

# La cascarilla cerámica como material escultórico

Lucido Petrillo



Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència **Reconeixement- NoComercial - SenseObraDerivada 3.0. Espanya de Creative Commons.**

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia **Reconocimiento - NoComercial – SinObraDerivada 3.0. España de Creative Commons.**

This doctoral thesis is licensed under the **Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0. Spain License.**

Estudio de doctorado  
del EESS, Programa de  
Doctorado:  
“La realitat Assetjada:  
Posicionaments  
Creatius”  
Línea de investigación:  
“Art, natura i entorn”



Grup de Recerca BRAC:  
“Barcelona, Recerca, Art  
i Creació, 2009 SGR 1,  
de l’Agència de gestió  
d’Ajuts Universitaris de  
Recerca de la  
Generalitat de Catalunya



Beca Predoctoral de  
formació de personal  
investigador FI de la  
Generalitat de Catalunya



Agència  
de Gestió d'Ajuts  
Universitaris  
i de Recerca

Facultad de Bellas Artes, Universidad de Barcelona



## La cascarilla cerámica como material escultórico

Tesis doctoral presentada por

**Lucido Petrillo**

Dirigida por los doctores

**Miquel Àngel Planas Rosselló y Joan Antoni Valle Martí**

Barcelona, 2012

# II. ESTUDIO DE DIFERENTES TIPOS DE CASCARILLA CERÁMICA PARA SER APLICADA COMO MATERIAL ESCULTÓRICO

## ÍNDICE

<b>II.0. Estudio de diferentes tipos de cascarilla cerámica para ser aplicada como material escultórico</b>	67
<b>II.1. Materiales utilizados en este estudio</b>	69
II.1.1. Los aglutinantes empleados en la investigación	69
II.1.1.1. Sílice coloidal PW 50	69
II.1.1.2. Sílice coloidal Hispasil 1731	70
II.1.1.3. Silicato de sodio Carsil 9	70
II.1.1.4. Diferencias y aspectos comunes entre los tres productos	71
II.1.2. Los refractarios empleados en la investigación	72
II.1.3. Las fibras de vidrio empleadas en la investigación	73
<b>II.2. Pruebas de aplicación de la papilla</b>	75
II.2.1. Pruebas de preparación y composición de la papilla	75
II.2.1.1. Estudio de los porcentajes de aglutinante y de refractario	76
II.2.1.2. Densidad de cada tipo de papilla	81
<b>II.3. Procedimiento de rebozado con grano y fibra aplicado a las pruebas de este capítulo</b>	85
II.3.1. Rebozado con grano	85
II.3.2. Rebozado con fibra	86
<b>II.4. Pruebas de espesor y peso de las capas de cascarilla cerámica</b>	87
II.4.1. Resultados sobre el peso, el espesor y la calidad del recubrimiento de la primera capa de papilla (capa de contacto)	87
II.4.2. Resultados sobre el primer rebozado con grano o con fibra	89
II.4.2.1. Resultados de las medidas del peso de los rebozados con grano de Moloquita 50-80 o con fibra de vidrio 6 mm sobre la primera capa de papilla.	89
II.4.3. Resultados de las medidas de espesor que forman el refractario y la fibra de vidrio en la primera capa	90
II.4.4. Resultados: peso y espesor de la segunda capa de papilla (capa de regruessado)	91
II.4.4.1. Resultados de las medidas del peso de la papilla sobre los rebozados de grano de Moloquita 50-80dd o de fibra de vidrio 6 mm	91
II.4.4.2. Resultados de las medidas de espesor de la segunda capa de papilla	92
II.4.5. Valores de crecimiento del espesor de la cascarilla cerámica	92
<b>II.5. Procedimiento de secado aplicado para las pruebas de este capítulo</b>	95
<b>II.6. Cocción de la cascarilla cerámica</b>	99
<b>II.7. Pruebas de resistencia realizadas en la “Foneria” y en el laboratorio del</b>	101
<b>CAPÍTULO II: Estudio de diferentes tipos de cascarilla cerámica para ser aplicada como material escultórico</b>	63

<b>departamento de Ciència dels materials i Enginyeria Metal·lúrgica</b>	
II.7.1. Pruebas de resistencia desarrolladas en la “Foneria”	102
II.7.1.1 Desarrollo de las pruebas de la “Foneria”	105
II.7.1.1.1. Elaboración de los cilindros de cera	106
II.7.1.1.2. Prueba experimental sobre los sistemas de aplicación de la papilla	107
II.7.1.2. Pruebas de resistencia de la “Foneria”: primer ensayo experimental a 750°C con PW 50, Hispasil 1731 y Carsil 9	108
II.7.1.3. Pruebas de resistencia de la “Foneria”: segundo ensayo de resistencia con PW 50 e Hispasil 1731	110
II.7.1.3.1. Valoraciones y conclusiones con respecto a la resistencia considerando los grupos de porcentajes	113
II.7.1.3.2. Valoraciones y conclusiones con respecto a la resistencia considerando la participación de sílice en la papilla	114
II.7.1.3.3. Valoraciones y conclusiones con respecto a la resistencia considerando la temperatura de cocción	115
II.7.1.3.4. Valoraciones y conclusiones con respecto a la resistencia considerando la relación entre grosores de pared y resistencias de las probetas	119
II.7.1.4. Ensayo de resistencia de la cascarilla cerámica a 100 °C	121
II.7.1.5. Valoraciones y conclusiones finales de las pruebas de resistencia realizadas en la “Foneria” con respecto al estudio comparativo entre PW 50 y Hispasil 1731	123
II.7.2. Pruebas de resistencia realizadas con una máquina universal de ensayos	125
II.7.2.1. Comportamiento de las capas de la cascarilla cerámica durante el proceso de rotura en las pruebas de resistencia	127
II.7.2.2. Resultados de las pruebas de resistencia realizadas con una máquina universal de ensayos	130
II.7.2.2.1. Resultados del grupo de pruebas (m1-3)	130
II.7.2.2.2. Resultados del grupo de pruebas (m1-4)	132
II.7.2.2.3. Resultados del grupo de pruebas (m1-5)	133
II.7.2.2.4. Resultados del grupo de pruebas (m1-5F)	235
II.7.2.2.5. Resultados del grupo de pruebas (m2-3) con porcentajes 40-60	136
II.7.2.2.6. Resultados del grupo de pruebas (m2-4)	138
II.7.2.2.7. Resultados del grupo de pruebas (m2-5)	139
II.7.2.3. Valoraciones y conclusiones a partir del estudio comparativo de los resultados de todas las pruebas realizadas con la máquina de ensayos universal	141
II.7.2.4. Valoraciones y conclusiones realizadas contrastando la información obtenida en las pruebas de la “Foneria” con las pruebas del laboratorio de Ciència dels materials i Enginyeria Metal·lúrgica	143
II.7.3. Prueba de resistencia por compresión lateral (probetas realizadas con PW 50)	145
<b>II.8. Prueba de porosidad y de capacidad de absorción</b>	147
<b>II.9. Ensayo de resistencia de la cascarilla cerámica hecha sólo con papilla</b>	151
<b>II.10. Imágenes de microscopia de las secciones de la cascarilla cerámica</b>	153
II.10.1. Imágenes obtenidas con el microscopio electrónico de barrido	153
II.10.1.1. Resultados m1-5 capas 1200°C	155
II.10.1.2. Resultados m1-4 capas 1200°C	159
II.10.1.3. Resultados m1-5 capas 1300°C	162
II.10.1.4. Resultados m1-5 capas 750°C	167
II.10.1.5. Resultados m1-5 capas a 1200°C con fibra de vidrio	172
II.10.1.6. Resultados del m2-5, cocción a 1200°C	177
II.10.2. Imágenes de la capa de contacto de la cascarilla cerámica, obtenidas por microscopia óptica	180

II.10.3. Valoraciones y conclusiones finales sobre las imágenes de microscopio	182
<b>II.11. Pruebas de estabilidad dimensional de la cascarilla</b>	187
<b>II.12. Conclusiones del segundo capítulo</b>	189



## II.0. ESTUDIO DE DIFERENTES TIPOS DE CASCARILLA CERÁMICA PARA SER APLICADA COMO MATERIAL ESCULTÓRICO

La investigación realizada en este capítulo parte de los conocimientos previos sobre el uso de la cascarilla cerámica, especialmente en fundición. Su función, en este caso, es el de recurso técnico intermedio; como molde para metal fundido. Sin embargo en esta investigación, el interés se ha centrado en la obtención de un material escultórico, estable y resistente; que en la mayoría de los casos pueda tener también la apariencia de una estructura rígida, liviana y duradera.

El objetivo principal del segundo capítulo se centra en establecer determinados parámetros de uso de la cascarilla cerámica, teniendo presente su aplicación como material escultórico y considerando, en este capítulo, la resistencia y la estabilidad de los distintos tipos de cascarilla cerámica. Además, se ha pretendido poner de relieve determinadas características físicas y mecánicas de ésta. Y también se ha experimentado de manera que ello permita conocer las propiedades del material escogido.

Para ello se ha realizado un recorrido basado en pruebas que permiten establecer, en cada etapa, las bases de las siguientes pruebas. Los apartados de este capítulo están determinados por esta sucesión de ensayos. Este capítulo se corresponde con el apartado metodológico de estudio analítico.

En este segundo capítulo, en primer lugar se han expuesto los materiales que intervienen en estas pruebas a la hora de elaborar la cascarilla cerámica: diferentes tipos de sílice coloidal, un silicato de sodio, diferentes presentaciones comerciales de un producto llamado Moloquita y un tipo de fibra de vidrio.

En segundo lugar, se han expuesto los aspectos relacionados con la elaboración de la cascarilla cerámica: las pruebas y las pautas de preparación y composición de los distintos tipos de papillas, sus densidades y la aplicación de los rebozados, observando pesos, espesores y calidad de los recubrimientos.

En tercer lugar, se han expuesto los procedimientos de consolidación de la cascarilla cerámica: secado y cocción aplicados en las pruebas siguientes.

En cuarto lugar, se ha valorado la resistencia mecánica y el comportamiento estructural de las variantes de cascarilla cerámica experimentadas, siendo este apartado un valor fundamental en este capítulo.

Vinculado a la resistencia, se han realizado una serie de pruebas complementarias sobre la porosidad de los materiales ensayados.

En un apartado posterior, y persiguiendo una comprensión del comportamiento mecánico y estructural de este material se ha querido obtener una visión microscópica de algunos de los recubrimientos de cascarilla cerámica utilizados.

Finalmente se ha estudiado el comportamiento de la cascarilla cerámica con respecto a la estabilidad dimensional.

Al final de este recorrido se han incluido las conclusiones pertinentes.

Para la realización de las pruebas se han utilizado dos infraestructuras de la Universidad de Barcelona. Las pruebas se han desarrollado principalmente en la "Fonería" (taller de fundición de la Facultad de Bellas Artes), aunque también se ha recurrido a la colaboración de los laboratorios del departamento de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica de la facultad de Química.

Todos estos estudios aportan información relevante sobre el comportamiento, los parámetros y las metodologías de trabajo de la cascarilla cerámica para su uso como material escultórico, si bien es cierto, algunos resultados pueden ser útiles en su aplicación para moldes de fundición.



## II.1. MATERIALES UTILIZADOS EN ESTE ESTUDIO

Los recubrimientos sobre los que se ha experimentado en este capítulo y sobre los que se han efectuado las distintas pruebas son materiales habitualmente utilizados en el taller de fundición de la Facultad de BBAA de la UB, la "Fonería", para su aplicación en el procedimiento de cascarilla cerámica. Estos materiales se clasifican según su función en dos categorías: los aglutinantes ó ligantes, y los áridos. Entre los primeros se dispone de dos tipos de sílice coloidal, dos productos industriales comercializados por empresas distintas y de un tercer producto de silicato de sodio, mientras que entre los segundos se utiliza un árido refractario, presente en el taller en dos tipos de granulometrías y una presentación comercial concreta de fibra de vidrio.

### II.1.1 LOS AGLUTINANTES EMPLEADOS EN LA INVESTIGACIÓN

Para esta investigación se eligieron tres aglutinantes distintos (tabla II.1), basados en la sílice, éstos tienen un uso común en los entornos de fundición. Los aglutinantes escogidos poseen distintas características físicas y mecánicas que los hacen especialmente útiles en los procedimientos de fundición, muchas de las cuales se especifican en la documentación técnica del material. Las cualidades de estos aglutinantes se han puesto de relieve en las distintas etapas de la investigación. Para mayor información sobre estos productos se puede consultar el ap. I.3., p. 43 del primer capítulo

Productos seleccionados como aglutinantes	
Producto industrial	Empresa distribuidora
Sílice coloidal PW 50.	Comercial Química Massó. Almacén: Vilafranca del Penedès, Barcelona, España.
Sílice coloidal Hispasil 1731.	P.I. PROSIDER IBÉRICA, S. A.Pol. Ind. Villayuda Burgos, España.
Silicato de sodio Carsil 9.	SMC-Foseco Productos, Fundición, S.A. Igorre, Vizcaya, España.

Tabla II.1 Productos seleccionados como aglutinantes.

#### II.1.1.1. SÍLICE COLOIDAL PW 50

Éste es un producto industrial, distribuido por la empresa Comercial Química Massó, con sede en Vilafranca del Penedès, Barcelona.

El PW 50 tiene un color blanquecino, es inodoro y no es inflamable, tiene una densidad de 1,39 g/cm<sup>3</sup>, El medio dispersante es el agua y la sílice se encuentra en una concentración del 50%. El grosor de las partículas de dióxido de silicio es de 50 nm<sup>79</sup>. Su densidad es de 1,3 g/cm<sup>3</sup>. Según su hoja técnica<sup>80</sup>, este producto no necesita agentes gelificantes para fraguar.

Utilización: En fundición y para esta investigación es utilizado como aglutinante a la hora de preparar la papilla de la cascarilla cerámica.

<sup>79</sup> El nanómetro es la unidad de longitud que equivale a una milmillonésima parte de un metro, 1 nanómetro = 10<sup>-9</sup> metros

<sup>80</sup> Nota técnica proporcionada por el distribuidor Comercial Química Massó S.A, producto PW 50, Junio, 2007.

### Riesgos y medidas de prevención

Riesgos: En cuanto a su toxicidad, la ficha técnica del producto dice que en el dióxido de silicio, preparado químicamente “No fueron encontrados efectos negativos en experimentos de toxicidad oral crónica, carcinogenia, teratogenia y fertilidad. No se encontraron cambios irreversibles o síntomas de silicosis en lo experimentos de toxicidad crónica por inhalación. Según nuestra experiencia y las informaciones que tenemos al respecto, el producto no produce ningún efecto perjudicial para la salud cuando se maneja adecuadamente y se emplea con los fines especificados”.

Medidas de prevención: Se recomienda “el uso de guantes y ropa de manga larga, gafas protectoras y protección facial”<sup>81</sup>.

#### II.1.1.2. SÍLICE COLOIDAL HISPASIL 1731

Es un producto distribuido por la empresa P.I. Prosider Ibérica, S. A. con sede en el polígono industrial Villayuda, en BURGOS.

El Hispasil 1731 tiene un aspecto blanquecido, es ligeramente turbio e inodoro. El medio dispersante es el agua y la sílice se encuentra en una concentración del 30%, inferior a la del PW 50. El tamaño de las partículas de sílice es de 7 nm (bastante más finas que las del PW 50). Tiene muy bajo coeficiente de dilatación térmica. Su densidad es de 1,15-1,25 g/cm<sup>3</sup>. No necesita de agentes gelificantes para fraguar.

Utilización: En fundición y para esta investigación es utilizado como aglutinante a la hora de preparar la papilla de la cascarilla cerámica.

### Riesgos y medidas de prevención

Riesgos: El manejo del Hispasil no requiere de precauciones especiales<sup>82</sup>, no obstante, en la preparación de los baños y debido a la utilización de áridos refractarios de grano fino, se han de tomar las correspondientes medidas de captación de polvo y de ventilación. No es un material tóxico ni inflamable.

Medidas de prevención: Se recomienda el uso de guantes y ropa de manga larga, gafas protectoras y protección facial.

#### II.1.1.3. SILICATO DE SODIO CARSIL 9

Es un producto distribuido por la empresa SMC-Foseco Productos, Fundación, S.A. con sede en Igorre, Vizcaya.

Silicato de sodio es el nombre genérico dado a una serie de compuestos derivados del vidrio soluble de silicato de sodio. Son soluciones acuosas de óxido de sodio (Na<sub>2</sub>O) y dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), combinados en diferentes proporciones (SiO<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>O). Variando las relaciones molares de SiO<sub>2</sub> y Na<sub>2</sub>O se obtienen soluciones con múltiples aplicaciones.

Cuando una disolución de silicato de sodio se añade lentamente a un exceso de ácido clorhídrico diluido, se forma una disolución coloidal de óxido de silicio (IV) hidratado:  $\text{SiO}_3^{2-} + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

Se produce así una disolución clara, que puede ser dializada para eliminar gran parte del electrolito. Un exceso de iones silicato provoca la coagulación. Con el tiempo, se forma una gelatina rígida o gel. Si se calienta con cuidado ese gel, se elimina la mayor parte del agua y se obtiene un sólido que absorbe bien el agua<sup>83</sup>.

---

<sup>81</sup> Ibidem

<sup>82</sup> Nota técnica proporcionada por el distribuidor P.I. Prosider Ibérica, S.A, producto Hispasil 1731 (Enero 2001).

<sup>83</sup> Basso, A.S. y Conci, F. S. (2007). *Producción conjunta de silicato de sodio y derivados*. Córdoba. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. (p.3) (Recuperado Enero del 2009) <http://www.edutecne.utn.edu.ar/PPI-CAI/ppi2006.pdf>

Este producto, utilizado en fundición para el moldeo con arena, necesita de gas carbónico (dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>) para reaccionar y endurecerse; sin su uso se puede tardar un tiempo muy prolongado, de hasta una semana, para que fragüe superficialmente. Tiene una concentración del 44-47% y su densidad es de 1,51-1,54 g/cm<sup>3</sup>. Es una sustancia viscosa, de color ligeramente grisácea.

Utilización: En fundición es utilizado como aglomerante para moldes de fundición a la arena, también hay precedentes de su uso como aglutinante para la cascarilla cerámica. Para esta investigación se ha utilizado como aglutinante a la hora de preparar la papilla de la cascarilla cerámica.

#### Riesgos y medidas de prevención

Riesgos: Es un producto contaminante y necesita un tratador autorizado de residuos para su eliminación (suele tener un pH muy alto). Reacciona exotérmicamente con ácidos fuertes y según sus especificaciones<sup>84</sup>, se debe evitar el contacto con aluminio, estaño, zinc, hierro y sus aleaciones, ya que podría liberarse hidrógeno con el consecuente peligro de explosión.

En su vertido en aguas naturales el anión silicato, aunque no se le atribuyen efectos nocivos, puede aumentar el pH de las aguas por su alcalinidad, generando una eventual toxicidad para los organismos acuáticos. Por otro lado, los silicatos solubles en contacto con aguas naturales pueden reaccionar con los cationes de calcio, magnesio, hierro y aluminio dando lugar a insolubles constituyentes de los suelos naturales. Medidas de prevención: Es recomendable el uso de guantes y ropa de manga larga, gafas protectoras y protección facial.

#### II.1.1.4. DIFERENCIAS Y ASPECTOS COMUNES ENTRE LOS TRES PRODUCTOS

Estos tres productos tienen distintas características físicas y mecánicas (tabla II.2), y distinta reacción a la unión con el refractario<sup>85</sup>.

Productos	PW 50	Hispsil 1731	Carsil 9
Densidad	1,39 g/cm. <sup>3</sup>	1,15-1,25 g/cm. <sup>3</sup>	1,53 g/cm. <sup>3</sup>
Concentración	50%	30%	47%
Tamaño de partícula	50 nm	7 nm	No se dispone del dato técnico <sup>86</sup> .
Viscosidad a 25 °C	Max 20 mPa·s	~ 30 mPa·s	950 mPa·s

Tabla II.2. Densidad, concentración y gruesos de partícula de los aglutinantes utilizados.

Estos productos se diferencian entre ellos destacando distintos aspectos:

- Todos están compuestos de dióxido de sílice (SiO<sub>2</sub>); unas veces disperso e insoluble en agua (Hispsil y PW 50), y otra formando solución (Carsil 9). La cantidad de partículas de sílice (dióxido de silicio) en el dispersante (agua) varía: el PW 50 tiene un 50% de sílice, el Hispsil 1731 un 30%. El porcentaje de sílice presente en el Carsil 9 es de un 47%.

<sup>84</sup> Nota técnica proporcionada por el distribuidor SMC-Foseco, producto Carsil (9 Junio, 1994).

<sup>85</sup> Como se verá en los apartados siguientes, como refractario de la papilla se usa Moloquita molturada: Moloquita -200.

<sup>86</sup> En la ficha técnica no se ofrece el dato técnico sobre el grueso de partícula, pero en otro documento Andy Fabian, y otros, se comenta que el producto se caracteriza por su módulo, es decir, la proporción entre sus componentes sólidos (SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O), que suele estar entre 1 y 4.1. (Quintero Castillo A.F., Albarracín, A y Fernando, D. (2001) Proceso de moldeo en arena con silicato de sodio y endurecido con CO<sub>2</sub>. Universidad Industrial de Santander Escuela de Ingenierías metalúrgica y ciencia de materiales, Facultad de Ingeniería Físico-Químicas. <http://es.scribd.com/doc/59164684/Silicato-de-sodio>, consulta realizada en marzo 2012).

- La densidad depende de la concentración de sílice: el Carsil 9 tiene una densidad de 1,53 g/cm<sup>3</sup>, mayor respecto al PW 50, de 1,39 g/cm<sup>3</sup>, y al Hispasil 1731, de 1,15-1,25 g/cm<sup>3</sup>.
- El Hispasil 1731 tiene partículas de dióxido de silicio más finas (7 nm frente a 50 nm del PW 50)
- El Carsil 9 tiene mayor viscosidad que el PW 50 y el Hispasil 1731.
- En su estado natural tanto el PW 50 como el Hispasil 1731 gelifican por evaporación del agua.
- El proceso de gelificación del Carsil 9 se demora más de un día, sin la aplicación directa de CO<sub>2</sub>.
- Aunque en común se puede destacar que:
  - Están compuestos de dióxido de sílice (SiO<sub>2</sub>), y contienen agua.
  - Gelifican, y además el proceso de gelificación es irreversible.

## II.1.2. LOS REFRACTARIOS EMPLEADOS EN LA INVESTIGACIÓN

Para la investigación desarrollada en este capítulo se ha empleado Moloquita como árido refractario, tanto para la realización de la papilla cerámica como para el rebozado con grano. La razón inicial de esta elección es la accesibilidad que se tiene a este material; se emplea en la "Fonería" de BBAA-UB, es relativamente económico y tiene un color blanquecino neutro.

En el capítulo anterior, ap. I.3.2.1.3.2., p.49; se ha hablado sobre la Moloquita y se remite al lector a este apartado para ampliar información.

No obstante, se destacan a continuación algunas características de la Moloquita<sup>87</sup> que han favorecido su uso en la presente investigación:

- No contiene sílice cristalina, por lo que resiste a los choques térmicos y carece de los efectos nocivos para la salud, que la presencia de sílice cristalina conllevaría.
- Tiene un bajo nivel de contracción durante la cocción y baja expansión térmica.
- Estabilidad de la forma a alta temperatura.
- Es resistente a la abrasión.
- La textura de la partícula es rugosa, facilitando la formación de enlaces físico-químicos proporcionando excelentes propiedades ligantes.

En esta investigación se han empleado dos tipos de refractario (tabla II.3), partiendo de su disponibilidad en la "Fonería", donde se ha desarrollado este trabajo:

- La harina de Moloquita, o Moloquita -200, se utiliza para la realización de la papilla, mezclándola con la sílice coloidal. Su trituración muy fina, como ya se verá, da una papilla compacta y homogénea que reproduce fielmente el modelo en la primera capa.
- La Moloquita 50-80, grano, se utiliza en la operación de rebozado con grano. Su grano es mucho mayor que el de la moloquita y da volumen a la pieza con menor número de capas. La empresa distribuidora comercializa otros tipos de granos de Moloquita no utilizados en esta investigación. Se ha escogido este tipo de grano porque es el que se utiliza en la "Fonería".

---

<sup>87</sup> La p. Web de ECC International, fabricante de la Moloquita es: <http://www.imerys-molochite.com/molochite.htm>, consulta realizada en julio 2009.

<b>Árido refractario: Moloquita</b>	
Moloquita -200	0-0,075 mm
Moloquita 50-80	0,18-0,3 mm

Tabla II.3. Áridos refractarios empleados en la investigación.

### **II.1.3. LAS FIBRAS DE VIDRIO EMPLEADAS EN LA INVESTIGACIÓN**

Se ha utilizado la fibra de vidrio en determinados recubrimientos de cascarilla cerámica, concretamente en las operaciones de rebozado con fibra. Sobre la fibra de vidrio se ha hablado en el Cap. anterior, ap. I.4., p. 53; y se remite a este apartado para ampliar información.

Se han utilizado en los ensayos de esta investigación, en una presentación comercial concreta, hilos de fibra de vidrio cortados, a una longitud de 6 mm (a la que se refiere como fibra de vidrio cortada) y sobre su forma de uso es ampliada la información más adelante en el ap. II.3.2., p. 86.



## II.2. PRUEBAS DE APLICACIÓN DE LA PAPILLA

Cuando se realiza el recubrimiento de cascarilla cerámica, se pueden diferenciar dos tipos de operaciones; una primera de aplicación de la papilla y otra posterior, realizada sobre la primera, que recibe el nombre de rebozado.

La operación de aplicación de la papilla en estas pruebas consiste en recubrir el soporte de cera con un fluido al que, dada su consistencia y su color blanquecino, denominamos papilla. Esta papilla blanca se obtiene mezclando un aglutinante (los mencionados en los apartados anteriores) y un árido refractario, harina de Moloquita (Moloquita -200). La papilla puede presentar distintas modalidades en función del tipo de aglutinante utilizado y del porcentaje de cada uno de los componentes. Este apartado se centra en las pruebas relacionadas con la papilla.

La operación de rebozado consiste en aplicar grano de refractario o fibra de vidrio sobre una capa de papilla aplicada previamente, de manera que tanto los granos como las fibras se adhieran sobre la aplicación de la papilla blanda. En el apartado siguiente II.3., p. 85, se desarrollan las pruebas de rebozado.

Dado que existe un cierto número de variables a la hora de preparar las papillas, con las pruebas de este apartado se pretende:

- Establecer los posibles porcentajes de uso de cada uno de los productos industriales utilizados en la elaboración de las papillas.
- Conocer las densidades de los diferentes tipos de papillas experimentadas.
- Calcular los porcentajes de sílice presente en cada tipo de papilla.
- Observar el comportamiento de cada tipo de papilla cuando se aplica sobre el modelo.

Para desarrollar este apartado se han realizado pruebas de preparación de la papilla utilizando para ello los distintos componentes en porcentajes variables. También se han realizado pruebas de aplicación de las papillas obtenidas sobre un soporte de cera. Finalmente se han realizado las comprobaciones de las densidades de los distintos tipos de papilla.

### II. 2.1. PRUEBAS DE PREPARACIÓN Y COMPOSICIÓN DE LA PAPILLA

El producto blanquecino obtenido como resultado de la mezcla de un producto industrial de sílice coloidal con un producto refractario molturado, muy finamente, recibe el nombre de papilla. La combinación de estos productos permite obtener un fluido de consistencia parecida al yogur líquido, a una papilla o incluso a la cola blanca de carpintero. En este apartado se exponen los procesos de elaboración manual y las valoraciones resultantes de la experimentación de la mezcla de distintos porcentajes de materiales.

#### Objetivos

Los tipos de papilla varían según el porcentaje de producto de sílice coloidal y de Moloquita-200. En este apartado se ha estudiado en primer lugar el comportamiento de los componentes de los distintos tipos de papilla durante la preparación de la papilla.

En segundo lugar, y siendo la finalidad de los ensayos de este capítulo, se ha comprobado la capacidad de cada tipo de papilla para recubrir un soporte de manera uniforme y estable. Para este capítulo, se pretendió obtener un tipo de papilla que recubriera homogéneamente la superficie de un patrón, y a partir de ahí poder desarrollar el resto de pruebas.

#### Materiales utilizados

Para realizar esta experiencia se han empleado los tres aglutinantes mencionados en el ap. II.1.1., p. 69: PW 50, Hispasil 1731 y Carsil 9, mezclados con el refractario molturado Moloquita -200, sobre la que también se ha hablado en el ap. II.1.2., p. 72.

## Procedimientos

Mediante el pesado de las diferentes cantidades de los componentes de la papilla, realizado con una pequeña balanza electrónica, se establecen los valores de participación en la mezcla de cada uno de estos elementos.

Para la elaboración de la papilla, se virtió la cantidad pesada de aglutinante (uno de los tres escogidos) en un recipiente, a continuación se añadió la cantidad de harina de Moloquita -200, esta se fue mezclando y removiendo progresivamente hasta obtener la papilla deseada<sup>88</sup>.

Durante el procedimiento de realización se observó cómo reaccionaban los componentes de cada tipo de papilla, haciendo las valoraciones pertinentes respecto a su comportamiento durante el mezclado.

Para observar la capacidad de recubrimiento de las distintas papillas se recubrió una superficie de cera previamente recubierta con una fina capa de goma laca disuelta en alcohol. El test consistió en aplicar cada una de las papillas sobre una placa de cera, utilizando un pincel.

Para hacer las valoraciones se optó por los tipos de papilla cuya composición ofreciera, visual y palpablemente, una consistencia compacta y densa, aunque suficientemente fluida. Para todas ellas no dejó de considerarse su futuro empleo escultórico en las aplicaciones del Cáp. III, aunque en este capítulo se ha tratado de buscar un tipo de papilla fluido que recubriera correctamente.

### II.2.1.1. ESTUDIO DE LOS PORCENTAJES DE AGLUTINANTE Y DE REFRACTARIO

Los antecedentes establecidos para la fundición aportaron una referencia de uso en los porcentajes de preparación de las papillas.

#### Objetivo

Con estos antecedentes se optó por el siguiente objetivo: establecer los porcentajes de aglutinante y de refractario para cada tipo de papilla.

#### Procedimiento utilizado

Aglutinante	Árido refractario
30%	70%
35 %	65 %
40 %	60 %
45 %	55 %
50 %	50 %
55 %	45 %

Tabla II.4. Porcentajes de papilla propuestos para el estudio.

Estos porcentajes de la tabla II.4. son los propuestos para desarrollar el estudio de este apartado.

Al caracterizar los distintos porcentajes de aglutinante y refractario, se tuvieron presentes tanto las posibles aplicaciones de recubrimiento específicas para este capítulo, como las de aplicación en los capítulos siguientes teniendo en cuenta, también, el potencial modelado con estas pastas o papillas, el moldeado y reparación de aplicación en esta investigación, etc.

---

<sup>88</sup> En el procedimiento de cascarilla cerámica, con esta mezcla, papilla, se recubre el modelo durante la operación de aplicación de la papilla añadiendo a continuación grano o fibra durante el rebozado. Posteriormente durante el secado y la cocción posterior de la cascarilla cerámica, la sílice coloidal actúa como ligante del árido, la Moloquita -200, obteniéndose un material compacto y bastante resistente.

Para establecer estos porcentajes anteriormente se ensayaron distintas composiciones entre aglutinante y refractario, y se optó finalmente por los porcentajes mencionados. Los porcentajes de aglutinante y de árido refractario son expresados en esta investigación por pares en forma de:

Aglutinante	Árido refractario
X %	Y %

Siendo  $x + y = 100$

Por ejemplo: 30 % de sílice coloidal y 70 % de Moloquita -200

A lo largo de este texto se presenta este par de porcentajes de la siguiente manera: X/Y%. Utilizando el ejemplo anterior, los porcentajes se expresarán de esta manera: 30/70%.

### Resultados

Se han ensayado los tres aglutinantes (producto de sílice coloidal PW 50, producto de sílice coloidal Hispasil 1731 y producto de silicato de sodio Carsil 9) mezclándolos con porcentajes distintos de Moloquita -200. Las combinaciones realizadas son las descritas en la tabla anterior. También se han realizado los respectivos recubrimientos de las superficies de cera.

Cada uno de los tres aglutinantes ensayados presentó un comportamiento diferente al unirse con el refractario en forma de harina, dando lugar a distintas viscosidades y densidades.

### Resultados de la serie de PW 50



Figura II.1. Elaboración de las papillas con PW 50 y Moloquita -200. Porcentaje 30/70% (izquierda), porcentaje 35/65% (centro), porcentaje 40/60% (derecha). Porcentajes en peso.

En cuanto al proceso de preparación de la papilla (Fig. II.1), de PW 50 y árido refractario Moloquita -200, ésta debía ser removida en el recipiente antes de su aplicación. Al dejar reposar la papilla preparada, durante un cierto tiempo el refractario que compone la papilla se mantenía en suspensión, aunque si pasaba bastante tiempo acababa precipitando<sup>89</sup> en la base del recipiente y separándose del aglutinante que quedaba flotando, lo que implicó que al volver a aplicar la papilla sobre el soporte, dado que se debía recuperar su consistencia pastosa homogénea, se requirió un tiempo para homogeneizar de nuevo la mezcla.

PW 50	30 %	70 %	No viable. En la papilla hecha con aglutinante PW 50 con 30% de aglutinante y 70% de refractario, como se verifica que la mezcla tiene poca cantidad de aglutinante permite obtener un amasijo compacto, pero no aplicable con pincel.
PW 50	35 %	65 %	Viable

<sup>89</sup> Sobre el precipitado de la Moloquita -200, dentro de la papilla, se profundiza en el capítulo IV dedicado al tratamiento superficial de la cascarilla cerámica.

PW 50	40 %	60 %	Viable
PW 50	45 %	55 %	Viable
PW 50	50 %	50 %	No viable. La papilla con 50% de aglutinante y 50% de refractario es demasiado líquida y no se consigue obtener un grosor de papilla suficiente sobre la superficie del objeto.

Tabla II.5. Resultado de papilla realizado con el aglutinante PW 50.

Por lo tanto, observando la tabla II.5, de la serie de PW 50 sólo fueron viables los porcentajes: 35/65%, 40/60% y 45/55%.

#### Resultados de la serie de Hispasil 1731



Figura II.2. Elaboración de las papillas con Hispasil 1731 y Moloquita -200. Porcentaje 30/70% (izquierda), porcentaje 35/65% (centro), porcentaje 40/60% (derecha). Porcentajes en peso.

En cuanto al proceso de preparación de la papilla (Fig. II.2) de Hispasil 1731 (el refractario Moloquita -200), ésta debía ser removida en el recipiente antes de su aplicación. Al dejar reposar la papilla preparada, en pocos instantes el refractario que componía la papilla se separaba del aglutinante, precipitando rápidamente en la base del recipiente y separándose del aglutinante que quedaba flotando, lo que implicó que al volver a aplicar la papilla sobre el soporte, dado que se debía recuperar su consistencia pastosa homogénea, se requirió un tiempo para homogeneizar de nuevo la mezcla.

Hispasil 1731	30 %	70 %	No viable. En la papilla hecha con aglutinante Hispasil 1731, con 30% de aglutinante y 70% de refractario, se consigue una papilla densa (1940g/cm <sup>3</sup> ), Sin embargo al aplicarla con pincel no se adhiere sobre la superficie, llegándose a separar de la base del soporte al repasar con el pincel. Se consigue obtener un amasijo compacto.
Hispasil 1731	35 %	65 %	Viable
Hispasil 1731	40 %	60 %	Viable
Hispasil 1731	45 %	55 %	No viable
Hispasil 1731	50 %	50 %	No viable

Tabla II.6. Resultado de papilla realizado con el aglutinante Hispasil 1731.

Por lo tanto, observando la tabla II.6, de la serie de Hispasil 1731 sólo fueron viables los porcentajes: 35/65% y 40/60%.

### Resultados de la serie de Carsil 9



Figura II.3. Elaboración de las papillas con Carsil 9 y Moloquita -200. Porcentaje 50/50% (izquierda), porcentaje 45/55% (centro), porcentaje 40/60% (derecha). Porcentajes en peso.

En cuanto al proceso de preparación de la papilla (Fig. II.3), de Carsil 9 y árido refractario Moloquita -200, ésta debió ser removida en el recipiente antes de su aplicación. Al dejar reposar la papilla preparada, durante un cierto tiempo el refractario que componía la papilla se mantuvo en suspensión y no precipitó.

Carsil 9	30 %	70 %	No viable
Carsil 9	35 %	65 %	No viable
Carsil 9	40 %	60 %	No viable. Se consigue obtener un amasijo compacto, difícil de aplicar con pincel.
Carsil 9	45 %	55 %	No viable. Al aumentar la proporción de Moloquita al 55% se obtiene una papilla demasiado pastosa de difícil aplicación.
Carsil 9	50 %	50 %	Viable. Con el Carsil 9 la única mezcla obtenida manualmente para la aplicación es la composición de 50% de aglutinante y 50% de refractario, con una densidad de 2027g/cm <sup>3</sup> .
Carsil 9	55 %	45 %	Viable aunque se desestima. Si se aumenta al 55% de Carsil 9 y se disminuye el refractario al 45%, la papilla resultante es fluida. Se desestima esta mezcla, no se utilizará en los ensayos siguientes. Durante el secado este tipo de composición aplicado sobre al patrón se arruga todavía más que la composición 50/50%, como se puede ver en la Fig. II.9 del ap. II.4.1., p. 87. Pruebas de espesor y peso de las capas de cascarilla cerámica. No se utiliza dióxido de carbono.

Tabla II.7. Resultado de papilla realizado con el aglutinante Carsil 9.

Por lo tanto, observando la tabla II.7, de la serie de Carsil 9 solo fue viable el porcentaje 50/50.

## Valoraciones sobre la viabilidad de las composiciones de las papillas.

### Papilla con PW 50



30/70% 35/65% 40/60%

### Papilla con Hispasil 1731



30/70% 35/65% 40/60%

### Papilla con Carsil 9



40/60% 50/50% 55/45%

Figura II.4. Elaboración de las papillas de PW 50, Hispasil 1731 y Carsil 9 combinadas en distintas composiciones con Moloquita -200. Porcentajes en peso.

Las papillas de PW 50 y las de Hispasil 1731 precipitaron al dejarlas reposar, aunque existió una diferencia notable de tiempo, precipitando en primer lugar la de Hispasil 1731 y en segundo lugar la de PW 50. La de Carsil 9 no precipitó.

Se comprobó que para mezclar una papilla estable, compacta y fluida, se tenía que aplicar una proporción inferior de sílice coloidal a la de harina de Moloquita. Con una proporción mayor de refractario se daba un mayor rozamiento entre las partículas y la papilla era demasiado compacta. Por el contrario, demasiado aglutinante separaba las partículas de Moloquita, de manera que, tras la gelificación de la estructura, ésta no resultaba lo suficientemente compacta y estable.

El caso del PW 50, al tener una densidad intermedia (tabla II.2), admitió más posibilidades de mezcla antes de que resultara una papilla demasiado consistente o demasiado diluida para su aplicación. Con el PW 50 se han visto como viables tres opciones.

Al considerar el porcentaje de 45% de aglutinante y 55% de refractario, esta mezcla resultó viable sólo con la papilla de PW 50, pues con Hispasil 1731 quedaba demasiado líquida y no creaba un espesor mínimamente aceptable sobre el soporte. Lo mismo sucedió al aplicar un porcentaje 50/50%, ya que la mezcla de Hispasil 1731 aún era más líquida. Con el Hispasil 1731 se han visto como viables sólo dos opciones.

### Valoraciones sobre la aplicación de las papillas

Durante las pruebas de aplicación de la papilla se han establecido los porcentajes adecuados para realizar la papilla idónea para las pruebas de este capítulo, y se han previsto posibles usos para los capítulos posteriores.

Se ha observado que una papilla demasiado líquida no recubre bien el patrón de cera, este recubrimiento no es estable, lo que provoca goteos o deslizamientos hacia las concavidades, dejando sin recubrimiento las protuberancias. El resultado final es desequilibrado, es decir, no se obtiene una aplicación de la papilla de grosor uniforme.

Por otro lado, también se constata que la papilla demasiado densa y compacta pierde adherencia en la superficie, produce grosores irregulares de la aplicación de la papilla, debido a la dificultad de aplicación de esta papilla densa o pastosa.

Además, por esta misma razón, incorpora cavidades y burbujas de aire. Después de las experiencias realizadas se puede concluir que la consistencia adecuada de la papilla ha de ser suficientemente densa y compacta, aunque ésta ha de tener la fluidez suficiente para su aplicación. Dependiendo de los componentes, estas características se observan en distintos porcentajes de componentes.

Como conclusión se exponen en la tabla siguiente (tabla II.8) los porcentajes de las papillas viables que cumplen estos requisitos.

Producto	Aglutinante	Árido refractario
<b>PW 50 o Hispasil 1731</b>	35 %	65 %
<b>PW 50 o Hispasil 1731</b>	40 %	60 %
<b>PW 50</b>	45 %	55 %
<b>Carsil 9</b>	50 %	50 %

Los porcentajes (%) de participación de los productos que componen cada tipo de papilla se establecen en peso.  
 \*Los aglutinantes<sup>90</sup> son los productos PW 50, Hispasil 1731 y Carsil 9 y el refractario<sup>91</sup> el producto Moloquita -200.

Tabla II.8. Tablas de tipos de papilla viables.

## II. 2.1.2. DENSIDAD DE CADA TIPO DE PAPILLA

Como se ha venido observando la densidad de las papillas es uno de los parámetros considerados en la descripción de las mismas, un medida de estos valores puede aportar una mayor fiabilidad en las pruebas que se hayan a realizar.

### Objetivos

La finalidad de este ensayo es conocer la densidad de cada tipo de papilla establecida en la tabla anterior (tabla II.8.). Interesa considerar el valor de la densidad de cada papilla, ésta se

<sup>90</sup> Los aglutinantes en la papilla se convertirán en ligantes durante el secado y la cocción. El término ligante, utilizado, se refiere a la capacidad de unir de estos productos, el PW 50, el Hispasil 1731 y Carsil 9, que contienen sílice; se les clasifica como ligantes de base acuosa.

<sup>91</sup> El término árido refractario se utiliza en este caso para hacer referencia al producto Moloquita -200, de aspecto harinoso, habitualmente utilizado en la cerámica y en fundiciones.

midió con un densímetro<sup>92</sup>; el conocimiento de este dato dió una mayor fiabilidad a la hora de reproducir algún tipo de papilla.

### Materiales utilizados

Para realizar estas pruebas se emplearon en la realización de la papilla los tres aglutinantes mencionados: PW 50, Hispasil 1731 y Carsil 9, mezclados con el refractario molturado Moloquita -200. De estos materiales se conoce su densidad, ver tabla II.9.

Productos	Densidad g/cm <sup>3</sup>
Moloquita	2.700
Carsil 9	1.530
PW 50	1.390
Hispasil 1731	1.150-1.250
Agua	1000

Tabla II.9. Densidad de los productos empleados.

### Procedimientos aplicados

Se midieron las densidades de las papillas (Fig. II.5) cuyos porcentajes se establecen en la tabla del ap. anterior (tabla II.9).

El procedimiento consistió en verter cada tipo de papilla en una probeta y se sumergió el densímetro en ella. Cuando el densímetro se estableció en la papilla se tomó su valor de acuerdo a la escala de nivel que esta en el densímetro.

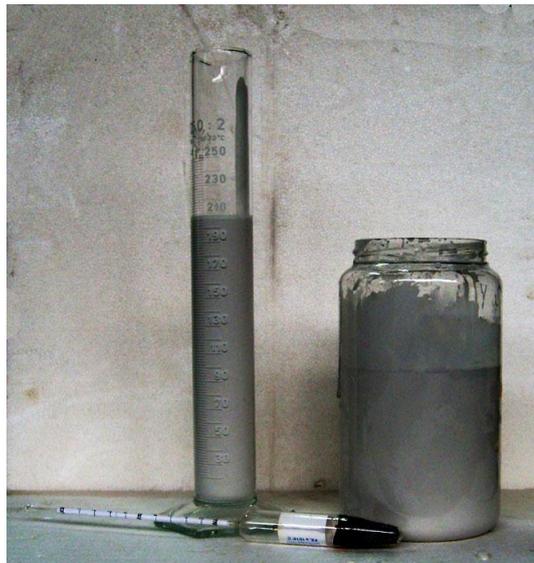


Figura II.5. Densímetro pesado.

### Resultados

Componentes de la papilla Productos industriales	Aglutinante/refractario % Productos industriales	Densidad g/cm <sup>3</sup>
PW 50 + Moloquita -200	35/65	2.010
	40/60	1.940

<sup>92</sup> El densímetro se utiliza para determinar la densidad relativa de los líquidos sin la necesidad de calcular antes su masa y volumen.

	45/55	1.860
<b>Hispasil 1731 + Moloquita -200</b>	35/65	1.860
	40/60	1.780
	45/55	1.700
<b>Carsil 9 + Moloquita -200</b>	50/50	2.027

Tabla II.10. Tabla de densidades de los distintos tipos de papilla testados ordenadas en función de los porcentajes de los productos.

<b>Componentes de la papilla Productos industriales</b>	<b>Aglutinante / refractario % Productos industriales</b>	<b>Densidad g/cm<sup>3</sup></b>
<b>Carsil 9 + Moloquita -200</b>	50/50	2027
<b>PW 50 + Moloquita -200</b>	35/65	2.010
	40/60	1.940
	45/55	1860
<b>Hispasil 1731 + Moloquita -200</b>	35/65	1860
	40/60	1780
	45/55	1700

Tabla II.11. Tabla de densidades de los distintos tipos de papilla testados ordenadas en función de los valores de densidad obtenidos.

Considerando el porcentaje de partículas de sílice, de agua y de Moloquita presente en los distintos tipos de papilla se presenta una variante de la tabla anterior ordenando de forma decreciente los porcentajes de sílice (tabla II.12.).

<b>Componentes de la papilla Producto industriales</b>	<b>Aglutinante / Refractario % Productos industriales</b>	<b>Moloquita -200 % presente en la papilla</b>	<b>H2O % presente en la papilla</b>	<b>Partículas de sílice % presente en la papilla</b>	<b>Densidad g/cm<sup>3</sup></b>
<b>Carsil 9 + Moloquita -200</b>	50/50	50	26'50	23'50	2027
<b>PW 50 + Moloquita -200</b>	45/55	55	22'50	22'50	1860
	40/60	60	20'00	20'00	1.940
	35/65	65	17'50	17'50	2.010
<b>Hispasil 1731 + Moloquita -200</b>	45/55	55	31'25	13'75	1700
	40/60	60	27'80	12'20	1780
	35/65	65	24'50	10'50	1860

Tabla II.12. Tabla de densidades de los distintos tipos de papilla testados ordenadas en función de los valores de sílice presentes en la papilla.

### Valoraciones y conclusiones

Las densidades mayores correspondieron a las papillas resueltas con Carsil 9 en primer lugar, y con PW 50 en segundo, siendo las menos densas las del grupo Hispasil 1731, salvo una excepción que se comenta (tabla. II.10).

La papilla resuelta con Carsil 9 en proporción 50/50% tiene una densidad superior a la de los demás aglutinantes, debido a las características físicas de este producto. Esta mayor densidad

es consecuencia tanto de la mayor densidad del Carsil 9 como de la abundancia de Moloquita en la papilla.

La excepción referida es la siguiente. La densidad de la papilla 45/55% resuelta con PW 50 es la misma que la densidad de la papilla 35/65% realizada con Hispasil 1731. Aunque es necesario destacar que el porcentaje de partículas de sílice contenida en cada mezcla es distinta, más del doble en la papilla de PW 50. Esta coincidencia de densidades parece circunstancial, y se adelanta que no implica ninguna similitud de contenidos, ni como se verá más adelante, de resultados.

En la papilla hecha con aglutinante PW 50 en proporción 40/60% se obtiene una densidad de 1940 g/cm<sup>3</sup>. Para obtener una densidad similar, en una papilla resuelta con Hispasil 1731 se debería preparar una papilla 30/70%, que en el apartado anterior se clasificó como no viable debido a su falta de adherencia sobre la superficie aplicada con pincel.

Observando la tabla II.11, se puede ver que la mayor presencia en porcentaje de partículas de sílice no siempre aporta la mayor densidad de la papilla. La mayor densidad de las papillas depende en primer lugar del porcentaje de Moloquita, siendo éste el material más denso, y a continuación del porcentaje de sílice que es el segundo más denso. En el caso del Carsil 9 la mayor presencia de sílice en la papilla coincide con la mayor densidad de todas, pero esto no pasa en el resto de papillas.

En cada grupo de papillas de un determinado aglutinante, a mayor participación de la harina de Moloquita, mayor densidad de la papilla. Pero comparando entre los grupos las densidades varían en función de los porcentajes de constituyentes.

En el caso del Carsil 9 con una composición 50/50%, la presencia de partículas de sílice es del 23,5%, la de agua del 26,5% (se suministra al 47%) y el restante 50% de Moloquita -200. Su densidad es la mayor de todas 2027 g/cm<sup>3</sup>. En el caso de la papilla de Carsil 9, 50/50%, la proporción de partículas de sílice es del 23,5%, superior a los otros dos casos.

En el caso de la papilla con PW 50, con una composición al 45/55%, la presencia de partículas de sílice en la mezcla es de 22,5%, siendo la de agua el mismo porcentaje 22,5 (el PW 50 se suministra al 50%) y el 55% restante de Moloquita -200; la densidad obtenida es de 1860 g/cm<sup>3</sup>, la inferior del grupo de papillas de PW 50.

En el Hispasil 1731 con una composición al 35/65%, la presencia de partículas de sílice en la mezcla será de 10,5%, la de agua 24,5% (el Hispasil se suministra al 30%) y el 65% restante de Moloquita -200. La densidad obtenida es de 1860 g/cm<sup>3</sup>, coincidiendo casualmente con la anterior. Es la superior del grupo de papillas de Hispasil 1731.

La menor participación de partículas de sílice, en las papillas con PW 50, se sitúa en los porcentajes 35/65%, con una proporción de partículas de sílice del 17,5%. La mayor participación en las papillas con Hispasil 1731 se sitúa en el 45/55%, siendo el porcentaje de sílice coloidal en este caso del 13,75%. Por lo tanto, en todos los casos experimentados, el porcentaje total de partículas de sílice en las mezclas en las que participa el Hispasil 1731 es menor que el porcentaje presente en las mezclas en las que se utiliza PW 50. Y también como ya se ha comentado, la densidad del grupo PW 50 es casi siempre superior.

Para conseguir un porcentaje similar al 17,5% de sílice coloidal en el grupo Hispasil 1731 se tendría que conseguir una papilla en la que el porcentaje de éste fuera cercano al 60%, de todas formas el tipo de papilla obtenida resultaría extremadamente fluido y poco apto para los recubrimientos.

## II.3. PROCEDIMIENTO DE REBOZADO CON GRANO Y FIBRA APLICADO PARA LAS PRUEBAS DE ESTE CAPÍTULO

Como se ha comentado en la introducción del ap. II.2., p. 75, sobre las pruebas de aplicación de la papilla, el procedimiento de aplicación del rebozado consiste en verter o espolvorear el refractario granulado, o la fibra, por encima de una capa de papilla recién aplicada. El estado plástico de la papilla permite que el grano penetre parcialmente en su interior y de esta manera se crea un conjunto, una única capa, donde la papilla atrapa el rebozado a la vez que el rebozado con grano, o con fibra, fija la papilla evitando que ésta fluya. El rebozado participa como relleno y como estabilizante dimensional, aumentando el volumen y evitando la contracción, entre otras propiedades de la cascarilla cerámica.

En resumen, el rebozado consta de una aplicación de la papilla y de la correspondiente aplicación de grano o de fibra con la que forma un cuerpo, es decir una capa completa. La aplicación de grano o fibra responde a unos requerimientos técnicos<sup>93</sup> concretos en el caso de la aplicación de la cascarilla cerámica en fundición. Para este proyecto, estos requerimientos se revisaron con la investigación que se desarrolla a lo largo de este capítulo.

En este apartado se expone el procedimiento de rebozado utilizado en las pruebas siguientes. Dicho procedimiento sigue las pautas establecidas en la práctica de fundición de la "Fonería".

### II.3.1. REBOZADO CON GRANO

Para el rebozado se utilizó Moloquita, que es un material cerámico procesado, de hecho es una arcilla blanca, caolín, cocida y triturada (chamota) que ha perdido las propiedades elásticas y mecánicas de la arcilla original. Desde el punto de vista de la cerámica, la Moloquita es un refractario triturado, una chamota<sup>94</sup>, es decir, una cerámica cocida y reducida a granos de varios grosores mediante un proceso de trituración a polvo fino mediante un proceso de molienda y cribado selectivo y controlado.

La Moloquita es un producto elaborado por la industria ECC International, ésta es el fabricante de la Moloquita, y lo hace en distintas granulometrías y en un tamaño homogéneo de grano.

El tamaño del grano del rebozado, como se ha comentado en el capítulo anterior, influye sobre el grosor de la cascarilla cerámica y sobre la porosidad<sup>95</sup> de la misma. El grano influye sobre la resistencia térmica y mecánica de la cascarilla cerámica. El procedimiento de aplicación del grano de Moloquita, para estas pruebas, consistió en espolvorear manualmente el grano, generando una especie de lluvia de grano, encima de la papilla cerámica todavía húmeda. La aplicación del grano se realizó con agilidad inmediatamente después de realizar la aplicación de la papilla.

Como se ha indicado anteriormente, para el rebozado se ha escogido Moloquita 50-80dd, (entre 0,18 y 0,50 mm). Dicho tamaño de grano se ha considerado apto para el uso requerido en este caso, entre otras razones por que su dimensión reducida, al recubrir el modelo aumenta ligeramente el volumen del modelo recubierto, por lo tanto no modifica ni altera excesivamente la forma del modelo. Por otro lado, los intersticios que se forman entre los granos 50-80dd permiten obtener una resistencia mecánica contrastada en las prácticas de

---

<sup>93</sup> En fundición se puede añadir entre las capa de papilla otro material distinto del rebozado con grano como es el caso de la fibra de vidrio, generalmente el rebozado de grano se alterna con ésta. Esta fibra de vidrio además de actuar como rebozado sirve para dar resistencia y cohesión ante la presión ejercida por la dilatación de la cera, evitando la rotura de la cascarilla cerámica durante el proceso de descerado.

<sup>94</sup> Las chamotas tienen estabilidad dimensional, es decir, no aumentan de tamaño al mezclarse con la pasta y no se contraen durante el secado ni tampoco tras la cocción. Ello se debe a que durante la cocción han sufrido un proceso de cocción que las ha transformado en un material cerámico estable.

<sup>95</sup> Pruebas de porosidad de la cascarilla cerámica en el ap. II.8., p. 147.

fundición sin dejar de ser capaces de aportar resistencia al choque térmico. A lo largo del desarrollo de las experiencias de esta tesis se ha experimentado con otro tipo de grano Moloquita 16-30dd (0,18-1,00 mm), aunque se descartó su uso para este capítulo. Las razones por las que no se ha escogido este grano se encuentran en su tamaño de grano. La Moloquita 16-30dd tiene mayor tamaño de grano (0,18-1 mm) que la Moloquita 50-80dd (0,18-0,30 mm). Aplicado como rebozado exterior modificaba demasiado la forma del soporte comparado con la Moloquita 50-80dd de grano más pequeño (Fig. II.6). Además, aplicada sobre la primera capa de contacto, los porcentajes de mezcla establecidos para la papilla no eran todos válidos, pues en las más líquidas, el grano se hundía, por su mayor peso.



Figura II.6. Rebozado de grano de Moloquita 50-80dd.

## II.3.2. REBOZADO CON FIBRA

En el ap. I.4., p. 53, dedicado a los refuerzos de la cascarilla cerámica para fundición se han presentado distintos tipos de fibra, y su utilidad en el ámbito de la fundición. El rebozado de fibra es un revestimiento que se usa para resolver el problema de la dilatación térmica de la cera (patrón) durante el descerado. En la “Foneria” se emplean distintos tipos de presentaciones comerciales de fibra de vidrio, aunque de forma sistemática la fibra cortada de 6mm; que permite recubrir toda la superficie del patrón de manera relativamente uniforme. También en esta investigación se han experimentado otros tipos de fibra, aunque se ha optado por escoger la triturada. El procedimiento de aplicación de la fibra de vidrio consiste en espolvorear manualmente la fibra, generando una especie de lluvia de fibra, encima de la papilla cerámica todavía húmeda. La aplicación de la fibra se realiza con agilidad inmediatamente después de realizar la aplicación de la papilla (Fig. II.7). El proceso de rebozado utilizado para las pruebas de este capítulo alternó aplicaciones de grano Moloquita 50-80dd con fibra cortada a 6 mm. Se aplicó la fibra de vidrio alternando estas capas con otras de grano de Moloquita 50-80dd, de manera que las de fibra siempre quedaban recubiertas por las de grano, recubriendo toda la superficie de la probeta.

En esta tesis, cuyo objetivo es distinto al de la fundición, trata de la aplicación escultórica de la cascarilla cerámica, y por lo tanto fue necesario replantearse el uso de la fibra experimentando su aplicación y evaluando los resultados de la misma, como se verá en los apartados de este capítulo dedicados a las pruebas de resistencia.



Figura II.7. Rebozado de fibra cortada de 6 mm.

## II.4. PRUEBAS DE ESPESOR Y PESO DE LAS CAPAS DE CASCARILLA CERÁMICA.

El grosor de la pared de cascarilla cerámica varía en función del tipo de papilla y del tipo de rebozado (Moloquita 50-80dd o fibra de vidrio cortada de 6mm).

### Objetivos

Por ello se consideró conveniente determinar:

1. Espesores de las primeras aplicaciones de las papillas: El espesor que forma la papilla sobre el patrón en función de los componentes y de las proporciones de los mismos.
2. Espesores de los rebozados: La aportación al grosor final de los rebozados con grano de Moloquita 50-80dd y con fibra de vidrio cortada a 6 mm introducidos entre las capas de papilla cerámica.
3. Peso de la segunda aplicación de las papillas: La cantidad de papilla que se adhiere sobre el rebozado de Moloquita 50-80dd y sobre el de fibra de vidrio.

### Materiales utilizados

Para realizar estas pruebas se emplearon en la realización de la papilla los tres aglutinantes mencionados: PW 50, Hispasil 1731 y Carsil 9, mezclados con el refractario molturado Moloquita -200. En la realización de los rebozados, los mencionados anteriormente: el grano de Moloquita 50-80dd y la fibra de vidrio triturada de 6mm.

### Procedimientos aplicados

Para obtener esta información se procedió a realizar un ensayo consistente en la aplicación de la papilla y los rebozados sobre un soporte de hierro de 10x10cm de superficie, 76g de peso y 1.00mm de grosor.

Se eligió este soporte para eliminar posibles fuentes de error atribuibles a éste, ya que por las características del material, éste no cambia su peso, volumen y forma dentro de los márgenes de la experiencia.

La aplicación se realizó con pincel<sup>96</sup> sobre el soporte las papillas preparadas en antelación con distintos aglutinantes y distintas proporciones de componentes previamente establecidas. Los rebozados se aplicaron espolvoreándolos sobre la superficie del soporte, como se suele hacer en fundición.

La experiencia se completó en un día de trabajo en la "Fonería" de la BBAA-UB.

### II.4.1. RESULTADOS SOBRE EL PESO, EL ESPESOR Y LA CALIDAD DEL RECUBRIMIENTO DE LA PRIMERA CAPA PAPILLA (CAPA DE CONTACTO)

La primera capa de papilla es la que recubre el soporte (modelo o patrón) y la que reproduce fielmente la forma y la textura en negativo del patrón. Ésta recibe el nombre de capa de contacto.

Para cada aglutinante se observó que al aumentar el porcentaje de refractario presente en la mezcla, aumentaba la cantidad de papilla sobre el soporte, entendiéndose que cuanto más consistente es la papilla, mayor espesor y cantidad tendremos de ésta. El mayor grosor se consiguió con el PW 50 en la proporción 35/65% (tabla II.13).

---

<sup>96</sup> La aplicación se realizó con pincel debido a que éste es un procedimiento eficaz, uno de los procedimientos más habituales en nuestra fundición y es el que más interesaba. En el siguiente capítulo se exponen otros procedimientos de aplicación.

Aglutinantes	Porcentaje de aglutinante y refractario: Moloquita -200 (%)	Peso de la papilla cerámica (g)	Espesor de la papilla (mm)
PW 50	35/65	4	0,43
PW 50	40/60	3	0,30
PW 50	45/55	2	0,19
Hispasil 1731	35/65	3	0,30
Hispasil 1731	40/60	1	0,06
Carsil 9	50/50	4	0,36

Tabla II.13. Pesos y espesor de cada tipo de papilla sobre soporte 10 x 10.

Con la papilla realizada con Hispasil 1731 en porcentaje 35/65% se obtuvo un recubrimiento uniforme sobre la plaqueta de hierro (Fig. II.8).

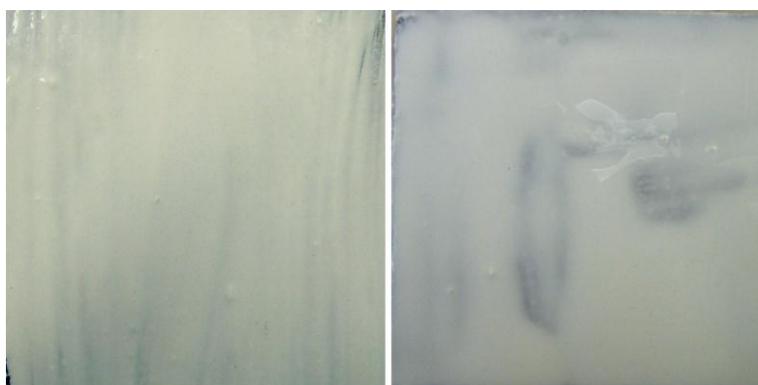


Figura II.8. Primera capa de contacto de las papillas de PW 50 de composición 35/65% (izquierda) e Hispasil 1731 de composición 35/65% (derecha).

En el ensayo con Carsil 9, sin aplicación de gas carbónico para que éste endurezca, se observó un arrugamiento en la capa de contacto de papilla y también un arrugamiento de la papilla aplicada sobre el rebozado de grano durante la gelificación y un secado muy lento (Fig. II.9).

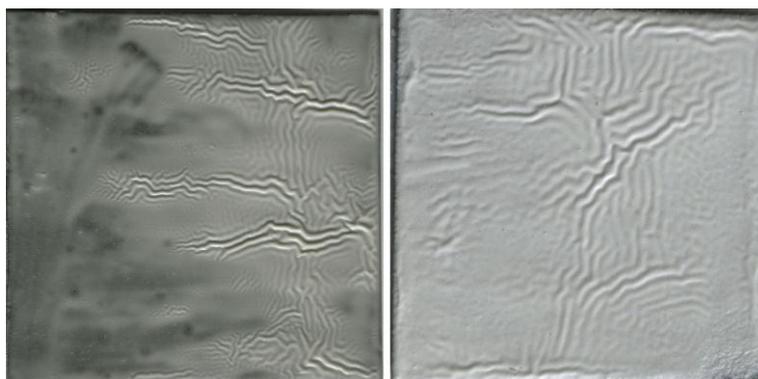


Figura II.9. Arrugamiento de la papilla sobre la capa de contacto (izquierda) y arrugamiento de la papilla aplicada sobre el rebozado (derecha).

Las papillas de PW 50 de composición 45/65% e Hispasil 1731 de composición 40/60% respectivamente, resultaron demasiado líquidas; no recubriendo la superficie del soporte, y dejando a éste sin cobertura en algunos puntos. Por consiguiente, en tanto que se consideró conveniente aplicar papillas que tuvieran una consistencia capaz de recubrir de manera homogénea y completa el soporte, sin que éste se entrevea bajo la papilla, dichas papillas no se consideraron recomendables en su aplicación como capa de contacto (Fig. II.10).

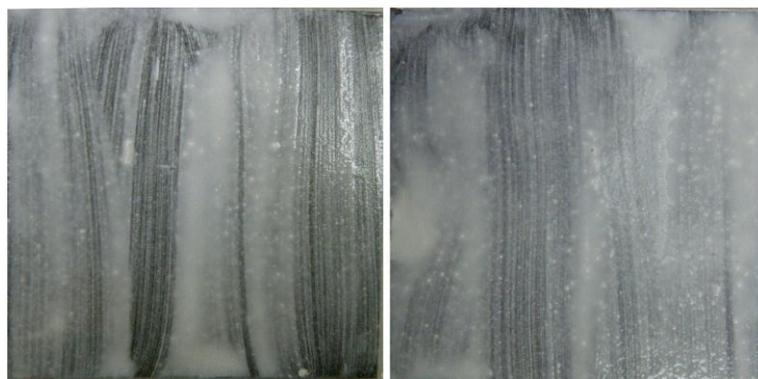


Figura II.10. Primera capa de contacto de las papillas de PW 50 de composición 45/55% (izquierda) e Hispasil 1731 de composición 40/60% (derecha).

## II.4.2. RESULTADOS SOBRE EL PRIMER REBOZADO CON GRANO O CON FIBRA

### II.4.2.1 RESULTADOS DE LAS MEDIDAS DEL PESO DE LOS REBOZADOS CON GRANO DE MOLOQUITA 50-80 O CON FIBRA DE VIDRIO 6 MM SOBRE LA PRIMERA CAPA DE PAPILLA.

Antes de que la papilla se seque y la sílice coloidal gelifique, se aplica el rebozado de grano de Moloquita 50-80 o de fibra de vidrio 6 mm, espolvoreándolo sobre ésta. El rebozado estabiliza la fluidez de la papilla sin que varíe su distribución. Una vez saturada la papilla, ésta no admite más grano;

Aglutinantes	Aglutinante /Refractario % (Porcentaje en peso)	Papilla (sílice Coloidal y Moloquita-200) (g)*	Rebozado (Moloquita 50-80dd) (g)*	Rebozado (fibra de vidrio cortada) (g)*	Peso de Papilla y rebozado (g)*
PW 50 G	35/65	4	2		6
PW 50 F.V	35/65	4		1	5
PW 50 G	40/60	3	2		5
PW 50 F.V	40/60	3		1	4
PW 50 G	45-65	2	2		4
PW 50 F.V	45-65	2		1	3
Hispasil 1731 G	35/65	3	2		4
Hispasil 1731 F.V	35/65	3		1	3
Hispasil 1731 G	40/60	1	2		3
Hispasil 1731 F.V*	40/60	1		1	2
Carsil 9 G	50/50	4	4		8
Carsil 9 F.V*	50/50	4		2	6

Tabla II.14. Peso (g) de cada rebozado de grano de Moloquita 50-80 (G) o de fibra de vidrio (F.V) \*sobre soporte 10x10.

Atendiendo los resultados de la tabla II.14 se puede decir que:

- Para las pruebas con PW 50 o con Hispasil 1731, independientemente de la diferencia de densidad de cada papilla, se adhiere sobre ésta 2 gramos de Moloquita 50-80dd y 1 gramo de fibra de vidrio.

- En la papilla con Carsil 9 se adhiere el doble de grano de Moloquita 50-80dd o de fibra de vidrio sobre la superficie que en las papillas del grupo PW 50 o Hispasil 1731. Ésto se debe a que el Carsil 9 no gelifica tan rápidamente como los otros dos (pues no se usa gas carbónico), y al mayor grado de humectación del Carsil 9, lo que le permite recibir mayor cantidad de rebozado.

### II.4.3. RESULTADOS DE LAS MEDIDAS DE ESPESOR QUE FORMA EL REFRACTARIO Y LA FIBRA DE VIDRIO EN LA PRIMERA CAPA.

Para conocer el espesor que forma el refractario y la fibra se midió el espesor de cada plaqueta en los cuatro cuadrantes de ésta con un pie de rey digital. Se tomaron cuatro valores porque el rebozado forma una superficie irregular. Con estos cuatro valores se calculó la media obteniendo un valor más aproximado.

Aglutinantes	Porcentaje de Aglutinante /Refractario (%)	Papilla (sílice c. y Moloquita-200) (mm)	Rebozado (Moloquita 50-80dd) (mm)	Rebozado (fibra de vidrio cortada) (mm)	Espesor total de Papilla y rebozado (mm)
PW 50 G	35/65	0,37	0,35		0,72
PW 50 F.V	35/65	0,37		0,31	0,68
PW 50 G	40/60	0,20	0,36		0,56
PW 50 F.V.	40/60	0,20		0,24	0,46
PW 50 G	45/55	0,13	0,34		0,47
PW 50 F.V.	45/55	0,13		0,36	0,49
Hispasil 1731 G	35/65	0,18	0,35		0,53
Hispasil 1731 F.V.	35/65	0,18		0,20	0,38
Hispasil 1731 G	40/60	0,13	0,33		0,43
Hispasil 1731 F.V.	40/60	0,13		0,28	0,41
Carsil 9 G	50/50	0,36	0,47		0,83
Carsil 9 F.V.	50/50	0,36		0,31	0,67

Tabla II.15. Espesor del rebozado de Moloquita 50-80dd y de la fibra de vidrio.

En los ensayos con PW 50 o con Hispasil 1731 el grosor del rebozado con grano de Moloquita fue relativamente constante, lo que concordó con los resultados de su peso (tabla II.15). Las características del grano, pequeño y homogéneo favorecieron un recubrimiento homogéneo.

En los ensayos con Carsil 9 tal y como se ha indicado anteriormente, el rebozado de Moloquita 50-80 dd presentó un grosor mayor que con el resto.

Sin embargo, en el caso de la fibra de vidrio el espesor variaba considerablemente, pues los filamentos eran largos y se entrelazaban aleatoriamente, dando lugar a una superficie muy irregular. Además, estos filamentos se disponen sobre la superficie formando ángulos diversos, sobresaliendo del plano en ocasiones, al ser flexibles no permitió que la medida del espesor con el pie de rey se hiciera correctamente, ya que éstos se doblaban.

Si se observa la tabla se pueden relacionar los grosores de cada tipo de papilla con la cantidad de rebozado atrapado. Se puede establecer que el grosor de la primera capa (considerando la aplicación de la papilla y el rebozado conjuntamente) viene determinado por el espesor de la capa de papilla para cualquiera de las variantes salvo en el caso, ya descrito, del Carsil 9.

## II.4.4. RESULTADOS: PESO Y ESPESOR DE LA SEGUNDA CAPA DE PAPILLA (CAPA DE REGRUESADO)

A continuación se exponen los resultados de peso y espesor de la primera capa y de la segunda capa.

### II.4.4.1 RESULTADOS DE LAS MEDIDAS DEL PESO DE LA PAPILLA SOBRE LOS REBOZADOS DE GRANO DE MOLOQUITA 50-80DD O DE FIBRA DE VIDRIO 6 MM.

Se aplicó una nueva capa de papilla para averiguar la cantidad requerida en la aplicación de la segunda capa de papilla.

En las valoraciones se establece la relación entre la primera y la segunda capa, contrastando las cantidades utilizadas en cada aplicación.

En la tabla II.16. se procede a comparar los pesos de ambas aplicaciones.

Aglutinantes	Proporción de aglutinante /refractario (%)	1º capa de papilla (g)*	2º capa de papilla (g)*
PW 50 G	35/65	4	9
PW 50 F.V	35/65	4	17
PW 50 G	40/60	3	6
PW 50 F.V.	40/60	3	11
PW 50 G	45/55	2	4
PW 50 F.V.	45/55	2	8
Hispasil 1731 G	35/65	3	8
Hispasil 1731 F.V.	35/65	3	10
Hispasil 1731 G	40/60	1	7
Hispasil 1731 F.V.	40/60	1	11
Carsil 9 G	50/50	4	8
Carsil 9 F.V.	50/50	4	13

Tabla II.16. Peso de cada composición de papilla para la 1ª y 2ª capas.

A partir de esta tabla comparativa se puede deducir que:

- La segunda capa de papilla es mayor respecto a la primera para todos los casos. Al recubrir con una nueva capa de papilla el rebozado de Moloquita 50-80dd o de fibra de vidrio, se tiene un peso y un espesor distintos respecto al de la primera capa de contacto. Debido a la rugosidad del grano y a la irregularidad de la fibra, la segunda capa de papilla ha de rellenar más recovecos.
- En los casos en que se utiliza la fibra de vidrio, se necesita más cantidad de papilla en la aplicación de la segunda capa, se entiende que esto se debe a la estructura de las capas de la fibra de vidrio y, por lo tanto, a la necesidad de rellenar los filamentos, las cavidades e intersticios que aparecen.
- La tasa de variación de la masa de papilla requerida en la segunda capa respecto a la composición del material es mayor en el caso del PW 50, tanto con el rebozado de grano de Moloquita 50-80% como con el de fibra de vidrio 6mm. Al aumentar la proporción de aglutinante utilizado, la masa de la segunda capa decrece.

- Por el contrario en el caso del Hispasil 1731, con rebozado de grano de Moloquita 50-80, decrece de 8g a 7g, al pasar de 35% a 40%, y aumenta de 10g. a 11g, con rebozado de fibra de vidrio.

#### II.4.4.2. RESULTADOS DE LAS MEDIDAS DEL ESPESOR DE LA SEGUNDA CAPA DE PAPILLA.

Aglutinantes	Proporción de aglutinante /refractario (%)	1ª capa de papilla (mm)	Rebozado (Moloquita 50-80dd) (mm)	Rebozado (fibra de vidrio cortada) (mm)	Espesor total de papilla y rebozado de la primera capa (mm)	2ª capa de papilla (mm)
<b>PW 50 G</b>	35/65	0,37	0,35		0,72	0,27
<b>PW 50 G+ F.V</b>	35/65	0,37		0,31	0,68	0,65
<b>PW 50 G</b>	40/60	0,20	0,36		0,56	0,20
<b>PW 50 F.V.</b>	40/60	0,20		0,24	0,46	0,53
<b>PW 50 G</b>	45/55	0,13	0,34		0,47	0,17
<b>PW 50 F.V.</b>	45/55	0,13		0,36	0,49	0,46
<b>Hispasil 1731 G</b>	35/65	0,18	0,35		0,53	0,30
<b>Hispasil 1731 F.V.</b>	35/65	0,18		0,20	0,38	0,45
<b>Hispasil 1731 G</b>	40/60	0,13	0,33		0,43	0,28
<b>Hispasil 1731 F.V.</b>	40/60	0,13		0,28	0,41	0,27
<b>Carsil 9 G</b>	50/50	0,36	0,47		0,83	0,43
<b>Carsil 9 F.V</b>	50/50	0,36		0,31	0,67	0,75

Tabla II.17. Espesores de la segunda capa en función de cada componente que forma la cascarilla cerámica.

Al aplicar la segunda capa de papilla PW 50 en la proporción 35/65% sobre el rebozado de Moloquita 50-80dd se obtuvo una capa de 9 gramos de peso y 0,27mm de espesor. Éste fue el único caso en que el grosor de la segunda capa de papilla resultó inferior al correspondiente a la primera capa; que en este caso resultó ser de 0,37mm. En cambio, para todos los demás casos el grosor de la segunda capa de papilla iguala o excede el de la primera (tabla II.17.).

Debido a las propiedades macroscópicas del rebozado de fibra de vidrio, los intersticios que éste tipo de rebozado presenta son de mayor volumen que en el caso de la Moloquita 50-80dd. Del mismo modo que con la primera capa de papilla, para ambos rebozados, se observó en la aplicación de la segunda capa, que a mayor densidad de la mezcla mayor grosor de la capa obtenida.

Se ha comprobado que, dependiendo del tipo de aglutinante que compone la papilla, ésta tiene distintas consistencias, y por este motivo se adapta de distintos modos al rebozado.

#### II.4.5. VALORES DE CRECIMIENTO DEL ESPESOR DE LA CASCARILLA CERÁMICA

Con los resultados obtenidos es posible deducir, de modo aproximado, el espesor de la cascarilla cerámica en función de las capas aplicadas.

Se plantean dos tablas que tienen un carácter referencial, es decir los espesores son aproximados (tablas II.18 y II.19).

Valores de crecimiento de espesor de la cascarilla cerámica ( mm)												
Papilla		1ª P	1ª M	2ª P	2ª M	3ª P	3ª M	4ª P	4ª M	5ª P	5ª M	Total de espesor Mm
PW 50	35/65%	0,37	0,35	0,27	0,35	0,27	0,35	0,27	0,35	0,27	0,35	3,20
PW 50	40/60%	0,20	0,36	0,20	0,36	0,20	0,36	0,20	0,36	0,20	0,36	2,80
PW 50	45/55%	0,13	0,34	0,17	0,34	0,17	0,34	0,17	0,34	0,17	0,34	2,51
Hispasil 1731	35/65%	0,18	0,35	0,30	0,35	0,30	0,35	0,30	0,35	0,30	0,35	3,13
Hispasil 1731	40/60%	0,13	0,33	0,28	0,33	0,28	0,33	0,28	0,33	0,28	0,33	2,90
Carsil 9	50/50%	0,36	0,47	0,43	0,47	0,43	0,47	0,43	0,47	0,43	0,47	4,43

Tabla II.18. Ejemplo del desarrollo del espesor de una cascarilla cerámica de cinco capas de papilla con rebozado de Moloquita. P=Papilla, M=Moloquita 50-80dd.

En la primera se consideran cinco capas de papilla con distintas composiciones y sus correspondientes rebozados de grano de Moloquita; en la segunda se incluyen rebozados de fibra de vidrio cortada en la segunda y cuarta capas.

Valores de crecimiento de espesor de la cascarilla cerámica ( mm)												
Papilla		1ª P	1ª M	2ª P	2ª FV	3ª P	3ª M	4ª P	4ª FV	5ª P	5ª M	Total de espesor mm
PW 50	35/65%	0,37	0,35	0,27	0,31	0,65	0,35	0,27	0,31	0,65	0,35	3,88
PW 50	40/60%	0,20	0,36	0,20	0,24	0,53	0,36	0,20	0,24	0,53	0,36	3,22
PW 50	45/55%	0,13	0,34	0,17	0,36	0,46	0,34	0,17	0,36	0,46	0,34	3,13
Hispasil 1731	35/65%	0,18	0,35	0,30	0,20	0,45	0,35	0,30	0,20	0,45	0,35	3,13
Hispasil 1731	40/60%	0,13	0,33	0,28	0,28	0,27	0,33	0,28	0,28	0,27	0,33	2,78
Carsil 9	50/50%	0,36	0,47	0,43	0,31	0,78	0,75	0,43	0,31	0,75	0,47	5,06

Tabla II.19. Ejemplo del desarrollo del espesor de una cascarilla cerámica de cinco capas de papilla con rebozados de Moloquita en la 1ª, 3ª y 5ª capas y fibra de vidrio en la 2ª y 4ª. P=Papilla, M=Moloquita 50-80dd, FV=Fibra de vidrio 6mm.

En la segunda tabla (tabla II.19) se plantea un tipo de recubrimiento alterno con grano y fibra, considerando distintas composiciones y un total de cinco capas de papilla.

Las tablas anteriores (tablas II.18 y II.19) muestran el crecimiento del espesor de la cascarilla cerámica. Sin embargo, es importante recalcar que estos valores son indicativos y pueden variar debido a los procedimientos de aplicación de la papilla (pincel, inmersión, vertido, etc.). También debe considerarse que todos los procedimientos de aplicación conllevan variaciones que deben ser tomados en cuenta.

Los resultados y los valores que se consiguieron con estos ensayos sobre peso y grosor son aproximados, pero permiten entender el comportamiento en la aplicación de las distintas papillas cerámicas y sus rebozados, así como prever el desarrollo de los espesores y pesos de la cascarilla cerámica.

### Valoraciones y conclusiones

En la primera tabla (tabla II.18) se observa que, mientras mayor es la densidad de la papilla mayor es el espesor de la cascarilla finalmente obtenida; siendo en el caso del Carsil 9 donde se obtiene la más gruesa de todas.

Conviene destacar que los espesores finales obtenidos con Hispasil 1731 no varían significativamente en función de los distintos rebozados. En ambos casos las diferencias observadas, cuando las hay, son mínimas.

Partiendo de estos datos se puede calcular el espesor final de la cascarilla utilizando distintas composiciones para aplicar las distintas capas. De este modo, por ejemplo, se puede aplicar una primera capa más consistente, que reproducirá con mayor fidelidad la textura del patrón y, posteriormente, sucesivas capas más líquidas para obtener un espesor más reducido, pudiéndose predecir el espesor aproximado y final de la cascarilla.

Se observa concordancia entre los valores de grosor previstos y los que se obtuvieron en distintos ensayos posteriores, concretamente sobre las probetas de cascarilla cerámica para el ensayo de resistencia, (ap. II.7.1.3.4., p.119).

## II.5. PROCEDIMIENTO DE SECADO PARA LAS PRUEBAS DE ESTE CAPÍTULO

Para el desarrollo de esta investigación se partió de la experiencia previa desarrollada en la “Fonería”. Uno de los procedimientos que se propone al alumnado de la “Fonería” está relacionado con el procedimiento denominado Cascarilla Cerámica Exprés (CCE)<sup>97</sup>, con él se aplican tiempos de secado reducido con una recomendación de tiempos mínimos situados en torno a los 15 minutos y sin límite de máximos. Cada capa de papilla (considerando los distintos tipos de papillas) con su consiguiente rebozado requiere de un cierto tiempo de secado antes de estar en condiciones de recibir una nueva aplicación.

### Objetivo

Establecer el tiempo de secado para cada tipo de papilla.

### Procedimientos

Se aplicó los diferentes tipos de capa (en los que puede variar el tipo de papilla y el tipo de rebozado) sobre una plancha de cera de 10 x 10cm. A continuación se sometieron estas probetas a un secado forzado con ventilación mecánica para acelerar su consolidación.

Para establecer el tiempo de secado de cada tipo de papilla, se comprobó la adherencia del rebozado siguiendo dos procedimientos, en primer lugar se comprobó el grado de adherencia con el tacto y luego la consistencia de la capa mediante la aplicación con un pincel de la papilla.

- Cada tres segundos se comprobó mediante el tacto, arrastrando ligeramente, si el rebozado se mantenía adherido,
- y, luego, se aplicó la capa siguiente de papilla con un pincel, verificando si éste arrastraba el grano de la capa anterior.

Se estableció para estas pruebas como tiempo de secado al intervalo de tiempo transcurrido entre el inicio de cada aplicación de papilla sobre el soporte y el final del secado, lo que coincide con el inicio de la siguiente aplicación de papilla y verificación del secado correcto. Para obtener el valor adecuado del tiempo de secado, para cada tipo de capa se realizaron cinco ensayos y se obtuvo el promedio de los distintos tiempos de secado.



Figura II.11. Pérdida de la capa de papilla mediante percepción táctil y luego con pincel, debido a un mal secado.

Para el secado de las probetas cuadradas se dispuso una ventilación forzada con ventilador potente, evitando que el chorro de aire incidiese directamente sobre las probetas, de modo que

<sup>97</sup> La CCE parte de una serie de parámetros, el primero de ellos consiste en la utilización de PW 50 como aglutinante y harina de Moloquita -200 en la confección de la papilla, el segundo en la utilización para los rebozados de un solo tipo de grano de Moloquita, el mencionado Moloquita 50-80dd, alternando capas de rebozado con fibra cortada de 6mm y el tercero un proceso de secado intenso y rápido, realizado con ventiladores potentes en una zona de exposición constante, en consecuencia de corta duración, siendo posible una exposición mínima de 10 minutos y recomendable para garantizar la eficacia del secado de 15 minutos, siendo posible una exposición prolongada. Valle, J. (coord), Lopez, P. y Marcos, C. Op cit. Libro de Actas.

no se alterara la superficie de éstas. Se pretendió evitar que el aire arrastrase parte del rebozado tierno de la probeta. Para ello se situaron las probetas a 1 metro de distancia, aproximadamente del ventilador, apoyándolas sobre el plano de la mesa de secado.

El tiempo de secado para cada capa de papilla varió dependiendo de diversos factores, entre ellos: el tipo de aglutinante empleado, el tipo de composición entre el aglutinante y el refractario de Moloquita -200 y el número de la capa secada (diferenciando si se trata de la primera capa (de contacto) o de las siguientes).

### Resultados

A continuación detallamos el tiempo de secado que se empleó para los ensayos de este capítulo.

Composición de la papilla		Tiempo de secado de cada capa de papilla					
		1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	Tiempo total
Papilla (PW 50 Moloquita -200) + rebozado Moloquita 50-80dd	35/65%	15-17 min.	23-25 min.	35-40 min.	35-40 min.	35-40 min.	2h23 m- 2h32 min.
	40/60%	6-7 min.	11-15 min.	25-30 min.	25-30 min.	25-30 min.	1h32 min- 1h52 min.
	45/55%	6-7 min.	11-15 min.	25-30 min.	25-30 min.	25-30 min.	1h32 min- 1h52 min.
Papilla (Hispasil 1731 Moloquita- 200) + rebozado Moloquita 50- 80dd	35/65%	15-17 min.	18-20 min.	30-35 min.	35-40 min.	35-40 min.	2h13 min- 2h32 min.
	40/60%	6-7 min.	11-15 min.	20-25 min.	25-30 min.	25-30 min.	1h27 min- 1h47 min.
	45/55%	6-7 min.	11-15 min.	20-25 min.	25-30 min.	25-30 min.	1h27 min- 1h47 min.
Papilla (Carsil 9 Moloquita -200) + rebozado Moloquita 50- 80dd	50/50%	2-3h	5-6h	7-8h	7-8h	7-8h	28 h 33 h

Tabla II.20. Tiempo empleado por cada aplicación de papilla variando su composición.

### Valoraciones y conclusiones

No se han tenido en consideración los valores ambientales de humedad ni de temperatura. Por tanto, los resultados son orientativos y los tiempos obtenidos podrían variar en función de las variaciones ambientales en que se realicen otras aplicaciones.

Estos tiempos de secado para cada composición de papilla permiten comparar los ensayos de este capítulo. Variando la distancia entre la plaqueta y el ventilador, o al variar el método de secado, o el tipo de soporte, se modifican los tiempos de secado.

Un tipo de papilla que contiene poca agua en su composición, es una papilla densa que forma una capa gruesa sobre el patrón. Necesita un tiempo prolongado de secado hasta que se evapore completamente el agua del interior de la capa.

Un tipo de papilla que contiene más agua en su composición forma una capa muy fina que seca en poco tiempo.

En las primeras capas de papilla realizadas con Hispasil 1731 se obtuvo un secado más rápido que las primeras capa de papillas realizadas con PW 50. La papilla con Hispasil 1731 generó capas de menor espesor sobre la superficie del patrón, lo que explica este comportamiento (ap. II.4.5., p. 92, Valores de crecimiento del espesor de la cascarilla cerámica).

Se observó que al aumentar el número de capas de papilla de Hispasil 1731 y de PW 50 aumentaba el tiempo de secado. El Hispasil 1731 contiene más agua que el PW 50, por tanto

las papillas del primero son menos densas y forman espesores de menor grosor; las papillas del segundo son más densas y forman capas de mayor espesor. Una papilla más densa, las de PW 50, tiene, por un lado, mayor cantidad de material sobre el soporte, mayor grosor de capa y por la otra, menor participación de agua en la papilla.

No obstante, los tiempos de secado fueron similares lo que se puede explicar considerando que el volumen total de agua en los distintos recubrimientos debía ser similar.

Los tiempos de secado son los expuestos en la tabla II.20.

En todos los casos, la primera capa tiene un tiempo de secado más corto que las siguientes.

En capas sucesivas aumenta el tiempo de secado. En estas capas, aproximadamente, coinciden los tiempos de secado de ambos tipos de recubrimiento resueltos con ambos tipos de papilla (PW 50, Hispasil 1731)

Se destaca también como observación que durante el proceso de aplicación de las capas, se constató que un secado deficiente puede provocar que la aplicación siguiente de papilla arrastre el rebozado de la capa anterior.



## II.6. COCCIÓN DE LA CASCARILLA CERÁMICA

Los procedimientos de descerado y cocción del molde varían en cada fundición dependiendo de la exigencia y problemática de cada uno.

Hay fundiciones que emplean dos tipos de cocción distintas, la primera en la etapa de descerado a 150°C durante 60-90 minutos y la segunda en la etapa de cocción de la cascarilla cerámica hasta alcanzar una temperatura entre 750°C y 900°C, en función del metal líquido que posteriormente se colará.

En la fundición de BBAA, actualmente los moldes de cascarilla cerámica se desceran y se cuecen a 750°C, temperatura suficiente para la eliminación de residuos de material calcinado y cenizas. A esta temperatura, el material cerámico puede soportar bien la presión metalostática.

A diferencia de otros materiales cerámicos como la arcilla, el gres o la porcelana, la cascarilla cerámica no necesita una curva de cocción larga y compleja, permitiendo ésta cocer con una curva de cocción más breve sin riesgo de deformaciones ni roturas. No obstante, se han utilizado curvas de cocción largas.

### **Materiales utilizados**

Para realizar estas pruebas se emplearon en la realización de la papilla los tres aglutinantes mencionados: PW 50, Hispasil 1731 y Carsil 9, mezclados con el refractario molturado Moloquita -200. En la realización de los rebozados, los mencionados anteriormente: el grano de Moloquita 50-80dd y la fibra de vidrio triturada de 6mm.

### **Infraestructuras utilizadas**

Hornos utilizados: Los dos primeros ensayos se realizaron en el horno del taller de fundición de la Facultad de BBAA. El tercer ensayo se realizó en los laboratorios de la Facultad de Química de la UB. Los dos hornos empleados para las cocciones de las probetas fueron eléctricos. En los respectivos ensayos de resistencia son presentadas más detalladamente las características de cada horno.

### **Procedimientos aplicados**

Para los ensayos, se realizaron distintos tipos de probetas de cascarilla cerámica que se cocieron a las siguientes temperaturas: 500°C, 750°C, 875°C, 1000°C, 1200°C y 1300°C, variando en cada ensayo la curva y el tiempo de cocción (que fueron de 31h a 6h). Dichas curvas se exponen en el apartado correspondiente.



## II.7. PRUEBAS DE RESISTENCIA REALIZADAS EN LA “FONERIA” Y EN EL LABORATORIO DEL DEPARTAMENTO DE CIÈNCIA DELS MATERIALS I ENGINYERIA METAL·LÚRGICA.

### Antecedentes de este estudio

Se parte de los resultados previos de fundición, en los que se aplicó a los moldes de cascarilla cerámica de fundición una temperatura por encima de la de fusión del bronce. Las pruebas de microfusión y de crisol fusible determinaron una mayor resistencia en las cáscaras resultantes. Ésto se evidencia además durante el desmoldeado y proporciona una buena orientación respecto a los posibles resultados en el estudio de resistencias.

La Dra. Carmen Marcos, en su tesis doctoral realizó pruebas de rotura para determinar la resistencia a la flexión y a la carga de rotura de baldosas cerámicas (así la autora describe las probetas de cascarilla cerámica). El objetivo principal del ensayo de resistencia de la Dra. Carmen Marcos fue “obtener valores comparativos referidos a la resistencia (al peso) y no a la dureza, pues la blandura de primera capa que facilita el descascarillado está garantizada con el empleo de refractarios blandos como el talco o el grafito<sup>98</sup>”. El procedimiento utilizado para las pruebas de resistencia recurre a las infraestructuras de taller. Las probetas elaboradas por la Dra. Carmen Marcos se diferenciaban por los ingredientes de la barbotina (papilla) y del grano (rebozado), con la finalidad de saber qué cáscaras eran más resistentes a la presión ejercida por el metal al llenar el molde, así como hasta qué punto afectaba el empleo de refractarios blandos en las primeras capas en la resistencia final de la cascarilla cerámica con ellos elaboradas.

Estos precedentes, en la medida que refieren cualidades de resistencia son relevantes, no obstante, esta tesis ha pretendido obtener una cascarilla cerámica para su uso como material escultórico.

### Objetivos

El objetivo de este apartado se centró en la valoración del grado de resistencia de distintos tipos de cascarilla cerámica, y para poder realizar dicha comparación se sometieron los tipos de cascarilla cerámica a ensayos de flexión hasta llegar a la rotura de las probetas. Es interesante establecer la relación entre el tipo de materiales utilizados, sus porcentajes y el grado de cocción y la estabilidad estructural de la cascarilla cerámica obtenida.

Durante el periodo de la investigación, se ha constatado la importancia, desde del punto de vista de la resistencia, de establecer las proporciones de los componentes que forman parte de la papilla cerámica (aglutinante y refractario) y el tipo de rebozado. También se ha considerado la temperatura adecuada de cocción que permite conseguir una cacarilla cerámica más estable y resistente.

En fundición, el molde está sujeto a distintas sollicitaciones mecánicas. En primer lugar tiene que soportar durante la cocción la dilatación de la cera (descerado) o la combustión de un material que participa como soporte. A continuación, tiene que contrarrestar la presión del material fundido vertido en su interior.

Frecuentemente los moldes están constituidos de un mínimo de 5 capas y llegando, en ocasiones, hasta 12 capas, dependiendo del tamaño y complejidad del patrón.

Se ha pretendido estudiar la viabilidad de una cascarilla cerámica que, con un número inferior a cinco capas pudiera tener una resistencia capaz de soportar su peso, los golpes, y presente resistencia estructural.

Además se quiso verificar:

---

<sup>98</sup> Marcos Martinez, C. Op cit. Tesis doctoral.( p. 361)

- Cuál es el aglutinante que proporcionaba más resistencia a la estructura de la cascarilla cerámica
- Cómo afectaba la utilización de distintos porcentajes de papilla a la resistencia.
- La relación entre resistencia y espesor de pared de la cascarilla.
- El grado de cocción que ofreciese mejores resultados de resistencia.
- La temperatura a la cuál la estructura perdía su integridad.
- La influencia de la utilización de la fibra de vidrio cortada.
- Los resultados en las cocciones por debajo de 750°C.

Se propusieron una serie de ensayos de resistencia con el fin de resolver las cuestiones formuladas. Éstos respondían a un método experimental rudimentario pero eficaz planteado en la “Fonería”. Se complementaron dichos ensayos con otro adicional realizado en la Facultad de Química de la UB, con la finalidad de contrastar las pruebas realizadas anteriormente y establecer con más exactitud y detalle la relación entre la resistencia de la cascarilla cerámica respecto a las distintas composiciones de la mezcla, el grado de cocción y a los distintas capas de recubrimiento aplicado.

#### **Materiales utilizados**

Para realizar estas pruebas se emplearon en la realización de la papilla los tres aglutinantes mencionados: PW 50, Hispasil 1731 y Carsil 9, mezclados con el refractario molturado Moloquita -200. En la realización de los rebozados los mencionados anteriormente: el grano de Moloquita 50-80dd y la fibra de vidrio triturada de 6mm.

#### **Procedimientos aplicados**

Para la realización de las probetas de cascarilla cerámica de los ensayos de resistencia realizados en la “Fonería” se emplearon cilindros huecos de cera obtenidos mediante moldeo. Sobre ellos se aplicó el recubrimiento de cascarilla y luego se desceró.

Para las probetas del ensayo de resistencia realizado en los laboratorios de Química se aplicó la cascarilla sobre un soporte plano (una plaqueta de metal revestido con cinta adhesiva).

Los dos tipos de probeta utilizados se diferenciaban en la forma y en las dimensiones, por lo que los resultados cuantitativos de ambas pruebas tomados de uno en uno no son comparables.

Es por ello que dichos resultados se han expresado en forma de gráfico, donde las tendencias de comportamiento de las curvas sí admitían un estudio comparativo.

Con respecto a los recubrimientos experimentados y las infraestructuras utilizadas se habla en los apartados correspondientes de este capítulo.

## **II.7.1. PRUEBAS DE RESISTENCIA DESARROLLADAS EN LA “FONERIA”**

### **Objetivo**

En este apartado se pretendió averiguar cuál era el tipo de papilla y el tipo de rebozado utilizados en la cascarilla cerámica que ofrecía mejores resultados de resistencia en función de la temperatura de cocción de las mismas. Teniendo en consideración sólo los productos experimentados.

### **Materiales utilizados**

Para realizar estas pruebas se emplearon en la realización de la papilla los tres aglutinantes mencionados: PW 50, Hispasil 1731 y Carsil 9, mezclados con el refractario molturado Moloquita -200. En la realización de los rebozados, los mencionados: el grano de Moloquita 50-80dd y la fibra de vidrio triturada de 6mm.

## Planificación de las pruebas

Variantes a considerar (ver tabla II.4., del ap. II.2., p. 76):

Grupo de papillas: PW 50 + Moloquita-200, Hispasil 1731 + Moloquita-200 y Carsil 9 + Moloquita-200.

Porcentaje de participación de los ingredientes: 35/65%, 40/60%, y 45/55%.

Modalidades de rebozados: rebozado con grano o rebozado alterno entre grano y fibra de vidrio, ver tabla II.21.

Temperaturas de cocción: 500°C, 750°C, 850°C, 1000°C, 1200°C, con una comprobación posterior a 100°C sobre un solo tipo de proporciones y productos.

Tipos de recubrimientos	1ª capa	2ª capa	3ª capa	4ª capa	5ª capa
<b>Modalidad 1 de recubrimiento</b>	Papilla + Grano de Moloquita 50-80 dd				
<b>Modalidad 2 de recubrimiento</b>	Papilla + Grano de Moloquita 50-80 dd	<b>Papilla + Fibra de vidrio cortada</b>	Papilla + Grano de Moloquita 50-80 dd	<b>Papilla + Fibra de vidrio cortada</b>	Papilla + Grano de Moloquita 50-80 dd

Tabla II.21. Las dos diferentes aplicaciones del rebozado para la papilla.

## Procedimientos utilizados

En primer lugar se procedió a elaborar las probetas, y a continuación, a realizar los ensayos de resistencia.

### 1. Elaboración de las probetas

La elaboración de las probetas ha seguido una serie de etapas:

- Elaboración de los cilindros de cera de 19cm de longitud y 2cm de diámetro: ensayos previos y conclusión,
- Ensayos previos de aplicación de la papilla y conclusión,
- Aplicación de los recubrimientos de cascarilla cerámica,
- Aplicación de la papilla con pincel
- Rebozado: aplicación del grano o de la fibra según el procedimiento descrito en el ap. II.3., p. 85.
- Número de capas: Se decidió aplicar cinco capas de rebozado completo. Cinco capas completas con rebozado de grano o bien, en la modalidad mixta, alternando capas, tres de grano y dos de fibra. El recubrimiento final, en la quinta capa es de grano, tal como se ha venido aplicando en el sistema de Cascarilla cerámica Exprés en la “Fonería”. Este planteamiento permitió obtener resultados para la presente investigación, y al mismo tiempo contrastar los resultados de las experiencias de la “Fonería”.
- Sobre el secado se remite al apartado donde se explica el procedimiento de secado, ver el ap. II.5., p. 95.
- Procedimiento de cocción de las probetas utilizado en todas las pruebas de resistencia de la “Fonería”. Estas probetas se han desecado y cocido al mismo tiempo en el horno eléctrico de la “Fonería”, (empresa constructora: Plamasó Fig. II.12.).



Figura II.12. Horno eléctrico para descerado Plasasó. Ubicado en la "Fonería"-UB.

## 2. Las pruebas de resistencia

Los cilindros huecos de cáscara de 19cm de longitud y 2cm de diámetro, se sometieron a la prueba de rotura, explicada en este apartado.

Estas dimensiones de la probeta tubular de cascarilla cerámica, como se ha indicado anteriormente, además de cómodas para realizar las pruebas de rotura, resultaron funcionales<sup>99</sup>.

La prueba consistió en colocar en un soporte de madera el cilindro, este se apoyaba exclusivamente por sus extremos permitiendo colgar en la parte central del tubo de cascarilla un gancho del que pendía un recipiente. Este recipiente se iba llenando lentamente con arena y otros elementos pesados hasta conseguir la rotura del cilindro de cascarilla cerámica.

Como peso se emplearon lingotes de bronce, fragmentos de colada de pesos diversos y arena. Los elementos más pesados se introducían en primer lugar y luego, gradualmente, los menos pesados.

El procedimiento para añadir la carga consistía en esperar dos minutos entre carga y carga, obteniendo con ese intervalo de tiempo un valor más representativo del efecto de la aplicación de la carga en el cilindro y resultando valores más coherentes para cada tipo de recubrimiento y cocción.

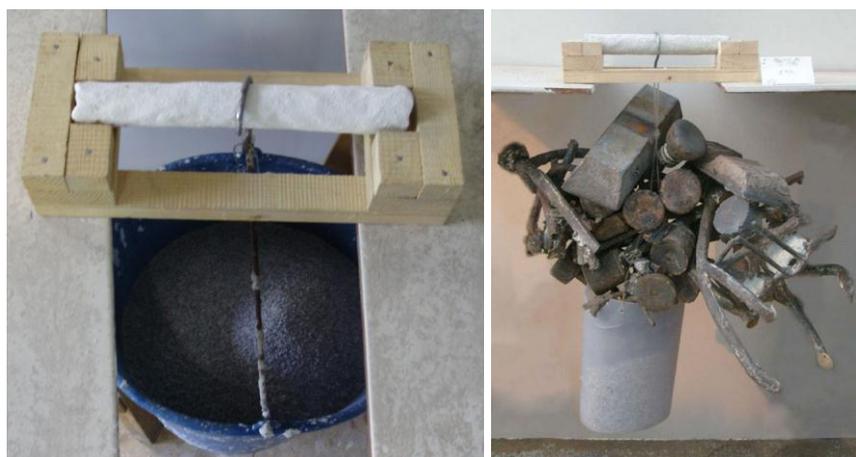


Figura II.13 Pruebas de resistencia hasta la rotura del cilindro.

<sup>99</sup> Como se ve más adelante en los resultados de las pruebas, este tipo de cilindros facilitó que el error relativo existente entre los distintos cilindros no fuese significativo.

A continuación, se procedió a pesar el contenido del recipiente para saber la fuerza necesaria para llegar a la rotura de la probeta. La fuerza de rotura, previsiblemente, variaría en función del revestimiento y su grado de cocción.



Figura II.14. Cilindros partidos, resultados de las experiencias realizadas.

Cada ensayo de rotura se repitió cuatro veces, es decir se partieron cuatro tubos de cada tipo, y se calculó el promedio de los resultados obtenidos en cada tipo de combinación de variables temperatura/recubrimiento para obtener un valor medio representativo de la resistencia de cada tipo de recubrimiento.

### II.7.1.1. DESARROLLO DE LAS PRUEBAS DE LA “FONERIA”

El método aplicado se fundamentó en una serie de pruebas encadenadas que permitieron la resolución de algunas de las preguntas formuladas a lo largo del proceso. La conclusión obtenida en cada apartado sirvió de base para la prueba siguiente. Por esta razón, los próximos apartados se exponen en el orden en que se fue solucionando cada duda:

Elaboración de los cilindros de cera: ensayos previos y conclusión.

Elaboración de las probetas de cascarilla cerámica: prueba experimental previa sobre los sistemas de aplicación y conclusión. Elaboración de las probetas.

Con respecto a la aplicación del recubrimiento, el secado y el descerado-cocción se describe el procedimiento empleado para todas las pruebas realizadas en el apartado anterior, y por lo tanto, no se hace mención en este apartado sobre el desarrollo de las pruebas.

- Pruebas de resistencia previas entre 500°C y 1200°C.
- Resultados y conclusiones.
- Pruebas de resistencia entre 500°C y 1200°C.
- Resultados y conclusiones.
- Pruebas de resistencia complementarias a 100°C.
- Resultados y conclusiones.
- Valoraciones y conclusiones sobre las pruebas de resistencia de la “Foneria”.

### II.7.1.1.1. ELABORACIÓN DE LOS CILINDROS DE CERA

Los ensayos realizados en la “Fonería”, se iniciaron confeccionando los modelos de cera que se tenían que utilizar como soporte del recubrimiento de cascarilla cerámica a testar.

Se escogió como modelo un cilindro de 19cm de largo y 2 de diámetro.

Estas dimensiones se consideraron adecuadas para facilitar las pruebas de rotura y al mismo tiempo minimizar el error relativo que se pudiera derivar de las variantes de aplicación de los recubrimientos. Por otro lado, éste es un tamaño manejable para el estudio, cuyo volumen cilíndrico tiene relación con los comportamientos de la cascarilla cerámica como forma escultórica.

Se editaron múltiples cilindros de cera de esta longitud y diámetro utilizando un molde de yeso de dos piezas. Este molde de yeso para las probetas es similar al utilizado en fundición para hacer conductos de colada.

#### Primer ensayo de descerado con cilindros macizos de cera

##### Objetivo

Observar el comportamiento de las probetas de cascarilla cerámica frente a la dilatación de la cera de un cilindro macizo, durante el proceso de cocción.

##### Procedimiento

En un ensayo inicial se realizaron cilindros macizos de cera.

A continuación se aplicaron las distintas capas de recubrimiento, cinco capas de papilla y grano de Moloquita, y finalmente se desceraron mediante una cocción gradual.

##### Resultados

Después de la cocción gradual se verificó que los cilindros de cascarilla presentaban grietas en su superficie.

##### Valoraciones e hipótesis

Se consideró que estas grietas fueron consecuencia de la dilatación de la cera provocada por el aumento de temperatura propia del proceso de cocción. El aumento de volumen de la cera quebró la cascarilla.

Valoraciones: el cilindro de cera macizo, absorbió calor desde el exterior hacia el interior, durante el proceso de descerado. Al absorber calor, primero se dilató y luego se fundió por la parte externa del cilindro, precisamente la que estaba en contacto con la cascarilla. Durante el descerado, la cera fundida sólo pudo fluir a través del espacio libre generado por la propia cera fundida, o sea, por el espacio situado entre la cascarilla y el núcleo sólido de cera, o bien a través de la cascarilla sobre la que ejerció presión. La presión ejercida por este fluido con toda probabilidad fue una de las causas del agrietamiento de la cascarilla.

Hipótesis de trabajo: si se realizan las pruebas con cilindros huecos la cera podrá evacuar por el interior del cilindro y de esta manera se reducirá la presión sobre la cáscara, es posible en consecuencia que la cascarilla no se agriete.

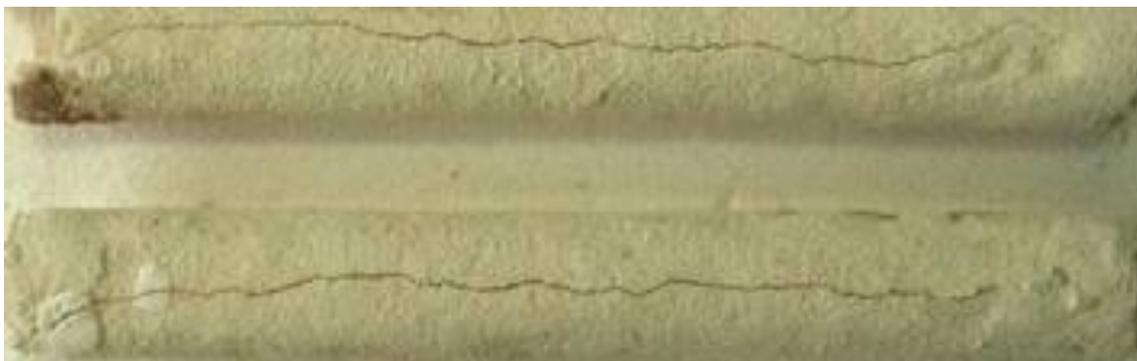


Figura II.15. Cilindros agrietados debido a la dilatación térmica de la cera durante el descerado.

## Segundo ensayo de descerado con cilindros huecos de cera

### Objetivo

Observar el comportamiento de la cascarilla cerámica frente a la dilatación de la cera en un cilindro hueco durante el proceso de cocción.

### Procedimiento

Con el objeto de evitar o reducir la presión ejercida por el núcleo y por el fluido de cera sobre la cascarilla, se elaboraron cilindros huecos vaciando con cera moldes de yeso preelaborados.

El espesor de la pared de los cilindros huecos de cera obtenidos, osciló entre los 2 y los 3mm, aproximadamente.

A continuación, se procedió de la misma manera que en el ensayo anterior, se aplicaron las capas sucesivas de recubrimiento (cinco capas de papilla y grano de Moloquita), y a continuación se cocieron gradualmente los cilindros recubiertos con cascarilla cerámica.



Figura II.16. Molde de cilindros (izquierda). Cilindros huecos de cascarilla cerámica (derecha).

### Resultados

Al realizar la prueba de cocción gradual con los cilindros huecos recubiertos con la papilla, éstos salieron del horno sin grieta alguna en su superficie.

Los cilindros de cera que se experimentaron con la papilla cerámica tienen 2cm de diámetro y 19cm de largo.

### Conclusión

Con cilindros huecos de cera, y recubiertos con las capas de cascarilla, durante una hornada gradual, la cera se puede evacuar por el interior del cilindro, de esta manera se evita la presión sobre la cascarilla y se evita su agrietamiento.

### II.7.1.1.2. PRUEBA EXPERIMENTAL SOBRE LOS SISTEMAS DE APLICACIÓN DE LA PAPILLA

En el ap. III.1.2. Modalidades de recubrimiento, del capítulo siguiente (Cáp. III) se realiza una serie de ensayos experimentales sobre los procedimientos de aplicación de la papilla sobre diferentes soportes. Los sistemas de aplicación considerados para este capítulo II son más ampliamente profundizados y contextualizados en este apartado.

### Objetivo

Se pretendió en todo momento conseguir cilindros de cascarilla cerámica con gruesos de pared relativamente homogéneos.

### Procedimiento

Anteriormente, se realizaron pruebas de aplicación de la papilla con tres procedimientos de aplicación de la papilla: aplicación con pincel, aplicación por vertido y aplicación por inmersión.

## Resultados

Con la aplicación realizada con pincel se consiguió un control mayor sobre el grado de uniformidad del grosor del recubrimiento.

La aplicación de la papilla por vertido o por inmersión generó una distribución desigual de la capa de papilla aplicada. La papilla fluía deslizándose hacia la parte inferior del tubo y tendía a concentrarse en las partes inferiores del cilindro provocando grosores irregulares en el recubrimiento. Este cambio de espesor en los extremos del cilindro alteraba ostensiblemente los resultados y por esta razón se desestimó la aplicación por inmersión o por vertido.

## Conclusión

Se descartaron los procedimientos de aplicación de la papilla por vertido o inmersión para estas pruebas.

Se escogió el pincel para la aplicación de la papilla sobre los cilindros huecos de cera, lo que permitía obtener un recubrimiento relativamente homogéneo.

### II.7.1.2. PRUEBAS DE RESISTENCIA DE LA “FONERIA”: PRIMER ENSAYO EXPERIMENTAL A 750°C CON PW 50, HISPASIL 1731 Y CARSIL 9

A lo largo del periodo de investigación desarrollado en el taller de la “Fonería”, se pudo observar, la consecuencia de algunas prácticas de los alumnos durante la elaboración de la papilla. Es posible que factores como la prisa y la falta de sistematismo provocado por la inexperiencia con este procedimiento se encontraran entre las posibles causas que hicieron que durante la elaboración de la papilla, algunos alumnos no atendieran las proporciones recomendadas de aglutinante y refractario, elaborando una papilla de composición imprecisa y resultando, en ocasiones, un molde irregular y excesivamente grueso en algunas partes y fino en otras. En el primer ensayo se intentó reproducir una actividad similar y no se tuvieron en cuenta los parámetros establecidos con respecto a la composición de la papilla por porcentajes. Tampoco se aplicó fibra de vidrio como rebozado.

## Objetivo

El propósito fue averiguar si las probetas de cascarilla elaboradas de forma intuitiva, sin tener en cuenta unos parámetros precisos de composición proporcional y medida de ingredientes, presentaban índices de resistencia distintos entre los tres grupos de pruebas: PW 50, Hispasil 1731 y Carsil 9

## Materiales utilizados

Para realizar estas pruebas se emplearon en la realización de la papilla los tres aglutinantes mencionados: PW 50, Hispasil 1731 y Carsil 9, mezclados con el refractario molturado Moloquita -200. En la realización de los rebozados, los mencionados: el grano de Moloquita 50-80dd y la fibra de vidrio triturada de 6mm.

## Procedimiento

Así pues el procedimiento siguió los siguientes pasos:

- Se elaboraron distintos tipos de papilla, usando como aglutinantes PW 50, Hispasil 1731 y Carsil 9, mezclando éstos con Moloquita-200, como hemos dicho sin utilizar medidas ni porcentajes.
- Cada tipo de papilla se aplicó sobre un cilindro de cera hueco de 19cm de largo.
- Los recubrimientos de cascarilla cerámica constaban de 5 capas: cada capa constaba de una aplicación de papilla y un rebozado de grano de Moloquita de 50-80dd.
- Se prepararon 4 probetas con cada tipo de recubrimiento.
- El secado se realizó mediante ventilación forzada.
- Los cilindros se cocieron a 750°C durante un tiempo total de 47,5 horas. Para el descerado y la posterior cocción de las probetas se utilizó, en ambos casos, un horno

Plamasó situado en la “Foneria”. La curva de cocción experimentada se corresponde con las siguientes etapas:

1. Una primera rampa de 3h 30m hasta 350°C para descerar y, el mismo día, una segunda rampa de 3h hasta 750°C (tiempo total 6h30).
2. Se mantuvo la temperatura constante a 750°C durante 24h.
3. Una tercera rampa de descenso de temperatura durante 17h hasta llegar a 200°C.
4. Tiempo total: 47,5 horas.

### Resultados

A continuación se realizó la prueba de resistencia tal y como se explicó anteriormente.

Tipo de Papilla		Resultado pruebas			
Aglutinante	Refractario	Peso mínimo Fractura (Kg)	Peso máximo Fractura (Kg)	Espesor de recubrimient o mínimo (mm)	Espesor de recubrimient o máximo (mm)
PW 50	Moloquita -200	5,551	6,895	2,4	3,5
Hispasil 1731	Moloquita -200	2,860	4,210	2,4	2,7
Silicato de sodio Carsil 9	Moloquita -200	19,827	35,630	3,0	3,8

Tabla II.22. Resultados del primer ensayo de pruebas de resistencia por flexión.

### Valoraciones y conclusión

A partir del ensayo se verificó que:

- Los cilindros de cada grupo (tipo de papilla) presentaron diferentes resultados de rotura, lo que se atribuyó a las diferencias en la consistencia de las papillas y a los distintos grosores de las paredes de los cilindros.
- La cascarilla elaborada con silicato de sodio, Carsil 9, fue la que presentó una mayor resistencia a la fractura. Con esta papilla se obtuvieron resultados muy dispares entre probetas.
- A continuación el grupo de pruebas realizado con PW 50 fue el segundo en resistencia y el segundo en disparidad de grosores.
- En último lugar quedó el grupo Hispasil 1731, obteniendo los valores más bajos pero también el rango inferior en cuanto a disparidad de resultados o desviación respecto a la media.

Durante la realización del ensayo se encontraron las siguientes diferencias que cabe destacar:

- La consistencia de la papilla de Carsil 9 fue mayor; con Carsil 9 se obtuvo una papilla más densa y menos fluida respecto de las otras dos papillas, lo cual generó un espesor de la pared más grueso aunque desproporcionadamente más resistente.
- La papilla hecha con Carsil 9, sin embargo, no gelificó aplicando un secado forzado con aire como lo hicieron las papillas realizadas con PW 50 y con Hispasil 1731; se sabía que una gelificación rápida se podía conseguir con la inyección de CO<sub>2</sub> (que no se empleó en este ensayo). Sin la inyección de este gas, las capas gelificaron lentamente. Al añadir cada nueva capa, el proceso de secado requería más tiempo, con el inconveniente que la papilla quedaba adherida a la mesa de trabajo, perdiéndose en consecuencia material sobre el cilindro.
- Otro inconveniente derivado de esta modalidad de uso de Carsil 9 fue que la mayoría de las probetas después de la cocción presentaban deformación. Por lo tanto de la

experiencia se dedujo la dificultad del uso del Carsil 9 sin dióxido de carbono inyectado y la conveniencia de su aplicación para conseguir un recubrimiento estable (Fig. II.17.).



Figura II.17. Cilindros de Carsil 9 deformados después de la cocción.

A partir de estos resultados y dadas las limitaciones para disponer de bombonas de CO<sub>2</sub> se descartó el uso del Carsil 9 como aglutinante para las próximas pruebas de resistencia. No obstante, se realizó una escultura con la papilla de Carsil 9 para contrastar el resultado obtenido con este aglutinante.

Se decidió que para la realización sistematizada del estudio de resistencia se utilizaría como aglutinante los productos de sílice coloidal: PW 50 y Hispasil 1731 y así se aplicó en las pruebas siguientes.

### II.7.1.3. PRUEBAS DE RESISTENCIA DE LA “FONERIA”: SEGUNDO ENSAYO DE RESISTENCIA CON PW 50 E HISPASIL 1731

#### Objetivo

En este apartado se pretendía averiguar cuales eran los tipos de recubrimiento más resistentes de entre los dos grupos experimentados; el grupo PW 50 o del grupo Hispasil 1731, considerando las variaciones de porcentajes y de temperatura de cocción.

#### Materiales e infraestructuras utilizadas

Para realizar estas pruebas se emplearon en la realización de la papilla los dos aglutinantes de sílice coloidal: PW 50, Hispasil 1731, mezclados con el refractario molturado Moloquita -200. Como ya se ha comentado, se descartó el uso del Carsil 9. En la realización de los rebozados, los mencionados: el grano de Moloquita 50-80dd y la fibra de vidrio triturada de 6mm.

Para este ensayo, se utilizó el horno de Plasasó ubicado en la “Foneria”, ver ap. II.7.1., p.102, con curvas de cocción graduales según las siguientes etapas:

1. Primera rampa de 5h hasta 500°C para desecar, y segunda rampa de 5h hasta 1200°C (tiempo total 10h).
2. Se mantuvo la temperatura constante a 1200°C durante 2h.
3. Tercera rampa de descenso de temperatura durante 14h hasta el enfriamiento a temperatura ambiente.

Temperatura (°C)	Tiempo de rampa Crecimiento (h)	Tiempo de Mantenimiento (h)	Tiempo total (h)
500	3	2	5
750	3	2	5
875	4	2	6
1000	6	2	8
1200	8	2	10

Tabla II.23. Progresión de las temperaturas de cocción del segundo ensayo.

## Planificación de las pruebas

Variantes a considerar (ver tabla II.24):

- Grupo de papillas: PW 50 + Moloquita-200 e (Hispasil 1731 + Moloquita-200).
- Porcentaje de participación de los ingredientes de la papilla (aglutinante % - refractario %): 35/65, 40/60, y 45/55.
- Modalidades de rebozados: rebozado con grano o rebozado mixto, este último alternando grano y fibra de vidrio.
- Temperaturas de cocción: 500°C, 750°C, 850°C, 1000°C, 1200°C.

Para realizar este ensayo se programaron diez tipos distintos de recubrimiento, cada tipo de recubrimiento fue editado dieciséis veces (se realizaron dieciséis cilindros por cada tipo de recubrimiento).

Se cocieron grupos de cuatro cilindros idénticos en cuatro cocciones realizadas a distintas temperaturas. Las cocciones se realizaron en sesiones distintas, a temperaturas diferentes 750°C, 875°C, 1000°C y 1200°C. Se realizó también una única cocción a 500°C para los tubos de cascarilla cerámica resueltos con PW 50 en una proporción 35/65%, cuatro tubos rebozados con grano y cuatro con grano más fibra.

Se prepararon un total de cuarenta y dos pruebas, y para llevarlas a cabo se moldearon más de ciento sesenta y ocho cilindros de cera, repitiendo alguna de las pruebas en varias ocasiones.

Véase el siguiente ejemplo:

El grupo de papilla resuelta con Hispasil 1731 y Moloquita-200, en un porcentaje 35/65, rebozado en las cinco capas con grano se coció a 750°C, 875°C, 1000°C y 1200°C. En cada cocción-temperatura se cocieron 4 tubos. 4 tubos por 4 cocciones dan un total de 16 tubos por grupo de pruebas (tipo de recubrimiento).

Propuesta de variantes experimentables de cascarilla cerámica			
Componentes de la papilla	Proporción (%) aglutinante/refractario	Rebozados	Temperatura cocción (°C)
<b>Aglutinante:</b> <b>sílice coloidal WP50</b> <b>+</b> <b>Refractario:</b> <b>Moloquita-200</b>	35/65	Grano	500
			750
			850
			1000
			1200
		Alternancia de grano y fibra de vidrio	500
			750
			850
	40/60	Grano	1000
			1200
			750
			850
		Alternancia de grano y fibra de vidrio	1000
			1200
			750
			850
	Grano	750	
		850	
		1000	
		1200	

	45/55	Alternancia de grano y fibra de vidrio	750
			850
			1000
			1200
<b>Aglutinante:</b> <b>sílice coloidal</b> <b>Hispasil 1731</b> <b>+</b> <b>Refractario:</b> <b>Moloquita-200</b>	35/65	Grano	750
			850
			1000
			1200
	40/60	Alternancia de grano y fibra de vidrio	750
			850
			1000
			1200
		Grano	750
			850
			1000
			1200

Tabla II.24. Tabla de variantes experimentales, propuesta de trabajo.

### Procedimiento

Elaboración de las probetas: se realizaron los recubrimientos siguiendo el procedimiento descrito al principio del ap. II.7.1., p. 102.

Los cilindros de cera se recubrieron con cinco capas de papilla aplicada con pincel además de los dos tipos de rebozado: con Moloquita 50-80dd aplicado en cada capa, o con alternancia de rebozados de grano y de fibra de vidrio (tres capas de grano y dos de fibra), (Fig. II.18.). Se secaron y cocieron como se ha explicado anteriormente.



Figura II.18. Cilindros de cascarilla cerámica recubiertos con sólo rebozado de Moloquita 50-80dd (cilindro de arriba), cilindro con introducción de fibra de vidrio (cilindro de abajo).

Todos los recubrimientos obtenidos a partir de la tabla II.24 se sometieron a las pruebas de flexión descrita al principio del ap. II.7.1 hasta alcanzar la rotura. Se anotaron los resultados. Dado que la resistencia de cada probeta tiene una relación directa con el grueso de pared de la misma, también se procedió a medir los grosores de pared de cada probeta para poder relacionar estos dos aspectos de las pruebas.

### Procedimiento de medida del espesor de la cascarilla cerámica

En todos los recubrimientos experimentados se midió el espesor de la cascarilla cerámica con un pie de rey digital y se guardó registro del mismo.



Figura II.19. Cilindros después de la rotura (izquierda). Vista frontal de la rotura del cilindro (derecha).

Dado que el espesor de la cascarilla cerámica de cada probeta era irregular, la medida se realizó en la zona de rotura, tomando en cada sección de rotura de la probeta dos medidas de espesor, una medida en la parte más fina y otra en la más gruesa (Fig. II.19.).

Se midieron todos las probetas tubulares, calculando las medias de las medidas de los espesores en los puntos más finos y lo mismo para las medidas de la parte más gruesa, a su vez se calculó la media de grosores de las probetas correspondientes a cada prueba y se añadió una columna de desviaciones entre medias de los grosores máximos del aro (o sección de la probeta) y los grosores mínimos de aro.

#### II.7.1.3.1. VALORACIONES Y CONCLUSIONES CON RESPECTO A LA RESISTENCIA CONSIDERANDO LOS GRUPOS DE PORCENTAJES

En la tabla II.25. se agrupan los resultados de resistencia por grupos de porcentajes de composición de las papillas, en primer lugar todos los 35/65%, en segundo lugar los 40/60% y en tercer lugar los 45/55%.

Recubrimientos	Papilla Porcentaje %	Fuerza de rotura en peso para cada temperatura de cocción (Kg)				
		500 °C	750 °C	875°C	1000 °C	1200 °C
	<b>Aglutinante/ Refractario</b>					
<b>PW 50</b>	35/65	15,20	16,37	26,85	59,45	79,77
<b>Hispasil 1731</b>	35/65		11,45	13,72	27,75	51,46
<b>PW 50 + F.v.</b>	35/65	18,20	15,40	25,35	43,17	54,60
<b>Hispasil 1731 + F.v.</b>	35/65		12,77	13,12	22,80	39,30
<b>PW 50</b>	40/60		15,00	18,90	37,07	49,12
<b>Hispasil 1731</b>	40/60		10,60	9,90	17,15	45,97
<b>PW 50 + F.v.</b>	40/60		16,00	19,05	27,95	36,15
<b>Hispasil 1731 + F.v.</b>	40/60		9,85	11,60	15,15.	29,55
<b>PW 50</b>	45/55		13,50	15,59	26,35	43,13
<b>Hispasil 1731</b>	45/55	-----				
<b>PW 50 + F.v.</b>	45/55		14,45	16,82	22,50	30,81
<b>Hispasil 1731 + F.v.</b>	45/55	-----				

Tabla II.25. Tabla de resultados índice de rotura (en peso) en función del tipo de mezcla y la temperatura de cocción.\*Las pruebas del grupo Hispasil 1731 en porcentaje 45/55% no se consideraron viables para realizar los recubrimientos.

Es importante destacar que, con porcentajes idénticos en la composición de las papillas, el grupo de pruebas en el que se ha utilizado PW 50, casi siempre resulta más resistente que el grupo de pruebas correspondiente al Hispasil 1731 y además a mayor temperatura de cocción el grado de resistencia aumenta.

### II.7.1.3.2. VALORACIONES Y CONCLUSIONES CON RESPECTO A LA RESISTENCIA CONSIDERANDO LA PARTICIPACIÓN DE SÍLICE EN LA PAPILLA

Considerando que la papilla está compuesta de harina de Moloquita -200 y sílice coloidal, y dado que la sílice coloidal está constituida por partículas de sílice dispersas en agua, en la papilla se pueden distinguir tres componentes en porcentajes distintos: Moloquita -200, partículas de sílice y agua. Por esta razón se establece en las tablas siguientes una columna con los porcentajes de partículas de sílice presente en la papilla. Los porcentajes de partículas de sílice se han deducido aplicando sobre el porcentaje de participación de sílice coloidal en la papilla, el porcentaje de partículas de sílice presente en cada producto: 50% en el PW 50 y 30% en el Hispasil 1731.

Recubrimientos	Papilla %	Papilla %	Fuerza de rotura en peso para cada temperatura de cocción (Kg)				
			500 °C	750 °C	875°C	1000 °C	1200 °C
	<b>Aglutinante/ Refractario</b>	<b>Partículas de sílice</b>					
<b>PW 50</b>	35/65	17'5	15,20	16,37	26,85	59,45	79,77
<b>PW 50 + F.v.</b>	35/65	17'5	18,20	15,40	25,35	43,17	54,60
<b>PW 50</b>	40/60	20'0		15,00	18,90	37,07	49,12
<b>PW 50 + F.v.</b>	40/60	20'0		16,00	19,05	27,95	36,15
<b>PW 50</b>	45/55	22'5		13,50	15,59	26,35	43,13
<b>PW 50 + F.v.</b>	45/55	22'5		14,45	16,82	22,50	30,81

Tabla II.26. Tabla de resultados del ensayo de resistencia para PW 50 en función de los porcentajes de participación en la papilla de sílice.

En la tabla II.26., se observa que, en los ensayos realizados con PW 50, a menor porcentaje de sílice y también de sílice coloidal, mayor es el grado de resistencia obtenido, es decir, este porcentaje es inversamente proporcional a la resistencia de la cáscara obtenida.

Recubrimientos	Papilla %	Papilla %	Fuerza de rotura en peso para cada temperatura de cocción (Kg)				
			500 °C	750 °C	875°C	1000 °C	1200 °C
	<b>Ligante/ refractario</b>	<b>Partículas de sílice</b>					
<b>Hispasil 1731</b>	35/65	10'5		11,45	13,72	27,75	51,46
<b>Hispasil 1731 + F.v.</b>	35/65	10'5		12,77	13,12	22,80	39,30
<b>Hispasil 1731</b>	40/60	12'2		10,60	9,90	17,15	45,97
<b>Hispasil 1731 + F.v.</b>	40/60	12'2		9,85	11,60	15,15.	29,55
<b>Hispasil 1731</b>	45/55		No experimentados				
<b>Hispasil 1731 + F.v.</b>	45/55		No experimentados				

Tabla II.27. Tabla de resultados del ensayo de resistencia para Hispasil 1731 ordenada en función de los porcentajes de participación de sílice.

En la tabla II.27., se observa también que cuando se utiliza Hispasil 1731, a menor porcentaje de sílice y también de sílice coloidal, mayor es el grado de resistencia obtenido, es decir, como

en el caso anterior, este porcentaje es inversamente proporcional a la resistencia de la cáscara obtenida.

Por lo tanto, en ambos casos la proporción presente de sílice es inversamente proporcional a la resistencia obtenida, en consecuencia se deduce que la proporción de Moloquita -200 presente en la papilla es directamente proporcional a la resistencia de la cascarilla cerámica.

Si se ordenan los resultados de las tablas II.26. y II.27. según los porcentajes de sílice empleados, tabla II.28.:

Recubrimientos	Papilla %	Papilla %	Fuerza de rotura en peso para cada temperatura de cocción (Kg)				
			500 °C	750 °C	875°C	1000°C	1200°C
	aglutinante/ refractario	Partículas de sílice					
Hispasil 1731	35/65	10'5		11,45	13,72	27,75	51,46
Hispasil 1731 +F.v.	35/65	10'5		12,77	13,12	22,80	39,30
Hispasil 1731	40/60	12'2		10,60	9,90	17,15	45,97
Hispasil 1731 +F.v.	40/60	12'2		9,85	11,60	15,15	29,55
Hispasil 1731	45/55		No experimentados				
Hispasil 1731 +F.v.	45/55		No experimentados				
PW 50	35/65	17'5	15,20	16,37	26,85	59,45	79,77
PW 50 + F.v.	35/65	17'5	18,20	15,40	25,35	43,17	54,60
PW 50	40/60	20'0		15,00	18,90	37,07	49,12
PW 50 + F.v.	40/60	20'0		16,00	19,05	27,95	36,15
PW 50	45/55	22'5		13,50	15,59	26,35	43,13
PW 50 + F.v.	45/55	22'5		14,45	16,82	22,50	30,80

Tabla II.28. Tabla de resultados de ambos grupos ordenada en función de los porcentajes de participación de sílice.

Se puede observar que al cambiar de Hispasil 1731 (que presenta menos proporción de sílice) a PW 50, la resistencia a la rotura aumenta aún pasando de utilizar un 12,2% a un 17,5% de sílice coloidal. Por lo tanto no es posible generalizar afirmando que a menor presencia de sílice siempre se obtiene mayor resistencia y a mayor presencia de Moloquita -200 mayor resistencia, y hará falta restringir esta afirmación sólo dentro de cada grupo.

Ésto lleva a plantear que existen otros factores que determinan el grado de resistencia a la rotura. Se desconocen cuáles pueden ser pero se sabe que existen diferencias entre ambos productos en cuanto al tamaño de la partícula de sílice en suspensión. Si éste fuera el factor determinante, en este caso y como hipótesis de futuros trabajos, se podría entender que cuanto mayor es el grueso de la partícula mayor es la resistencia obtenida.

#### II.7.1.3.3. VALORACIONES Y CONCLUSIONES CON RESPECTO A LA RESISTENCIA CONSIDERANDO LA TEMPERATURA DE COCCIÓN

Recubrimiento	Papilla % aglutinante+refractario	Partículas de sílice (%)	Media del grosor recubrimiento (mm)	750 °C Fuerza de rotura en peso (Kg)
PW 50	35/65	17,5	3,25	16,37
PW 50 + F.v.	40/60	20,0	3,49	16,00
PW 50 + F.v.	35/65	17,5	3,56	15,40
PW 50	40/60	20,0	3,05	15,00

<b>PW 50 + F.v.</b>	45/55	22,5	4,13	14,45
<b>PW 50</b>	45/55	22,5	3,11	13,50
<b>Hispasil 1731 + F.v.</b>	35/65	10,5	3,22	12,77
<b>Hispasil 1731</b>	35/65	10,5	3,15	11,45
<b>Hispasil 1731</b>	40/60	12,2	3,68	10,60
<b>Hispasil 1731 + F.v.</b>	40/60	12,2	3,44	9,85

Tabla II.29. Tabla de resultados de las pruebas cocidas a 750°C, ordenados de mayor a menor resistencia.

<b>Recubrimiento</b>	<b>Papilla % aglutinante+refractario</b>	<b>Partículas de sílice (%)</b>	<b>Media del grosor recubrimiento (mm)</b>	<b>875 °C Fuerza de rotura en peso (Kg)</b>
<b>PW 50</b>	35/65	17,5	3,25	26,85
<b>PW 50 + F.v.</b>	35/65	17,5	3,56	25,35
<b>PW 50 + F.v.</b>	40/60	20,0	3,49	19,05
<b>PW 50</b>	40/60	20,0	3,05	18,90
<b>PW 50 + F.v.</b>	45/55	22,5	4,13	16,82
<b>PW 50</b>	45/55	22,5	3,11	15,59
<b>Hispasil 1731</b>	35/65	10,5	3,22	13,72
<b>Hispasil 1731+F.v.</b>	35/65	10,5	3,15	13,12
<b>Hispasil 1731+F.v.</b>	40/60	12,2	3,68	11,60
<b>Hispasil 1731</b>	40/60	12,2	3,44	9,90

Tabla II.30. Tabla de resultados de las pruebas cocidas a 875°C, ordenados de mayor a menor resistencia.

En las dos tablas, II.29. y II.30., que presentan los resultados de las pruebas cocidas a 750°C y 875°C respectivamente, el mejor resultado de resistencia se obtuvo con el recubrimiento resuelto con PW 50 en la mezcla de proporción 35/65% y rebozado íntegramente con grano. Cuando se utilizó Hispasil 1731, el mejor resultado en cuanto a resistencia a la rotura, se obtuvo también con este porcentaje.

En las pruebas cocidas a 750°C y a 875°C los recubrimientos que utilizaban PW 50 son todos ellos más resistentes que aquellos en los que se utilizaba Hispasil 1731.

En general, tanto a 750°C como a 850°C los valores de resistencia de los cilindros resueltos con cinco capas, tres de grano y dos capas de fibra o la de los cilindros resueltos íntegramente con grano varían muy poco.

Con las proporciones de mezcla 40/60%, y 45/55%, la resistencia de los rebozados con fibra fue ligeramente superior a los rebozados de grano. Se debería tener en cuenta el posible margen de error debido al grosor, por ejemplo el rebozado con fibra tiene un espesor mayor, tabla II.31, lo cual influye sin lugar a dudas. Si se considera esta desviación de grosor, se observa que los resultados con fibra son menos resistentes que los resueltos con grano.

<b>Recubrimiento</b>	<b>Papilla % aglutinante+refractario</b>	<b>Partículas de sílice (%)</b>	<b>Media del grosor recubrimiento (mm)</b>	<b>1000 °C Fuerza de rotura en peso (Kg)</b>
<b>PW 50</b>	35/65	17,5	3,25	59,45
<b>PW 50 + F.v.</b>	35/65	17,5	3,56	43,17
<b>PW 50</b>	40/60	20,0	3,05	37,07
<b>PW 50 + F.v.</b>	40/60	20,0	3,49	27,95

<b>Hispasil 1731</b>	35/65	10,5	3,22	27,75
<b>PW 50</b>	45/55	22,5	3,11	26,35
<b>Hispasil 1731+F.v.</b>	35/65	10,5	3,15	22,80
<b>PW 50 + F.v.</b>	45/55	22,5	4,13	22,50
<b>Hispasil 1731</b>	40/60	12,2	3,44	17,15
<b>Hispasil 1731+F.v.</b>	40/60	12,2	3,68	15,15

Tabla II.31. Tabla de resultados de las pruebas cocidas a 1000°C, ordenados de mayor a menor resistencia.

A 1000°C, como se muestra en la tabla II.31., se sigue cumpliendo la regla de proporcionalidad inversa en cuanto a la presencia de sílice, a mayor presencia de sílice menor resistencia y en consecuencia, a mayor presencia de Moloquita -200, en la papilla, mayor resistencia.

También se sigue observando que con el PW 50 se consiguieron los mejores resultados, aunque no se mantuvo así para todos los recubrimientos. No todos los recubrimientos con PW 50 fueron más resistentes que los realizados con Hispasil 1731. Al incrementar la temperatura, cociendo a 1000°C, el recubrimiento Hispasil 1731, en porcentajes 35/65%, con 10,5 % de sílice, fue más resistente que el PW 50 en la proporción 45/55% con 22,5 % de sílice, y lo mismo ocurrió cuando llevaban fibra de vidrio.

<b>Recubrimiento</b>	<b>Papilla % aglutinante+refractario</b>	<b>Partículas de sílice (%)</b>	<b>Media del grosor recubrimiento (mm)</b>	<b>1200 °C Fuerza de rotura en peso (Kg)</b>
<b>PW 50</b>	35/65	17,5	3,25	79,77
<b>PW 50 + F.v.</b>	35/65	17,5	3,56	54,60
<b>Hispasil 1731</b>	35/65	10,5	3,44	51,46
<b>PW 50</b>	40/60	20,0	3,05	49,12
<b>Hispasil 1731</b>	40/60	12,2	3,22	45,97
<b>PW 50</b>	45/55	22,5	3,11	43,13
<b>Hispasil 1731+ F.V.</b>	35/65	10,5	3,15	39,30
<b>PW 50 + F.v.</b>	40/60	20,0	3,50	36,15
<b>PW 50 + F.v.</b>	45/55	22,5	4,13	30,81
<b>Hispasil 1731+F.v.</b>	40/60	12,2	3,68	29,53

Tabla II.32. Tabla de resultados de las pruebas cocidas a 1200°C, ordenados de mayor a menor resistencia.

En la cocción a 1200°C, tabla II.32, se puede observar que los valores de resistencia siguen incrementándose para los dos grupos de pruebas y de forma considerable para el grupo Hispasil 1731. Esto condujo a valorar la posibilidad de continuar haciendo alguna prueba de resistencia a temperaturas más elevadas, como por ejemplo a 1300°C, considerando el uso de la cáscara como material escultórico.

A 1200°C, se obtuvo un mejor resultado con PW 50 (35/65%) con rebozado de grano, le sigue en el mismo grupo PW 50 (35/65%) con rebozado de fibra, sin embargo, el tercer mejor resultado en resistencia a la rotura se obtuvo con Hispasil 1731 (35/65%) con rebozado de grano. A 1000°C y 1200°C los porcentajes de 40/60% y 45/55% con rebozado sólo de grano de Moloquita 50-80dd tuvieron una resistencia que superó con mucha diferencia el recubrimiento que incorporaba el rebozado de fibra. Los valores más bajos de resistencias correspondieron a las pruebas con fibra, exceptuando la mencionada de PW 50 (35/65%). Las fibras manifestaron una tendencia a la baja con el incremento de temperaturas, aunque en general el valor de resistencia de los rebozados se incrementó al aumentar la temperatura de cocción.

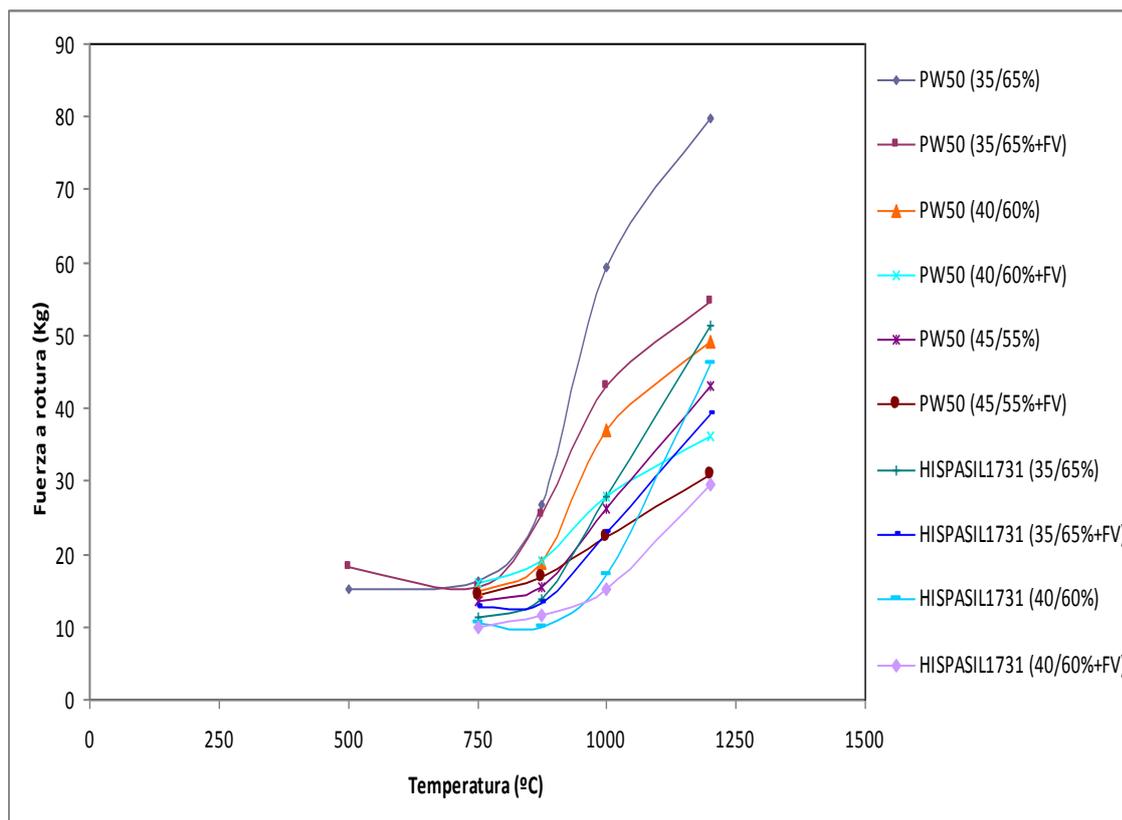


Gráfico II.1. Gráfico de curvas obtenidas a partir de los resultados de la resistencia por flexión de las pruebas de la "Foneria". Probetas resueltas con un recubrimiento de 5 capas.

Observando los fragmentos de curvas registrados en el gráfico II.1, las curvas obtenidas parecen tener una lógica de comportamiento que probablemente se puedan ratificar con los datos obtenidos en las futuras pruebas de confirmación de resultados. Se puede suponer que estas curvas sinuosas podrían manifestar su punto álgido por entorno a los 1200°C, y su punto de inflexión mínimo entorno a los 750°C, esto indujo a continuar con las pruebas para esbozar en el gráfico una información más completa respecto al comportamiento con los puntos máximos y mínimos de resistencia incluidos.

#### Resultados de las pruebas de resistencia por flexión de la "Foneria".

La tabla II.33. recoge los resultados de la rotura.

Recubrimientos	Papilla %	Fuerza de rotura en peso para cada temperatura de cocción (Kg)				
		500 °C	750 °C	875°C	1000 °C	1200 °C
PW 50	35/65	15,20	16,37	26,85	59,45	79,77
PW 50 + F.v.	35/65	18,20	15,40	25,35	43,17	54,60
PW 50	40/60		15,00	18,90	37,07	49,12
PW 50 + F.v.	40/60		16,00	19,05	27,95	36,15
PW 50	45/55		13,50	15,59	26,35	43,13
PW 50 + F.v.	45/55		14,45	16,82	22,50	30,81
Hispasil 1731	35/65		11,45	13,72	27,75	51,46
Hispasil 1731 + F.v.	35/65		12,77	13,12	22,80	39,30
Hispasil 1731	40/60		10,60	9,90	17,15	45,97
Hispasil 1731 + F.v.	40/60		9,85	11,60	15,15.	29,53

Tabla II.33. Tabla de resultados, índice de rotura (en peso) en función del tipo de mezcla y la temperatura de cocción. (Las pruebas del grupo Hispasil 1731 en porcentaje 45/55% no se consideraron viables para realizar los recubrimientos).

**Resultados de los grosores de pared de las probetas de las pruebas de la "Foneria".**

Recubrimientos	Papilla (%) aglutinante/ refractario	Densidades de las papillas (g/cm <sup>3</sup> )	Espesor de los cilindros (mm)	Valor promedio espesor de los cilindros (mm)	Desviación espesor máximo y mínimo (mm)
PW 50	35/65	2.010	2,93- 3,58	3'25	0,60
PW 50 + F.v.	35/65	2.010	3,17- 3,95	3'56	0,78
PW 50	40/60	1.940	2,73- 3,38	3'05	0,68
PW 50 + F.v.	40/60	1.940	2,91- 4,08	3'49	1,17
PW 50	45/55	1.860	2,50- 3,73	3'11	1,23
PW 50 + F.v.	45/55	1.860	3,47- 4,79	4'13	1,32
Hispasil 1731	35/65	1.860	2,82- 3,63	3'22	0,81
Hispasil 1731 + F.v.	35/65	1.860	2,74- 3,57	3'15	0,83
Hispasil 1731	40/60	1.780	2,81- 4,08	3'44	1,27
Hispasil 1731 + F.v.	40- 60	1.780	3,11- 4,26	3'68	1,15

Tabla II.34 .Tabla de resultados de los grosores de las cáscaras agrupados por bloques de PW 50 y de Hispasil 1731. (Las pruebas del grupo Hispasil 1731 en porcentaje 45/55% no se consideraron viables para realizar los recubrimientos).

Los valores de grosor reflejados en la tabla II.34, varían ligeramente. El cuadro de grosores sirve para relacionar los resultados de resistencia con los de grosor.

**II.7.1.3.4. VALORACIONES Y CONCLUSIONES CON RESPECTO A LA RESISTENCIA CONSIDERANDO LA RELACIÓN ENTRE GROSORES DE PARED Y RESISTENCIAS DE LAS PROBETAS.**

El espesor de las paredes de las probetas esta condicionado por:

- El tipo de papilla utilizada, sea ésta más densa (menos fluida) o menos densa.
- El tipo de rebozado aplicado, sea este de grano o de fibra.
- El número de capas y las combinatorias posibles.
- La variabilidad que ofrece la aplicación manual con pincel.
- Y otros factores ambientales, como la temperatura o el grado de humedad ambiental que, a pesar de su importancia, no se han podido contemplar en esta investigación.

El valor de rotura de cada cilindro varía entre los cuatro ensayos de las mismas características, pero en la mayoría de los casos la desviación estándar es inferior al 10%.

El primer aspecto que llama la atención en relación a los grosores de las paredes de las probetas nos permite relacionar la densidad de las papillas con los grosores obtenidos:

La papilla con una concentración de 35% de aglutinante y 65% de refractario (35/65%) es más densa (menos fluida), dando un grueso medio de recubrimiento con grano de 3,25mm. La papilla 45/55 es menos densa (más fluida), el grueso medio del recubrimiento obtenido con grano es de 3,11mm.

Se encuentra la excepción en la 40/60% donde el grueso medio del recubrimiento obtenido con grano es de 3,05mm, y lo mismo pasa cuando se observa los recubrimientos con fibra; existe alguna desviación. Pero la tendencia general parece ser la comentada.

En la papilla más densa la oscilación media entre medidas efectuadas en un cilindro es de unos +0,6mm mientras que en la papilla más líquida, el espesor es más irregular, menos

estable sobre la superficie, con una oscilación media de grosores situada entre  $\pm 1,15$  y  $\pm 1,17$ mm, (tabla II.35.).

En resumen, los recubrimientos con papilla dan resultados coherentes, en el sentido de que a mayor densidad mayor capa de papilla, y a menor densidad menor capa de papilla, salvo excepciones. Papillas más densas y menos fluidas suelen dar recubrimientos de mayor espesor que las menos densas y más fluidas. En cualquier caso, sirve como sistema de orientación que una papilla con un porcentaje más alto de refractario tendrá un espesor mayor que otra con menor porcentaje.

Se comprobó que el resultado de los espesores de las probetas concuerda con los valores obtenidos en el ensayo del ap. II.4., p. 87, (Pruebas de espesor y peso de las capas de cascarilla cerámica).

Recubrimientos	A	B	C	Índice de rotura en peso para cada temperatura de cocción (Kg)				
				500 °C	750 °C	875°C	1000 °C	1200 °C
PW 50	35/65	3,25	$\pm 0,60$	15,20	16,37	26,85	59,45	79,77
PW 50 + F.v.	35/65	3,56	$\pm 0,78$	18,20	15,40	25,35	43,17	54,60
PW 50	40/60	3,05	$\pm 0,68$		15,00	18,90	37,07	49,12
PW 50 + F.v.	40/60	3,49	$\pm 1,17$		16,00	19,05	27,95	36,15
PW 50	45/55	3,11	$\pm 1,23$		13,50	15,59	26,35	43,13
PW 50 + F.v.	45/55	4,13	$\pm 1,32$		14,45	16,82	22,50	30,81
Hispasil 1731	35/65	3,22	$\pm 0,81$		11,45	13,72	27,75	51,46
Hispasil 1731 + F.v.	35/65	3,15	$\pm 0,83$		12,77	13,12	22,80	39,30
Hispasil 1731	40/60	3,44	$\pm 1,27$		10,60	9,90	17,15	45,97
Hispasil 1731 + F.v.	40/60	3,68	$\pm 1,15$		9,85	11,60	15,15	29,53

Columna A: % Componentes de la papilla, ligante/ refractario  
Columna B: Media del grosor de los recubrimientos (mm)  
Columna C: Desviaciones entre las diferencias de grosor (mm)

Tabla II.35. Valores de grosor de los cilindros y su resistencia variando el grado de cocción.

Con respecto a la utilización de la fibra de vidrio, se observa en la imagen izquierda de la Fig. II.20., que su aplicación en la cascarilla cerámica aporta mayor espesor al recubrimiento salvo alguna excepción (en el caso del Hispasil 1731 (35/65%) da un resultado de 3,22mm, mientras que con fibra da 3,15mm).

No obstante la fibra no aporta más resistencia que el rebozado de grano de Moloquita, salvo algunas excepciones en que los recubrimientos con fibra han resultado más resistentes, es el caso de la mezcla Hispasil 1731 + Fv (40/60%) a 875°C que soporta 11,60 Kg de media, mientras que este recubrimiento sin fibra soporta 9,90 Kg de media, también para la mezcla de PW 50 + Fv (45/55%) a 750°C el resultado es de 14,45 Kg, y sin fibra de 13,5 Kg; el PW 50 + Fv (45/55%) a 850°C presenta un grado de resistencia de 16'82 Kg, y sin fibra 15,59 Kg, y el caso del PW 50 + Fv (40/60%) a 750°C soporta 16 Kg mientras que sin fibra soporta 15 Kg.

Por el contrario, con el rebozado de grano de Moloquita 50-80dd se obtiene una cascarilla cerámica más compacta y más resistente salvo en las excepciones mencionadas anteriormente. No se ha podido explicar la razón de estas excepciones, al menos por el momento. Se podrían atribuir a las desviaciones de los espesores y de hecho se observan desviaciones en cuanto a los espesores, pero no resultan convincentes.

En cuanto al espesor de los cilindros, cabe destacar la importancia del número de capas aplicadas y las combinatorias posibles; en este caso el número de capas son cinco y las combinatorias posibles son las mencionadas. Cinco capas de grano o capas alternas de grano y fibra.

Queremos destacar que debido a su aplicación manual, los espesores varían dentro del mismo cilindro (y de uno a otro) en 2 a 4 décimas de milímetro. Por ejemplo, en un cilindro hecho con PW 50 de 35/65% el grosor está entre 4,2mm y 4,5mm.

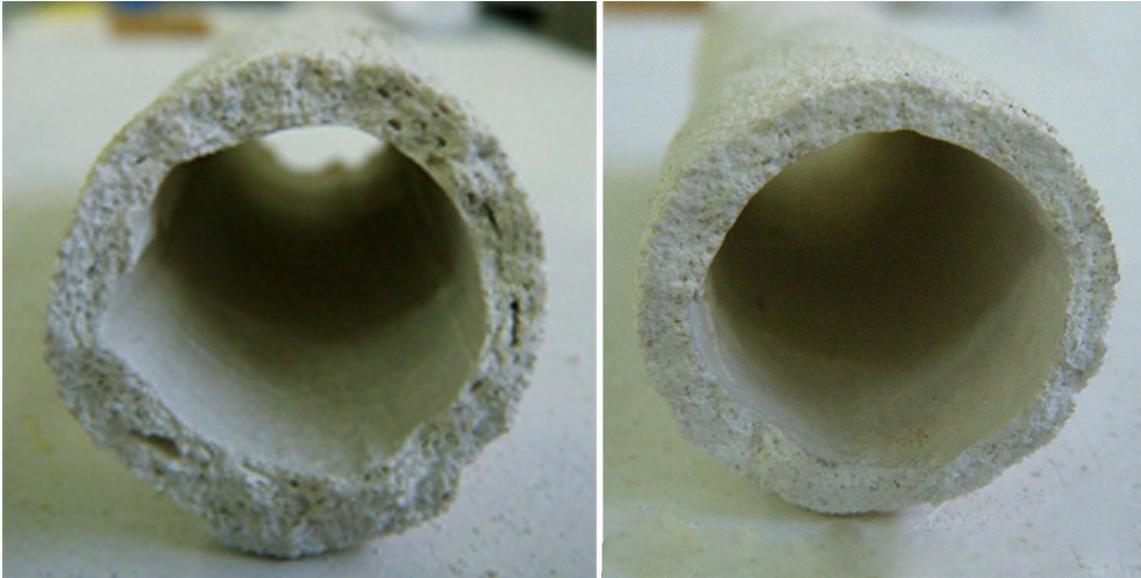


Figura II.20. Diferencia de grosor del cilindro de cascarilla con fibra de vidrio de cinco capas (izquierda), y el cilindro de cascarilla sólo con rebozado de grano de cinco capas (derecha).

#### II.7.1.4. ENSAYO DE RESISTENCIA DE LA CASCARILLA CERÁMICA A 100°C

A partir del segundo ensayo de resistencia desarrollado en la “Foneria”, expuesto en el apartado anterior, y de los resultados obtenidos sobre las pruebas realizadas con recubrimientos que incorporan fibra de vidrio cocida a 500°C, se pudo comprobar que los resultados eran más resistentes que los obtenidos con la cocción de 750°C. No ocurría lo mismo cuando la cascarilla no llevaba fibra, resultando un poco menos resistente en la cocción a 500°C (tabla II.35).

Pareció lógico plantearse entonces la cocción a una temperatura inferior a 500°C. Ya que el modelo de cera recubierto por la cascarilla suele fundir a partir de los 60°C<sup>100</sup> se plantearon hacer varios ensayos cociendo a 100°C. Se procedió a comparar la resistencia de la cascarilla cocida a esta temperatura con y sin fibra de vidrio, de esta manera se podría valorar la resistencia de la cascarilla en ese punto, dependiendo de la integración de un rebozado distinto.

Las probetas se prepararon con cilindros, con el mismo sistema que el desarrollado hasta ahora.

Este ensayo se hizo sólo utilizando PW 50 en la proporción 35/65%, igual que en el ensayo de cocción a 500°C. Los cilindros se recubrieron con cinco capas de papilla y cinco de rebozado con grano de Moloquita 50-80dd, paralelamente se hizo el ensayo correspondiente con cinco capas de rebozado, dos de ellas de fibra de vidrio (cortada a 6 mm).

El descerado de los cilindros se hizo con un horno eléctrico, con los 100°C alcanzados, esta temperatura permitió descerar el cilindro y eliminar el agua de la cascarilla (el agua aportada por la sílice coloidal), consiguiendo un calentamiento homogéneo de toda la superficie de los cilindros. Cada cilindro se sometió a prueba de rotura obteniendo los resultados recogidos en la tabla II.36.

---

<sup>100</sup> La cera citada es una mezcla preparada en el taller a partir de 50% de cera virgen de abejas, 20% de parafina y 30% de colofonia. El intervalo de fusión de la mezcla se sitúa en torno a los 60°C. Intervalo de fusión de la cera virgen de abeja 61-66°C, el de la parafina utilizada se sitúa en torno a los 60°C y el de la colofonia entre 100-150°C.

Fuerza de rotura en peso (Kg)					
		Recubrimiento 1º sin fibra	Espesor 1	Recubrimiento 2º con fibra	Espesor 2
Ensayos	1	14,10	3 mm	16,20	3,4 mm
	2	17,00	3,2 mm	23,20	4,1 mm
	3	15,30	3 mm	18,30	3,6 mm
	4	12,70	3 mm	23,20	4,1 mm
Promedio		14,77	3,5 mm	20,22	3,8 mm

Tabla II.36. Resultados de flexión de los dos recubrimientos sin y con fibra de vidrio.

Se comprobó que la fibra de vidrio sin calcinar presentaba una resistencia mayor respecto a la cascarilla cerámica sin fibra. Se opinó que esto ocurría porque a 100°C la fibra no ha sido alterada por el calor y no ha modificado su resistencia, Con esta prueba y las realizadas a 500°C se confirmó la utilidad de la fibra como refuerzo a bajas temperaturas<sup>101</sup>, (grafico II.2.). En la tabla II.37., se pueden observar, para las cocciones entre 100°C y 750°C, los valores crecientes en los resultados de la resistencia a la rotura de la cascarilla resuelta exclusivamente con grano de Moloquita y los valores decrecientes cuando se utiliza la fibra.

Grupo	Porcentajes de los componentes de la papilla % Aglutinante/ refractario	Fuerza de rotura en peso para cada temperatura de cocción (Kg)					
		100 °C	500 °C	750 °C	875°C	1000°C	1200°C
PW 50 + G	35/65	14,77	15,20	16,37	26,85	59,45	79,77
PW 50 + F.v.	35/65	20,22	18,20	15,40	25,35	43,17	54,60

Tabla II.37. Resistencia a la rotura de las probetas con PW 50 35/65% en función de la temperatura de cocción.

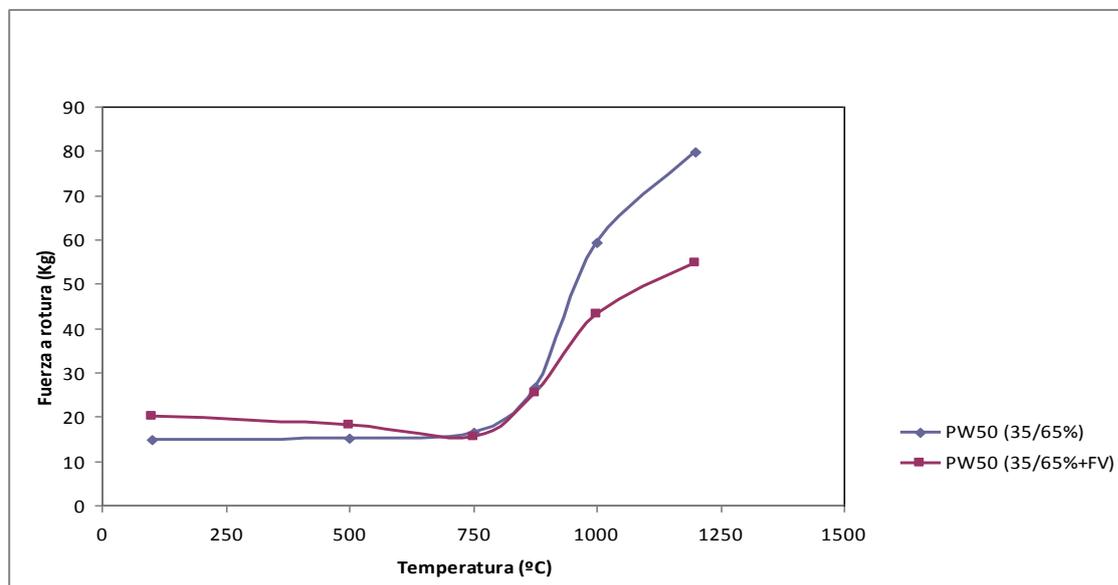


Gráfico II.2. Gráfica con la curva de resistencia de las probetas con PW 50 35/65 en función de la temperatura de cocción.

<sup>101</sup> Para el descerado de la cascarilla cerámica de fundición la introducción de la fibra ha demostrado ser útil, pero como se ha visto en los ensayos anteriores, la resistencia empieza a reducirse cada vez que se aumenta el grado de cocción. Para estas prácticas de fundición se superan los 600°C, con lo que la cáscara alcanza una resistencia inferior (entre un 20 y un 25 % menos) a la que se obtiene cuando está cruda.

### II.7.1.5. VALORACIONES Y CONCLUSIONES FINALES DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA REALIZADAS EN LA “FONERIA” CON RESPECTO AL ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE PW 50 Y HISPASIL 1731

Como se ha comentado el PW 50 se distribuye comercialmente con una concentración de sílice coloidal del 50%, el resto es fundamentalmente agua, y con un grueso de partícula del 50nm. El Hispasil 1731 se distribuye comercialmente con una concentración de sílice del 30% y un tamaño de partícula de 7nm. Por lo tanto, este último presenta mayor proporción de agua, menor proporción de sílice y menor tamaño de partícula.

El PW 50, en comparación con el Hispasil 1731, como se ha podido observar en este capítulo permite obtener una mayor variedad de papillas en cuanto a proporciones de la mezcla de componentes. El menor porcentaje de agua del PW 50 posibilita las papillas con una composición de 35/65%, 40/60% y 45/65%. Es lógico suponer que el mayor porcentaje de agua presente en el Hispasil 1731 diluye excesivamente las papillas y aún permitiendo la mezcla 45/65%, ésta es excesivamente fluida para su aplicación en recubrimientos.

El porcentaje total de sílice en las papillas experimentadas en las que participa el PW 50 es mayor que el porcentaje presente en las papillas en las que se utiliza Hispasil 1731 (véase Tabla II.28., p. 115).

La papilla hecha con PW 50 mantiene el refractario en suspensión durante más tiempo que la realizada con Hispasil 1731. En esta última la harina precipita con mayor rapidez.

Para ambos tipos de sílice coloidal, cuánto más elevada es la temperatura de cocción de la cascarilla, considerando sólo el tramo situado entre 750°C y 1200°C, mayor es la resistencia obtenida en las pruebas de rotura por flexión.

Si se comparan en las tablas proporciones idénticas de producto en la elaboración de papillas de ambos grupos de productos, los recubrimientos resultantes siempre son más resistentes cuando se utiliza el PW 50. En general, tal y como resulta de los ensayos realizados, los recubrimientos en los que interviene el producto PW 50 son más resistentes que aquellos en los que interviene Hispasil 1731, salvo dos curiosas excepciones en los ensayos de las piezas cocidas a 1000°C y en cuatro de las piezas cocidas a 1200°C. Al aumentar la temperatura de cocción, el Hispasil incrementa considerablemente la resistencia (véase la tabla II.25. p.113).

La cantidad total de sílice presente en las papillas experimentadas tiene una relación inversa con los resultados en la pruebas de resistencia, es decir, a mayor cantidad de sílice coloidal menor grado de resistencia (con independencia del grupo de papillas que se considere, sea el grupo de PW 50 o el de Hispasil 1731).

Si se observan los resultados de ambos grupos (PW 50 y Hispasil 1731) en una sola tabla, II.28., p.115, esta constante inversa no se mantiene exactamente de forma lineal al aumento de proporción de sílice, (Obsérvese en la tabla II.28., que las pruebas con Hispasil 1731, todas tienen menor presencia total de sílice coloidal, por lo tanto tendrían que ser más resistentes, sin embargo sus resistencias son menores que las del tramo anterior de PW 50). Se plantea entonces la posibilidad de que existan otros factores que afecten a la resistencia a la rotura, uno de ellos que diferencia a ambos productos es el tamaño de partícula, por lo tanto se planteó en qué sentido afectaba el tamaño de partícula a los resultados y permitió en consecuencia lanzar una hipótesis: a mayor tamaño de partícula de sílice mayores resistencias obtenidas.

Por lo tanto, si ello fuera cierto, la resistencia vendría condicionada, al menos en las pruebas realizadas, de forma inversamente proporcional a la menor presencia de sílice, y directamente proporcional al tamaño de partícula.

Se pudo observar que el recubrimiento más resistente era el que utilizaba como papilla el combinado de sílice coloidal PW 50 y Moloquita -200, con un porcentaje de 35% de ligante y de 65% de refractario y le sigue el que utiliza 40/60%. Lo cual se tuvo presente en el desarrollo de los capítulos posteriores.

## Valoraciones y conclusiones con respecto a la utilización de la fibra de vidrio

En primer lugar, es conveniente decir que los cilindros de cascarilla cerámica resuelta alternando el grano de Moloquita con rebozados de fibra de vidrio tienen generalmente un espesor mayor respecto a los que utilizan solo el grano de Moloquita para el rebozado, considerando el mismo número de capas. Por tanto, el valor comparativo real de la resistencia de estos recubrimientos con fibra se ha de hacer considerando esta diferencia.

En segundo lugar, se observa que exceptuando las temperaturas bajas la fibra aporta menor resistencia que el grano de Moloquita.

Se comprueba que la fibra de vidrio sin cocer, o cocida a temperatura baja, de 100°C, presenta una resistencia mayor que los recubrimientos contrastados rebozados sólo con grano. Se confirma pues la utilidad de la fibra como refuerzo a temperaturas próximas a los 100°C.

La tendencia a explicar esta menor resistencia en los recubrimientos, con fibra de vidrio y cocidos a partir de cierta temperatura, hace pensar que tanto la estructura fibrosa de este material como la forma en que se aplica la fibra sobre el soporte, sean las causas de este debilitamiento.

Es de suponer, aunque no se tienen datos concretos al respecto, que la fibra, sobretudo en el sentido transversal, tiene menor cohesión que el grano de Moloquita, ésta podría ser otra de las causas pendientes de confirmación para otros estudios.

El sistema de aplicación de la fibra genera un recubrimiento con pequeñas cavidades entre las distintas capas, de hecho se pueden observar a simple vista en las roturas de las probetas, y esto incrementa la debilidad de las cascarillas resueltas con fibra. Otra hipótesis fundamentada del debilitamiento de la fibra se puede encontrar en su alteración durante el proceso de cocción; se cree que la fibra, al cocerse, empieza a perder consistencia debilitando la cáscara y a partir de 840°C la fibra de vidrio empieza a fundir.

Se pueden observar, para las cocciones entre 100°C y 750°C, los valores crecientes en los resultados de la resistencia a la rotura de la cascarilla con grano y los valores decrecientes cuando se utiliza la fibra, ver tabla II.37., p.122.

En los casos de cocción a 500°C el recubrimiento con fibra que utiliza PW 50 en porcentaje de 35/65%, tiene un buen grado de resistencia, mayor que este mismo recubrimiento cocido a 750°C, por lo tanto se deduce que la cocción a esta temperatura debilita la consistencia de la fibra, (se observa pues, que la fibra de vidrio al cocerse pierde sus propiedades debilitando la cascarilla<sup>102</sup>) mientras que a 875°C el grado de resistencia se incrementa. Se tiende a creer que esto se debe a que la resistencia de la papilla aumenta, aunque cabe la posibilidad de que la fusión de la fibra y su consolidación posterior favorezcan también la resistencia del recubrimiento, aunque podría ser todo lo contrario. No se dispone de datos suficientes para sacar conclusiones.

En los recubrimientos ensayados que contienen fibra y para cocciones de 750°C y 875°C, en general la fibra refuerza, salvo una excepción en que debilita (Hispasil 1731, 35/65% a 875°C), aunque cabría destacar que, a estas temperaturas lo hace muy ligeramente, teniendo en cuenta los porcentajes de sus componentes. En cocciones realizadas a 1000°C y a 1200°C, los recubrimientos con fibra ofrecen mayor resistencia que en cocciones a temperaturas inferiores aunque con resultados de menor resistencia que los de grano, con diferencias sustanciales.

Sabiendo que la fibra funde a partir de 875°C cabría plantearse posibles deformaciones de la cascarilla cerámica. En ese sentido, es importante constatar, a partir de las experiencias realizadas, que no se ha observado deformación alguna de la cascarilla en las cocciones inferiores o en las de 1200°C.

---

<sup>102</sup> Se supone que este resultado puede ser interesante de cara a la aplicación en la realización de moldes de fundición y escultura de tamaño pequeño, reduciendo la temperatura de cocción. Esto plantea la cuestión acerca de si un molde de cascarilla cerámica cocido a 500°C sería apto para fundición o en qué casos (éste sería un molde más resistente respecto a uno cocido a 750°C).

## II.7.2. PRUEBAS DE RESISTENCIA REALIZADAS CON UNA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS

Las pruebas se realizaron en uno de los laboratorios del departamento de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica de la facultad de Química con una máquina universal de ensayo digital<sup>103</sup>.

### Objetivos

Con estas pruebas se pretendía alcanzar dos objetivos:

En primer lugar contrastar algunos de los resultados obtenidos en la “Foneria” (ap. II.7.1.5., p. 123), con los nuevos de los laboratorios de Química, y si es posible ratificarlos. En segundo lugar observar la resistencia de un recubrimiento de cascarilla cerámica con un número reducido de capas, pensando en los límites del uso del material y en el objetivo general del proyecto, o sea, en la viabilidad escultórica de recubrimientos delgados.

En el apartado anterior (II.7.1., p. 102) se han llegado a diversas conclusiones, una de ellas es especialmente relevante para estas nuevas pruebas y en ella decía: se puede observar que el recubrimiento más resistente es el que utiliza como papilla el combinado de sílice coloidal PW 50 y Moloquita -200, con un porcentaje de 35% de aglutinante y de 65% de refractario y le sigue el que utiliza un porcentaje 40/60%.

### Procedimiento

En primer lugar se procedió a comparar el comportamiento de los dos tipos de porcentaje del grupo resuelto con la papilla compuesta con PW 50, sílice coloidal PW 50 y el refractario Moloquita-200, (tabla II.38.) siendo estos porcentajes 35/65% y 40/60%.

Se pretendió contrastar más detalladamente la diferencia entre los dos tipos de composición relacionando las características mecánicas de las probetas resueltas con las papillas de las densidades mencionadas.

### Planificación de las pruebas

Recubrimiento	Papilla %	Capas de recubrimiento	Grado de cocción , °C
PW 50	(m1) 35/65%	3	750°, 850°, 1000°, 1200°, 1300
		4	750°, 850°, 1000°, 1200°, 1300
		5	750°, 850°, 1000°, 1200°, 1300
PW 50+FV.	35/65%	5	750°, 850°, 1000°, 1200°, 1300
PW 50	(m2) 40/60%	3	750°, 850°, 1000°, 1200°, 1300
		4	750°, 850°, 1000°, 1200°, 1300
		5	750°, 850°, 1000°, 1200°, 1300

Tabla II.38. Combinación de probetas testadas en el tercer ensayo.

### Materiales y procedimiento utilizado

Aglutinante utilizado: En todas las pruebas se utilizó como aglutinante la sílice coloidal PW 50.

Porcentajes de PW 50/harina de Moloquita -200: fueron 35/65% y 40/60%. Los rebozados: se realizaron con grano de Moloquita 50-80dd en ambos porcentajes y alternando dos capas de fibra de vidrio (cortada a 6 mm) en el recubrimiento de cinco capas, solo en el porcentaje 35/65%. No se programó la prueba de fibra con el porcentaje 40/60%.

---

<sup>103</sup> Estas pruebas se pudieron realizar gracias a la colaboración de la Dra. Mercè Segarra, la Dra. Monica Martínez y la ayuda del Dr. Xavi Garcia del departamento de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica de la Facultat de Química de la UB.

Los recubrimientos por capas: se programaron tres tipos de recubrimiento, resueltos con tres, cuatro y cinco capas, excepto en la prueba de fibra que sólo se realizó con cinco capas. Dado que en ensayos preliminares, las probetas con menos de tres capas resultaron demasiado frágiles impidiendo su manipulación, se decidió establecer un mínimo de tres.

Se estableció como número máximo de capas para el ensayo cinco capas, al considerar que era el número utilizado en las pruebas de la "Foneria" y suficientes para valorar y analizar los resultados de resistencia a la rotura. Edición de los recubrimientos: cada tipo de recubrimiento (recubrimiento de tres capas, de cuatro capas y de cinco capas) fue editado 15 veces, es decir se hicieron 15 plaquetas que se separaron en grupos de tres para experimentar las diferentes temperaturas. Procedimiento de elaboración de las plaquetas de cascarilla: El procedimiento seguido para realizar esta prueba consistió en realizar plaquetas de cascarilla cerámica de 100x10mm y distintos espesores, para ello se utilizó un soporte de hierro revestido de plástico de dimensiones 100x10x1mm (Fig. II.21.).



Figura II.21. Conformación de la plaqueta de cascarilla sobre el soporte de hierro recubierto de cinta adhesiva (izquierda). Todas las plaquetas de cascarilla cerámica divididas por composición y cocción (derecha).

La consistencia líquida y fluida de la cascarilla requirió de dicho soporte para obtener plaquetas de cascarilla de medida uniforme. El soporte de hierro utilizado se revistió de plástico para poder separar las plaquetas de dicho soporte antes de la cocción. Se descartó la cera como soporte, ya que al ser un material blando presentaba dificultades para obtener plaquetas uniformes que sólo se podían conseguir utilizando un soporte rígido y plano.

Código de identificación de las probetas: Las plaquetas fueron marcadas individualmente para identificar la composición y el número de capas aplicadas. Los códigos empleados para la identificación fueron: m1 (material 1) para la composición 35/65%, m2 para la segunda composición 40/60%, separado con un guión y a continuación un número indicando las capas aplicadas, 3,4 o 5 capas. La codificación final quedó entonces de la siguiente manera: m1-3, m1-4, m1-5 y m2-3, m2-4, m2-5. En el caso de la prueba con fibra se añadió una F: m1-5F

Cocción:

Todas las plaquetas se cocieron a 750°C, 850°C, 1000°C, 1200°C y 1300°C.

Infraestructura:

Horno eléctrico automatizado Carbitite, de los laboratorios mencionados, que alcanza 1300°C como temperatura máxima.

Los laboratorios del departamento de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica<sup>104</sup> permitieron realizar más ensayos de cocción para determinar la resistencia de la cascarilla.

---

<sup>104</sup> El uso de estos laboratorios fue posible gracias a la colaboración y la ayuda de la Dra. Mercè Segarra, la Dra. Monica Martínez y el Dr. Xavi García del Departamento de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica de la Facultad de Química de la UB.

Cada probeta estuvo cocida a distinta temperatura: 750°C, 875°C, 1000°C, 1200°C y 1300°C. La rampa de calentamiento adaptada para este ensayo consistió en un incremento constante de 4°C cada minuto hasta alcanzar la temperatura deseada. La etapa de mantenimiento, en este caso, tuvo una duración de 3h.

Comparando este ensayo respecto al segundo se obtuvieron los siguientes resultados:

Curva de cocción: Cada mezcla se coció a distinta temperatura siguiendo una rampa de subida de temperatura común de 3 horas hasta 750°C, y después una segunda rampa de calentamiento aumentando 4°C la temperatura cada minuto hasta conseguir la temperatura deseada en cada caso. Todas las cocciones tuvieron un mantenimiento de 3 horas, como se recoge en la tabla II.39.

Rampa de cocción		
Temperatura de cocción (°C)	Tiempo total (h) 3h (750 °C)+ 4C°/min	Mantenimiento (h)
750	3	3
850	3:34	3
1000	4	3
1200	4:48	3
1300	5:12	3

Tabla II.39. Ciclos de cocción.

El enfriamiento de las probetas tuvo lugar en el mismo horno, en una bajada de temperatura gradual, evitando así la aparición de tensiones internas en la estructura de la cascarilla.

Sistema de rotura de las plaquetas: las plaquetas se sometieron a flexión usando un dispositivo de carga de tres puntos, éste es un sistema rápido y preciso para detectar la resistencia a la rotura. A través de la herramienta citada anteriormente se consiguió medir de manera representativa, y con cierta fiabilidad los resultados obtenidos en cada plaqueta.

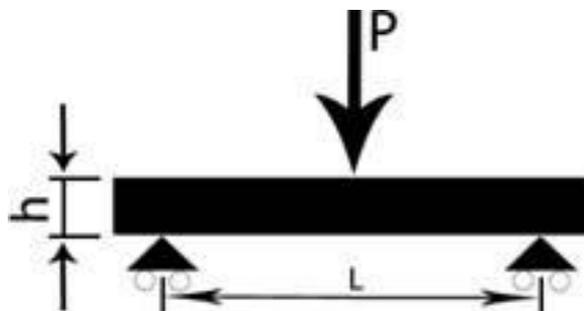


Figura II.22.: Esquema del ensayo, P= Carga aplicada L= Distancia entre soporte, h= espesor de la muestra de rotura.

La máquina de pruebas (Fig. II.23.), dispone de dos puntos de apoyo (donde se apoya la plaqueta) y un punto de carga que baja a una velocidad constante (para presionar la plaqueta de cascarilla), Fig. II.22. Los dos puntos de apoyo están a una distancia de dos centímetros y el punto de carga en el medio entre estos dos, La carga así aplicada produce la presión en el centro de la plaqueta causando la rotura.

La velocidad de aplicación de la carga fue de 5mm/min. Los resultados se miden en newtons ( $F = m \cdot g$ , donde  $F$  corresponde a los newtons, N;  $m$  a la masa en kg y  $g$  a la gravedad, 9,8 m/s<sup>2</sup>).

Numero de ensayos: la distancia de apoyo, de la herramienta mencionada, al ser de dos centímetros, permitió emplear cada una de las plaquetas, de diez centímetros de longitud, tres veces, es decir, con cada plaqueta se pudieron hacer tres pruebas de resistencia a la rotura, obteniendo de cada grupo de tres plaquetas un total de nueve resultados de rotura, y una información más representativa acerca de la resistencia a la rotura de cada plaqueta. En total se realizaron más de 105 plaquetas que multiplicado por tres pruebas por plaqueta se sitúa en torno a las 315 pruebas de resistencia.

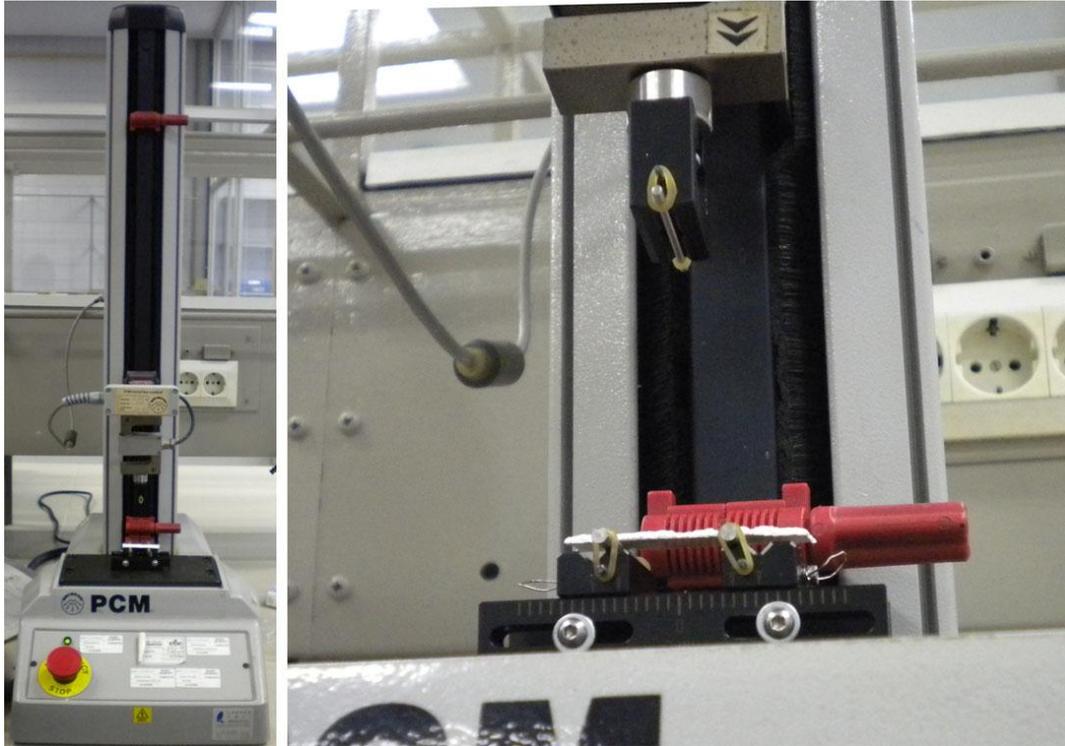
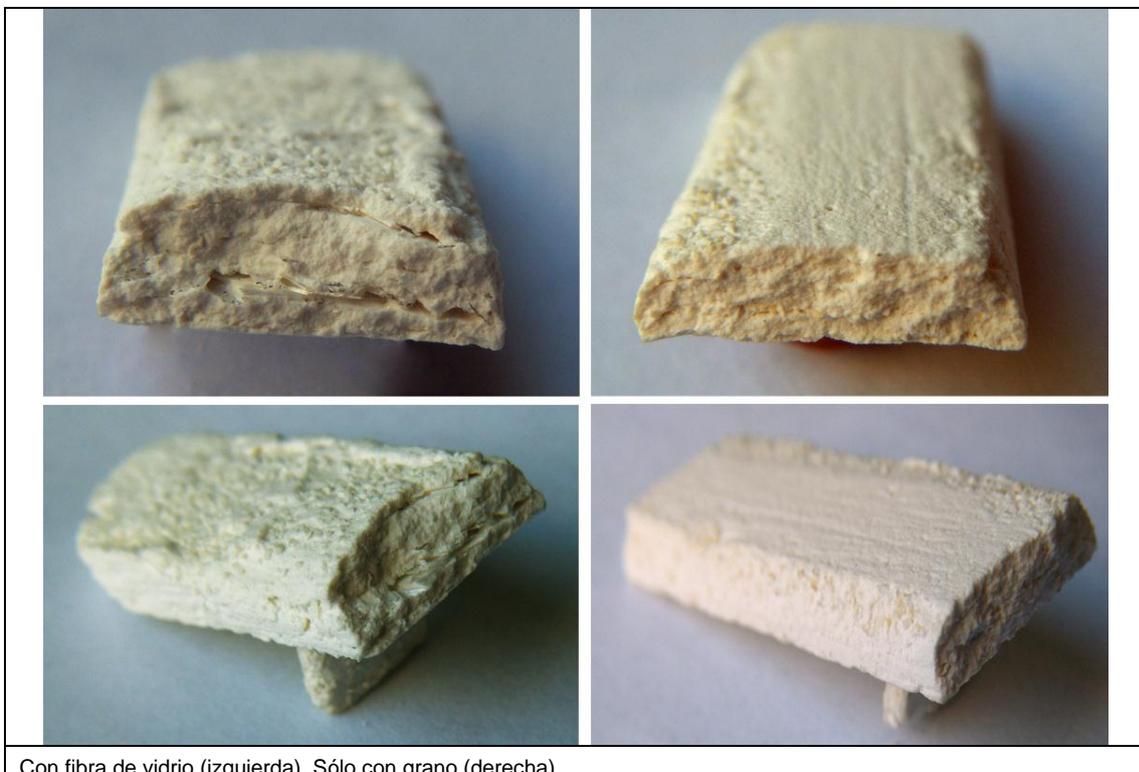


Figura II.23. Máquina de ensayos universal Mecmesin PCM con célula de carga de 2500 N utilizada en las pruebas de rotura de las plaquetas de cascarilla cerámica.

### II.7.2.1. COMPORTAMIENTO DE LAS CAPAS DE LA CASCARILLA CERÁMICA DURANTE EL PROCESO DE ROTURA EN LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA.



Con fibra de vidrio (izquierda), Sólo con grano (derecha)

Fotografías II.24. Vistas de la sección, obtenida por fractura, de las probetas.

En las fotografías II.24. se pueden observar las capas del recubrimiento de la probeta.

Con la introducción de fibra de vidrio en la segunda y cuarta capa se hace patente la estructura de capas. En la probeta sin fibra de vidrio las capas son menos perceptibles, dando la sensación de un cuerpo unitario de cascarilla cerámica. Con esta prueba, realizada con la máquina de ensayos universal ya mencionada se persigue registrar las variaciones de resistencia de la cascarilla cerámica sometida a la prueba de rotura.

Con los datos obtenidos se trazó la curva de esfuerzo y deformación de cada probeta.

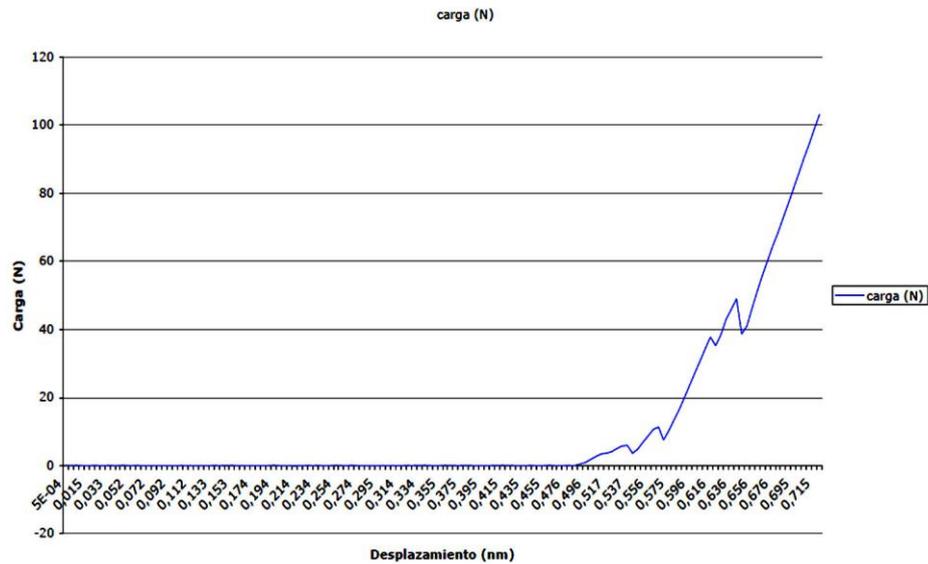


Gráfico II.3. Curva de deformación en flexión de una rotura de probeta formada por cinco capas de rebozado con grano.

En el gráfico (II.3.), se observa que la curva presenta puntos de depresión en forma de v, éstos se corresponden con el momento de la rotura de cada una de las capas.

Durante el ensayo se observó que las probetas se rompían empezando desde la capa inferior hacia la superior. Se cree que la unión entre capas no crea un cuerpo unitario por lo que se observa en la gráfica respecto a los picos de fractura. Es probable que los rebozados no ofrezcan tanta resistencia como las capas de papilla.

Mediante la fuerza ejercitada de la máquina desde arriba sobre la plaqueta, se observó que la cascarilla cerámica empezaba a romperse por la capa de abajo, la capa apoyada sobre los dos puntos. Es decir, la zona sometida a tracción.

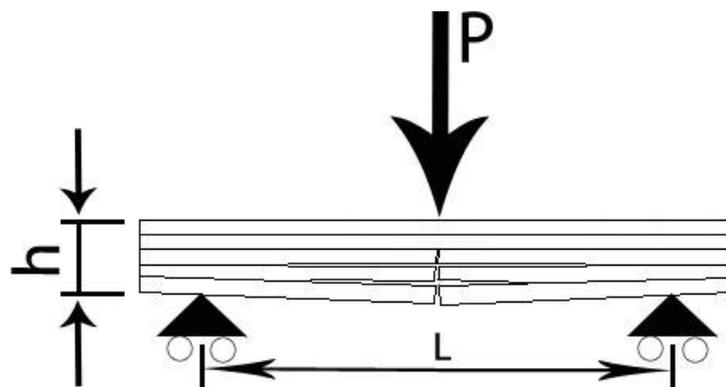


Figura II.25. Rotura por capas. Esquema del ensayo. P: Carga de rotura; L: Distancia entre soportes; h: espesor de la muestra de rotura.

## II.7.2.2. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA REALIZADAS CON UNA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS

Los resultados obtenidos se presentan a continuación en siete grupos:

Grupos	Papilla %	Subgrupos	Número de capas
m1	35/65	m1-3,	3 capas
		m1-4,	4 capas
		m1-5	5 capas
		m1-5 F.	5 capas, alternas de fibra
m2	40/60	m2-3,	3 capas
		m2-4,	4 capas
		m2-5	5 capas

Tabla II.40. Los siete grupos de probetas.

- Los grupos m1 tienen un porcentaje de componentes en la papilla 35/65%.
- La F indica fibra de vidrio, dos capas de fibra y tres de grano.
- Los grupos m2 tienen un porcentaje de componentes en la papilla 40/60%.
- Los números posteriores de cada grupo indican el número de capas aplicado en el recubrimiento.

### II.7.2.2.1. RESULTADOS DEL GRUPO DE PRUEBAS (M1-3)

En el primer tipo de papilla se empleó el porcentaje 35/65% y se aplicó un recubrimiento de tres capas, el rebozado se realizó con grano de Moloquita 50-80dd. Se cocieron a 750°C, 850°C, 1000°C, 1200°C y 1300°C.

		Esfuerzo rotura (N)				
m1-3c		Temperatura (°C)				
Ensayo	Roturas	750	850	1000	1200	1300
	<b>1*</b>	9,96	6,66	11,64	12,48	45,42
	<b>2</b>	10,88	7,43	14,63	14,78	36,69
	<b>3</b>	16,85	5,29	13,33	13,56	34,85
	<b>4*</b>	5,75	11,56	14,32	15,55	39,37
	<b>5</b>	11,41	7,51	8,88	19,38	38,37
	<b>6</b>	17,23	7,73	7,81	19,3	24,43
	<b>7*</b>	5,13	6,05	12,56	36,3	17,85
	<b>8</b>	4,52	4,44	10,95	30,71	12,87
	<b>9</b>		5,21	10,95	24,51	13,79
<b>Promedio ± Desviación</b>		10,22 ± 4,98	6,88 ± 2,10	11,68 ± 2,32	20,73 ± 8,23	29,29 ± 12,22

\* Los números 1, 4 y 7 en negrita corresponden a la primera rotura de cada plaqueta, cada plaqueta se rompió por tres sitios diferentes, y los números que siguen representan la rotura de las dos extremidades de la plaqueta.

Tabla II.41. Resistencia de la composición m1-3. (Se indican los valores promedios junto con la desviación).

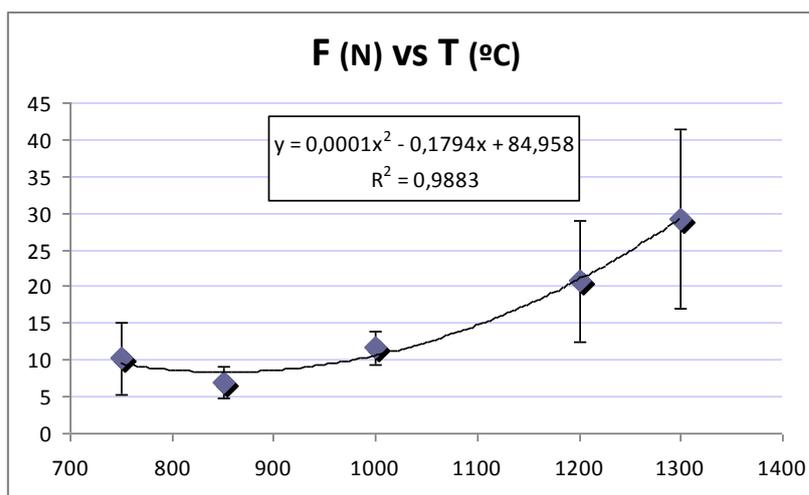


Gráfico II.4. Composición m1-3: Curva de resistencia a la rotura (N) y desviación respecto a la temperatura de cocción (°C).

m1-3c	Espesor (mm)				
	Temperatura, °C				
	750°	850°	1000°	1200°	1300°
Promedio ± desviación	2,1 ± 0,3	1,8 ± 0,4	1,9 ± 0,2	1,7 ± 0,2	1,9 ± 0,4

Tabla II.42. Espesor + desviación (mm) en función del grado de cocción (°C).

Si se comparan los resultados de las pruebas de resistencia a la rotura de las probetas se aprecia un crecimiento progresivo de resistencia al aumentar la temperatura de cocción (gráfico II.5.), exceptuando los resultados de la columna de cocción de 850°C, en que se observa un debilitamiento con respecto a la de 750°C. Los valores de resistencia más reducidos de la tabla II.41., se encuentran en la columna de cocción de 850°C y los más elevados a 1300°.

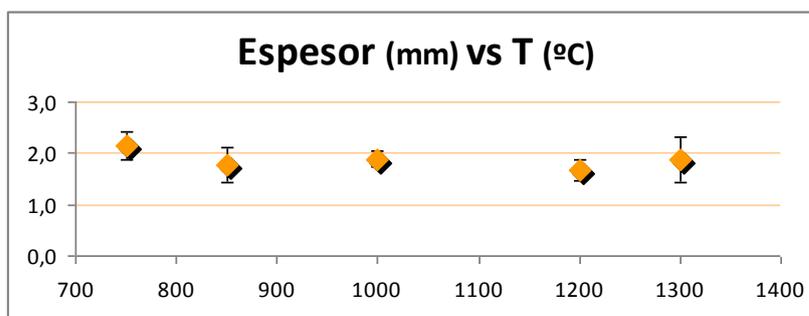


Gráfico II.5. Composición m1-3: Espesor y desviación obtenido (mm) respecto a la temperatura de cocción (°C).

Los grosores medios de los recubrimientos varían en cada columna de temperaturas, siendo la media de entre ellas de en torno a 1,9 mm, con desviaciones con respecto a las medias de las columnas de temperatura de  $\pm 0,3$  mm y con respecto a las probetas de  $\pm 0,5$  mm, (tabla II.42., y Gráfico II.5).

Si sobre los valores de resistencia se considera la corrección relativa a los grosores, la resistencia obtenida a 750°C tendría que bajar bastante, la de 1200°C subir ligeramente. Con lo que la curva mostraría un valor progresivo ascendente hasta 1200°C donde suavizaría la progresión de resistencia, (gráfico II.5).

Los resultados de cada grupo de cocción varían menos en las cocciones a 850°C y 1000°C, es decir, el promedio de desviación es menor en estos casos que en el resto, siendo mayor en la cocción a 1300°C.

### II.7.2.2.2. RESULTADOS DEL GRUPO DE PRUEBAS (M1-4)

En el primer tipo de mezcla se empleó el porcentaje 35/65%. En estas pruebas se aplicó un recubrimiento de cuatro capas, el rebozado se realizó con grano de Moloquita 50-80dd. Se cocieron a 750°C, 850°C, 1000°C, 1200°C y 1300 °C.

m1-4		Temperatura (°C)				
		750°	850°	1000°	1200°	1300°
Fuerza (N)	1	13,33	29,26	26,19	71,38	55,45
	2	8,27	16,93	20,91	56,83	76,28
	3	24,74	21,83	24,05	64,72	44,8
	4	26,58	17,62	36,46	47,41	35,08
	5	31,55	11,03	31,71	36,23	49,94
	6	24,36	17,23	22,64	42,35	39,72
	7	18,15	23,13	33,47	72,99	46,03
	8	30,25	13,79	26,19	64,03	90,76
	9	37,38	23,97	36,3	65,18	48,71
Promedio ± Desviación		23,85 ± 9,20	19,42 ± 5,63	28,66 ± 5,93	57,90 ± 13,08	54,09 ± 18,04

Tabla II.43. Resistencia de la composición m1-4 (Se indican los valores promedios junto con la desviación).

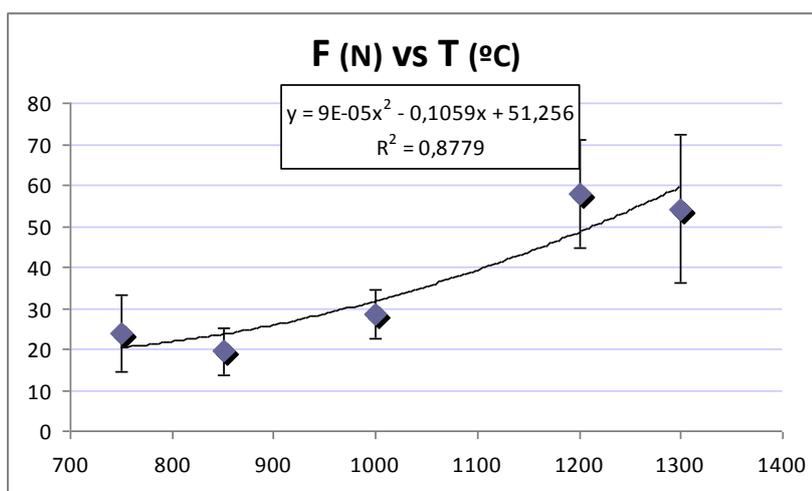


Gráfico II.6. Composición m1-4: Curva de resistencia a la rotura (N) y desviación respecto a la temperatura de cocción (°C).

m1-4		Espesor (mm)				
		750°	850°	1000°	1200°	1300°
Promedio ± desviación		3,2 ± 0,2	2,6 ± 0,4	2,7 ± 0,4	2,6 ± 0,3	2,5 ± 0,2

Tabla II.44. Espesor + desviación (mm) en función del grado de cocción (°C) de la composición m1-4.

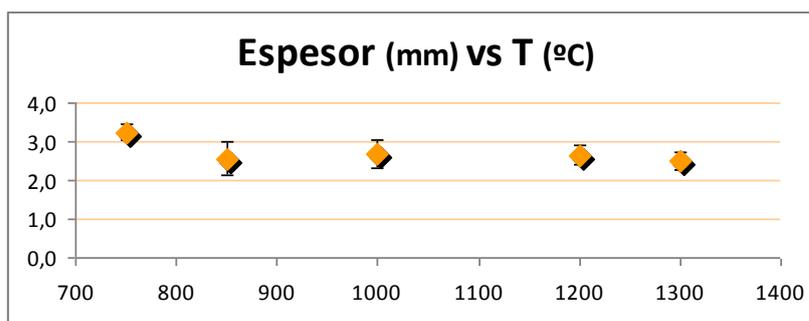


Gráfico II.7. Composición m1-4: Espesor y desviación obtenido (mm) respecto a la temperatura de cocción (°C).

Si se comparan los resultados de las pruebas de resistencia a la rotura de las probetas no se aprecia un crecimiento progresivo de resistencia al aumentar la temperatura de cocción, exceptuando los resultados de la columna de cocción de 1300°C, en que se observa un debilitamiento con respecto a la de 1200°C. Los valores de resistencia más reducidos se encuentran en la cocción de 850°C y los más elevados a 1200°C (tabla II.43., gráfico II.6).

A 850°C, los resultados de resistencia son los más bajos, menores incluso que a 750°C, lo que resulta sorprendente.

Los grosores medios de los recubrimientos varían en cada columna de temperaturas, siendo la media de entre ellas de en torno a 2,7mm, con desviaciones con respecto a las medias de las columnas de temperatura de  $\pm 0,5$ mm y con respecto a las probetas de  $\pm 0,7$ mm, (tabla II.44., y gráfico II.7.) De todas formas el grosor, de pared de las probetas, más elevado es el de la columna de 750°C, por tanto si se corrige a la baja el valor de resistencia obtenido, para compensar la desviación de grosor, se podría considerar que la curva mantiene un valor ascendente progresivo desde los 750°C hasta los 1200 °C, donde cambia de tendencia.

La desviación de la columna de 1300°C es la mayor y la de la columna de 850°C es la menor. En el gráfico II.6. se aprecia que a 850°C y 1000°C la desviación obtenida en los valores de resistencia es menor que en el resto de cocciones, siendo muy elevada a partir de 1200°C y siendo la mayor la de 1300°C.

### II.7.2.2.3. RESULTADOS DEL GRUPO DE PRUEBAS (M1-5)

En el primer tipo de mezcla se empleó el porcentaje 35/65%. En estas pruebas se aplicó un recubrimiento de cinco capas, el rebozado se realizó con grano de Moloquita 50-80dd. Se cocieron a 750°C, 850°C, 1000°C, 1200°C y 1300°C.

35/65, m1-5		Temperatura (°C)				
		750°	850°	1000°	1200°	1300°
Fuerza (N)	1	42,81	39,29	77,81	116,50	112,70
	2	40,36	41,97	64,87	115,20	72,15
	3	34,01	34,54	52,54	95,00	104,20
	4	30,25	28,87	56,83	136,60	73,76
	5	30,48	34,92	50,55	134,90	66,10
	6	22,59	35,69	42,43	101,00	105,20
	7	38,91	31,40	43,35	104,50	82,03
	8	36,00	38,75	52,69	88,46	57,90
	9		40,44	84,82	106,60	48,40
<b>Promedio± Desviación</b>		34,43 ± 6,56	36,21 ± 4,31	58,43 ± 14,70	110,97 ± 16,58	80,27 ± 22,57

Tabla II.45. Resistencia de la composición m1-5. (Se indican los valores promedios junto con la desviación)

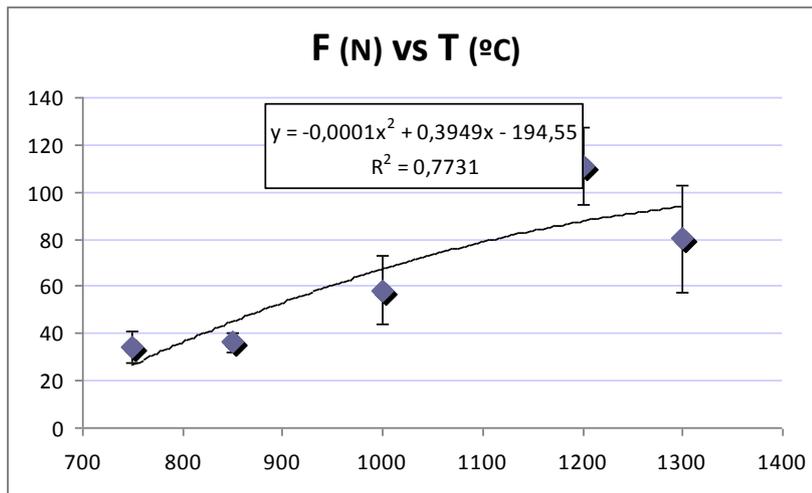


Gráfico II.8. Composición m1-5: Curva de resistencia a la rotura (N) y desviación respecto a la temperatura de cocción (°C).

35/65, m1-5	Espesor (mm)				
	750°	850°	1000°	1200°	1300°
Promedio	3,3 ± 0,3	3,3 ± 0,1	3,5 ± 0,3	3,3 ± 0,3	3,3 ± 0,3
Desviación ±					

Tabla II.46. Espesor + desviación (mm) en función del grado de cocción (°C) de la composición m1-5.

Si se comparan los resultados de las pruebas de resistencia a la rotura de las probetas se aprecia un crecimiento progresivo de resistencia al aumentar la temperatura de cocción, exceptuando los resultados de la columna de cocción de 1300°C, en que se observa un debilitamiento con respecto a la de 1200°C. Los valores de resistencia más reducidos se encuentran en la cocción de 750°C y los más elevados a 1200°C, (tabla II.45. y gráfico II.8.).

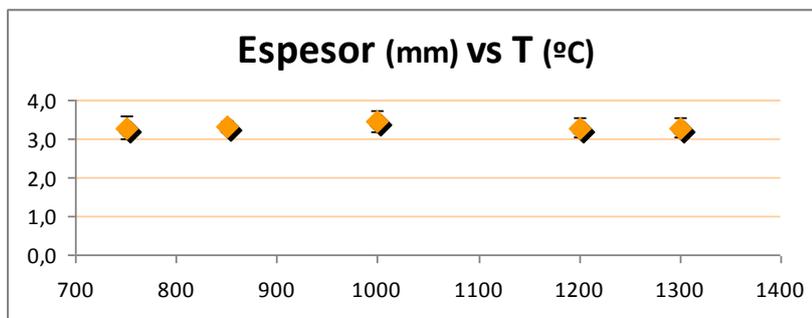


Gráfico II.9. Composición m1-5: Espesor y desviación obtenidos (mm) respecto a la temperatura de cocción (°C).

Los grosores medios de los recubrimientos varían en cada columna de temperaturas, siendo la media de entre ellas de en torno a 3,3mm, con desviaciones con respecto a las medias de las columnas de temperatura de ± 0'1mm y con respecto a las probetas de ± 0,5m, (Fig. II.46. y gráfico II.9.).

La curva de progresión de resistencias es sinuosa, con un crecimiento continuo desde los 750°C hasta los 1200°C, (gráfico II.8), siendo esta última el punto de inflexión en el cambio de tendencia. La corrección a la baja, debida al mayor grosor de la columna de 1000°C no afecta al desarrollo de la curva.

Los resultados de cada probeta del grupo de cocción varían menos en las cocciones a 75°C y 850 °C, es decir, el promedio de desviación es menor en estos casos que en el resto, siendo mayor en la cocción a 1300°C. La desviación comienza a aumentar a partir de los 1000°C.

#### II.7.2.2.4. RESULTADOS DEL GRUPO DE PRUEBAS (M1-5F)

En el primer tipo de mezcla se empleó el porcentaje 35/65%, en estas pruebas se aplicó un recubrimiento de cinco capas, el rebozado se realizó con grano de Moloquita 50-80dd en tres de las capas alternando con dos de fibra de vidrio cortada a 6 mm, (dos capas de fibra de vidrio, concretamente entre la segunda y cuarta capa) Se cocieron a 750°C, 850°C, 1000°C, 1200°C y 1300°C.

35/65, m1-5F	Temperatura (°C)					
	750°	850°	1000°	1200°	1300°	
Fuerza (N)	1	25,66	62,57	65,94	100,70	97,88
	2	28,57	45,49	56,68	97,73	104,00
	3	28,87	41,51		91,14	85,93
	4	54,99	36,30	44,42	89,92	116,60
	5	49,32	50,55	40,29	120,00	152,30
	6	37,30	28,18	38,60	97,96	130,30
	7	48,94	33,39	36,53	72,30	148,00
	8	27,11	25,27	49,40	87,31	91,91
	9	23,30	46,41	41,82	76,59	99,34
<b>Promedio ± Desviación</b>	36,01 ±12,04	41,07 ±11,71	46,71 ±10,12	92,63 ±14,04	114,05 ±24.40	

Tabla II.47. Resistencia de la composición m1-5F. (Se indican los valores promedios junto con la desviación)

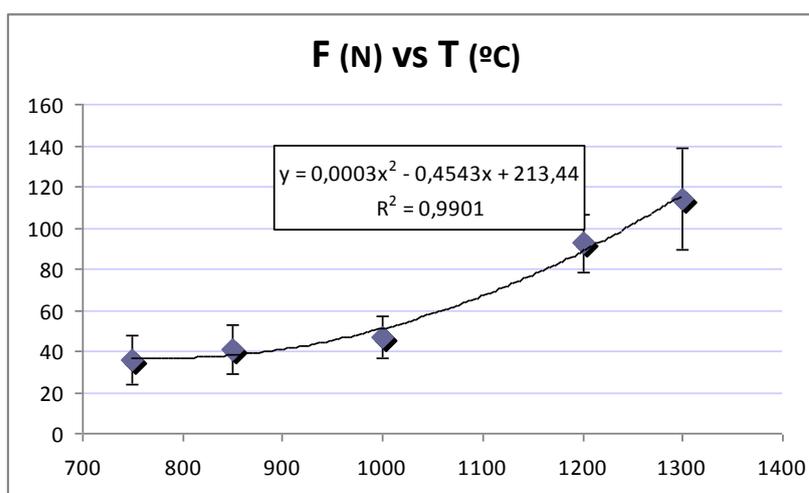


Gráfico II.10. Composición m1-5F: Curva de resistencia a la rotura (N) y desviación respecto a la temperatura de cocción (°C).

M1-5F	Espesor (mm)				
	750°	850°	1000°	1200°	1300°
<b>Promedio</b>	3,5 ± 0,4	3,8 ± 0,5	3,7 ± 0,4	3,5 ± 0,4	3,7 ± 0,4

Tabla II.48. Espesor + desviación (mm) en función del grado de cocción (°C) de la composición m1-5F.

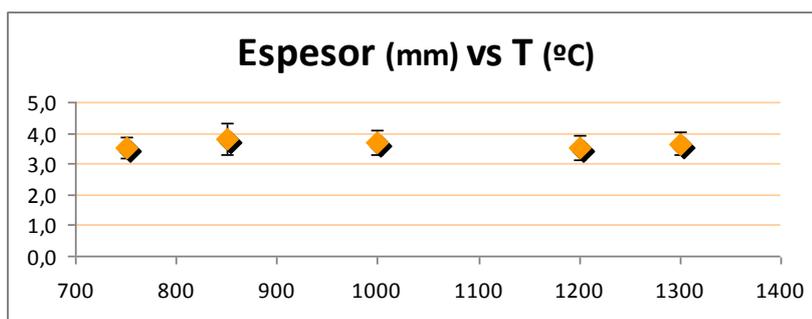


Gráfico II.11. Composición m1-5F: Espesor y desviación obtenido (mm) respecto a la temperatura de cocción (°C).

Si se comparan los resultados de las pruebas de resistencia a la rotura de las probetas se aprecia un crecimiento progresivo de resistencia al aumentar la temperatura de cocción. Los valores de resistencia más reducidos se encuentran en la cocción de 750°C y los más elevados a 1300°C, (tabla II.47. y gráfico II.10.).

Los grosores medios de los recubrimientos varían en cada columna de temperaturas, siendo la media de entre ellas de en torno a 3,6 mm, con desviaciones con respecto a las medias de las columnas de temperatura de  $\pm 0,2$  mm y con respecto a las probetas de  $\pm 0,6$  mm (tabla II.48. y Gráfico II.11.).

La curva de progresión de resistencias es homogénea, su valor más elevado se halla en los 1300°C. Si aplicamos la corrección de las desviaciones de grosor, el valor de 850 debería bajar ligeramente, con lo que la curva resultante se situaría en valores similares para 750°C y 850°C, y se suavizaría la ascensión a 1300°C.

Los valores de resistencia más homogéneos se consiguen entre los 750°C y los 1000°C, sufren un ligero incremento a 1200°C y la desviación crece exageradamente para la temperatura de 1300°C respecto a los demás. A 1300°C se consiguen valores de resistencia, próximos a los inferiores de la columna de 1200°C (en cuatro de los 9 casos) y en tres de los 9 casos superiores a los más elevados. Por lo tanto el resultado medio obtenido en la columna de 1300°C tiene un valor relativo, más si consideramos que los grosores se sitúan una décima por encima de la media, mientras que los de 1200°C se sitúan una décima por debajo de la media.

#### II.7.2.2.5. RESULTADOS DEL GRUPO DE PRUEBAS (M2-3) CON PORCENTAJES 40/60

En el segundo tipo de mezcla se empleó el porcentaje 40/60%. En estas pruebas se aplicó un recubrimiento de tres capas, el rebozado se realizó con grano de Moloquita 50-80dd. Se cocieron a 750°C, 850°C, 1000°C, 1200°C y 1300°C.

40/60, m2-3		Temperatura (°C)				
		750°	850°	1000°	1200°	1300°
Fuerza (N)	1	3,29	9,34	7,43	16,39	13,25
	2	5,21	5,51	5,59		16,7
	3	3,45	5,74	6,28	11,26	
	4	5,21	4,37	8,12	16,39	10,8
	5	3,75	5,97	5,44	10,8	
	6	5,29	4,9	4,83	10,72	
	7	5,9	3,6	6,82	7,81	14,17
	8		3,68	9,04	13,48	12,79
	9					12,94
<b>Promedio <math>\pm</math> Desviación</b>		4,58 $\pm$ 1,05	5,39 $\pm$ 1,83	6,69 $\pm$ 1,44	12,41 $\pm$ 3,18	13,44 $\pm$ 1,94

Tabla II.49. Resistencia de la composición m2-3. (Se indican los valores promedios junto con la desviación)

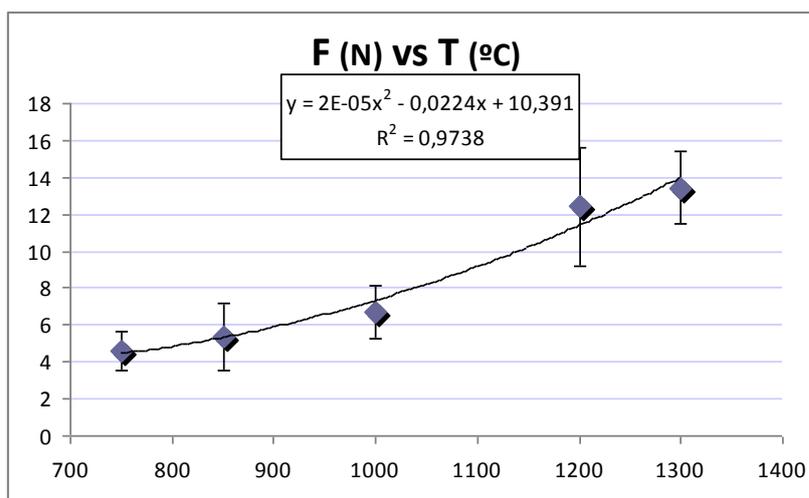


Gráfico II.12. Composición m2-3: Curva de resistencia a la rotura (N) y desviación respecto a la temperatura de cocción (°C).

M2-3	Espesor (mm)				
	750°	850°	1000°	1200°	1300°
Promedio ± Desviación	1,6 ± 0,3	1,5 ± 0,2	1,4 ± 0,1	1,4 ± 0,1	1,3 ± 0,2

Tabla II.50. Composición m2-3. Espesor + desviación (mm) en función de la temperatura de cocción (°C)

Observaciones: con esta proporción de aglutinante en la papilla, las plaquetas de tres capas son frágiles, dificultando su manipulación antes y después de la cocción, tanto es así, que en muchos casos no es posible realizar los tres ensayos previstos. Por esta razón en la tabla II.49., de los resultados con composición 40/60% faltan algunos resultados de resistencia, sin embargo la falta de estos datos no afecta el resultado final de la nota ponderada.

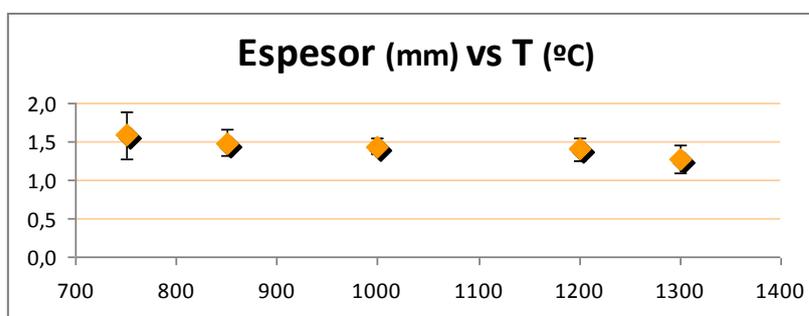


Gráfico II.13. Composición m2-3: Espesor y desviación (mm) respecto a la temperatura de cocción (°C).

Si se comparan los resultados de las pruebas de resistencia a la rotura de las probetas se aprecia un crecimiento progresivo de resistencia al aumentar la temperatura de cocción. Los valores de resistencia más reducidos se encuentran en la cocción de 750°C y los más elevados a 1300°C. Las probetas de este ensayo tienen poco grosor de pared y son frágiles. Los espesores oscilan entre 1,3 y 1,6mm. Los grosores medios de los recubrimientos varían en cada columna de temperaturas, siendo la media de entre ellas de en torno a 1,4mm, con desviaciones con respecto a las medias de las columnas de temperatura de ± 0,2mm y con respecto a las probetas de ± 0,5mm, (tabla II.50 y gráfico II.12.).

La curva de progresión de resistencias es constante, con un crecimiento continuo desde los 750°C hasta los 1200°C, siendo esta última el punto donde se suaviza la tendencia. La corrección a la baja, debida al mayor grosor de la columna de 750°C no afecta al desarrollo lógico de la curva (gráfico II.11.). Los resultados de cada probeta del grupo de cocción varían

menos en las cocciones a 750°C y 1000°C, es decir, el promedio de desviación es menor en estos casos que en el resto, siendo mayor en la cocción a 1200°C.

#### II.7.2.2.6. RESULTADOS DEL GRUPO DE PRUEBAS (M2-4)

En el segundo tipo de mezcla se empleó el porcentaje 40/60. En estas pruebas se aplicó un recubrimiento de cuatro capas, el rebozado se realizó con grano de maloquita 50-80dd. Se cocieron a 750°C, 850°C, 1000°C, 1200°C y 1300°C.

M2-4		Temperatura (°C)				
		750°	850°	1000°	1200°	1300°
Fuerza (N)	1	12,1	14,02	13,4	26,88	32,7
	2	12,41	12,18	10,88	19,79	23,21
	3	9,88	9,27	11,72	30,41	28,26
	4	8,58	12,71	21,22	20,68	43,35
	5	10,26	11,26	15,85	16,85	49,02
	6	9,04	12,41	12,71	18,92	30,33
	7	11,41	8,43	16,39	25,58	25,5
	8		9,57	19,84	30,41	27,34
	9		8,58	13,79	30,33	24,74
Promedio	Desviación ±	10,53 ± 1,49	10,94 ± 2,03	15,09 ± 3,57	24,43 ± 5,44	31,61 ± 8,86

Tabla II.51. Resistencia de la composición m2-4. (Se indican los valores promedios junto con la desviación)

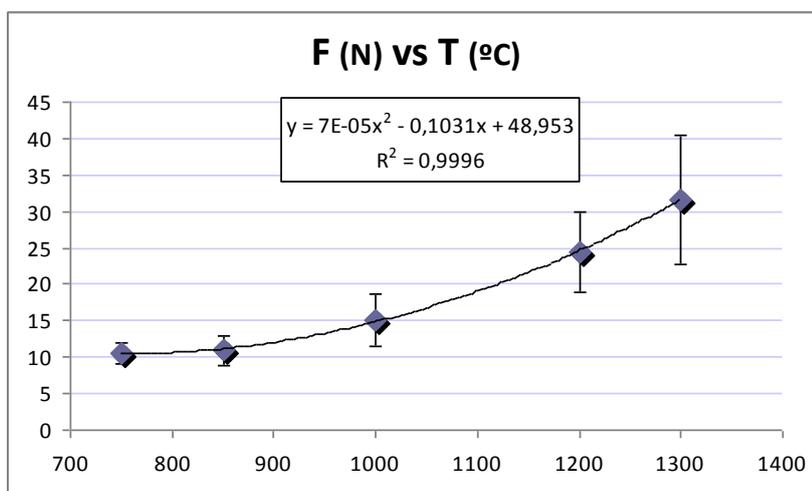


Gráfico II.14. Composición m2-4: Curva de resistencia a la rotura (N) y desviación respecto a la temperatura de cocción (°C).

M2-4	Espesor (mm)				
	750°	850°	1000°	1200°	1300°
Promedio	1,9 ± 0,1	2,0 ± 0,2	2,0 ± 0,2	1,8 ± 0,1	1,9 ± 0,2

Tabla II.52. Composición m2-4. Espesor + desviación (mm) en función del grado de cocción (°C).

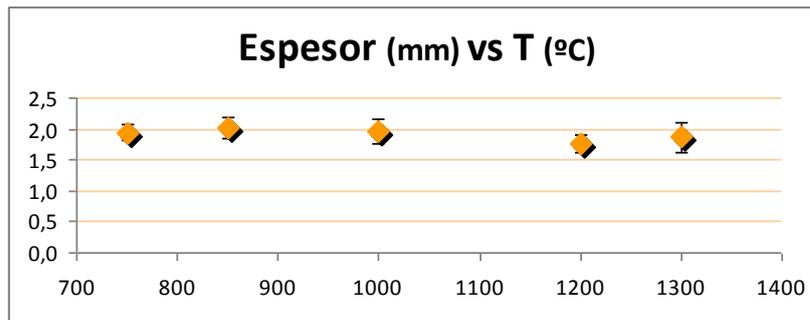


Gráfico II.15. Composición m2-4: Espesor y desviación (mm) respecto a la temperatura de cocción (°C).

Observaciones: con esta proporción de aglutinante en la papilla, las plaquetas de tres capas son frágiles, dificultando su manipulación antes y después de la cocción, tanto es así, que en muchos casos no es posible realizar los tres ensayos previstos. Por esta razón en las tablas de los resultados con composición 40/60% faltan algunos resultados de resistencia, sin embargo la falta de estos datos no afecta el resultado final de la nota ponderada.

Si se comparan los resultados de las pruebas de resistencia a la rotura de las probetas se aprecia un crecimiento progresivo de resistencia al aumentar la temperatura de cocción. Los valores de resistencia más reducidos se encuentran en la cocción de 750°C y los más elevados a 1300°C, (tabla II.51. y gráfica II.14.).

Las probetas de este ensayo tienen poco grosor de pared y son frágiles. Los espesores medios oscilan entre 1,8 y 2,0mm. Los grosores medios de los recubrimientos varían en cada columna de temperaturas, siendo la media de entre ellas de en torno a 1,9mm, con desviaciones con respecto a las medias de las columnas de temperatura de  $\pm 0,1$ mm y con respecto a las probetas de  $\pm 0,3$ mm. La curva de progresión de resistencias es constante, con un crecimiento continuo desde los 750°C hasta los 1300°C, (tabla II.52. y gráfica 15.).

Los resultados de cada probeta del grupo de cocción varían menos en las cocciones a 750°C, 850°C y 1000°C, es decir, el promedio de desviación es menor en estos casos que en el resto, siendo mayor en la cocción a 1300°C.

#### II.7.2.2.7. RESULTADOS DEL GRUPO DE PRUEBAS (M2-5)

En el segunda tipo de mezcla se empleó el porcentaje 40/60. En estas pruebas se aplicó un recubrimiento de cinco capas, el rebozado se realizó con grano de Moloquita 50-80dd. Se cocieron a 750°C, 850°C, 1000°C, 1200°C y 1300°C.

M2-5		Temperatura (°C)				
		750°	850°	1000°	1200°	1300°
Fuerza (N)	1	14,93	19,99	27,19	44,73	44,42
	2	15,24	18,38	23,82	45,80	58,36
	3	13,53	19,45	25,81	39,90	42,20
	4	8,35	17,85	29,56	44,50	43,27
	5	9,04	21,29	28,41	47,87	69,93
	6	7,58	16,31	24,28	45,80	43,59
	7	16,85	19,15	30,33	43,04	46,03
	8	20,68	18,30	30,41	43,43	42,05
	9	15,09		22,21	39,37	33,70
Promedio $\pm$ Desviación		13,48 $\pm$ 4,36	18,84 $\pm$ 1,50	26,89 $\pm$ 3,02	43,83 $\pm$ 2,77	47,06 $\pm$ 10,68

Tabla II.53. Resistencia de la composición m2-5. (Se indican los valores promedios junto con la desviación)

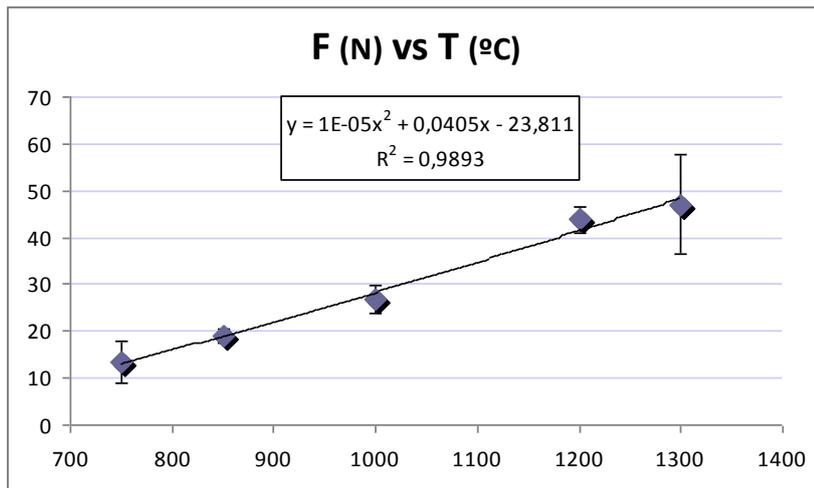


Gráfico II.16. Composición m2-5: Curva de resistencia a la rotura (N) y desviación respecto a la temperatura de cocción (°C).

M2-5	Espesor (mm)				
	750°	850°	1000°	1200°	1300°
Promedio ± desviación	2,2 ± 0,2	2,4 ± 0,1	2,4 ± 0,2	2,3 ± 0,2	2,4 ± 0,2

Tabla II.54. Espesor + desviación (mm) en función del grado de cocción (°C) de la composición m2-5.

Si se comparan los resultados de las pruebas de resistencia a la rotura de las probetas se aprecia un crecimiento progresivo de resistencia al aumentar la temperatura de cocción. Los valores de resistencia más reducidos se encuentran en la cocción de 750°C y los más elevados a 1300°C (tabla. II.53.).

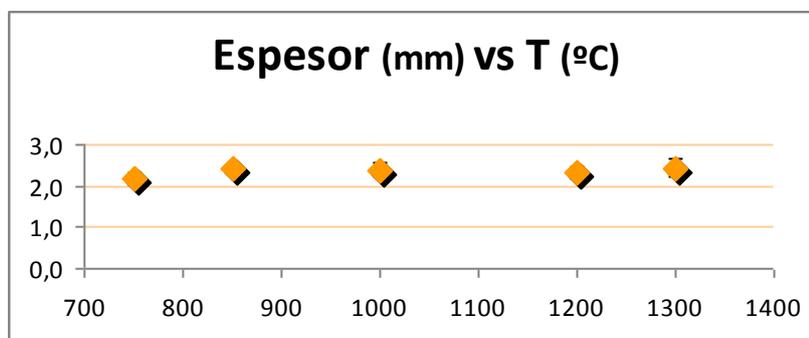


Gráfico II.17. Composición m2-5: Espesor y desviación obtenido (mm) respecto a la temperatura de cocción (°C).

Los espesores medios oscilan entre 2,2 y 2,4 mm. Los grosores medios de los recubrimientos varían en cada columna de temperaturas, siendo la media de entre ellas de en torno a 2,3mm, con desviaciones con respecto a las medias de las columnas de temperatura de ± 0,1mm y con respecto a las probetas de ± 0,3mm, (tabla II.54. y gráfico II.17.).

La curva de progresión de resistencias es constante (gráfico II.16.), con un crecimiento continuo desde los 750°C hasta los 1300°C. Las desviaciones de grosor son poco significativas.

Los resultados de cada probeta del grupo de cocción varían poco en las cocciones a 750°C, 850°C, 1000°C y 1200°C, es decir, el promedio de desviación es menor en estos casos que en la mayor desviación situada en 1300°C. Algunos resultados son inferiores a los de la temperatura anterior.

### II.7.2.3. VALORACIONES Y CONCLUSIONES A PARTIR DEL ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS DE TODAS LAS PRUEBAS REALIZADAS CON LA MÁQUINA DE ENSAYOS UNIVERSAL

Fuerza (N)	Composición 1 PW 50 Composición 2 PW 50							
	35/65				40/60			
		m1-3	m1-4	m1-5	m1-5F	m2-3	m2-4	m2-5
750 °C	10,22	23,85	34,43	36,01	4,58	10,53	13,48	
850 °C	6,88	19,42	36,21	41,07	5,39	10,94	18,84	
1000 °C	11,68	28,66	58,43	46,71	6,69	15,09	26,89	
1200 °C	20,73	57,90	110,97	92,63	12,41	24,43	43,83	
1300 °C	29,29	54,09	80,27	114,05	13,44	31,61	47,06	
<b>Espesor</b>	(mm)	1,88	2,72	3,34	3,64	1,24	1,92	2,34

Tabla II.55. Tabla resultados Resistencia a la rotura (N) y Espesor (mm) promedios para cada formulación en función de la temperatura de cocción.

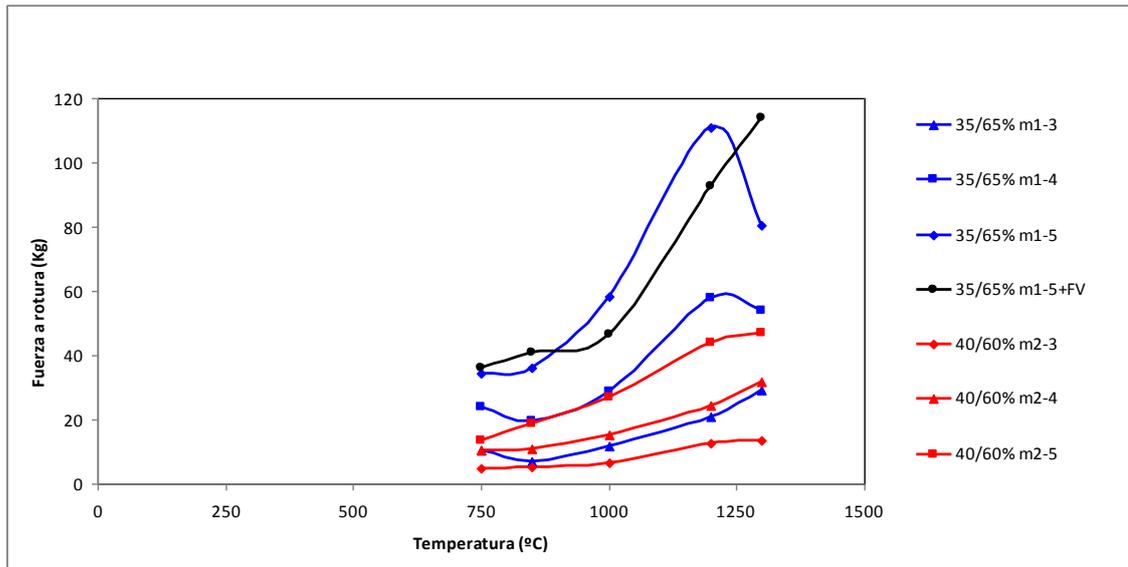


Gráfico II.18. Gráfico de las curvas de los grupos m1-3, m1-4, m1-5, m1-5F, m2-3, m2-4, m2-5 de las pruebas de Química.

Un mayor número de capas implica un grosor mayor de cascarilla cerámica (dentro de cada grupo de composiciones, es decir, dentro de cada tipo de densidades de papilla). Entre grupos de composiciones distintas, los grosores de las papillas menos densas, 40/60%, tienden a ser menores que los de las más densas, 35/65%, (tabla. II.55.).

Para ambas composiciones, al aumentar el número de capas la resistencia también aumenta, pero el incremento de resistencia es extraordinario a medida que aumenta la temperatura de cocción, llegando a doblar los resultados obtenidos con una capa menos.

El número mínimo de capas aplicadas fue de tres, considerando que este es el mínimo viable y no en todos los tipos de papilla, en la menos densa, 40/60%, algunas probetas no eran completamente viables.

A mayor densidad (entre estas dos modalidades de papilla), a mayor participación de la harina de Moloquita, mayor resistencia. La composición 35/65% resulta más resistente que la composición 40/60%

Aunque se pueda considerar globalmente que la resistencia aumenta con el grado de cocción, en el caso de la composición 35/65% se observa un cambio de tendencia o decrecimiento en los valores de resistencia para algunos casos, en el (m1-3) a 850°C, aunque éste considerando la desviación de los grosores, se podría ignorar, y en los m1-4 y m1-5 a 1300°C cuyo cambio es evidente. De todas formas sorprende que en el m1-3, este cambio de tendencia no se observe en la curva, ni tampoco en ninguno de los grupos m2 de 40/60%, (gráfico II.18.).

Para la composición 40/60%, la resistencia aumenta con el grado de cocción. El comportamiento de la composición 40/60% se manifiesta más uniforme en la progresión de los resultados, aunque con valores bastante más bajos, continuando en ascenso suave incluso a 1300°C.

El ensayo realizado con una composición 35/65% y cinco capas, dos de ellas de fibra, (m1-5F) se observa un crecimiento gradual y progresivo de la resistencia en relación directa al grado de cocción, obteniéndose el valor de resistencia más elevado de toda la tabla a una temperatura de 1300°C, o sea, el mayor valor de resistencia se ha obtenido aplicando una papilla 35/65%, un recubrimiento de cinco capas, dos de ellas de fibra y una cocción de 1300°C.

Sin embargo a 1200°C el valor más alto se corresponde con una papilla 35/65%, recubrimiento de cinco capas, sólo de grano, siendo la siguiente la que sí tiene fibra. El orden decreciente es el siguiente: m1-5, m1-5-F, m1-4, m2-5, m1-3, m2-4 y m2-3.

En la composición 35/65% m1-4 y m1-5, la resistencia a la rotura a 1300°C es inferior a la que presentan las probetas cocidas a 1200°C y presentan una desviación muy superior a la que resulta a otras temperaturas. Se considera que el grado de máxima cohesión de la cascarilla cerámica se consigue en torno a 1200°C, en los grupos m1 de 35/65%, no así para los grupos m2 de 40/60%, cuyo valor más alto se sitúa a los 1300°C, (tabla II.56.).

Puesto que se trata de un ensayo de flexión, y que este esfuerzo se compone de un esfuerzo de tracción en las capas inferiores y un esfuerzo de compresión en las superiores, deducimos que el material es más resistente a la compresión que a la tracción.

Este resultado era previsible porque la resistencia a la compresión la ejerce la estructura del árido, bien consistente, mientras que la resistencia a la tracción la ejerce el aglutinante, con una fuerza de atracción menor.

Con respecto a las desviaciones se ha podido observar, en los apartados anteriores, que en las pruebas realizadas sobre probetas del mismo grupo, con idénticas características, los resultados no eran iguales. Para obtener una referencia media de su comportamiento se ha obtenido el valor medio de sus resultados. Pues bien, la diferencia entre ese valor medio y el resultado de cada prueba es lo que conocemos como desviación de resultados.

Desviaciones de los resultados sobre resistencia (máquina de ensayos universal)								
Fuerza (N)	Composición 1 PW 50 Composición 2 PW 50							
	35/65 (%)				40/60 (%)			
		m1-3	m1-4	m1-5	m1-5F	m2-3	m2-4	m2-5
750 °C		4,98	9,20	6,58	12,04	1,05	1,49	4,36
850 °C		2,10	5,63	4,31	11,71	1,83	2,03	1,50
1000 °C		2,32	5,93	14,70	10,12	1,44	3,57	3,02
1200 °C		8,28	13,08	16,58	14,04	3,18	5,44	2,77
1300 °C		12,22	18,04	22,57	24,40	1,94	8,86	10,68

Tabla II.56. Tabla de las desviaciones de los resultados de resistencias de cada grupo (capas y grado de cocción).

Estas desviaciones sirven para entender que el comportamiento frente a la rotura de la cascarilla cerámica aplicada en la escultura, tal como se desarrolla en la experiencia, es diverso.

## II.7.2.4. VALORACIONES Y CONCLUSIONES REALIZADAS CONTRASTANDO LA INFORMACIÓN OBTENIDA EN LAS PRUEBAS DE LA “FONERIA” CON LAS PRUEBAS DEL LABORATORIO DE CIÈNCIA DELS MATERIALS I ENGINYERIA METAL·LÚRGICA

En este apartado se contrastan los resultados de las pruebas de resistencia obtenidas en la “Foneria” con las del laboratorio de Química. Para ratificar los resultados de la “Foneria”, o en su caso ponerlos en cuestión, se decidió comparar los resultados de los comportamientos de la cascarilla cerámica, frente a las pruebas de resistencia de los dos ensayos, el de la “Foneria” y el de Química (tabla II.57. y tabla II.58.).

En este apartado se pretendió comprobar el grado de concordancia entre los comportamientos frente a las pruebas de resistencia de los tipos de cascarilla experimentados y cocidos a diferentes temperaturas. Los resultados obtenidos en ambos laboratorios fueron de distinto orden y respondían a modelos de probeta y de pruebas diferentes, aunque ambas se planteaban el comportamiento estructural y de resistencia de la cascarilla cerámica. Los resultados obtenidos se han expresado en gráficas que permiten evidenciar las tendencias de dicho comportamiento, y es la comparación de estas gráficas la que nos aporta una información clara sobre dichas tendencias (gráfico II.19. y gráfico II.20.).

Los datos obtenidos y trasladados sobre los gráficos son los de las tablas siguientes y ponen de manifiesto que solo un sector de las tablas registran los mismos parámetros. Las lagunas de las tablas responden a pruebas pendientes que no se han incluido en esta investigación.

Valores de resistencia obtenidos en la “Foneria” (BBA)								
Recubrimientos	Componentes de la papilla, ligante/ refractario	Índice de rotura en peso para cada temperatura de cocción (Kg)						
		100 °C	500 °C	750 °C	875°C	1000 °C	1200 °C	1300 °C
PW 50	35/65	14,77	15,20	16,37	26,85	59,45	79,77	
PW 50 + F.v.	35/65	20,15	18,20	15,40	25,35	43,17	54,60	
PW 50	40/60			15,00	18,90	37,07	49,12	

Tabla II.57. Tabla de resistencia hecha en la “Foneria”.

Valores de resistencia obtenidos en el lab. De Ciencia dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica								
Recubrimientos	Componentes de la papilla, ligante/ refractario	Índice de rotura en peso para cada temperatura de cocción Fuerza (1N= 1/9,8Kgf)						
		100 °C	500 °C	750 °C	850°C	1000 °C	1200 °C	1300 °C
PW 50	35/65 (M1-5c)			34,43 (3,51Kg)	36,21 (3,69Kg)	58,43 (5,95Kg)	110,97 (11,31Kg)	80,27 (8,18Kg)
PW 50 + F.v.	35/65 (M1-5cF)			36,01 (3,67Kg)	41,07 (4,18Kg)	46,71 (4,76Kg)	92,63 (9,44Kg)	114,05 (11,62Kg)
PW 50	40/60 (M2-5)			13,48 (1,3Kg)	18,84 (1,92Kg)	26,89 (2,74Kg)	43,83 (4,47Kg)	47,06 (4,8Kg)

Tabla II.58. Tabla de resistencia hecha en el laboratorio de Química.

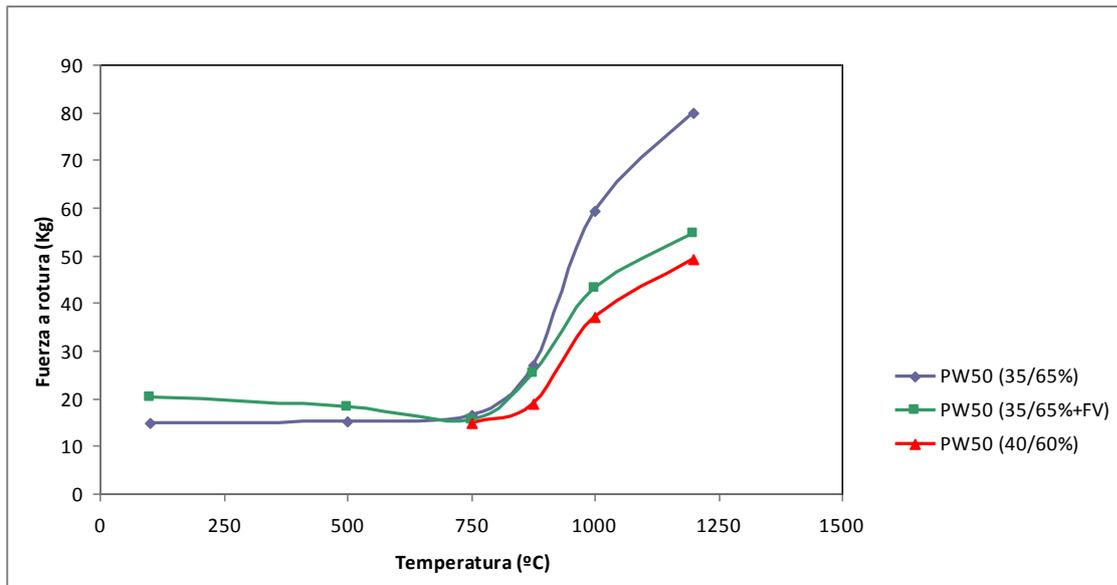


Gráfico II.19. Resistencia de las probetas realizada en el taller de la "Foneria".

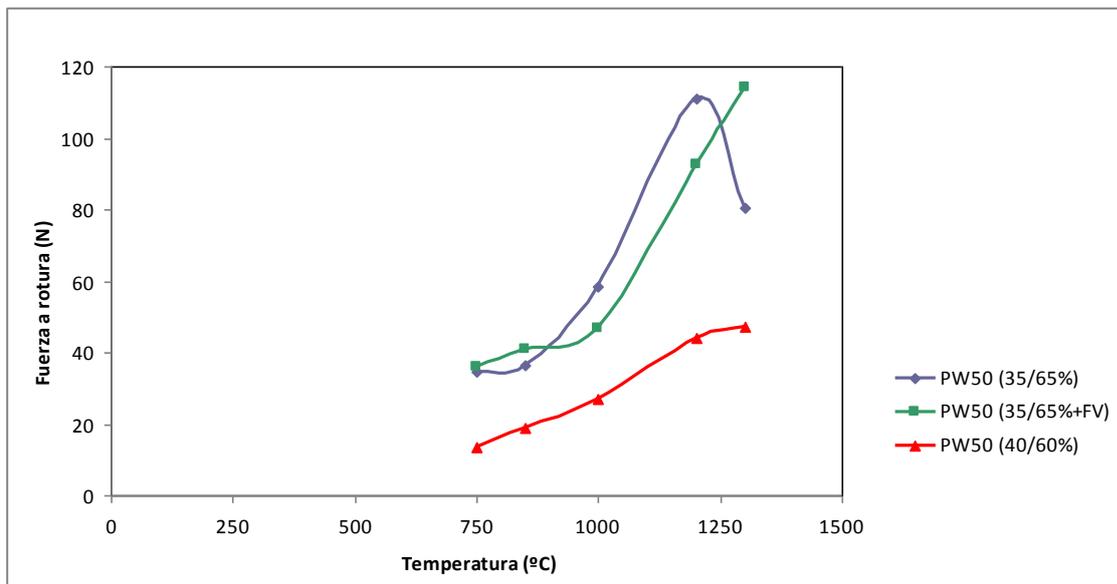


Gráfico II.20. Resistencia de las pruebas realizadas en el laboratorio de Química.

### Valoraciones y conclusiones

A partir de las pruebas realizadas en ambos laboratorios se concluye que:

Los recubrimientos más resistentes se obtienen con la papilla de sílice coloidal PW 50 (35%) y Moloquita -200 (65%), por tanto el combinado 35/65% es el más resistente en todos los casos. La composición 40/60%, en ambos ensayos, resulta más débil que la 35/65%.

El grado de resistencia de la cascarilla es inversamente proporcional al porcentaje de sílice y directamente proporcional al porcentaje de harina de Moloquita -200, dado que la papilla 35/65% es la que presenta una mayor concentración de harina y la menor de sílice; se refuerza así la conclusión anterior.

Cuánto más elevada es la temperatura de cocción de la cascarilla (entre 750°C y 1200°C) mayor es la resistencia obtenida en las pruebas de resistencia.

En las experiencias realizadas la cascarilla no se deforma a alta temperatura (1200°C y 1300°C).

Con respecto a la fibra, de las pruebas realizadas en ambos laboratorios se concluye que:

Las probetas resueltas con rebozados mixtos de grano y fibra de vidrio tienen generalmente un espesor mayor respecto a los que utilizan solo el grano de Moloquita para el rebozado, considerando el mismo número de capas.

No se confirma totalmente la menor resistencia en los recubrimientos con una composición 35/65% que contienen fibra de vidrio en el rebozado en las pruebas realizadas entre 750°C y 1200°C. Los resultados realizados con fibra de vidrio en la “Foneria” resultan menos resistentes que los realizados exclusivamente con solo rebozado de grano de Moloquita 50-80dd, desde 750°C a 1200°C y en todos los casos. Las pruebas de Químicas no ratifican totalmente estos resultados, a 750°C y a 850°C los resultados de Químicas son más resistentes; a 1000°C y 1200°C los resultados de Químicas ratifican los de la “Foneria”.

En cocciones realizadas a 1000°C y a 1200°C los recubrimientos, del mismo tipo de porcentaje y con fibra, ofrecen mayor resistencia que en cocciones a temperaturas inferiores. No obstante los recubrimientos del mismo tipo de porcentaje con fibra de vidrio tienen menor resistencia que los de grano cuando están cocidos a 1000°C y 1200°C.

Sabiendo que la fibra funde a partir de 875°C cabía plantearse posibles deformaciones. En ese sentido, es importante constatar, a partir de las experiencias realizadas, que no se ha observado deformación alguna de la cascarilla en las cocciones inferiores o en las de 1200°C.

### II.7.3. PRUEBA DE RESISTENCIA POR COMPRESIÓN LATERAL (PROBETAS REALIZADAS CON PW 50)

#### Objetivos

Con esta prueba se pretendió comprobar mediante resistencia por compresión lateral cómo se comportaba la cascarilla cerámica realizada con rebozado de grano y con rebozado de fibra vidrio.

#### Infraestructura

Los ensayos se realizaron con una máquina de ensayos universal Hounsfield, Fig. II.26

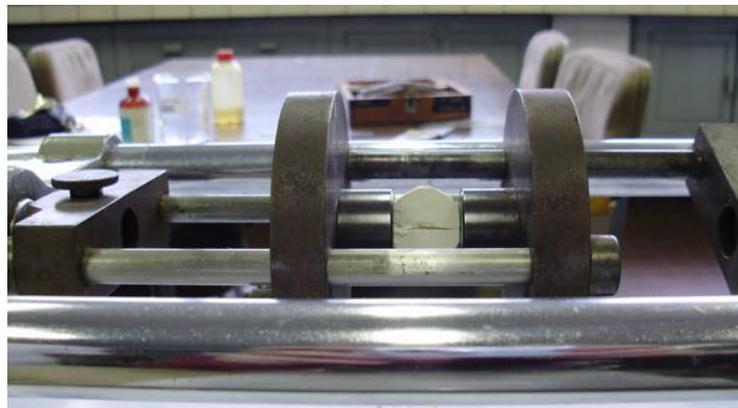


Figura II.26. Máquina universal de ensayos Hounsfield.

#### Material

Se escogieron las fórmulas que habían presentado los mejores resultados de resistencia a la rotura:

Componentes de la papilla (%)	Porcentajes	Rebozado	Capas	Cocción °C
PW 50 / Moloquita -200	35/65%	Grano de Moloquita 50-80dd	5 capas	750
PW 50 / Moloquita -200	35/65%	Grano de Moloquita 50-80dd	3 capas	750
		Fibra de vidrio cortada	2 capas	

Tabla II.59. Composición de la cascarilla cerámica de las probetas para el ensayo de compresión.

Se optó también por dos tipos de aplicación:

Cinco capas de papilla alternando cinco capas de rebozado Moloquita 50-80dd.

Cinco capas de papilla alternando tres capas de refractario Moloquita 50-80dd y dos capas de fibra de vidrio.

Temperatura de cocción de 750°C.

#### Procedimiento utilizado

El formato de las probetas planteado consistió en unas placas circulares de 2cm de diámetro, semejantes a unas monedas, que se colocaron en la prensa, de manera que el eje de compresión recorriera todo el diámetro de las placas. La presión se ejercía sobre los cantos de la placa, dejando las caras a la vista.

#### Resultados

Papilla	Fuerza	Resultado	Imagen
PW 50	50Kg	La placa resuelta con rebozado de grano aguantó más fuerza, rompiéndose a capas.	
PW 50 F.v.	32Kg	La placa resuelta con rebozado alterno de grano y fibra, aguantó menos fuerza, su rotura fue limpia generándose una grieta en la superficie.	

Figura II.27. Resultados comparativos del tipo de rotura de la probetas realizadas con y sin la incorporación de fibra de vidrio en la cascarilla cerámica.

#### Valoraciones y conclusiones

En las placas resueltas con rebozados de grano 50-80dd de Moloquita, la superficie de la cascarilla se rompió en forma de escamas. Durante la compresión saltaron esquiras escamosas. La fuerza soportada fue de 50Kg.

Las placas resueltas con la fibra de vidrio se rompieron de manera diferente, por la mitad, apareciendo en primer lugar una grieta diametral que recorría la trayectoria de la compresión y rompiéndose al final limpiamente como se muestra en la imagen de la Fig. II.27. La presión soportada en este caso fue inferior, menor de 32kg.

Estos ensayos permitieron observar la reacción de estas cáscaras ante este tipo de presión longitudinal. El tipo de rotura indicó que la unión entre las capas es mejor en el caso en que se utiliza fibra de vidrio, dado que la rotura recorría diametralmente la probeta, mientras que en la probeta resuelta exclusivamente con grano, la rotura era entre capas.

Por otro lado, los resultados de la fuerza soportada indicaron que el grado de resistencia de la cáscara resuelta exclusivamente con grano era superior al de la cáscara que incluye fibra de vidrio, confirmando el resultado obtenido a partir de las pruebas de tensión transversal realizadas en el taller de Fundición de la facultad de BBAA.

## II.8. PRUEBAS DE POROSIDAD Y DE CAPACIDAD DE ABSORCIÓN

La cascarilla cerámica es un material refractario y granulado (Moloquita en este caso) aglomerado con sílice coloidal. El tamaño del grano del rebozado proporciona distintos grados de porosidad de la cascarilla cerámica. Durante el proceso de rebozado, estos granos forman entre ellos pequeños huecos micrométricos, que darán lugar a las porosidades de la estructura cerámica. Cuanto más grande es el tamaño de los granos del refractario mayor es la separación entre ellos por tanto mayor será la porosidad de la capa aplicada.

Dichos componentes forman una estructura con cavidades de distintas dimensiones, algunas de ellas microscópicas. Esta formación varía tanto por la distribución de los tamaños del poro irregular, como la conectividad entre ellos.

La porosidad favorece la refractariedad del material, a mayor porosidad en la estructura cerámica mayor resistencia térmica. La porosidad permite disipar el calor a través de los poros lo que resulta ventajoso para que la cascarilla cerámica pueda soportar calentamientos bruscos. La porosidad permite la salida de gases<sup>105</sup>.

La porosidad va en detrimento de la resistencia mecánica. Por otro lado, los poros presentes en la estructura de la cascarilla pueden condicionar la durabilidad de la cascarilla.

“El tamaño base (gruesos) de las partículas influye sobre la resistencia térmica y mecánica de la pieza [...] en general, al crecer el tamaño base es mayor la resistencia pirosférica, pero también lo es la porosidad y menor la resistencia mecánica”<sup>106</sup>.

### Objetivos

Conocer el grado de porosidad de las distintas pruebas realizadas.

### Materiales utilizados

Para verificar su porosidad se utilizaron las plaquetas utilizadas en el test de estabilidad dimensional (ap. II.11., p. 185), considerando también los distintos porcentajes de composición de las mezclas cocidas a distintas temperaturas.

Se empleó para la papilla cerámica sólo PW 50 mezclado con el refractario Moloquita -200, en tres composiciones diferentes de mezcla para comprobar cómo influía en la reducción la composición de la mezcla.

Aglutinante %	Refractario %
35	65
40	60
45	55

Tabla II.60. Porcentajes empleados para el test de reducción de volumen.

Se realizaron probetas planas aplicando cinco capas de cada papilla con cinco de rebozado de Moloquita 50-80dd, sobre un soporte de cartón pluma de tamaño 23 x 5cm. La elección de este soporte se debe a que este material presentaba una superficie estable, plana y lisa que permitía desmoldar la cascarilla antes de cocerla.

<sup>105</sup> En la fundición se recomienda que el molde de cascarilla cerámica sea poroso para facilitar la evacuación de los gases que están atrapados en el interior del molde, provocados por la emanación del metal fundido.

<sup>106</sup> Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Oviedo. Cap 3- Fabricación de materiales refractarios conformados.  
[http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/lecciones4-5\\_6.fabricacionproductos.refractarios.pdf](http://www.etsimo.uniovi.es/usr/fblanco/lecciones4-5_6.fabricacionproductos.refractarios.pdf) consultación mayo 2010.

Además se prepara otra plaqueta de cascarilla del mismo tamaño, con una mezcla de proporción 35/65 introduciendo dos capas de fibra de vidrio cortada. Ésta se preparó con el objeto de verificar la influencia en el grado de porosidad de la presencia de fibra de vidrio. Esta probeta adicional se coció también a distintas temperaturas.

### Procedimientos

Dado que la cascarilla cerámica es una estructura porosa y permeable se planteó medir la porosidad de la misma en función de su capacidad de absorción de agua.

Por ello, se procedió a calcular el contenido de agua que puede absorber cada probeta.

El procedimiento para el test consistió en:

Confeccionar probetas de cascarilla cerámica con distintos tipos de papilla, estas tendrían un formato de plaqueta de 23 x 5cm.

Pesar y registrar el peso de cada plaqueta.

Sumergir las probetas en agua y llevarlas a ebullición durante dos horas para eliminar las burbujas de aire de la cascarilla cerámica.

Posteriormente pesado de la plaqueta saturada de agua.

De esta manera, se cuantificó la masa de agua que puede absorber la cascarilla para distintas composiciones de la mezcla y distintas temperaturas de cocción.

### Resultados

Porcentaje de agua absorbida por las probetas					
Composición Papilla %		Porosidad en función de la temperatura de cocción %			
Aglutinante	Refractario	750 °C	875°C	1000 °C	1200 °C
35	65	11,25	13	8,3	6,8
35	65 + FV	12,5	18	13	10,3
40	60	12,3	13	6,9	8,7
45	55	13	10,8	12,2	9,2

Tabla. II.61. Porcentaje de porosidad de la cascarilla a distinta composición y cocción.

### Valoraciones y conclusiones

La información obtenida ayudó a poder establecer la cantidad de agua que podía absorber la cascarilla cerámica, y además conocer:

El grado máximo de agua absorbida por cada grupo de probetas (los grupos se han clasificado en función de los componentes de la papilla).

La porosidad obtenida a distintos grados de cocción.

Se pudo verificar de los resultados de la tabla II.61, que cada composición de papilla presentaba cierta progresividad lineal en los valores obtenidos, concluyendo que:

El porcentaje más bajo de agua era 6,8% para la composición de proporción 35/65% cocida a 1200°C. En las fotos de microscopía electrónica se puede apreciar fácilmente la diferencia de porosidad de la cascarilla cerámica cocida a 750°C y 1200°C con un porcentaje 35/65% (Fig. II.48, p.135).

A 1200°C los valores son más bajos respecto a los otros valores, excepto en la composición 40/60% que a 1200°C es 8,7% respecto a 6,9% cocido a 1000°C.

A partir de 1000°C hay una disminución de la porosidad para casi todas las composiciones de la mezcla, excepto la correspondiente a 45/55% que a 1000°C presenta un 12,2% respecto a 10,2% cocido a 875 °C.

A 750°C y 875°C los grados de porosidad en las distintas composiciones son los más altos y ésta es mayor respecto a una cocción más alta.

La introducción de dos capas de fibra de vidrio en la cascarilla proporciona una mayor porosidad respecto a las otras probetas, excepto a 750°C donde se obtiene una porosidad del 12,5% inferior al 13% de la composición 45/55% cocida a 750°C. La cascarilla con fibra tiene, generalmente, más porosidad debido a que los filamentos del recubrimiento se posicionan de manera irregular sobre la superficie formando intersticios de tamaños diversos, y la papilla aplicada sobre ella no consigue rellenar todos los huecos, únicamente se observa una excepción en la columna de cocciones a 750°C.

La porosidad de una papilla más líquida se diferencia poco respecto a la de una más consistente; ya que la mayor porosidad la proporcionan los intersticios generados por el grano de refractario que se emplea como rebozado. Es de suponer, en consecuencia, que dependiendo del tamaño de grano se puede modificar la porosidad de la cascarilla cerámica.

Da la sensación que a mayor temperatura la tendencia sea a reducir la porosidad, pero con los resultados obtenidos no se pudo verificar la conclusión. Es de suponer que la porosidad está condicionada también por otros factores; como por ejemplo las variantes que puede ofrecer la aplicación manual con pincel o la disposición aleatoria del rebozado.



## II.9. ENSAYO DE RESISTENCIA DE LA CASCARILLA CERÁMICA HECHA SÓLO CON PAPILLA

En el apartado anterior se ha comentado que el grado de porosidad va en detrimento de la resistencia mecánica de la cascarilla cerámica. Por esta razón, se consideró necesario realizar algunas pruebas con recubrimientos de papilla, donde la porosidad fuera menor que la de los recubrimientos realizados con rebozado de grano o fibra.

### Objetivos

Comprobar si la cascarilla cerámica preparada sólo con papilla, sin aplicación de rebozados, era más resistente que la que recibe algún tipo de rebozado.

### Materiales utilizados

Para la realización de las probetas de papilla se procedió con el sistema aplicado en la "Fonería". Se realizaron cilindros de cera huecos, de 19cm de longitud y 2 de diámetro. Estos cilindros fueron recubiertos únicamente de papilla de composición 35/65%.

Los cilindros de papilla se cocieron a 1200°C, temperatura que se eligió por el ser el valor óptimo en el ensayo anterior de resistencia de la cascarilla cerámica.

### Procedimientos

Para obtener una información exacta de la resistencia de estas probetas se optó por tres distintas maneras para la conformación de la cascarilla cerámica de sólo papilla.

Se realizaron:

- Tres probetas de cinco capas de sólo papilla (la cantidad de capas máxima empleada en el ensayo anterior de resistencia).
- Tres probetas de sólo papilla con el mismo peso que una probeta del ensayo anterior de resistencia, que contenía 5 capas de papilla y cinco de rebozado de Moloquita 50-80dd.

Para esto se midió previamente el cilindro de cera y se añadieron capas de papilla hasta que el peso era el del cilindro de cera más el pretendido.

- Tres probetas de sólo papilla con el mismo grosor de pared que el caso de la probeta de papilla y rebozado.

Dado que una probeta de papilla y rebozado tenía aproximadamente un grosor de 3,20mm y en el ensayo de espesor y peso de cada recubrimiento (ap. II.4.5., p. 92) se estableció que una papilla de composición 35/65% tenía aproximadamente 0,4mm de espesor en su primera capa de contacto, se previó que 8 capas de papilla tendrían el espesor deseado de 3,20mm.

### Resultados





Figura II.28. Probeta de cascarilla cerámica de sólo papilla con grietas en su superficie.

Durante el secado de cada papilla se comprobó que al estar sin rebozado ésta fluía sobre el soporte de cera formando un espesor no uniforme. Además la papilla del recubrimiento se adhería a la superficie de apoyo, lo que aportaba una dificultad añadida, que se solucionó sosteniendo en suspensión la probeta, sujetándola desde el interior del tubo de cera.

Se observaron grietas en la superficie de todas las probetas de sólo papilla. Se consideró que ello era debido a la contracción de la papilla durante el proceso de secado, es decir, con la pérdida de agua, la papilla perdía volumen. La estabilidad dimensional de la papilla no se correspondía con la de la cascarilla cerámica.

#### **Valoraciones y conclusiones**

Podemos deducir que la estabilidad dimensional de la cascarilla cerámica es consecuencia de la aportación del rebozado, el grano o la fibra que hacen que la papilla no contraiga durante el secado y actúan de árido estable, frenando el agrietamiento. Mientras que como se ha podido observar la papilla si se resquebraja, contrae, durante el secado.

Todas las probetas del ensayo resultaron inviables antes ya de la cocción, las fisuras longitudinales impidieron considerar este tipo de recubrimiento para su aplicación escultórica. No se realizaron pruebas de resistencia sobre las probetas cilíndricas fisuradas, ni tampoco sobre probetas planas que pudiesen aportar una referencia sobre su resistencia real.

## II.10. IMÁGENES DE MICROSCOPIA DE LAS SECCIONES DE LA CASCARILLA CERÁMICA

La Dra. Carmen Marcos, en una primera publicación, La microporosidad de la cascarilla cerámica: demostración visual con imágenes de TEM (Transmisión Electrón Microscope)<sup>107</sup>, utilizó este tipo de microscopio electrónico para observar la existencia de la microporosidad en la papilla de la cascarilla cerámica (sílice coloidal y Moloquita -200). Para otra publicación posterior Catálogo visual de la morfología de materiales habituales en laboratorio de fundición, empleó un microscopio electrónico de Barrido<sup>108</sup> (SEM), con la finalidad de observar la morfología de distintos materiales. Entre ellos, la estructura morfológica de dos tipos de sílice coloidal Hispasil 1731 y PW 50 y la combinación de éstas con la Moloquita -200, obteniendo una visión más completa de estos materiales.

De esta investigación de la Dra. Marcos, se destaca la conclusión relativa a la existencia de microporosidad en la papilla. No obstante, en relación a la conclusión sobre la mayor porosidad y menor compacidad de las papillas resueltas con sílice coloidal del tipo PW 50 frente a las de Hispasil 1731 no se dispone de resultados.

### Objetivos

Con las pruebas de microscopia se pretendió confirmar la estructura estratificada y porosa de la cascarilla resuelta con la utilización de papillas compuestas de sílice coloidal PW 50 y Moloquita -200.

### Infraestructura

Se utilizó un microscopio electrónico de Barrido (SEM)<sup>109</sup> y un microscopio óptico con los cuales se fotografiaron los aspectos morfológicos de la microestructura de la cascarilla cerámica.

### II.10.1. IMÁGENES OBTENIDAS CON EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO

#### Infraestructura

Se utilizó un microscopio electrónico de Barrido<sup>110</sup> (SEM) Hitachi H-2300 de los CCIT de la UB con el cual se fotografiaron los aspectos morfológicos de la microestructura de la cascarilla cerámica.

---

<sup>107</sup> Marcos Martinez, C.: La microporosidad de la cascarilla cerámica: demostración visual con imágenes de TEM (Transmisión Electrón Microscope). En el libro Marcos, C. (coord): La fundición artística en la Universidad española: la investigación, año 2006. Ed: Grupo de Investigación Nuevos Procedimientos Escultóricos y otros, Valencia 2007.

<sup>108</sup> Marcos Martinez, C.: Catálogo visual de la morfología de materiales habituales en laboratorio de fundición. En el libro de Acta Marcos, C. (coord): II Congreso nacional de investigadores en fundición artística. Facultad de Bellas Artes de Valencia Departamento de escultura, Valencia 2009.

<sup>109</sup> Microscopia electrónica de Barrido (SEM) (Scanning Electron Microscopy). A través de este método de análisis se consiguen reproducir imágenes de alta resolución obteniendo información sobre la morfología del material analizado. Un haz de electrones inciden sobre la probeta, y a través de un detector se mide la cantidad de electrones enviados que arroja la densidad de la zona de muestra. Para haber una lectura de la probeta ésta tiene que ser conductora, por esto las probetas se recubrieron con una capa delgada de metal, utilizando oro para ello.

<sup>110</sup> Con la colaboración de la Dra. Mercè Segarra, Dra. Monica Martinez y la ayuda del Dr. Xavi Garcia del departamento de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica de la Facultad de Química de la UB



Figura II.29. Microscopio electrónico de Barrido (SEM)

### Materiales

Las pruebas se realizaron utilizando plaquetas del ensayo de resistencia a la rotura (ap. II.7.2., p. 125.) testadas ya anteriormente con las pruebas de resistencia<sup>111</sup> en el laboratorio del departamento de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica de la Facultat de Química de la UB. Dichas probetas correspondían al tipo de cascarilla m1-5, resuelta con papilla de PW 50 y harina de Moloquita -200, en la proporción 35/65%, con cinco capas completas, de papilla y rebozado, cocidas a 1200°C y dieron los valores más altos en el resultado de la prueba de rotura.

Las probetas correspondientes al grupo de papilla 35/65%, m1-5, fueron comparadas con probetas de otros porcentajes en los constituyentes de las papillas para poner de relieve las diferencias entre las microestructuras. Las otras mezclas observadas con el microscopio electrónico de barrido fueron las siguientes: m1-4 capas cocida a 1200°C; m1-5 capas cocida a 1300°C; m1-4 capas a 750°C, m1-5F capas a 1200°C; m2-5 capas a 1200°C.

### Procedimientos utilizados

Valoraciones relativas a los aspectos estructurales puestos de relieve en las fotografías considerando las pruebas independientemente y comparando las diferencias a continuación.

Las imágenes mostradas presentan una sección de la rotura de la probeta utilizada en la prueba de flexión realizada en los laboratorios de la facultad de Química de la UB.

El voltaje utilizado fue de 15 kv y una corriente de sonda de 500 pA. Las muestras fueron recubiertas con una capa nanométrica de carbono para poder ser observadas. Dicha capa no interfiere en la morfología de la microestructura. Su utilidad es hacer conductora a la muestra para poder ser observada en un microscopio electrónico de barrido en modo de alto vacío.

---

<sup>111</sup> 2.11.2. 3ª prueba de resistencia facultad de química UB (PW 50) a 750°C, 1000°C, 1200°C y 1300°C.

## II.10.1. 1. RESULTADOS, M1-5 A 1200°C

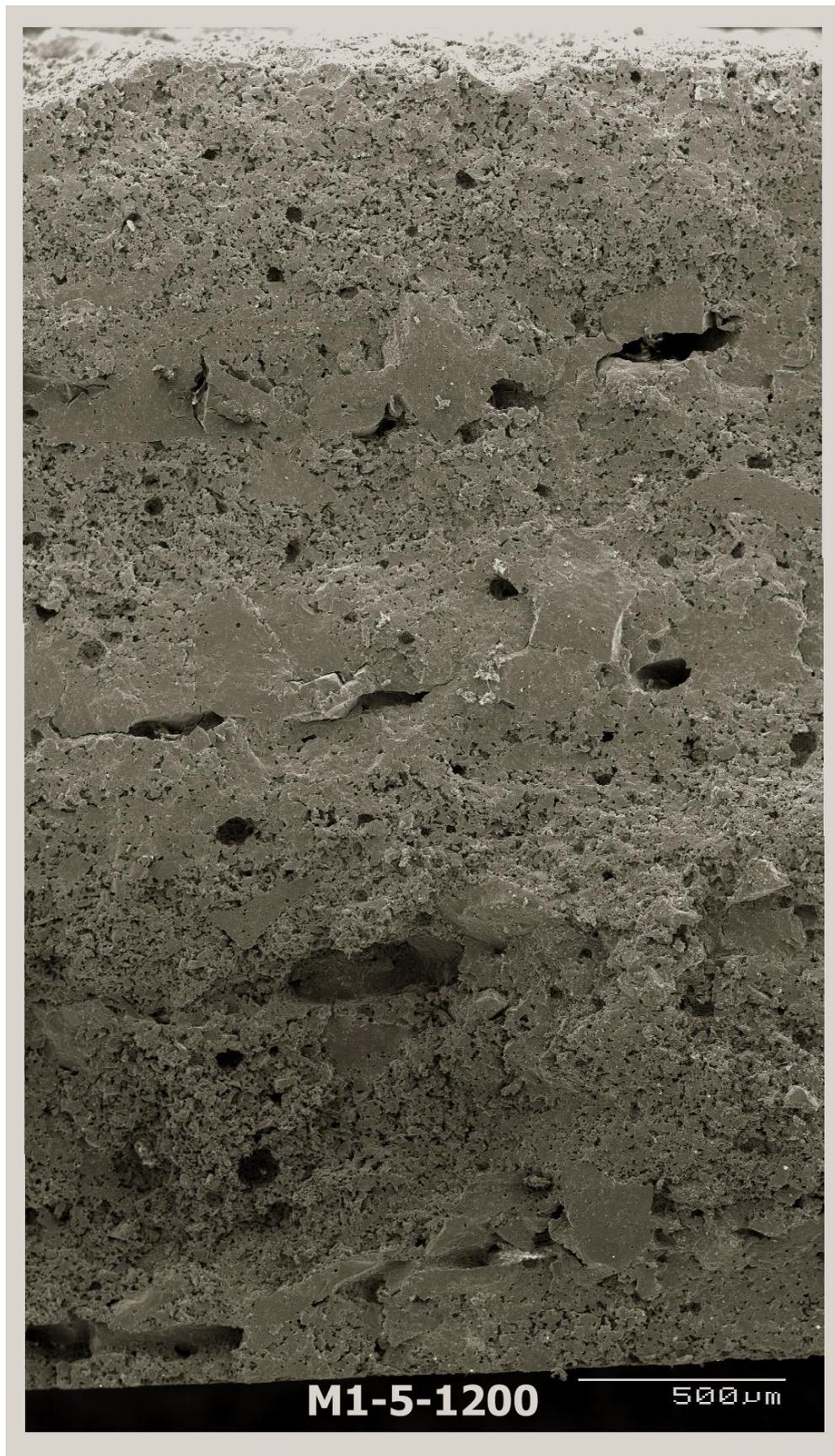


Figura II.30. Imagen de la microestructura de la mezcla m1-5 cocida a 1200 °C.

## Valoraciones y conclusiones

En la imagen completa (Fig. II.30) se puede apreciar perfectamente la sucesión estratificada de capas. Capas de papilla (PW 50 con Moloquita -200) y de grano de rebozado (Moloquita 50-80dd). Desde el punto de vista de la cascarilla cerámica se considera una capa completa al conjunto formado por una de papilla y una de rebozado. Esta cascarilla del grupo m1-5 tiene cinco capas completas (tabla II.62.), aunque en la imagen no se ven los granos del rebozado de la última capa. Es decir, en la imagen solo se aprecian 9 niveles en lugar de los diez que se podrían apreciar. No obstante se aprecia perfectamente la estructura estratificada de la cascarilla.

Recubrimiento de la cascarilla cerámica m1-5					
	1ª capa	2ª capa	3ª capa	4ª capa	5ª capa
Recubrimiento	Papilla + Grano de Moloquita 50-80 dd				

Tabla II.62. Estructura del recubrimiento de la cascarilla cerámica m1-5.

Empezando a contar desde la parte inferior:

La capa de contacto de papilla, bastante delgada en comparación con las otras capas de papilla. A continuación el rebozado de grano con alguna cavidad.

La capa siguiente es de papilla y esta casi se funde con el rebozado.

La tercera capa presenta una correlación entre el grosor de la aplicación de papilla y la del rebozado. Es en este caso donde mejor se aprecia el grueso del rebozado, en el resto de capas el grano tiene un grosor menor que la capa de papilla.

La cuarta capa tiene un grosor menor que la tercera, aunque mayor que la primera.

Y la quinta capa es de papilla y no se aprecian en la imagen granos de Moloquita 50-80 dd.

En esta imagen se puede apreciar también la porosidad. Es apreciable la porosidad de las capas de papilla, es una porosidad micrométrica bastante homogénea, en la que las pequeñas cavidades están interconectadas. (Fig. II.31).

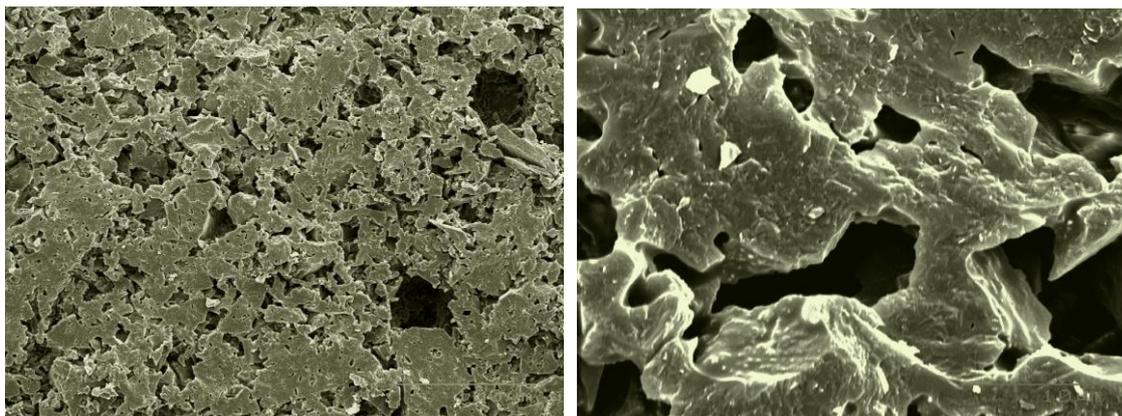


Figura II.31. Estructura porosa de la papilla M1-5 1200°C (poros irregulares) y presencia de burbuja de aire atrapada en ella forma circular.

En las imágenes ampliadas se puede notar la estructura porosa de la papilla (la mezcla entre sílice coloidal y Moloquita -200) con poros de forma y tamaño irregular.

La papilla presenta también profundas cavidades de forma redondeada, de diámetro mucho mayor que las mencionadas. Probablemente se hayan producido con la inclusión en la papilla de burbujas de aire (Fig. II.31).

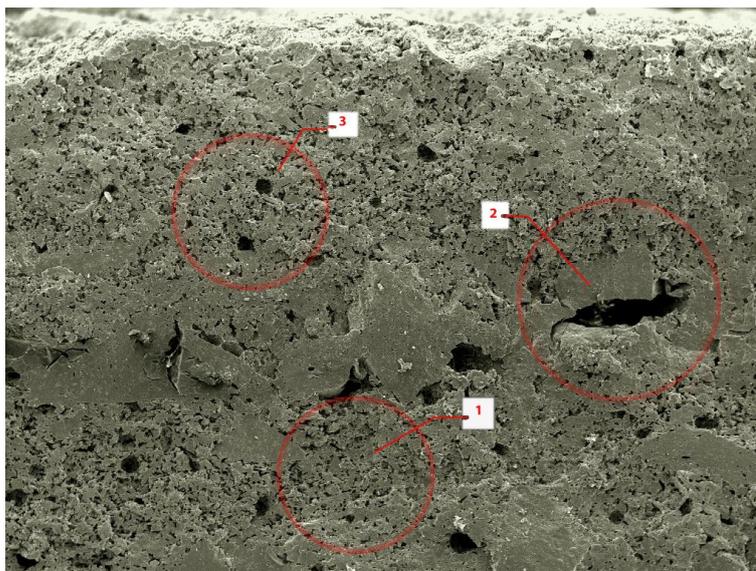


Figura II.32. Distinta conformación de la porosidad.

En la imagen se pueden hallar grandes cavidades, en las capas de rebozado de Moloquita 50-80dd, porosidad macrométrica (Fig. II.32). Se observa distinta conformación de la porosidad, en la zona 1 la porosidad debido a la papilla, en la 2 porosidades debido al rebozado, en la 3 porosidades debido a la conformación de burbuja de aire atrapado entre la papilla.

Grano recubierto con la papilla, con bastante homogeneidad. Cuando se realiza el rebozado, el grano penetra parcialmente en la papilla, que presenta una consistencia fluida, y queda atrapado en el interior o pegado en la superficie de la misma. Cuando se aplica una nueva capa de papilla, ésta penetra en las cavidades que quedan entre los granos, envolviéndolos y uniéndolos. No obstante, de forma aleatoria, entre los granos se originan cavidades (Fig. II.33.).

Fractura del grano. Se puede observar que la fractura es bastante limpia. Por un lado, no se observan los escalonados propios de un estratificado poco cohesionado entre capas, aunque a simple vista este aspecto es apreciable en algunas ocasiones. Por otro, el grano presenta fracturas limpias al mismo nivel que la papilla, lo que hace suponer que la cohesión entre la papilla y el grano es muy fuerte, lo suficiente como para que el grano no se pueda soltar de la papilla cuando se le ha sometido a la prueba.

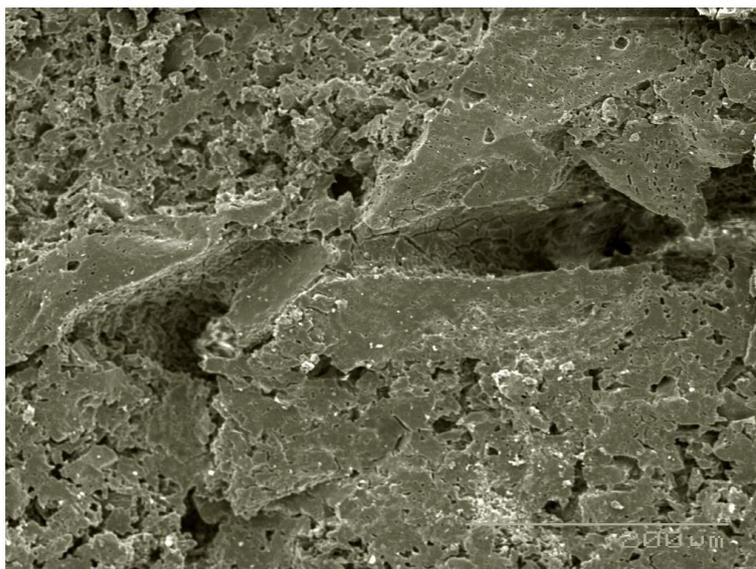


Figura II.33. Rebozado de grano de Moloquita 50-80 entre la papilla con conformación de cavidad entre los granos.

En la Fig. II.33 se puede apreciar dos tipos de porosidades; la de la papilla (unión entre PW 50 y Moloquita -200) y la porosidad de la estructura del grano de Moloquita 50-80dd, este es un

caolín (arcilla) calcinado y posteriormente triturado, por esto en su estructura presenta micro-poro, (Fig. II.34. y Fig. II.35).

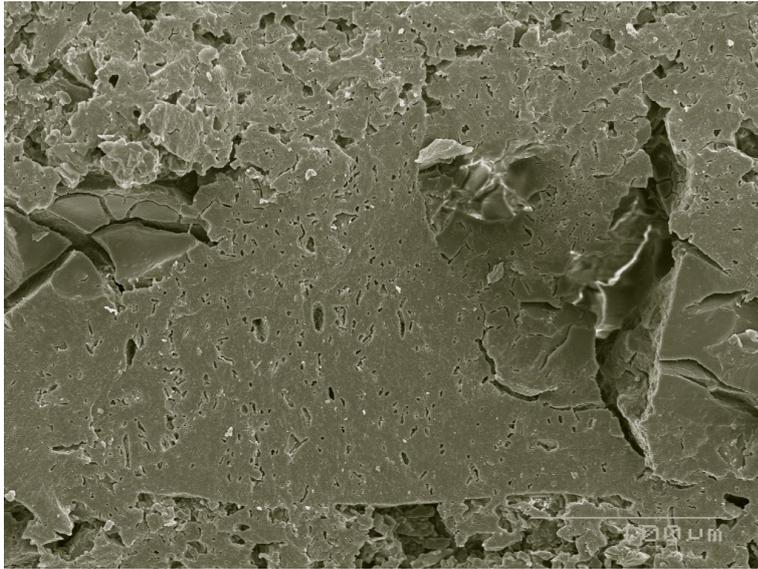


Figura II.34. Estructura porosa del grano de Moloquita 50-80 recubierto de papilla.

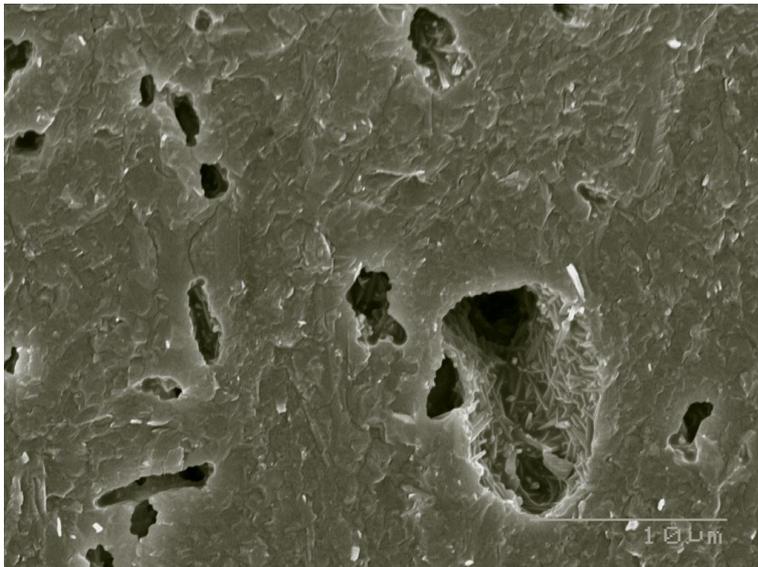


Figura II.35. Detalle del grano de Moloquita 50-80 y su estructura interna.

## II.10.1.2. RESULTADOS M1-4 CAPAS 1200 °C

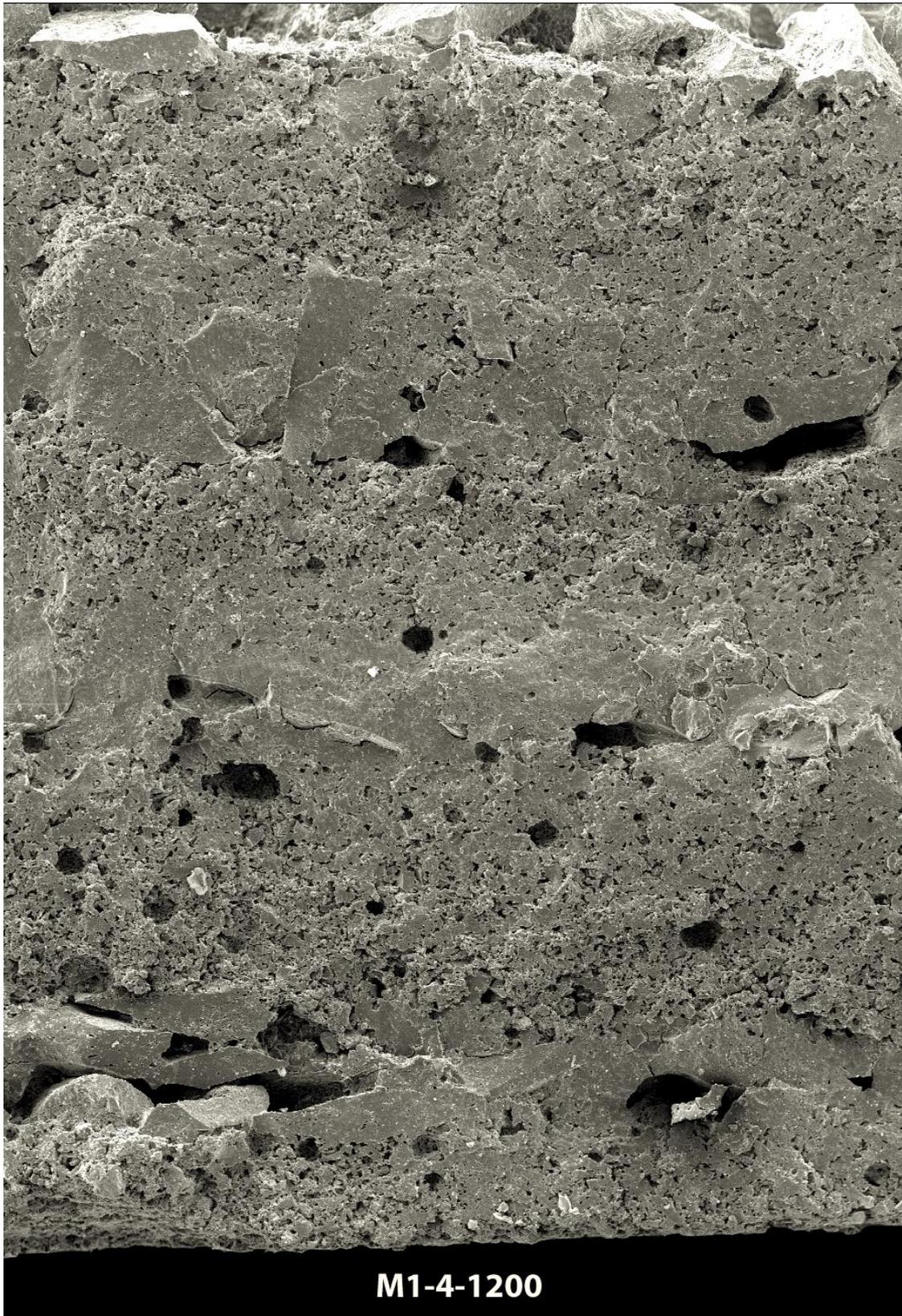


Figura II.36. Imagen de la microestructura de la mezcla m1-4 cocida a 1200 °C.

En la imagen completa del m1-4 (Fig. II.36) se puede apreciar perfectamente la sucesión estratificada de capas constituidas por aplicaciones de papilla (PW 50 con Moloquita -200) y grano de rebozado (Moloquita 50-80dd).

Recubrimiento de la cascarilla cerámica m1-4				
	1ª capa	2ª capa	3ª capa	4ª capa
<b>Recubrimiento</b>	Papilla + Grano de Moloquita 50-80dd	Papilla + Grano de Moloquita 50-80dd	Papilla + Grano de Moloquita 50-80dd	Papilla + Grano de Moloquita 50-80dd

Tabla II.63. Estructura del recubrimiento de la cascarilla cerámica m1-4

En principio, la cascarilla m1-4 se diferencia de la m1-5, fotografiada y comentada anteriormente, en que dispone de una capa menos. Por lo demás el tipo de materiales, el sistema de aplicación y la cocción son los mismos, (Fig. II.37.).

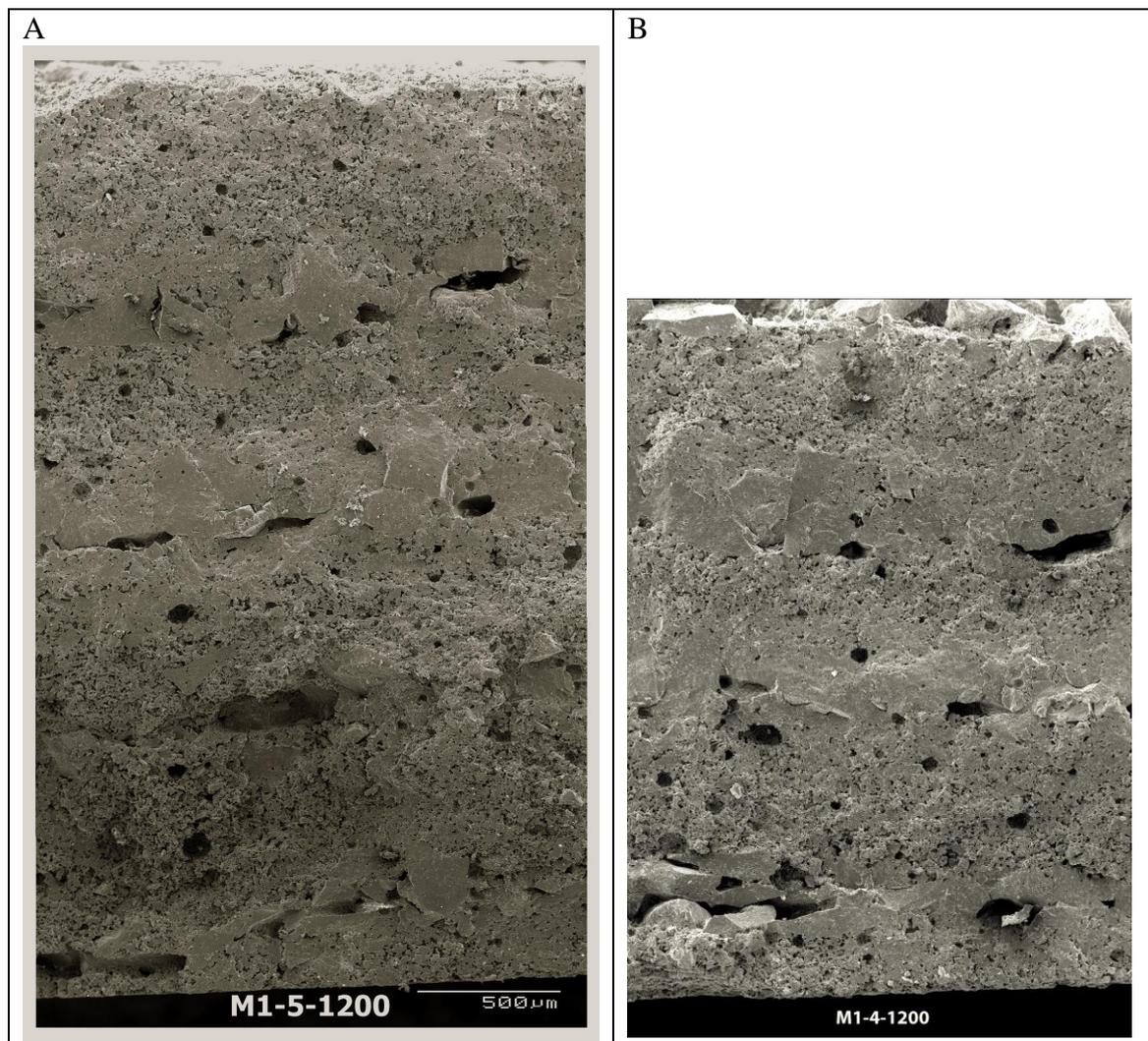


Figura II. 37. Comparación gráfica de la imagen A (m1-5 capas 1200°C) con la B (m1-4 capas 1200°C)

Esta cascarilla del grupo m1-4 tiene cuatro capas completas, en la Fig. II.36, se ven perfectamente las cuatro capas completas constituidas por 8 niveles. Se aprecia perfectamente la estructura estratificada de la cascarilla.

Empezando a contar desde la parte inferior, tenemos:

En la primera capa, el nivel de la papilla, un poco más delgada en comparación con los otros recubrimientos de papilla aunque todas ellas difieren en el grosor. A continuación el rebozado de grano con algunas cavidades importantes.

La capa siguiente, la segunda, empieza con la papilla y ésta casi se funde con el rebozado.

El tercer estrato presenta una correlación entre el grosor de la capa de papilla y la del rebozado. El rebozado queda perfectamente integrado entre las capas de papilla y es difícil apreciar los granos de forma aislada.

La cuarta capa tiene un grosor menor que la tercera, aunque mayor que la primera. Se aprecian en la imagen granos de Moloquita 50-80dd.

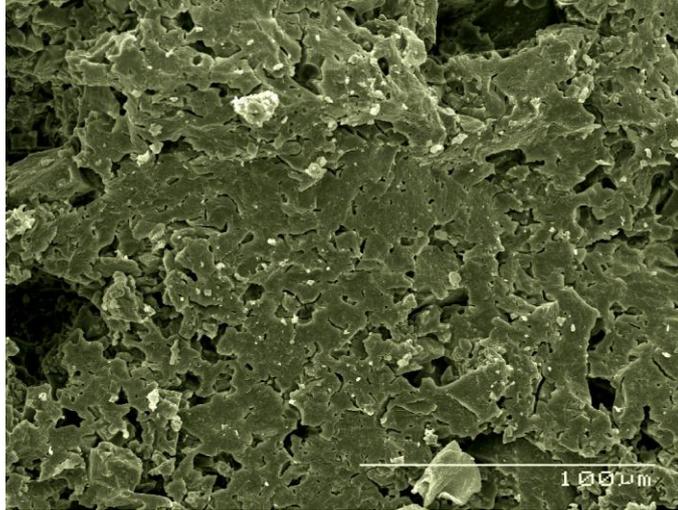


Figura II.38. Porosidad de la papilla M1-4 1200°C.

En esta Fig. II.38., se puede apreciar también la porosidad. Es apreciable la porosidad de los recubrimientos de papilla, es una porosidad micrométrica bastante homogénea, en la que las pequeñas cavidades están interconectadas. En las imágenes ampliadas se puede notar la estructura porosa de la papilla (la mezcla entre sílice coloidal y Moloquita -200) con poros de forma y tamaño irregular. La papilla presenta también profundas cavidades de forma redondeada, de diámetro mucho mayor que las mencionadas. Probablemente se hayan producido con la inclusión en la papilla de burbujas de aire.

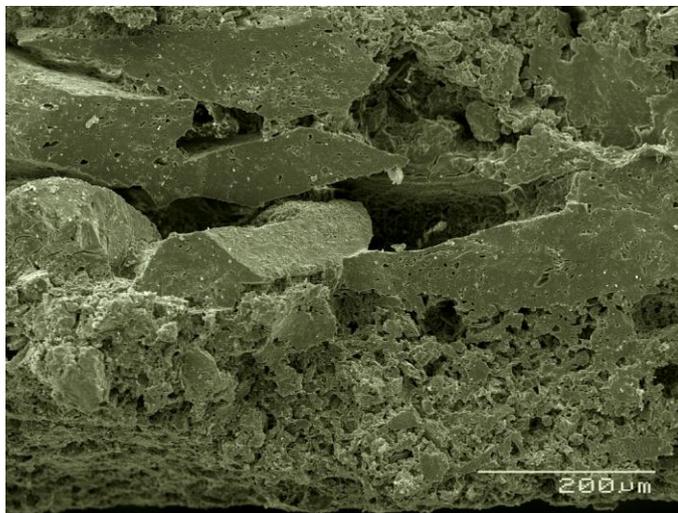


Figura II.39. Superposición del grano de Moloquita50-80dd entre la papilla.

En la (Fig. II.37, imágenes A y B), en el nivel de rebozado de Moloquita 50-80dd, se pueden hallar grandes cavidades, porosidad macrométrica. En la Fig. II.39., las cavidades dejan los granos sin envoltorio de papilla y permite verlos como tales, la fractura del grano no se halla en el mismo plano que el del resto de la probeta y esto es una diferencia sustancial en relación a la imagen de del m1-5 cocida a la misma temperatura. Por lo que respecta al resto, y en general, el grano está recubierto con la papilla, con bastante homogeneidad, igual que en el caso anterior.

La fractura de la probeta es bastante limpia y en general la de los granos también.

No se observan los escalonados propios de un estratificado con poca cohesión entre capas.

### II.10.1.3. RESULTADOS M1-5 CAPAS 1300°C

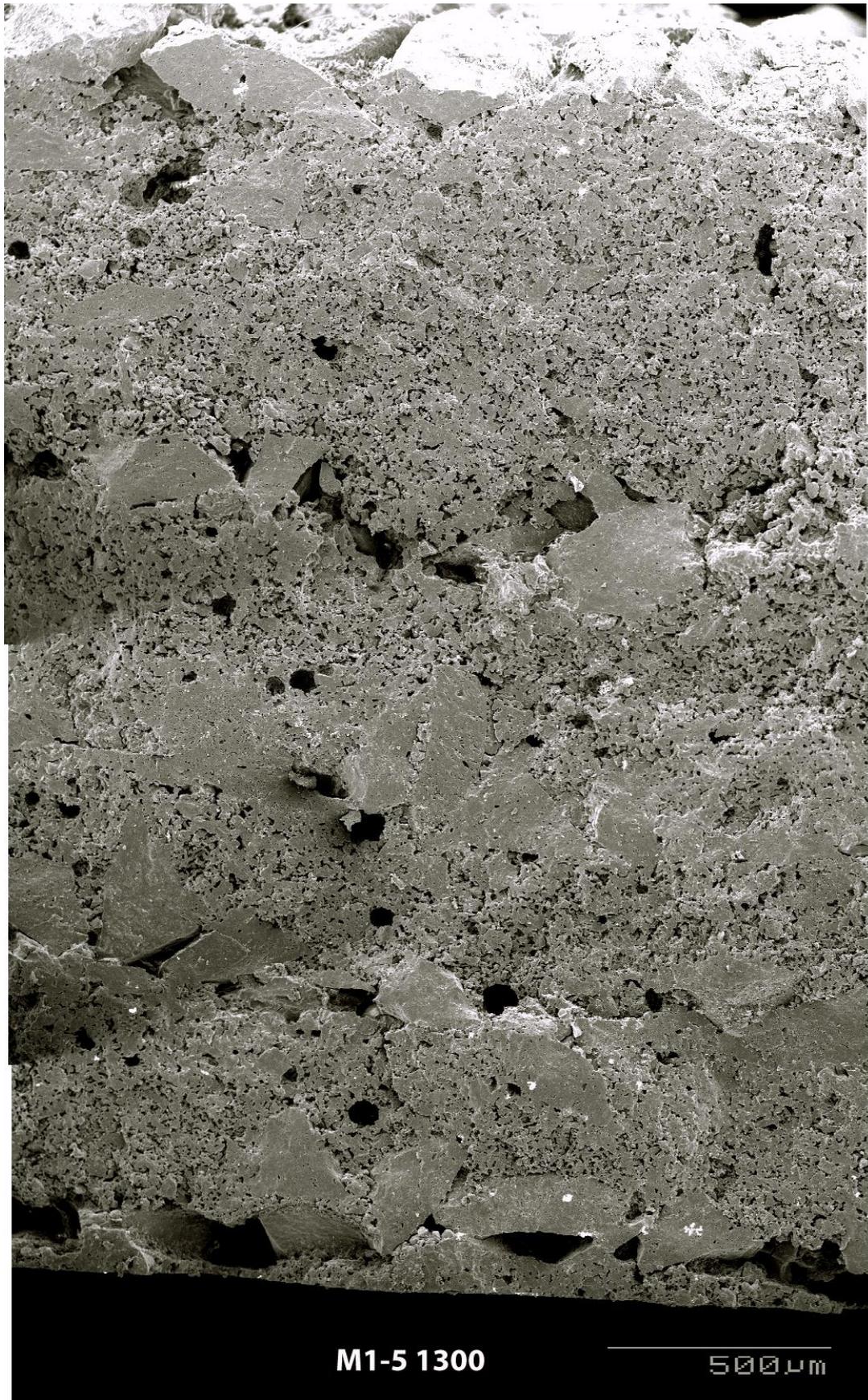


Figura II.40. Imagen de la microestructura de la mezcla m1-5 cocida a 1300°C.

En el ensayo de rotura realizado en laboratorio de Química, la probeta cocida a 1300°C resultó más frágil que la cocida a 1200°C.

En la imagen completa del m1-5 se puede apreciar perfectamente la sucesión estratificada de capas constituidas por aplicaciones de papilla (PW 50 con Moloquita -200) y de grano de rebozado (Moloquita 50-80dd).

Recubrimiento de la cascarilla cerámica m1-5					
	1ª capa	2ª capa	3ª capa	4ª capa	5ª capa
Recubrimiento	Papilla + Grano de Moloquita 50-80dd				

Tabla II.64. Estructura del recubrimiento de la cascarilla cerámica m1-5.

En principio, la cascarilla m1-5 a 1300°C se diferencia de la m1-5 a 1200°C en la temperatura de cocción. Por lo demás el tipo de materiales, el sistema de aplicación y la cocción son los mismos, (Fig. II.41., imágenes A y B).

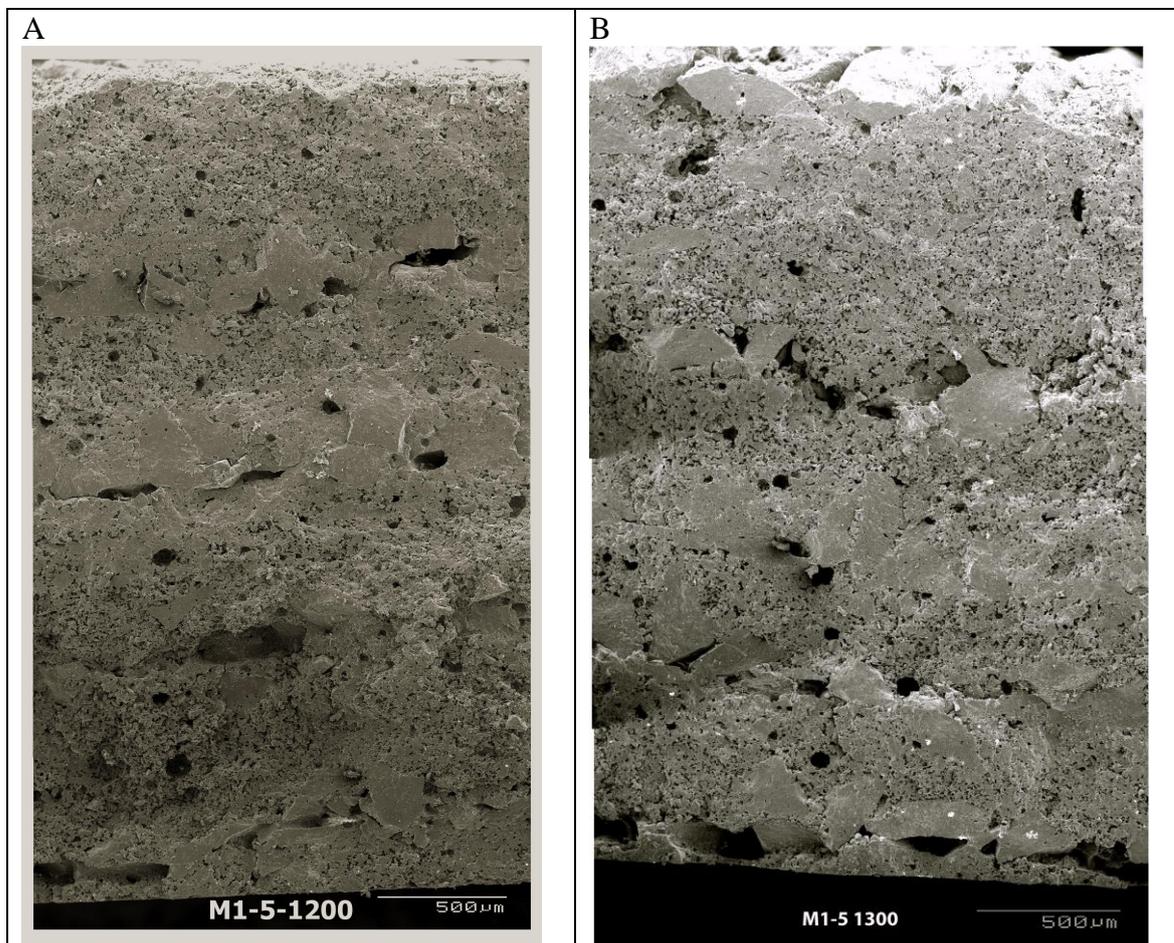


Figura II.41. Comparación gráfica de la imagen A (m1-5 capas 1200°C) con la B (m1-5 capas 1300°C).

Esta cascarilla del grupo m1-5 tiene cinco capas completas, en la imagen se ven perfectamente las cinco capas completas constituidas por 10 niveles. Se aprecia perfectamente la estructura estratificada de la cascarilla.

Empezando a contar desde la parte inferior:

En la primera capa, el nivel de la papilla, bastante más delgada en comparación con los otros recubrimientos de papilla aunque todas ellas difieren en el grosor. A continuación el rebozado de grano con algunas cavidades importantes.

La capa siguiente, la segunda, empieza con la papilla, su espesor también es limitado, presenta una correlación entre el grosor de la capa de papilla y la del rebozado.

La tercera capa es muy similar a la segunda aunque el rebozado esta mejor recubierto.

La cuarta capa tiene un grosor similar y el rebozado presenta mayor porosidad entre el rebozado de grano de Moloquita 50-80dd.

La quinta capa es la que tiene mayor espesor.

Se puede percibir en la Fig. II.41. cierta irregularidad en la uniformidad de las capas. Se ha podido observar que la aplicación de la papilla con pincel produce acumulaciones aleatorias de ésta sobre la superficie. Durante el proceso de aplicación de la papilla seguido del rebozado de grano, éste penetra en la papilla, depositándose en la parte inferior, entrando en contacto con el soporte de cera u otro material, o bien con la capa anterior de papilla ya seca. El exceso de papilla llega a aflorar sobre el rebozado de grano.

En la imagen del m1-5 a 1300°C se puede apreciar también la porosidad. Es apreciable la porosidad de los recubrimientos de papilla, es una porosidad micrométrica bastante homogénea, en la que las pequeñas cavidades están interconectadas.

En las imágenes ampliadas se puede notar la estructura porosa de la papilla (la mezcla entre sílice coloidal y Moloquita -200) con poros de forma y tamaño irregular (Fig. II.42).

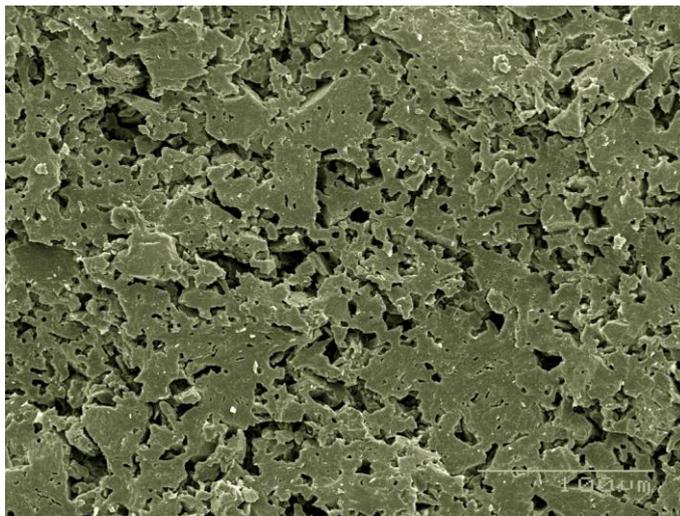


Figura II.42. Detalle de la porosidad de la papilla m1-5 1300°C.

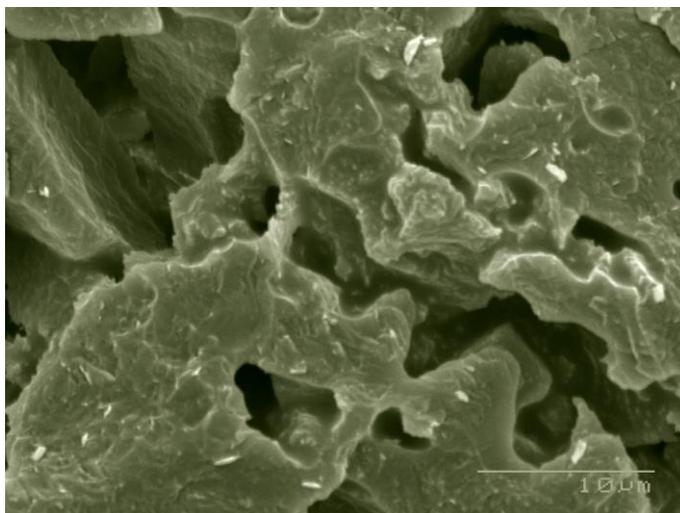


Figura II.43. Detalle de la porosidad de la papilla m1-5 1300°C.

Comparando las dos imágenes del grupo m1-5 (Fig. II.44), se puede apreciar una porosidad más acentuada en la de la izquierda, es decir, la cocida a 1200°C.

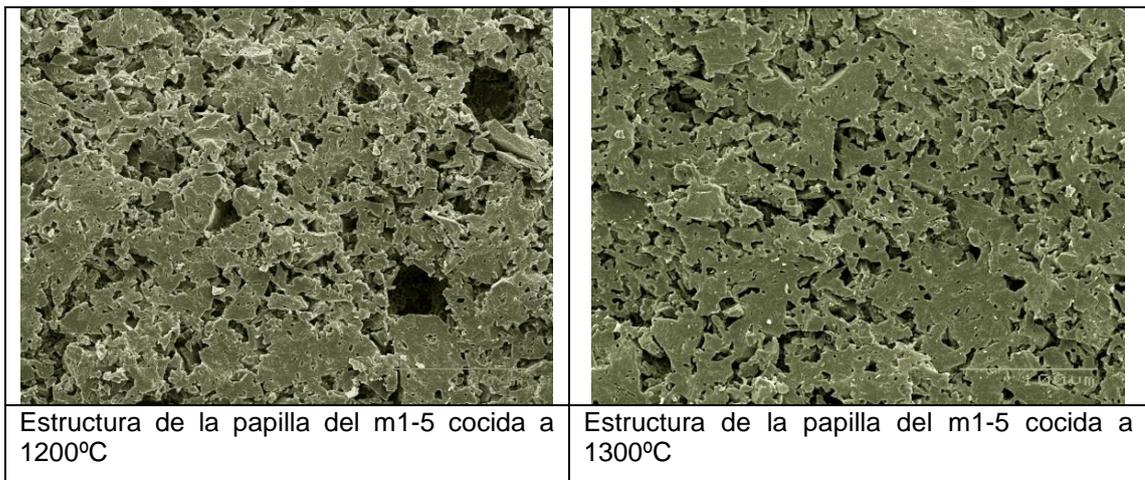


Figura II.44. Comparación de la porosidad de las papillas M1 cocidas a 1200 y 1300°C

La papilla presenta también profundas cavidades de forma redondeada atribuidas a la formación de burbujas de aire durante la aplicación de la papilla.

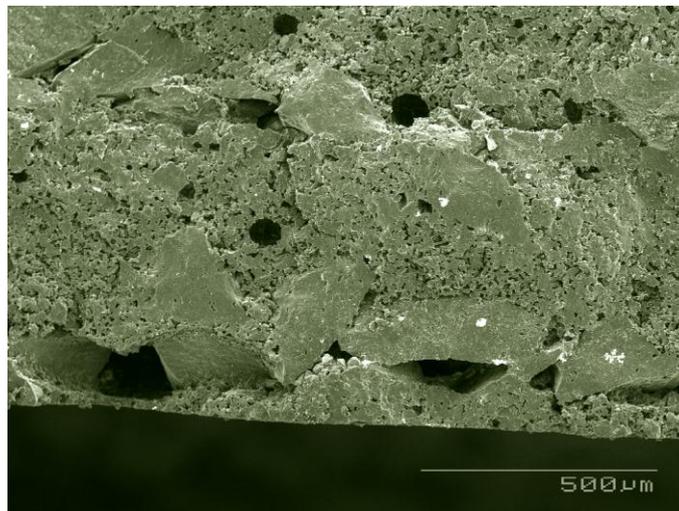


Figura II.45. Intervalo de la papilla y rebozado de Moloquita 50-80dd papilla del m1-5 cocida a 1300°C.

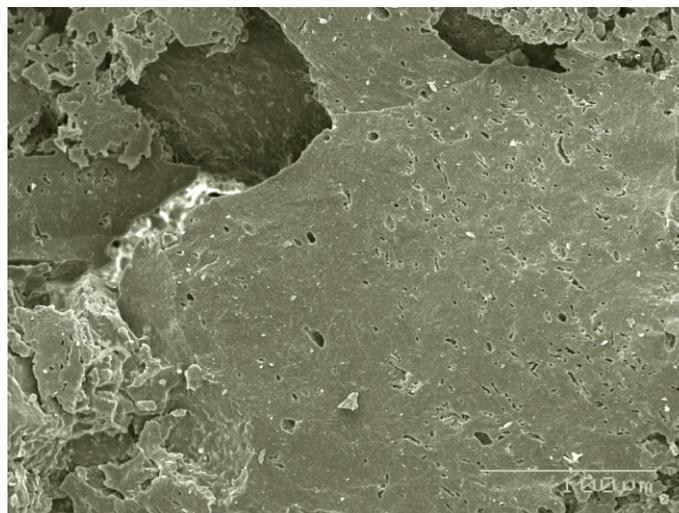


Figura II.46. Detalle del Intervalo de la papilla y rebozado de Moloquita 50-80dd papilla del m1-5 cocida a 1300°C.

En la imagen se pueden hallar grandes cavidades, en las capas de rebozado de Moloquita 50-80dd, porosidad macrométrica (Fig. II.45 y 46). En esta imagen las cavidades dejan los granos sin envoltorio de papilla y permite verlos como tales, la fractura del grano no se halla en el mismo plano que el del resto de la probeta y esto es una diferencia sustancial en relación a la imagen del m1-5 cocida a la misma temperatura.

Por lo que respecta al resto, y en general, el grano está recubierto con la papilla, con bastante homogeneidad, igual que en el caso anterior, salvo en la primera capa donde el recubrimiento del rebozado presenta un buen número de cavidades.

La fractura de la probeta es bastante limpia y en general la de los granos también.

No se observan los escalonados propios de un estratificado con poca cohesión entre capas.

#### II.10.1.4. RESULTADOS M1-4 CAPAS 750°C



Figura II.47. Imagen de la microestructura de la mezcla m1-4 cocida a 750°C.

En el ensayo de rotura realizado en laboratorio de Química la probeta cocida a 750°C resultó más frágil que la cocida a 1200°C. En la imagen completa del m1-4 750°C se puede apreciar perfectamente la sucesión estratificada de capas constituidas por aplicaciones de papilla (PW 50 con Moloquita -200) y de grano de rebozado (Moloquita 50-80dd).

En principio la cascarilla m1-5 a 1300°C se diferencia de la m1-5 a 1200°C, en la temperatura de cocción. Por lo demás el tipo de materiales, el sistema de aplicación y la cocción son los mismos.

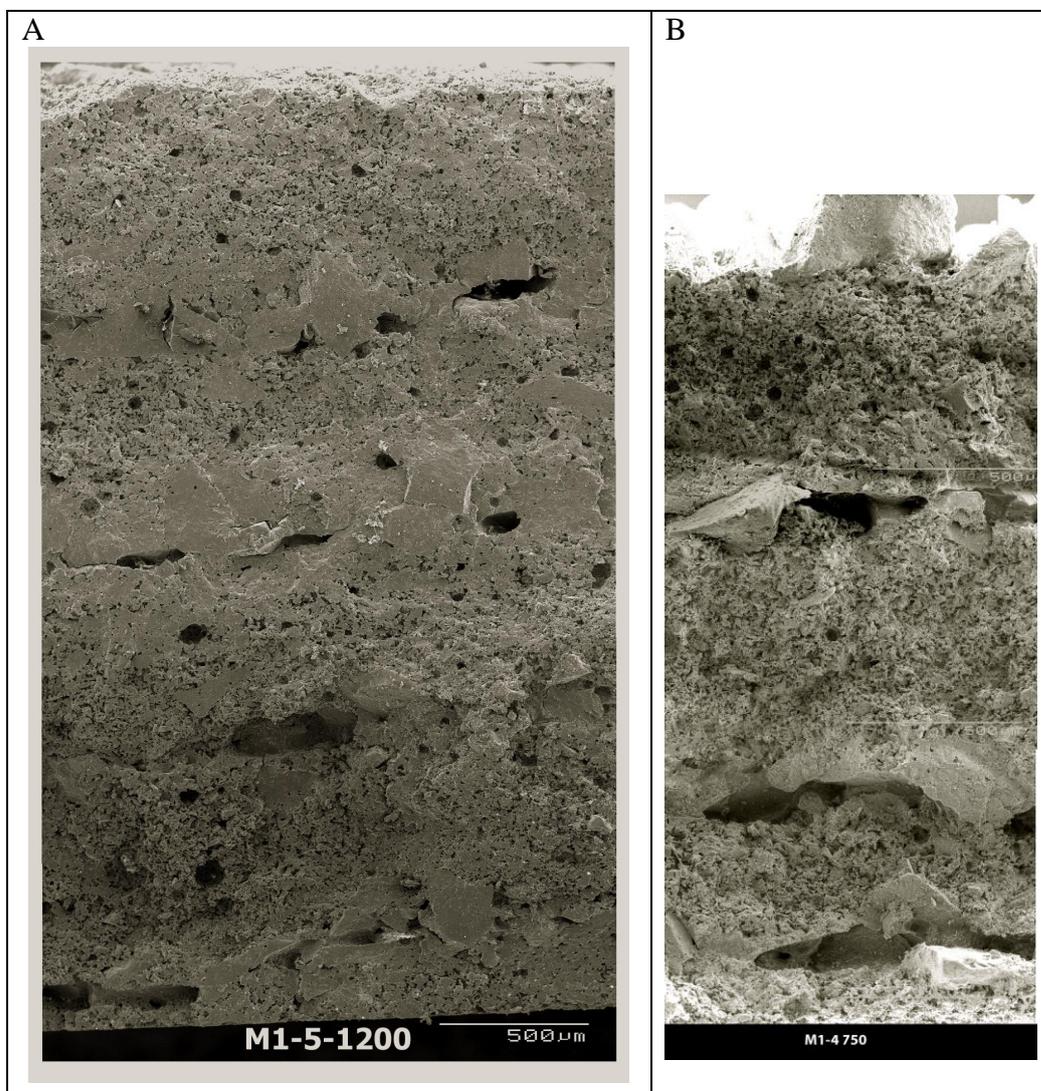


Figura II. 48. Comparación gráfica de la imagen A (m1-5 capas 1200°C) con la B (m1-4 capas 750°C).

Se puede apreciar Fig. II. 48. la diferencia de grosor entre un tipo y otro de cascarilla cerámica, debido a la diferencia en el número de capas. Esta cascarilla del grupo m1-4 tiene 4 capas completas, en la imagen se ven perfectamente las cuatro capas completas constituidas por 8 niveles. Se aprecia perfectamente la estructura estratificada de la cascarilla.

Recubrimiento de la cascarilla cerámica m1-4				
	1ª capa	2ª capa	3ª capa	4ª capa
<b>Recubrimiento</b>	Papilla + Grano de Moloquita 50-80 dd			

Tabla II.65. Estructura del recubrimiento de la cascarilla cerámica m1-4.

Empezando a contar desde la parte inferior:

En la primera capa, el nivel de la papilla, bastante más delgada en comparación con los otros recubrimientos de papilla aunque todas ellas difieren en el grosor. A continuación, el rebozado de grano con algunas cavidades importantes.

La capa siguiente, la segunda, empieza con la papilla, su espesor también es limitado, presenta una correlación entre el grosor de la capa de papilla y la del rebozado.

La tercera capa es la mas gruesa, y el rebozado también incorpora cavidades.

La cuarta capa tiene un grosor algo menor que la tercera, aunque equivalente a las dos primeras, se aprecia perfectamente el rebozado final de grano de Moloquita 50-80dd.

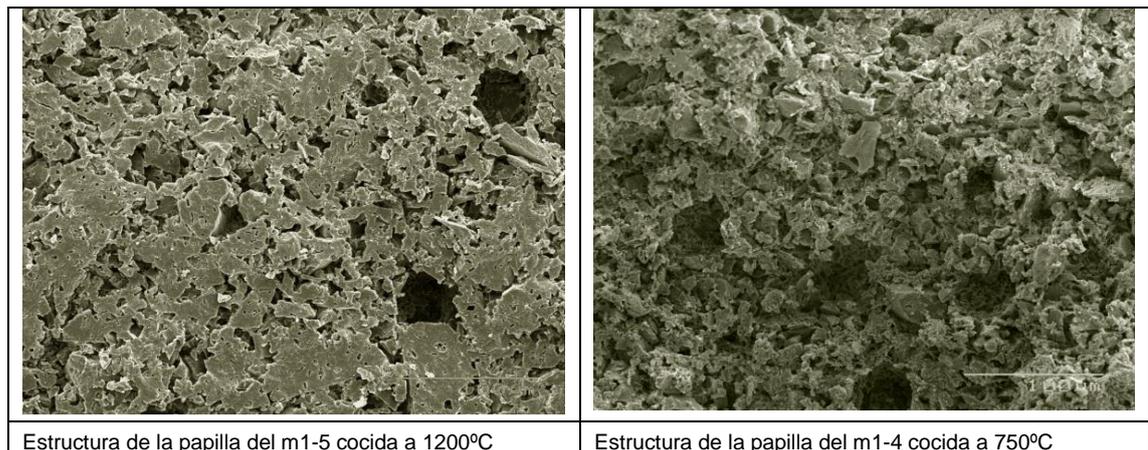


Figura II.49. Comparación de la porosidad de las papillas M1 cocidas a 1200 y 750°C.

En la imagen del m1-4 a 750°C se puede apreciar también la porosidad. Es apreciable la porosidad de los recubrimientos de papilla, es una porosidad micrométrica bastante pronunciada, en la que las pequeñas cavidades están muy interconectadas.

En las Fig. II.50., ampliadas se puede notar la estructura porosa de la papilla (la mezcla entre sílice coloidal y Moloquita -200) con poros de forma y tamaño irregular.

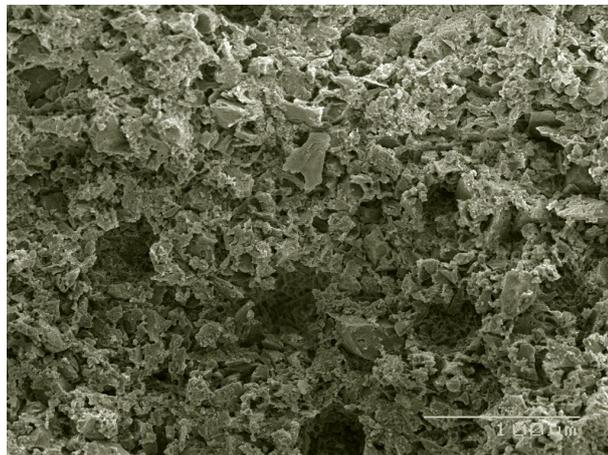


Figura II.50. Porosidad de la papilla M1-4 750°C.

Comparando las dos imágenes, la del grupo m1-5 a 1200°C con ésta de m1-4 a 750°C, se puede apreciar una porosidad mucho más acentuada en la de la derecha, (Fig. II.49.).

Esto podría tener relación con el menor grado de resistencia obtenido en las pruebas realizadas.

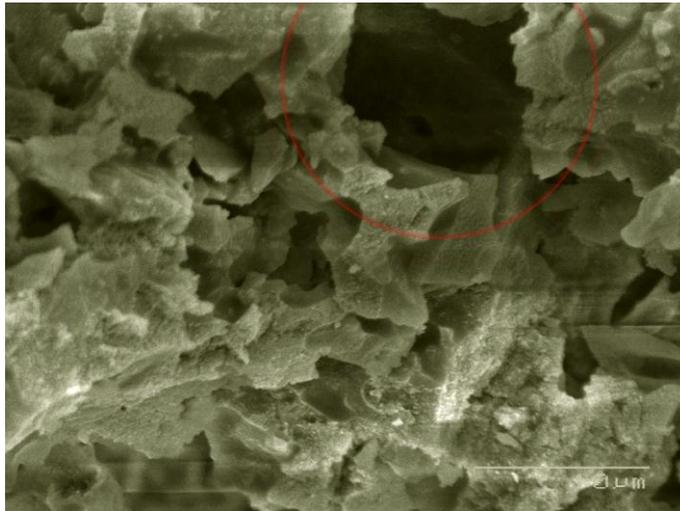


Figura II.51. Detalle de la porosidad de la papilla m1-4 750°C.

La papilla presenta también profundas cavidades de forma redondeada atribuida a la formación de burbujas de aire durante la aplicación de la papilla. En el detalle de la Fig. II.51 se puede notar la porosidad de la papilla de composición M1-4 750°C, además en su interior hay una burbuja de aire (inscrita en un círculo rojo), donde se entrevé el grano de Moloquita 50-80.

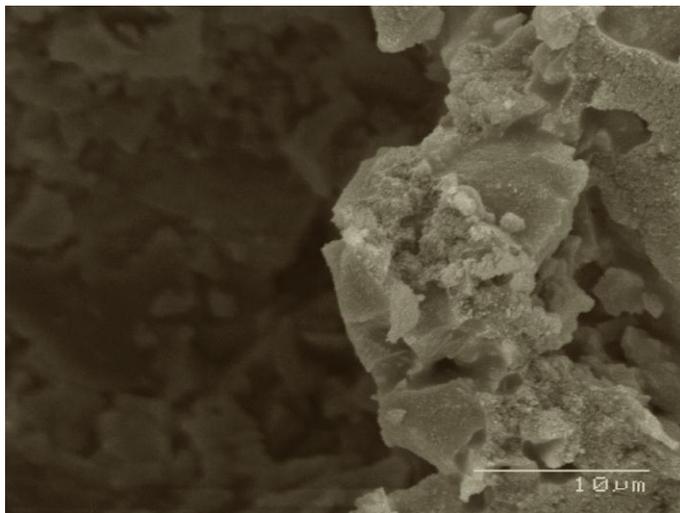


Figura II.52. Detalle de sílice que cubre el grano de Moloquita -200.

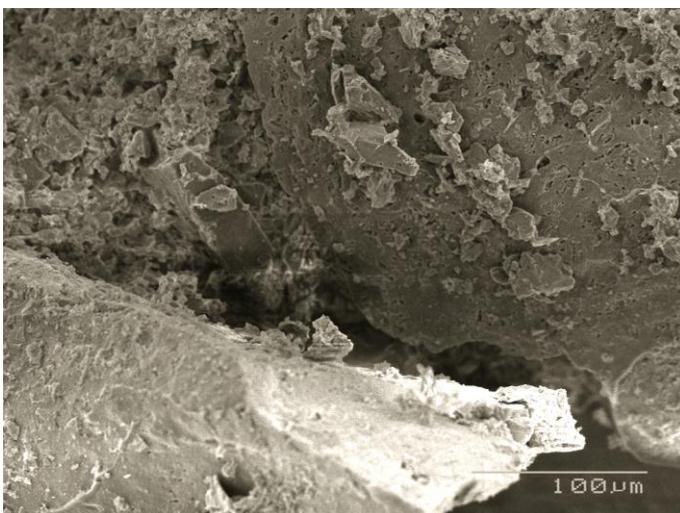


Figura II.53. Rebozado de Moloquita 50-80dd, detalle del recubrimiento del grano.

En la imagen se pueden hallar grandes cavidades, en las capas de rebozado de Moloquita 50-80dd, porosidad macrométrica (Fig. II.52)

En la Fig. II.53., las cavidades dejan los granos sin envoltorio de papilla y permite verlos como tales, la fractura del grano no se halla en el mismo plano que el del resto de la probeta y esto es una diferencia sustancial en relación a la imagen de del m1-5 cocida a la misma temperatura.

Por lo que respecta al resto, y en general, el grano presenta menor unidad con la papilla, a diferencia de los casos anteriores cocidos a mayor temperatura.

La fractura de la probeta es más accidentada y aparecen granos enteros sin fragmentar. En este caso la resistencia de la papilla es menor que la del grano, que tras la fractura de la probeta permanece entero.

Se observan los escalonados propios de un estratificado con poca cohesión entre capas.

### II.10.1.5. RESULTADOS M1-5 CAPAS A 1200°C CON FIBRA DE VIDRIO.



Figura II.54. Imagen de la microestructura de la cascarilla cerámica m1-5F cocida a 1200°C.

En el ensayo de rotura realizado en laboratorio de Química la probeta cocida a m1-5F a 1200°C resultó ligeramente más frágil que la m1-5 cocida a 1200°C.

En la Fig. II.54., completa del m1-5F se puede apreciar la sucesión estratificada de capas constituidas por aplicaciones de papilla (PW 50 con Moloquita -200) y de grano de rebozado (Moloquita 50-80dd) alternadas con capas constituidas por aplicaciones de papilla (PW 50 con Moloquita -200) y de fibra (tabla II.66.).

Recubrimiento de la cascarilla cerámica m1-5 F					
	1ª capa	2ª capa	3ª capa	4ª capa	5ª capa
Recubrimiento	Papilla + Grano de Moloquita 50-80 dd	Papilla + Fibra de vidrio triturada	Papilla + Grano de Moloquita 50-80 dd	Papilla + Fibra de vidrio triturada	Papilla + Grano de Moloquita 50-80 dd

Tabla II.66. Estructura del recubrimiento de la cascarilla cerámica.

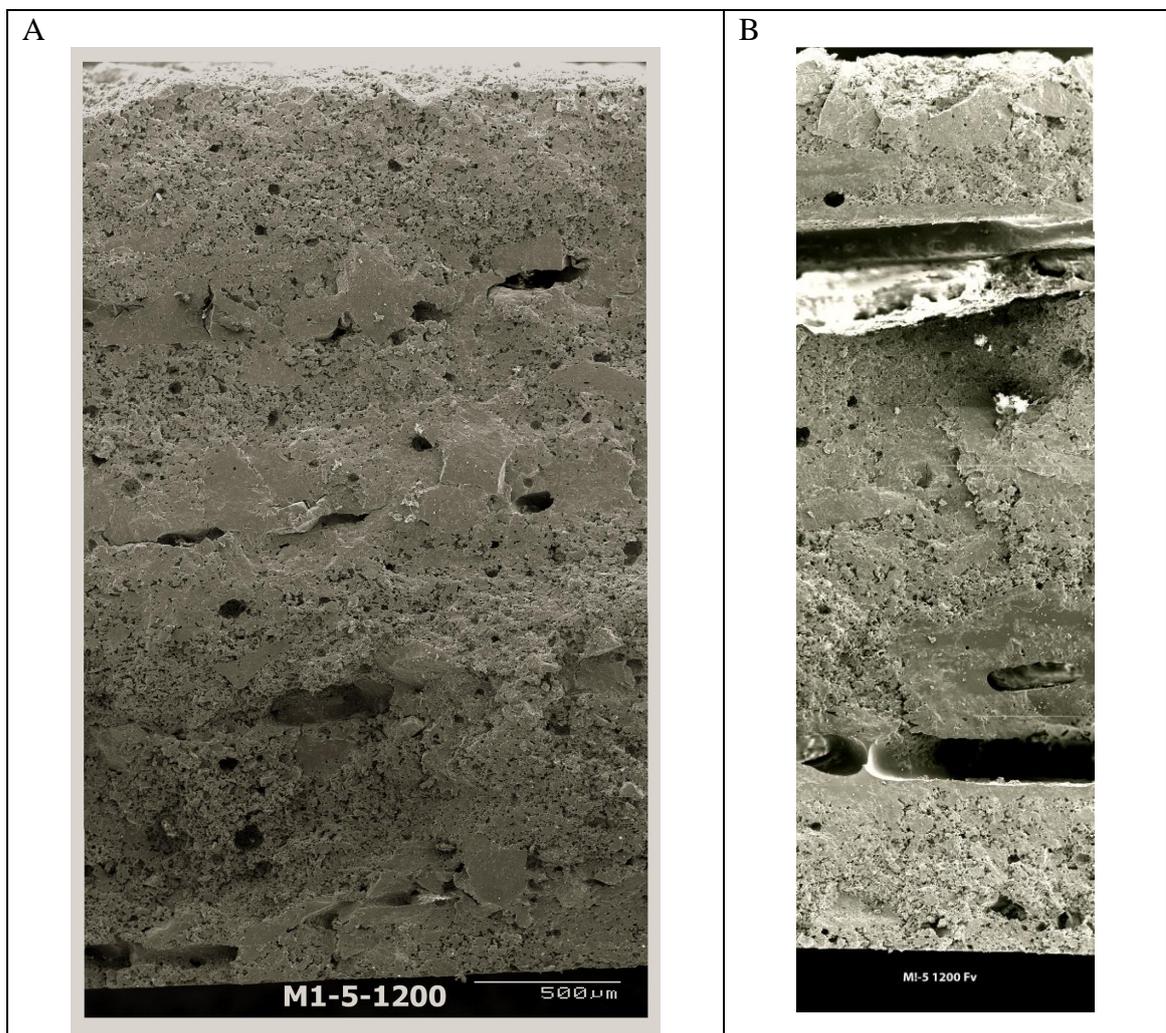


Figura II. 55. Imagen A, Cascarilla tipo m1-5 cocida a 1200°C a la izquierda; imagen B, cascarilla tipo m1-5F cocida a 1200°C a la derecha.

En principio, la cascarilla m1-5 a 1200°C se diferencia de la m1-5F a 1200°C, en el uso alternativo de rebozados de grano y fibra de la segunda, frente al exclusivamente de grano de la primera. Por lo demás el tipo de materiales, el sistema de aplicación y la cocción son los mismos.

Esta cascarilla del grupo m1-5F tiene 5 capas completas, en la imagen se pueden localizar las cinco capas completas constituidas por 10 niveles. Se aprecia perfectamente la estructura estratificada de la cascarilla.

Empezando a contar desde la parte inferior:

En la primera capa, el nivel de la papilla, delgada en comparación con los otros recubrimientos de papilla aunque todas ellas difieren en el grosor. A continuación apenas si se aprecia el rebozado de grano con algún grano y sobre todo por algunas cavidades importantes.

La capa siguiente, la segunda, empieza con la papilla, su espesor es mayor que el de la primera. Recubre el grano de la capa inferior y presenta grandes cavidades cilíndricas, que se supone corresponden a los huecos dejados por la fibra al fundirse. Junto a ellos, zonas compactas y densas, sin apenas porosidad, situadas por debajo de cada macrocavidad. Da la sensación que el material de la fibra se ha fusionado con la papilla generando un nuevo material, de naturaleza física (y probablemente química) diferente.

La tercera capa ligeramente más gruesa, recubre el rebozado de fibra de la segunda capa, se observa alguna cavidad como consecuencia de la fibra, y en su rebozado de grano no se aprecian cavidades.

La cuarta capa tiene un rebozado de fibra, se repite el comportamiento observado en la segunda. Se observa, lo que parece ser el extremo de una fibra corroída que sobresale del nivel de la fractura.

En la quinta capa se aprecia el rebozado final de grano de Moloquita 50-80dd, perfectamente incrustado en la papilla.

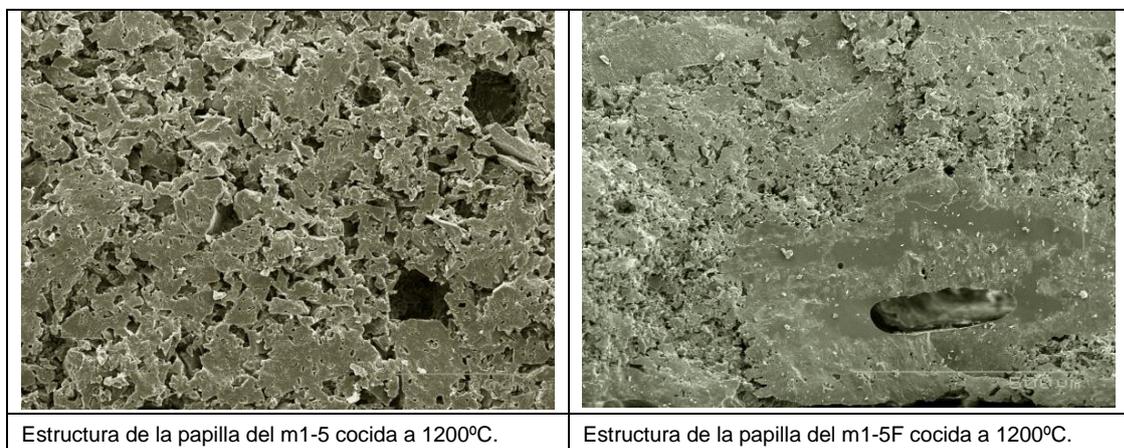


Figura II.56 Comparación de la estructura de las composiciones m1-5 y m1-5F.

Si se compara la m1-5 a 1200°C con la imagen del m1-5F a 1200°C se puede apreciar menor porosidad (Fig. II.55. y Fig. II.56.).

Es apreciable la porosidad de los recubrimientos de papilla, es una porosidad micrométrica, en la que las pequeñas cavidades están dispersas interconectadas, como en el m1-5. No obstante, existen zonas muy compactas en torno a las cavidades dejadas por la fusión de la fibra, casi sin porosidad apreciable. La fibra de vidrio a 1200°C está fusionada con la papilla, al cristalizar genera un material con apariencia amorfa, compacta y opaca. La compactidad explicaría su resistencia.

En la fotografías (Fig. II.57, II.58 y II.59), realizadas con el microscopio electrónico correspondiente a la mezcla m1-5F, se observa en la estructura la presencia de cavidades huecas que corresponden al emplazamiento de la fibra, que a 1200°C ha fundido y empieza a incorporarse a la estructura de la cascarilla cerámica fortaleciéndola.

En estas fotos se puede apreciar que alrededor de la cavidad donde estaba la fibra se ha formado un nuevo compuesto, con una estructura más compacta y casi ausencia de porosidad, la fibra se ha vitrificado junto con la papilla.



Figura II.57. Cavidades dejadas por la fibra de vidrio al fundirse; a su alrededor se han fusionado los materiales.

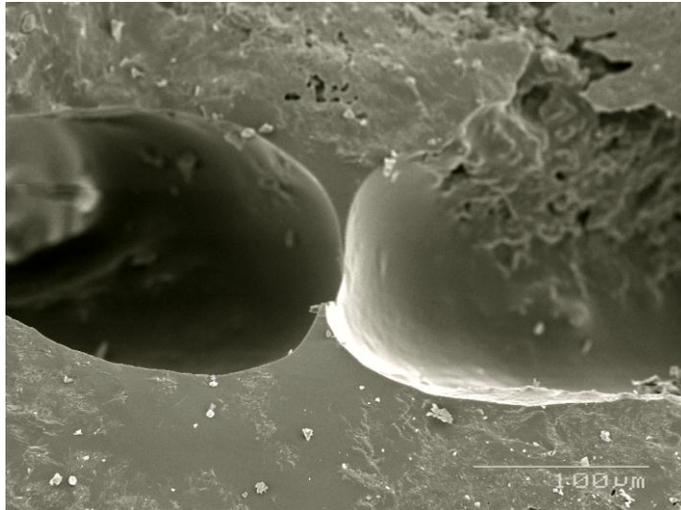


Figura II.58. Cavidades dejadas por la fibra de vidrio al fundirse; a su alrededor se han fusionado los materiales.

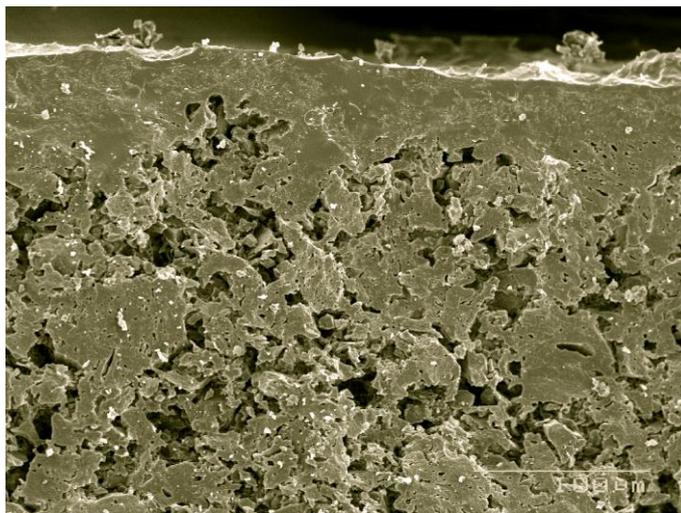


Figura II.59. En la parte superior se ve en negro la cavidad dejada por la fibra de vidrio al fundirse; a su alrededor se han fusionado los materiales.

En la imagen se pueden hallar grandes cavidades, en las capas de rebozado de fibra. Por lo que respecta al grano, éste se enlaza perfectamente con la papilla, como en casos anteriores.

La papilla presenta también alguna cavidad de forma redondeada atribuida a la formación de burbujas de aire durante la aplicación de la papilla.

La fractura de la probeta es limpia. Aparecen restos de las fibras que sobresalen sobre el plano de la fractura.

No se observan los escalonados propios de un estratificado con poca cohesión entre capas.

### II.10.1.6. RESULTADOS DEL M2-5, COCCIÓN A 1200°C

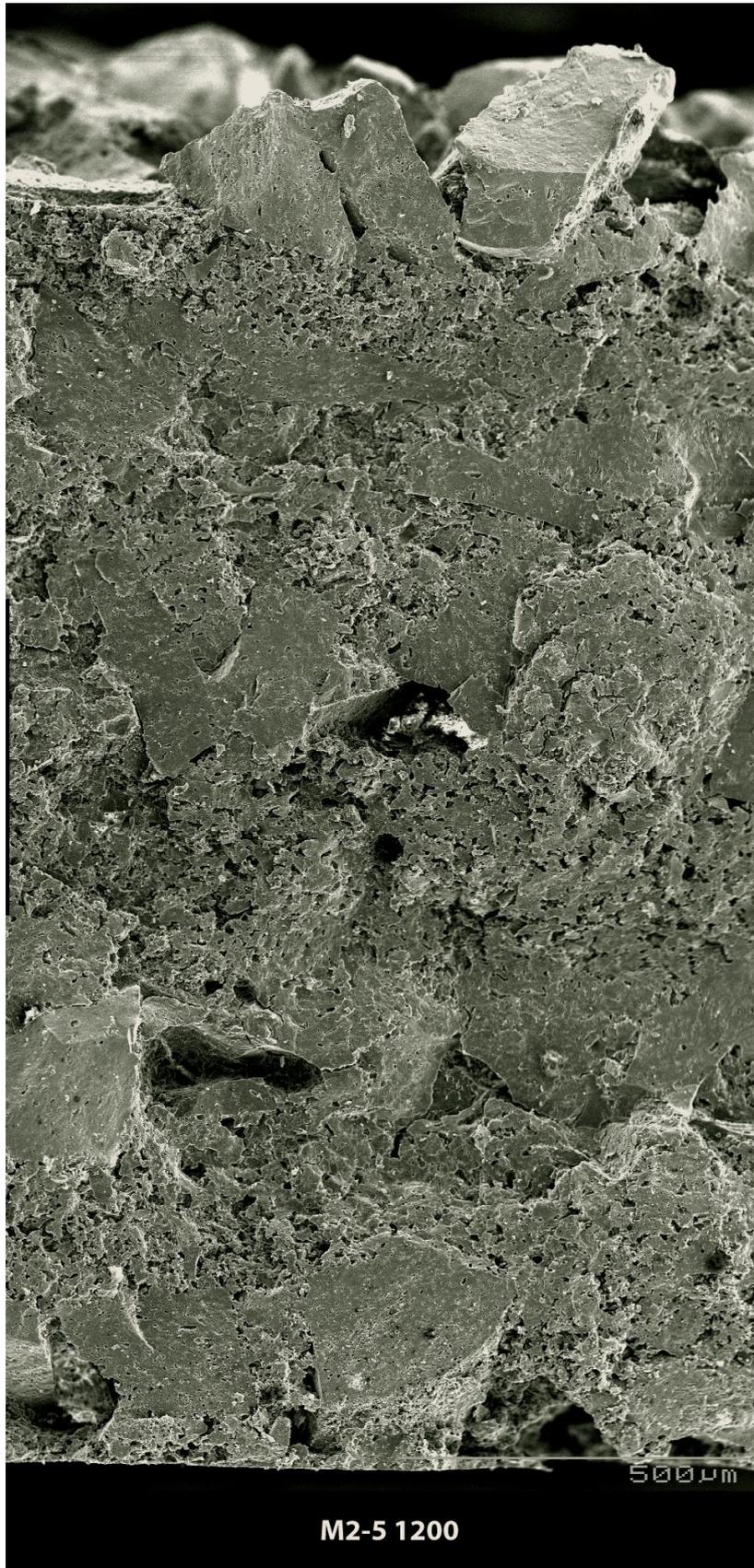


Figura. II.60. Imagen y detalles correspondientes a la microestructura de la mezcla m2-5 cocida a 1200°C.

En el ensayo de rotura realizado en laboratorio de Química la probeta m2-5 cocida a 1200°C resultó más frágil que la m1-5 cocida a 1200°C. Una participación mayor de sílice coloidal ha resultado más débil que la composición de la papilla 35/65%.

En la Fig. II.60., completa del m2-5 se puede apreciar la sucesión estratificada de capas constituidas por aplicaciones de papilla (PW 50 con Moloquita -200) y de grano de rebozado (Moloquita 50-80dd) alternadas con capas constituidas por aplicaciones de papilla (PW 50 con Moloquita -200) y de fibra.

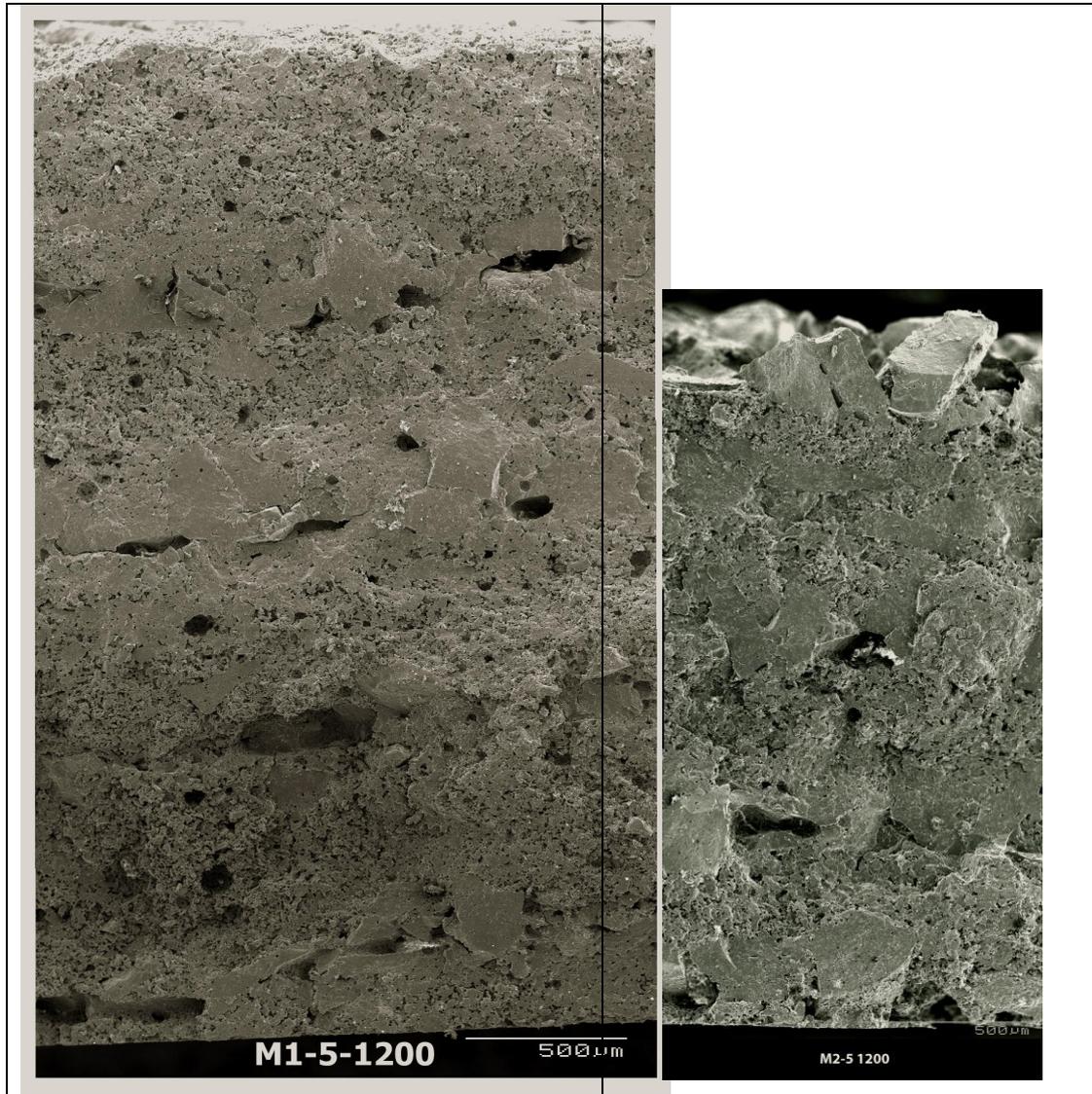


Figura II. 61. Cascarilla tipo m1-5 cocida a 1200°C a la izquierda, cascarilla tipo m2-5 cocida a 1200°C a la derecha. Dimensiones proporcionadas en función del patrón de referencia, 500 µm,

En principio, la cascarilla m2-5 a 1200°C se diferencia de la m1-5 a 1200°C, en el tipo de porcentajes de los componentes de la papilla, en el primer caso 40/60% (40% de sílice coloidal PW 50 y 60% de Moloquita -200) y en el segundo 35/65%. Por lo demás el tipo de materiales, el sistema de aplicación y la cocción son los mismos (Fig. II.61.).

Esta cascarilla del grupo m2-5 tiene 5 capas completas, en la imagen se pueden localizar las cinco capas completas constituidas por 10 niveles. Se puede apreciar en la comparativa de imágenes la diferencia de espesor entre un m1-5 y un m2-5, una papilla menos densa penetra mas, ofrece menor grueso de cascarilla y recubre mejor los granos de rebozado.

Se aprecia perfectamente la estructura estratificada de la cascarilla.

Recubrimiento de la cascarilla cerámica m2-5					
	1ª capa	2ª capa	3ª capa	4ª capa	5ª capa
<b>Recubrimiento</b>	Papilla + Grano de Moloquita 50-80 dd				

Tabla II.67. Estructura del recubrimiento de la cascarilla cerámica m2-5.

Empezando a contar desde la parte inferior:

En la primera capa, el nivel de la papilla es muy delgado. En comparación con los otros recubrimientos de papilla todas ellas difieren en el grosor. La capa siguiente, la segunda, empieza con la papilla, su espesor es mayor que el de la primera. Recubre el grano de la capa inferior y se observa alguna cavidad en su rebozado de grano. La tercera capa ligeramente más gruesa, recubre el rebozado de fibra de la segunda capa, se observa alguna cavidad en su rebozado de grano. La cuarta capa está perfectamente compactada, el grano está totalmente recubierto.

En la quinta capa se aprecia muy bien el rebozado final de grano de Moloquita 50-80dd.

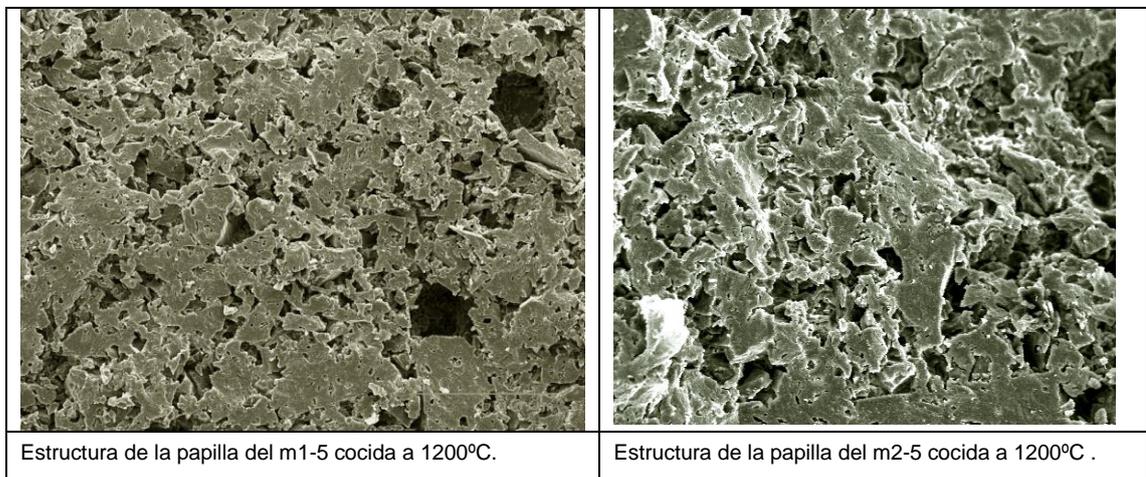


Figura II.62. Detalle de la porosidad de la cascarilla tipo m1-5 a 1200°C (izquierda), y la cascarilla tipo m2-5 a 1200°C (derecha).

Si se compara la m1-5 a 1200°C con la imagen del m2-5 a 1200°C se puede apreciar mayor porosidad en m2-5. Estos poros de la composición m2 (40/60%) tienen una forma más irregular respecto a la composición m1 (35/65%) (Fig. 62).

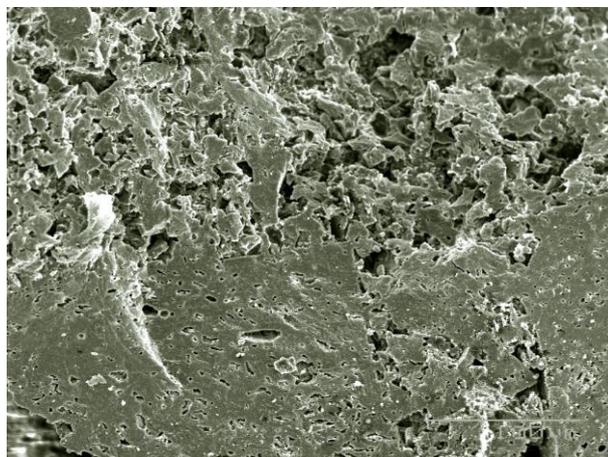


Figura II.63. Detalle de la porosidad de la cascarilla cerámica m2- 5 1200°C.

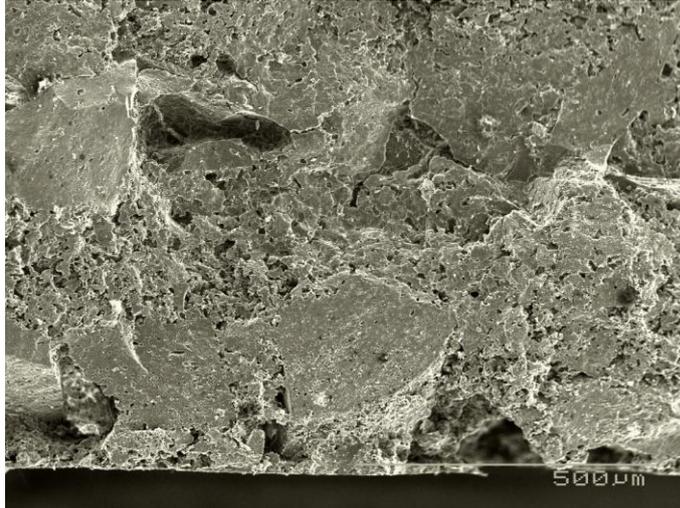


Figura II.64. Cavidades dejadas por la aplicación de la papilla y el rebozado de grano.

En la imagen se pueden hallar cavidades, en las capas de rebozado de grano estos quedan recubiertos visiblemente por la papilla, mucho más porosa (Fig. II.63 y II.64).

La papilla presenta escasas cavidades de forma redondeada atribuida a la formación de burbujas de aire durante la aplicación de la papilla. Pudiera ser que una papilla menos densa, contuviera menor cantidad de burbujas de aire.

La fractura de la probeta es limpia. Aparecen granos fracturados limpiamente, sin protuberancias de los mismos como se puede apreciar en la Fig. II.64. Los granos no sobresalen sobre el plano de la fractura.

No se observan los escalonados propios de un estratificado con poca cohesión entre capas.

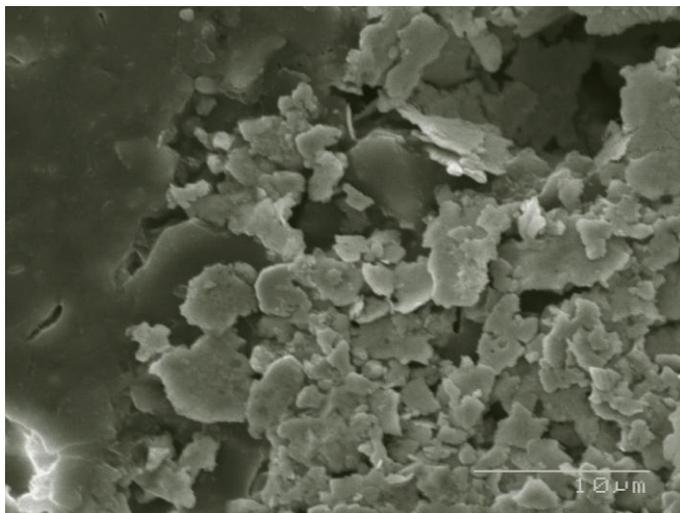


Figura II.65. Agrupaciones escamosas de sílice.

## II.10.2. IMÁGENES DE LA CAPA DE CONTACTO DE LA CASCARILLA CERÁMICA, OBTENIDAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA

Con un microscopio óptico se han podido examinar las superficies de la cascarilla cerámica; la superficie de contacto, zona inferior hecha con papilla.

El examen se realizó en dos tipos de cascarilla; m1-5 (35/65%) a 1200°C y m2-5 (40/60%) a 1200°C con el fin de contrastar las diferencias entre las superficies respectivas.

### Resultado de la m1-5, cocida a 1200°C



Figura II.66. Superficie inferior y superior de la muestra m1-5 cocida a 1200°C.

Se puede observar la superficie de la capa de contacto con la composición de papilla 35/65% (Fig. II.66.); la cual es uniforme, no se aprecian granos de Moloquita. Sobre la superficie aparecen pequeñas cavidades negras que son burbujas de aire que quedaron atrapadas en la primera capa de papilla (capa de contacto).

### Resultado de la m2-5, cocida a 1200°C

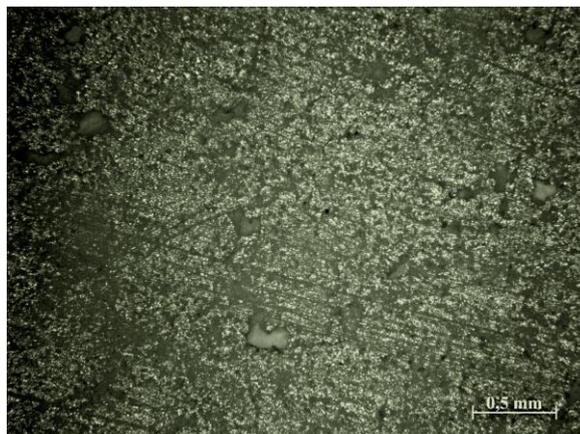


Figura II.67. Superficie inferior y superior de la muestra m2-5 cocida a 1200°C.

Esta muestra m2-5 está constituida por un porcentaje más alto de sílice, 40% respecto a la composición anterior con el 35% de sílice. Como se puede observar en la Fig. II.67 se entrevé, entre la capa de contacto, el rebozado de Moloquita 50-80dd.

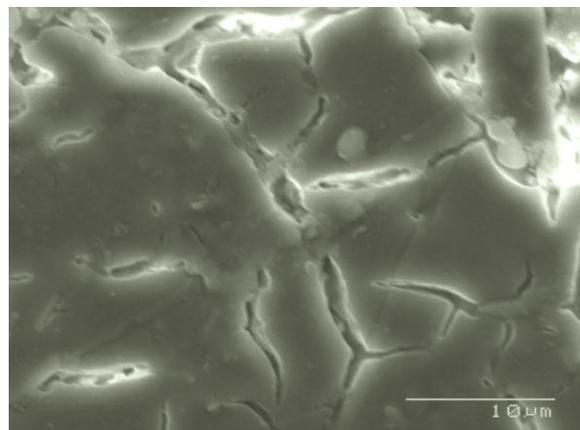


Figura II.68. Aplicación de la superficie de la capa de contacto de la composición 40/60% de papilla. Formación de grietas, probablemente producidas durante el secado con la evaporación del agua.

## Valoraciones y conclusiones sobre los resultados de microscopía óptica

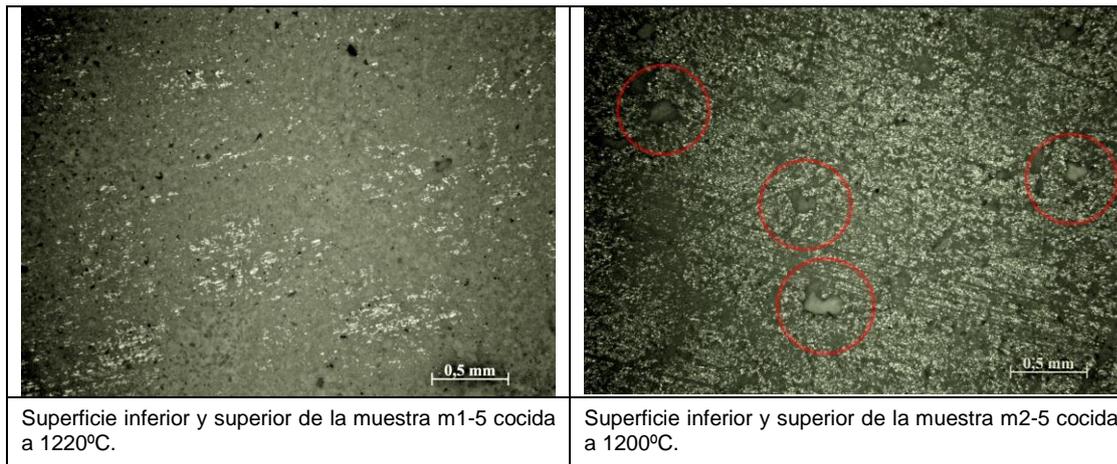


Figura II.69. Comparación de la dos capas de contacto de la papilla m1-5 (35/65%) y m2-5 (40/60%).

Una papilla constituida con un porcentaje más alto de sílice 40%, es más penetrable por el grano, llegando a alcanzar, en la capa de contacto, la superficie del modelo. Esto indica que una papilla más líquida puede afectar el registro, resultando una reproducción ligeramente menos fiel. Sin embargo, una papilla densa puede llegar a atrapar pequeñas burbujas de aire causando una pérdida de registro de la superficie del patrón, aunque en este caso de la imagen de la izquierda, esto no es apreciable (Fig. II.69.). En la ampliación (Fig. II.68), en la capa de contacto se puede notar la formación de grietas sobre la superficie, se cree que se puede deber a una mayor cantidad de sílice coloidal en la papilla. Durante el secado se produce la evaporación del agua y una contracción, una tensión capilar que llega a formar grietas, afectando la textura de la superficie.

### II.10.3. VALORACIONES Y CONCLUSIONES FINALES SOBRE LAS IMÁGENES DE MICROSCOPIO

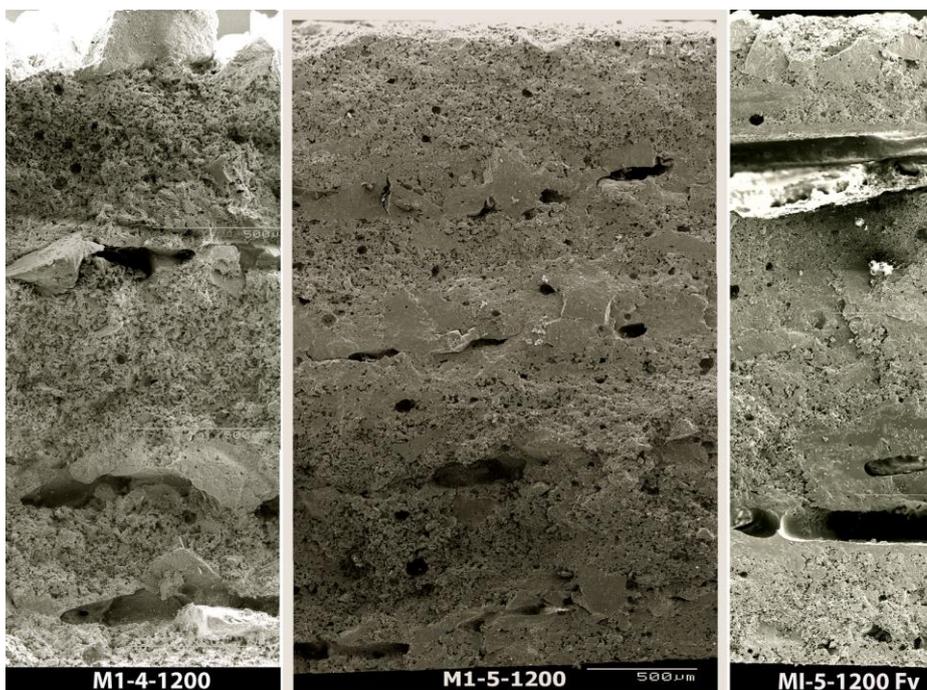
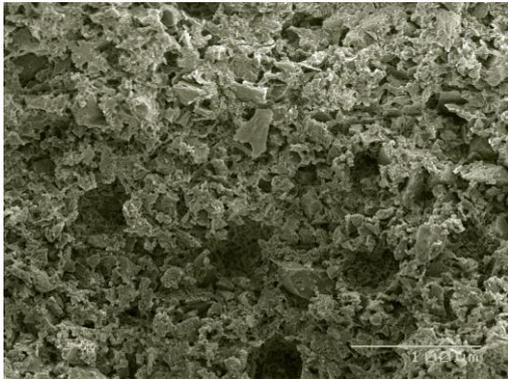
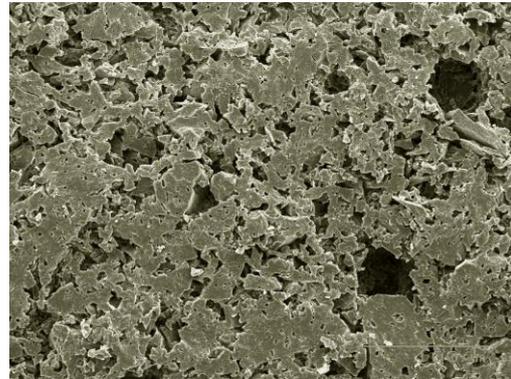


Figura II.70. Estructura estratificada de la cascarilla cerámica con rebozado de grano cocida a 750°C (izquierda) y a 120 °C (centro) y con fibra de vidrio cocida a 1200°C (derecha).

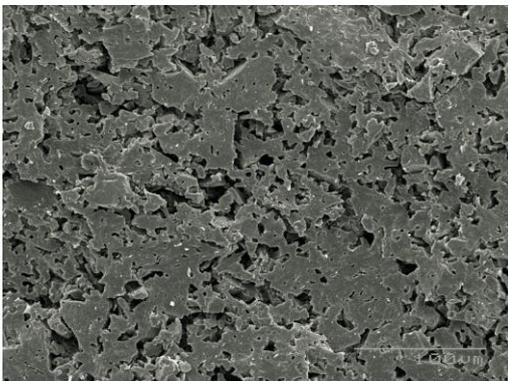
Con el microscopio electrónico de Barrido (SEM) se ha observado que la estructura de la cascarilla queda condicionada a su elaboración por capas. Y que éstas están condicionadas por el sistema de aplicación de la papilla, en este caso con pincel y por la aleatoriedad del rebozado. Irregularidad en la uniformidad de los grosores de las capas.



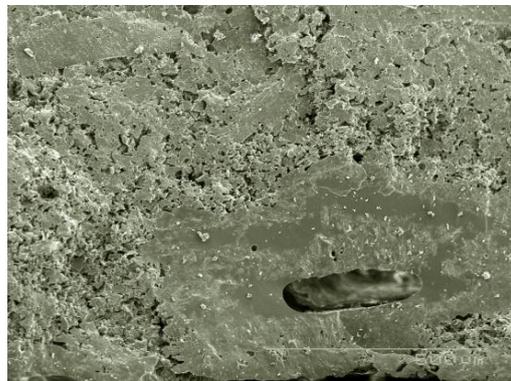
m1-4, cocida a 750°C.



m1-5, cocida a 1200°C.



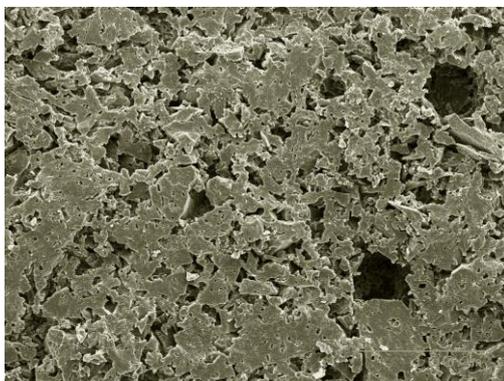
m1-5, cocida a 1300°C.



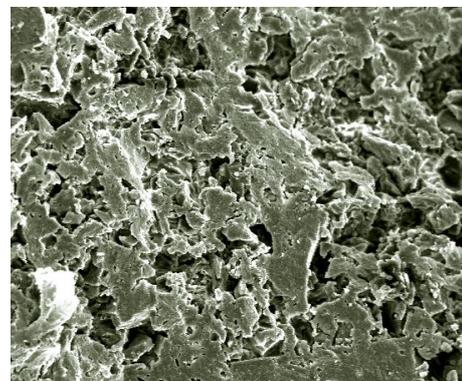
m1-5-F cocida a 1200°C.

Figura II .71. Estructura porosa de la papilla de la cascarilla cerámica cocida a 750°C (superior izquierda) y a 1200°C (superior derecha), a 1300°C (inferior izquierda) y con fibra de vidrio cocida a 1200°C (inferior derecha).

El mayor grado de porosidad se debe fundamentalmente a la microporosidad de la papilla. La papilla es un conglomerado constituido por microgranos de Moloquita unidos por la sílice, entre estos microgranos aparecen espacios sin materia. La porosidad de la papilla, no depende sólo de los microgramos de la harina, influye también la temperatura de cocción de la cascarilla. A mayor temperatura menor porosidad. La temperatura de cocción altera la estructura de la papilla, a 750°C es mucho más porosa que a 1200°C. A 1300°C, la presencia de poros es menor. Sorprende la menor resistencia de la cascarilla cocida a 1300°C, con respecto a la cocida a 1200°C, cuando la porosidad de la papilla, de la primera, es inferior. Una apariencia de mayor compacidad no genera en este caso mayor resistencia.



Estructura de la papilla del m1-5 cocida a 1200°C.



Estructura de la papilla del m2-5 cocida a 1200°C.

Figura II .72. Comparación de las porosidades de m1 (35/65%) y m2 (40/60%)

La proporción de sílice coloidal presente en la papilla también modifica la porosidad, mayor porcentaje de sílice coloidal implica mayor porosidad.

La presencia de las cavidades circulares, burbujas de aire, es aleatoria, aunque es posible que una mayor participación de sílice coloidal en la papilla reduzca su presencia.

Las cavidades entre granos del rebozado también son aleatorias Fig. II .72.

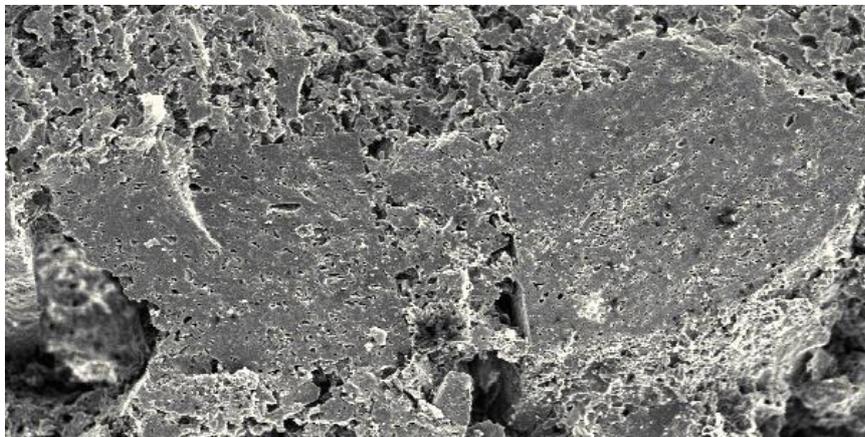
Constitución de un nuevo material tras la fusión de la fibra de vidrio.

La fibra de vidrio se funde penetrando en la papilla y al parecer generando un nuevo compuesto amorfo y compacto, sin porosidad. No se conoce a partir de que temperatura se inicia este proceso.

La cascarilla con fibra de vidrio resulta la más resistente a 1300°C, probablemente, debido a que la fibra se funde fluyendo entre los poros de la papilla. En determinado momento, estos materiales se fundirán formando al enfriar una nueva composición de material.

### Resistencia y fractura de la probeta

Con cascarilla cerámica cocida a altas temperaturas, la cohesión de la papilla con los granos es más resistente que la propia cohesión del material constituyente de los granos, dado que, durante las pruebas de resistencia, éste se fractura limpiamente.



A  
m1-5  
cocido a 1200°C.



B  
m2-4  
cocido a 750°C.

Figura II .73. Comparación del recubrimiento de las dos papillas: m1 y m2 sobre el grano.

La papilla es un conglomerado de microgranos de Moloquita unidos por la sílice, el grano es una arcilla cocida, una cerámica. La papilla es muy porosa. El grano tiene micro porosidades, pero en la imagen se ven mucho más dispersas que en la papilla.

Se puede apreciar en los granos de la Figura superior un tipo de fractura absolutamente limpia (Fig. II. 73., imagen A), para que esto ocurra la cohesión de la papilla con el grano ha de ser suficientemente fuerte como para que ceda la propia cohesión del material constitutivo del grano.

Mientras que en la inferior, cocida a 750°C (Fig. II.73., imágin B), el grano mantiene su unidad sobresaliendo del plano, se aprecia el grano entero, no se fractura. A 750°C la cohesión es menor y la resistencia del material del grano es superior a la cohesión de la papilla con éste.

A esta temperatura la fractura de las capas tiende al escalonado, mostrando una menor cohesión entre capas.



## II.11. PRUEBAS DE ESTABILIDAD DIMENSIONAL DE LA CASCARILLA

La cascarilla cerámica se utiliza en determinadas fundiciones precisamente por su reconocida estabilidad dimensional. Durante el secado y durante la cocción la cascarilla permanece estable en sus dimensiones, no se contrae como lo hace el barro por ejemplo. En este apartado se procedió a comprobar la estabilidad dimensional de la cascarilla, comprobando las posibles deformaciones se pudieran producirse en el volumen, considerando las distintas cocciones y porcentajes en el uso del PW 50.

### Objetivo

Comprobar la estabilidad dimensional del grupo de papillas que se detalla a continuación sometiénola a cocciones de distintas temperaturas y establecer si a determinadas temperaturas de cocción la cascarilla cerámica sufre cambios dimensionales permanentes. Evaluar si el cambio afecta a la forma y al tamaño de la pieza en cascarilla.

### Materiales utilizados.

Para este ensayo se ha elegido un sólo tipo de aglutinante para la conformación de la papilla, el PW 50. En pruebas anteriores se concluyó que este aglutinante era resistente y permitía más modalidades de composición. Se empleó para la papilla cerámica sólo PW 50 mezclado con el refractario Moloquita -200, en tres composiciones diferentes de mezcla para comprobar cómo influía en la reducción la composición de la mezcla.

Aglutinante %	Refractario %
35	65
40	60
45	55

Tabla II.68. Porcentajes empleados para el test de reducción de volumen.

### Procedimientos aplicados

Para conocer el comportamiento dimensional de la cascarilla se sometió este material a distintas temperaturas de cocción, incluyendo temperaturas más elevadas de las que habitualmente se utilizan en fundición, verificando si se produce una reducción de volumen u otra alteración. Se realizaron probetas planas aplicando cinco capas de cada papilla con cinco de rebozado de Moloquita 50-80dd, sobre un soporte de cartón pluma de tamaño 23 x 5cm, (Fig. II.74.). La elección de este soporte se debió a que este material presenta una superficie estable, plana y lisa que permitía desmoldar la cascarilla antes de cocerla.

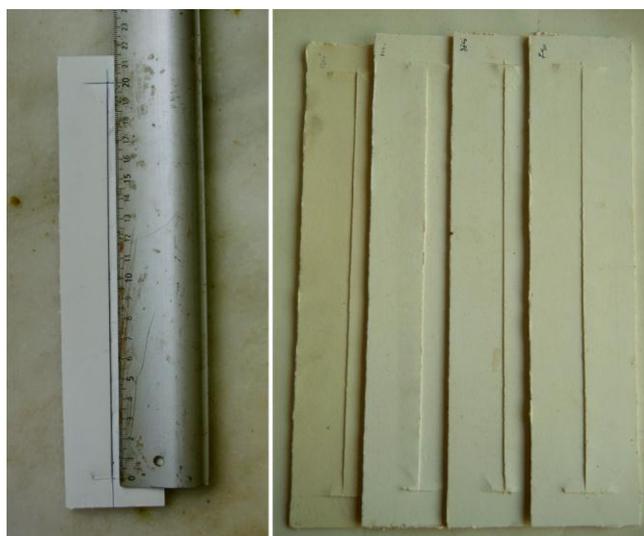


Figura II .74. Soporte de cartón pluma (izquierda), plaqueta de cascarilla cerámica (derecha).

Antes de aplicar la papilla, se marcó sobre la superficie del cartón pluma una línea transversal de 20cm, a modo de referencia longitudinal de la probeta de cascarilla, y además, se marcó en cada soporte un código para identificar el tipo de papilla y tipo de cocción.

Con el objeto de minimizar el margen de error, cada prueba fue repetida cuatro veces.

Cada probeta correspondiente a las diferentes composiciones de papilla se procesó a distinta temperatura con el objeto de verificar la influencia del grado de cocción en la reducción de la misma. Las probetas se sometieron a varias cocciones para comprobar el grado de reducción con las sucesivas cocciones.

Las temperaturas de cocción de las plaquetas fueron las siguientes: 750°C, 875°C, 1000°C y 1200°C. Se llegó hasta los 1200°C porque era una temperatura alcanzable y adecuada para una pieza de cascarilla.

### Resultados

Papilla	% Reducción de volumen				
	Seco	750 °C	875 °C	1000 °C	1200 °C
PW 50 / Moloquita -200 (%)					
35/65	0	0	0	0	0,50-0,75 mm
40/60	0	0	0	0	0,50-0,75 mm
45/55	0	0	0	0	0,50-0,75 mm

Tabla II.69. Grado de reducción de la cascarilla cerámica.

### Valoraciones y conclusiones

Se verificó que la reducción de la cascarilla cerámica con rebozado de grano de Moloquita se producía sólo a 1200°C. Además se comprobó que, variando el porcentaje de la papilla no variaba la reducción a 1200°C. A otras temperaturas inferiores de cocción no se presentaban cambios de volumen.

A 1200°C la cascarilla se reducía sólo 0,45mm sobre la longitud inicial de 200mm. El resultado obtenido es de 199,55mm.

Se comprobó también que la plaqueta sometida a una segunda cocción a la temperatura que fueron sometidas anteriormente (1200°C) no presentaba ninguna ulterior reducción, ni afectaba a la forma global de la cascarilla cerámica.

Además se comprobó que la plaqueta cocida a altas temperaturas (1000°C y 1200°C) no se deformaba.

## II.12. CONCLUSIONES DEL SEGUNDO CAPÍTULO

Con este capítulo se ha intentado mostrar una imagen del comportamiento de la cascarilla cerámica, considerando que dicha imagen responde a una aproximación realizada desde distintos ángulos y con distintos medios. Se es consciente que esto permite generar una imagen difusa y parcial aunque muy útil para el presente proyecto.

La investigación desarrollada en este capítulo ha permitido establecer distintos parámetros del comportamiento de este material y sobre ellos se exponen las conclusiones finales. Dichas conclusiones se han extraído de los distintos apartados de este capítulo, a los que se puede recurrir en caso de interés o necesidad.

### **Sobre el comportamiento de los productos de sílice coloidal**

El PW 50 es un producto de sílice coloidal que se distribuye comercialmente con una concentración de sílice del 50%, el resto es mayoritariamente agua, y con un grueso de partícula de sílice del 50nm. El Hispasil 1731 se distribuye comercialmente con una concentración de sílice del 30% y un grueso de partícula de 7nm. Por lo tanto, este último producto presenta mayor proporción de agua, menor proporción de sílice y menor grueso de partícula.

El PW 50 gelifica más deprisa que el Hispasil 1731, lo que se ha podido apreciar mediante la aplicación directa de los rebozados, lo cual es lógico si se tiene en mente que el PW 50 tiene menor cantidad de agua.

### **Sobre las papillas viables**

La papilla es el material que cohesiona todo el recubrimiento de la cascarilla cerámica. Esta compuesta de un aglutinante, y de un árido refractario de molturación muy fina. En este capítulo se han utilizado principalmente dos tipos de aglutinante, Hispasil 1731 y PW 50, mezclándolos en distintos porcentajes con el refractario molturado al que denominamos harina de Moloquita-200.

El PW 50, en comparación con el Hispasil 1731, ha permitido obtener una mayor variedad de papillas en cuanto a proporciones de la mezcla de componentes. El menor porcentaje de agua del PW 50 posibilita las papillas con una composición (expresada en pares de porcentajes en peso de sílice coloidal y de harina de Moloquita -200,) de 35/65%, 40/60% y 45/55%. Es lógico suponer que el mayor porcentaje de agua presente en el Hispasil 1731 diluya las papillas y aún permitiendo la mezcla 45/55%, ésta sea excesivamente fluida para su aplicación en recubrimientos. Se consideran pues como viables las papillas cuyo contenido en peso responden a las composiciones siguientes: PW 50 (35/65%, 40/60%, 45/55%); Hispasil 1731 (35/65% y 40/60%).

Con respecto a un tercer aglutinante, el Carsil 9, que es un silicato de sodio, se ha experimentado escasamente con un porcentaje (50/50 %), aunque en este proyecto se ha descartado su uso por razones de infraestructura.

El porcentaje total de sílice en las papillas experimentadas en las que participa el PW 50 es mayor que el porcentaje presente en las papillas en las que se utiliza Hispasil 1731.

La papilla hecha con PW 50 mantiene el refractario en suspensión durante más tiempo que la realizada con Hispasil 1731. En esta última la harina precipita con mayor rapidez.

### **Sobre la densidad de las papillas**

Las densidades mayores corresponden a las papillas resueltas con Carsil 9 en primer lugar y con PW 50 en segundo, siendo las menos densas las del grupo Hispasil 1731, salvo una excepción se comentará.

La mayor densidad de las papillas depende en primer lugar del porcentaje de harina de Moloquita, ésta es el material más denso y a continuación el de la sílice, que es menos denso. En el caso del Carsil 9 la mayor presencia de sílice en la papilla coincide con la mayor densidad de todas, pero esto no pasa en el resto de papillas.

En cada grupo de papillas de un determinado aglutinante, a mayor participación de la harina de Moloquita, mayor densidad de la papilla.

En todos los casos experimentados, el porcentaje total de sílice en las mezclas en las que participa el PW 50 es mayor que el porcentaje presente en las mezclas en las que se utiliza Hispasil 1731 y también como hemos comentado la densidad del grupo PW 50 es casi siempre superior.

Durante el proceso de aplicación manual en las probetas de pequeñas dimensiones la mayor densidad de las papillas utilizadas no ha sido un obstáculo para la aplicación global del rebozado.

#### **Conclusiones sobre los rebozados con grano**

Aunque no se han hecho pruebas comparativas, se ha observado que la receptividad de una papilla, con respecto al grano del rebozado, depende del grado de humedad de la misma.

Si la papilla es poco densa, el rebozado aplicado se hunde hasta tocar la superficie de éste. El registro de la textura no es perfecto, apareciendo múltiples poros por ausencia de material en la superficie.

Por otro lado, el recubrimiento realizado con papilla poco densa no es estable, se desliza sobre la superficie y se concentra en forma de goteo en las cavidades y los salientes. El resultado final resulta desequilibrado en cuanto a grosor.

Las papillas demasiado densas, pierden adherencia, lo que conlleva una gran dificultad de aplicación sobre el patrón y una menor receptividad con respecto al rebozado.

#### **Conclusiones sobre los rebozados con fibra de vidrio**

En el rebozado con fibra de vidrio las fibras no tienen una buena interrelación con la papilla, sino que únicamente están atrapadas, o envueltas, por ésta; esto se observa en los anillos de rotura de los cilindros (como se vio en el ap. II.7.2 en la prueba de resistencia hecha en el taller de la "Fonería").

#### **Conclusiones sobre el grosor del recubrimiento**

Con una papilla mas densa que tenga un porcentaje más elevado de Moloquita -200 se logra un mayor espesor de capa de papilla. Cuanto mayor es la densidad de la papilla mayor es el espesor de la cascarilla finalmente obtenida.

Los espesores finales obtenidos con Hispasil 1731 no varían significativamente en función de los distintos rebozados.

Los espesores finales obtenidos con PW 50 son más diversos, dependiendo de los distintos rebozados. Con PW 50 se puede trabajar con más variedades de composición en las papillas, y cada una produce distinto grosor de capa.

#### **Conclusiones sobre la masa del recubrimiento**

En general, la cantidad de papilla aplicada en la primera capa (capa de contacto) es siempre menor que la cantidad aplicada en las siguientes, sobre el grano o la fibra de rebozado. La textura de este rebozado permite que la papilla penetre en sus intersticios, recubriendo mayor superficie y volumen que cuando se aplica directamente sobre el modelo de cera.

Se ha observado que la receptividad de una papilla húmeda, con respecto al grano del rebozado, no se ve alterada por la densidad, dado que los pesos obtenidos en las distintas papillas son muy parecidos.

#### **Sobre la resistencia**

Sobre la resistencia, en general podemos concluir que una mayor concentración de harina de Moloquita -200 en la papilla, un mayor número de capas completas (papilla-rebozado) y un aumento de la temperatura de cocción son factores que aumentan la resistencia de la cascarilla. También afecta el uso de un tipo de sílice coloidal u otro, entre los dos experimentados, el PW 50 es el que ofrece mejores resultados.

Para ambos tipos de sílice coloidal, cuánto más elevada es la temperatura de cocción de la cascarilla, considerando sólo el tramo situado entre 750°C y 1200°C, mayor es la resistencia obtenida en las pruebas de rotura por flexión.

Si comparamos en las tablas proporciones idénticas de producto en la elaboración de papillas de ambos grupos de productos, los recubrimientos resultantes siempre son más resistentes cuando se utiliza el PW 50. En general, tal y como resulta de los ensayos realizados, los recubrimientos en los que interviene el producto PW 50 son más resistentes que aquellos en los que interviene Hispasil 1731<sup>112</sup>.

La sílice funciona de aglomerante, haciendo de puente de relleno entre las partículas del refractario cerámico, cohesionándolo. El aglomerante es el responsable de la resistencia mecánica de la cascarilla cerámica. Sin embargo, hay que tener en cuenta que una proporción elevada de aglomerante (sílice coloidal) separa las partículas de refractario generando una menor resistencia.

Es fundamental conocer el comportamiento de los porcentajes de los ingredientes de las papillas para lograr una determinada resistencia.

En cada grupo de papillas (sea el grupo de PW 50 o el de Hispasil 1731) la cantidad total de sílice presente en las papillas experimentadas tiene una relación inversa con los resultados en las pruebas de resistencia, sin embargo, no siempre es así si se relacionan ambos grupos. Posiblemente el grueso de partícula afecte a los resultados. De donde surge una nueva hipótesis: a mayor grueso de partícula mayor resistencia obtenida.

El grado de resistencia de la cascarilla es directamente proporcional al porcentaje de harina de Moloquita -200,

El recubrimiento más resistente es el que utiliza como papilla el combinado de sílice coloidal PW 50 y Moloquita -200, con un porcentaje de 35% de aglutinante y de 65% de refractario y le sigue el que utiliza 40/60%.

Puesto que se trata de un ensayo de flexión, y que este esfuerzo se compone de un esfuerzo de tracción en las capas inferiores y un esfuerzo de compresión en las superiores, se deduce que el material es más resistente a la compresión que a la tracción.

Este resultado era previsible porque la resistencia a la compresión la ejerce la estructura del árido, bien consistente, mientras que la resistencia a la tracción la ejerce el aglutinante, con una fuerza de atracción menor.

#### **Sobre la resistencia de la fibra de vidrio**

En primer lugar es conveniente decir que los cilindros con fibra de vidrio tienen generalmente un espesor mayor respecto a los que utilizan sólo el grano de Moloquita para el rebozado, considerando el mismo número de capas. Por tanto, el valor real de la resistencia de estos recubrimientos con fibra ha de ser considerado como menor al obtenido en las pruebas de resistencia.

En segundo lugar se observa que a temperaturas bajas la fibra refuerza, y a partir de cierto punto aporta menor resistencia que el grano de Moloquita.

Se comprueba que la fibra de vidrio sin cocer, o cocida a temperatura de 100°C, presenta una resistencia mayor que los recubrimientos contrastados rebozados sólo con grano. Se confirma pues la utilidad de la fibra como refuerzo a temperaturas próximas a los 100°C. Se altera durante el proceso de cocción, y se cree que ésta, al cocerse empieza a perder consistencia, debilitando la cáscara y a partir de cierto momento, posiblemente a partir de los 800°C, la fibra de vidrio se funde<sup>113</sup>.

---

<sup>112</sup> Salvo dos curiosas excepciones en los ensayos de las piezas cocidas a 1000°C y en cuatro de las piezas cocidas a 1200°C. Al aumentar la temperatura de cocción, el Hispasil incrementa considerablemente la resistencia.

<sup>113</sup> En las imágenes de microscopía realizadas sobre probetas con fibra cocidas a 1200°C, se aprecian las cavidades dejadas por la fibra, tras su fusión.

Se pueden observar en las pruebas de la “Fonería”, para las cocciones entre 100°C y 750°C, los valores crecientes en los resultados de la resistencia a la rotura de la cascarilla sin fibra y los valores decrecientes cuando se utiliza la fibra.

En los casos de cocción a 500°C el recubrimiento con fibra que utiliza PW 50 en porcentaje de 35/65%, tiene un buen grado de resistencia, mayor que este mismo recubrimiento cocido a 750°C, por lo tanto se deduce que la cocción a esta temperatura debilita la consistencia de la fibra, (se observa pues, que la fibra de vidrio al cocerse pierde sus propiedades debilitando la cascarilla mientras que a 875°C el grado de resistencia se incrementa. Se tiende a creer que esto se debe a que la resistencia de la papilla aumenta, aunque cabe la posibilidad de que la fusión de la fibra y su consolidación posterior favorezca también la resistencia del recubrimiento, siendo ésta una suposición.

En los recubrimientos ensayados que contienen fibra y para cocciones de 750°C y 875°C, en general la fibra refuerza, salvo una excepción en que debilita (Hispasil 1731, 35/65% a 875°C), aunque cabría destacar que, a estas temperaturas lo hace muy ligeramente, teniendo en cuenta los porcentajes de sus componentes.

En cocciones realizadas a 1000°C y a 1200°C los recubrimientos con fibra ofrecen mayor resistencia que en cocciones a temperaturas inferiores aunque con resultados de menor resistencia que los de grano, con diferencias sustanciales.

La fibra de vidrio se funde penetrando en la papilla y al parecer generando un nuevo compuesto amorfo y compacto, sin porosidad. No conocemos con certeza a partir de que temperatura se inicia este proceso.

La cascarilla con fibra de vidrio resulta la más resistente a 1300°C, probablemente, debido a que la fibra se funde fluyendo entre los poros de la papilla, en determinado momento estos materiales se fundirán formando al enfriar una nueva composición de material.

Sabiendo que la fibra funde en torno a 800°C cabía plantearse posibles deformaciones. En ese sentido, es importante constatar, a partir de las experiencias realizadas, que no se ha observado deformación alguna de la cascarilla.

#### **Sobre la resistencia y la fractura de la probeta**

Con cascarilla cerámica cocida a altas temperaturas, la cohesión de la papilla con los granos es más resistente que la propia cohesión del material constituyente de los granos, dado que, durante las pruebas de resistencia, éste se fractura limpiamente.

La papilla es un conglomerado de microgranos de Moloquita unidos por la sílice, el grano es una arcilla cocida, una cerámica. La papilla es muy porosa. El grano tiene microporosidades, pero en las imágenes se ven mucho más dispersas que en la papilla.

En cascarillas cocidas a temperaturas elevadas, se puede apreciar fracturas absolutamente limpias donde la cohesión de la papilla con el grano ha de ser suficientemente fuerte como para que ceda la propia cohesión del material constitutivo del grano.

En cascarillas cocidas a 750°C, el grano mantiene su unidad sobresaliendo del plano, se aprecia el grano entero, este no se fractura. A 750°C la cohesión es menor y la resistencia del material del grano es superior a la cohesión de la papilla con éste. A esta temperatura la fractura de las capas tiende al escalonado, mostrando una menor cohesión entre capas.

#### **Sobre la estructura estratificada**

Con el microscopio electrónico de Barrido (SEM) se ha observado que la estructura de la cascarilla queda condicionada a su elaboración por capas.

Y que éstas están condicionadas por el sistema de aplicación de la papilla, en este caso con pincel y por la aleatoriedad del rebozado. Irregularidad en la uniformidad de los grosores de las capas.

#### **Sobre el comportamiento estructural en las pruebas de resistencia**

El comportamiento de la cascarilla cerámica es el de un estratificado cohesionado, su sistema de fractura responde al de la fractura de las sucesivas capas que lo componen. Esto es sumamente relevante a la hora de considerar la variabilidad de resultados obtenidos en las

pruebas y que en este trabajo se ha reflejado a través de los índices de desviación con respecto a los promedios obtenidos.

Los mayores índices de desviación, en cuanto a resultados de resistencia, se corresponden con los valores más elevados de resistencia y estos coinciden con una temperatura situada en torno a los 1200°C.

### **Sobre la estructura porosa**

La estructura morfológica de la cascarilla cerámica corresponde a un material poroso, como se puede observar en las imágenes obtenidas con el microscopio electrónico de barrido.

Esta porosidad se debe a los espacios libres que restan entre los microgramos de harina de Moloquita como constituyente de la papilla, lo que a su vez depende de la proporción de sílice coloidal presente, a la inclusión de burbujas de aire en dicha papilla, a los intersticios entre los granos o la fibra del rebozado, pero también a la temperatura de cocción de la cascarilla cerámica.

El mayor grado de porosidad se debe fundamentalmente a la microporosidad de la papilla. La papilla es un conglomerado constituido por microgranos de Moloquita unidos por la sílice, entre estos microgranos aparecen espacios sin materia. La proporción de sílice coloidal presente en la papilla también modifica la porosidad, mayor porcentaje de sílice coloidal implica mayor porosidad.

La porosidad de la papilla, no depende solo de los microgramos de la harina, influye también la temperatura de cocción de la cascarilla. A mayor temperatura menor porosidad.

La temperatura de cocción altera la estructura de la papilla, a 750°C es mucho más porosa que a 1200°C. A 1300°C, la presencia de poros es menor.

La presencia de las cavidades circulares, burbujas de aire, es aleatoria, aunque es posible que una mayor participación de sílice coloidal en la papilla reduzca su presencia.

Las cavidades entre granos del rebozado también son aleatorias.

La porosidad de la papilla como la del rebozado de grano o de fibra, aumenta con la fibra y disminuye con la aplicación de papillas densas y al aumentar la temperatura de cocción.

Se considera que una menor porosidad ofrece mayores grados de resistencia, aunque en esta tesis se han observado excepciones que sorprenden, como la mayor porosidad de la papilla cocida a 1300°C, dando una cascarilla menos resistente.

Se ha supuesto que el menor grado de porosidad de la cascarilla vendría dado por aplicaciones de papilla en exclusiva, sin rebozado de grano ni de fibra, aunque se ha observado que los recubrimientos resueltos con papilla no son viables para el propósito de esta investigación, dado que durante el secado se fisuran.

### **Sobre la estabilidad dimensional**

La cascarilla cerámica con rebozado de grano de Moloquita 50-80dd no reduce de dimensión a temperaturas bajas, sólo se ha visto que reduce cociéndola a una temperatura de 1200°C, con una reducción mínima de 0.50-0,75%.

Se ha observado que durante el secado se producen agrietamientos en los recubrimientos realizados sólo con papilla sobre cilindros de cera. Es de suponer que estos agrietamientos son debidos a la contracción de la papilla durante el secado.

En las experiencias realizadas no se han observado deformaciones a alta temperatura (1200°C y 1300°C).

