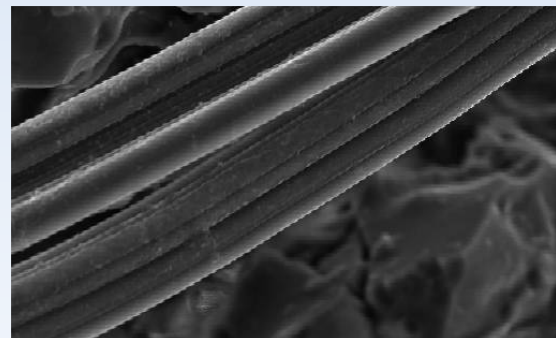
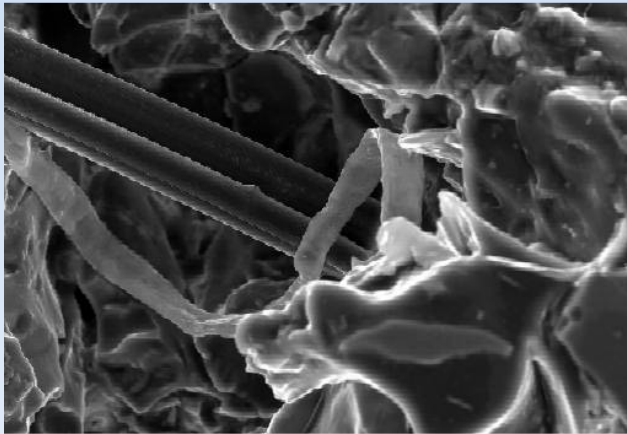
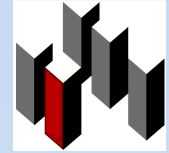




## Proyecto Final de Carrera



# Desarrollo de baldosas cerámicas reforzadas con partículas y su aplicación en la construcción

Ingeniería de Materiales

Curso 2008-09

Alumno: **Jacobo Rangel Spínola**

Tutor: **Javier Orozco Messana**

*“El éxito consiste en obtener lo que se desea.*

*La felicidad, en disfrutar lo que se obtiene.”*

**Ralph Emerson**

## *AGRADECIMIENTOS*

*Me gustaría agradecerle a M<sup>a</sup> Dolores Reyes, y muy especialmente al profesor D. Javier Orozco Messana, toda la dedicación y la ayuda que me han ofrecido para la elaboración de este proyecto.*

*Gracias, a Héctor y a Natalia,  
y sobre todo a ti, Sara,  
por todo vuestro apoyo y cariño.*



## INDICE:

1. Objetivos .....	2
2. Introducción .....	3
2.1. La materia prima: las arcillas	3
2.2. La industria cerámica en España	4
2.3. La industria cerámica en Comunidad Valenciana	6
3. Antecedentes.....	8
3.1. Conceptos generales	8
3.2. Proceso de fabricación	9
4. Metodología y plan de trabajo .....	16
5. Materiales de estudio .....	18
5.1. Selección inicial de la matriz	19
5.2. Selección inicial de refuerzos	23
5.3. Estudios de compatibilidad	28
5.4. Elección final del refuerzo	51
5.5. Estudio de la formulación	53
6. Simulación de geometría por ordenador.....	54
6.1. Descripción y justificación de las geometrías	54
6.2. Propiedades de los materiales	59
6.3. Desarrollo de las bases del modelo	60
6.4. Resultados de los cálculos	65
7. Métodos experimentales.....	69
7.1. Estudio de las variables de los ensayos	69
7.2. Justificación morfológica del refuerzo	72
7.3. Estudio microscópico de la interfase	73
7.4. Ensayos mecánicos de las piezas	91
7.5. Conclusiones sobre los resultados de los ensayos	93
8. Análisis económico.....	93
9. Conclusiones finales .....	94
10. Referencias bibliográficas.....	95



## 1. Objetivos.

De acuerdo con la evolución de los pavimentos con altas demandas de tránsito, es necesario potenciar la resistencia intrínseca de los materiales a fin de conseguir soluciones óptimas en cuanto a prestaciones, proceso y precio.

El objetivo de este proyecto es desarrollar un nuevo tipo de formulaciones que, mediante el estudio científico pormenorizado de los refuerzos en partículas, sus características físico químicas y morfología, logren aumentar las características resistentes en cocido de las baldosas. Paralelamente se desarrollará una sistemática de proceso y fabricación, incluyendo geometrías óptimas, a fin de conseguir un producto viable técnica y económicamente.

Partiendo de un producto base, de los más empleados en el mercado, como el gres porcelánico, se pretende realizar un estudio específico de reducción de espesor para un uso concreto, como baldosa de alto tránsito.

El producto base empleado es una arcilla comercial ya atomizada, que se emplea directamente en la cadena de producción. A través de las distintas formulaciones, se han preparado unos prototipos que han sido sometidos a distintas pruebas y ensayos: microscopía electrónica de barrido, ensayos mecánicos, etc.

Para conseguir la disminución de espesor sin perder prestaciones mecánicas, se planifica el empleo de refuerzos sobre la matriz cerámica. La reducción de espesor supone, no sólo el ahorro de materia prima, sino un ahorro energético tanto en su producción como en el transporte.

Se pretende pues, el diseño de un producto cerámico mejorado, partiendo del estudio de las características de las fibras de refuerzo, su proporción y estudio de compatibilidad. Tras lo cual se realizará un estudio de comportamiento mediante simulación por ordenador, y las correspondientes comprobaciones mediante ensayos mecánicos. Todo ello, sin perder de vista el proceso productivo, la compatibilidad de formas con el prensado.

Finalmente, se realizará un análisis económico de los resultados obtenidos, además de establecer las conclusiones finales obtenidas del trabajo realizado.



## 2. Introducción

### 2.1.-La materia prima: las arcillas.

Las arcillas de interés cerámico se componen, a grandes trazos, en dos tercios de minerales de arcilla y un tercio de cuarzo, feldespato y carbonato, óxido de hierro, etc. El mineral de arcilla más importante es la caolinita. Una composición mineralógica detallada sólo se puede dar con referencias a estadísticas.

Están constituidas por unos materiales primarios y otros secundarios. Los llamados primarios son los que existían en las rocas ígneas que dieron origen a la arcilla, y que han llegado hasta nuestros días sin sufrir alteración apreciable en su composición. Los materiales llamados secundarios se han formado por diversas acciones químicas y físicas sobre algunos minerales de las rocas originales.

Las arcillas como materia prima natural, contienen una cantidad de impurezas. Entre las más habituales, se encuentran las sales solubles (sulfatos, cloruros y carbonatos) y la materia orgánica. Una cantidad importante de sales solubles provoca eflorescencias en el material acabado. La presencia de iones de carácter floculante, como  $\text{SO}_4^{-2}$  y  $\text{Ca}^{+2}$  en ciertas cantidades ( $<0,1\%$ ) puede ocasionar una deficiente desfloculación de la barbotina.

La materia orgánica suele tener consecuencias más nefastas en la fabricación, ya que da lugar a la formación de **corazón negro** en el interior del cuerpo y pinchazos y otros defectos en la superficie de la pieza, pudiendo llegar a producir grandes deformaciones e hinchamientos. Su origen es diverso: Lignito, ácidos húmicos, resinas, ceras, aceites, etc. Para simplificar, y a efectos cerámicos, la materia orgánica se puede reducir a dos grandes grupos:

- Partículas de cierto tamaño ( $>50\mu\text{m}$ ), como el lignito. Ocasionan una porosidad elevada y pueden provocar defectos sobre los esmaltes.
- Partículas de tamaño coloidal, que recubren la superficie de la partícula de mineral de arcilla, aumentando su plasticidad y su resistencia en crudo. Este tipo de impureza suele actuar de desfloculante.

Las impurezas más frecuentes son: la calcita y la dolomita (de tamaño  $>100\mu\text{m}$ ), pirita, carbón, biotita y mica.



Las arcillas empleadas en la industria cerámica son rocas constituidas por una mezcla de minerales, entre los que destacan el cuarzo y minerales arcillosos como los filosilicatos, que agrupan a las ilitas, montmorillonitas y caolinitas.

Las principales características de las arcillas están en relación con su composición mineralógica y su granulometría. Desde el punto de vista granulométrico, la materia prima empleada en la fabricación de productos cerámicos que se designa con ese nombre suele tener distribuciones granulométricas más gruesas de  $2 \mu\text{m}$ .

Los pavimentos y revestimientos cerámicos se fabrican utilizando bien arcillas comunes (arcillas rojas que dan productos de este color tras la cocción) o arcillas refractarias (blancas tras la cocción), las objetos de este estudio, pertenecen a este último grupo.

La clasificación de arcillas puede hacerse empleando diferentes criterios, en general en relación con su mineralogía o su color de cocción. Las arcillas refractarias se utilizan en pastas cerámicas blancas. Las pastas blancas porosas para recubrimientos cerámicos suelen necesitar la adición de caolín, carbonato cálcico, dolomita, arenas silíceas y feldespato, mientras que las pastas para pavimentos cerámicos de monococción incorporan generalmente feldespato, sílice, caolín y talco, una mezcla muy similar a la de los pavimentos de porcelánicos, salvo que en estos últimos el contenido en feldespato alcanza el 50%. Las pastas para cerámica sanitaria y vajillas se fabrican a base de arcillas refractarias, feldespato, caolín y sílice.

## 2.2.-La industria cerámica en España.

La industria española de pavimentos cerámicos ha sufrido grandes cambios en relación con la preparación de las materias primas: las plantas de homogenización y los atomizadores. En el caso de las pastas blancas sólo hay un productor independiente de arcillas refractarias atomizadas, que suministra al mercado libre.

Los consumos medios de materia prima, tanto sea de soporte en pasta blanca como en roja que se han utilizado en las estimaciones, son aproximadamente:

18 -22  $\text{kg/m}^2$  para revestimiento

20 -25  $\text{kg/m}^2$  para pavimento

El sector cerámico español ha tenido un crecimiento muy alto debido, principalmente, al auge que ha tenido la construcción en los últimos años. La siguiente tabla muestra los principales índices del sector cerámico español.

Año	2000	2001	2002	2003	2004	04/03
Producción efectiva (millones m <sup>2</sup> )	621	638	651	627	640	2,1
Número de trabajadores	25000	25600	26100	25200	25500	1,2
Ventas totales estimadas (millones €)	3301	3472,4	3595,9	3495,6	3670,8	5
Exportación (millones €)	1872,1	1987,8	2059,3	1939,1	1977,3	2
% exportación sobre total de ventas (valor)	56,7	57,2	57,3	55,5	53,9	-
Ventas en España estimadas (millones €)	1428,9	1484,6	1636,6	1556,6	1693,5	8,8
Importación (millones €)	37,9	47,4	60,2	75,4	86,6	14,9
Consumo aparente en España (millones m <sup>2</sup> )	290,4	309,6	327,1	332,4	360,9	8,6
Superávit comercial sectorial (millones €)	1834,2	1940,3	1999,1	1863,7	1890,7	1,4

Tabla 1. Principales datos del sector cerámico. Fuente ASCER.

En la tabla nº 1 se puede comprobar como el sector cerámico ha ido en aumento en los últimos años, a excepción de un ligero descenso de la producción en el año 2003. Pese a ello se puede ver como en el 2004 el sector se recuperó. La producción española mantiene un crecimiento positivo desde 1982. Lo mismo ocurre con los beneficios generados por las ventas totales.

No obstante, puede comprobarse como el consumo aparente en España ha ido en un progresivo aumento, a lo largo de todos los años estudiados. Por ello, se puede decir que es un sector con una demanda creciente, hasta comienzos de 2008, donde la crisis en el sector inmobiliario ha frenado el incremento de producción.

La industria cerámica puede dividirse en diferentes subsectores, los cuales se presentan a continuación junto con sus cuotas de producción, ver figura nº 1:

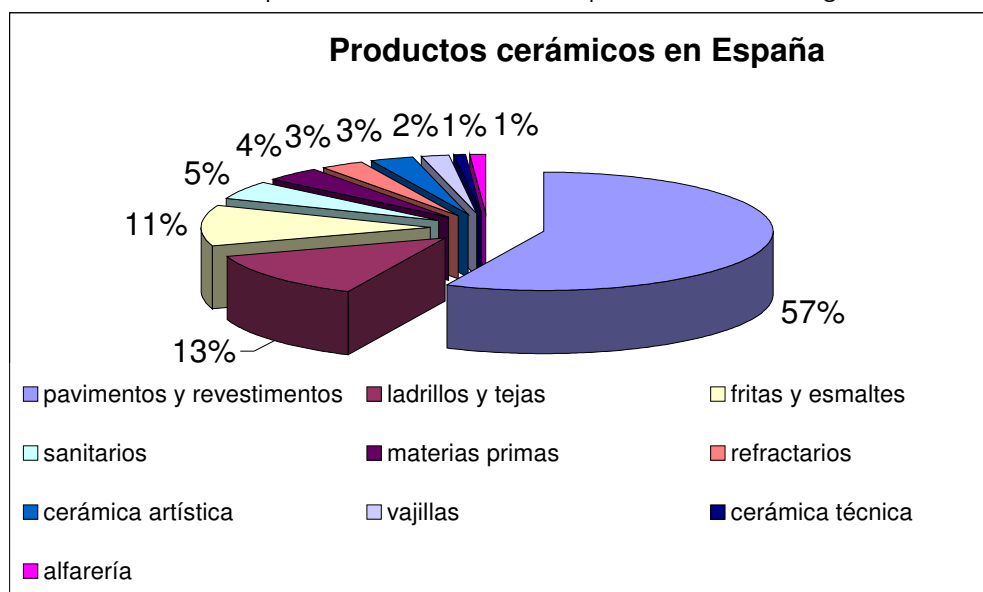


Figura 1.-Productos cerámicos y cuotas de producción.





Como puede observarse la mayor parte de la producción (57%) de productos del sector cerámico se corresponde con las baldosas (pavimentos y revestimientos). El segundo sector más importante es el correspondiente a la fabricación de ladrillos y tejas (13%). Otro de los sectores importantes de la industria cerámica es el que se corresponde con los esmaltes y fritas (11%). La fabricación de fritas forma parte del sector de fabricación de vidrio, aunque dada la importancia que tiene en el sector cerámico puede incluirse en el mismo. Por otro lado, la fabricación de esmaltes también puede parecer que pertenece a otro sector diferente del cerámico, pero la mayor parte de baldosas fabricadas en la actualidad los incluyen, de ahí su importancia en el sector.

El resto de subsectores tienen menor cuota de mercado, aunque no por ello son menos importantes. En este conjunto se puede encontrar: el sector de materias primas directamente relacionadas con la fabricación de baldosas, subsectores más específicos como los sanitarios, la cerámica artística... y sectores más técnicos como son la fabricación de refractarios y cerámica técnica.

La producción mundial de pavimentos cerámicos alcanza los 2 700 Mm<sup>2</sup>. Italia (19%), España (12%) y Brasil (11%) solían compartir el liderazgo en la producción mundial, hasta la reciente y repentina aparición de China como segundo productor mundial (15%), si bien los datos chinos se basan en su capacidad de producción y son poco fiables. Los cuatro países mencionados, junto con Alemania, son también líderes en consumo de pavimentos cerámicos, aunque en España e Italia la producción duplica el consumo interno lo que confirma su extraordinaria capacidad de exportación.

Actualmente, la industria española de pavimentos y revestimientos cerámicos está valorada muy positivamente a nivel internacional por la gran competitividad de sus productos, basada no sólo en el precio sino también en la calidad estética y las excelentes propiedades técnicas del producto acabado.

### 2.3.-La industria cerámica en la comunidad valenciana.

Una de las principales características de este sector es la alta concentración de la industria en Castellón. En 2004, el 94 % de la producción nacional precedió de esta provincia, donde se encuentra el 81% de las empresas.

#### NÚMERO DE EMPRESAS POR ACTIVIDAD

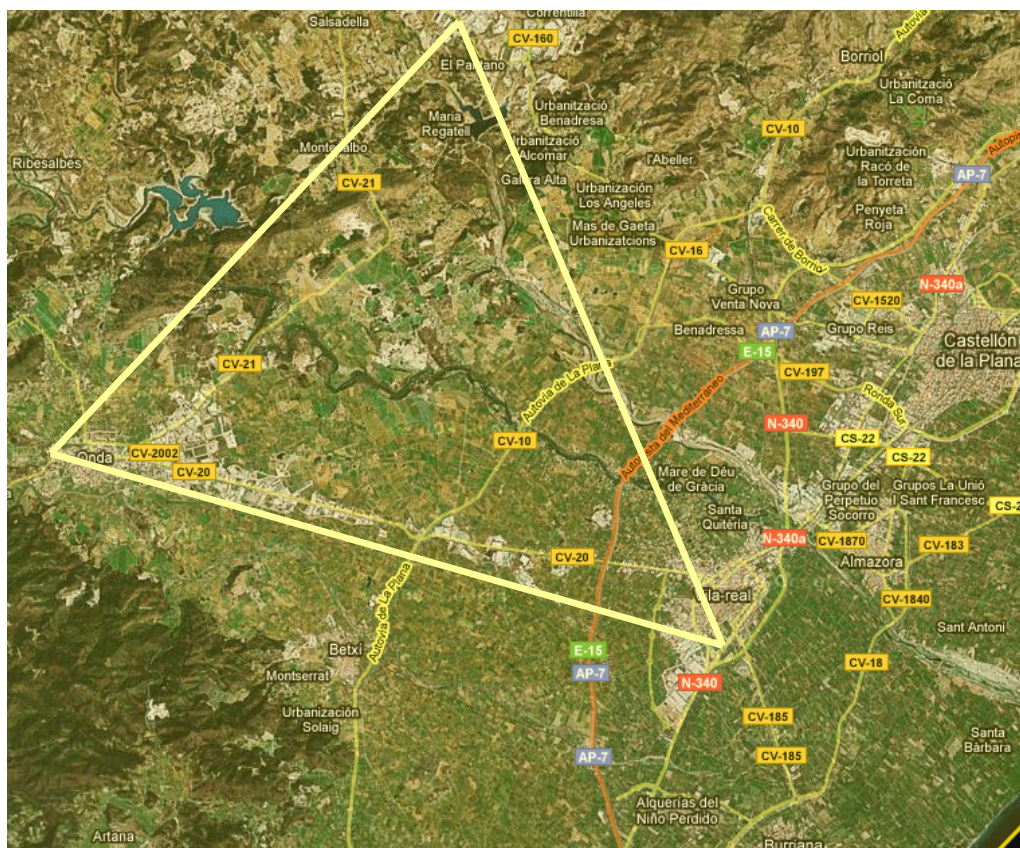
Actividad	2001	2002	2003	2004
Baldosas cerámicas	204	203	200	196
Piezas especiales	27	27	27	26
Atomizadoras	13	13	13	13
Bizcocho	6	6	6	6
TOTAL	250	249	246	241

Tabla nº 1.-Datos procedentes de la Asociación Española de fabricantes de Azulejos y Pavimentos Cerámicos ASCER.

La fabricación de productos cerámicos constituye una actividad económica puntera en la Comunidad Valenciana, y en especial para la provincia de Castellón. Sus cifras así lo demuestran:

- El 95% de esta industria cerámica está asentada en Castellón, donde desarrollan su actividad 196 empresas de las 241 que integran el sector a nivel nacional.
- Aporta el 32% del PIB provincial.
- Ofrece empleo directo al 15% del total de trabajadores remunerados de la provincia.
- El 22% de las exportaciones mundiales de azulejos y pavimentos tiene su origen en Castellón.
- En el ejercicio 2005, esta industria de Castellón alcanzó una producción de 3.370 millones de euros.
- A nivel de la Comunidad Valenciana, la industria azulejera es el primer sector industrial por generación de riqueza, así como por inversión registrada (15% del total).

Geográficamente la industria cerámica puede situarse en el área norte de la Comunidad Valenciana, concretamente delimitada por las localidades de Alcora y Borriol por el norte, al oeste por Onda, al sur por Nules y al este por Castellón de la Plana.





La Comunidad Valenciana es el origen del 44% de la producción de la UE y del 10,1% de la producción mundial. Dentro de la UE, España e Italia son los dos grandes productores, si bien a escala mundial ambos se encuentran a bastante distancia de China, primer productor cerámico mundial. Del "gigante asiático" se desconocen datos exactos, debido a la disparidad de cifras que vierten las fuentes consultadas por el sector, aunque se estima que su producción rondaba ya en 2002 los 2.240 millones de metros cuadrados, frente a los 1.447 de la UE (651 de España y 605 de Italia).

A pesar de la introducción en el mercado de las cerámicas procedentes de China, la balanza comercial del sector sigue arrojando un resultado claramente positivo.

El principal cliente de la industria valenciana de cerámica y por tanto española, es EEUU. Dentro del mercado comunitario Francia, Reino Unido y Portugal son los principales países compradores.

En cuanto a los países de origen de la importación de productos cerámicos, destacan Italia, Portugal, China y Francia.

### 3. Antecedentes.

#### 3.1.-Conceptos generales

Los productos de arcilla junto con los materiales refractarios forman las cerámicas tradicionales. Están formados básicamente por arcilla (aluminio - silicatos), cuarzo y feldespato. Dentro de este grupo se encuentran las arcillas, lozas y porcelanas, cuya característica principal es la elevada plasticidad.

Precisamente la propia composición del material hace que tenga en la fragilidad uno de sus puntos débiles. Este fenómeno se explica bien considerando la direccionalidad de los esfuerzos en una estructura iónica y comparando con el caso opuesto, el caso de un metal.

Los materiales cerámicos, como se ha comentado poseen uniones más fuertes por lo que, ante una sollicitación externa en una grieta, rompen antes que deslizar.

Así pues, las cerámicas concentran tensiones que sólo pueden relajarse por rotura frágil. El problema con la fractura frágil de los materiales cerámicos se intensifica por la presencia de imperfecciones como pequeñas grietas, porosidad, inclusiones extrañas, fases cristalinas o un tamaño grande de grano, que se introducen en el proceso de manufactura. Los defectos varían en tamaño, forma y orientación, tanto dentro de un solo componente, como de un componente a otro.

En cuanto a los poros cabe decir que éstos pueden estar aislados dentro del sólido (cerrado) o pueden estar interconectados por canales que lleguen a la superficie del sólido (abierto). Un aumento de la porosidad está relacionado con otros factores como la baja conductividad térmica o la disminución de la resistencia mecánica. Y según se acaba de comentar, cuanto mayor sea la porosidad, más se concentrarán las cargas y más roturas frágiles se darán.

### 3.2.-Proceso de fabricación.

El proceso de fabricación de materiales cerámicos consta de una serie de etapas, siendo variables dependiendo del tipo de material cerámico que se quiera conseguir. En las siguientes figuras se muestra un esquema simplificado de estos procesos:

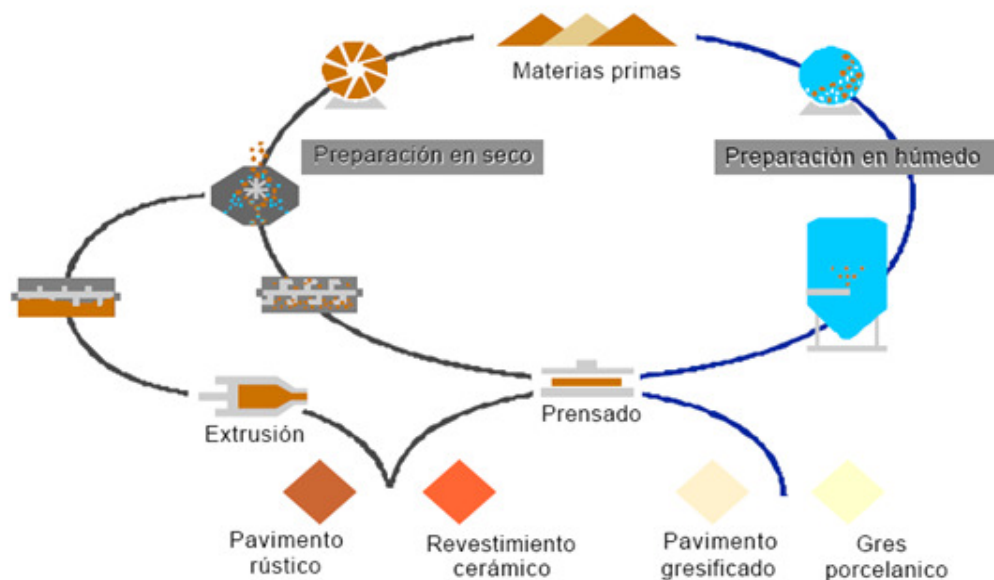


Figura 2.- Esquema general del proceso de fabricación.  
Fuente: Instituto de Tecnología Cerámica

#### a) Elección y preparación de materias primas.

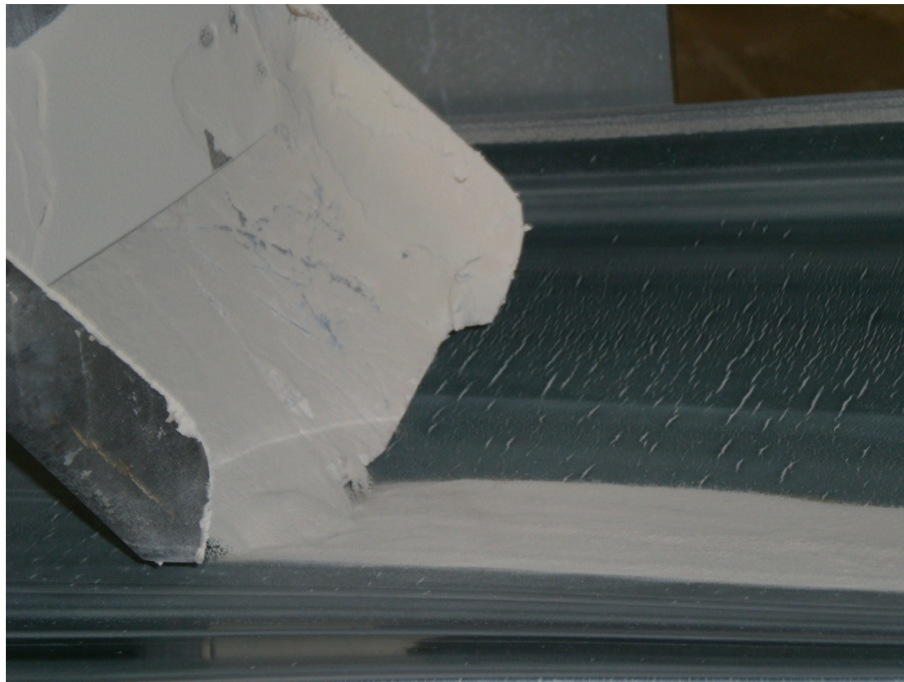
Los materiales utilizados para la fabricación de materiales cerámicos suelen ser arcillas, feldspatos, arenas, carbonatos y caolines. A éstos se les puede añadir aditivos varios para obtener diferentes propiedades interesantes.

En la industria cerámica será necesaria una previa homogenización de las materias primas, ya que todas ellas llegan normalmente desde la cantera de la cual han sido extraídas.

**b) Molturación por vía seca o vía húmeda.**

Molturación por vía húmeda. Este procedimiento es el que se sigue en la mayoría de las industrias cerámicas puesto que supone numerosas mejoras técnicas, sobretodo en la fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos. La molturación se realiza con molinos de bolas continuos o discontinuos, obteniéndose como resultado una suspensión denominada barbotina, siendo el tamaño de partículas de la suspensión de unas 200 micras.

Tras la molturación se realiza una atomización. La atomización es un proceso de secado por el cual una suspensión pulverizada en finas gotas entra en contacto con aire caliente para producir un producto sólido de bajo contenido en agua. Se consigue pues una gran eliminación de humedad. La figura nº 3 representa un esquema básico del secado por atomización.



Fotografía nº 1: muestra de barbotina en el proceso industrial.

Para llevar a cabo este proceso la barbotina almacenada tras las plantas de molienda, con un contenido en agua entre el 30-40%, es bombeada al sistema de pulverización, poniéndola en contacto con una corriente de gases calientes.

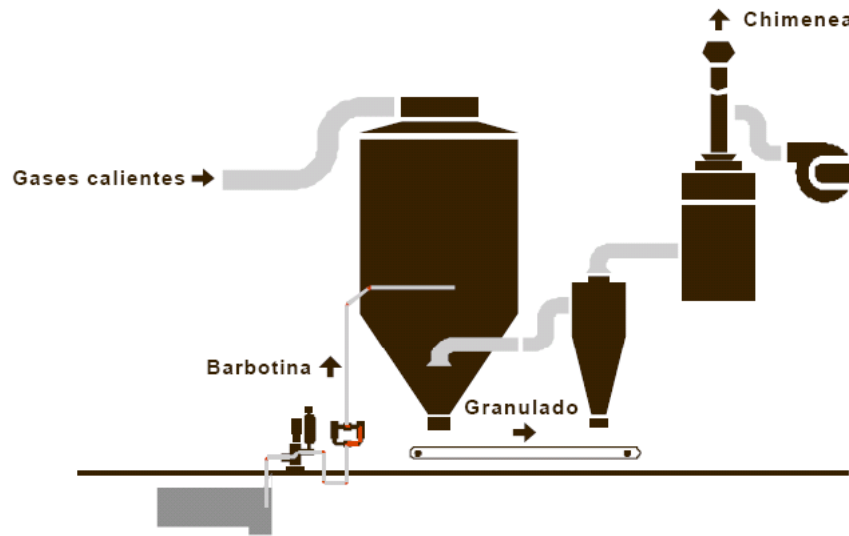


Figura 3.- Esquema de secado por atomización.  
Fuente: Instituto de Tecnología Cerámica

La salida inferior del atomizador es un granulado con una humedad entre el 5.5 y el 7%. Este granulado se descarga en una cinta transportadora para ser almacenado en silos hasta su posterior prensado. Por la parte superior se obtienen los gases calientes empleados y que contienen un elevado porcentaje de humedad y finas partículas en suspensión.

El proceso húmedo conlleva unas mejoras técnicas. Una de las más importantes, es la obtención de gránulos más o menos esféricos huecos en su interior y muy uniformes. De este modo se confiere al polvo de una gran fluidez, facilitando las posteriores operaciones de prensado. Otra ventaja es la realización de las operaciones secado y granulación en un mismo equipo del proceso, siendo las variables del proceso de fácil control.

Molturación por vía seca. Se realiza con molinos de martillos o pendulares, se produce una fragmentación, manteniéndose tanto los agregados como los aglomerados de partículas. Por esta razón se obtienen unos tamaños de partícula superiores a los obtenidos en la vía húmeda, se pueden obtener tamaños de unas 300 micras.

### c) Amasado.

El proceso de amasado es posterior a la preparación en seco de las materias primas. Consiste en el mezclado íntimo con agua de la mezcla de polvos que definen la composición de la pasta. De este modo se consigue una masa plástica fácilmente moldeable por extrusión.

#### d) Extrusión.

Consiste en hacer pasar una columna de pasta, en estado plástico, a través de una matriz que forma una pieza de sección constante. Es un procedimiento análogo al que se realiza con los metales. Para realizar la extrusión primero debe haberse realizado un amasado.

#### e) Prensado en seco.

Este es el procedimiento por excelencia para la conformación de las piezas, mediante el uso de prensas hidráulicas. La operación se realiza con una compresión mecánica de la pasta en el molde. El sistema de prensado se basa en prensas oleodinámicas que realizan el movimiento del pistón contra la matriz por medio de la compresión de aceite.



Fotografía n° 2: proceso de prensado de las baldosas de gres porcelánico

El prensado en seco es uno de los procedimientos más económicos para la fabricación de materiales cerámicos de geometría regular.

En nuestro caso, hemos realizado varias pruebas con prensado a distintas presiones: 10, 15 y 20 toneladas.

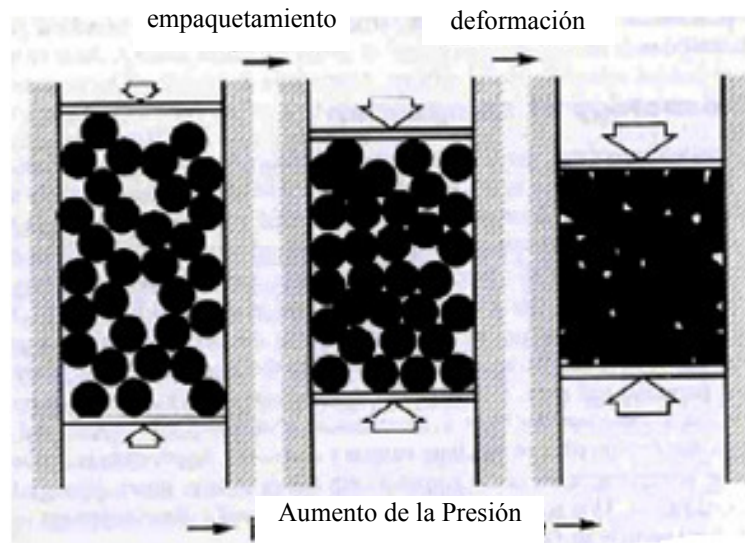


Figura 4.- Esquema del proceso de prensado.

#### f) Secado de piezas cerámicas.

Una vez se ha conformado la pieza cerámica se somete a un proceso de secado para eliminar casi en su totalidad el contenido en agua que aun llevase, llegando a niveles de humedad tras el secado de 0.2-0.5%. Esta etapa es importante para que las posteriores etapas de cocción y esmaltado se realicen adecuadamente.

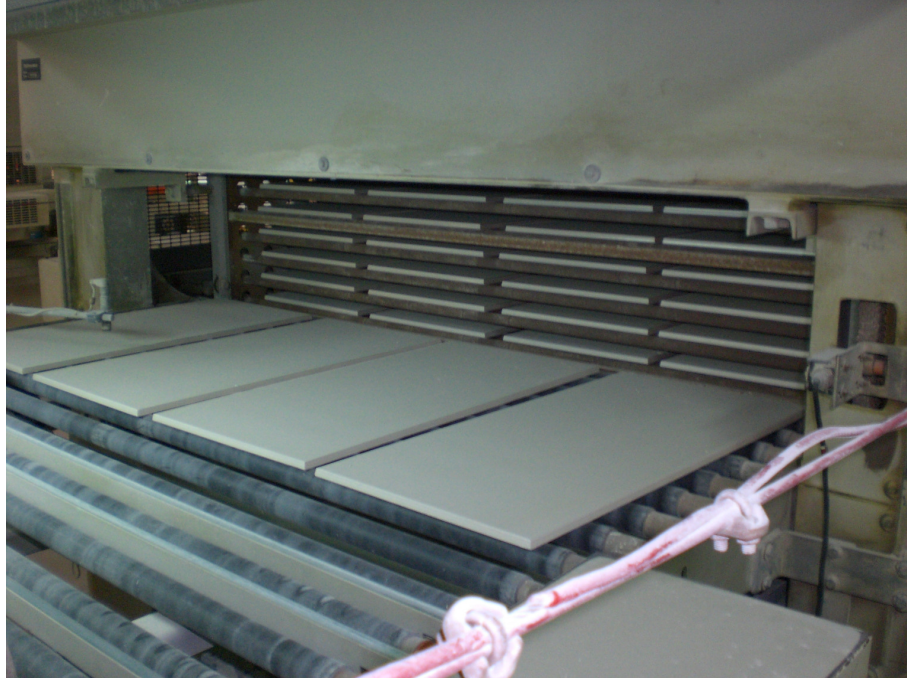
Actualmente los procesos de secado se realiza introduciendo las piezas cerámicas una vez conformadas en el secadero, donde se ponen en contacto en contracorriente con gases calientes y secos.

Se pueden encontrar dos tipos de secaderos:

- Secaderos verticales: En este tipo de secadero las piezas se colocan en superficies metálicas. Dichas superficies forman entre sí unidades denominadas cestones. El conjunto de cestones se mueve por el interior del secadero verticalmente, de modo que el conjunto cestón-pieza está en contacto con gases calientes (unos 200°C) entre 35 y 50 min.
- Secaderos horizontales: Se basan en un sistema un horno de rodillos como los utilizados, por ejemplo, en el secado de los fangos de una depuradora de aguas residuales. Las piezas se introducen en el interior del secadero y se mueven horizontalmente en su interior por encima de los rodillos. El aire caliente, que entra en contacto en contracorriente con las piezas, es aportado por quemadores situados en los laterales del horno. La temperatura máxima en este tipo de instalaciones suele ser mayor que en el caso de los secaderos verticales (alrededor de los 350°C) y, como consecuencia, los ciclos de secado son menores, entre 15 y 25 minutos. En general los secaderos horizontales tienen un consumo menor que los



verticales, debido a la mejor disposición de las piezas dentro del secadero y a la menor masa térmica.



Fotografía n° 3: las piezas se almacenan para secarlas previamente a su cocción

#### g) Cocción de las piezas.

Una vez secas las piezas se realizan una cocción. En la cocción se determinan las características mecánicas y químicas del producto, por lo que será necesario estudiar correctamente el mejor modo de cocer la pieza.

En cuanto al tipo de cocción se pueden distinguir: cocción única, monococción y bicocción. Normalmente esta elección viene determinada por la inclusión de un esmalte o no en la superficie del cerámico. Concretamente, para los productos que no deban ser esmaltados esta cocción es única, como ocurre en el caso del gres porcelánico.

El ciclo térmico, que determina la evolución de las reacciones que se producen entre los constituyentes del material cerámico y que cambian su microestructura (la principal responsable de las propiedades del material).

Un ciclo térmico se corresponde a la tendencia de la figura n° 5:

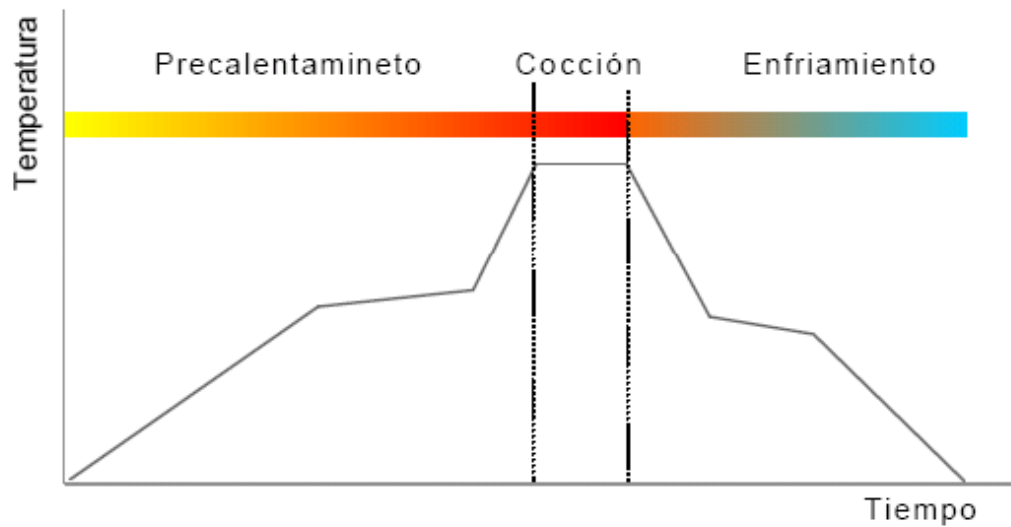


Figura 5.- Esquema del ciclo de cocción de las baldosas cerámicas.  
Fuente: Instituto de Tecnología Cerámica



Fotografía nº 4: aspecto de las piezas tras la cocción

Los dos sistemas de producción de cerámicas son el laminado y el prensado. El laminado únicamente es empleado a escala de laboratorio, mientras que el prensado es el sistema empleado industrialmente.

Por estos motivos, se utilizarán cerámicas prensadas y con amplia producción como ocurre con el porcelánico.



## 4. Metodología y plan de trabajo.

Sentadas las bases sobre el material base de trabajo, el proceso de fabricación de las muestras y teniendo en cuenta los medios disponibles, se realizó la planificación de los trabajos a realizar.

Como se ha indicado en los objetivos del trabajo, se pretende disminuir el espesor de las baldosas de gres porcelánico, manteniendo sus capacidades mecánicas intactas para el uso de gran tránsito para el que se le busca aplicación.

Las primeras fases tras la organización general del trabajo, se correspondían con fijar el material base (matriz), a continuación se buscaba un refuerzo que fuera compatible con la matriz, que soportara las temperaturas de la cerámica. Tras las primeras decisiones sobre los refuerzos, se inician los estudios previos y los estudios microscópicos para comprobar la interfase y poder tener elementos de juicio para la elección del refuerzo más adecuado.

Posteriormente, se establecen el resto de parámetros: morfología, tamaño, dosificación, presión de prensado, etc.

Finalmente, se realizan los ensayos mecánicos para poder comprobar la "eficacia" del refuerzo y poder realizar la comparación de los datos obtenidos.

En primer lugar se estableció un cronograma de tiempos con el fin de poder establecer los hitos más importantes, así como la frecuencia y duración de los mismos:



Figura nº 6: cronograma de trabajos a realizar

Además de la programación de tiempos, y con el fin de organizar de manera conveniente los procesos a seguir durante el presente proyecto, se realizó un diagrama de flujo que tras ser revisado, quedó como se indica a continuación:

## DIAGRAMA DE FLUJO

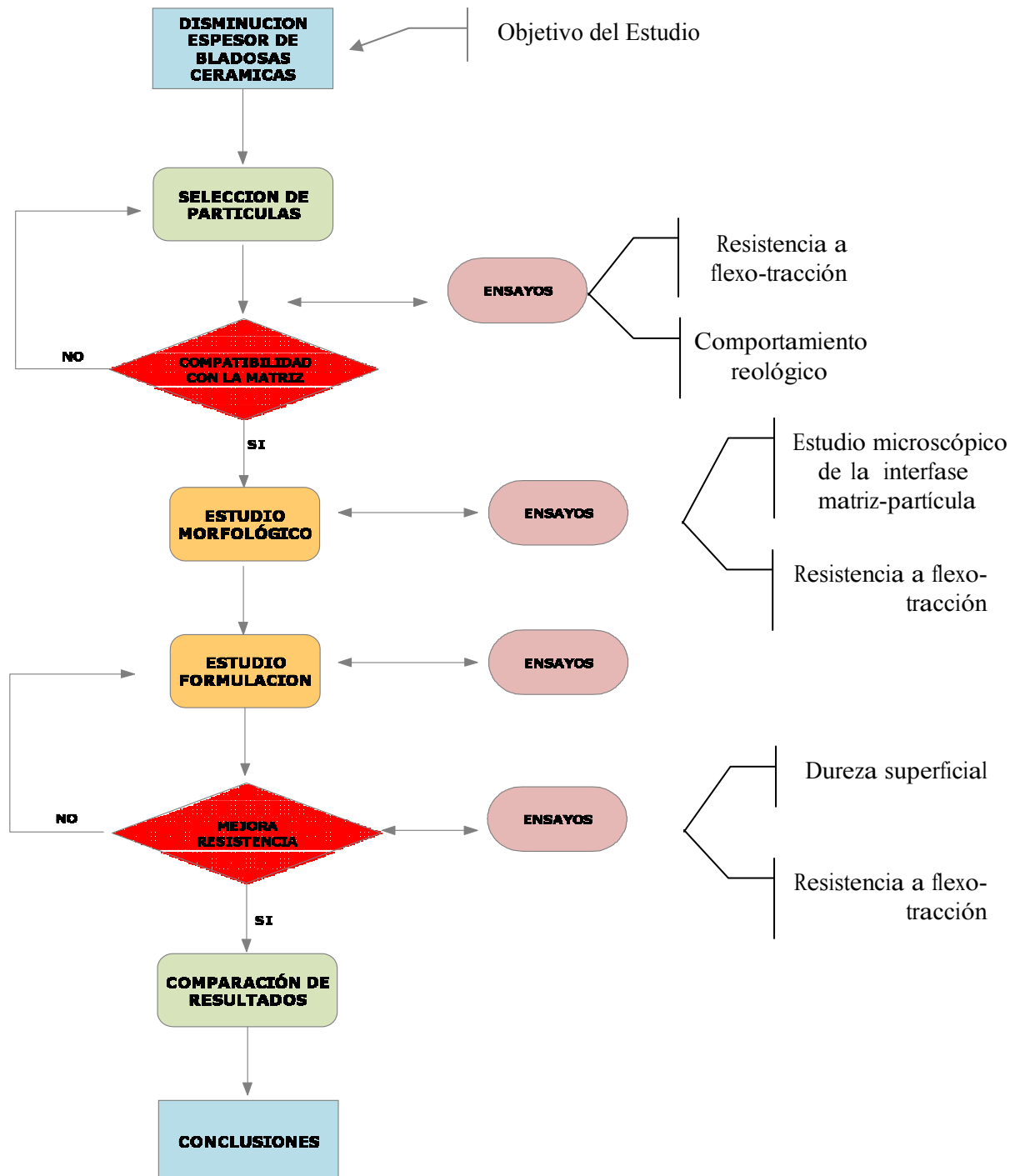


Figura nº 7.- Diagrama de flujo del estudio



## 5. Materiales de estudio.

Remontándonos al inicio del presente estudio, allá cuando marcábamos el objetivo del mismo *“desarrollar un nuevo tipo de formulación para desarrollar el proceso de fabricación de baldosas de gres porcelánico de menor espesor y aptas para el alto tránsito”*, y con ello el material base del trabajo.

El planteamiento era obtener un producto “mejorado” del estándar de producción, con materiales de fácil obtención y de uso cotidiano. De ahí, que la primera selección de la base o matriz, fuese una arcilla “convencional” en el sector cerámico para la fabricación de baldosas.

Continuando con este mismo criterio, era necesaria una primera elección, atendiendo a su proceso de fabricación. Como ya sabemos, los procesos de obtención son dos: mediante laminación y mediante prensado.

Las cerámicas laminadas poseen mayor resistencia a flexión. A esto hay que añadir que con el laminado, se mejoran propiedades mecánicas tales como la tenacidad. Otro factor a tener en cuenta, es que, mediante el laminado se obtienen mayores formatos de placas cerámicas. Por el contrario, su implantación industrial es menor que el proceso de prensado, al menos hasta el momento.

Precisamente, el prensado, es el método industrial de obtención de piezas cerámicas empleados por la inmensa mayoría de fabricantes a nivel mundial. En este proceso partimos de un producto en polvo, prensado a una determinada presión, obteniéndose diferentes formatos con escaso espesor.

Por lo tanto, nuestra primera decisión fue elegir una base cerámica de composición empleada habitualmente en el mercado, con el método habitual de fabricación, esto es, un gres porcelánico prensado.



### 5.1. Selección inicial de la matriz.

Como se ha indicado anteriormente, para la selección de la matriz cerámica, se ha tenido como criterios básicos: el diseño del producto, la disponibilidad en el mercado y que el coste sea admisible en el proceso industrial global.

Como primer punto de partida, realizamos un barrido por los productos más empleados como revestimientos de suelos, en forma de baldosas, que se agrupan bajo la denominación de "baldosas cerámicas", éstos quedan reflejados en la tabla nº 3:

TIPO DE BALDOSA	MOLDEO	SOPORTE	ESMALTE	ABSORCIÓN AGUA	CARGA ROTURA	RESIST. HELADA	RESIST. QUÍMICA
<b>Azulejo</b>	Prensado	Poroso	Si	11-15%	300-1200N	No	Variable
<b>Gres convencional</b>	Prensado	No poroso	Si	2-6 %	1000-2300 N	Si-No	Variable
<b>Gres porcelánico</b>	Prensado	No poroso	No	0,1%	2200-5200 N	Si	Si
<b>Gres rústico</b>	Extruido	No poroso	No- Si	1,5-6%	2200-4500 N	Si-No	Si
<b>Barros cocido</b>	Extruido	Poroso	No	6-15%	2300-3200 N	No	Variable
<b>Baldosín catalán</b>	Extruido	Poroso	No	Gran dispersión	500-1800 N	No	Variable

Tabla 2.-Tipos de baldosas cerámicas y sus propiedades.

Del análisis objetivo de la tabla anterior, se deduce que es precisamente el gres porcelánico, aquel que una baja porosidad, posee unas características mecánicas más destacadas. A esto hay que añadir su extensa implantación en el mercado español.

Medidas usuales.	Grosor usual.	Absorción de agua.	Carga de rotura.	Abrasión. GL	Abrasión. UGL	Resistencia a la helada.	Resistencia química.
15 x 15 a 60 x 60 cm.	> 8 mm.	< 0.1 %	2200-5200 N	-	110-160 mm <sup>3</sup>	Si	Si

Tabla 3.- Propiedades generales del gres porcelánico.

Podemos definir como gres porcelánico, a aquel producto, normalmente en forma de baldosas, que poseen una muy baja absorción de agua, que han sido obtenidas mediante prensado en seco, de superficie no esmaltada, y por tanto sometidas a una única cocción.



El cuerpo es del color resultante de la adición de colorantes a la masa, con distribución uniforme o granular. Es de textura muy fina y homogénea no siendo apreciables a simple vista elementos heterogéneos. Las superficies y aristas son muy regulares y bien acabadas.

La cara vista es de la misma materia que el cuerpo y puede ser de color liso, moteada, marmoleada o decorada. El gres porcelánico puede utilizarse tal como resulta tras la cocción (gres porcelánico mate o natural) o someterse la cara vista un proceso de pulido, que le da brillo y lisura (gres porcelánico pulido). La cara vista puede tener relieves similares a los de las piedras naturales, con fines decorativos, o en forma de puntas de diamante, estrías, ángulos, con fines antideslizantes, para uso en suelos exteriores o de locales industriales.

Desde el punto de vista normativo, según la norma UNE-EN 14411, el gres porcelánico está comprendido dentro de grupo B Ia (baldosas cerámicas prensadas en seco con absorción de agua  $E < 0,5\%$ ).

Para la caracterización de la materia prima utilizada para la obtención del gres porcelánico, es decir, la arcilla blanca, tenemos los datos de partida de las curvas gravimétricas de sus principales componentes: arcilla, feldspatos y caolín (figuras nº 8, nº 9 y nº 10 respectivamente); así como los porcentajes en masa, detallados en la tabla nº 4. En este caso, no se han realizado los ensayos granulométricos ni termogravimétricos correspondientes, puestos que fueron aportados por el suministrador de la materia prima para lo ensayos.

Materias primas	%Peso seco
BiO <sub>2</sub>	53,70
TiO <sub>2</sub>	0,77
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,96
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,09
MgO	2,85
CaO	5,95
Na <sub>2</sub> O	0,66
K <sub>2</sub> O	3,25
P.F	10,77
<b>TOTAL</b>	<b>100,00</b>

Tabla 4.-Porcentajes en masa de la cerámica comercial empleada como materia prima.



La termogravimetría, no es más que un análisis térmico, y por tanto, la medida de los cambios físicos o químicos que ocurren en una sustancia en función de la temperatura mientras la muestra se calienta (o se enfría) con un programa de temperaturas controlado.

Así, la medida se puede hacer sobre los valores absolutos de una propiedad (p.ej. el peso o el módulo de compresibilidad), la diferencia entre las propiedades de una muestra y un material de referencia que no se ve afectado en esas condiciones (p.ej. la temperatura, o el flujo de calor necesario para mantener los dos materiales a la misma temperatura), la velocidad de cambio de una propiedad (p.ej. derivada de peso o de otra propiedad). En función de la medida que se produzca, se pueden distinguir varios análisis. Otras técnicas menos importantes son el análisis termosónico (TS) y el termomagnetométrico (TM).

El objeto del ensayo es el análisis termogravimétrico (TG y DTG) preferentemente.

Los eventos térmicos se producen al elevar la temperatura de un cuerpo en una atmósfera inerte (si no es inerte, los dos reactivos reaccionan y no se consigue el propósito, que es estudiar la variación de una propiedad con la temperatura). Esto da lugar a un aumento en el movimiento molecular, atómico o iónico, produciendo cambios en la estructura, sinterización, fusión o sublimación. Si las fuerzas intramoleculares son menores que las intermoleculares, la sustancia se descompone.

La parte más importante del equipo es la termobalanza, dispositivo preparado para la medida simultánea del peso de una muestra y la temperatura a la que se somete.

El resultado de esta técnica son tres curvas, la primera de ellas muestra la pérdida de peso de la muestra en función de la temperatura. La segunda de ellas es la curva derivada, muestra la pérdida de peso por minuto y en función de la temperatura. Y finalmente, la última curva es la curva SDTA, esta curva da información acerca de las reacciones químicas que se están produciendo, marca el calor absorbido o el calor desprendido por la masa, es decir, si las reacciones que se producen son endotérmicas o exotérmicas.

En este caso, la caracterización termogravimétrica de las materias primas principales aportadas por el suministrador, para la Arcilla, el Caolín y el Feldespato, son las que se corresponden con las siguientes gráficas:



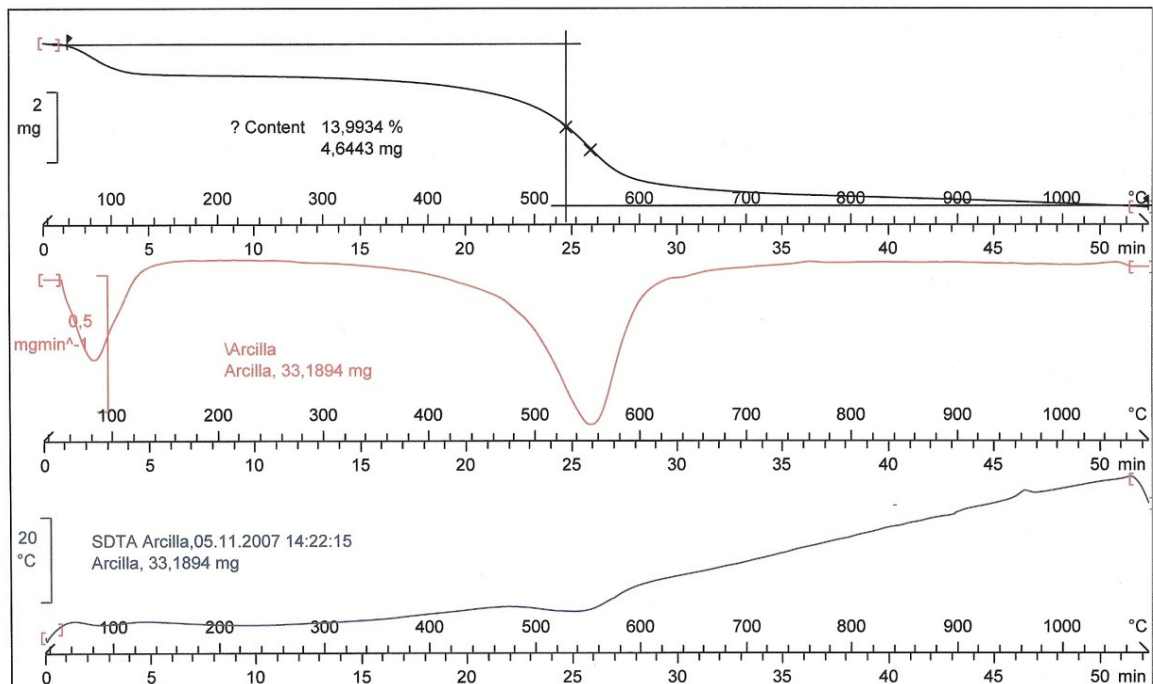


Figura 8.-Curvas Termogravimétricas de la Arcilla.

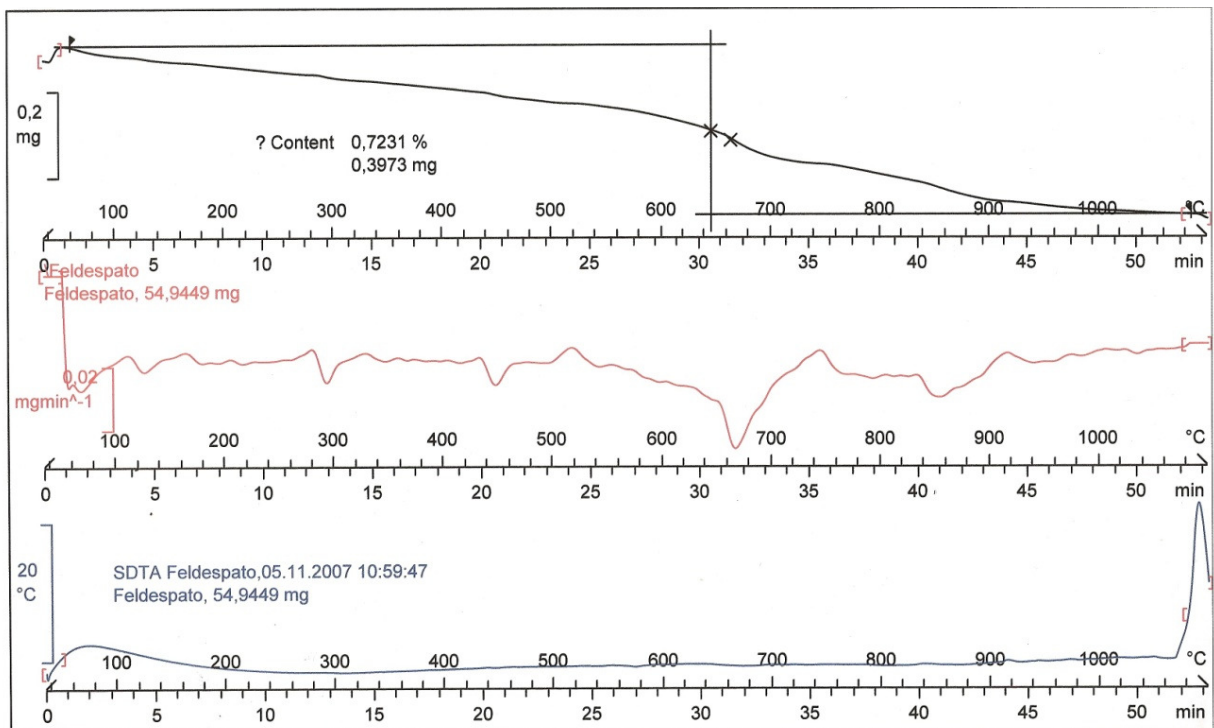


Figura 9.- Curvas Termogravimétricas del Feldspato.

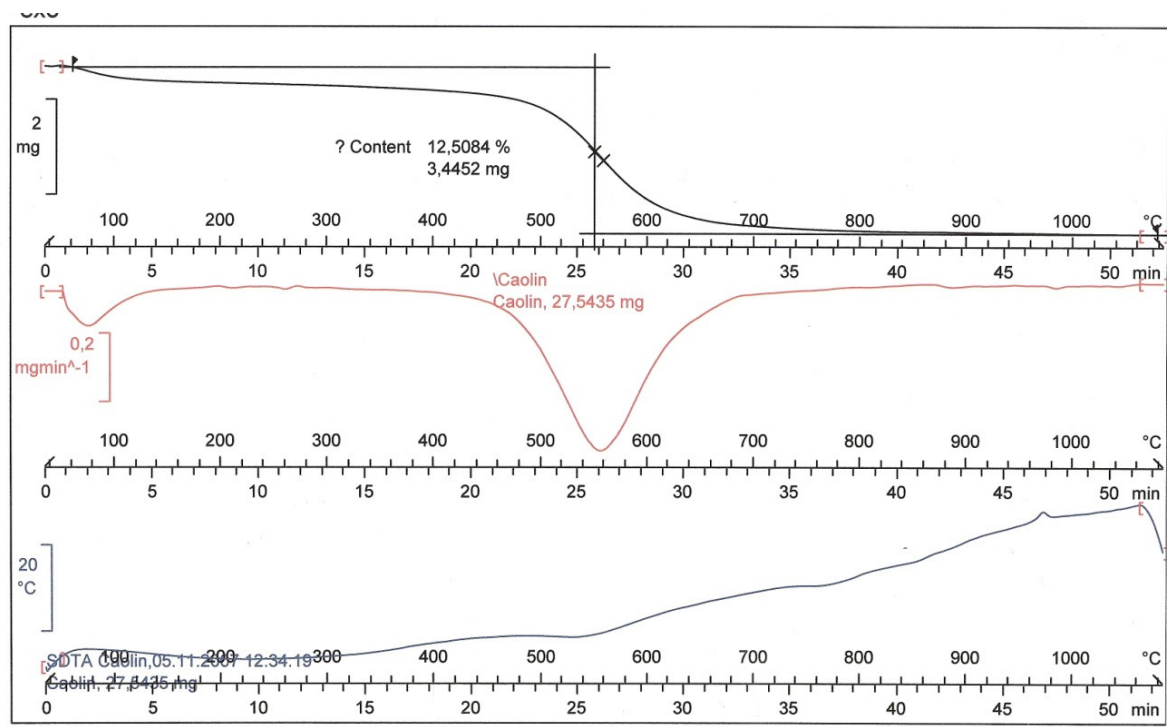


Figura 10.- Curvas Termogravimétricas del Caolín

## 5.2.- Selección inicial del refuerzo.

Un material compuesto es un sistema integrado por una mezcla o combinación de dos o más micro o macroconstituyentes que difieren en forma y composición química y que son esencialmente insolubles entre si. Es importante destacar la escala de longitudes donde se trata la microestructura (entre  $10^{-7}/10^{-4}$  m), macroestructura ( $> 10^{-3}$  m) y la nanoestructura (o estructura atómica) [ $< 10^{-8}$  m].

En general, los materiales compuestos (MC) poseen la gran ventaja de tener una muy baja densidad con unas muy buenas propiedades mecánicas, permitiendo el diseño de elementos constructivos muy ligeros y una construcción amena. Estos materiales presentan multitud de posibles aplicaciones en numerosos sectores.

La importancia ingenieril de los materiales compuestos es muy grande ya que se combinan las propiedades y prestaciones de los materiales constituyentes cuando se diseña y se fabrica el material compuesto correctamente. La mayor parte de los materiales compuestos están formados por dos o más fases, una matriz continua que rodea a las demás fases que se denominan fases dispersas y que se clasifican en función de su microestructura o geometría. La microestructura de la fase dispersa incluye la forma, tamaño, distribución y orientación de las partículas.

Cuando se dan las proporciones de material matriz y material disperso hay que distinguir claramente entre relaciones en peso o en volumen ya que las densidades de estas fases pueden ser muy diferentes.

Basándose en el criterio de la naturaleza de la microestructura de la fase dispersa, para la clasificación de los materiales compuestos se pueden establecer tres grandes grupos:

- Compuestos reforzados con partículas.
- Compuestos reforzados con fibras.
- Compuestos estructurales.

A su vez, estos grupos presentan subdivisiones. Los materiales compuestos estructurales presentan una combinación de materiales homogéneos y las propiedades dependen más de la geometría del diseño de los elementos estructurales que de la naturaleza de los materiales constituyentes. Estas capas de materiales suelen ser laminares o sándwiches y son muy anisotrópicos.

Existe otra clasificación de materiales compuestos en función de la naturaleza de la matriz:

- Materiales compuestos de matriz metálica (MMC).
- Materiales compuestos de matriz cerámica (CMC).
- Materiales compuestos de matriz polimérica (PMC).

Dependiendo del tipo de refuerzo, los materiales compuestos los podemos clasificar en:

- Compuestos particulados: aquellos en los que se emplean partículas en una matriz.
- Compuestos fibrosos: se emplean fibras en una matriz.
- Compuestos laminados: se colocan capas o láminas alternadas de las fases.

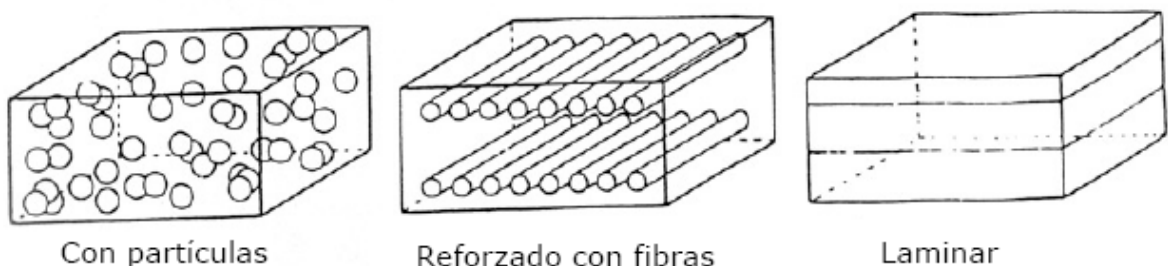


Figura 11.- Esquema comparativo de los tres tipos de materiales compuestos.

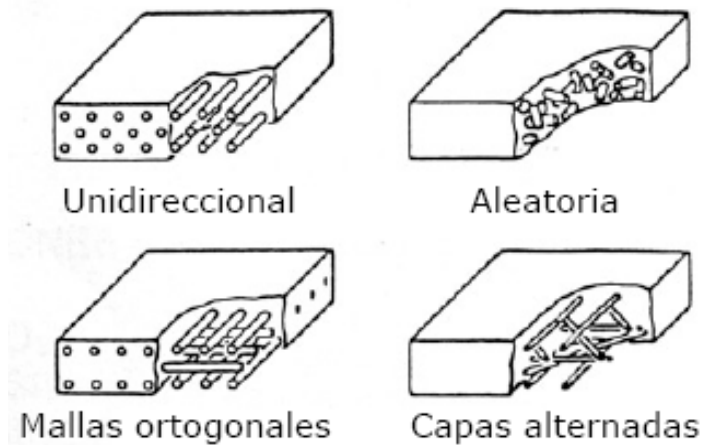


Figura 12.- Esquema de la orientación o disposición de las fibras de refuerzo

En una primera aproximación, haciendo uso de la bibliografía más reciente, encontramos que se han realizado estudios con fibras continuas de carburo de silicio y con óxidos de aluminio. Aunque las prestaciones mecánicas son excelentes (del orden del doble, con una adición del 20% de SiC), el alto coste de estos productos hace que, en nuestro caso, sean descartados. Limitándose su aplicación para intercambiadores de calor y sistemas de protección térmicos.

Nos planteamos pues, unos refuerzos de menor coste, y que se puedan incorporar en la cadena de fabricación sin grandes ajustes.

Con el fin de acometer otro grave problema, como es el del medio ambiente, nos planteamos el empleo de aluminio en forma de partículas, tras la trituración de residuos de este material. Analizando los puntos de fusión del Aluminio (660 °C), nos encontramos de incompatibilidad con la matriz y con posibles problemas de difusión en la interfase, por lo tanto, se deshecha su empleo como refuerzo de nuestra matriz.

### TIPO DE REFUERZO

	POLIMÉRICO	METÁLICO	CERÁMICO
TIPO DE MATRIZ: CERÁMICA	Incompatible por las temperaturas de cocción de la matriz cerámica.	Posible, dependiendo de los metales empleados y su temperatura de fusión.	El más adecuado por su "compatibilidad", pero las mejoras son limitadas.
VENTAJAS	BAJO COSTE	BAJO COSTE Y MEJORAS MECÁNICAS NOTABLES	COMPATIBILIDAD Y COSTE REDUCIDO
INCOVENIENTES	MUY BAJA TEMPERATURA DE FUSIÓN	PROBLEMAS DE OXIDACIÓN Y DE DIFUSIÓN DEL METAL	MEJORAS MECÁNICAS DE TÉRMINO MEDIO

Tabla nº 5.- Cuadro estudio de tipos de refuerzo para matriz cerámica

Partimos pues de nuestra matriz cerámica y un elemento metálico, fácil de conseguir como el acero (dramix®). Filamentos de acero (alambres estirados en frío, con los extremos conformados), empleado en refuerzos de hormigón para piezas que deben mejorar sus prestaciones mecánicas, como por ejemplo en el caso de las soleras.

Dadas las similitudes entre la forma de trabajo de una solera y una baldosa, diseñamos unas pruebas preliminares para obtener datos sobre la conveniencia de nuestro refuerzo.



Fotografía nº 5: muestra de las materias primas para el primer estudio



Fotografía nº 6: muestra de las fibras metálicas (dramix©)empleadas como refuerzos



Fotografía nº 7: aspecto de las muestras preparadas previamente a su cocción.



### 5.3.- Estudio de compatibilidad.

Con el fin de poder realizar un estudio de compatibilidad previo a la preparación de las baldosas, se diseñó unos ensayos previos siguiendo los siguientes parámetros:

- Dado el tamaño del molde (y con ello el de las probetas definitivas), se cortan las piezas metálicas hasta reducirlas al tamaño adecuado.
- Se decide la dosificación a emplear: 3 gramos de arcilla y 0'5 gramos de fibras metálicas.
- Se alternan capas de arcilla y fibras, según consta en la tabla siguiente:

MUESTRA	COMPOSICIÓN POR CAPAS	PRENSADO
Muestra n° 1	arcilla-fibra-arcilla-fibra-arcilla	10 Toneladas
Muestra n° 2	arcilla-arcilla-fibra-arcilla	10 Toneladas
Muestra n° 3	arcilla-arcilla-fibra-arcilla	15 Toneladas
Muestra n° 4	arcilla-arcilla-fibra-arcilla	12 Toneladas
Muestra n° 5	arcilla-arcilla-fibra-arcilla	10 Toneladas
Muestra n° 6	arcilla-fibra-arcilla-fibra-arcilla	15 Toneladas

Tabla n° 6.- Estudio previo de fibras metálicas.

- Para evitar problemas de oxidación de los elementos metálicos, la primera y última capa de cada probeta siempre ha de ser arcilla.
- Excepto en las muestras n° 1 y n° 2 (donde el porcentaje de fibra fue aleatorio), la cantidad de fibra siempre fue 14 unidades, en peso, 0'5 gr.

Desarrollo operativo de la preparación de muestras:

- Pesado de polvos. Conocida la probeta en la cual se iban a prensar los polvos, y conocida la densidad de los mismos, se realizaron los cálculos pertinentes para obtener probetas de 8-10 mm de espesor.
- Prensado. La operación de prensado consiste en la compresión mecánica de los polvos. Para la fabricación de las muestras se usó una prensa hidráulica manual, aplicando la presión, que en cada caso se estipuló, como se indica en la tabla anterior.



Figura 13. Prensa hidráulica manual.

- c) Cocción. La cocción de las probetas prensadas se realizó en un horno a 900°C. El tiempo de cocción fue de 2 horas.



Figura 14.- Horno de laboratorio, temperatura de proceso de hasta 1300°C.

Tras realizarse la cocción de las piezas, se han podido detectar “defectos” en ellas. El metal fundido había llegado a la superficie de algunas de las piezas, formando “burbujas” de metal solidificado.

Para poder determinar realmente lo que ha ocurrido, analizamos las muestras con el microscopio electrónico de barrido (SEM), cuyos resultados comentaremos más adelante.

- d) Corte. Tras la cocción, y una vez lo suficientemente frías las muestras, se procedió al corte de cada una de ellas, mediante un disco de corte, con el fin de obtener una visión clara de la sección de las mismas.



- e) Embutición de las muestras. Después del corte, se somete a una mitad de cada muestra, a un proceso de embutición con resinas y su posterior polimerización, para poder realizar la preparación cristalográfica correspondiente.



Fotografía n° 8: Preparación de la embutición de las muestras previamente a su preparación.



Fotografía n° 9: Aspecto de las muestras preparadas y clasificadas.

- f) Estudio metalográfico con el SEM. Una vez preparadas las muestras, tras su desbastado y pulido con distintas lijas, se les somete a sólo dos de las muestras al microscópico electrónico de barrido. Del estudio metalográfico, se aportan aquellas capturas más definatorias.

La microscopia electrónica de barrido (SEM o MEB). El análisis de microsonda electrónica es un método instrumental no destructivo para el análisis cualitativo y cuantitativo de elementos químicos basado en la medida de las longitudes de onda y las intensidades de sus espectros de rayos X característicos excitados por un haz electrónico con un diámetro de  $1\mu\text{m}$ .

La muestra se incide con un haz de electrones y se emiten fotones (Rayos X característicos), pero también son emitidos electrones secundarios y electrones retrodispersados.

En el análisis cuantitativo de elementos químicos que se obtiene con este método, en algunas ocasiones, aparecen elementos que no deberían, esto se debe a que los electrones no solo atraviesan una capa, sino que depende con la intensidad con la que interaccionen con la superficie de la muestra pueden llegar a traspasar varias capas. Y la composición de cada una de estas capas se puede leer en el espectro.

### Muestra n° 1

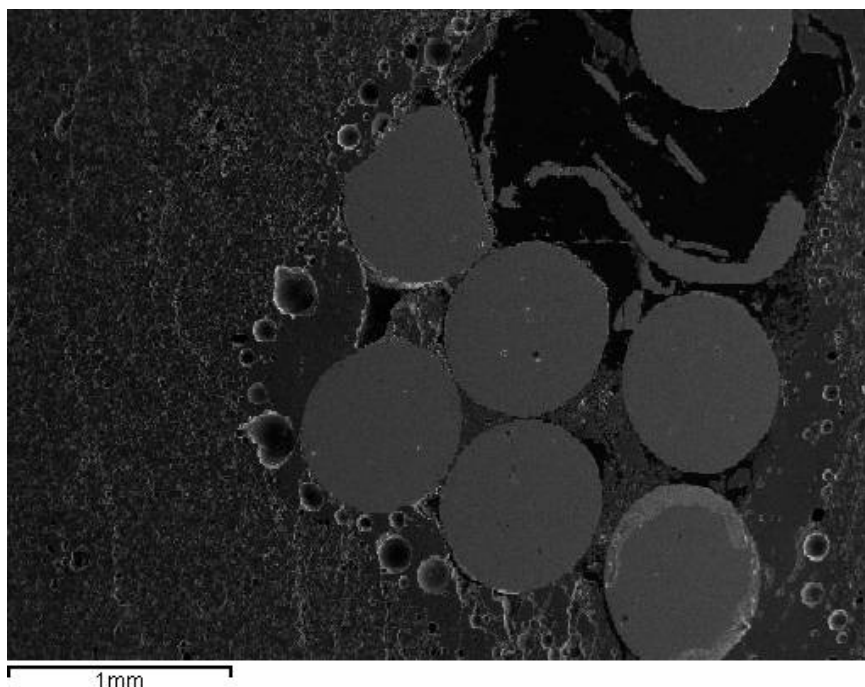


Figura 15.- Magnificación 30X. Cerámica con fibras metálicas (muestra n°1)

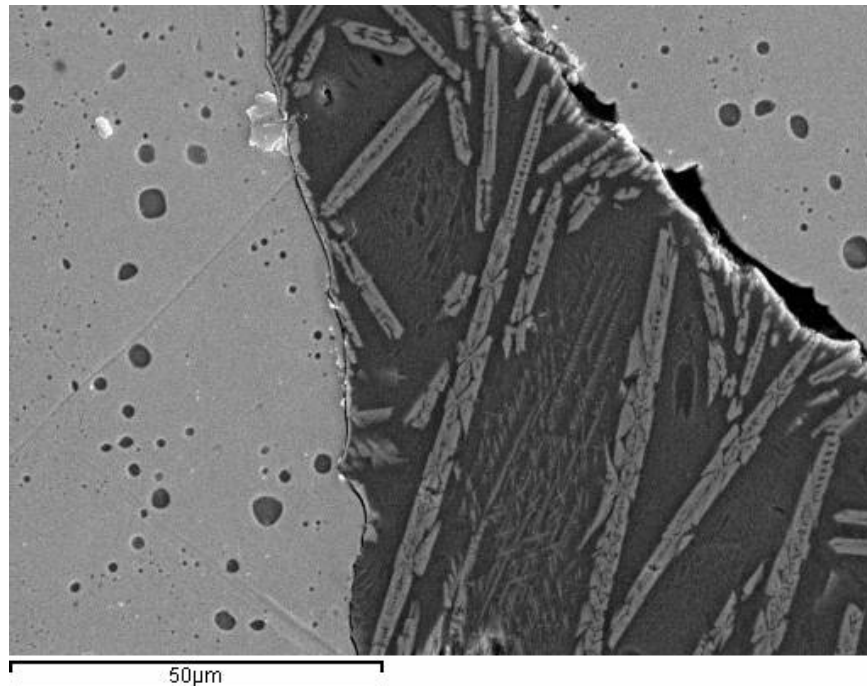


Figura 16.- Magnificación 1000X (muestra n°1)

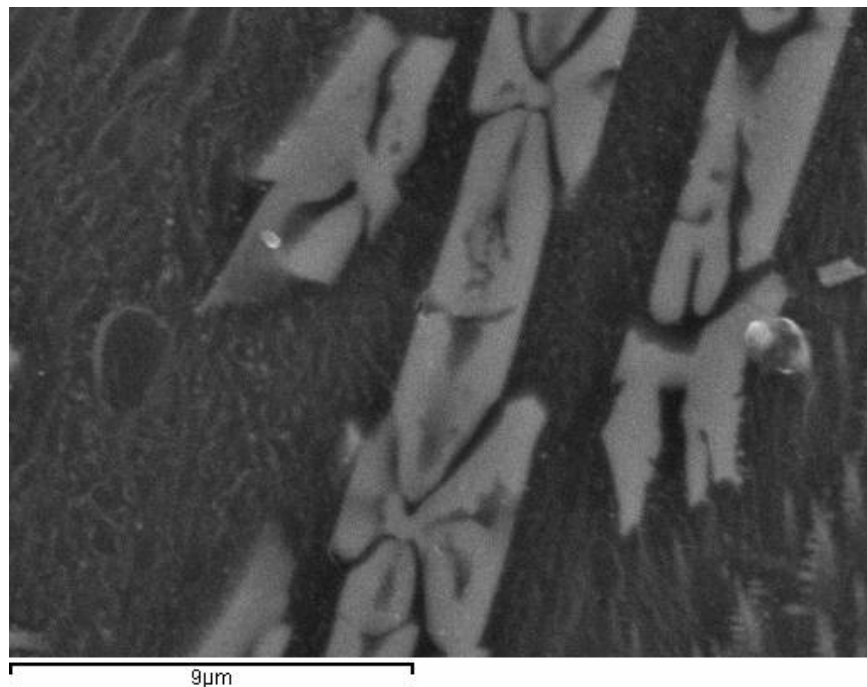


Figura 17.- Magnificación 6000X (muestra n°1)

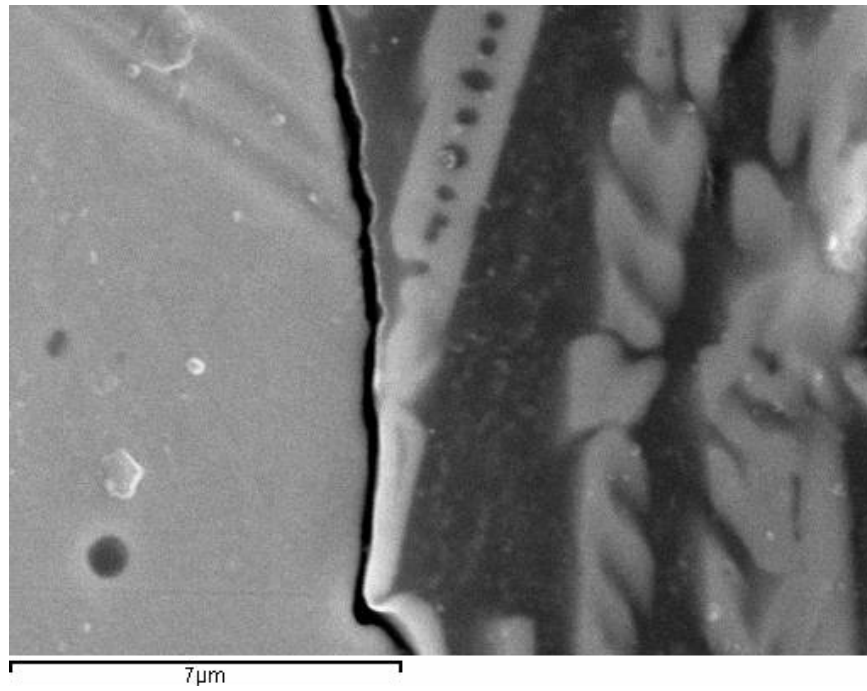


Figura 18.- Magnificación 8000X (grieta)

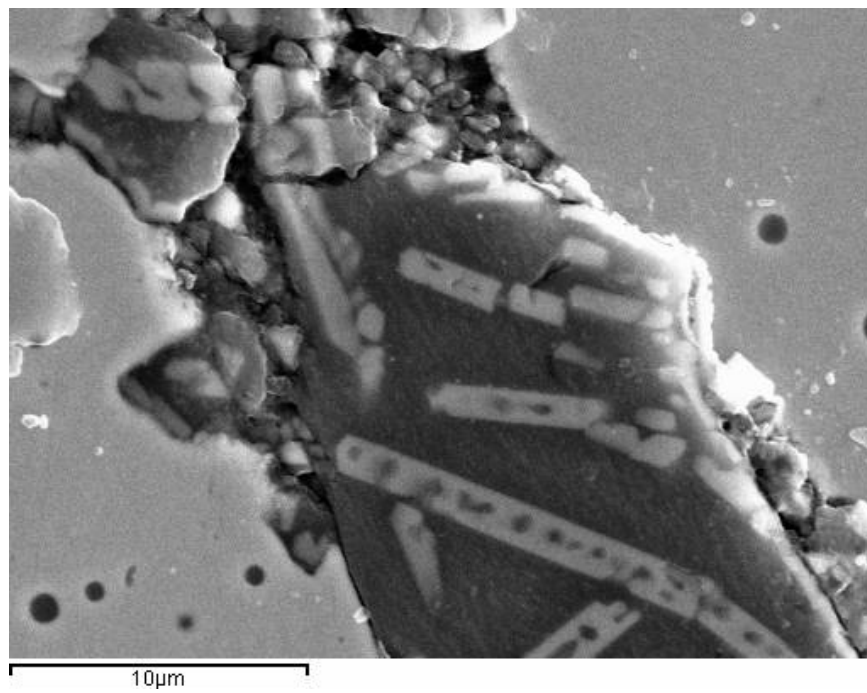


Figura 19.- Magnificación 4000X

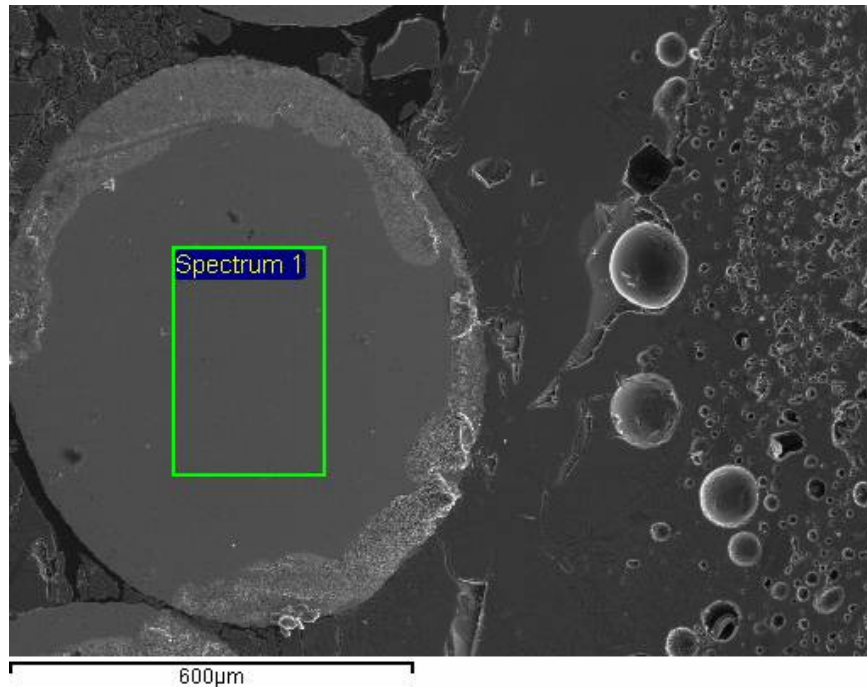


Figura 20.- Imagen espectro 1 (fibra de acero).

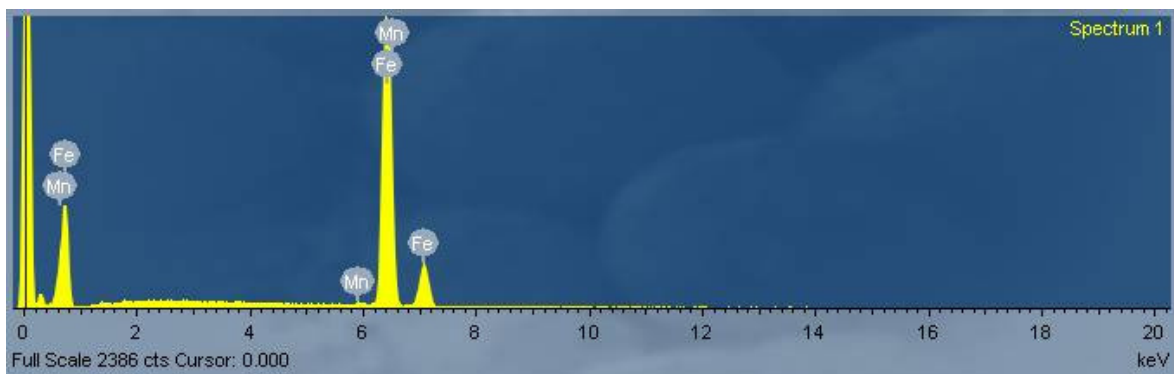


Figura 21.- Análisis de composición del espectro 1.

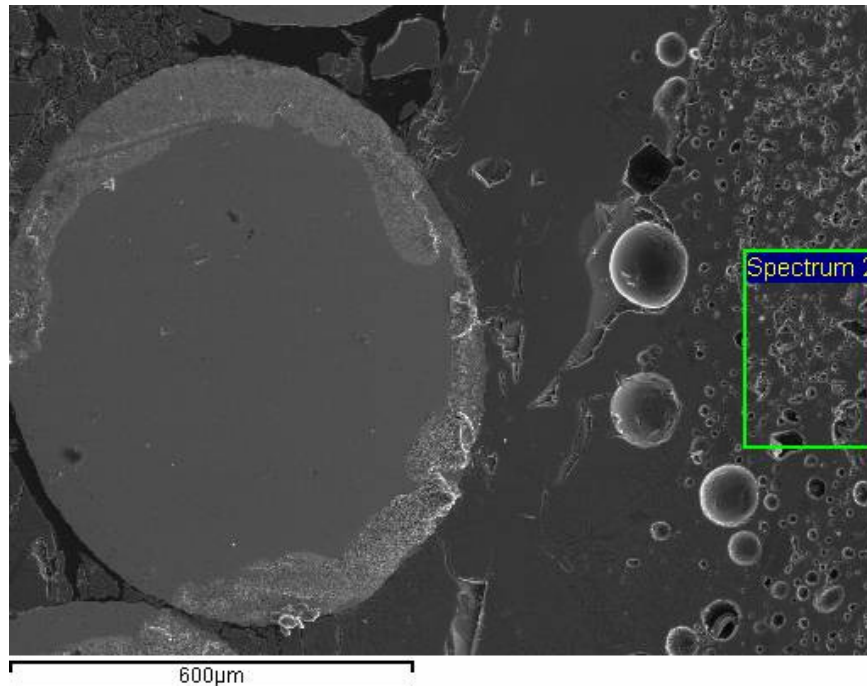


Figura 22.- Imagen espectro 2 (cerámica).

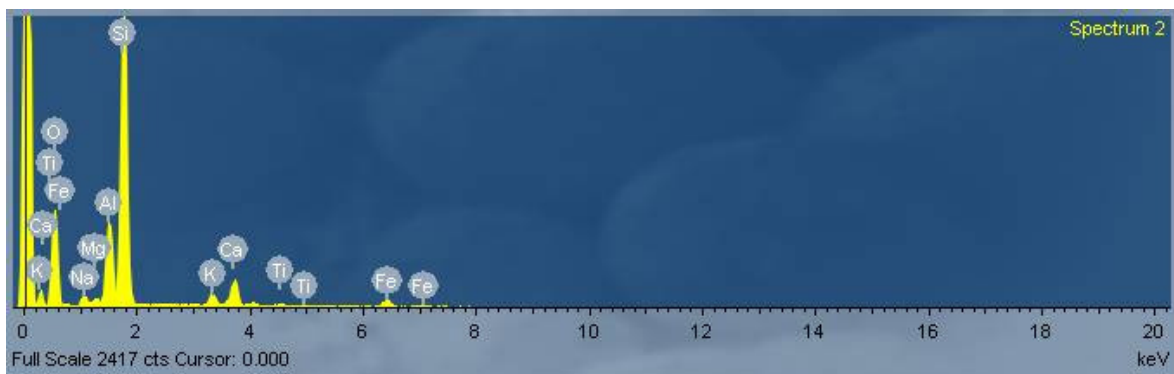


Figura 23.- Análisis de composición del espectro 2.

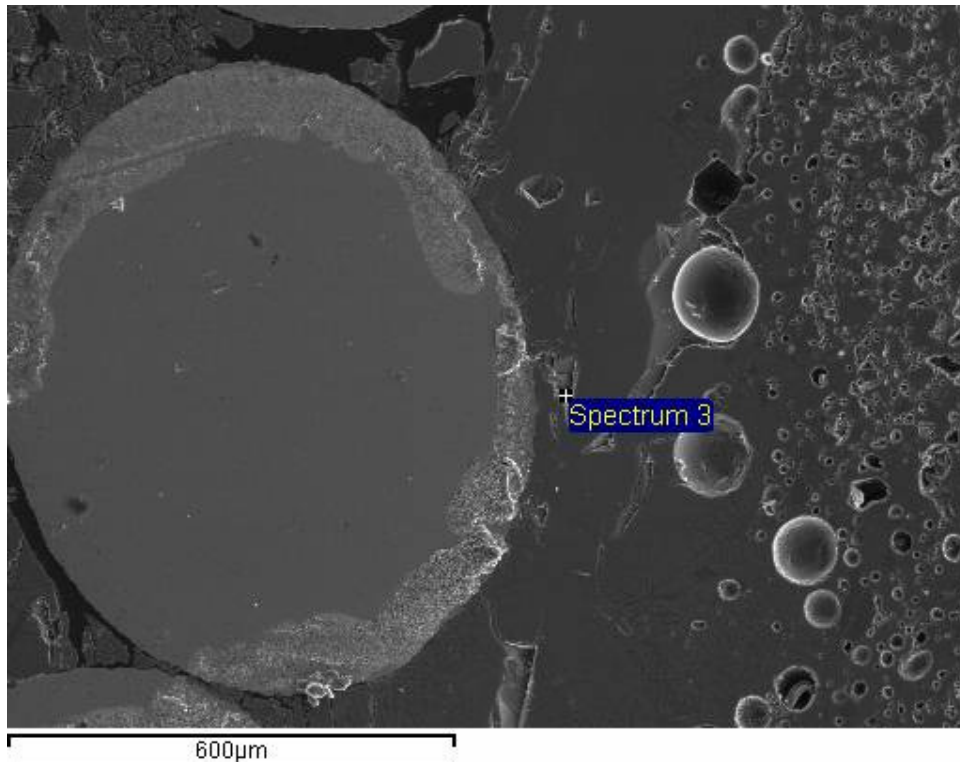


Figura 24.- Imagen espectro 3 (zona de difusión).

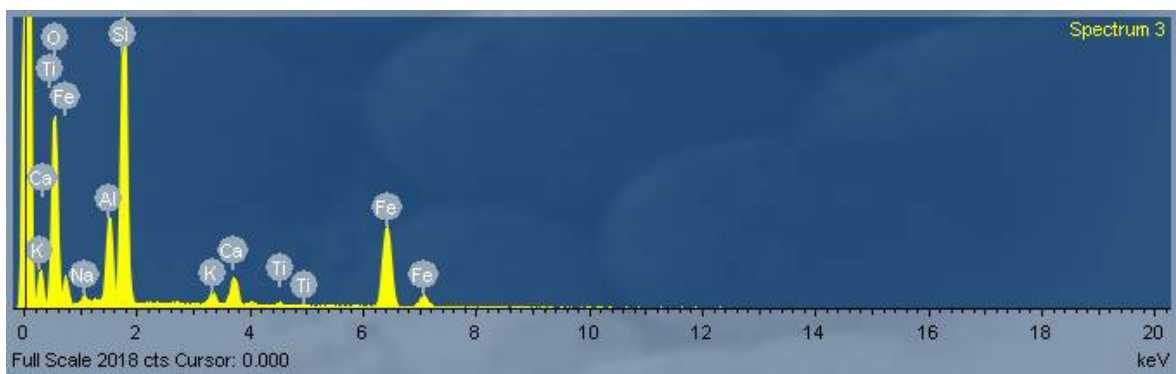


Figura 25.- Análisis de composición del espectro 3.

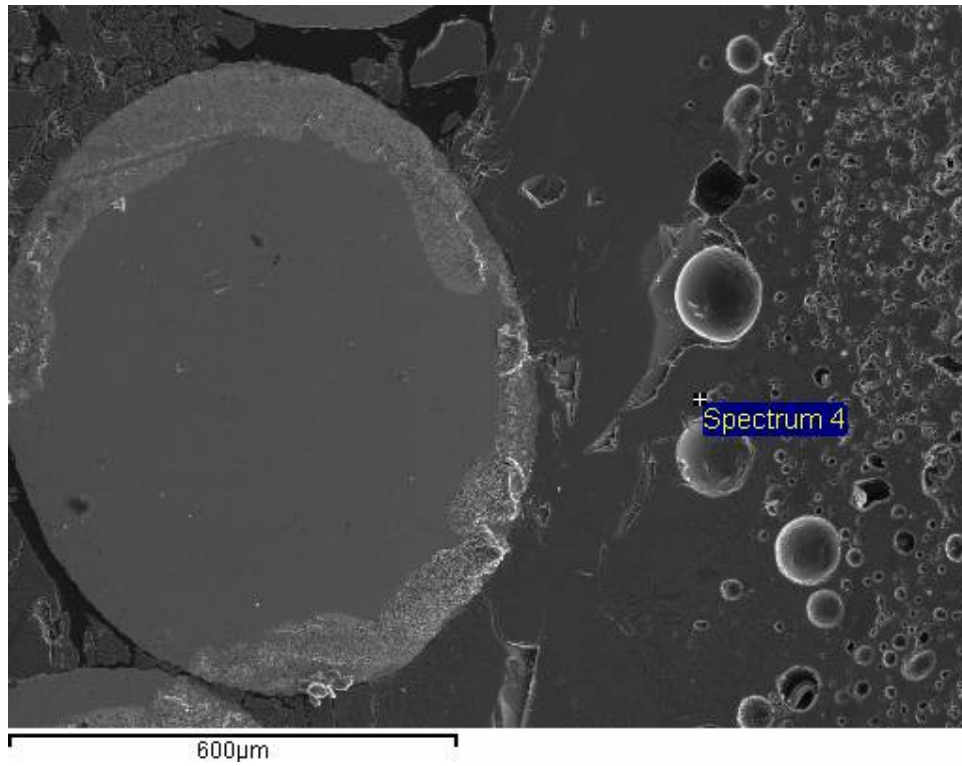


Figura 26.- Imagen espectro 4 (zona de difusión).

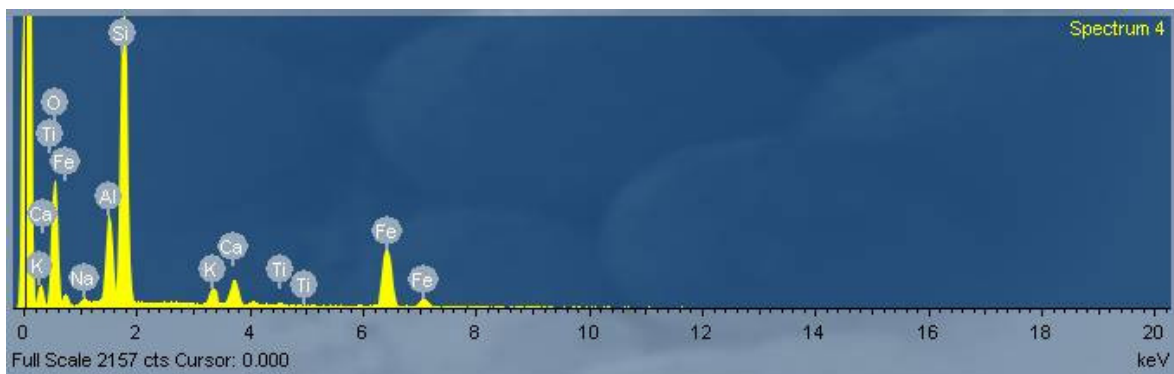


Figura 27.- Análisis de composición del espectro 4.



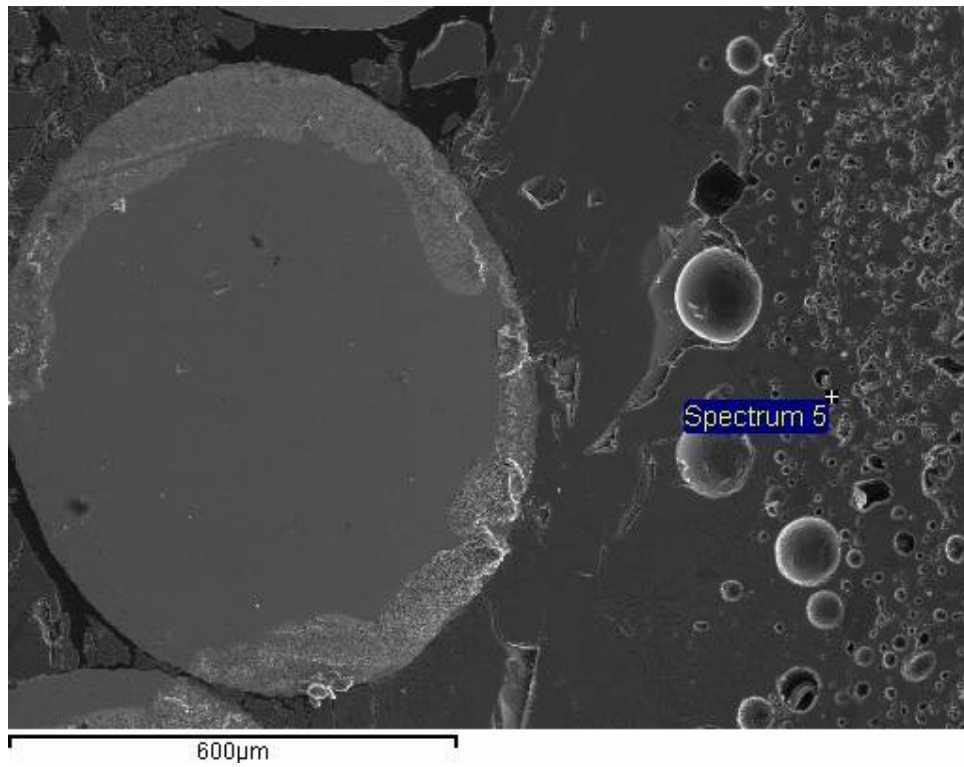


Figura 28.- Imagen espectro 5 (cerámica).

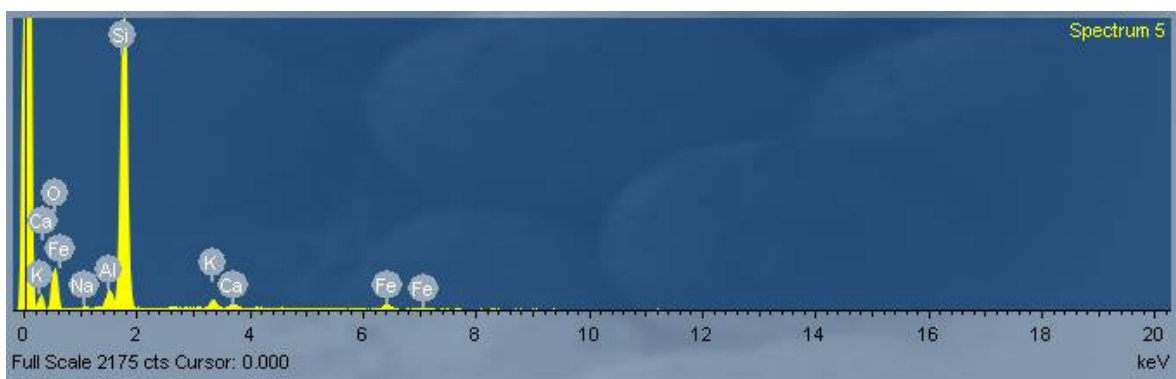


Figura 29.- Análisis de composición del espectro 5.

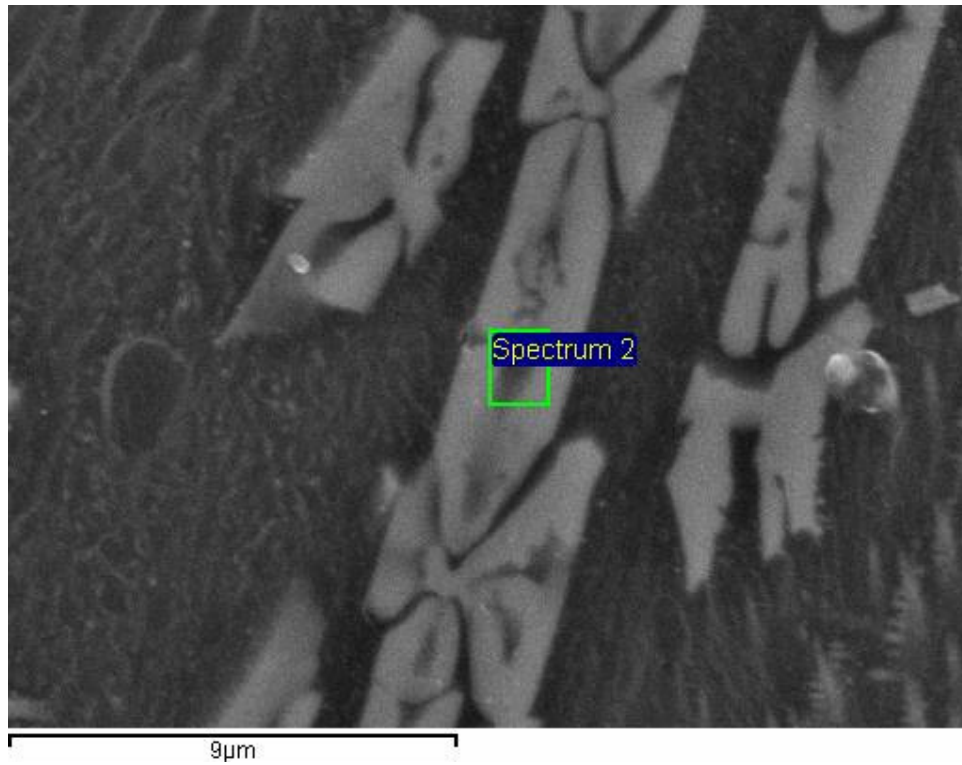


Figura 30.- Imagen espectro difusión.

Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
Number of iterations = 3

Standard :

O SiO<sub>2</sub> 1-jun-1999 12:00 AM  
Al Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1-jun-1999 12:00 AM  
Si SiO<sub>2</sub> 1-jun-1999 12:00 AM  
Ca Wollastonite 1-jun-1999 12:00 AM  
Fe Fe 1-jun-1999 12:00 AM

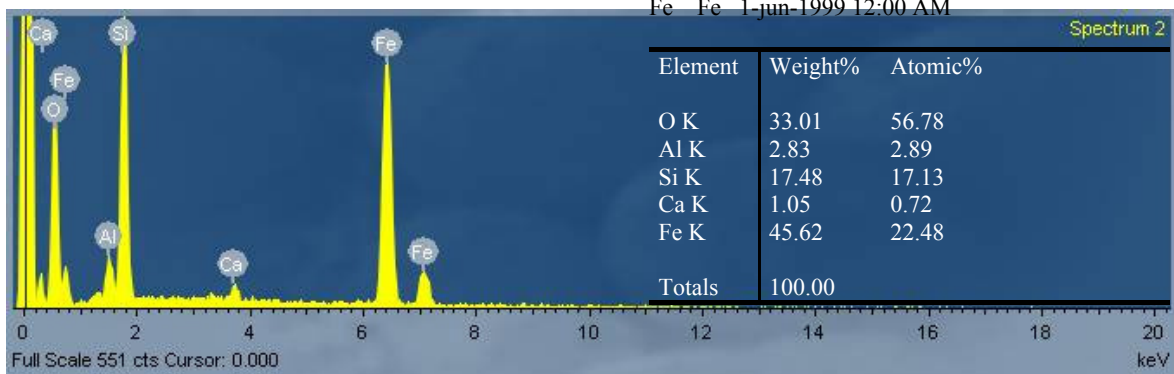


Figura 31.- Análisis de composición del espectro difusión.

Muestra n° 2

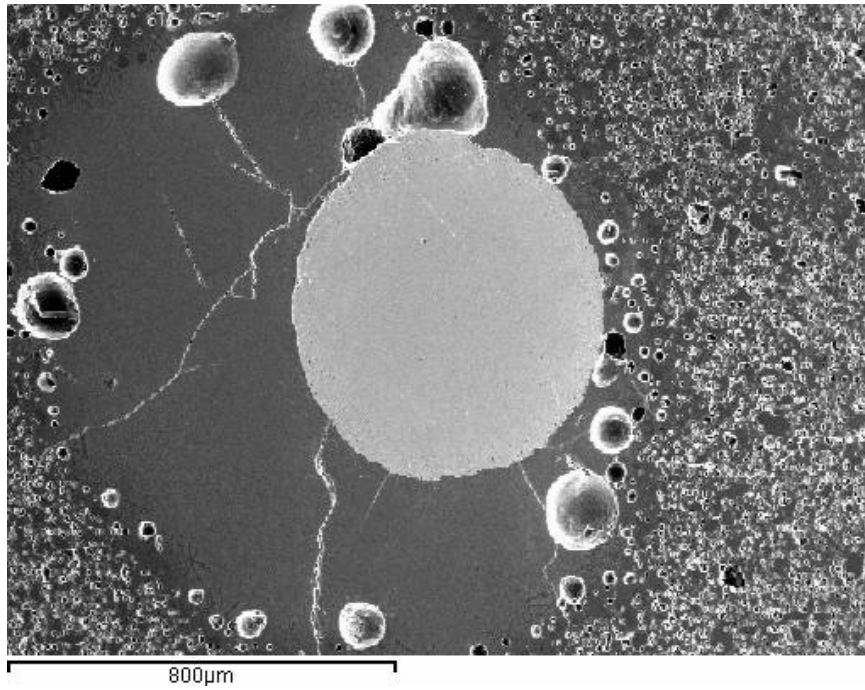


Figura 32.- Magnificación 30X (zona de fibra metálica)

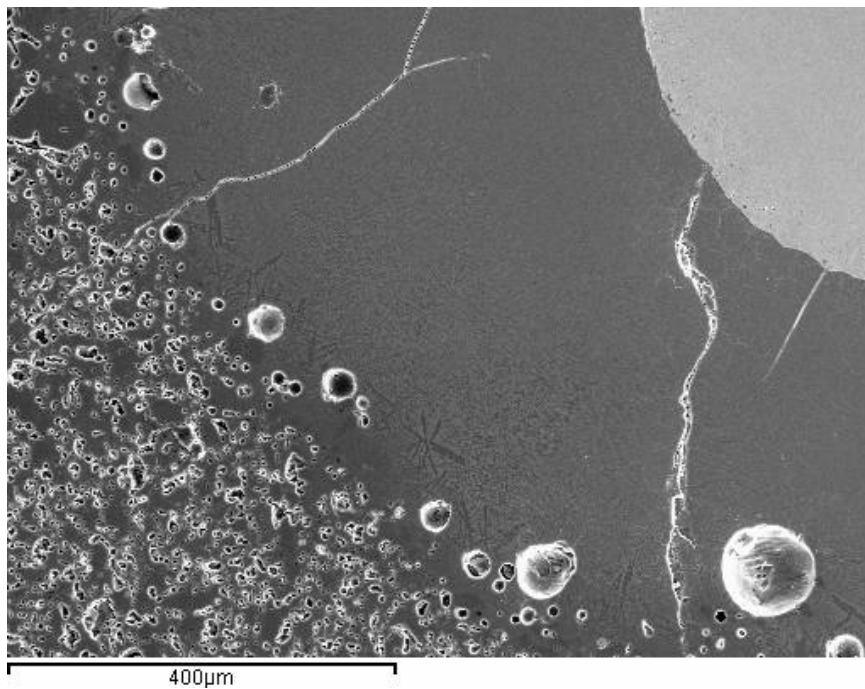


Figura 33.- Magnificación 130X

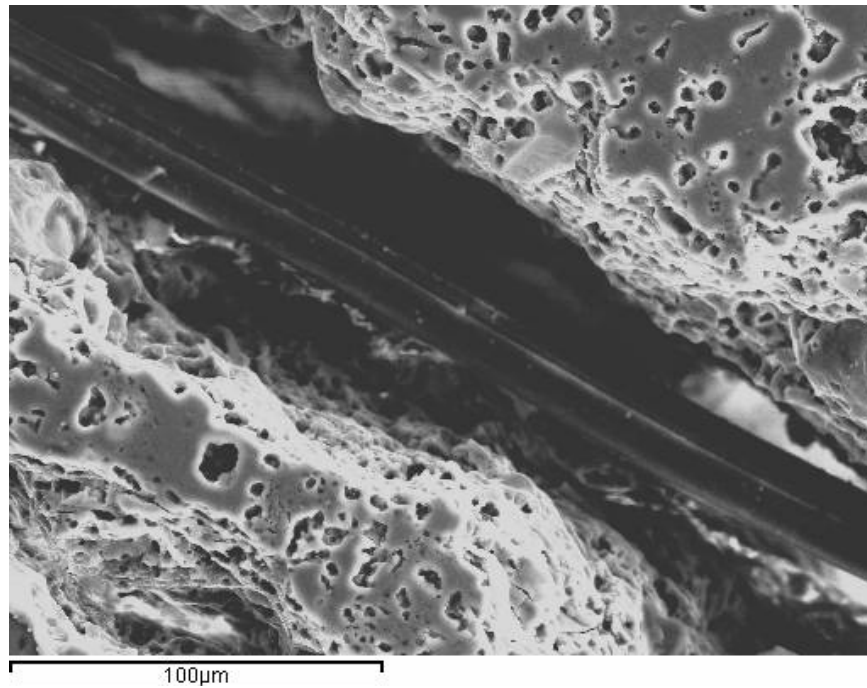


Figura 34.- Magnificación 500X

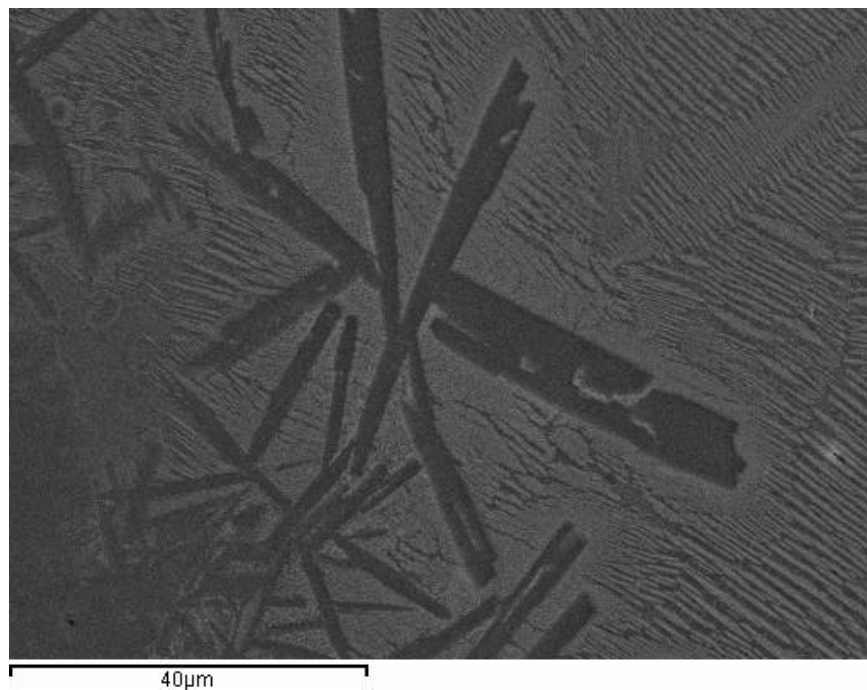


Figura 35.- Magnificación 1200X

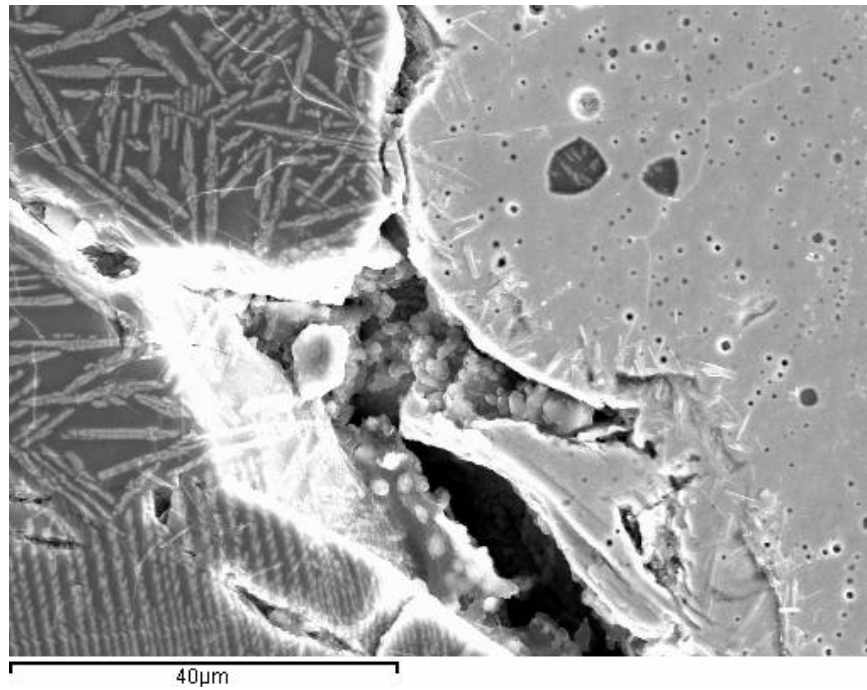


Figura 36.- Magnificación 1300X

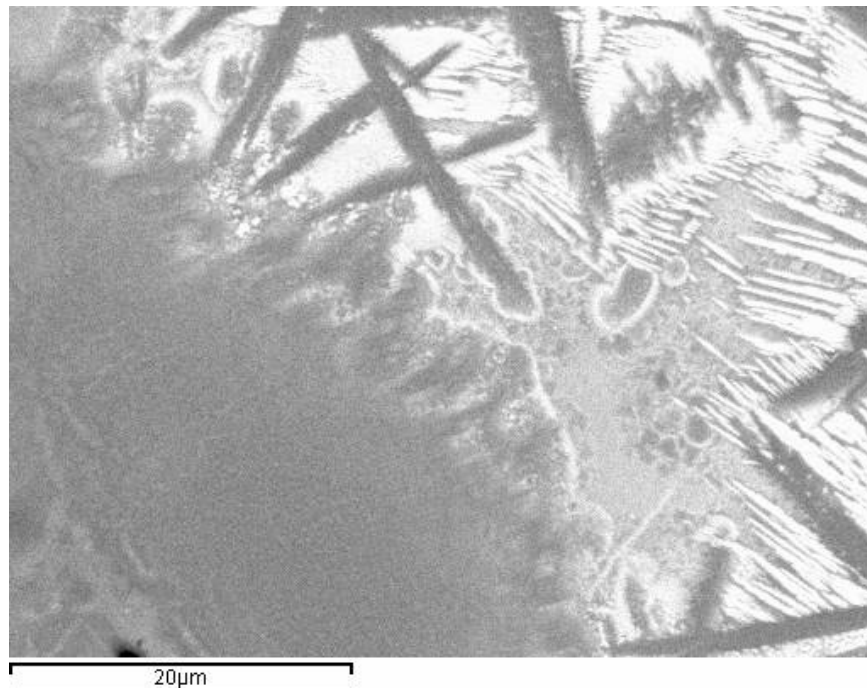


Figura 37.- Magnificación 3200X retrodispersados

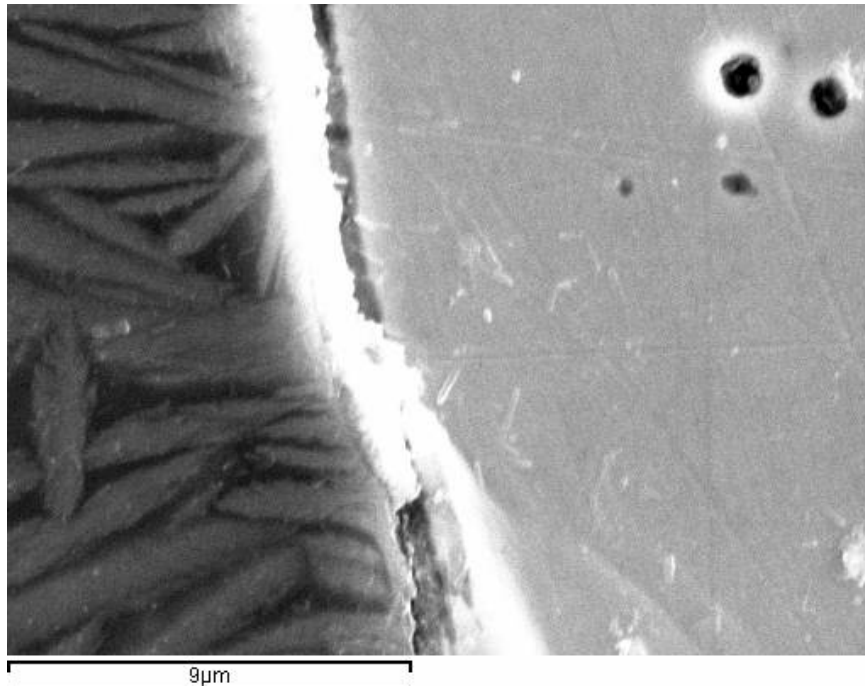


Figura 38.- Magnificación 6000X

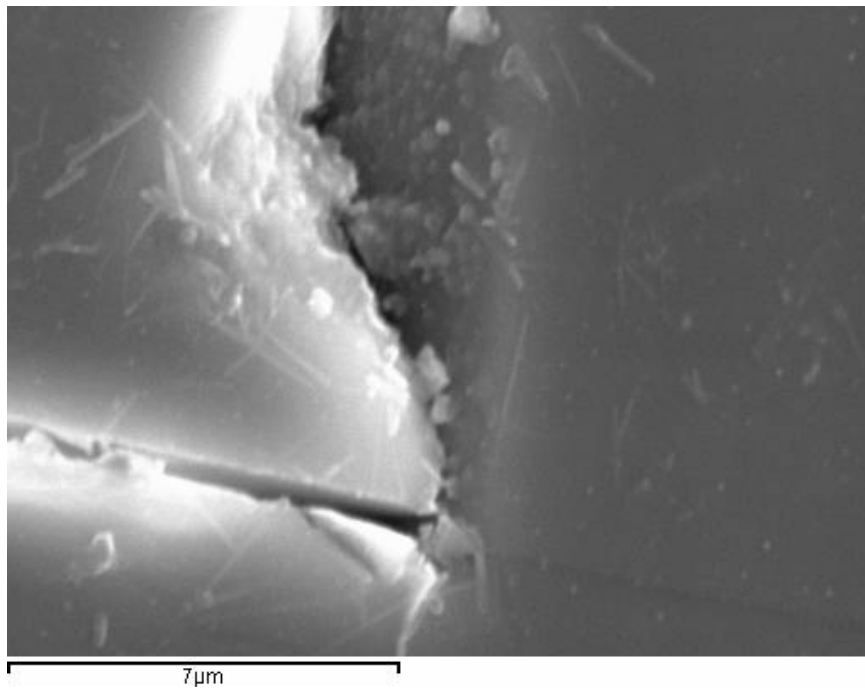


Figura 39.- Magnificación 7500X (grieta)

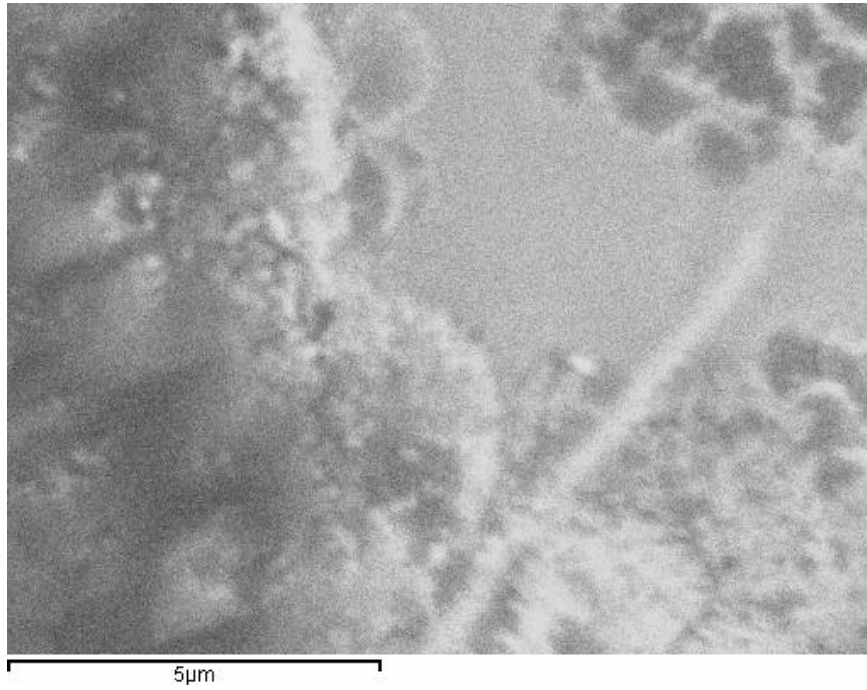


Figura 40.- Magnificación 10000X retrodispersados

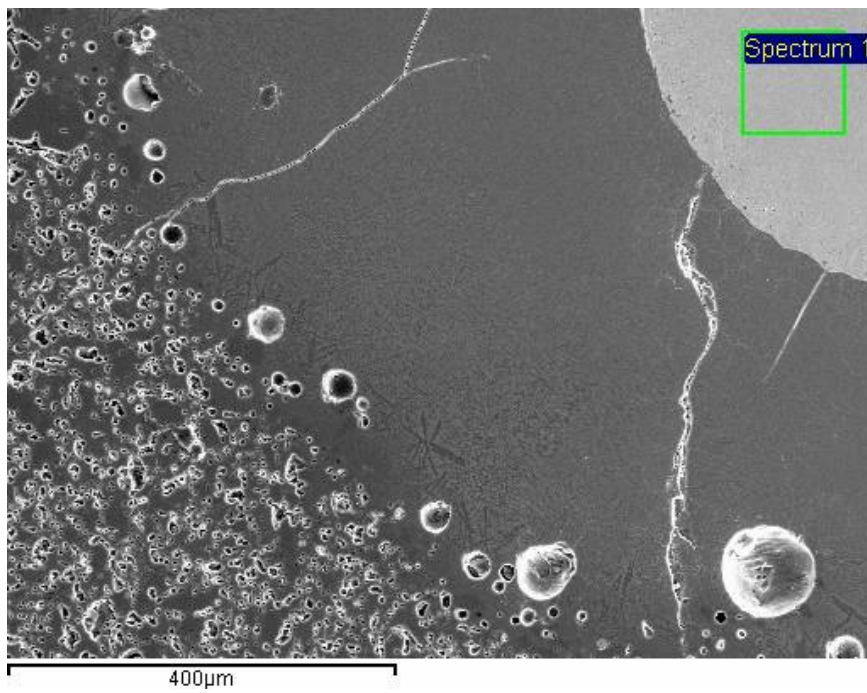


Figura 41.- Imagen espectro 1

cermicas reforzadas con metal

25/07/2009 11:31:10

Project: cermicas reforzadas con metal  
 Owner: Administrador  
 Site: Site of Interest 4

Sample: Sample 2  
 Type: Default  
 ID:

Spectrum processing :  
 No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
 Number of iterations = 1

Standard :  
 Mn Mn 1-jun-1999 12:00 AM  
 Fe Fe 1-jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Mn K	0.71	0.72
Fe K	99.29	99.28
Totals	100.00	

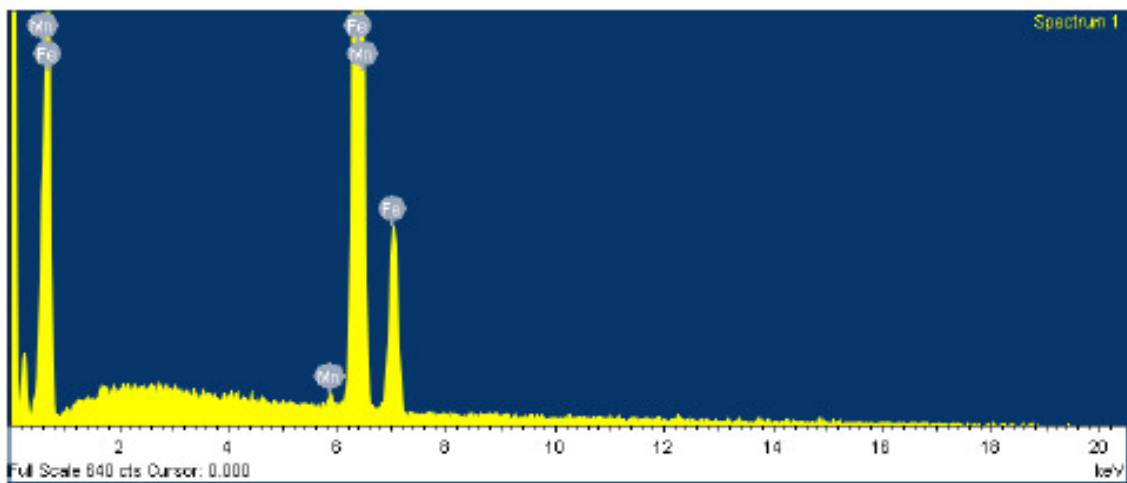
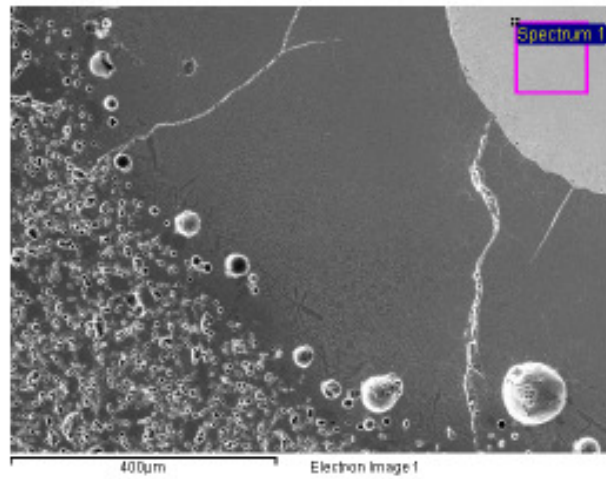


Figura 42.- Reporter del espectro 1 (zona de la fibra metálica), muestra n° 2



**cermicas reforzadas con metal** 22/07/2009 11:34:19

Project: cermicas reforzadas con metal  
 Owner: Administrador  
 Site: Site of Interest 4

Sample: Sample 2  
 Type: Default  
 ID:

Spectrum processing :  
 No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
 Number of iterations = 3

Standard :  
 O SiO2 1-jun-1999 12:00 AM  
 Na Albite 1-jun-1999 12:00 AM  
 Al Al2O3 1-jun-1999 12:00 AM  
 Si SiO2 1-jun-1999 12:00 AM  
 K MAD-10 Feldspar 1-jun-1999 12:00 AM  
 Ca Wollastonite 1-jun-1999 12:00 AM  
 Ti Ti 1-jun-1999 12:00 AM  
 Fe Fe 1-jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
O K	40.26	59.82
Na K	1.17	1.21
Al K	6.64	5.85
Si K	24.45	20.69
K K	1.08	0.66
Ca K	3.01	1.78
Ti K	0.39	0.20
Fe K	23.00	9.79
Totals	100.00	

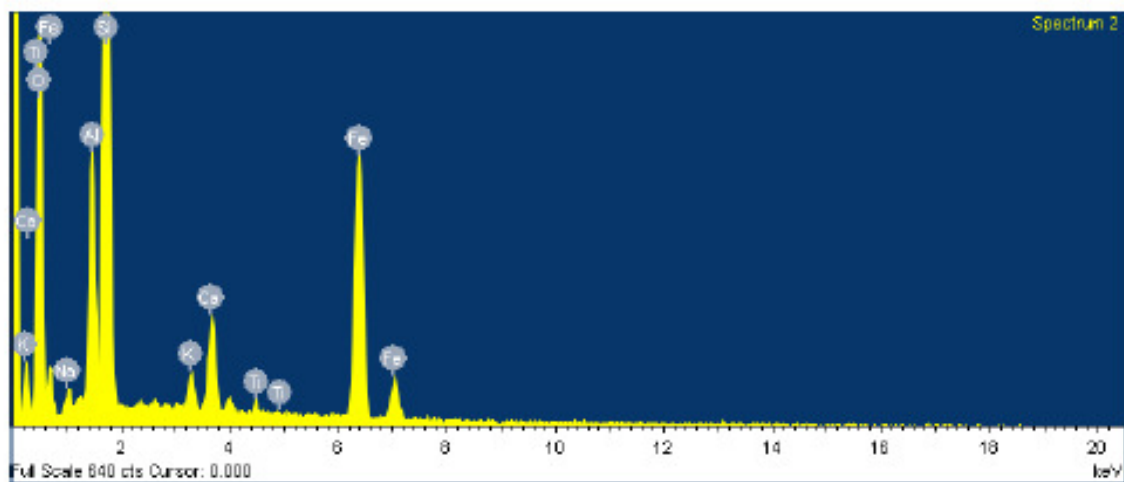
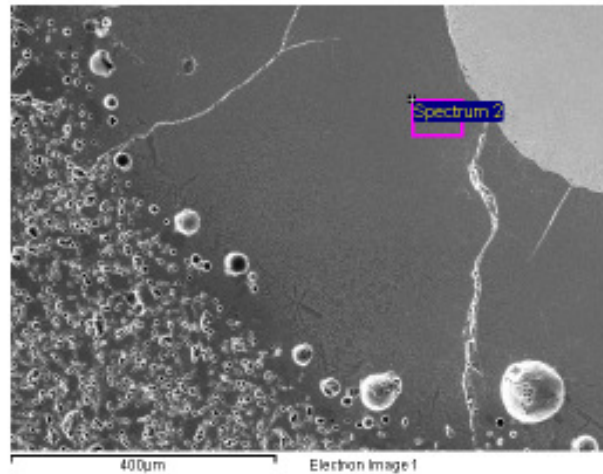


Figura 43.- Reporter del espectro 2 (zona de difusión), muestra n° 2

cermicas reforzadas con metal

22/07/2009 11:36:59

Project: cermicas reforzadas con metal  
 Owner: Administrador  
 Site: Site of Interest 4

Sample: Sample 2  
 Type: Default  
 ID:

Spectrum processing :  
 No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
 Number of iterations = 3

Standard :  
 O SiO2 1-jun-1999 12:00 AM  
 Na Albite 1-jun-1999 12:00 AM  
 Al Al2O3 1-jun-1999 12:00 AM  
 Si SiO2 1-jun-1999 12:00 AM  
 K MAD-10 Feldspar 1-jun-1999 12:00 AM  
 Ca Wollastonite 1-jun-1999 12:00 AM  
 Ti Ti 1-jun-1999 12:00 AM  
 Fe Fe 1-jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
O K	40.64	60.25
Na K	1.01	1.04
Al K	6.74	5.93
Si K	24.16	20.40
K K	1.01	0.61
Ca K	3.02	1.79
Ti K	0.38	0.19
Fe K	23.06	9.79
Totals	100.00	

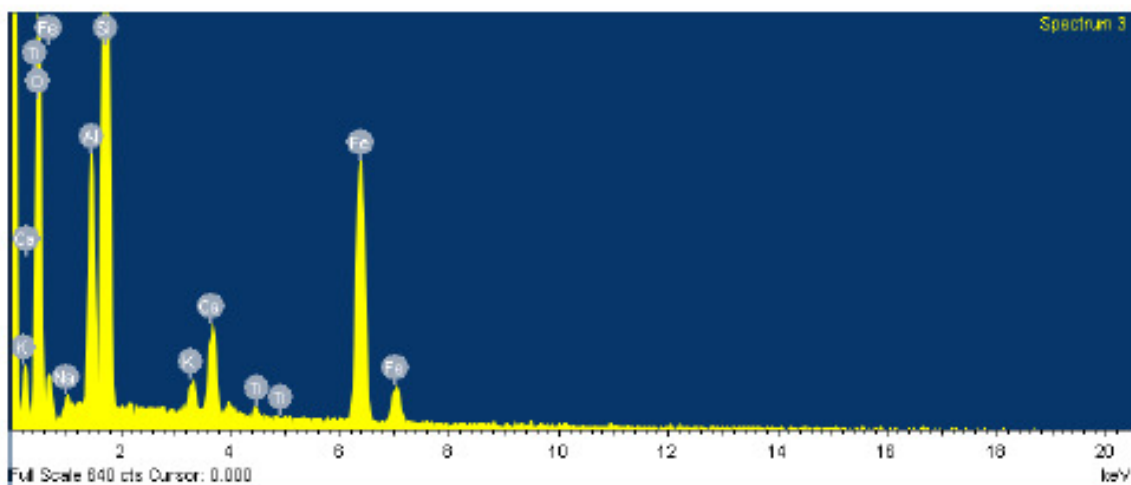
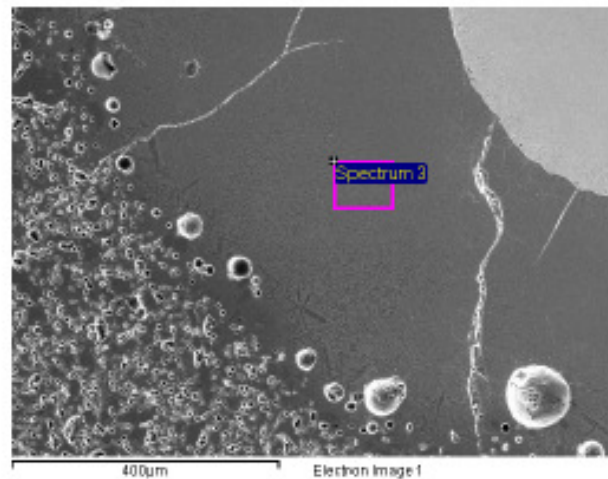


Figura 44.- Reporter del espectro 3 (zona de difusión), muestra n° 2

cermicas reforzadas con metal

22/07/2009 11:39:25

Project: cermicas reforzadas con metal  
 Owner: Administrador  
 Site: Site of Interest 4

Sample: Sample 2  
 Type: Default  
 ID:

Spectrum processing :  
 Peak possibly omitted : 4.525 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
 Number of iterations = 3

Standard :  
 O SiO2 1-jun-1999 12:00 AM  
 Na Albite 1-jun-1999 12:00 AM  
 Al Al2O3 1-jun-1999 12:00 AM  
 Si SiO2 1-jun-1999 12:00 AM  
 K MAD-10 Feldspar 1-jun-1999 12:00 AM  
 Ca Wollastonite 1-jun-1999 12:00 AM  
 Fe Fe 1-jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
O K	40.11	59.27
Na K	1.29	1.32
Al K	7.12	6.24
Si K	25.38	21.36
K K	1.26	0.76
Ca K	3.18	1.88
Fe K	21.67	9.17
Totals	100.00	

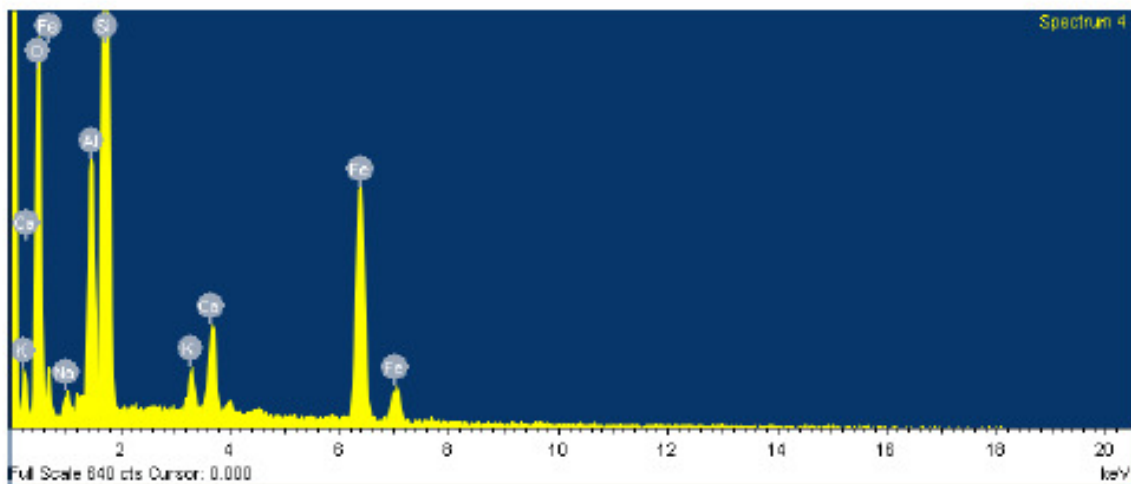
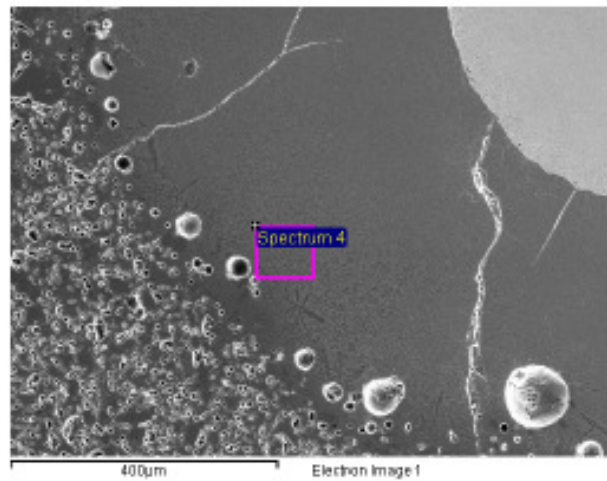


Figura 45.- Reporter del espectro 4 (zona de difusión), muestra nº 2

**cermicas reforzadas con metal** 22/07/2009 11:48:37

Project: cermicas reforzadas con metal Owner: Administrador Site: Site of Interest 4	Sample: Sample 2 Type: Default ID:
--	--

Spectrum processing :  
 No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
 Number of iterations = 4

Standard :  
 O SiO2 1-jun-1999 12:00 AM  
 Na Albite 1-jun-1999 12:00 AM  
 Al Al2O3 1-jun-1999 12:00 AM  
 Si SiO2 1-jun-1999 12:00 AM  
 K MAD-10 Feldspar 1-jun-1999 12:00 AM  
 Ca Wollastonite 1-jun-1999 12:00 AM  
 Ti Ti 1-jun-1999 12:00 AM  
 Fe Fe 1-jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
O K	49.28	63.77
Na K	1.68	1.51
Al K	8.18	6.28
Si K	33.88	24.98
K K	1.65	0.87
Ca K	4.01	2.07
Ti K	0.46	0.20
Fe K	0.86	0.32
Totals	100.00	

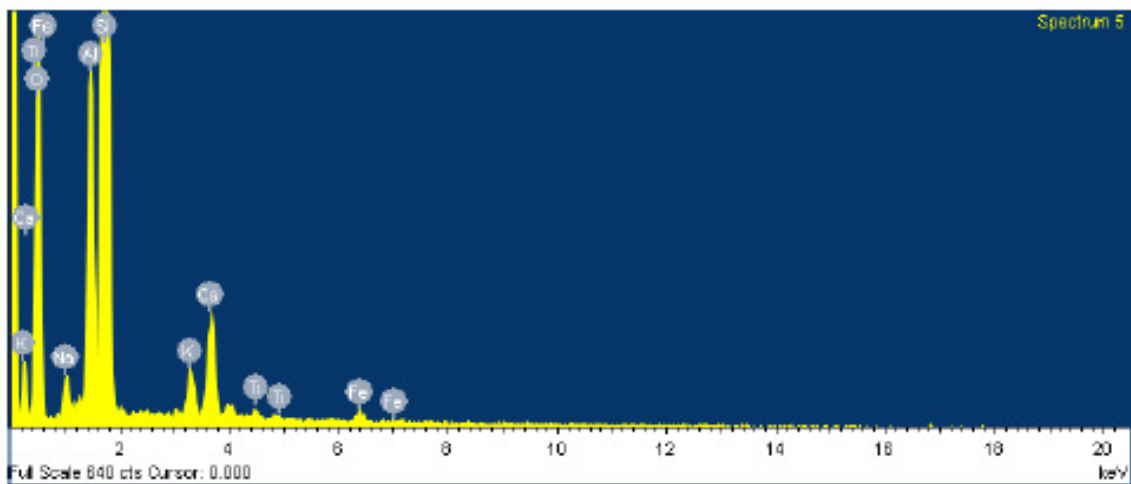
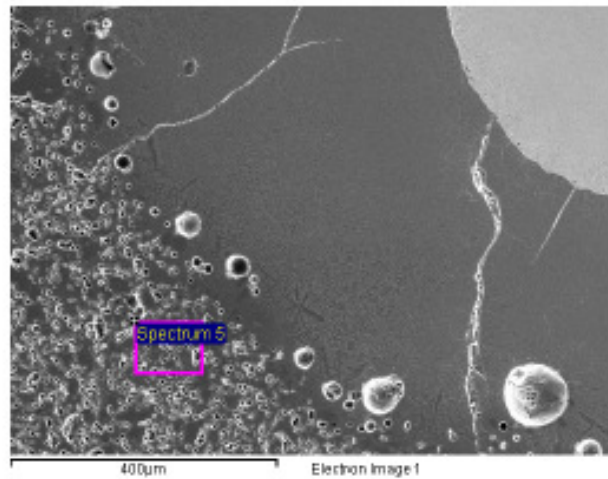


Figura 46.- Reporter del espectro 5 (cerámica con algo de metal), muestra n° 2

cermicas reforzadas con metal

22/07/2009 11:44:03

Project: cermicas reforzadas con metal  
 Owner: Administrador  
 Site: Site of Interest 4

Sample: Sample 2  
 Type: Default  
 ID:

Spectrum processing :  
 Peak possibly omitted : 6.405 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
 Number of iterations = 4

Standard :  
 O SiO2 1-jun-1999 12:00 AM  
 Na Albite 1-jun-1999 12:00 AM  
 Al Al2O3 1-jun-1999 12:00 AM  
 Si SiO2 1-jun-1999 12:00 AM  
 K MAD-10 Feldspar 1-jun-1999 12:00 AM  
 Ca Wollastonite 1-jun-1999 12:00 AM  
 Ti Ti 1-jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
O K	49.85	64.05
Na K	1.95	1.74
Al K	9.29	7.08
Si K	32.84	24.03
K K	1.58	0.83
Ca K	4.05	2.08
Ti K	0.44	0.19
Totals	100.00	

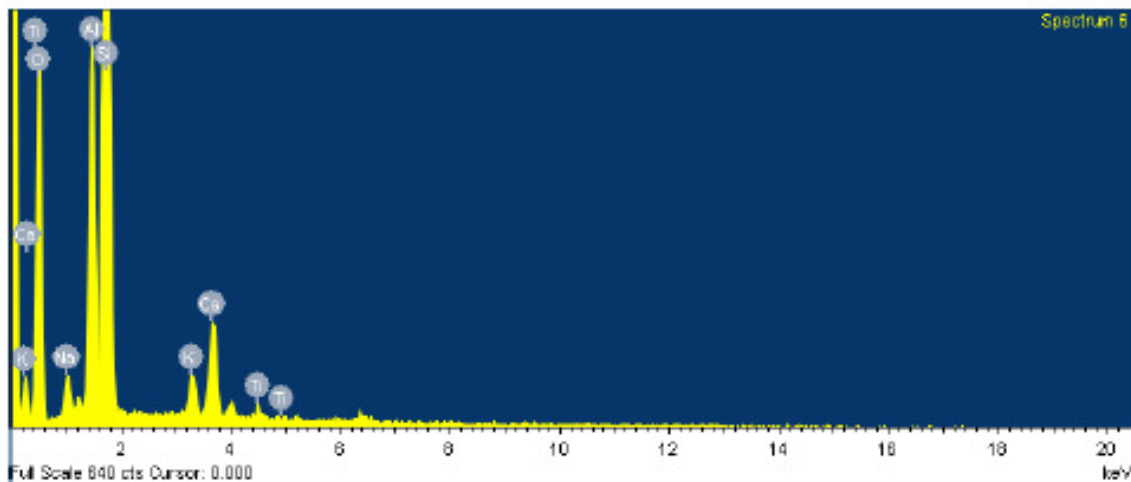
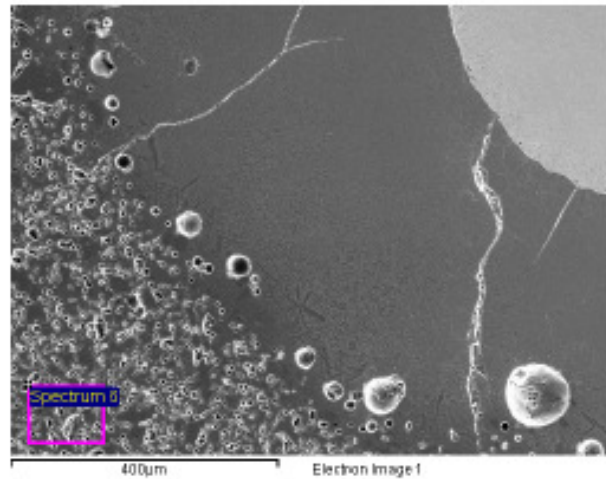


Figura 47.- Reporter del espectro 6 (cerámica), muestra n° 2



#### 5.4.- Elección final del refuerzo.

Después de los resultados obtenidos del empleo de los refuerzos metálicos y tras consultar nuevamente con la bibliografía sobre los estudios más actuales, desestimamos el empleo de los refuerzos metálicos.

Dentro de los refuerzos cerámicos para matriz cerámica, aquellos que se han empleado anteriormente en estudios realizados por otros investigadores, encontramos: conan, magnesita, carburo de silicio y wollastonita.

Apoyándonos en otras investigaciones en la misma línea, seleccionamos por su bajo coste y la compatibilidad con la matriz (este elemento forma parte de la composición de la arcilla), la wollastonita como refuerzo.

Dada la formulación básica de las baldosas se deben utilizar alúmina como mejora de las propiedades intrínsecas de resistencia de la formulación, y fibras de wollastonita a fin de mejorar sus condiciones de tenacidad tan fundamentales para las aplicaciones de alto tránsito. Adicionalmente se puede mejorar con una molturación más fina de las partículas de cuarzo.

En general la mejora en dureza y tenacidad se relaciona con la presencia de mullita. Este compuesto aparece en la interfase entre la wollastonita y la matriz porcelánica durante la cocción. Adicionalmente, se puede controlar la presencia de mullita primaria con la velocidad de cocción. No obstante, este último extremo es complejo en la producción de baldosa cerámica industrial.

Otros tipos de fibras de refuerzo son posibles pero no aceptables en la industria de la baldosa de construcción por su elevado coste e impredecibles resultados ante la variabilidad de la materia prima.

**Wollastonita** es un mineral de calcio inosilicato ( $\text{Ca Si O}_3$ ) que puede contener pequeñas cantidades de hierro, magnesio, y manganeso, en sustitución de calcio.

Hay dos componentes principales que la wollastonita forma mineral:  $\text{CaO}$  y  $\text{SiO}_2$ . En un  $\text{CaSiO}_3$  pura, cada componente de forma casi la mitad del porcentaje de mineral de peso. La  $\text{CaO}$  tiene un porcentaje de peso de 48,3%, y el  $\text{SiO}_2$  tiene un porcentaje de peso de 51,7%. En algunos casos, pequeñas cantidades de hierro (Fe), y el manganeso (Mn), y menor cantidad de magnesio (Mg) sustituto de Calcio (Ca) en las moléculas de mineral. Wollastonita puede formar una serie de soluciones sólidas en el sistema de  $\text{CaSiO}_3$ - $\text{FeSiO}_3$ , o la síntesis hidrotermal de las fases en el sistema de  $\text{MnSiO}_3$ - $\text{CaSiO}_3$ .

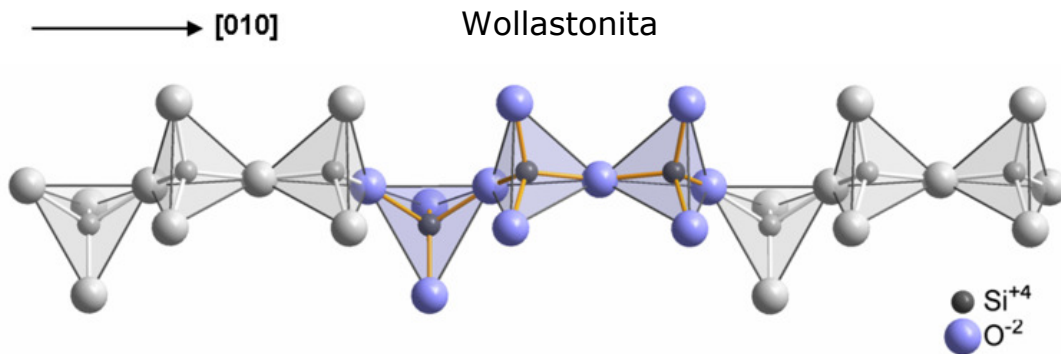


Figura 48.- Celda unidad de wollastonita

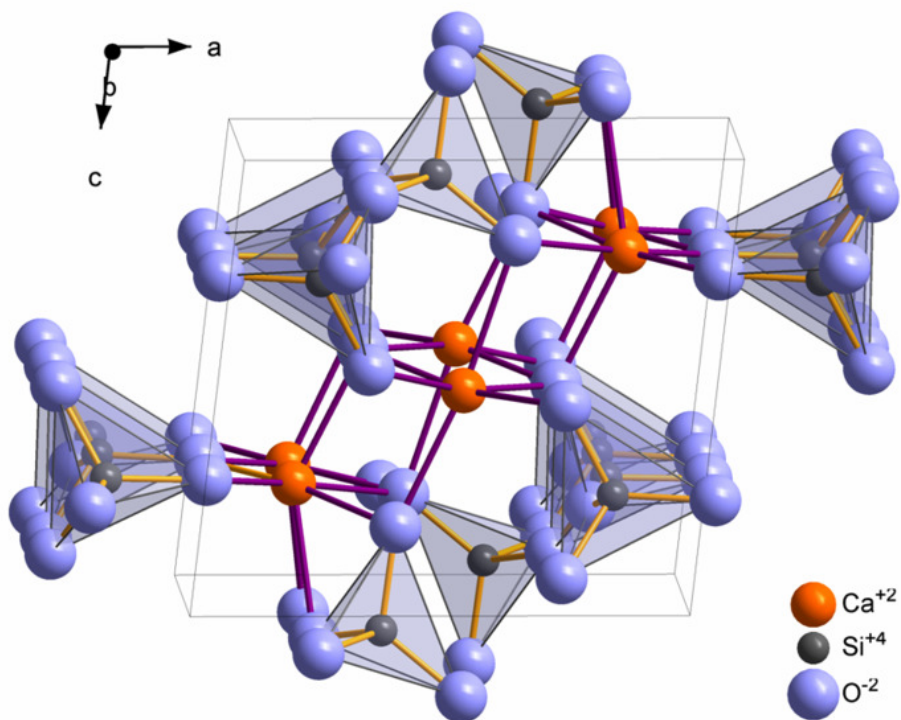


Figura 49.- imagen modelizada de la wollastonita

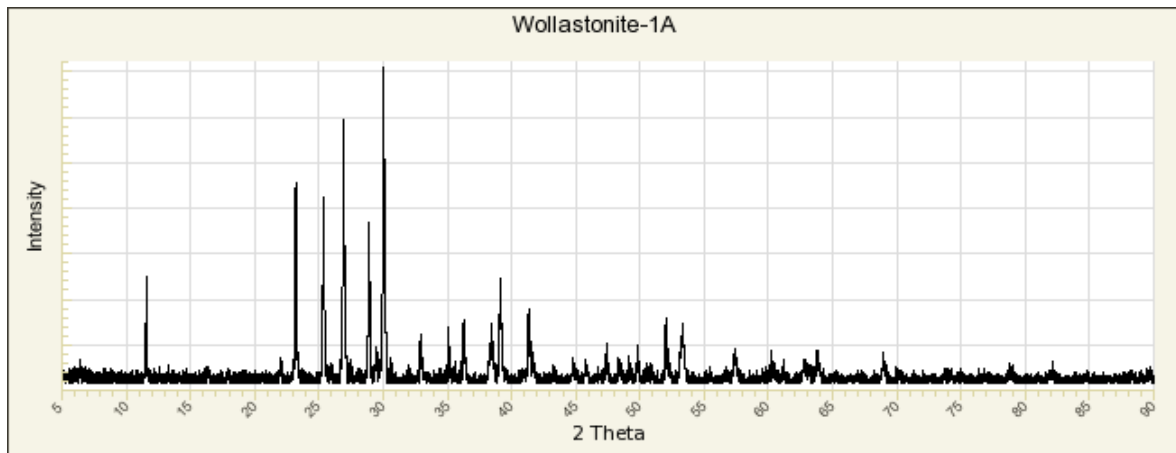


Figura 50.- difractograma de la wollastonita

### 5.5.- Estudio de la formulación.

Partiendo del atomizado utilizado para las formulaciones de mayor resistencia, (tras la consulta de los estudios realizados por otros investigadores), se planteó añadir un 1%, 2%, 6% y 10% en peso de wollastonita en una primera serie. La segunda serie sustituía un 2% y 4% en peso por alúmina. Por último, se probó una composición con atomizado base, 2% de wollastonita y 1% de alúmina.

Sirva como aclaración la tabla n° 7, donde se identifican las muestras y sus composiciones:

Identificación de las muestras	Atomizado base de arcilla	Adición de Wollastonita	Adición de Alúmina
PROBETA N° 1	SI	NO	NO
PROBETA N° 2	SI	1%	NO
PROBETA N° 3	SI	6%	NO
PROBETA N° 4	SI	10%	NO
PROBETA N° 5	SI	2%	NO
PROBETA N° 6	SI	NO	2%
PROBETA N° 7	SI	NO	4%
PROBETA N° 8	PRUEBA FALLIDA		
PROBETA N° 9	PRUEBA FALLIDA		
PROBETA N° 10	SI	2%	1%

Tabla n° 7.- Estudio de la composición de las muestras.





Las probetas nº 8 y nº 9, dieron fallidas en el momento de la fabricación de las baldosas prototipo, por lo que se desestimaron para la fase de ensayos.

La composición del atomizado base no fue suministrado por el fabricante por razones comerciales, pese a todo, al ser una constante en los ensayos, entendemos que no es una información de vital importancia en este proyecto.

Aunque los rangos de formulaciones pudieran ser más exhaustivos, según la bibliografía, no se debe añadir más del 10% en peso de wollastonita para evitar problemas en el prensado. Debemos tener en cuenta que el efecto combinado de alúmina y wollastonita es complejo, y difícil de producir industrialmente.

## 6. Simulación de geometría por ordenador.

### 6.1.-Descripción y justificación de las geometrías

Los hornos de rodillos utilizados en el proceso de cocción son problemáticos. Los relieves demasiado profundos, facilitan que las baldosas queden atrapadas, o den lugar a movimientos indeseados, balanceos e incluso a la superposición o caída de las piezas. Con los crecientes ritmos de producción, estos problemas pueden ser frecuentes e importantes, y los relieves se limitan a profundidades no superiores a 2 mm.

Al mismo tiempo, el sector de los materiales de agarre desarrolló nuevos adhesivos de acción química (polímeros y resinas) y colocación en capa fina que aseguraban una sujeción óptima casi con independencia de la calidad de la superficie de agarre. Este factor no es relevante cuando la baldosa se utiliza en entornos de alto tránsito donde debe favorecerse la presencia de una capa gruesa de mortero que distribuya las tensiones concentradas en la totalidad de la superficie de la baldosa.

Las baldosas aligeradas por conformado de relieve al dorso, pueden ser fabricadas con una cantidad de materia prima sustancialmente inferior a la tradicional, abren una puerta al ahorro másico y energético, y deben ser estudiadas para fijar su adecuación a las normas de calidad en la producción y de seguridad en la construcción.

En su mayoría, los relieves actuales tienen forma de retícula obtenida por la repetición de uno o varios módulos no necesariamente idénticos entre sí. Algunos relieves característicos son los llamados "dameros", formados por cuadrados ordenados que recibe este nombre por su similitud con el tablero de damas; o los "nidos de abeja", en donde la unidad fundamental, como en la naturaleza, el es

hexágono. También el relieve de bandas paralelas y el de costillas finas pueden encontrarse fácilmente. La función de todos ellos es meramente funcional y no el conseguir distribuciones de tensiones homogéneas que permitan ahorrar peso en la baldosa.

Para la selección óptima de la geometría "tipo", se han adoptado criterios resistentes basados en datos bibliográficos. Para el modo resistente en láminas rígidas, que corresponde a las acciones en baldosas de alto tránsito, la geometría óptima corresponde con medio elipsoide cuyo eje mayor es perpendicular a la curva de isotensión local.

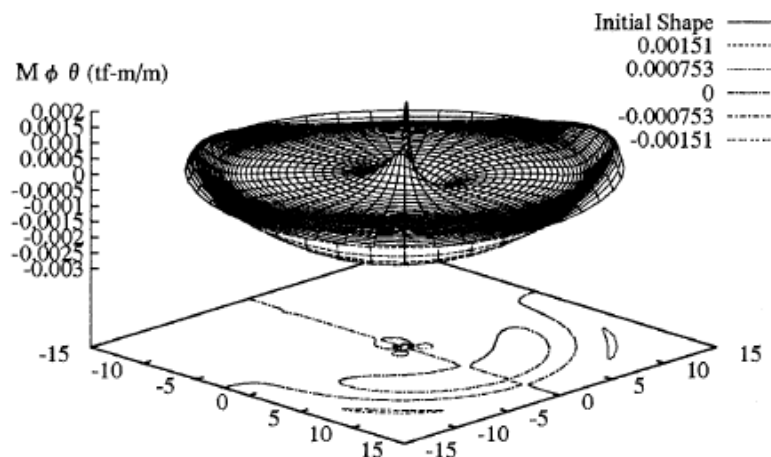


Figura nº 51.- Variación tensional en el elipsoide orientado.

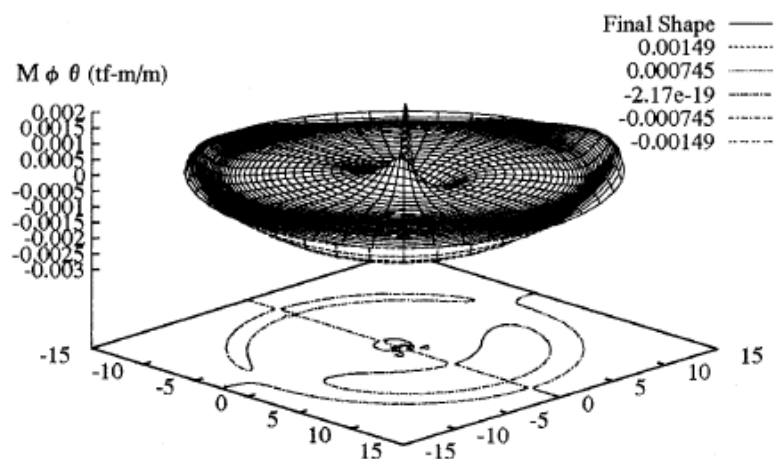
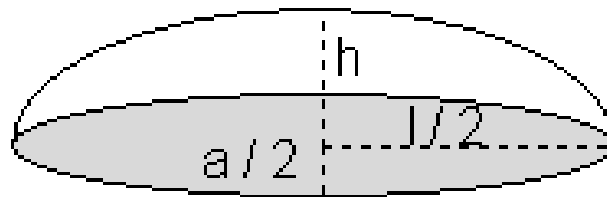


Figura nº 52.- Deformadas en el elipsoide orientado.



donde  $h$  debe valer 2 mm como máximo. Los semiejes “ $a$ ” y “ $l$ ” deben cumplir:  $0,8 < a/l < 1,5$ ;  $2l$  inferior a la décima parte de la longitud de la baldosa

Figura nº 53.-Semi-elipsoide “tipo”

Los pavimentos cerámicos, como producto final, están sujetos fundamentalmente a 2 normas: la norma EN ISO 10545 “Baldosas cerámicas” que sustituye a la norma EN 100:1991 y cuenta con 17 partes; y el Código Técnico de Edificación (CTE), en particular el Documento Básico sobre Seguridad Estructural y Acciones en la Edificación DB SE-AE23.

- Norma EN ISO 10545:

El uso de la norma EN ISO 10545 “Baldosas Cerámicas” lleva años extendido en la industria. Su empleo ha permitido a los fabricantes trabajar sobre un mismo estándar de calidad, y emplear una misma terminología en cuanto a los parámetros definitorios de los productos cerámicos, como son la absorción de agua, la porosidad abierta, la densidad aparente, la resistencia al impacto, la resistencia a la abrasión profunda y superficial, la resistencia al cuarteo, etc.

Una parte vital de la norma, y en especial en lo referente a la adecuación de los pavimentos aligerados por relieve a dorso, es la definición y obtención normalizada de resistencia a flexión  $R$  (EN ISO 10545-4). Esta resistencia se define como “la magnitud expresada en newtons por milímetro cuadrado obtenida al dividir la fuerza de rotura por el cuadrado del grosor mínimo en la sección de rotura”, es decir:

$$R = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Resistencia a flexión  $R$  según la norma EN ISO 10545-4

Donde  $F$  es la fuerza de rotura,  $L$  la distancia entre los apoyos,  $b$  la anchura de la pieza y  $h$  el espesor mínimo de la sección de rotura.

La limitación de esta definición la aporta el parámetro  $h$ , que en todo momento es considerado constante. En el caso de baldosas con grosor no uniforme la medida del grosor mínimo en la sección de rotura sólo da resultados aproximados. La aproximación es mayor cuanto menos acentuado sea el relieve. Estas limitaciones se superan mediante un análisis resistente por elementos finitos como el planteado en el presente estudio.

### • Código Técnico de Edificación (CTE)

En España, el Código Técnico de Edificación es el reglamento de referencia, organizado en ocho Documentos Básicos (DB), que abordan la seguridad estructural de las construcciones en todas sus variantes. El Documento Básico sobre Seguridad Estructural y Acciones en la Edificación DB SE-AE (Parte 2, marzo de 2006), en su apartado "3.1.1 Acciones Variables – Valores de la sobrecarga" establece las cargas de deben soportar los elementos estructurales:

Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m <sup>2</sup> ]	Carga concentrada [kN]
A	Zonas residenciales	A1	Viviendas y zonas de habitaciones en, hospitales y hoteles	2	2
		A2	Trasteros	3	2
B	Zonas administrativas			2	2
C	Zonas de acceso al público (con la excepción de las superficies pertenecientes a las categorías A, B, y D)	C1	Zonas con mesas y sillas	3	4
		C2	Zonas con asientos fijos	4	4
		C3	Zonas sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas como vestíbulos de edificios públicos, administrativos, hoteles; salas de exposición en museos; etc.	5	4
		C4	Zonas destinadas a gimnasio u actividades físicas	5	7
		C5	Zonas de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc)	5	4
D	Zonas comerciales	D1	Locales comerciales	5	4
		D2	Supermercados, hipermercados o grandes superficies	5	7
E	Zonas de tráfico y de aparcamiento para vehículos ligeros (peso total < 30 kN)			2	20
F	Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación	G1	Cubiertas con inclinación inferior a 20°	1	2
		G2	Cubiertas con inclinación superior a 40°	0	2

Tabla Nº 8.-Extracto sobrecargas de uso en el DB SE-AE (2) del CTE

Se han realizado estudios de resistencia en baldosas por elementos finitos con aplicación en fachadas. Entre dichos trabajos cabe destacar los desarrollados por los autores: Naniwa, Bowman y Banks, quienes emplearon los elementos finitos para resolver un modelo bidimensional de una fachada ventilada expuesta a altas temperaturas.

En relación a sistemas pavimentados, también Bowman y Banks ofrecieron un modelo basado en elementos finitos que incluía pavimento cerámico, junta de colocación, adhesivo o mortero y sustrato de hormigón, apoyado inferiormente y restringido en los laterales por lo que podrían ser la paredes del recinto en cuestión. Se estudiaron dos tipos de expansión: expansión uniforme y expansión impuesta por un gradiente de temperaturas de 40°C (la superficie de la cerámica mostraba una temperatura de 60°C, mientras que su base tan sólo 20°C). Estas hipótesis parecían simular el comportamiento de la baldosa frente a la radiación solar continuada.



Las máximos tensiles fueron hallados aproximadamente en la sección media de la baldosa (valores alrededor de 4 MPa), mientras que las tensiones verticales y de cizalla se concentraban en los puntos de contacto con la junta (valores alrededor de 2.5 y 1.5 MPa respectivamente). Al margen de los resultados numéricos o cuantitativos, los autores concluyeron que la mejor aproximación a los sistemas reales se obtenía cuando se combinaban datos físicos con simulados: los resultados obtenidos en el laboratorio debían servir de punto de partida al modelo virtual, y a la vez servir de confirmación.

Todos estos desarrollos se sintetizan en el trabajo recientemente desarrollado por Abreu, en el cual se empleó una formulación propia de elementos finitos híbrido-mezclada de esfuerzos de los estados planos, consiguió buenas aproximaciones incluso usando un número reducido de elementos (33 en este caso). El método fue desarrollado en el Instituto de Engenharia de Estruturas, Território e Construção (ICST) y en el Instituto Técnico Superior (IST), Universidade Técnica de Lisboa. El modelo, de nuevo, estaba constituido por la sección transversal de un forjado de hormigón con recubrimiento cerámico, considerando un comportamiento elástico lineal. 2 variantes se tuvieron en cuenta: (i) sistema de capa gruesa o tradicional (mortero grueso) y (ii) sistema de capa delgada o no tradicional (mortero fino).

Las propiedades de los materiales fueron obtenidas de fuentes bibliográficas. Considerando cuatro cargas distintas (tres deformaciones diferenciales, la principal de 0.1 mm/mm; y un peso distribuido de 10 KN/m), se planteó un estudio paramétrico en donde se alternaban las principales variables geométricas y materiales del sistema, como se muestra en las siguientes tablas:

VARIABLE	CAPA FINA (mm)			CAPA GRUESA (mm)		
	REFERENCIA	PARAMÉTRICO		REFERENCIA	PARAMÉTRICO	
Grosor de la capa de asiento	6	2	10	30	15	50
Anchura de las juntas	6	1	12	6	1	12
Grosor de las piezas cerámicas	9	6	12	9	6	12
Longitud de las piezas cerámicas	200	100	300	200	100	300
Grosor del forjado	200	150	250	200	15	250
Vano del forjado	1436		2672	1436		2672

Tabla nº 9.-geometría del modelo de Abreu

MATERIAL	C. POISSON (m/m)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (GPA)					
		CAPA FINA			CAPA GRUESA		
		REFERENCIA	PARAMÉTRICO		REFERENCIA	PARAMÉTRICO	
Piezas cerámicas	0.30	70	40		70	40	
Capa de asiento	0.25	10	5	15	20	10	30
Juntas	0.25	10	5	15	20	10	30
Forjado	0.20	30	20	10	30	20	40

Tabla nº 10.-Características mecánicas del modelo de Abreu

Los esfuerzos máximos obtenidos en tracción son de 5 MPa. Los esfuerzos verticales y de cizalla eran de un orden inferior, aunque los resultados mostraban picos muy pronunciados cerca de las juntas y bordes libres. Más detalles se ofrecen en la figura nº 54.

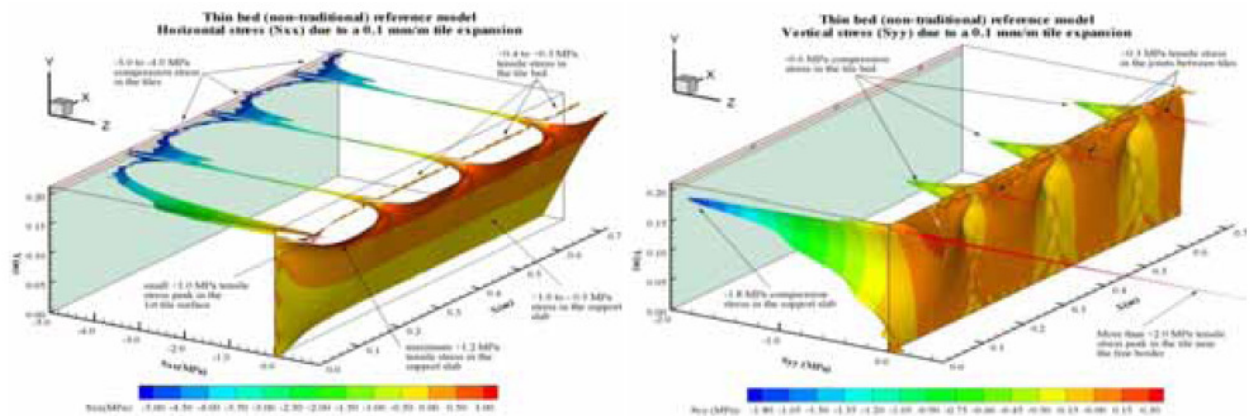


Figura nº 54.- Variación de las tensiones de reacción en el mortero

Estas variaciones de las reacciones son posteriormente consideradas al modelar el apoyo de las baldosas.

## 6.2.- Propiedades de los materiales

Considerando que el estudio se realiza en la zona elástico-lineal del material cerámico, y que este se considera isotrópico, las mínimas propiedades mecánicas y térmicas que han de fijarse son:

- **Densidad ( $\rho$ ):** relación entre la masa y el volumen.
- **Módulo de elasticidad ( $E$ ):** resistencia a la deformación elástica obtenida como la pendiente en la curva tensión-deformación del ensayo de tracción o flexión en el tramo lineal (elástico), en donde se cumple la ley de Hooke. También conocido como Módulo de Young.
- **Coefficiente de Poisson ( $\nu$ ):** relación entre las deformaciones según los tres ejes ortogonales espaciales.



- **Coefficiente de dilatación térmica ( $\alpha$ ):** relación entre la deformación experimentada por el material con respecto a la variación de temperatura en el mismo.
- **Conductividad térmica ( $k$ ):** capacidad del material de transmitir calor por conducción.
- **Calor específico ( $C$ ):** cantidad de energía necesaria para aumentar  $1^{\circ}\text{C}$  la temperatura de una sustancia. Indica la mayor o menor dificultad que presenta dicha sustancia para experimentar cambios de temperatura bajo el suministro de calor.

Para establecer estas propiedades, se recurrió a una amplia bibliografía, que resultó, como era de prever, bastante ambigua en la definición de algunas de estas magnitudes y sus rangos de valor. La siguiente tabla presenta estos datos de partida para la pasta porcelánica utilizada en este estudio.

MATERIAL	PROPIEDAD MECÁNICO - TÉRMICA					
	$\rho$ ( $\text{Kg/m}^3$ )	$E$ (GPa)	$\mu$ (m/m)	$\alpha$ ( $10\text{e-}6^{\circ}\text{K-1}$ )	$k$ ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	$C$ ( $\text{Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
PASTA	2300	50	0.25	7	1	0.75

tabla n° 11.- Propiedades de partida para el modelo

### 6.3.- Desarrollo de las bases del modelo

En el estudio se ha utilizado el software ANSYS en su versión 10.0 cuya licencia está disponible en la UPV. Se realizó un mallado sólido tridimensional de la pieza cuadrada cocida según prototipo facilitado por la empresa y un espesor medio análogo al de producción (con un ligero alabeo de 1 mm para recoger la geometría real que facilita el desmoldeo).

En el mallado se ha utilizado el elemento de análisis SOLID92 para el análisis estructural (tetraedro de 10 nodos y 3 grados de libertad según los ejes ortogonales); y elemento SOLID87 para el análisis térmico (tetraedro de 10 nodos y 1 grado de libertad en virtud de la temperatura). Este elemento tetraédrico es ideal para modelos de geometría tridimensional irregular, donde ningún otro elemento sería apropiado. La siguiente figura muestra un esquema de ambos elementos, recogida en el manual "ANSYS User's manual: Elements Vol.III". El mallado fue automático y automatizado por defecto.



Figura nº 55.- Elementos utilizados en el análisis.

Para la evaluación estructural se empleó un análisis estático no considerando el campo de las grandes deformaciones, puesto que se suponen, en un principio, resultados aproximadamente lineales con las cargas.

Para los ensayos térmicos, se empleó un análisis termal constante. En ambos casos se eligió el método "paso simple adaptativo" de convergencia. Según este método, el sistema ejecuta una primera iteración de orden polinómico igual a 3 y determina el error local de las soluciones. A continuación determina un nuevo orden polinómico y ejecuta el paso final. La elección de este método se realizó tras comprobar, en varios ensayos, que el método alternativo "múltiple paso adaptativo", en donde el usuario determina el número de iteraciones, conducía a resultados idénticos en los supuestos estudiados. Los errores de los diferentes ensayos no superaron, en ningún caso, el 2%.

Los pavimentos cerámicos se ven sometidos a cargas de distinta índole durante su vida útil. En función del espacio en donde se encuentre ubicados, prevalecerán unas sobre otras. Puesto que en el estudio se propone como objetivo el conocimiento generalista de la respuesta mecánica (con la influencia térmica) de las baldosas aligeradas, conviene seleccionar una serie limitada de ensayos los cuales representen en su conjunto las condiciones de trabajo más habituales.

Es por esto que se consideraron cuatro ensayos: aplicación de una carga uniformemente distribuida y aplicación de una carga puntual en condiciones ideales de apoyo, aplicación de una carga lineal en condiciones de flexión, y aplicación simultánea de dilatación térmica.

Para establecer los detalles de estos ensayos (valores de las cargas y condiciones concretas de contorno), se recurrió a las normas de aplicación en cerámica, tanto para la calidad del producto (norma EN ISO 10545), como para la seguridad en la edificación (Código Técnico de Edificación CTE) ya expuestas, obteniendo las hipótesis recogidas en la tabla nº 12.





Nº	CARGAS	RESTRICCIONES	NORMA DE REFERENCIA
1	Carga de 5 KN/m <sup>2</sup> vertical y uniformemente distribuida sobre la cara vista de la baldosa	Condiciones normales de trabajo para pavimento: baldosa adherida a mortero o pegamento por su cara no vista	DB SE-AE 3.1 Sobrecarga de uso máxima en categoría C, carga uniforme, zonas de acceso público.
2	Carga de 7 KN vertical y uniformemente distribuida sobre una superficie cuadrangular de 50 mm de lado ubicada en la cara vista de la baldosa.	Condiciones normales de trabajo para pavimento.	DB SE-AE 3.1 Sobrecarga de uso máxima en categoría C, carga concentrada, zonas de acceso público.
3	Carga lineal uniformemente distribuida aplicada sobre un cilindro metálico recubierto de caucho de dureza 50±5 IRHD, calculada conforme ISO 48 situado en la sección media de la baldosa sobre la cara vista. La carga debe ser aumentada progresivamente, de tal manera que se observe en el manómetro, un aumento del esfuerzo de la baldosa de 1±0.2 N/mm <sup>2</sup> por segundo, hasta que ésta rompa.  R= 3FL/(2hb) resistencia a flexión, donde: F= carga de rotura medida con el manómetro (N) L= distancia entre los ejes de los apoyos (mm) b= anchura de la baldosa (mm) h= espesor mínimo de la baldosa, tras el ensayo, en la sección de rotura (mm)	Baldosa apoyada sobre 2 cilindros metálicos recubiertos de caucho de dureza 50±5 IRHD, calculada conforme ISO 48, colocados a una distancia l= 20 mm de los extremos de la misma.	EN ISO 10545-4: Determinación de la resistencia a la flexión y de la carga de rotura
4	Incremento de la temperatura debido a la radiación solar de 42°C.	Condiciones normales de trabajo para pavimento.	DB SE-AE 3.4.2 Cálculo de la acción térmica, orientación de la superficie Sur y Oeste, color de la superficie oscuro.

Tabla nº 12.- Hipótesis de cálculo

Para simular los ensayos antes expuestos con las herramientas computacionales disponibles, se realizaron diferentes ajustes y simplificaciones tanto de las cargas como de las restricciones, buscando en todo momento la viabilidad de las simulaciones, así como la fidelidad del modelo con respecto al ensayo real. A continuación se detallan estas hipótesis:

- **Ensayo uniforme:** La carga se aplicó tal y como especifica la norma, es decir, una presión de valor 5 KN/m<sup>2</sup> vertical y uniformemente distribuida sobre la cara vista de la baldosa. Esta fuerza, aunque pequeña, representa las condiciones de trabajo habituales del pavimento colocado, pero además, también representa el estado normal de apilamiento, lo cual hace especialmente interesante el ensayo.

Para simular las condiciones de trabajo normales del pavimento, se anulaban los desplazamientos de la superficie inferior del mismo, dejando libres las superficies interiores de las teselaciones. Esta restricción representa la condición más desfavorable de trabajo, en la cual el mortero o pegamento no habría fraguado dentro del relieve al dorso y por tanto sólo habría adherido la superficie más externa del relieve. El apoyo se modeló de acuerdo a los resultados bibliográficos expuestos anteriormente para el mortero.



- **Ensayo puntual:** La carga se aplicó tal y como especifica la norma, es decir, una presión de valor 7 KN vertical y uniformemente distribuida sobre una superficie cuadrangular de 50 mm de lado ubicada en la cara vista de la baldosa, considerando un cuadrado con centro geométrico coincidente con el centro geométrico de la cara vista de la baldosa. Si bien esta consideración puede que no represente el caso más desfavorable (quizá una ubicación excéntrica hubiera sido más crítica), permite la aplicación de simetrías, lo cual es una máxima de la tesis, a fin de ahorrar tiempo y recursos de computación.

Para simular las condiciones de trabajo normales del pavimento sobre el mortero, se procedió como en el caso anterior.

- **Ensayo flexión:** En este ensayo, el cilindro sobre el que se aplica la carga fue sustituido por una región (superficie) virtual situada sobre la cara vista de la baldosa, de 2 mm de anchura y longitud igual a la longitud de la pieza, con centro geométrico coincidente con el centro geométrico de la citada cara vista. Para modelar el aumento de la carga, se tomó un valor inicial de 5 MPa, que se aumentó de forma progresiva tomando valores de 7.5, 10, 12.5 y 15 MPa.

Para cada una de estas presiones, denominadas en los ensayos como  $\sigma_5$ ,  $\sigma_{7.5}$ ,  $\sigma_{10}$ ,  $\sigma_{12.5}$  y  $\sigma_{15}$ , se tomaron datos de reacciones y se capturaron los resultados gráficos. Para modelar las condiciones de contorno, los dos cilindros laterales se sustituyeron por otras dos regiones virtuales, de anchura 1mm y longitud igual a la de la pieza, a las cuales se les restringió tan sólo la traslación según el eje y con el objetivo de simular un apoyo ideal.

- **Ensayo térmico:** consiste en incrementar la tensión de dilatación térmica correspondiente a 50°C sobre la hipótesis más desfavorable entre las anteriores.

La resistencia a la flexión **R** ha de presentar unos valores mínimos según la norma EN ISO 10545, que varían en función del tipo de pavimento considerado, clasificado arreglo al tanto por cien de absorción de agua. La tabla nº 13, resume estos valores.

CLASIFICACIÓN	CARGA DE ROTURA
Pavimento BIIb (agua 6-9%)	>18 N/mm <sup>2</sup>
Pavimento BIIa (agua 3-6%)	>22 N/mm <sup>2</sup>
Pavimento BIb (agua 0.5-3%)	>30 N/mm <sup>2</sup>
Gres porcelánico (agua <0.5%)	>35 N/mm <sup>2</sup> (50 N/mm <sup>2</sup> en el mercado)

Tabla nº 13.- Valores límites de resistencia.

Lo cual, teniendo en cuenta las dimensiones de las baldosas propuestas para el estudio (60x60 cm), arroja un intervalo para la carga de rotura mínima para el material de:

$$\sigma_{\text{rotura}} \in [3'33, 9'26] \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)}$$

$$\text{ó bien } R \in [65, 97] \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)}$$

Por lo que respecta a la distribución de los elementos "tipo" (semi elipsoide de 2 mm de profundidad según se ha justificado), se comienza por el análisis por elementos finitos de una baldosa maciza. En la figura siguiente se observan las líneas de isotensión obtenidas para el caso de carga "estático".

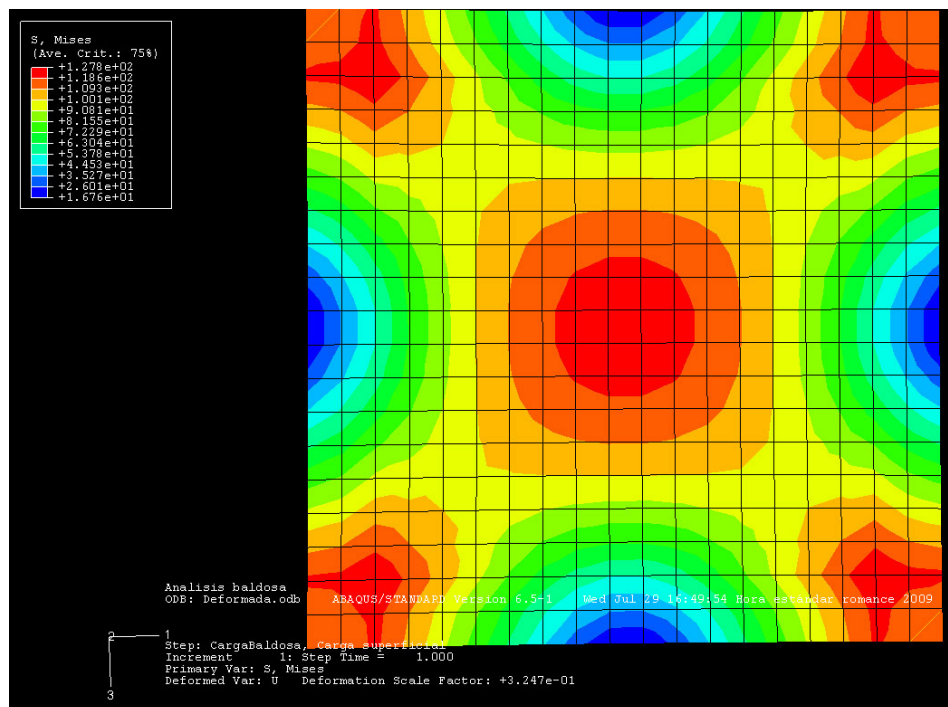


Figura nº 56.- Líneas de isotensión máxima para baldosa maciza en el caso de carga estático.

A la vista de los resultados, los semi-elipsoides para el aligeramiento de la masa deben disponerse de forma perpendicular respecto del centro en círculos concéntricos separados 4'5 veces el semieje menor. Se respetarán sin relieve (o teselación) áreas en el entorno del 20% de la longitud respecto del centro y de las esquinas.

Posteriormente, se comprueba en simulaciones donde el relieve se repite de forma geométrica en damero que el incremento tensional es muy bajo. Por esta razón se opta por disponer como relieve el semi-elipsoide de ejes  $a=1$  entre 15 y 25 mm y profundidad de 2 mm.

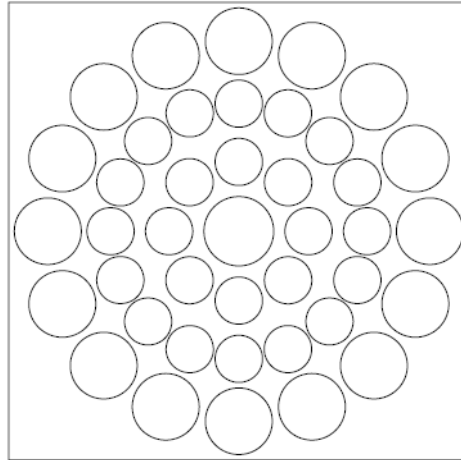


Figura nº 57.- Propuesta de ubicación para los semielipsoides.

#### 6.4.- Resultados

Tras definir la geometría de los elementos teselados y su ubicación para el caso óptimo tensional en las distintas hipótesis de carga. Se comprueba que los picos de tensión no varían de forma significativa al repartir de forma regular semielipsoides redondos de radio 15 mm (y 2 mm de profundidad). En consecuencia, se adopta una disposición de damero compacta según la figura nº 58.

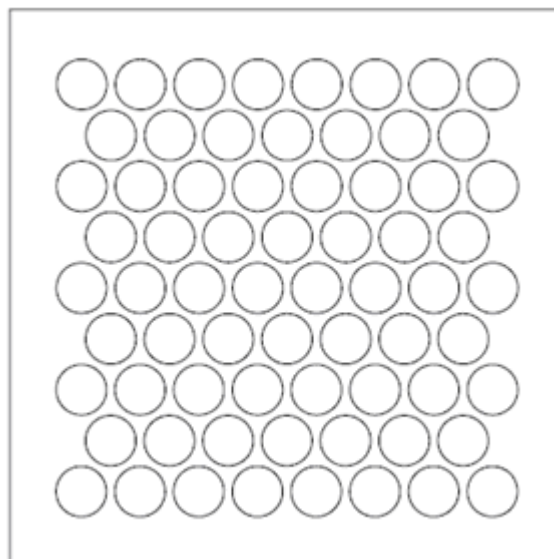


Figura nº 58.- Ubicación para los semielipsoides.

Considerando esta geometría como definitiva, se aplican los distintos casos de carga obteniendo distintos resultados en función del espesor propuesto para la baldosa. A partir de 11 mm de espesor se logran resultados compatibles con la carga de rotura del material cerámico. En las figuras siguientes se presentan algunos resultados.

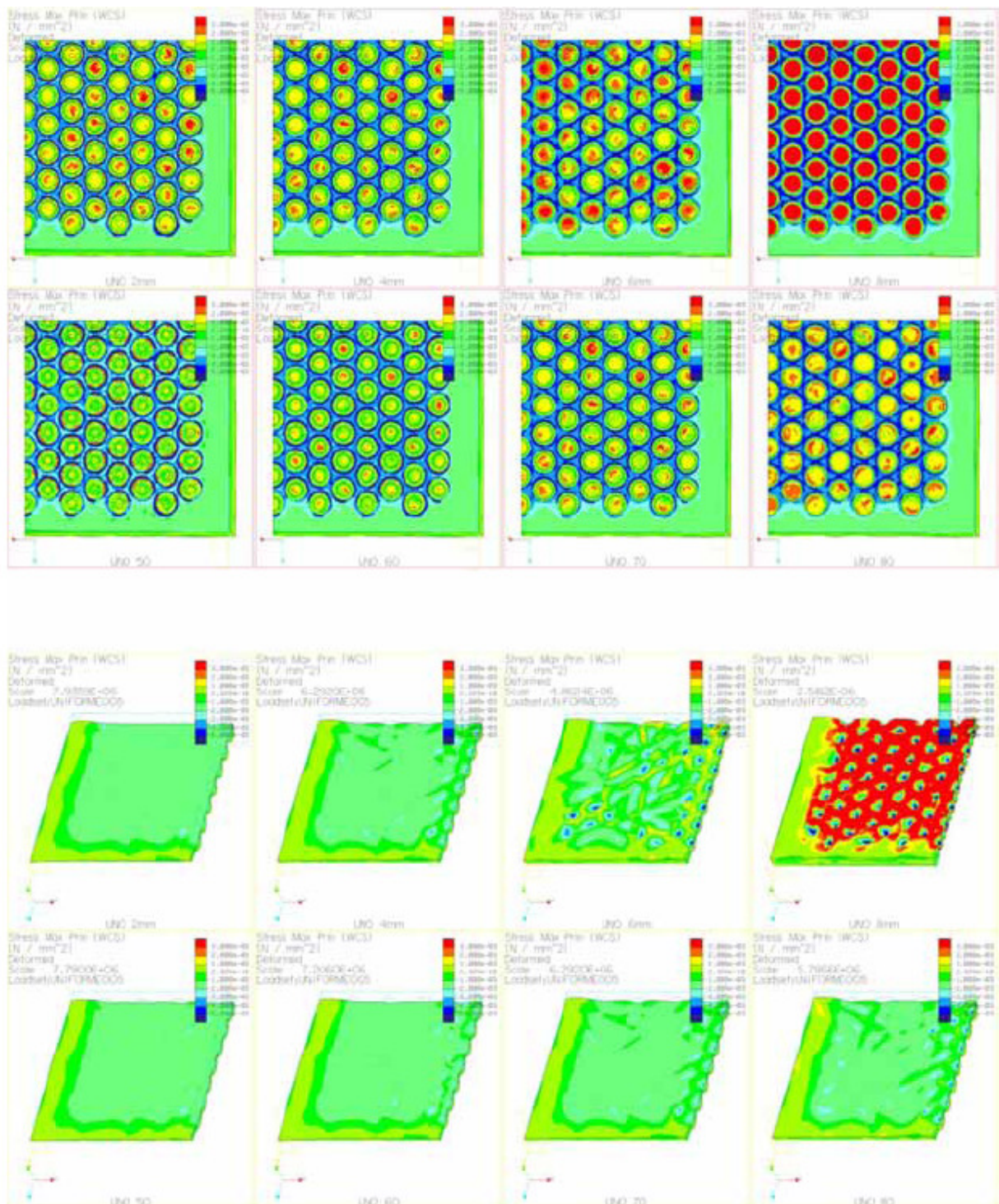


Figura n° 59.- Presentación gráfica de las tensiones máximas de Von Mises para carga uniforme.

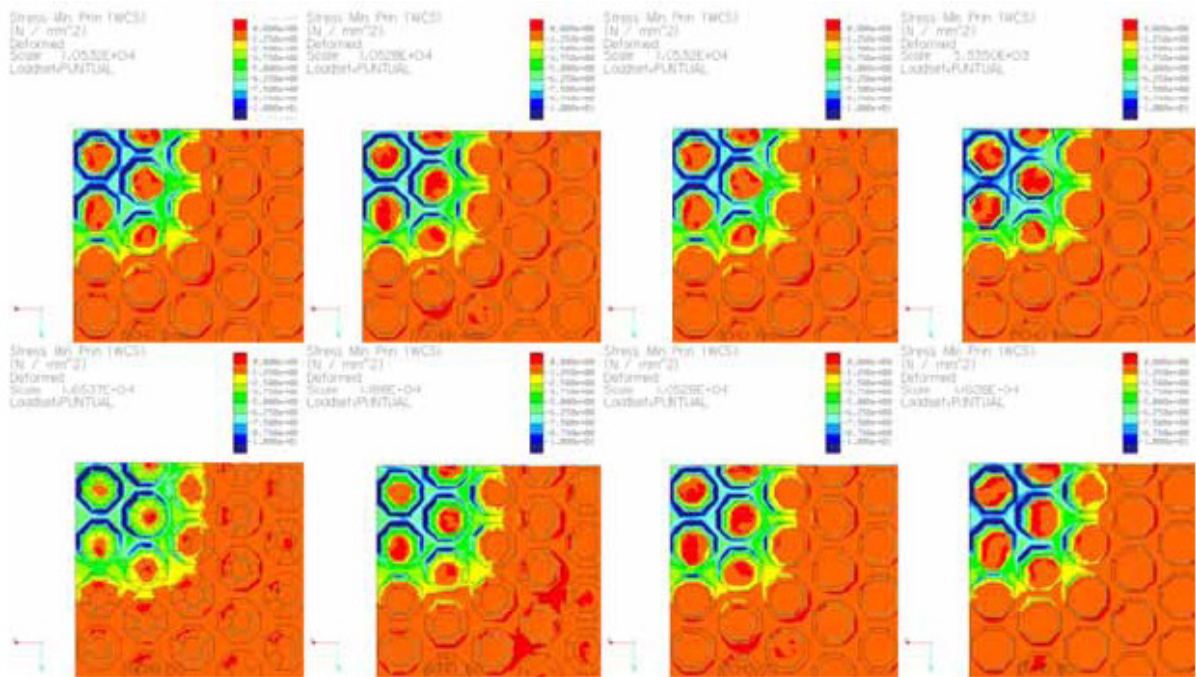


Figura n° 60.- Presentación gráfica de las tensiones máximas de Von Mises para carga puntual.

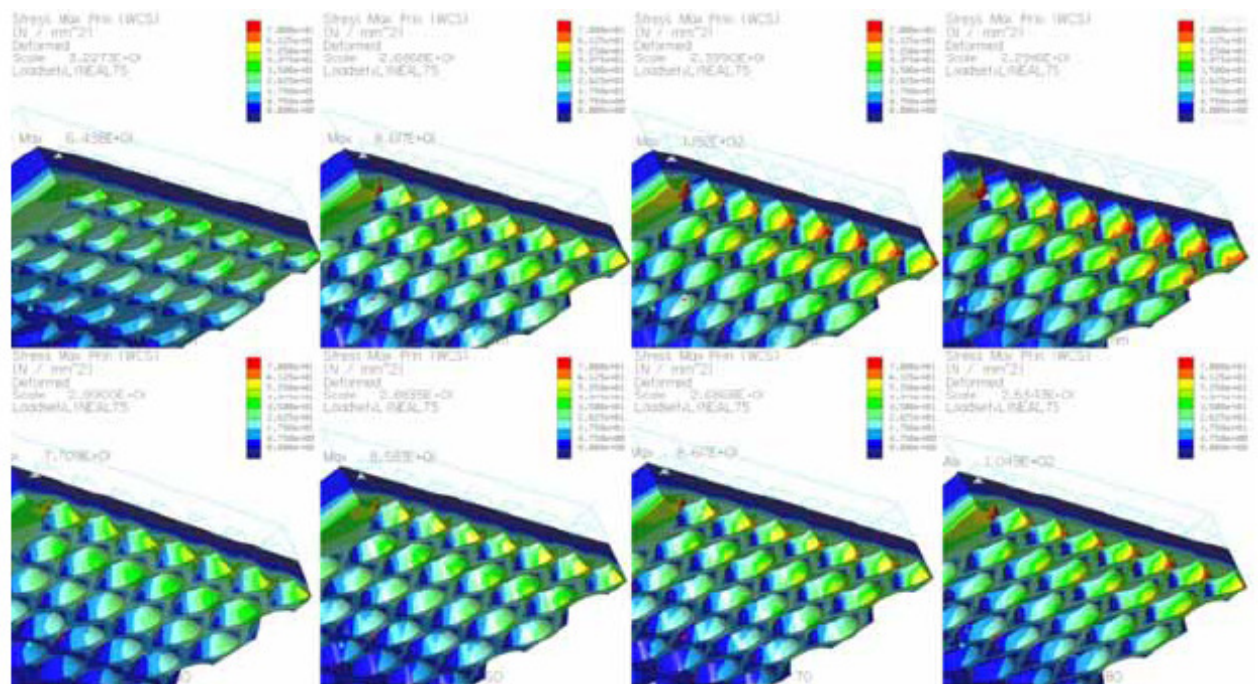


Figura n° 61.- Presentación gráfica de las tensiones máximas de Von Mises para carga de flexión.

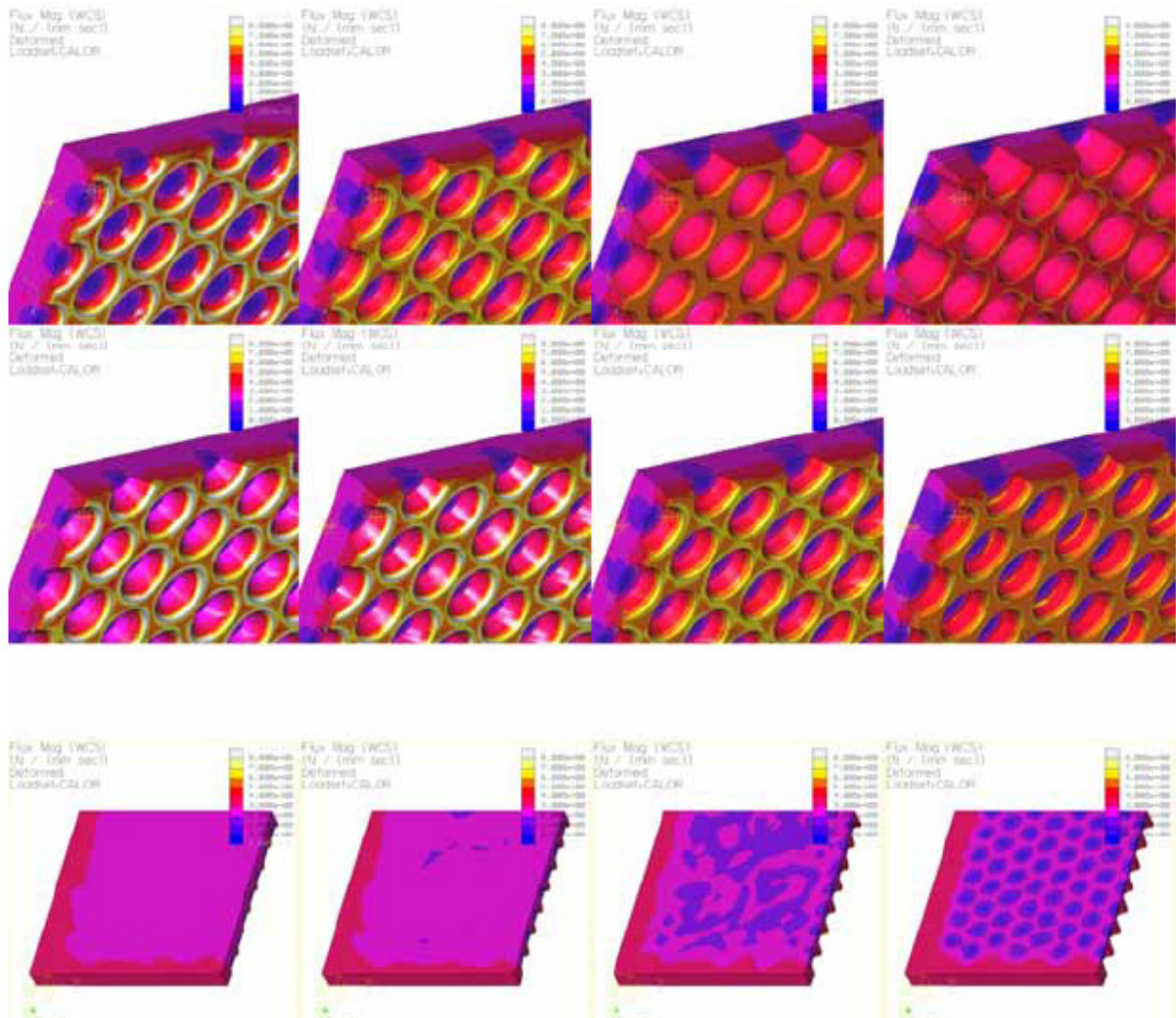


Figura n° 62.- Presentación gráfica de las tensiones máximas de Von Mises para carga de dilatación térmica.

### Conclusiones extraídas de las comprobaciones de cálculo:

En consecuencia, para el diseño propuesto de costillas y un espesor de baldosa de 11 mm. se cumplen las condiciones de carga propuestas para una baldosa de alto tránsito y un ahorro de peso del 28%.

## 7. – Métodos experimentales.

### 7.1. Estudio de las variables de los ensayos.

Para evaluar cuantitativamente la posible mejora de la resistencia de las piezas cerámicas al reforzarlas con fibras, recurrimos al método de ensayo que se describe en la norma española para cerámicas técnicas avanzadas UNE-EN 843-1 “Determinación de la resistencia a flexión. Ensayo de flexión en tres puntos”.

Este ensayo tiene como objetivo su utilización para el desarrollo de materiales, control de calidad y caracterización y obtención de datos de diseño. El nivel de resistencia determinado por el ensayo se calcula sobre la base de la teoría de la flexión elástica lineal de una viga delgada.



Fotografía n° 10: Aspecto de una de las baldosas (probeta n° 10), lista para ser mecanizada

A partir de las baldosas reforzadas elaboradas, según las distintas composiciones anteriormente expuestas, se han mecanizado cinco probetas de cada una de las muestras, según la norma de ensayo EN 843-1. Las dimensiones y las tolerancias admisibles son las que se muestran en la siguiente figura n° 63:



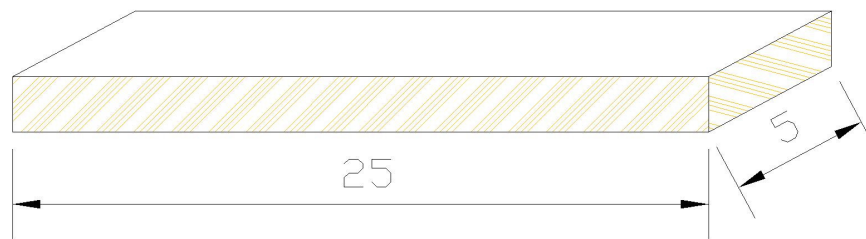


Figura nº 63.- Esquema de probetas una vez mecanizadas para el ensayo a flexión.

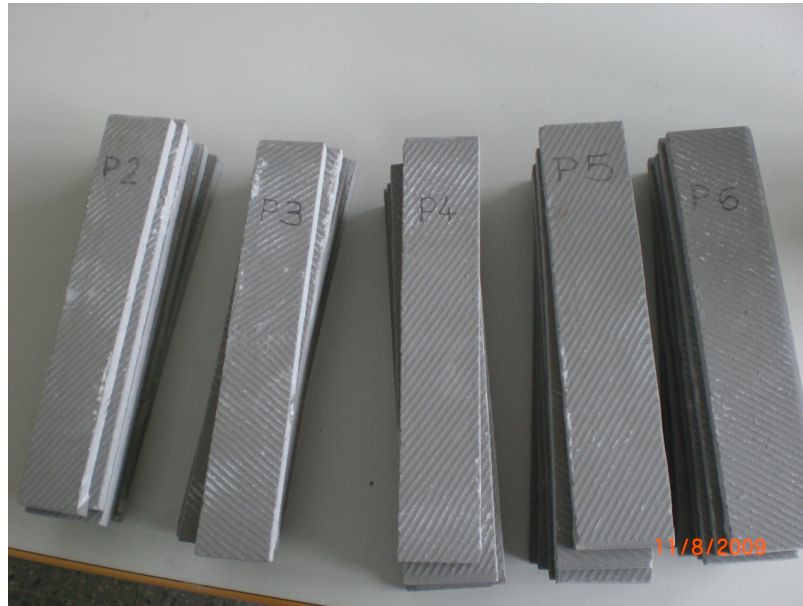


Fotografía nº 10: Aspecto general de la zona de mecanizado durante los trabajos

Para el mecanizado, se empleó una cortadora de disco de diamante, refrigerada con agua, en los laboratorios del Instituto de Tecnología de los Materiales.



Fotografía nº 11: Aspecto de las piezas tras el mecanizado de las muestras.



Fotografía n° 12: Algunas de las muestras mecanizadas para el posterior ensayo a flexión

Una vez mecanizadas las muestras, se comprobaron sus dimensiones, especialmente la longitud y anchura de cada muestra. Posteriormente se ajusta el rango de fuerzas de la máquina de ensayos empleada (Electrotest-100), teniendo en cuenta los valores esperados. Tras asegurarnos de que todo el utillaje se encuentra limpio y listo para usarse, se posiciona cada una de las muestras, comprobándose que se encuentra centrada entre los rodillos del soporte. Se colocan las medidas de seguridad para evitar impactos y se inicia la secuencia de cada uno de los ensayos.

Tras seleccionar la velocidad de aplicación de la fuerza, comienza la aplicación de ésta y se registra el punto correspondiente a la fuerza soportada en el instante de la rotura.

Este procedimiento se repitió hasta ensayar todas las muestras de todas las baldosas, excepto la n° 8 y n° 9 que dieron fallidas en su fabricación.

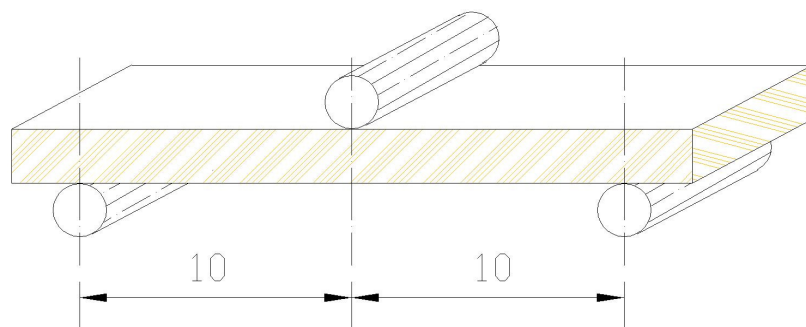


Figura n° 64.- Esquema colocación de la muestra en la máquina de ensayo a flexión.

## 7.2. Justificación morfológica del refuerzo.

Durante la fase previa de la elección del refuerzo, se realizó un análisis de las ventajas e inconvenientes del empleo de fibras largas o cortas. De la bibliografía consultada, cabe destacar la coincidencia en el criterio de los investigadores, sobre la existencia del comportamiento anisótropo que presentan los refuerzos con fibras largas. Por otro lado, el empleo de fibras excesivamente cortas pueden ocasionar problemas de salud laboral bastante graves.

Ante esta problemática y sin perder de vista el proceso de fabricación, parece que lo más adecuado es el empleo en forma de polvo. En este sentido, y teniendo en cuenta que la fabricación de las baldosas cerámicas se realiza por prensado del atomizado, se plantea que el refuerzo se incorporará en forma de polvo durante la fase de mezclado, antes de realizarse el prensado. Con esta morfología aseguramos un mayor reparto del refuerzo en toda la pieza y con ello su comportamiento isotrópico.

Existen varias razones para la elección de partículas en forma de polvo, en la obtención de piezas cerámicas. Esta técnica permite fabricar piezas de formas complicadas con unas tolerancias muy ajustadas. La alta automatización permite variar composiciones químicas, tratamientos, acabados, sin alterar en exceso el proceso productivo. Todo ello con un alto rendimiento de la producción y con un coste energético bajo.

En la fabricación de cerámicos a partir de polvos, al igual que la pulvimetalurgia, hay que considerar toda una serie de factores, ya desde la obtención y el tratamiento de los polvos, como son la fabricación, la caracterización por su tamaño y su forma, su manejo y su procesamiento. Como procesamiento se tienen fundamentalmente la compactación y la sinterización. Para finalizar el proceso hay que hacer un estudio de sus propiedades y de su microestructura.

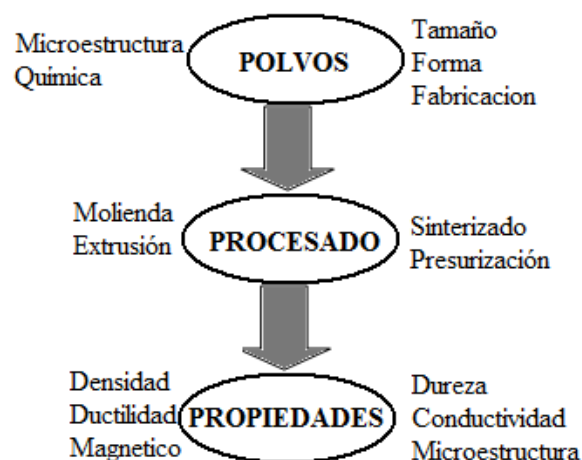


Figura 65.- Procesado de polvos.

### 7.3. Estudio microscópico de la interfase.

Con el fin de poder realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos mediante microscopía electrónica de barrido SEM, se procedió a preparar tres muestras de laboratorio, con la composición de la probeta n° 5, esto es, pasta base y un 2% Wollastonita.

Manteniendo la formulación fija, se realizaron tres prensados distintos (10 Tn, 15 Tn y 20 Tn) obteniéndose sendas muestras que fueron sometidas a embutición, desbastado y pulido, como en las otras ocasiones.



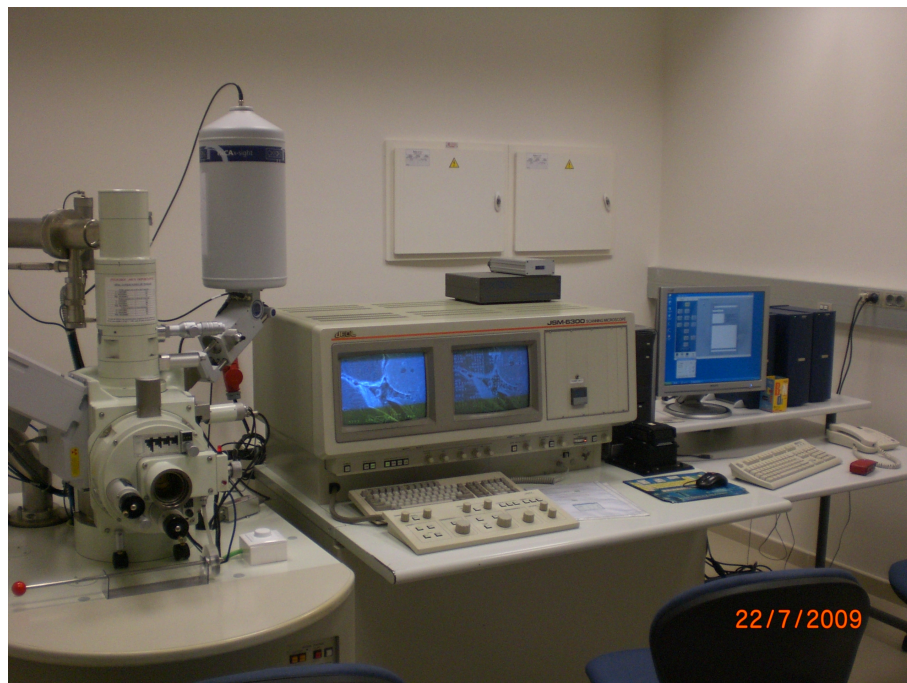
Fotografía n° 13: Embutidora Struers Labopress 3, donde se embutieron las probetas



Fotografía n° 14: Se procedió a un desbastado con lija de 250 y pulido con lijas de 500 y 1000.



Fotografía nº 15: Las muestras preparadas para ser sometidas al SEM



Fotografía nº 16: vista general del SEM durante los ensayos

Como se ha comentado anteriormente, a esta fase de pruebas, sólo se les ha sometido a tres muestras prensadas a: 10 Tn, 15 Tn y 20 Tn, todas pertenecientes a la probeta n° 5. De lo ensayos con microscopía electrónica de barrido (SEM), se obtuvieron los siguientes resultados:

- Muestra n° 5 prensado a 10 Tn.

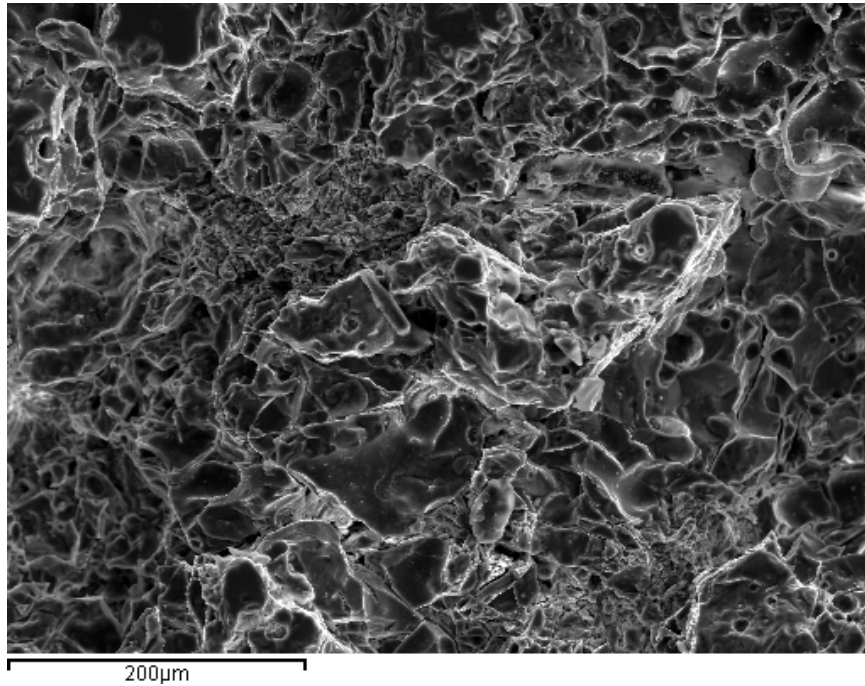


Figura n° 66.- Magnificación 200X

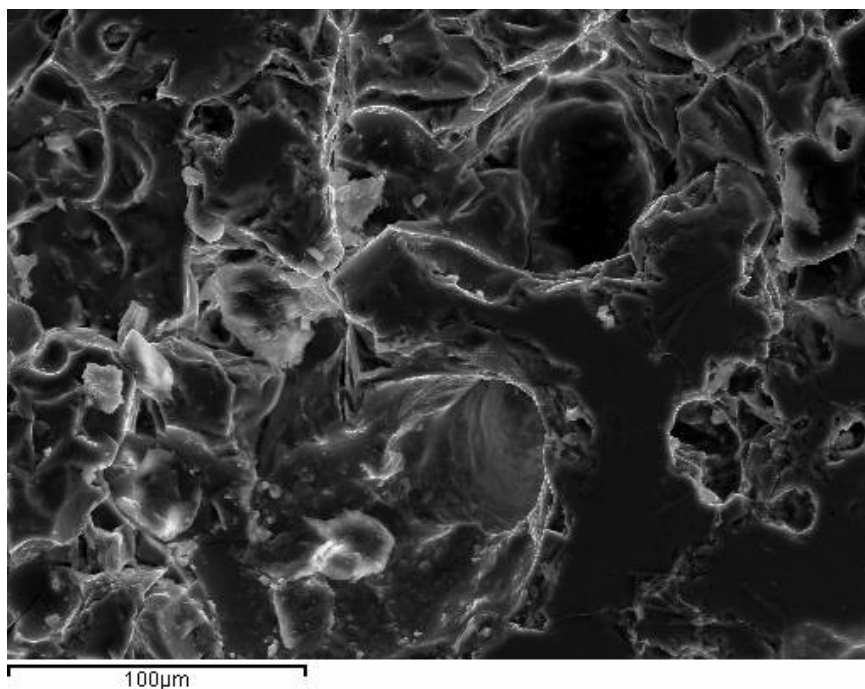


Figura n° 67.- Magnificación 400X

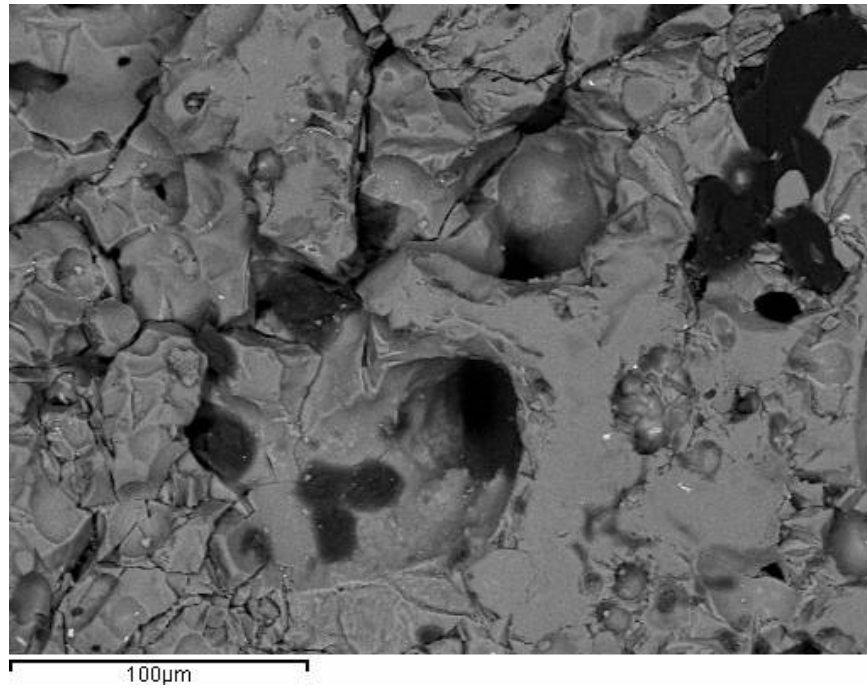


Figura n° 68.- Magnificación 400X Retro

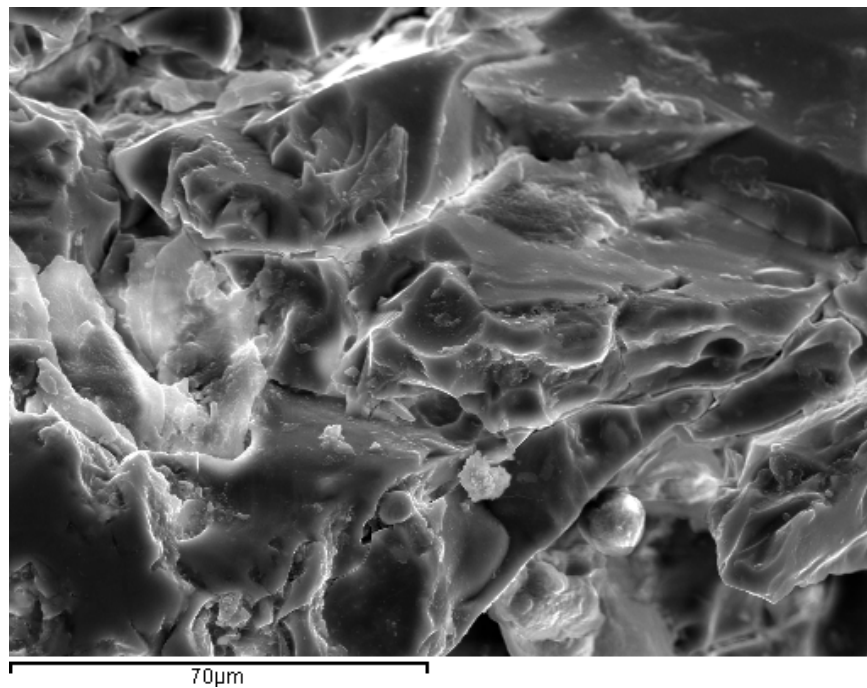


Figura n° 69.- Magnificación 800X

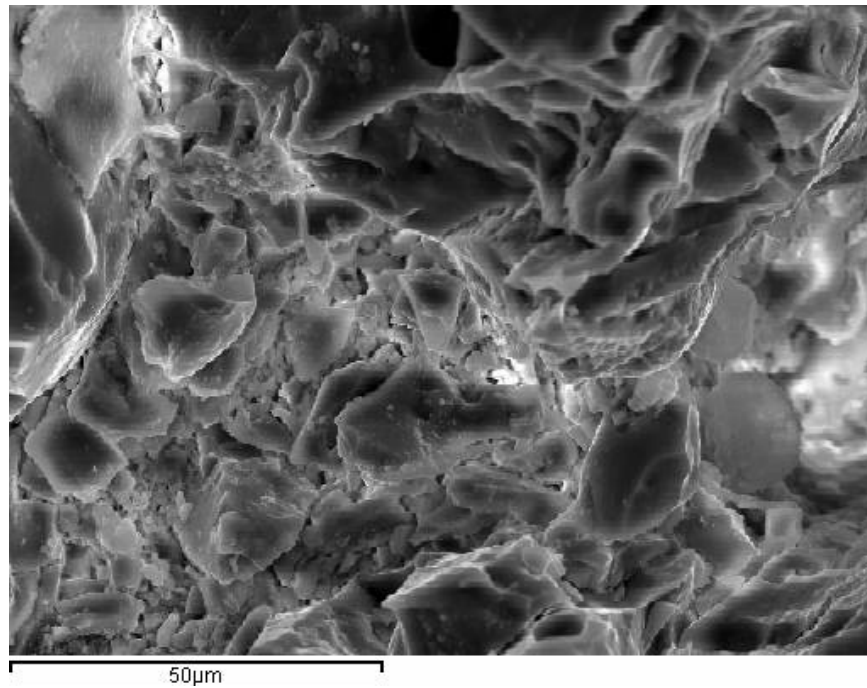


Figura n° 70.- Magnificación 1000X

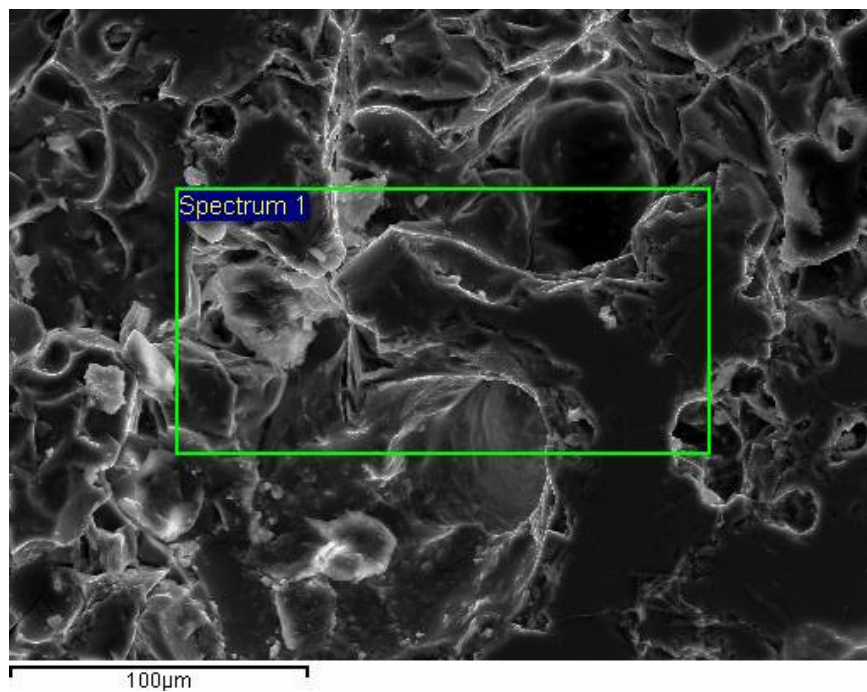


Figura n° 71.- Magnificación 400X espectro 1



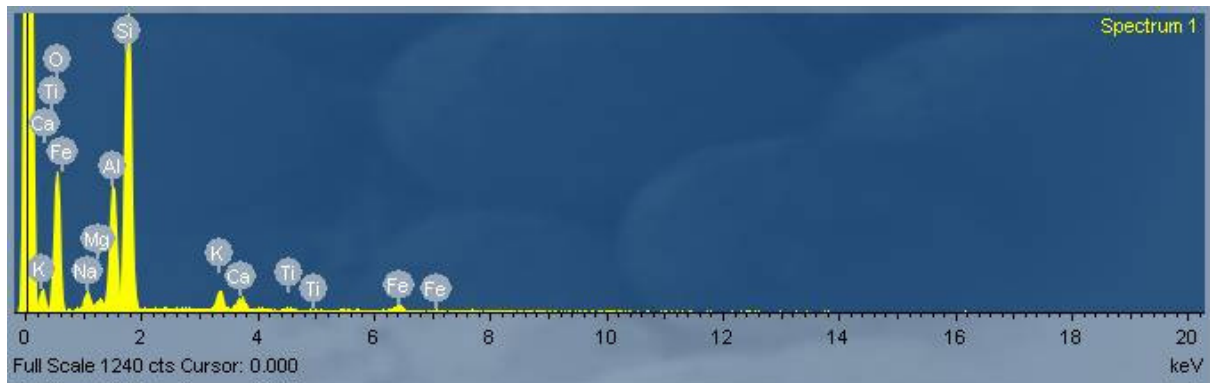


Figura nº 72.- análisis de composición del espectro 1

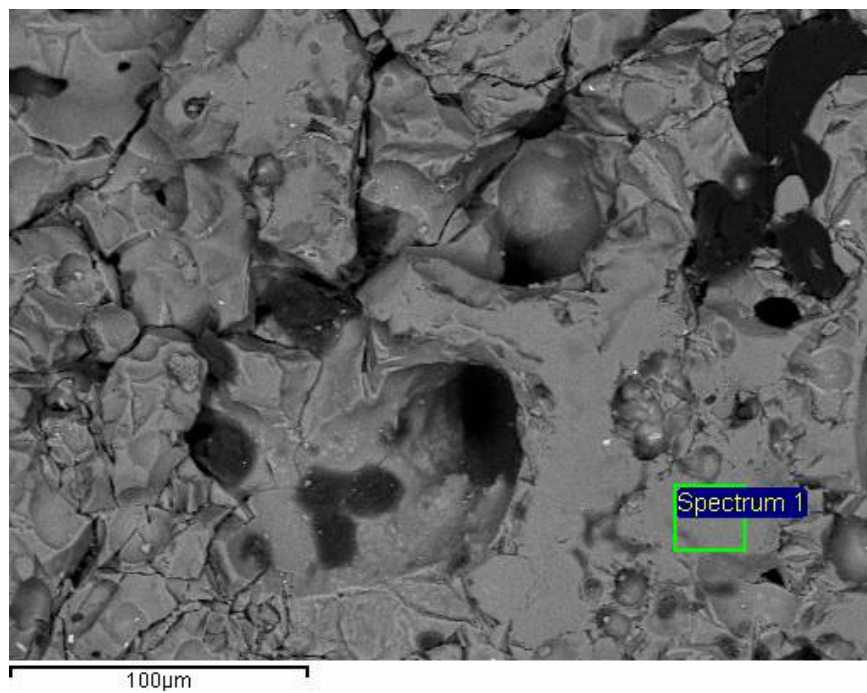


Figura nº 73.- Magnificación 400X retro (espectro 1)

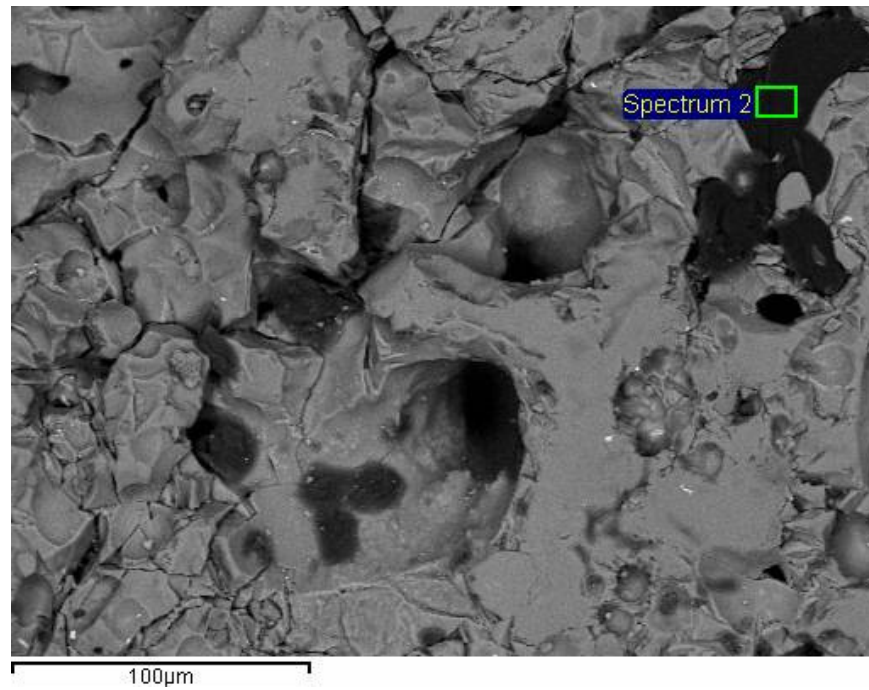


Figura nº 74.- Magnificación 400X espectro 2

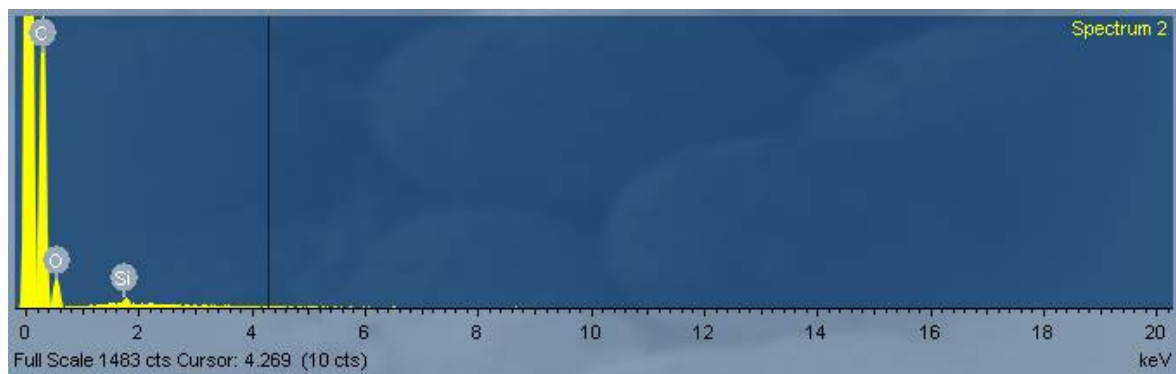


Figura nº 75.- análisis de composición del espectro 2

probetas ceramicas reforzadas

31.07.2009 10:01:30

Project: probetas ceramicas reforzadas  
 Owner: Administrador  
 Site: Site of Interest 3

Sample: 10Tn  
 Type: Default  
 ID:

Spectrum processing :  
 No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
 Number of iterations = 4

Standard :

O SiO2 1-jun-1999 12:00 AM  
 Na Albite 1-jun-1999 12:00 AM  
 Mg MgO 1-jun-1999 12:00 AM  
 Al Al2O3 1-jun-1999 12:00 AM  
 Si SiO2 1-jun-1999 12:00 AM  
 K MAD-10 Feldspar 1-jun-1999 12:00 AM  
 Ca Wollastonite 1-jun-1999 12:00 AM  
 Ti Ti 1-jun-1999 12:00 AM  
 Fe Fe 1-jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
OK	51.62	65.70
Na K	2.45	2.17
Mg K	0.79	0.66
Al K	10.45	7.89
Si K	28.66	20.78
KK	2.33	1.21
Ca K	1.48	0.75
Ti K	0.41	0.17
Fe K	1.81	0.66
Totals	100.00	

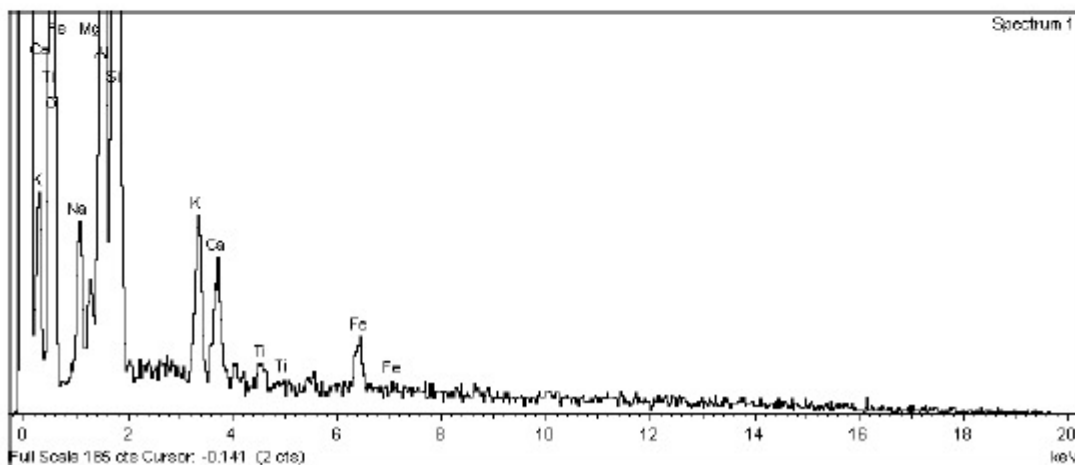
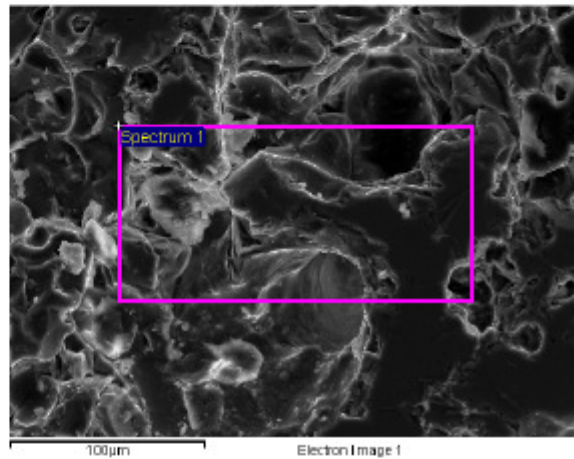


Figura76.- Reporte del espectro 1, muestra n° 5, 10 Tn

probetas ceramicas reforzadas

31/07/2009 10:11:16

Project: probetas ceramicas reforzadas  
 Owner: Administrador  
 Site: Site of Interest 4

Sample: 10Tn  
 Type: Default  
 ID:

Spectrum processing :  
 No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
 Number of iterations = 4

Standard :

O SiO2 1-jun-1999 12:00 AM  
 Na Albite 1-jun-1999 12:00 AM  
 Mg MgO 1-jun-1999 12:00 AM  
 Al Al2O3 1-jun-1999 12:00 AM  
 Si SiO2 1-jun-1999 12:00 AM  
 K MAD-10 Feldspar 1-jun-1999 12:00 AM  
 Ca Wollastonite 1-jun-1999 12:00 AM  
 Ti Ti 1-jun-1999 12:00 AM  
 Fe Fe 1-jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
O K	47.82	61.92
Na K	2.61	2.35
Mg K	0.71	0.60
Al K	10.57	8.12
Si K	33.36	24.60
K K	2.67	1.42
Ca K	0.80	0.41
Ti K	0.63	0.27
Fe K	0.82	0.30
Totals	100.00	

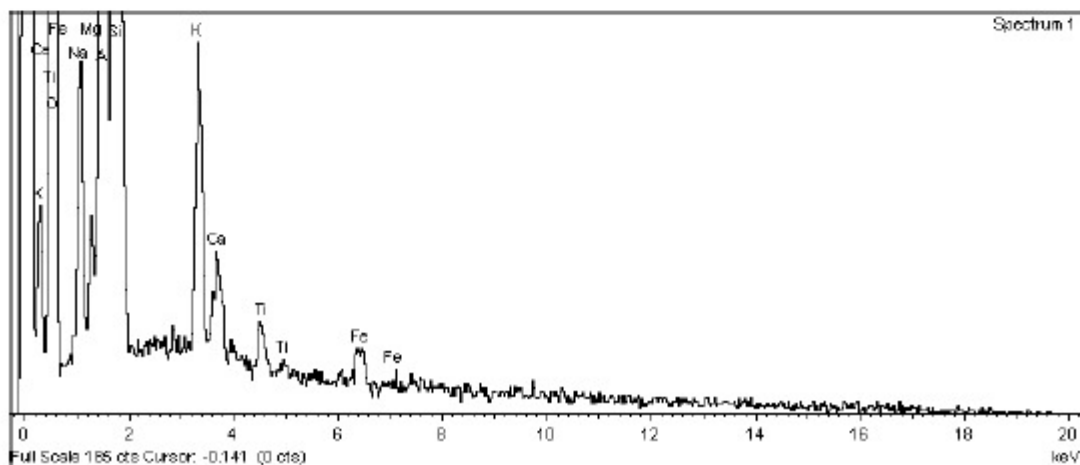
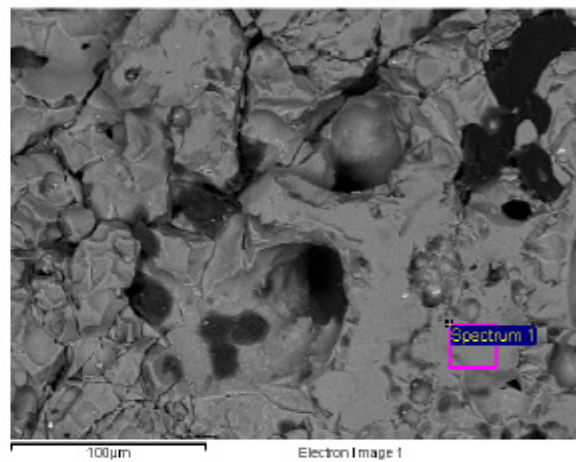


Figura77.- Reporter del espectro 1bis, muestra n° 5, 10 Tn

probetas ceramicas reforzadas

31/07/2009 10:13:45

Project: probetas ceramicas reforzadas  
 Owner: Administrador  
 Site: Site of Interest 4

Sample: 10Tn  
 Type: Default  
 ID:

Spectrum processing :  
 No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
 Number of iterations = 3

Standard :  
 C CaCO3 1-jun-1999 12:00 AM  
 O SiO2 1-jun-1999 12:00 AM  
 Si SiO2 1-jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
CK	73.00	78.37
OK	26.61	21.45
SiK	0.39	0.18
Totals	100.00	

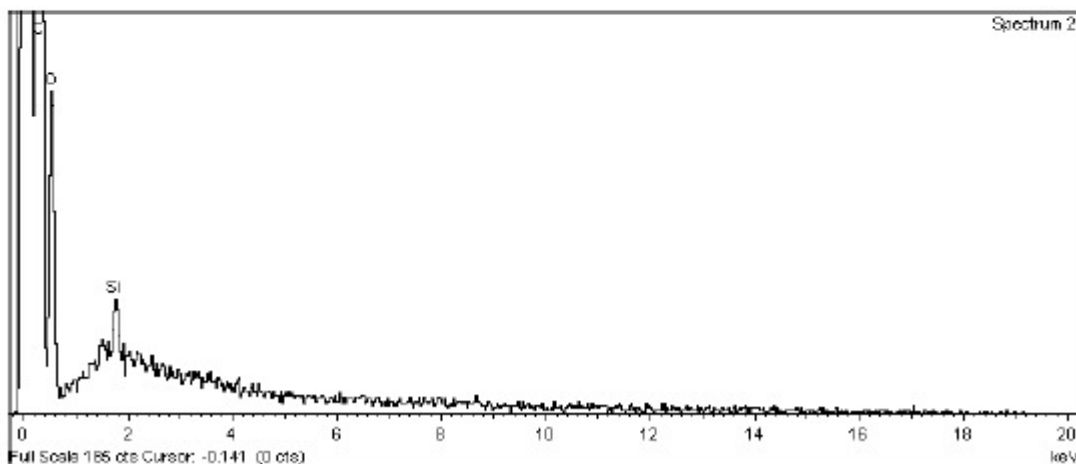
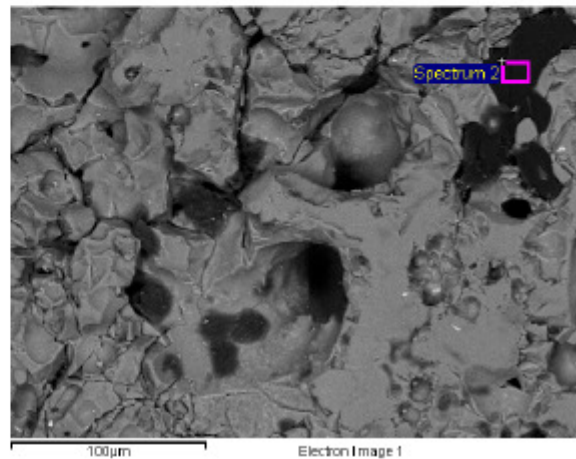


Figura n° 78.- Reporter del espectro 2, muestra n° 5, 10 Tn

- Muestra n° 5 prensado a 15 Tn.

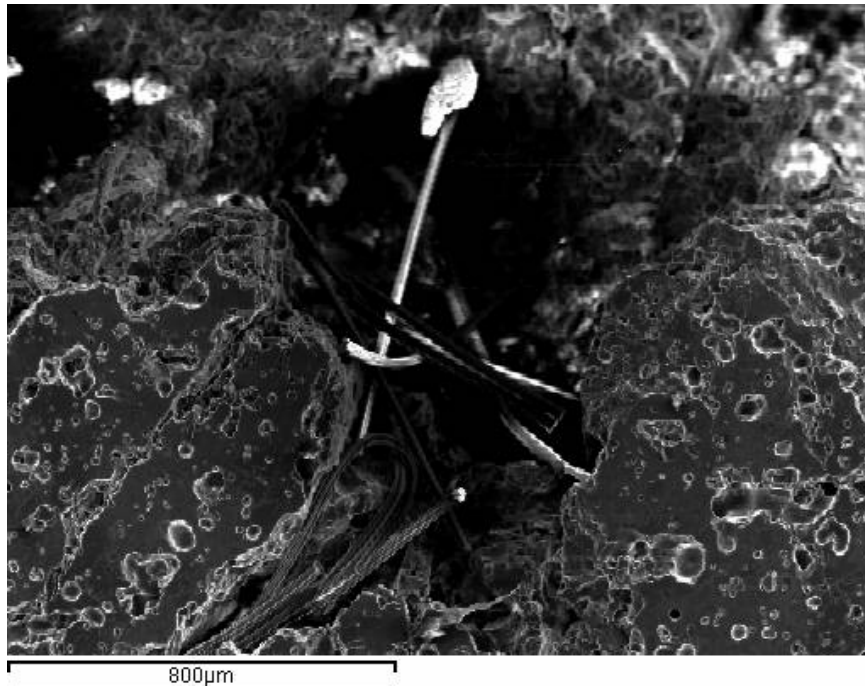


Figura n° 79.- Magnificación 65X

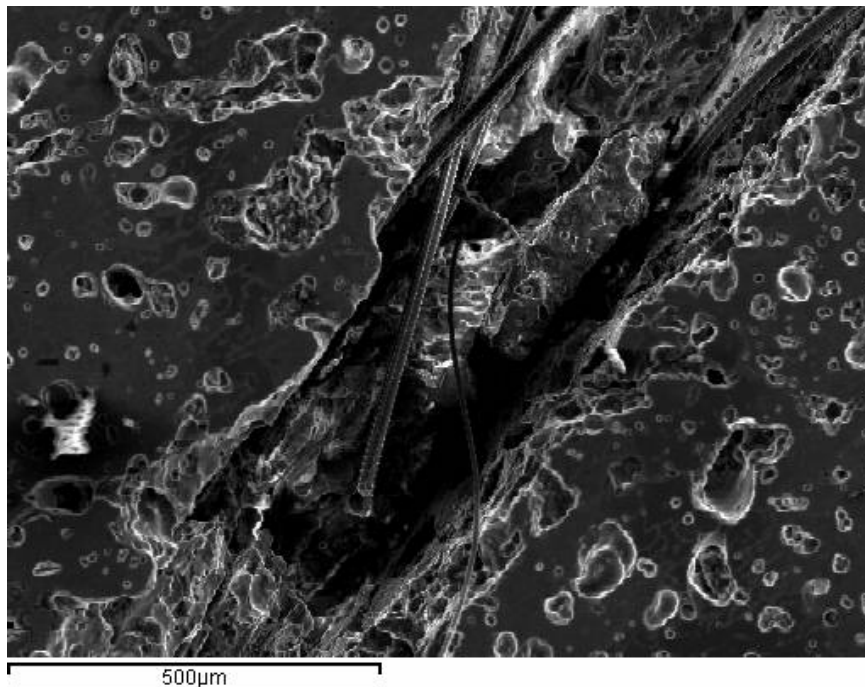


Figura n° 80.- Magnificación 100X

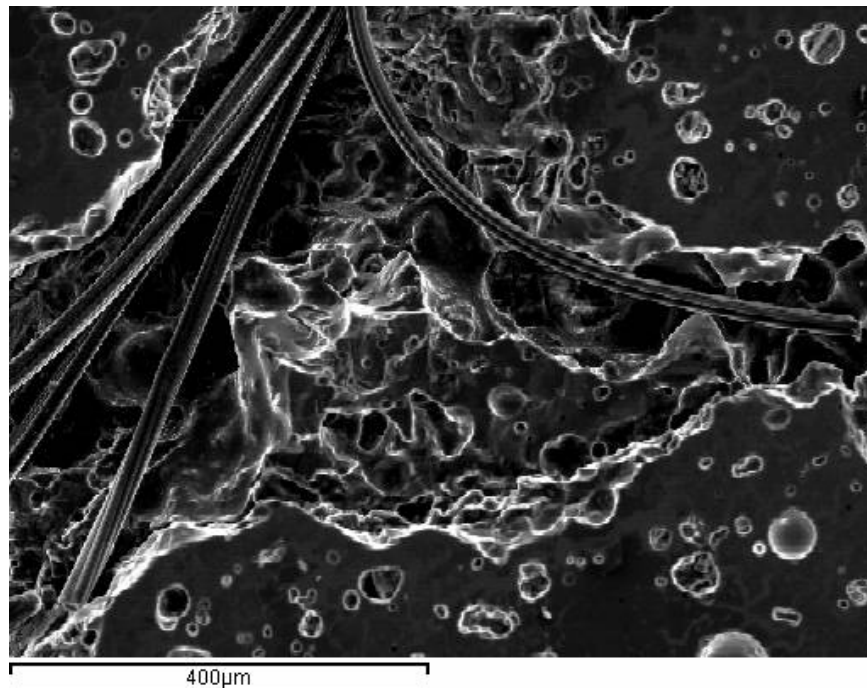


Figura nº 81.- Magnificación 140X

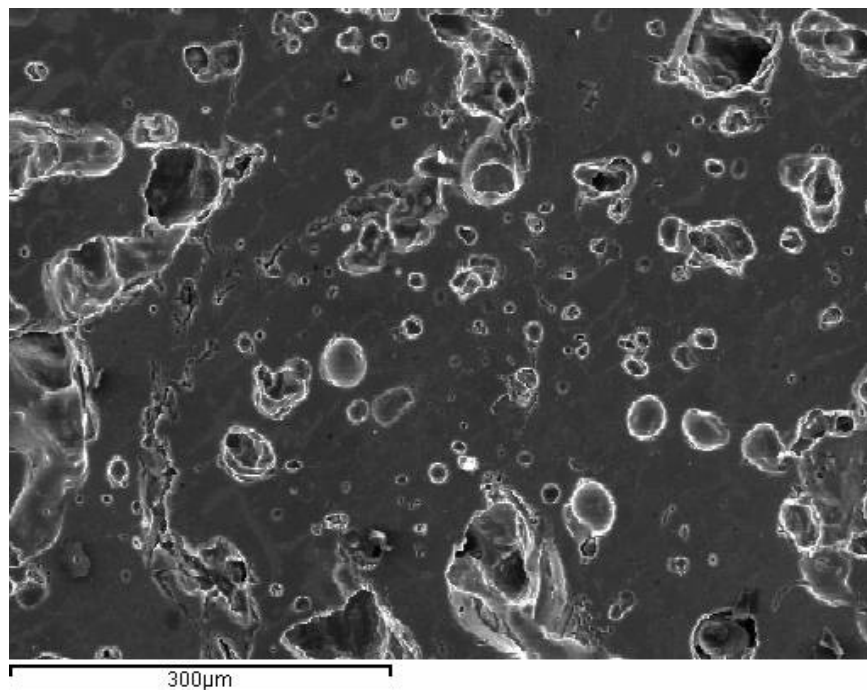


Figura nº 82.- Magnificación 170X

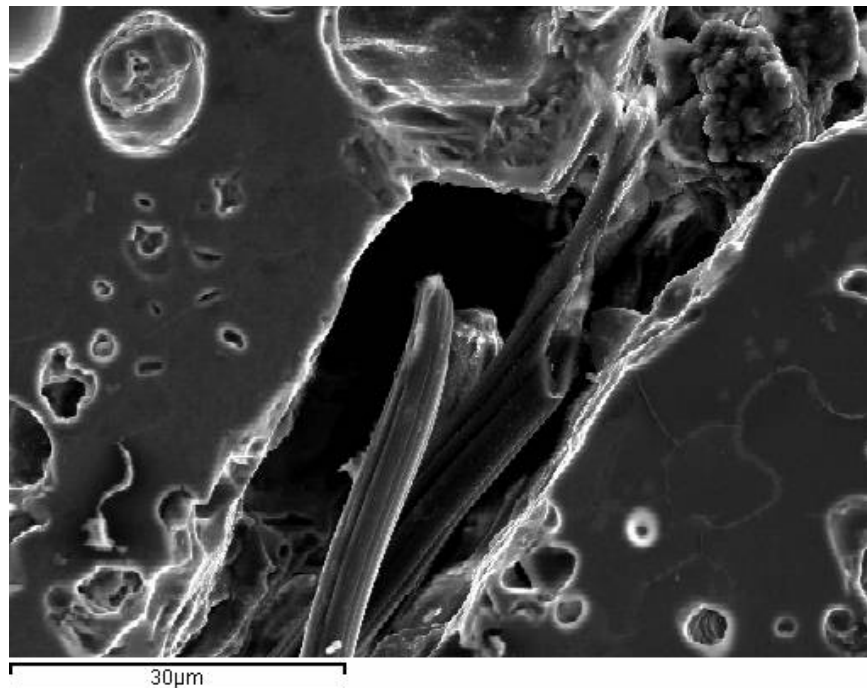


Figura nº 83.- Magnificación 400X

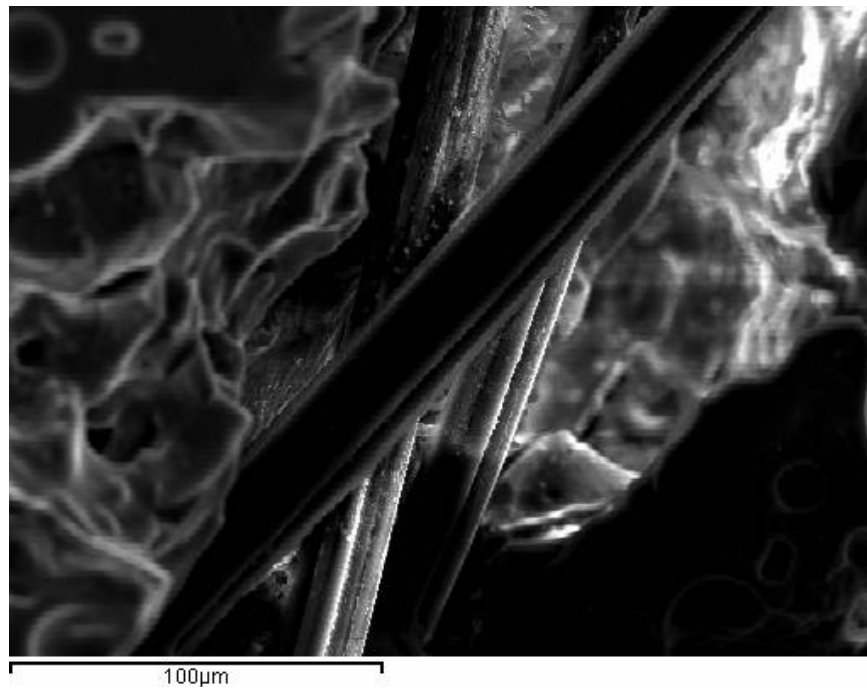


Figura nº 84.- Magnificación 500X





Figura n° 85.- Magnificación 1500X

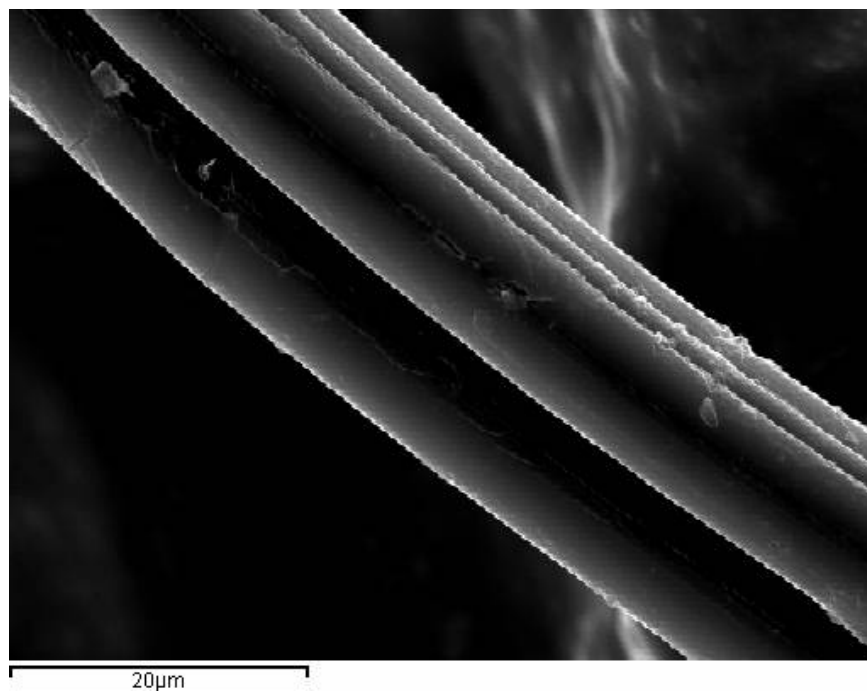


Figura n° 86.- Magnificación 2000X

probetas ceramicas reforzadas

31/07/2009 10:37:07

Project: probetas ceramicas reforzadas  
 Owner: Administrador  
 Site: Site of Interest 5

Sample: 15Tn  
 Type: Default  
 ID:

Spectrum processing :  
 Peak possibly omitted : 3.346 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
 Number of iterations = 6

Standard :  
 C CaCO3 1-jun-1999 12:00 AM  
 O SiO2 1-jun-1999 12:00 AM  
 Na Albite 1-jun-1999 12:00 AM  
 Si SiO2 1-jun-1999 12:00 AM  
 S FeS2 1-jun-1999 12:00 AM  
 Cl KCl 1-jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
CK	59.88	68.10
OK	32.98	28.15
NaK	4.60	2.73
SiK	0.23	0.11
SK	0.23	0.10
ClK	2.09	0.81
<b>Totals</b>	<b>100.00</b>	

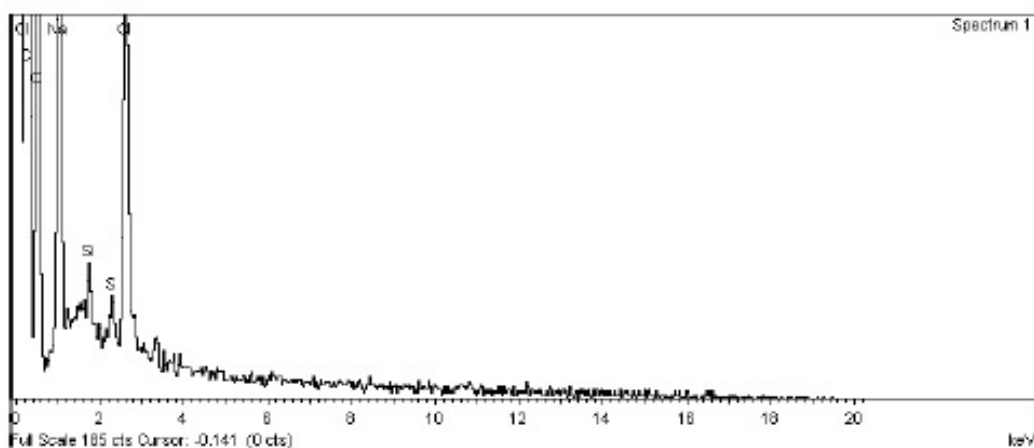
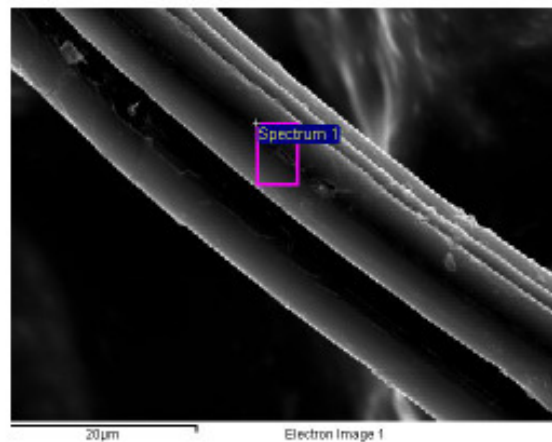


Figura nº 87.- Reporter del espectro 1, muestra nº 5, 15 Tn

- Muestra n° 5 prensado a 20 Tn.

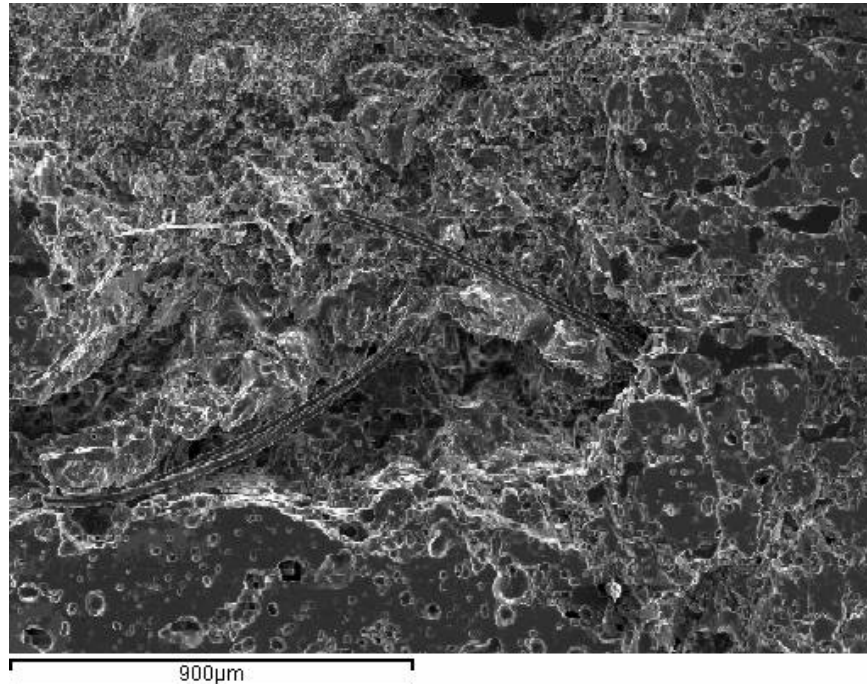


Figura n° 88.- Magnificación 60X

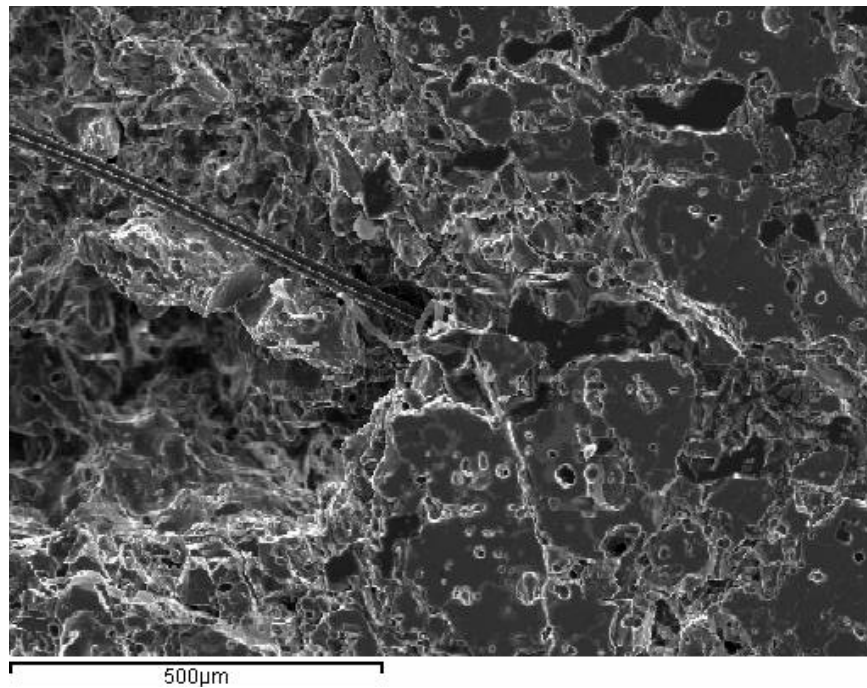


Figura n° 89.- Magnificación 100X

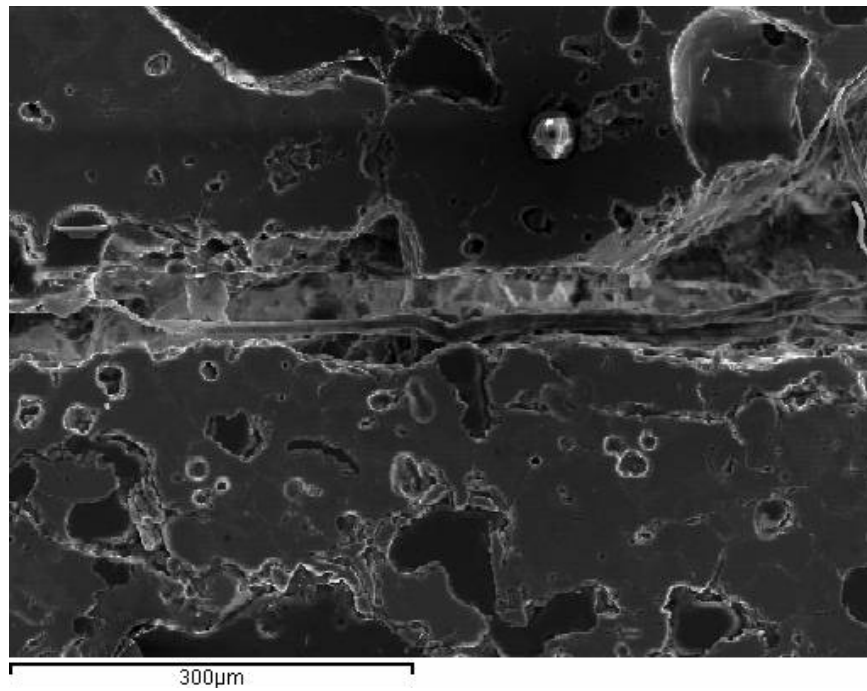


Figura nº 90.- Magnificación 180X

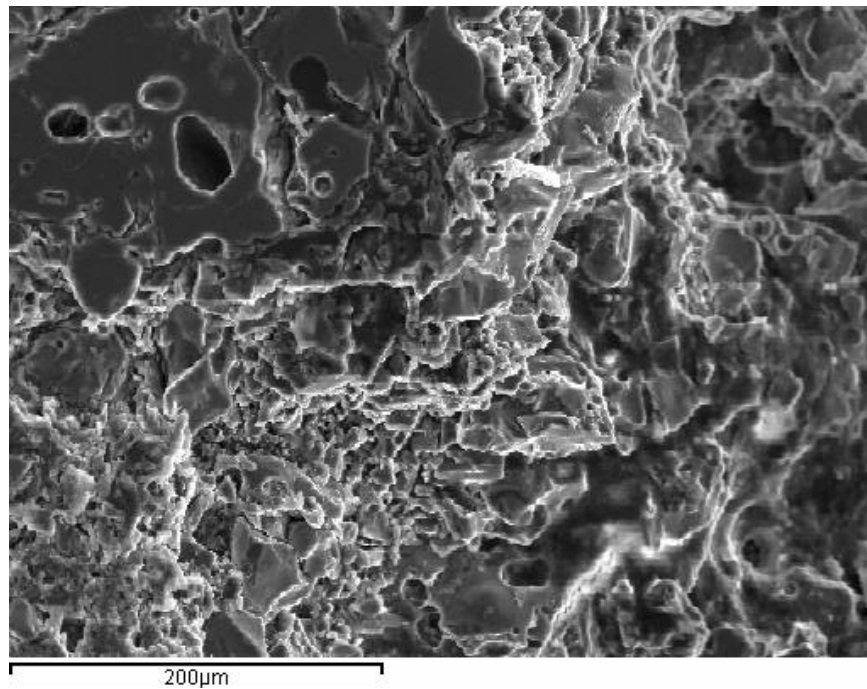


Figura nº 91.- Magnificación 250X

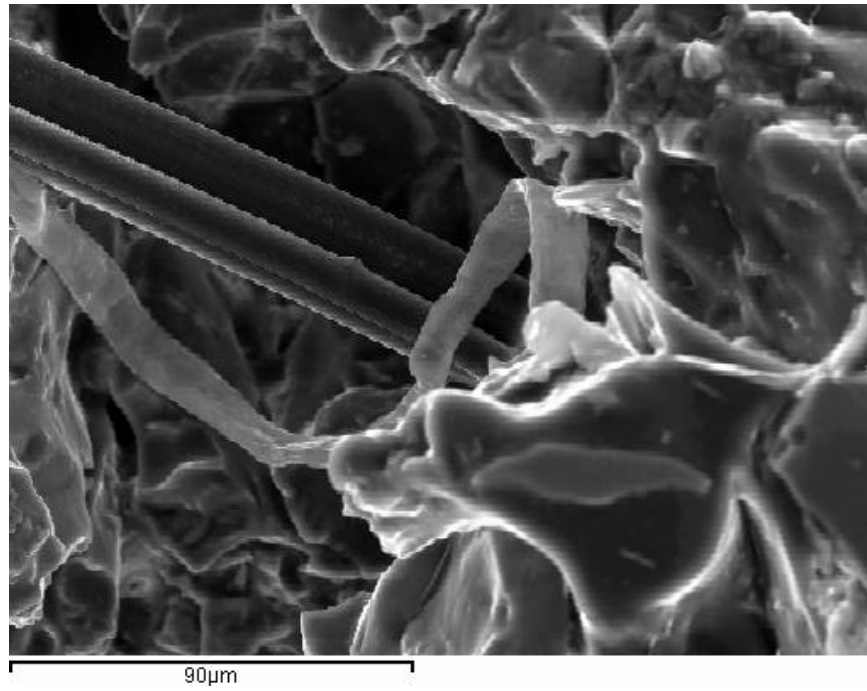


Figura n° 92.- Magnificación 600X

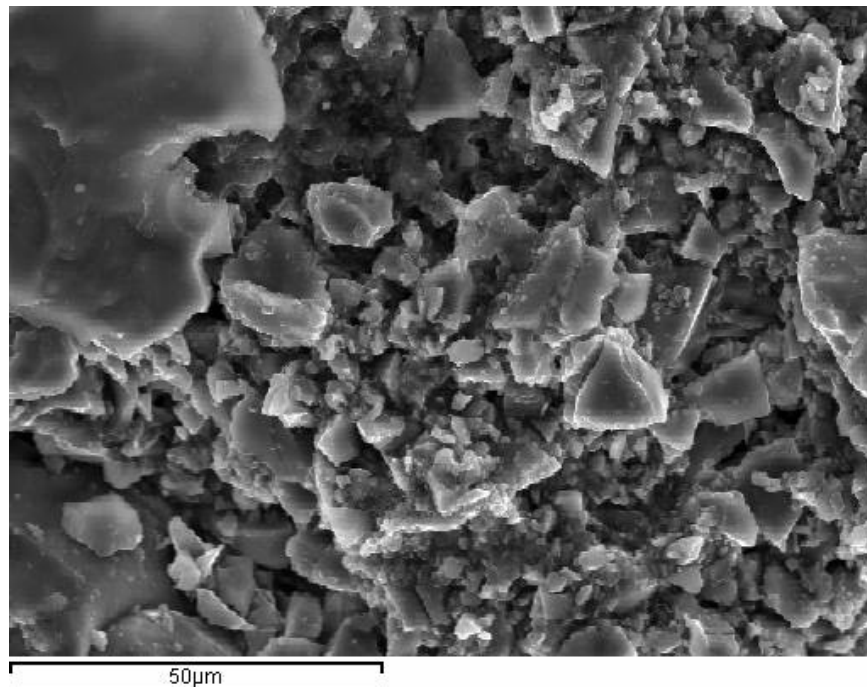


Figura n° 93.- Magnificación 1000X

#### 7.4. Ensayo mecánicos de las piezas.

En la figura nº 94, se muestra el esquema de la función del utillaje de ensayo para la flexión en tres puntos.

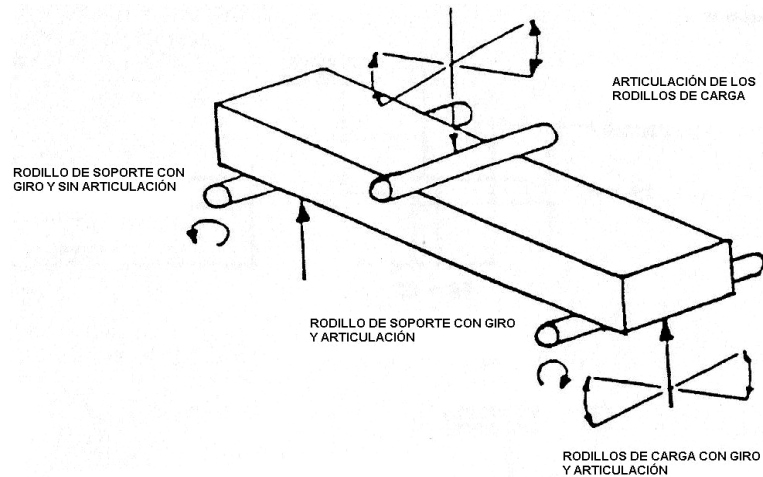


Figura nº 94.- esquema del ensayo de flexión de tres puntos

La probeta debe estar sujeta en dos aristas de apoyo perpendiculares a su eje longitudinal. Las aristas exteriores de apoyo deben ser rodillos paralelos de 2,5 mm  $\pm$  0,2 mm de diámetro y deben ser capaces de girar hacia el exterior sobre superficies planas del soporte. Uno de los rodillos, adicionalmente, debe ser capaz de girar alrededor de un eje paralelo al eje longitudinal de la probeta, con la finalidad de minimizar las fuerzas de torsión.

Los rodillos deben estar fabricados con acero endurecido, u otro material endurecido, con una dureza mayor que 40 HCR (Escala Rockwell C). Los rodillos deben tener un acabado superficial liso, libre de rebabas y con una rugosidad menor que 0,5  $\mu$ m, y deben tener un diámetro uniforme con una tolerancia de  $\pm$  2 mm.

En el ensayo de flexión a tres puntos, se instala un tercer rodillo en el punto medio entre los rodillos de soporte, y paralelamente a ellos. Este rodillo tiene el mismo diámetro que los rodillos de soporte e, igualmente, rotación libre alrededor de un eje paralelo al eje longitudinal de la probeta.

La máquina de ensayo debe ser capaz de aplicar la fuerza para una carga o velocidad de desplazamiento constante.

El ensayo de flexión en tres puntos, se realiza en el Instituto de Tecnología de los Materiales, de la Universidad Politécnica de Valencia.

Se han realizado ensayos de flexión de todas las formulaciones de acuerdo con la norma EN ISO 10545-4. De cada una de las formulaciones se ensayaron tres probetas. En la figura siguiente se muestran las gráficas correspondientes a la P5. En la figura n° 95, se presentan los resultados de los ensayos, correspondientes a la muestra n° 5.

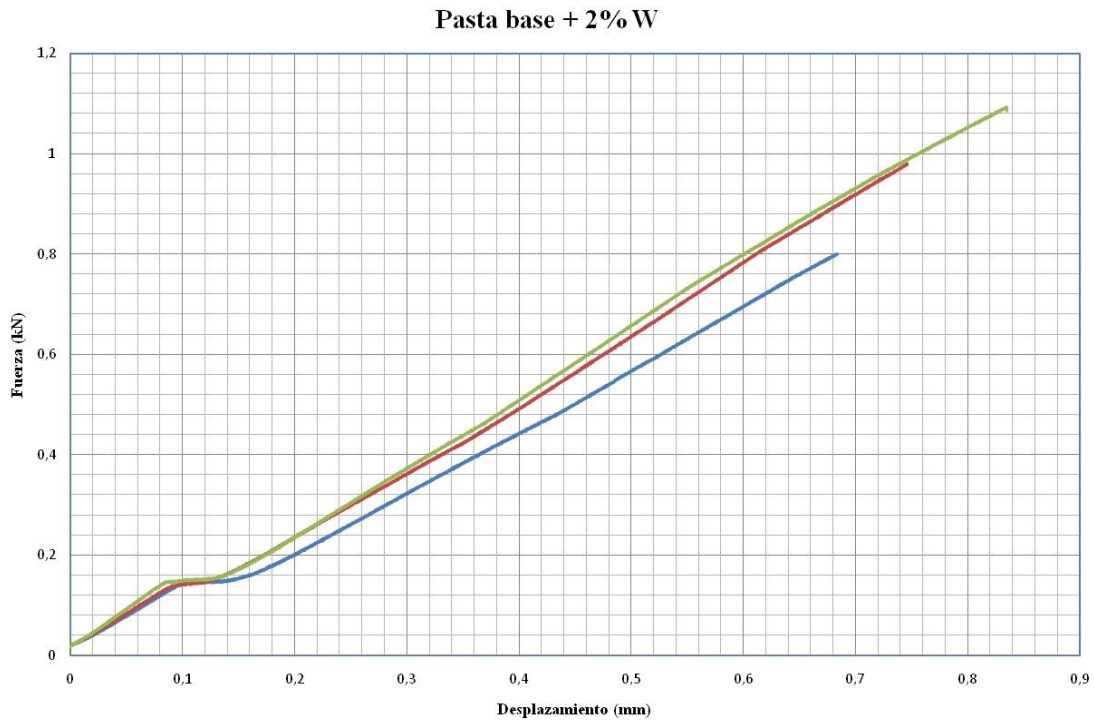


Figura n° 95.- gráfica del ensayo de flexión de las tres muestras correspondientes a la probeta n° 5

Identificación de las muestras	Composición	R (MPa)	Flecha en la rotura (mm)
PROBETA N° 1	Base	89'5±5'4	0'71±0'11
PROBETA N° 2	Base + 1% Wollastonita	122'2±4'1	0'82±0'09
PROBETA N° 3	Base + 6% Wollastonita	123'3±6'0	0'83±0'12
PROBETA N° 4	Base + 10% Wollastonita	117'3±5'2	0'84±0'10
PROBETA N° 5	Base + 2% Wollastonita	143'6±4'2	0'89±0'13
PROBETA N° 6	Base + 2% Alúmina	92'5±2'6	0'60±0'05
PROBETA N° 7	Base + 4% Alúmina	83'4±3'5	0'52±0'07
PROBETA N° 10	Base + 2% Wollastonita+ 1% Alúmina	122'5±6'7	0'68±0'11

Tabla n° 14.- Resultados de ensayos a flexión



## 7.5. Conclusiones sobre los resultados de los ensayos.

Se comprueba el efecto positivo de la wollastonita tanto en la resistencia como en la flecha, que a su vez, está relacionada con una mayor tenacidad. La alúmina no aporta efectos relevantes ni de forma individual, ni combinada con la wollastonita para la formulación base empleada para este estudio.

Teniendo en cuenta que hemos partido de una cerámica base, con una composición determinada. Esto supone una gran limitación sobre el estudio, puesto que es bien sabido que la arcilla (por ser un producto con materias primas de origen natural) tiene variaciones en su composición, impurezas, etc., que le hacen comportarse con ligeras variaciones. Además una cerámica de idéntica composición puede tener diferente estructura cristalina (polimorfismo).

Por todo ello, hubiese sido conveniente para profundizar en el presente estudio, realizar más ensayos de caracterización cerámica, con el fin de optimizar la formulación a utilizar en un proceso industrial real.

## 8. – Análisis económico.

Después de las pruebas realizadas y los resultados obtenidos en los ensayos, entendemos como una solución de mejora aceptable, aquella preparación realizada con la pasta base y un 2% de wollastonita.

Teniendo en cuenta la selección realizada, y dado que la wollastonita ya es empleada en la confección del atomizado suministrado a la industria, el empleo de un 2% más en peso de la wollastonita supone un incremento de precio prácticamente despreciable.

Según las fuentes consultadas, el precio de Wollastonita oscila entre los 280-400 €/tonelada, con un peso molecular de 116'16 gramos, el empleo de un 2% en peso de la pieza, cuando con la propuesta de solución se ahorra un 23% de materia prima, el coste de la aportación es ínfimo.

Otro factor que podría influir en el coste, son las modificaciones en el proceso productivo habitual. Dado que el producto se añade en forma de polvo y se mezcla con el atomizado, no hay que realizar ningún cambio ni adaptación significativa que represente un sobre coste.





## 9. – Conclusiones finales.

Tras el planteamiento inicial de tipología de refuerzos, y después de los resultados obtenidos con los refuerzos metálicos y los problemas que ocasionan, especialmente en la interfase, deberíamos apartarlo como una solución alternativa a los refuerzos cerámicos, al menos en la forma comercial, aunque nos constan estudios sobre el empleo de óxidos férricos modificados.

De los materiales “compatibles” se eligió la wollastonita, no sólo por su afinidad y por la facilidad de obtención, sino que además tiene a su favor el factor económico.

Dada la formulación básica de las baldosas, es aconsejable emplear alúmina, como mejora de las propiedades intrínsecas de resistencia de la formulación, y fibras de wollastonita a fin de mejorar sus condiciones de tenacidad, tan fundamentales para las aplicaciones de alto tránsito. Adicionalmente se puede mejorar con una molturación más fina de las partículas de cuarzo.

En general la mejora en dureza y tenacidad se relaciona con la presencia de mullita. Este compuesto aparece en la interfase entre la wollastonita y la matriz porcelánica durante la cocción. Adicionalmente, se puede controlar la presencia de mullita primaria con la velocidad de cocción, aunque resulta complejo realizarlo durante el proceso industrial.

Deben realizarse estudios previos en el empleo de la alúmina, puesto que, aunque mejora la resistencia, baja la tenacidad y dificulta el proceso industrial, al tener un efecto negativo sobre el material durante el prensado en verde.

Otros tipos de fibras de refuerzo son posibles pero no aceptables, debido a su elevado coste e impredecibles resultados ante la variabilidad de la materia prima.

A la vista de los resultados obtenidos en los distintos ensayos, se propone para obtener la mejora deseada con las dimensiones y propiedades requeridas, la ejecución de baldosas con botones en forma de semielipsoide circular de 2 mm de profundidad y 15 mm de diámetro (en cocido) distribuidos, bien en damero regular, o bien en geometría orientada según las tensiones principales. El espesor mínimo que deben tener las baldosas es de 11 mm., considerando el material base empleado en el presente estudio.

Por lo que respecta al refuerzo, se demuestra que la utilización de wollastonita en una proporción del 2% en peso es recomendable puesto que supone un ahorro de



material en torno al 23%. Se debería ampliar el presente estudio, mejorando la formulación de la pasta base, con el fin de obtener una mayor optimización de resultados.

## 10. – Referencias bibliográficas.

1. Materias primas en la fabricación de soportes. Instituto Tecnológico de la Cerámica (ITC).
2. Procesos de fabricación de baldosas cerámicas. Instituto Tecnológico de la Cerámica (ITC).
3. Normas UNE-EN ISO 14545, UNE-EN 14411, y UNE 138001.
4. Guía de la Baldosa Cerámica.
5. Código Técnico de la Edificación.
6. Fiber-reinforced bioactive and bioabsorbable hybrid composites. (Huttunen,M.; Tormala,P.; Godinho,P.; Kellomaki,M.), 2008.
7. Carbon nanotube reinforced ceramic composites and their performance (Arsecularatne,J.A.; Zhang,L.C), 2007.
8. Clay-based polymer nanocomposites: research and commercial development (Zeng,Q.H.; Yu,A.B.; Lu,G.Q.; Paul,D.R), 2005.
9. Prepn. of flooring material of synthetic resin|using two nonwoven fabrics with fibres oriented orthogonal to each other, inserted or laminated as reinforcement, etc. (TAJIMA KK ).
- 10.Mfr. of building tile reinforced by steel or glass fibres etc.|by compounding unsatd. polyester resin contg. polystyrene, copolymerisable monomer, with powdered porcelain as reinforcement (KURARAY CO LTD; KOSHO KK ).
- 11.Compactación continua de placas cerámicas reforzadas con fibras altamente resistentes (A. Bresciani, C.Ricci), 2006.
12. AlPO<sub>4</sub>-coated mullite/alumina fiber reinforced reaction-bonded mullite composites (Yahua Bao, Patrick S. Nicholson), 2008.



13. Influence of cassava starch content and sintering temperature on the alumina consolidation technique (F.A. Almeida , E.C. Botelho, F.C.L. Meloc, T.M.B. Campos, G.P. Thimc,), 2008.
14. Thermal and physical characterisation of apatite/wollastonite bioactive glass–ceramics (Valeria Cannillo a, Fiorenza Pierli a, Sanjay Sampath b, Cristina Siligardi), 2008.
15. Preparation of double-layer glass-ceramic/ceramic tile from bauxite tailings and red mud (Huizhi Yang , Changping Chenb, Lijun Pan , Hongxia Lu, Hongwei Sun, Xing Hu), 2008.
16. Development of a roadmap for advanced ceramics: 2010–2025 (Jürgen Rödel, Alain B.N. Kounga, Marion Weissenberger-Eibl , Daniel Koch, Antje Bierwisch , Wolfgang Rossner , Michael J. Hoffmann, Robert Danzer, Gerhard Schneider), 2008.
17. Ceramic toughness assessment through edge chipping measurements— Influence of interfacial friction (F. Petit, V. Vandeneede, F. Cambier), 2008.
18. Induced crystallization porosity and properties of sintered diopside and wollastonite glass-ceramics (Alexander Karamanov , Mario Pelino), 2007.
19. Effect of pyrolyzation temperature on wood-derived carbon and silicon carbide (K.E. Pappacena, S.P. Gentry, T.E. Wilkes, M.T. Johnson, S. Xie, A. Davis, K.T. Faber), 2009.
20. Development and characterisation of high-density oxide fibre-reinforced oxide ceramic matrix composites with improved mechanical properties (C. Kayaa, F. Kaya, E.G. Butler, A.R. Boccaccini, K.K. Chawla), 2008.
21. Fracture statistics of ceramic laminates strengthened by compressive residual stresses (Javier Pascual, Tanja Lubea, Robert Danzer), 2007.
22. Interface engineering in mullite fiber/mullite matrix composites (K.K. Chawla), 2007.
23. Kinetics of alumina segregation in mullite ceramics (P. Fielitz , G. Borchardt, P. Mechnich, M. Schmücker), 2007.



24. Microstructure and mechanical properties of C/C–SiC composites fabricated by a rapid processing method (Jiping Wang, Min Lin, Zhuo Xu, Yonghui Zhang, Zhongqi Shi, Junmin Qian, Guanjun Qiao, Zhihao Jin), 2008.
25. Structure and properties of mullite—A review (H. Schneider, J. Schreuer, B. Hildmann), 2007.
26. Mechanical properties of textured ceramics from muscovite–kaolinite alternate layers (F. Gridi-Bennadji, D. Chateigner, G. Di Vita, P. Blanchart), 2009.
27. Processing and properties of a mica–apatite glass–ceramic reinforced with Y-PSZ particles (M. Montazerian, P. Alizadeh, B. Eftekhari Yekta), 2008.
28. In vitro characterisation of plasma-sprayed apatite/wollastonite glass–ceramic biocoatings on titanium alloys (V. Cannillo, J. Colmenares-Angulo, L. Lusvardi, F. Pierli, S. Sampath), 2008.
29. Thermal shock resistance and fracture toughness of liquid-phase-sintered SiC-based ceramics (Alexandra Kovalčíková, Ján Dusza, Pavol Sajgalík), 2008.
30. Apuntes asignatura “Comportamiento mecánico de los materiales. Elasticidad”, (profesor: Fernando Fargueta), 2008.
31. Apuntes asignatura “Comportamiento mecánico de los materiales. Plasticidad”, (profesor: Francisco D. Denia Guzmán), 2008.
32. Apuntes asignatura “Técnicas y aplicación de los materiales I”, (profesor: Carlos Ferrer Giménez), 2008.
33. Apuntes asignatura “Materias Primas y productos manufacturados en el sector cerámico”, (profesor: Javier Orozco Messana), 2008.
34. Apuntes asignatura “Diseño aplicado al sector cerámico”, (profesor: Javier Orozco Messana), 2009.
35. Apuntes asignatura “Técnicas y aplicación de los materiales II”, (profesor: Javier Orozco Messana), 2009.
36. Apuntes asignatura “Ensayos y comportamiento en servicio de materiales en el sector cerámico”, (profesora: Isabel Rodríguez Abad), 2009.