



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE MATERIALES CERÁMICOS FABRICADOS CON RESIDUOS MINEROS.

Alumno: Ana M^a Fernández Jiménez.

**Tutor: Prof. D. Francisco Javier Iglesias Godino.
Depto.: Ingeniería Química, Ambiental y de los
Materiales.**

Septiembre, 2021

ÍNDICE.

Índice de figuras.	4
Índice de tablas.	5
Resumen.	6
Abstract.	7
1. Introducción.	8
2. Objetivos.	12
2.1. Objetivos técnicos.	12
2.2. Objetivos ambientales	13
2.3. Objetivos económicos.	13
2.4. Objetivos estratégicos.	14
3. Estado del arte.	15
3.1. Residuos.	15
3.2. Materiales cerámicos.	18
3.3. Proceso de formación de materiales cerámicos.	21
3.4. Valorización de subproductos industriales en los materiales cerámicos.	23
3.4.1. Principales subproductos industriales.	24
3.4.2. Normativa vigente en materia de gestión de residuos.	25
4. Materiales y metodología.	27
4.1. Materiales.	27
4.1.1. Arcillas.	27
4.1.2. Suelo.	28
4.2. Metodología.	28
4.2.1. Caracterización físico química de los materiales.	29
4.2.1.1. Densidad real.	30
4.2.1.2. Límite líquido.	30
4.2.1.3. Índice de plasticidad.	31
4.2.1.4. Análisis elemental.	32
4.2.1.5. Pérdida por calcinación.	33
4.2.1.6. Fluorescencia de rayos X.	33
4.2.2. Conformado de probetas. Ensayos físicos, mecánicos y colorimétricos.	34
4.2.2.1. Determinación de la contracción lineal posterior a sinterización UNE – EN 772-16.	36

4.2.2.2. Determinación de la pérdida de peso, tras la Sinterización de las probetas.	37
4.2.2.3. Determinación de la absorción de agua por capilaridad (succión). UNE-EN 772-11.	37
4.2.2.4. Determinación de la absorción de agua en frío 24h. UNE-EN 772-21.	38
4.2.2.5. Determinación de la absorción de agua hirviendo, densidad aparente y porosidad abierta. Norma ASTM – C373: 1994 a	38
4.2.2.6. Determinación de la resistencia a la compresión mediante norma UNE-EN-772-1:2011+A ₁ .	39
4.2.2.7. Ensayo colorimétrico.	40
4.2.3. Ensayos de lixiviación a las diferentes familias de probetas	40
4.2.3.1. Espectrometría de masas por plasma de acoplamiento inductivo (ICP-Masas).	41
4.2.4. Análisis del ciclo de vida de los materiales cerámicos conformados con suelo contaminado.	43
5. Resultados y discusión.	45
5.1. Resultados de caracterización físico-química de los materiales utilizados.	45
5.1.1. Densidad real.	45
5.1.2. Límite líquido e índice de plasticidad.	46
5.1.3. Ensayo de análisis elemental.	46
5.1.4. Pérdida por calcinación	47
5.1.5. Fluorescencia de rayos X.	48
5.2. Conformado de probetas. Ensayos físicos, mecánicos y colorimétricos.	50
5.2.1. Determinación de la contracción lineal en probetas sinterizadas.	50
5.2.2. Determinación de la pérdida de peso.	51
5.2.3. Determinación de la absorción de agua por capilaridad (succión).	52
5.2.4. Determinación de la absorción de agua en frío 24h.	54
5.2.5. Determinación de la absorción de agua hirviendo, densidad aparente y porosidad abierta.	55
5.2.6. Determinación de la resistencia a compresión.	58
5.2.7. Resultado del ensayo de colorimetría.	60
5.3. Ensayos de lixiviación.	61

5.3.1. Espectrometría de masas por plasma de acoplamiento inductivo (ICP-masas).	61
5.4. Análisis del ciclo de vida de los materiales cerámicos conformados con suelo contaminado.	66
6. Conclusiones.	69
7. Líneas futuras de investigación.	72
8. Bibliografía.	73

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1.- Principales objetivos de la economía circular clasificados por área de aplicación.	10
Figura 2.- Procesos y generación de residuos en una explotación minera metálica.	11
Figura 3.- Solidificación de materiales cristalinos y vítreos.	19
Figura 4.- Materiales Cerámicos Avanzados.	21
Figura 5.- Proceso de conformación de materiales cerámicos.	21
Figura 6.- Proceso de fabricación de materiales cerámicos.	23
Figura 7.- Proceso de conformado y caracterización de probetas.	30
Figura 8.- Representación gráfica contracción lineal.	49
Figura 9.- Representación gráfica pérdida de peso.	50
Figura 10.- Representación gráfica succión.	51
Figura 11.- Representación gráfica absorción en frío 24 h.	52
Figura 12.- Representación gráfica absorción agua hirviendo.	54
Figura 13.- Representación gráfica densidad aparente.	55
Figura 14.- Representación gráfica porosidad.	56
Figura 15.- Representación gráfica resistencia a compresión.	57
Figura 16.- Probetas.	58
Figura 17.- Representación gráfica concentración de cromo.	60
Figura 18.- Representación gráfica concentración de plomo.	61
Figura 19.- Representación gráfica concentración de arsénico.	62
Figura 20.- Representación gráfica concentración de cadmio.	63
Figura 21.- Representación gráfica concentración de bario.	64
Figura 22.- Calentamiento global, en kg de CO ₂ equivalente por tonelada de ladrillo fabricado, de las diferentes etapas necesarias para la fabricación de un cerámico tradicional.	67
Figura 23.- Calentamiento global, en kg de CO ₂ equivalente por tonelada de ladrillo fabricado, de las diferentes familias de cerámicos conformadas con suelo contaminado.	68

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1.- Familias de probetas conformadas.	35
Tabla 2.- Densidad real suelo.	43
Tabla 3.- Densidad real arcilla.	43
Tabla 4.-Resultados límites de Atterberg.	44
Tabla 5.-Resultado análisis elemental suelo.	45
Tabla 6.-Resultado análisis elemental arcilla.	45
Tabla 7.-Resultado pérdida por calcinación.	45
Tabla 8.- Resultado FRX suelo.	46
Tabla 9.- Resultado FRX arcilla.	47
Tabla 10.- Resultado de contracción lineal.	48
Tabla 11.- Resultado de pérdida de peso.	49
Tabla 12.- Resultado succión.	51
Tabla 13.- Resultado absorción en frio 24 h.	52
Tabla 14.- Resultado absorción agua hirviendo.	53
Tabla 15.- Resultado densidad aparente.	54
Tabla 16.- Resultado porosidad.	55
Tabla 17.- Resultado de resistencia a compresión.	57
Tabla 18- Resultado colorimetría.	58
Tabla 19.- Límites máximos permisibles establecidos por la EPA.	59
Tabla 20.- Resultado concentración de cromo.	59
Tabla 21.- Resultado concentración de plomo.	60
Tabla 22.- Resultado concentración de arsénico.	61
Tabla 23.- Resultado concentración de cadmio.	62
Tabla 24.- Resultado concentración de bario.	63

RESUMEN.

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es el estudio de la retención de elementos contaminantes procedentes de residuos mineros en materiales cerámicos para la producción de ladrillos.

Estos residuos procedentes del distrito minero de Linares producen una contaminación ambiental importante, pues se han depositado durante décadas a la intemperie, al no estar contemplado su tratamiento en las normativas ambientales de la época.

Para paliar estos efectos, en este trabajo fin de grado se procede a la caracterización del residuo minero y obtención de su composición química, encontrándose, en alguno de los casos, elementos contaminantes y perjudiciales para el medio ambiente. Posteriormente, se fabrican materiales cerámicos con distintos porcentajes de residuo minero valorizando estos y reduciendo el consumo de materias primas. Finalmente, se analiza las afecciones ambientales producidas por la fabricación de cerámicos tradicionales y por los nuevos cerámicos desarrollados en esta investigación que incorpora suelo contaminado.

Se estudiará el comportamiento de la adición de estos en matriz cerámica, a partir de sus propiedades físicas y mecánicas después del proceso de conformación, así como, análisis de lixiviados para cuantificar la retención de los elementos contaminantes en el residuo y las afecciones ambientales.

Finalmente, se determinará el porcentaje máximo de residuo minero que se incorporará en el material cerámico para obtener unas propiedades aceptables según la normativa vigente.

ABSTRACT.

The main objective of this Bachelor Thesis is the study of the retention of polluting elements from mining waste in ceramic materials for the production of bricks.

These wastes from the Linares mining district produce significant environmental contamination, since they have been deposited in the open for decades, as their treatment was not contemplated in the environmental regulations of the time. To alleviate these effects, in this Bachelor Thesis we proceed to characterize the mining waste and obtain its chemical composition, finding, in some cases, polluting elements that are harmful to the environment. Subsequently, ceramic materials with different percentages of mining waste are manufactured, valuing these and reducing the consumption of raw materials. Finally, the environmental effects produced by the manufacture of traditional ceramics and by the new ceramics developed in this research, which incorporate contaminated soil, are analysed.

The behavior of the addition of these in ceramic matrix will be studied, based on their physical and mechanical properties after the shaping process, as well as leachate analysis to quantify the retention of polluting elements in the residue and environmental impacts.

Finally, the maximum percentage of mining residue that will be incorporated into the ceramic material to obtain acceptable properties according to current regulations will be determined.

1. INTRODUCCIÓN.

La historia de la ciudad de Linares siempre ha estado directamente vinculada a la minería. Los filones de plomo atrajeron a distintos pueblos y culturas hasta este enclave. En los siglos XVII y XVIII la actividad minera aumenta considerablemente, centrándose fundamentalmente en la extracción de plomo. En el siglo XIX Linares se consolida como uno de los centros más importantes de la provincia de Jaén. Será con la llegada de nuevas maquinarias y técnicas de minería, así como nuevos medios de transporte como el ferrocarril, cuando Linares alcance los años de mayor apogeo. El ferrocarril facilita la salida del mineral y de los productos derivados, así como posibilita la llegada de emigrante. En el siglo XX la actividad minera decae, hasta el punto de que cierran todas las minas. A partir de este momento, todos los residuos quedan depositados a la intemperie suponiendo un importante foco de contaminación ambiental.

La gestión sostenible del medioambiente y los recursos naturales es esencial para el crecimiento económico y el bienestar humano. Solamente a través de una adecuada gestión de los recursos naturales se podrá desarrollar una sociedad de forma sostenible, con un ecosistema saludable donde el agua, el aire y la tierra no resulten contaminados como consecuencia de los vertidos residuales. Dichos ecosistemas, además de reputar elevados beneficios económicos para la sociedad, son cruciales para el progreso de determinados sectores económicos como son la agricultura, la ganadería, la pesca o el turismo.

El modelo económico actual es un modelo lineal, basado en un esquema que consiste en extraer, producir y tirar. Este modelo es agresivo con el medio y tarde o temprano agotará las fuentes de suministro, tanto materiales como energéticas. Además, en este tipo de economía hay una fuerte dependencia de las materias primas, lo que conlleva riesgos asociados al suministro y precios elevados de las mismas con mucha volatilidad. También acarrea una reducción significativa del capital natural. Y eso sin contar con las pérdidas económicas que conlleva.

Este modelo lineal fomenta el consumo a corto plazo y contribuye por tanto al agotamiento de recursos. Hemos llegado a creernos la hipótesis de que disponemos de ellos de manera infinita y barata. Pero esto no es así. En el modelo lineal las empresas producen bienes y servicios, los consumidores los utilizan y consumen. Después, las empresas sacan nuevos productos y servicios, los consumidores dejan de utilizar los que se han quedado viejos y compran los nuevos... Y vuelta a empezar.

La alternativa al modelo lineal es la economía circular. Básicamente se trata de un sistema de aprovechamiento de recursos. Todo puede reaprovecharse de manera continua en diferentes etapas. Pero, ¿economía circular es lo mismo que reciclaje? La respuesta corta es no. Reciclar es sólo una pequeña parte del proceso. La economía circular hace referencia a un concepto que tiene sus miras puestas más allá del reciclaje. Su esencia pretende englobar todo el ciclo productivo. Esto incluye la utilización con eficiencia de materiales y energía.

Por tanto, el reciclaje no es suficiente para conseguir un modelo productivo respetuoso con el medio ambiente. El diseño ecológico, la responsabilidad de los productores y la concienciación del consumidor se añaden a las clásicas “cuatro erres” en esta nueva visión comercial: Reducir, Reutilizar, Reparar y Reciclar. La economía circular implica dar un paso más allá del reciclaje. El concepto engloba un campo mucho más amplio, ya que abarca el ciclo completo de producción, incluyendo el uso eficiente de materias primas, la optimización de los recursos energéticos y la minimización de riesgos medioambientales.

Existe la necesidad de examinar objetivos vinculados a la economía circular, vinculados a sectores económicos o características geográficas. La Figura 1 proporciona una representación gráfica de los objetivos de la economía circular, que también son los objetivos más comúnmente aplicados en los sistemas económicos. Estos objetivos se pueden agrupar en cinco áreas principales de aplicación: eficiencia, reciclaje, recuperación, reducción y diseño. Las superposiciones que se observan en la Figura 1 ocurren debido a su alto nivel de interconexiones, por ejemplo, los objetivos de reducción de desechos pueden relacionarse con la eficiencia del material, mientras que el diseño puede tener consecuencias para todas las demás áreas. En un espíritu heurístico, este aspecto se transmite en la Figura 1 por las superposiciones entre los ciclos que representan las áreas de aplicación de los objetivos.

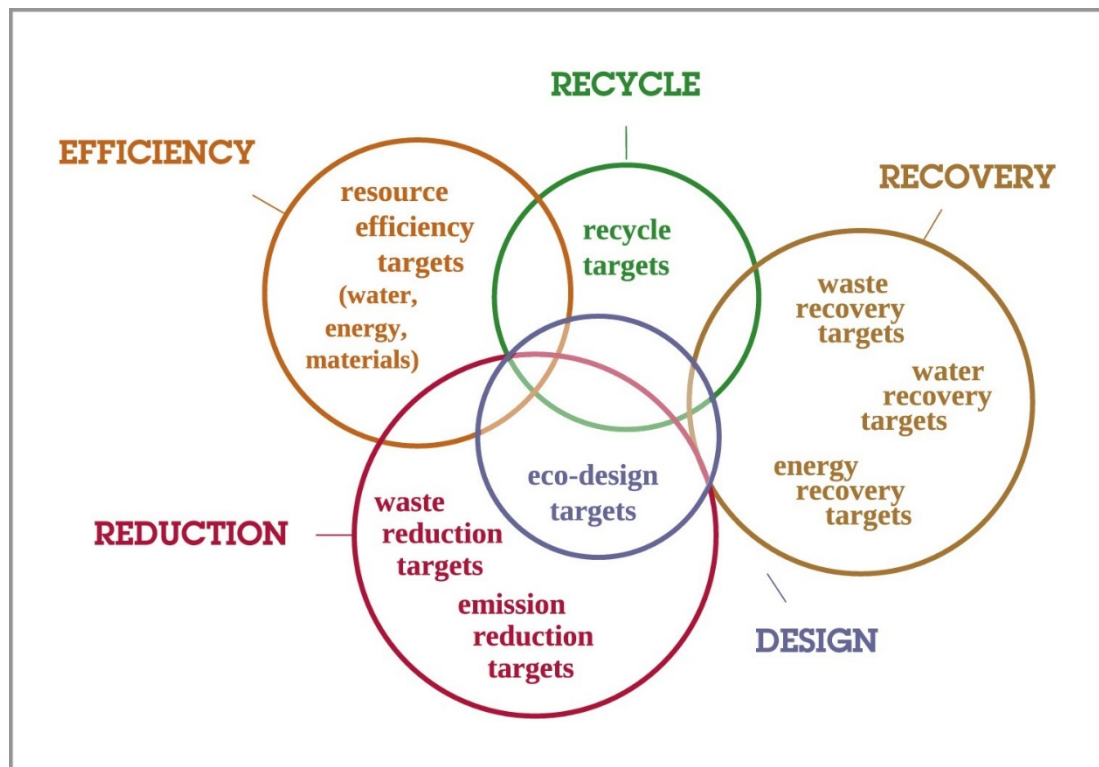


Figura 1.- Principales objetivos de la economía circular clasificados por área de aplicación.

La minería constituye un caso especial en lo que a generación de residuos se refiere. En líneas generales, para obtener el producto a comercializar es necesario extraer una gran cantidad de materiales estériles que, por motivos económicos, se disponen en las proximidades de la explotación. Adicionalmente, para alcanzar la pureza o concentración requeridos para la puesta en mercado del producto deseado, se precisa someter la masa mineralizada extraída a una serie de procesos en los que se generan residuos.

Hasta fecha muy reciente, no existía una normativa que tipificara los residuos que se generan en las explotaciones mineras. Actualmente, la apertura de una nueva mina debe contemplar una serie de requisitos ambientales que influyen en gran medida en la viabilidad económica del proyecto. Sin embargo, existe un pasivo medioambiental derivado de las explotaciones abandonadas que constituye un problema a nivel autonómico, nacional y europeo.

En la mayoría de las explotaciones mineras se encuentran presentes, en mayor o menor medida, una serie de procesos conducentes a conseguir este enriquecimiento del producto a comercializar.

En un esquema genérico, los procesos y generación de residuos en una explotación minera metálica pueden sintetizarse como sigue:

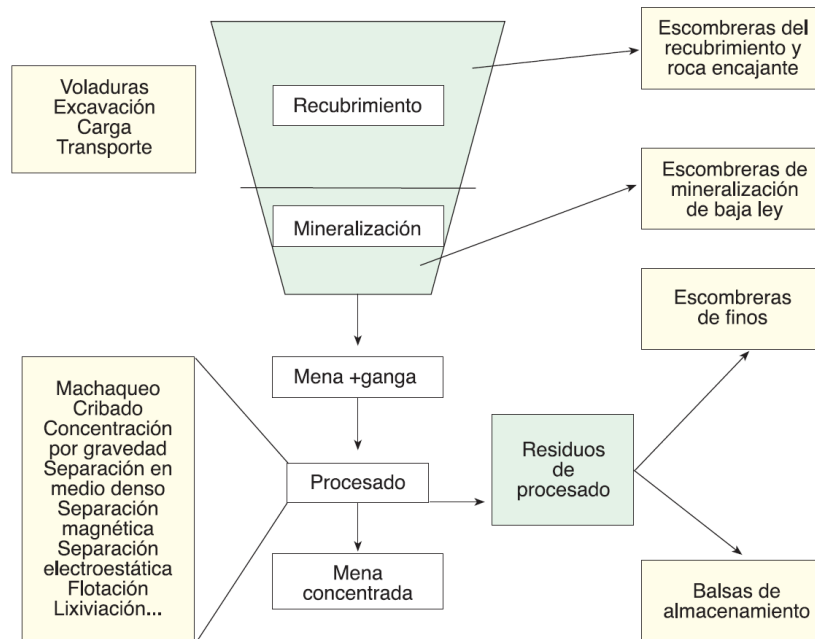


Figura 2.- Procesos y generación de residuos en una explotación minera metálica.

La problemática del suelo surge cuando la escombrera, expuesta a la intemperie, sufre transformaciones que provocan la movilización de los metales que se encuentran en los minerales del yacimiento. Esto provoca la generación de aguas ácidas de mina (AMD). En concreto, en la zona de la fundición de la Cruz, se extraían minerales ricos en plomo, pero también contenían cobre, zinc y arsénico. En el caso del suelo a estudio los metales encontrados han sido zinc, plomo, cadmio, arsénico y bario. Esto se debe a que el suelo de la zona es de caliza y por tanto su pH es 7 - 8 lo que provoca la disolución en dichas aguas. Los residuos están depositados en una zona más alta y las AMD los han trasladado hasta la zona más baja, y tras la evaporación, ha quedado el suelo cubierto con una capa salina provocando la contaminación del mismo.

Para intentar acabar con esta problemática habría que eliminar los depósitos de residuos, reutilizar el suelo contaminado, y así, conseguir su renovación. Para valorizar el residuo se va a incorporar junto a la arcilla para la elaboración de ladrillos.

2 OBJETIVOS.

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es la retención en matriz cerámica de los elementos contaminantes procedentes de residuos mineros generados por la explotación de la zona y que están depositados a la intemperie sin ningún tipo de control desde el cese de la actividad hace décadas, para obtener un producto cerámico de menor coste, y con características físicas y mecánicas adecuadas según la normativa vigente.

Para ello se realizará un trabajo experimental basado en una investigación objetiva capaz de determinar la aptitud del material conformado para su uso en el sector de la construcción, definiéndose, una serie de objetivos específicos que deben cumplirse en la investigación y que se detallan a continuación subdivididos en varios grupos, tales como objetivos técnicos, medioambientales, económicos y estratégicos.

2.1. Objetivos técnicos.

La metodología que se ha empleado para retener en una matriz cerámica los elementos contaminantes de los residuos mineros mencionados anteriormente, creando un producto cerámico comercializable, se basa en los siguientes objetivos:

- Actualización tecnológica, normativa y análisis del estado del arte, para conocer experiencias anteriores en el tratamiento de este tipo de subproductos, y más concretamente, en materiales cerámicos.
- Caracterización físico - química de los residuos procedentes de la actividad minera, determinado sus propiedades físicas, así como los elementos químicos presentes en las mismas, para evaluar posteriormente su aptitud en el empleo como aditivo en materiales cerámicos.
- Estudio del lixiviado de los residuos sin alterar para posteriormente, una vez conformados los materiales cerámicos con porcentajes crecientes de adición de los mismos, evaluar la retención producida de los elementos contaminantes en estudio.
- Conformación de diferentes familias de probetas con porcentajes crecientes de adición de residuo minero.

- Estudio del abanico posible de adiciones del residuo minero desde el mínimo al máximo permitido, según las propiedades mecánicas y físicas reflejadas en comparación con la normativa vigente sobre materiales cerámicos.
- Estudio del lixiviado de las familias de probetas a través del ensayo espectrometría de masas por plasma de acoplamiento inductivo (ICP-masas), para confirmar y cuantificar la retención de los elementos contaminantes en matriz cerámica en comparación con la muestra lixiviada del residuo inalterado.
- Estudio de las características estéticas a través de ensayos de colorimetría capaz de evaluar objetivamente el color, y a su vez, mostrar la aceptación en el mercado de los materiales cerámicos conformados.
- Análisis de los resultados obtenidos con el fin de proporcionar el mayor número posible de soluciones que cumplan la normativa vigente sobre materiales cerámicos, y crear una gama de colores aceptables por el mercado.

2.2. Objetivos ambientales.

Este Trabajo Fin de Grado considera la reutilización y el reciclaje dentro de la economía circular, ya que parte de un subproducto sin uso y altamente contaminante se emplea como materia prima para la conformación de un nuevo producto.

En base a esto se producen diferentes beneficios en materia ambiental, el primero de ellos surge de la utilización de un material contaminante por su composición química, el cual, tras el proceso detallado queda inactivo y sin afección para el medio ambiente; por otra parte, se utiliza un subproducto ambiental de nulo valor económico reduciéndose la extracción de nuevas materias primas con el consiguiente impacto ambiental y generación de gases; y finalmente, se produce un producto de estudiada viabilidad y comportamiento en servicio, estableciéndose una reducción de afección al medio ambiente en todas las fases del ciclo de vida del elemento.

2.3. Objetivos económicos.

Los objetivos económicos dependen de la empresa que conforma el proyecto. En este sentido, la empresa fabricante de materiales cerámicos, principalmente ladrillo, evita la utilización de parte de las materias primas al incorporar este subproducto en su proceso,

evitando las laboriosas y costosas labores de extracción de la arcilla. A su vez, el material producido cuenta con un menor coste de fabricación, y, por lo tanto, se establece como más competitivo en el mercado.

2.4. Objetivos estratégicos.

El ámbito de aplicación de este Trabajo Fin de Grado es principalmente local, ya que, tanto la zona donde están depositados los residuos como la productora de materiales cerámicos se encuentran a una distancia inferior a 20 km. De esta forma, situándose el interés del presente proyecto en la provincia de Jaén (provincia desfavorecida y con tasa importante de desempleo) crea una industria nueva, favorable con el medio ambiente y competitiva con el fin primordial de crear un material de calidad y sostenible.

Dada la creciente conciencia medioambiental de la población, se considera adecuada la aceptación del material conformado, siendo un estímulo para la economía de la zona con el consiguiente aumento de la competitividad de las empresas productoras, y, por lo tanto, la generación de nuevos puestos de trabajo en el entorno.

3. ESTADO DEL ARTE.

3.1. Residuos.

Un residuo es un bien u objeto que se obtiene a la vez que el producto principal, incluyendo los que no se pueden aprovechar, como los que simplemente subsisten después de cualquier tipo de proceso.

Los residuos se clasifican:

- Urbanos.
- Agrarios.
- Clínicos.
- Radiactivos.
- Industriales.

Los residuos industriales aparecen tras un proceso de fabricación, transformación, utilización, consumo o, limpieza, y se destinan al abandono, al no ser objeto directo de sus procesos productivos. Así, podemos hacernos una idea de la variedad de residuos industriales que se generan en las múltiples actividades o procesos industriales. No obstante, muchos de los residuos industriales pueden ser recuperados y utilizados como materia prima en distintos procesos de ciertas actividades, pero este reprocesamiento está en función de la rentabilidad del mismo. Si su reutilización es rentable, se convertirá de nuevo en materia prima, si no, pasará a ser un residuo más.

Los residuos industriales, por tanto, podrían clasificarse en:

- Residuos inertes. Son aquellos que no suponen un riesgo para el medio y que pueden ser utilizados como material de relleno. Se trata, fundamentalmente, de chatarras, escombros, lodos inertes, escorias, etc.
- Residuos asimilables a urbanos. Se trata de la "basura" generada en distintas instalaciones de las industrias como cocinas, oficinas, comedores, salas de descanso; los residuos producidos en elector hostelero, en actividades comerciales, etc. que requieren el mismo tratamiento que los residuos domésticos.

- Residuos identificables. Se trata de todos aquellos "residuos que requieren una gestión específica y diferenciada, ya que, al final del uso de determinados productos, por su volumen o inadecuada gestión se crean problemas medioambientales" Se incluirían en este grupo los neumáticos, fluorescentes, electrodomésticos, baterías, vehículos usados, etc.
- Residuos especiales. Son aquellos que por sus características suponen un grave riesgo para el medio ambiente por lo que requieren un tratamiento específico bajo condiciones especiales. Se trata de unos residuos que, por su peligrosidad y posibles efectos nocivos para la salud del hombre y los organismos vivientes, han de ser controlados rigurosamente.

La gestión de residuos es el conjunto de actividades necesarias para el tratamiento de los desechos, desde su generación, hasta su eliminación o reaprovechamiento. Eso incluye la recogida de los residuos, su transporte, la gestión de los que son especialmente peligrosos, el reciclaje de los materiales aprovechables

La gestión de residuos ha cobrado una gran importancia por motivos ecológicos y económicos.

Inicialmente la gestión de los residuos se basaba en transportarlos a un lugar apartado y usar la incineración como método de destrucción, de ahí se ha pasado a todo un proceso de reciclaje.

Además, se ha mejorado la concienciación sobre la generación de residuos, lo que ha influido en el diseño de los productos, y el consumo de los mismos, para generar menos desperdicio.

Así, los objetivos actuales de la gestión de residuos son:

- Minimizar en lo posible su generación.
- Reutilizar al máximo los materiales de esos residuos, mediante reciclaje.
- Concienciación y educación sobre la gestión de residuos.
- Mejorar el alcance de una gestión integral de residuos para que llegue a todas partes.
- Usar métodos de tratamiento y eliminación que permitan la recuperación de energía y creación de combustibles
- Maximizar el reaprovechamiento de los residuos para tareas de abono y fertilización.

- Fomentar nuevas tecnologías de eliminación, más ecológicas y menos dañinas que métodos tradicionales, como la incineración.

Dentro de estos objetivos, los más importantes son los de prevenir la generación de residuos y minimizarlos cuando se produzcan. Estos objetivos conectan con el concepto de economía circular.

La gestión de residuos pasa por diversas fases:

- La recogida en el punto de generación, como puedan ser nuestros hogares.
- El transporte hasta los lugares adecuados para la siguiente fase de procesamiento.
- El procesamiento en plantas preparadas para reaprovechar lo posible.
- La disposición final de los residuos que no han podido ser reaprovechados de ninguna manera.

Principales formas de disponer de los residuos, que no contribuían a reaprovechar materiales o generar energía:

- Los vertederos.
- La quema de residuos.

Actualmente, se han desarrollado nuevas formas de disponer de los residuos:

- La pirólisis: Que es una incineración en tanques sellados con poco oxígeno. Eso produce una quema menos contaminante y más eficiente en cuanto a generación de energía aprovechable. En el caso de ciertos residuos orgánicos o vegetales, se puede usar para obtener combustibles.
- Reprocesamiento biológico: La materia orgánica, e incluso el papel, se pueden descomponer y formar compostaje, que sirve de abono para la agricultura.
- El reciclado: Donde el material aprovechable, como aluminio, plástico o papel, sirve para crear nuevo aluminio, plástico o papel.
- El tratamiento de aguas residuales mediante la extracción de lodos: Debido al gran crecimiento de las ciudades, el agua residual ha aumentado mucho. Mediante su tratamiento, se pueden obtener diversos tipos de lodos, que pueden ser usados en agricultura como fertilizante.

Estos son algunos de los nuevos métodos de disposición final dentro de la gestión de residuos. Cada vez se avanza más en encontrar nuevas maneras de reaprovechar al máximo los desechos.

3.2. Materiales cerámicos.

El concepto cerámico proviene del término griego “Keramos”, cuya raíz sánscrita significa “quemar”. La definición más ajustada de esta palabra hace referencia solamente a la arcilla, aunque en la actualidad ha derivado a todo material inorgánico no metálico, por lo que en [2] podemos encontrar la siguiente definición de materiales cerámicos:

“Materiales inorgánicos constituidos por átomos de metal y no metal unidos por enlaces iónicos y/o covalentes”.

En la actualidad se puede considerar material cerámico aquel compuesto químico constituido por metales y no metales que incluyen minerales de arcilla, cementos y vidrios. Se trata de materiales que presentan un buen aislamiento térmico y que a elevada temperatura y en ambientes agresivos, presentan un mejor comportamiento que los materiales metálicos o los materiales poliméricos [2].

Desde el punto de vista mecánico, son materiales que presentan una alta dureza pero, a su vez, son materiales frágiles. Los enlaces interatómicos pueden ser de carácter iónico, o bien de carácter predominantemente iónico con carácter parcial covalente. Estos materiales se pueden encontrar en forma vítrea, monocristalina, policristalina o combinaciones de algunas de ellas.

También, tienen dos características importantes: por un lado, su capacidad de resistir al calor y por otro, su resistencia al ataque químico. Estas características se deben fundamentalmente a la fortaleza del enlace entre sus átomos que les confiere un alto punto de fusión, dureza y rigidez [3].

Las aplicaciones de los materiales cerámicos son innumerables y abarcan una infinidad de campos, como por ejemplo su aplicación como materiales eléctricos, magnéticos, ópticos, compuestos, cementos y biomateriales.

Los distintos materiales cerámicos se pueden clasificar en tres tipos:

- Cerámicas amorfas o Vidrios

Una cerámica vítrea es por definición una cerámica parcialmente cristalina, de grano muy fino y que se obtiene por calentamiento de un vidrio cerámico susceptible de experimentar una cristalización controlada. No todos los vidrios cerámicos pueden experimentar cristalización parcial por tratamiento térmico. Las cerámicas vítreas tienen como mínimo el 50 % cristalizado pudiendo llegar al 90 % de su volumen.

Las propiedades que poseen estas cerámicas vienen determinadas por sus fases vítrea y cristalina así como de sus fracciones en volumen. Las propiedades mecánicas son superiores a las del vidrio de procedencia.

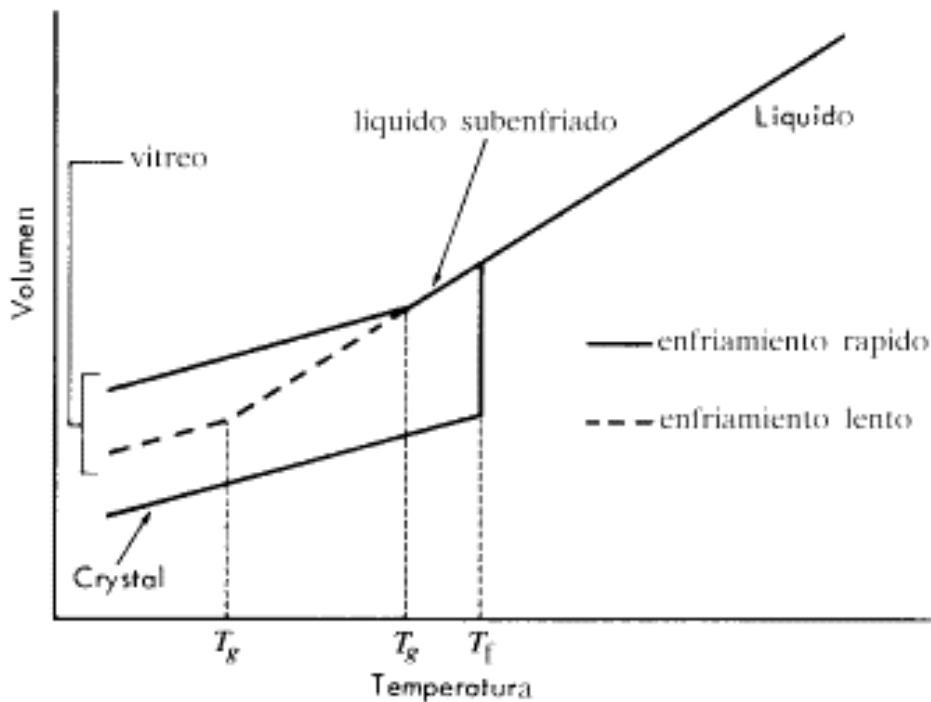


Figura 3.- Solidificación de materiales cristalinos y vítreos.

- Cerámicas Tradicionales.

Los materiales cerámicos tradicionales están constituidos por tres componentes básicos: arcilla, sílice y feldespato.

Las cerámicas tradicionales pueden definirse como aquellas que comprenden las industrias que tienen como base a los silicatos, principalmente los materiales arcillosos, los cementos y los vidrios de silicatos.

Son materiales que presentan una dureza y a la vez fragilidad a temperatura ambiente, como consecuencia de los enlaces iónicos o covalentes que les caracteriza. Esta fragilidad se intensifica por la presencia de imperfecciones. A temperaturas elevadas son deformables, ya que a esas temperaturas se permite el deslizamiento de bordes de grano.

Como ejemplos de cerámicas tradicionales, se pueden destacar, el barro cocido, la porcelana o los ladrillos.

- Cerámicas avanzadas.

Las cerámicas avanzadas están constituidas principalmente de compuestos puros o casi puros; principalmente de óxidos, carburos o nitruros. Algunas de las más importantes cerámicas avanzadas son: alúmina (Al_2O_3), nitruro de silicio (Si_3N_4), carburo de silicio (SiC) y circonia (ZrO_2) combinados con algunos óxidos refractarios.

Por las propiedades eléctricas que tienen estas cerámicas, se pueden utilizar como capacitadores piezoeléctricos, termistores, sustratos de circuitos integrados, aisladores, soportes de semiconductores, condensadores de alta tensión, etc. Las propiedades ópticas que pueden tener estas cerámicas se pueden utilizar como ventanas de infrarrojos, construcción de láseres y de lámparas de sodio de alta presión. Dada la gran dureza y resistencia a la abrasión se pueden utilizar como herramientas de corte, además de que muchos de ellos son biocompatibles.



Figura 4.- Materiales Cerámicos Avanzados.

3.3. Proceso de formación de materiales cerámicos.

El proceso de formación de materiales cerámicos se componen de distintas etapas: extracción de arcillas, trituración, mezcla y molienda, amasado, moldeo, cortado, apilado, secado, cocción, empaquetado y almacenamiento [4].



Figura 5.- Proceso de conformación de materiales cerámicos.

La **extracción** de arcillas se realiza en canteras y bajo estrictos controles de seguridad y respeto medioambiental.

Con el fin de homogeneizar la materia prima extraída de las canteras, para iniciar su proceso de envejecimiento y maduración, se constituyen lechos de homogenización.

La materia prima, procedente de las canteras se almacena antes de entrar en la línea de fabricación. El tipo de almacenamiento depende de si la molienda se hace por vía húmeda o por vía seca.

El siguiente proceso es el de **tritución, molienda y mezclado** para reducir el tamaño de la arcilla consiguiendo una homogeneización del material, se mezcla la proporción de arcillas, desgrasantes y posibles aditivos que van a formar la mezcla arcillosa. Para ello, se emplean silos independientes con dosificadores o cajones alimentadores.

A continuación, pasamos al **amasado** donde se producirá la primera adición de agua. La cantidad dependerá de la humedad de la arcilla y de las condiciones climáticas, durante la etapa de almacenamiento.

Continuamos con la siguiente etapa, que es el **moldeo** y se realiza bien por extrusión o por prensado. La extrusión presenta mayor rendimiento y posibilidad de piezas perforadas y mayor tamaño y el prensado obtiene piezas con mejor acabado superficial, pero con el inconveniente que las piezas son macizas y se obtiene un menor rendimiento.

Posteriormente pasamos al **cortado y apilado** que se realiza mediante un cortador y se apilarán en estanterías o vagonetas antes de introducirlo en el **secadero** seguidamente se introducirá en el horno, para la sinterización de los materiales cerámicos.

El proceso de **sinterización** se inicia con reacciones en estado sólido, empieza con una rotura de enlaces químicos, una descomposición de minerales y formación de puentes de unión, donde el calor juega un papel desencadenante de las transformaciones. Más tarde se inicia la generación de líquido, ya que una parte de los componentes funden. Esta fase líquida es muy reactiva y acelera las reacciones ya que, a medida que aumenta la temperatura, va disminuyendo la viscosidad y el líquido se va introduciendo en los intersticios. Todo ello conduce a una densificación de la masa. A su vez, el cuerpo adquiere una rigidez que le confiere las propiedades cerámicas características.

Las reacciones cerámicas son extremadamente lentas, de ahí que las reacciones cerámicas se realicen a alta temperatura. El calor es la energía que precisan los átomos para vibrar hasta conseguir una etapa inestable cuando se pierde el agua de composición. Ahora el retículo “pseudocristalino” es más reactivo.

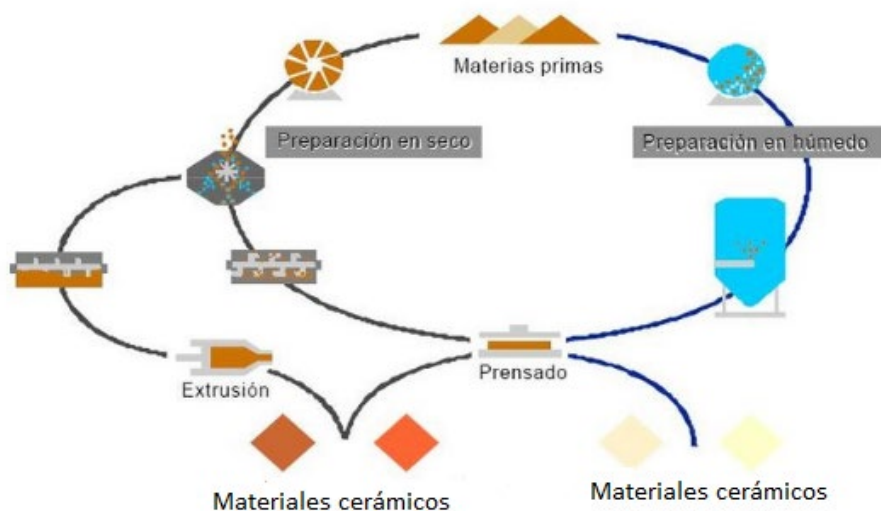


Figura 6.- Proceso de fabricación de materiales cerámicos.

3.4 Valorización de subproductos industriales en los materiales cerámicos.

La industria cerámica, por su propia naturaleza, es una industria en la que se consume grandes cantidad de materia prima, y a su vez los procesos industriales necesarios para la conformación de los materiales cerámicos consumen una alta cantidad de energía, ya que los procesos de ceramización tienen lugar a altas temperaturas.

Aquí es donde influye la valorización de los subproductos industriales y se pone de manifiesto el concepto de sostenibilidad, ya que el valorizar estos subproductos, se consigue sustituir o reemplazar esta materia prima por estos subproductos industriales, disminuyendo la necesidad de extraer materia prima.

Para que se consideren sostenibles los materiales cerámicos conformados, deben cumplir las siguientes condiciones [5]:

- Materias primas locales, ya que la extracción y los procesos industriales se encuentren a poca distancia de las fábricas de conformación de materiales

cerámicos, ya que al disponer de la materia prima a una distancia corta, repercute en una menor emisión de gases de efecto invernadero (GEI).

- Materiales renovables, ya que el poder usar un subproducto en la conformación de materiales cerámicos, que tenga una alta producción, constante y homogénea facilita el estudio de su posible valorización.
- Reciclaje de materiales, ya que al reciclar se elimina el impacto ambiental causado por los procesos de extracción y minería, se minimiza el consumo de energía y de materias primas como el petróleo, mientras se minimizan las emisiones de GEI.
- Materiales durables, esta es una de las condiciones más importantes para lograr construcciones sostenibles es una vida útil prolongada.

3.4.1. Principales subproductos industriales.

Existen una gran variedad de subproductos industriales, que pueden ser susceptibles de valorizarse dentro de la industria cerámica. Los principales subproductos industriales son:

- Lodos de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) e industriales.
- Cenizas volantes de las centrales termoeléctricas.
- Escorias metalúrgicas.
- Plásticos mezclados y sucios.
- Escombros de construcción.
- Residuos mineros.
- Neumáticos fuera de uso.
- Residuos de la industria química, papelera, cuero, cosmética, tratamiento de superficies, etc.

El Catálogo Europeo de Residuos (CER), ha actualizado y definido los principales residuos generados, y los ha clasificado en 20 grupos. Esta clasificación se ha hecho en función de analogías físico-químicas o en similitudes en los procesos productivos de procedencia.

3.4.2 Normativa vigente en materia de Gestión de Residuos.

El cambio que ha generado la sociedad actual, hace que se tenga una gran conciencia medioambiental, y por ellos es necesario que exista una normativa en materia de gestión de residuos, que garantice que los procesos industriales se realicen de manera sostenible con el medio ambiente.

Dado que actualmente existe una normativa a nivel europeo, estatal y autonómico, se hará un repaso de la normativa más importante.

Normativa europea:

- Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos [6].
- Directiva 2006/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de marzo de 2006 , sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas y por la que se modifica la Directiva 2004/35/CE [7].

Normativa estatal:

- Ley 5/2013, de 11 de junio, por la que se modifican la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación y la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados [8].
- Ley 11/2012, de 19 de diciembre, de medidas urgentes en materia de medio ambiente [9].
- Real Decreto 777/2012, de 4 de mayo, por el que se modifica el Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por las actividades mineras [10].

Normativa autonómica:

- Decreto 18/2015, de 27 de enero, por el que se aprueba el reglamento que regula el régimen aplicable a los suelos contaminados [11].
- Decreto 73/2012, de 22 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento de Residuos de Andalucía [12].

4. MATERIALES Y METODOLOGÍA.

4.1. Materiales.

Los materiales utilizados en este Trabajo Fin de Grado para el estudio de la retención de elementos contaminantes procedentes de residuos mineros en matriz cerámica, son principalmente la arcilla roja y los residuos mencionados. Ambos elementos se describen a continuación:

4.1.1. Arcillas.

Para la realización de este Trabajo Fin de Grado se ha utilizado arcilla roja procedente de la provincia de Jaén, en particular de la zona de Bailén. La industria cerámica de Bailén es una de las más importantes productoras de ladrillos cerámicos del sur de España, utilizando la mayoría de las empresas de la zona materiales de la Cuenca del Guadalquivir para la producción del ladrillo común.

Las arcillas han constituido y constituyen la base de la industria cerámica, al igual que el agua que, aunque se elimina en los procesos de cocción, es absolutamente necesaria en cantidad y calidad en las etapas iniciales del proceso.

Los materiales arcillosos constituyen la mayor parte de la corteza terrestre externa, y son de fórmula general los hidrosilicatos de aluminio.



Dentro del campo de la cerámica los materiales arcillosos se dividen en dos grupos:

- Caolín: de origen primario, en cuanto a emplazamiento y formación metamórfica, con escasas impurezas.
- Arcillas: de origen secundario y formación sedimentaria, presentando numerosas impurezas adquiridas durante la sedimentación (sustancias orgánicas, carbonatos sulfatos y otras sales metálicas).

La arcilla roja suministrada por la empresa SAN FRANCISCO de Bailen (Jaén), se ha utilizado como material base para la incorporación en diferentes porcentajes de los residuos mineros. Destacar de este tipo de arcilla su cuidada granulometría y su empleo habitual para la fabricación de ladrillo para el sector de la construcción, presentando

unas características adecuadas para tal fin, como así se ha podido determinar en los ensayos físicos o químicos realizados.

4.1.2. Suelo.

El suelo que se ha empleado en este TFG procede del entorno de la Fundación la Cruz localizada en las coordenadas 38.14158, - 3.63511. La contaminación se ha producido debido a la deposición de residuos mineros sin ningún tipo de control.

4.2. Metodología.

La metodología seguida en este Trabajo Fin de Grado se basa en una serie de ensayos lógicamente ordenados, de forma que el conjunto de los mismos pueda reflejar unos resultados claros y objetivos de la viabilidad de la incorporación de los residuos mineros en materiales cerámicos, reteniendo por lo tanto, los elementos contaminantes presentes en los mencionados residuos.

En base a lo mencionado y siguiendo un esquema rigurosamente científico y objetivo se procede analizar, primer lugar, los materiales utilizados en la conformación de los cerámicos con el fin de evaluar su aptitud para este proceso, ya sea la arcilla o el residuo. Para ello, se realizan ensayos físicos y químicos a ambos materiales.

Los ensayos físicos realizados a ambos materiales son el cálculo de la densidad real, la densidad aparente y el Índice de plasticidad, determinando a su vez el límite líquido y el límite plástico de ambos materiales tan esencial para caracterizar una arcilla. Por otra parte, se han realizado ensayos químicos para conocer la composición de ambos productos, siendo estos el ensayo de análisis elemental, pérdida por calcinación y fluorescencia de rayos X. Cabe destacar que los residuos mineros presentan una granulometría inferior a 6 mm, siendo no apta para la conformación de cerámicos; por lo tanto, y con el fin de homogenizar ambos materiales, se procedió a la molienda de tal subproducto obteniendo una granulometría inferior a 0,25 mm compatible con la arcilla roja a utilizar, que ha sido capaz de facilitar las operaciones de mezclado en los diferentes porcentajes.

Una vez caracterizados ambos materiales, arcilla y residuos, se ha procedido a la conformación de diferentes familias de probetas de materiales cerámicos con porcentajes crecientes de adición de residuos mineros a la arcilla base. Para ello, se

comenzó con un cerámico sin adición de residuo minero, al cual se le fue adicionando porcentajes crecientes del 10% de residuos hasta conseguir un material formado por el 100% del mismos. Solo de esta forma se ha podido evaluar de forma objetiva, tras los ensayos posteriores físicos, mecánicos, estéticos y de lixiviados, el posible campo de aplicación de las diferentes combinaciones de elementos.

Conformadas las probetas y sinterizadas en horno a la temperatura de 950°C tras su secado en estufa, se ha procedido a realizar los ensayos físicos oportunos que han determinado la afección del material resultante por la adición en porcentajes crecientes de residuos. A su vez, y con el principio de crear un material comercializable, es necesaria la evaluación del color de forma objetiva, para poder así registrar fielmente el mismo; para ello se ha utilizado un instrumento de laboratorio denominado colorímetro.

Evaluadas las propiedades físicas en su totalidad se ha procedido a determinar la resistencia mecánica con el ensayo de compresión de las diferentes familias de probetas, determinando, en base a la normativa vigente, los límites admisibles de adición de residuos mineros capaces de proporcionar la resistencia mínima exigida.

Finalmente ,y tras la realización de los diferentes ensayos, se ha evaluado la retención de los elementos contaminantes existentes en los residuos gracias a la vitrificación en la matriz cerámica. En este ámbito, se han realizado ensayos de lixiviados en agua de las diferentes familias de probetas, con el objetivo último de evaluar, en comparación en igualdad de condiciones, la lixiviación de los diferentes cerámicos con la lixiviación de los residuos mineros inalterados.

En base a lo comentado, se ha procedido a dividir los apartados posteriores en tres grandes grupos de ensayos, en los cuales se describirán los ensayos realizados en profundidad. En primer lugar se caracterizarán los materiales iniciales, después se conformarán las probetas y se realizarán los ensayos físicos y mecánicos, y finalmente, se estudiarán los lixiviados de las diferentes familias.

4.2.1. Caracterización físico química de los materiales.

Como se ha mencionado con anterioridad, en este apartado se han realizado los ensayos físicos y químicos oportunos para evaluar la aptitud de la arcilla y los residuos mineros en la conformación de materiales cerámicos. Los materiales utilizados, por un lado la arcilla, la ha suministrado la empresa participante, mientras que el suelo contaminado ha sido recogido directamente en su localización. Ambos han sido secados

en estufa a la temperatura de 105°C durante 24 horas para eliminar la posible humedad existente en las muestras. Este proceso se realiza con el fin de tener el mayor control posible de todos los parámetros. No obstante, la existencia en fábrica de humedad no perjudicaría al material final, simplemente debería tenerse en cuenta para no adicionar agua en exceso.

A su vez, como se ha comentado, los residuos mineros han sido molidos hasta obtener un tamaño máximo inferior a 0,25mm, con el fin de homogenizar ambos materiales y facilitar su mezclado.

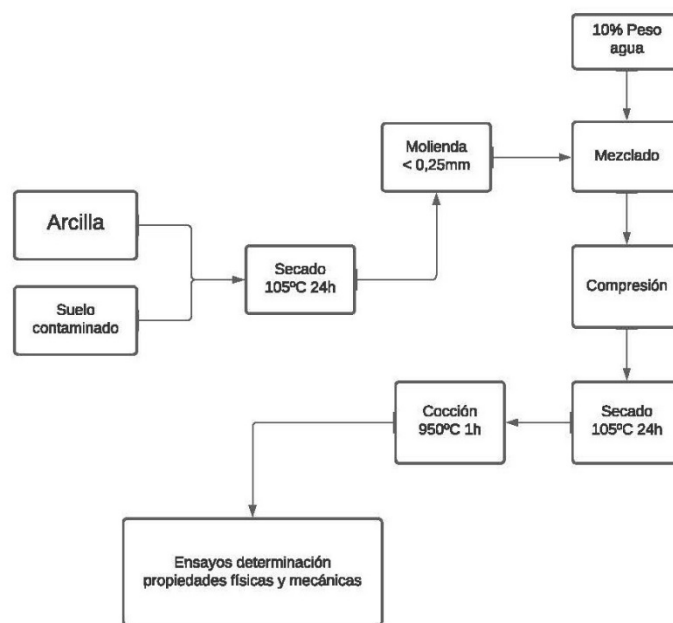


Figura 7.- Proceso de conformado y caracterización de probetas.

A continuación se describen los ensayos realizados a la arcilla y los residuos, tras el proceso de preparación de muestras comentado.

4.2.1.1. Densidad real.

La densidad real, también llamada densidad absoluta es la relación entre la masa del material o cuerpo, objeto de estudio y el volumen total que ocupa. Para determinar la densidad real se ha seguido la norma UNE-EN 1097-7:2009.

4.2.1.2. Límite líquido.

La norma UNE 103-103-94, define como límite líquido la humedad que tiene un suelo amasado con agua y colocado en una cuchara normalizada, cuando un surco que se

realiza con un acanalador normalizado, que divide dicho suelo en dos mitades, se cierra a lo largo de su fondo en una distancia de 13 mm, tras haber dejado caer 25 veces la mencionada cuchara desde una altura de 10 mm sobre una base también normalizada, con una cadencia de 2 golpes por segundo.

Para la realización de este ensayo primero se separa la cuchara del resto del aparato. Se sujeta firmemente y, por medio de una espátula, se coloca en su parte inferior una porción de muestra amasada, aplastándola hacía abajo y extendiéndola dentro de la cuchara de un lado a otro, obteniéndose una altura de unos 10 mm y una superficie lisa. Se debe evitar la formación de burbujas de aire en el interior.

Manteniendo la cuchara en la palma de la mano, se hace un surco con el acanalador de Casagrande, de arriba hacia abajo, con el borde biselado hacía adelante, disponiendo en todo momento el acanalador perpendicular a la superficie de la cuchara y describiendo un arco. Seguidamente, se coloca la cuchara en el aparato y se gira la manivela dos vueltas por segundo. Se cuentan los golpes necesarios para que las paredes del surco se unan por el fondo del mismo. El ensayo se repite hasta obtener una determinación entre 25 y 15 golpes, y otra entre 35 y 25, siempre teniendo en cuenta que el número de golpes disminuye al aumentar la cantidad de agua destilada que se añade para realizar el amasado. Si el número de golpes fuese siempre inferior a 25, esto nos indicaría que no se puede determinar el límite líquido y se debe anotar ese suelo como no plástico sin realizar el ensayo de determinación del límite plástico.

Los resultados se llevan a un gráfico donde en el eje de abscisas va el número de golpes y en el de ordenadas la humedad (a escala logarítmica). Se unen los puntos formando una recta y la intersección de esta recta con los 25 golpes nos da el límite líquido

4.2.1.3. Límite plástico e índice de plasticidad.

Calculado según la UNE 103-104-93, el índice de plasticidad de un suelo es la humedad más baja con la que pueden formarse cilindros de 3mm de diámetro, rodando dicho suelo entre los dedos de la mano y una superficie lisa, hasta que los cilindros empiecen a resquebrajarse. Para la realización de este ensayo se cogen 20 g de muestra pasados por un tamiz de 400 μm y se amasa con agua destilada hasta formar con facilidad una bola. Se toman 15 g de dicha bola, como muestra para el ensayo.

Se empieza a moldear la muestra haciéndola rodar entre los dedos de la mano y la superficie lisa con la presión estrictamente necesaria para que se formen cilindros, de

tal forma que se mueva la mano hacia delante y hacia atrás, entre 80 y 90 veces por minuto.

Si al llegar el cilindro de 3 mm no se ha resquebrajado, se parte en seis u ocho trozos y se vuelve a repetir la operación cuantas veces sea necesario, hasta que el cilindro se resquebraje.

Con posterioridad se colocan las porciones de suelo así obtenidas hasta que una cantidad mínima de 5 g, en un pesa sustancias tarado previamente y se determina la humedad de acuerdo con la Norma UNE-103-300.

Con la otra mitad de la muestra se vuelve a repetir todas las operaciones. La media aritmética de las humedades de ambas determinaciones nos proporcionará el LP de nuestra muestra.

El límite líquido (LL) conjuntamente con el límite plástico (LP) nos permite calcular el índice de plasticidad (IP).

$IP = LL - LP$	[1]
----------------	-------

4.2.1.4. Análisis elemental.

La determinación de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre de las muestras de arcilla y residuo minero se ha llevado a cabo por análisis químico elemental (CNHS) mediante combustión en atmósfera rica en O₂.

El equipo utilizado en el SCAI de Málaga para realizar este ensayo es un ANALIZADOR ELEMENTAL LECO TruSpec micro CHNS + MODULO DE O.

Está basado en la técnica de combustión total, y es capaz de medir simultáneamente los elementos C, H, N y S de tamaño de muestra de 2 mg. (aunque puede llegar hasta los 10 mg según la naturaleza de la muestra) y O en el módulo correspondiente con un tiempo de análisis de 4 min para el análisis CHNS y de 1 min para el análisis de O.

Los detectores son independientes para cada elemento, siendo de IR de estado sólido no dispersivo (C, H y S) y de termoconductividad diferencial (TCD) para N. Con horno de combustión de resistencias, en U, alcanza temperaturas máximas de trabajo de hasta

1150 (1050) °C y horno de combustión (de pirolisis) para el módulo de análisis de O, pudiendo alcanzar una temperatura máxima de trabajo de 1350 °C. (1300)

4.2.1.5. Pérdida por calcinación.

La determinación de la pérdida de masa por ignición, es una metodología empleada para determinar el contenido en materia orgánica y el contenido en carbonatos de las muestras objeto de estudio.

En una primera reacción la materia orgánica es oxidada a 500-550 °C, emitiendo CO₂ y cenizas. En la siguiente reacción se produce la destrucción de los carbonatos en torno a 900-950 °C, con la emisión de CO₂ y la formación de óxidos.

4.2.1.6. Fluorescencia de rayos X.

La fluorescencia de rayos X (FRX), es una técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X. La radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo. Los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes y la diferencia de energía resultante de esta transacción se disipa en forma de fotones, radiación X fluorescente o secundaria, con una longitud de onda característica y una intensidad directamente relacionada con la concentración del elemento presente en la muestra.

Los equipos que se utilizan para este fin son los Espectrómetros de Fluorescencia de rayos X.

La composición química de los ensayos realizados en el SCAI de Málaga se ha determinado mediante Fluorescencia de rayos X de longitud de onda (WDXRF), utilizando un equipo modelo ARL ADVANT`XP+ secuencial de la casa THERMO. El equipo consta de un automuestreador con capacidad para un total de 161 cassettes de diferentes diámetros, un tubo de rayos X de Rh y un goniómetro que consta a su vez de: 3 colimadores, 4 cristales que permiten medir desde el F hasta del U y dos detectores (SC y FPC). El equipo puede medir en dos ambientes: en He y en vacío.

La técnica analítica empleada es la siguiente: para la determinación del índice de oxígeno límite (LOI), se pesó una cantidad aproximada de 1 g de muestra en una

balanza analítica, previamente secada 43 a 105 °C durante 1 h, y se calcinó durante 2 h a 1050 °C.

Por otro lado, para la realización del ensayo se pesó, en un portamuestras, el resto del contenido de la muestra usando una balanza analítica, y se analizaron en polvo en ambiente de He.

Los datos de concentración se obtuvieron mediante el Software integrado UNIQUANT en forma de óxidos, teniendo en cuenta el contenido del LOI de las muestras.

4.2.2. Conformado de probetas. Ensayos físicos, mecánicos y colorimétricos.

Preparados los materiales iniciales, arcilla y residuos mineros, según el procedimiento descrito y evaluada su aptitud a través de los ensayos anteriores para la conformación de materiales cerámicos, se procede a la conformación de las diferentes familias de probetas.

Para ello, se ha tomado como material base la arcilla y se han conformado probetas con el 100% de este material para, posteriormente, comparar los resultados obtenidos de las diferentes familias con adición del subproducto y esta familia inicial a través de los ensayos posteriores.

De cada familia de adición se realizarán 6 probetas mediante compresión en matriz. Esta matriz posee unas dimensiones interiores de 60 x 30 mm, en la cual, es vertido el material y posteriormente compactado mediante una carga de 50 kN, o lo que es equivalente, 27,77 MPa. Cabe destacar que para la conformación de las probetas de forma adecuada, y para conseguir la máxima resistencia, se procede a conformar las diferentes familias de probetas con un 10% de agua.

El proceso de conformado comienza con el mezclado en seco de ambos materiales, arcilla y residuo minero, según el porcentaje correspondiente de cada familia, posteriormente, se adiciona el 10% de agua para nuevamente volver a mezclar hasta obtener un material homogéneo. Este material se vierte en la matriz y se compacta según lo indicado.

Las familias de probetas que se han desarrollado en el Trabajo Fin de Grado se detallan en la tabla posterior, en la cual, puede identificarse el nombre de la familia, el porcentaje de arcilla y el porcentaje de residuo minero adicionado.

<i>Familia</i>	<i>% Arcilla</i>	<i>% Suelo</i>
S 0	100	0
S 1	90	10
S 2	80	20
S 3	70	30
S 4	60	40
S 5	50	50
S 6	40	60
S 7	30	70
S 8	20	80
S 9	10	90
S 10	0	100

Tabla 1.- Familias de probetas conformadas.

Conformadas las probetas de las diferentes familias se retiran de la matriz con el fin de determinar posteriormente las dimensiones geométricas de las mismas así como su masa húmeda. Una vez realizado este proceso se introducen en estufa para secado a la temperatura de 105 °C durante 24 horas, midiendo nuevamente las dimensiones geométricas y la masa seca de las mismas.

Para el sinterizado de los materiales cerámicos se introducen las diferentes probetas en el horno de mufla y se eleva la temperatura a 950 °C, manteniendo esta temperatura al menos 1 hora para, posteriormente, dejar enfriar y medir nuevamente sus dimensiones geométricas y masa tras sinterizado.

Obtenidos los cerámicos derivados del proceso anterior y de las diferentes familias, se realizan los ensayos de absorción de agua por capilaridad, absorción en agua fría y absorción en agua hirviendo; obteniendo a su vez la masa sumergida de todas las probetas y la masa con superficie saturada seca, para finalmente determinar la porosidad abierta y la densidad de los cerámicos creados.

Como se ha mencionado en el primer apartado, para comercializar un cerámico es necesario que su aspecto visual sea agradable. Este término es difícil de evaluar ya que el mercado es directamente el que decide la aceptación de un producto; no obstante, para evaluar de forma objetiva y fiel el color del material se realiza el ensayo de

colorimetría gracias a la utilización del instrumento destinado para tal fin denominado colorímetro.

Realizados los ensayos anteriores, se procede a determinar la resistencia de las diferentes familias de probetas, hecho esencial que debe establecerse en un cerámico para su comercialización según la normativa al respecto. Para ello, se ensaya cada una de las probetas a compresión con velocidad de 1 N/mm²/s, evaluándose la resistencia así como la deformación.

Una vez realizados los anteriores ensayos se realiza la sinterización de las piezas en HORNO TECNOPIRO MODELO BENJAMÍN ATR – 902 colocadas ordenadamente dentro de él y siempre dejando una distancia mínima para que el calentamiento sea homogéneo por todos los lados de la probeta. La temperatura máxima de cocción fue de 950 °C.

A continuación, se detallan los distintos ensayos realizados a las familias de probetas.

4.2.2.1. Determinación de la contracción lineal una vez sinterizadas las probetas UNE – EN 772-16.

Como consecuencia del desprendimiento de gases provocado por la combustión de materia orgánica y descomposición de carbonatos de magnesio y calcio en la pieza hay un aumento de porosidad durante la cocción que comienza a reducirse por la formación de fases líquidas, llenan los poros y provocan la contracción lineal.

La temperatura máxima de cocción y su mantenimiento provoca que la porosidad disminuya y la contracción aumente.

Las mayores contracciones van relacionadas a la mayor finura granulométrica debido a que el aumento de superficie de contacto hace que las reacciones de cocción sean más rápidas.

La contracción lineal se calcula mediante la fórmula:

$\% \text{ Contracción lineal} = \frac{L_{seco} - L_{sinterizado}}{L_{seco}} \times 100$	[2]
--	-------

Siendo:

L_{seco} : longitud de piezas en verde después de salir de la estufa.

$L_{sinterizado}$: longitud de piezas en verde después de sinterización.

4.2.2.2. Determinación de la pérdida de peso tras la sinterización de las probetas.

Para la realización de la pesada de todos los ensayos experimentales se ha utilizado una balanza analítica de precisión de $\pm 0,0001$ g KERN ABJ-NM/ABS-N.

Para esta medición no se ha seguido ninguna normativa ya que en la actualidad no hay ninguna existente.

Para calcular la pérdida de peso se utiliza la siguiente fórmula:

$\% \text{ Pérdida de peso} = \frac{W_{seco} - W_{sinterizado}}{W_{seco}} \times 100$	[3]
---	-------

Siendo:

W_{seco} : peso de la pieza después de introducirla en estufa.

$W_{sinterizado}$: peso de la pieza después de sinterización.

4.2.2.3. Determinación de la absorción de agua por capilaridad (succión). UNE-EN 772-11.

La succión de un ladrillo es la cantidad de agua absorbida durante una inmersión parcial de corta duración.

Se mide la superficie de la cara de la probeta que va a entrar en contacto con el agua, se llena una bandeja de agua con una altura de 5 ± 1 mm. aproximadamente y se coloca la pieza en esta durante 1 minuto. Pasado dicho tiempo se saca la pieza, se seca superficialmente y se pesa en balanza (M_i).

La succión se calcula mediante la expresión:

$C_{w,i} = \frac{M_i - M_d}{A_s \cdot t} \left[\frac{g}{m^2 \cdot min} \right]$	[4]
--	-------

Donde:

M_i = masa de inmersión.

M_d = masa seca.

A_s = área superficial de la cara de ensayo.

t = 1 min.

4.2.2.4. Determinación de la absorción de agua en frío 24h. UNE-EN 772-21.

La absorción es una medida de humedecimiento cuando se sumerge un ladrillo totalmente en agua durante un período prolongado.

Siguiendo la norma UNE-EN 772-21 de septiembre de 2011, se llena un baño y se sumergen las piezas completamente en este, durante $24 \pm 0,5$ horas, pasado este tiempo se seca superficialmente la pieza y se pesa seguidamente. (M_s)

La absorción de agua (W_s) de cada una de las piezas se calcula mediante la expresión:

$W_s = \frac{M_s - M_d}{M_d} \times 100$	[5]
--	-------

Donde:

W_s = absorción agua.

M_s = masa saturación.

M_d = masa seca pieza.

4.2.2.5. Determinación de la absorción de agua hirviendo, densidad aparente y porosidad abierta. Norma ASTM – C373: 1994 a.

Se determina la absorción de agua de las piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería que sirve de barrera antihumedad, por inmersión de las probetas en agua hirviendo durante un tiempo determinado.

Se introducen las piezas en un baño con una cantidad de agua destilada suficiente, para que la muestras estén completamente sumergidas con una relación de masa de agua 3:1 (el agua debe mantenerse siempre al mismo nivel y si se adiciona agua para evitar esto, no debe de parar la ebullición), se mantiene hirviendo esta agua 1 hora o menos y seguidamente durante $5h \pm 5$ min, después de las cinco horas hirviendo, mantenerlas en remojo en el baño $24 h \pm 30$ min. Una vez pasado este tiempo, se sacan las piezas y se pesan en balanza, calculamos la porosidad abierta y la densidad aparente, y volvemos a pesar la pieza saturada al aire y obteniendo la absorción en agua hirviendo.

$P = \frac{W - D}{V} \times 100$	[6]
$B = \frac{D}{V}$	[7]

Donde:

P = porosidad abierta o porosidad aparente.

B = densidad aparente, (g/cm³).

V = volumen exterior (cm³). Donde V = W – S teniendo en cuenta que la densidad del agua es 1 g/cm³.

S = peso suspendido (g).

W = peso saturado. (g)

D = peso seco.

4.2.2.6. Determinación de la resistencia a la compresión mediante norma UNE-EN-772-1:2011+A₁.

La compresión del ladrillo, es la carga unitaria aparente a la rotura, bajo un esfuerzo axial de compresión. Es una de las pruebas más importantes ya que la función del ladrillo es básicamente soportar esfuerzos de compresión en la construcción.

Colocamos la pieza en una Máquina Universal de Ensayos SHIMAZU modelo AG-X plus, y se le aplica una carga uniforme repartida, aumentándola de una manera continua hasta que se produzca la rotura. La resistencia a la compresión se determina con la siguiente expresión:

$\sigma = \frac{F}{A}$	[8]
------------------------	-------

Donde:

σ = resistencia a la compresión (MPa).

F = carga (N).

A = sección de la probeta (mm²).

4.2.2.7. Ensayo colorimétrico.

Este ensayo se basa en medir mediante un colorímetro portátil que posee un sensor externo para realizar los muestreos con una geometría de medición de 45° y 0°. El colorimétrico emplea la tecnología microsistema más moderno y preciso, y opera según el método espectral. Posee una excelente reproductibilidad gracias a que emplea un análisis espectral. El origen de la luz está en dos diodos de luz blancos. También hay que tener en cuenta el Diagrama del Color, que fue diseñado por la Comisión Internacional del Color, debido a que hay que conseguir un valor objetivo y comparable del color. Se basa en las coordenadas RGB (Red – Green – Blue) como áreas cromáticas, y hay que hacer la trasposición a las coordenadas HSL, que indican cromatismo, saturación y luminosidad, debido a que son más próximas a la realidad.

4.2.3. Ensayos de lixiviación a las diferentes familias de probetas.

Uno de los principales objetivos de este Trabajo Fin de Grado es la retención en matriz cerámica de los elementos contaminantes existentes en el residuo minero. Para ello, el ensayo más adecuado y con una sensibilidad excelente de determinación es el de lixiviación, el cual, se describe a continuación:

1. Preparación del reactivo de extracción.

- Pipetear 5,7 ml de ácido acético glaciar y ponerlos en un matraz aforado de 1 L.
- Pipetear 64,3 ml de hidróxido de sodio 1 N y agregarlos al matraz.
- Completar hasta el aforo con agua desionizada.
- Medir el pH de la disolución con el potenciómetro y el valor de este debe estar en el rango $4,93 \pm 0,05$.

2. Determinación de componentes no volátiles.

- Tomar una muestra de 100 g como mínimo y pasar a un matraz aforado.
- Agregar el reactivo de extracción, hasta que cubra completamente la muestra.
- Cerrar el frasco herméticamente con el tapón, con cinta de teflón o con el papel parafilm.
- Colocar el matraz en el equipo de agitación rotatorio a 60 rpm durante 24 horas. La temperatura se mantuvo aproximadamente a 23 ± 2 °C.

- Después de 24 horas se obtiene el extracto PECT, se filtra y se envasa en frascos de plástico y se acidifica el extracto a un pH menor de 2 para conservar la muestra, además se refrigera a una temperatura aproximada de 4 °C.

El ICP de masas es un equipo complejo que nos proporciona los elementos químicos existentes y su proporción en la muestra en estudio, gracias a una serie de patrones con los cuales se puede comparar la concentración. Este equipo se describirá en el siguiente apartado.

Destacar que para el estudio de la retención de los elementos contaminantes existentes en el residuo minero, se ha procedido inicialmente a estudiar el lixiviado de la muestra de residuo sin vitrificar, es decir inalterada, y posteriormente, el de los distintos cerámicos correspondientes a las familias mencionadas; de esta forma, se podrá observar si efectivamente existe retención de los elementos y cuál era el máximo lixiviarle de cada muestra.

4.2.3.1. Espectrometría de masas por plasma de acoplamiento inductivo (ICP-masas).

Esta técnica de espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo, es una variante de las técnicas de análisis por espectrometría de masas. Esta técnica está establecida de manera estándar en laboratorios, para analizar: aguas, suelos, alimentos, muestras clínicas, entre otras.

Entre sus ventajas tenemos: alta precisión, reducido coste económico y bajos límites de detección. Además de analizar el mayor número de los elementos e isótopos de la tabla periódica, de forma simultánea en menor tiempo, lo cual representa un aporte importante para el ámbito de acción.

El fundamento del método está basado en la medición de la emisión atómica por medio de una técnica de espectroscopia óptica. Las muestras se nebulizan y el aerosol formado se transporta hasta la antorcha de plasma en donde tiene lugar la excitación electrónica. Un plasma de radiofrecuencia acoplado inductivamente (ICP) genera los correspondientes espectros de líneas de emisión atómicas. Los haces de luz son dispersados por un espectrómetro de red de difracción y los detectores se encargan de medir las intensidades de las líneas. Las señales originadas en los detectores se

procesan y controlan mediante un sistema informático. El equipo disponible en el CICT de la Universidad de Jaén es un espectrómetro ICP-masas modelo 7900 de Agilent, este modelo de última generación permite el análisis químico cualitativo y cuantitativo de la mayoría de elementos de la tabla periódica en un amplio rango de concentraciones, desde ppt hasta cientos de ppm, dependiendo del elemento a analizar, en soluciones acuosas y orgánicas.

El equipo dispone de los siguientes elementos diferenciadores:

- Celda de colisión reacción octopolar (Sistema ORS) para la eliminación de interferencias poliatómicas.
- Multiplicador de electrones con detección dual (analógica y digital) con 11 órdenes de rango dinámico.
- Automuestreador SPS4 para introducción de muestras con caja anticontaminación y tubo de conexión para la extracción de gases.
- Sistema de muestreo discreto ISIS3 mediante bomba de pistón y válvula Reodhyne.
- Sistema de introducción de muestras UHMI que permite la introducción de muestras directas hasta de un 25% en sólidos disueltos totales.
- Kit de introducción de disolventes orgánicos que permite trabajar tanto con muestras en mezclas agua/disolvente orgánico como con muestras en disolvente 100% orgánico.
- Sistema completo de conexión/interfase LCICPMS para trabajar en modo especiación con un tándem HPLC-ICPMS. Incluye el software cromatográfico MassHunter. El sistema es compatible tanto con sistemas HPLC de Agilent Technologies como de otros fabricantes.
- Software MassHunter Work Station, un paquete de programas específicos que permiten por un lado el control del equipo y por otro el desarrollo de métodos analíticos para la adquisición y posterior tratamiento de datos.

4.2.4. Análisis del ciclo de vida de los materiales cerámicos conformados con suelo contaminado.

El fin de este apartado es la determinación del beneficio ambiental que se produce por la incorporación del suelo contaminado en materiales cerámicos para ladrillos.

Esta evaluación ambiental se realiza con el software SimaPro versión 8.3.0.0 de PRé Consultants (Amersfoort, Países Bajos). La metodología de análisis de ciclo de vida fue realizada para los materiales detallados según las normas ISO 14040 e ISO 14044. En consecuencia, se definieron diversas etapas dentro del procesamiento del material que son imprescindibles para la obtención de un material cerámico. Estas etapas o procesos son los que se detallan a continuación:

- Extracción del material. La obtención de materias primas para la producción de cerámicos posee una serie de impactos significativos que deben tenerse en cuenta. Primeramente, se produce una alteración del paisaje, provocando afecciones importantes en la fauna, la flora y, a su vez, influyendo en las corrientes de agua subterráneas. Una vez preparada la superficie para la extracción del material, deben desarrollarse diferentes procesos para extraer la materia prima. Es usual en esta etapa el empleo de explosivos para la fragmentación de la roca y su posterior recogida con equipos mecánicos. Estos equipos de recogida cargan los vehículos de transporte que se tendrán en cuenta en la posterior etapa. Por lo tanto, los explosivos producen una serie de afecciones ambientales como son las ondas sísmicas, aéreas e incluso nubes de polvo. Además, los equipos mecánicos utilizados para perforación o para carga consumen usualmente combustibles fósiles. En consecuencia, se producen una serie de emisiones al medio ambiente y una importante afección ambiental.

- Transporte. Los equipos de carga de la anterior etapa proporcionan el material a los vehículos para su transporte. Este transporte, realizado usualmente por vehículos que consumen combustibles fósiles, trasladan el material desde el yacimiento a la industria cerámica. En esta investigación se ha tomado como distancia de transporte 20 kilómetros.

- Fabricación de cerámicos para ladrillos. Para la fabricación de materiales cerámicos es imprescindible una serie de etapas. Primeramente, se produce una molienda del material, posteriormente este material es mezclado con agua y, finalmente, conformado por extrusión para la obtención del material en verde. Seguidamente, el

material en verde es secado y sinterizado, consumiendo enormes cantidades de energía para elevar la temperatura a 950 °C.

Una vez definidas las etapas se procede a la determinación de la metodología seguida. La metodología seguida para el cálculo ambiental es CML 2000 en su versión 2.05 (Centro de Estudios Ambientales, Leiden, Países Bajos). Esta metodología se ha utilizado por diferentes motivos.

- Posee una elevada versatilidad y es capaz de cuantificar diferentes impactos de forma adecuada.
- Los datos que utiliza se fundamentan en bases de datos europeas e incluso mundiales, por lo que la extrapolación de los resultados a diferentes países es inmediata.
- Además, son diversas las investigaciones que han utilizado esta metodología y han supuesto un éxito para el cálculo de la afección ambiental.

Para llevar a cabo esta metodología de análisis de afección ambiental es necesaria la utilización de diferentes bases de datos reales en las que se mida directamente el impacto de cada etapa. Los datos utilizados para este fin corresponden a diferentes fuentes. Estas fuentes se detallan a continuación:

- Datos de bases de datos de corroborado prestigio, Ecoinvent v.3.2 (Ecoinvent, Zurich, Suiza).
- Datos empíricos medidos directamente de las diferentes etapas.
- Datos bibliográficos publicados en diversas investigaciones relacionadas con el ámbito de estudio.

Con las premisas detalladas anteriormente se obtuvieron las afecciones ambientales del proceso de obtención de materiales cerámicos con suelo contaminado. De esta forma pudo compararse objetivamente los resultados y obtener una serie de conclusiones parciales que determinan la bondad de la utilización del suelo contaminado como materia prima para cerámicos.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.1. Resultados de caracterización físico-química de los materiales utilizados.

5.1.1. Densidad real.

Para la densidad real de la arcilla y del suelo contaminado se ha utilizado la norma UNE-EN 1097-7:2009, y los resultados obtenidos son los que se muestran a continuación:

<i>Densidad real suelo</i>			
MUESTRA 1 S			
<i>m0</i>	Masa picnómetro seco	45,687	g
<i>m1</i>	Masa picnómetro + masa	55,692	g
<i>m2</i>	Masa picnómetro + masa + agua	201,201	g
	Densidad	2,783	g/cm ³
MUESTRA 2 S			
<i>m0</i>	Masa picnómetro seco	45,687	g
<i>m1</i>	Masa picnómetro + masa	55,692	g
<i>m2</i>	Masa picnómetro + masa + agua	201,216	g
	Densidad	2,795	g/cm ³
MUESTRA 3 S			
<i>m0</i>	Masa picnómetro seco	45,687	g
<i>m1</i>	Masa picnómetro + masa	55,696	g
<i>m2</i>	Masa picnómetro + masa + agua	201,216	g
	Densidad	2,793	g/cm ³
	DENSIDAD MEDIA	2,790	

Tabla 2.- Densidad real del suelo.

<i>Densidad real arcilla</i>			
MUESTRA 1 ARCILLA			
<i>m0</i>	Masa picnómetro seco	68,08	g
<i>m1</i>	Masa picnómetro + masa	78,083	g
<i>m2</i>	Masa picnómetro + masa + agua	205,338	g
	Densidad	2,44	g/cm ³
MUESTRA 2 ARCILLA			
<i>m0</i>	Masa picnómetro seco	68,08	g
<i>m1</i>	Masa picnómetro + masa	78,088	g

<i>m2</i>	Masa picnómetro + masa + agua	205,307 g
	Densidad	2,42 g/cm ³
MUESTRA 3 ARCILLA		
<i>m0</i>	Masa picnómetro seco	68,08 g
<i>m1</i>	Masa picnómetro + masa	78,09 g
<i>m2</i>	Masa picnómetro + masa + agua	205,387 g
	Densidad	2,47 g/cm ³
	DENSIDAD MEDIA	2,443 g/cm ³

Tabla 3.- Densidad real de la arcilla.

Los resultados de la densidad real de las partículas de arcilla y del suelo contaminado muestra la compatibilidad entre ambos materiales, este hecho se debe principalmente a que la densidad de la arcilla y el suelo son muy similares y prácticamente coincidentes con la de un suelo patrón convencional de 2,65 t/m³.

En consecuencia la mezcla de ambos materiales para el conformado de cerámicos no presentará problemas, ya que a igualdad de densidades, la homogenización de la mezcla será correcta.

5.1.2. Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.

Los resultados del límite líquido y plástico, son los que se muestran a continuación:

Límite líquido	38,5
Límite plástico	22,1
Índice de plasticidad	16,4

Tabla 4.- Resultados límites de Atterberg.

El índice de plasticidad que se obtiene para la arcilla es de 16,4, lo que nos indica que tiene una alta plasticidad, perfecta para su aprovechamiento como materia prima en materiales cerámicos.

5.1.3. Ensayo de análisis elemental.

En la siguiente tabla se refleja los resultados obtenidos en el ensayo de análisis elemental.

	<i>Nitrógeno %</i>	<i>Carbono %</i>	<i>Hidrógeno %</i>
<i>Suelo</i>	0,169	1,490	0,218
<i>Suelo</i>	0,172	1,738	0,234
<i>Media</i>	0,171	1,614	0,226

Tabla 5. Resultado análisis elemental suelo.

	<i>Nitrógeno %</i>	<i>Carbono %</i>	<i>Hidrógeno %</i>
<i>Arcilla</i>	0,041	1,192	0,656
<i>Arcilla</i>	0,038	1,137	0,646
<i>Media</i>	0,040	1,164	0,651

Tabla 6.- Resultado análisis elemental arcilla.

El análisis elemental refleja una arcilla roja típica, con una cantidad de materia orgánica muy baja.

Como se puede observar en la tabla 6 el porcentaje de nitrógeno es muy reducido, en consecuencia, no existen elementos contaminantes derivados de la combinación de este elemento como puede ser los nitratos que pudieran llegar a perjudicar el material final.

A su vez, el porcentaje de carbono e hidrógeno es también reducido por lo que cabe esperar que el porcentaje de materia orgánica que existe en el suelo también sea reducido. Cabe destacar que el porcentaje de carbono corresponde tanto a la materia orgánica como a los carbonatos de los minerales existentes en el suelo, en ambos casos, debido al reducido porcentaje de carbono. Puede determinarse que existe un porcentaje muy bajo de carbonatos y de materia orgánica.

En el caso de arcilla los porcentajes de carbono, hidrógeno y nitrógeno son similares a los obtenidos en el suelo contaminado por lo que la justificación de los resultados es similar.

5.1.4. Pérdida por calcinación.

Los resultados obtenidos para la pérdida de calcinación son los siguientes:

<i>Muestra</i>	<i>% Pérdida por calcinación</i>
<i>Suelo</i>	2,94
<i>Arcilla</i>	7,90

Tabla 7.- Resultado de pérdida por calcinación.

La pérdida por ignición o pérdida por calcinación supone la variación de masa que se produce antes y después de la calcinación de la muestra a la temperatura de 950°. Esta pérdida de masa se debe a diferentes factores, por una parte a la materia orgánica existente en la muestra y por otra parte, a los elementos volátiles que puedan existir. En este caso, se observa cómo la pérdida por calcinación del suelo es bastante reducida, hecho corroborado anteriormente por el análisis elemental. En consecuencia la existencia de materia orgánica existente en la muestra de suelo es también reducida así, como los elementos volátiles que pudieran existir

Por otra parte, la pérdida por calcinación de la arcilla es similar a la obtenida en otra muestra perteneciente al distrito de Bailén, ciudad productora de grandes cantidades de materiales cerámicos.

5.1.5. Fluorescencia de rayos X.

En las siguientes tablas se muestran los datos obtenidos por FRX tanto para el suelo como para la arcilla.

<i>Elemento</i>	<i>% peso</i>	<i>Error</i>
<i>Si</i>	31,240	0,1100
<i>Fe</i>	5,7700	0,1000
<i>Ca</i>	4,6100	0,0900
<i>Al</i>	3,0400	0,0600
<i>K</i>	2,0400	0,0600
<i>Na</i>	1,3100	0,0500
<i>Zn</i>	1,0800	0,0500
<i>Sx</i>	0,4460	0,0200
<i>Mg</i>	0,5430	0,0270
<i>Pb</i>	0,6490	0,0320
<i>Ba</i>	0,4910	0,0500
<i>Ti</i>	0,1480	0,0074
<i>As</i>	0,1420	0,0210
<i>Mn</i>	0,1360	0,0068

<i>Px</i>	0,0459	0,0025
<i>Cu</i>	0,0610	0,0030
<i>Sr</i>	0,0398	0,0028
<i>Zr</i>	0,0310	0,0035
<i>Cl</i>	0,0266	0,0013
<i>Cr</i>	0,0133	0,0015
<i>Ni</i>	0,0147	0,0016

Tabla 8.- Resultados fluorescencia rayos X suelo.

<i>Elemento</i>	<i>% peso</i>	<i>Error</i>
<i>Si</i>	24,60	0,12
<i>Al</i>	9,44	0,10
<i>Fe</i>	5,48	0,09
<i>K</i>	4,67	0,10
<i>Mg</i>	2,07	0,05
<i>Ca</i>	2,28	0,06
<i>Ti</i>	0,461	0,023
<i>Na</i>	0,123	0,011
<i>Px</i>	0,0672	0,0034
<i>Mn</i>	0,119	0,0059
<i>Zr</i>	0,0280	0,0036
<i>V</i>	0,0200	0,0017
<i>Sr</i>	0,0291	0,0030
<i>Ru</i>	0,0242	0,0016
<i>Rb</i>	0,0250	0,0044
<i>Pd</i>	0,0237	0,0035
<i>S</i>	0,0247	0,0013
<i>Ni</i>	0,0183	0,0016
<i>Pt</i>	0,0158	0,0034
<i>Cr</i>	0,0112	0,0016
<i>Cl</i>	0,0095	0,0008
<i>Co</i>	0,0057	0,0017
<i>Mo</i>	0,0042	0,0012
<i>Zn</i>	0,0050	0,0022
<i>Ga</i>	0,0038	0,0014

Tabla 9.- Resultados fluorescencia rayos X arcilla.

Como puede observarse en la tabla 9, la composición de la arcilla determinada por el ensayo de fluorescencia de rayos X corresponde a una usual composición de este material. En ella puede observarse como la presencia de silicio y aluminio determinan la existencia de un silicato aluminato. Cabe destacar el porcentaje de hierro capaz de proporcionar la resistencia al material cerámico conformado, así como el porcentaje reducido de calcio, creando por lo tanto, una arcilla de elevada calidad.

Por otra parte los resultados del ensayo de fluorescencia rayos X del suelo contaminado determinan que este residuo guarda cierta similitud con la arcilla evaluada. Se observa un elevado porcentaje de silicio acompañado de aluminio por lo que hace pensar que igualmente corresponde a un silicato aluminato. No obstante, el porcentaje de calcio en este caso es más elevado por lo que influirá en el detrimento de la calidad del material cerámico conformado. A su vez se identifican como elementos potencialmente contaminantes arsénico y plomo en porcentajes considerables, estos elementos son los que en la presente investigación y proyecto se desean retener en materiales cerámicos para evitar la contaminación que se pudiera producir por lixiviación con agua

5.2. Conformado de probetas. Ensayos físicos, mecánicos y colorimétricos.

5.2.1. Determinación de la contracción lineal tras sinterización.

Los resultados obtenidos para el cálculo de esta variable se recogen en la tabla y se muestra en la siguiente figura para su mejor comprensión.

<i>Familia</i>	<i>% Arcilla</i>	<i>% Suelo</i>	<i>Contracción lineal</i>
S 0	100	0	4,90
S 1	90	10	3,39
S 2	80	20	2,38
S 3	70	30	1,39
S 4	60	40	0,15
S 5	50	50	-0,14
S 6	40	60	-0,63
S 7	30	70	-0,67
S 8	20	80	-1,00
S 9	10	90	-1,30
S 10	0	100	-1,73

Tabla 10.- Resultados de contracción lineal.

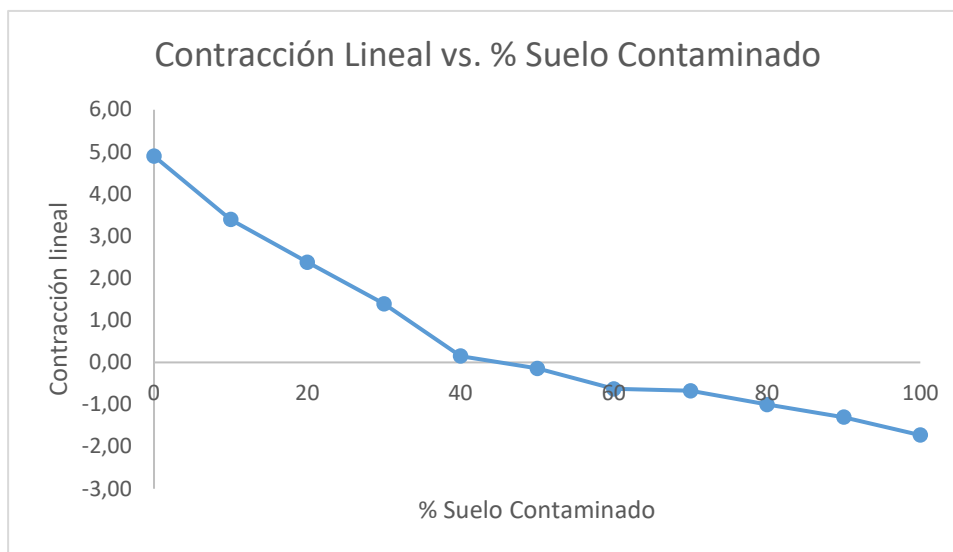


Figura 8.- Representación gráfica contracción lineal.

Los cerámicos conformados con la combinación de arcilla y suelo contaminado han reflejado una disminución de la contracción lineal desde la familia con 0% de residuo hasta la familia con el 100 % de suelo contaminado, produciéndose en esta misma una expansión lineal tras el proceso de sinterización. La familia de cerámicos conformada con 60% de arcilla y 40% de suelo contaminado representa una contracción lineal nula, es decir, no se produce ninguna variación de las dimensiones de las piezas antes ni después del proceso de sinterización. Esta característica física junto con la pérdida de masa condicionará enormemente las siguientes propiedades físicas que se detallan en los sucesivos apartados.

5.2.2. Determinación de la pérdida de peso tras sinterización.

Los resultados obtenidos para el cálculo de esta variable se recogen en la tabla y se muestra en la siguiente figura para su mejor comprensión.

<i>Familia</i>	<i>% Arcilla</i>	<i>% Suelo</i>	<i>Pérdida de peso</i>
S 0	100	0	8,19
S 1	90	10	7,60
S 2	80	20	6,98
S 3	70	30	6,36

S 4	60	40	5,69
S 5	50	50	5,41
S 6	40	60	4,81
S 7	30	70	4,67
S 8	20	80	4,30
S 9	10	90	4,02
S 10	0	100	3,35

Tabla 11.- Resultados de pérdida de peso.

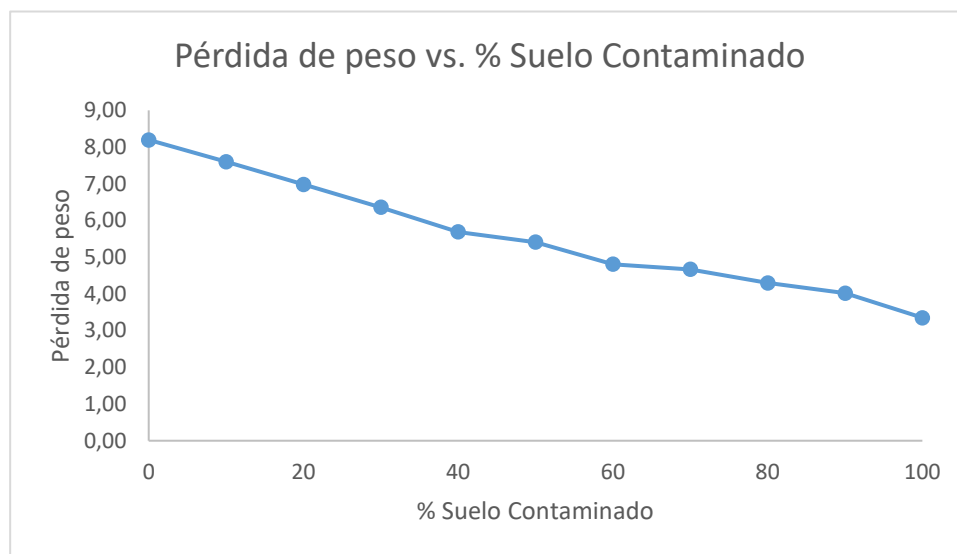


Figura 9.- Representación gráfica de pérdida de peso.

Los resultados de la pérdida de masa de la familia de cerámicos tras el proceso de sinterización refleja que se produce una disminución de la masa cuanto mayor es el porcentaje del suelo contaminado en proporción con la arcilla. Hecho esperable si se tiene en cuenta que la pérdida por calcinación de la arcilla es superior a la pérdida por calcinación del suelo. En consecuencia, la disminución de la masa de los cerámicos finales será proporcional al porcentaje de suelo incorporado.

5.2.3. Determinación de la absorción de agua por capilaridad (succión).

Los resultados obtenidos para el cálculo de esta variable se recogen en la tabla y se muestra en la siguiente figura para su mejor comprensión.

<i>Familia</i>	<i>% Arcilla</i>	<i>% Suelo</i>	<i>Succión</i>
S 0	100	0	217,14
S 1	90	10	446,02
S 2	80	20	818,51
S 3	70	30	1079,98
S 4	60	40	1121,36
S 5	50	50	1465,63
S 6	40	60	1378,55
S 7	30	70	1333,35
S 8	20	80	1653,84
S 9	10	90	2025,74
S 10	0	100	2559,68

Tabla 12.- Resultados de succión.

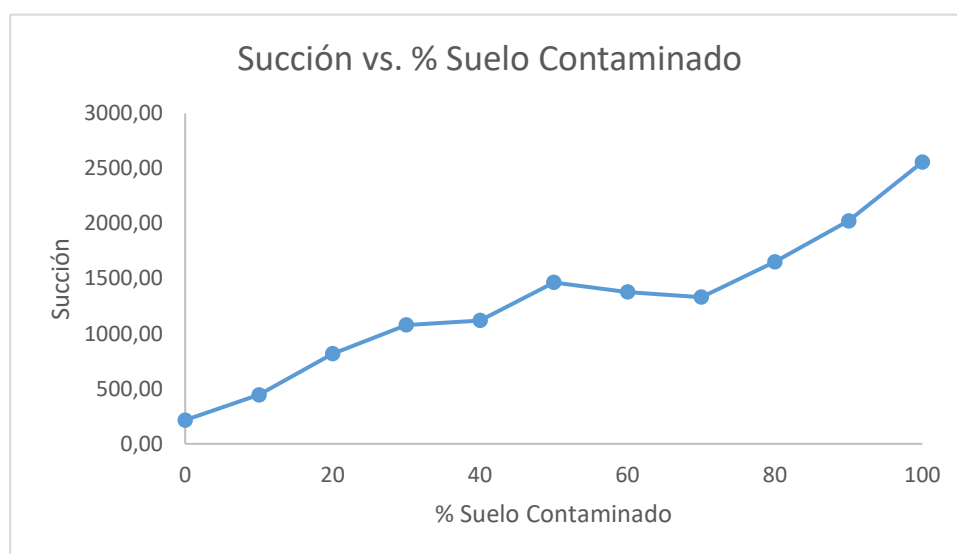


Figura 10.- Representación gráfica succión.

Los resultados del ensayo de succión realizado para las distintas familias de cerámicos conformadas con arcilla y suelo contaminado, refleja como se produce una mayor succión de agua con el aumento del porcentaje de suelo contaminado. En consecuencia puede estimarse, que el aumento del porcentaje de suelo contaminado crea una estructura cerámica con un mayor porcentaje de poros que se encuentran interconectados entre ellos. Por lo tanto, el agua expuesta en este ensayo de succión alcanza mayor profundidad en la pieza y refleja unos mayores valores de succión. Este ensayo de succión es imprescindible para determinar otras propiedades físicas

directamente relacionadas como la conductividad térmica. A su vez, es esencial la evaluación de este parámetro para que un elemento cerámico que esté expuesto al nivel freático. En todos los casos los valores obtenidos son aceptables según la normativa al respecto.

5.2.4. Determinación de la absorción de agua en frío 24 h.

Los resultados obtenidos para el cálculo de esta variable se recogen en la tabla y se muestra en la siguiente figura para su mejor comprensión.

<i>Familia</i>	<i>% Arcilla</i>	<i>% Suelo</i>	<i>Absorción agua en frío</i>
S 0	100	0	4,30
S 1	90	10	5,66
S 2	80	20	7,08
S 3	70	30	8,16
S 4	60	40	8,44
S 5	50	50	9,08
S 6	40	60	8,50
S 7	30	70	8,30
S 8	20	80	9,07
S 9	10	90	9,56
S 10	0	100	12,32

Tabla 13.- Resultados absorción agua en frío 24 h.

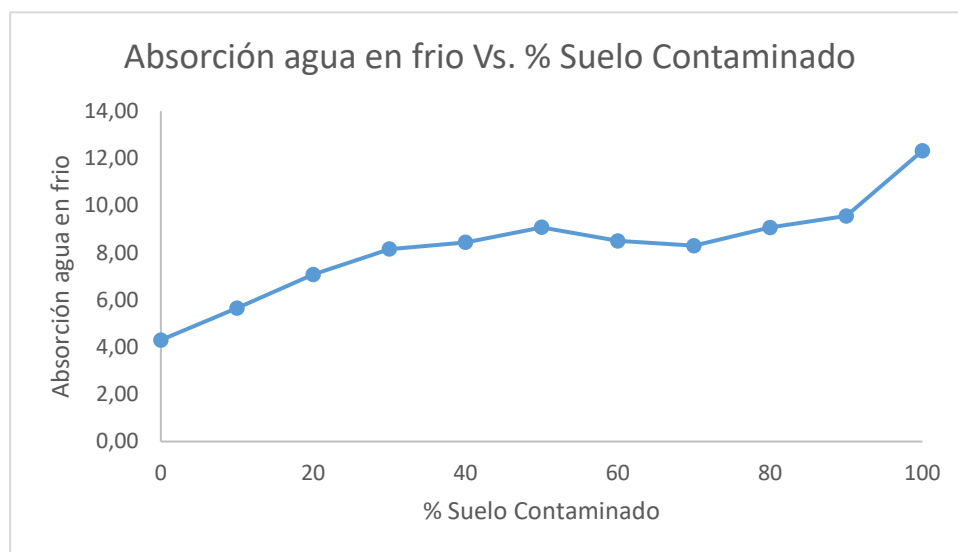


Figura 11.- Representación gráfica absorción agua en frío 24 h.

El ensayo de absorción en agua fría de las diferentes familias de cerámicos conformadas ha reflejado, como era de esperar por los resultados del ensayo anterior, que el aumento del porcentaje de suelo contaminado en el cerámico conlleva un aumento de la absorción de agua. Este hecho se debe principalmente, y como se ha detallado, a que el cerámico conformado con mayor porcentaje de suelo contaminado posee una estructura más abierta, contando con un mayor porcentaje de poros. Los valores de este ensayo no se encuentran limitados actualmente por la normativa no obstante sí debe tenerse en cuenta para elementos cerámicos que estén expuestos a la intemperie. Además, una mayor porosidad en el cerámico no condiciona una características negativas sino que pueden obtenerse propiedades de aislamiento térmico muy deseables para los nuevos materiales de construcción.

5.2.5. Determinación de la absorción de agua hirviendo, densidad aparente y porosidad abierta 24 h.

Los resultados obtenidos para el cálculo de esta variable se recogen en la tabla y se muestra en la siguiente figura para su mejor comprensión.

<i>Familia</i>	<i>% Arcilla</i>	<i>% Suelo</i>	<i>Absorción agua hirviendo</i>
S 0	100	0	5,82
S 1	90	10	7,52
S 2	80	20	9,29
S 3	70	30	10,52
S 4	60	40	10,91
S 5	50	50	11,50
S 6	40	60	10,87
S 7	30	70	10,77
S 8	20	80	11,98
S 9	10	90	12,57
S 10	0	100	16,22

Tabla 14.- Resultados absorción agua hirviendo.

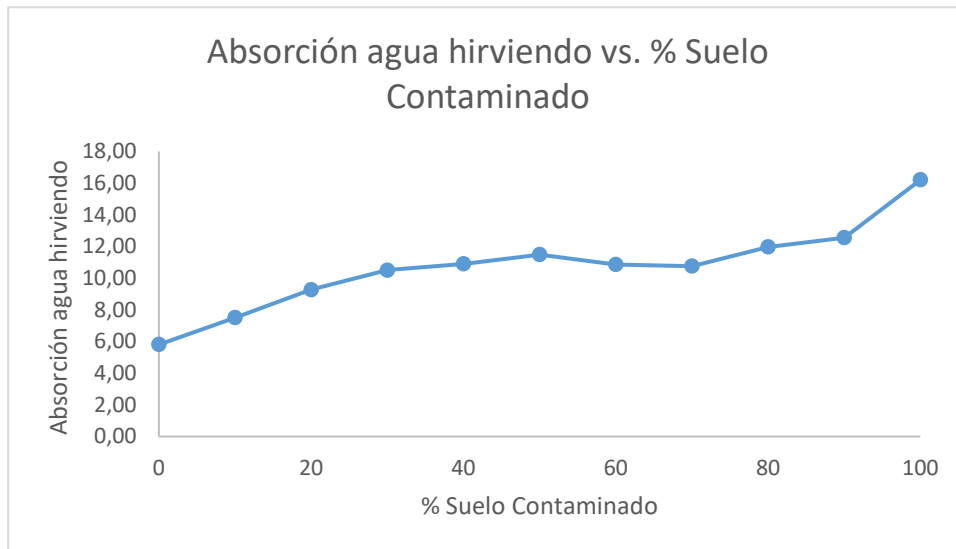


Figura 12.- Representación gráfica absorción en agua hirviendo.

<i>Familia</i>	<i>% Arcilla</i>	<i>% Suelo</i>	<i>Densidad aparente</i>
S 0	100	0	2,23
S 1	90	10	2,21
S 2	80	20	2,14
S 3	70	30	2,11
S 4	60	40	2,11
S 5	50	50	2,09
S 6	40	60	2,13
S 7	30	70	2,13
S 8	20	80	2,08
S 9	10	90	2,02
S 10	0	100	1,89

Tabla 15.- Resultados densidad aparente.

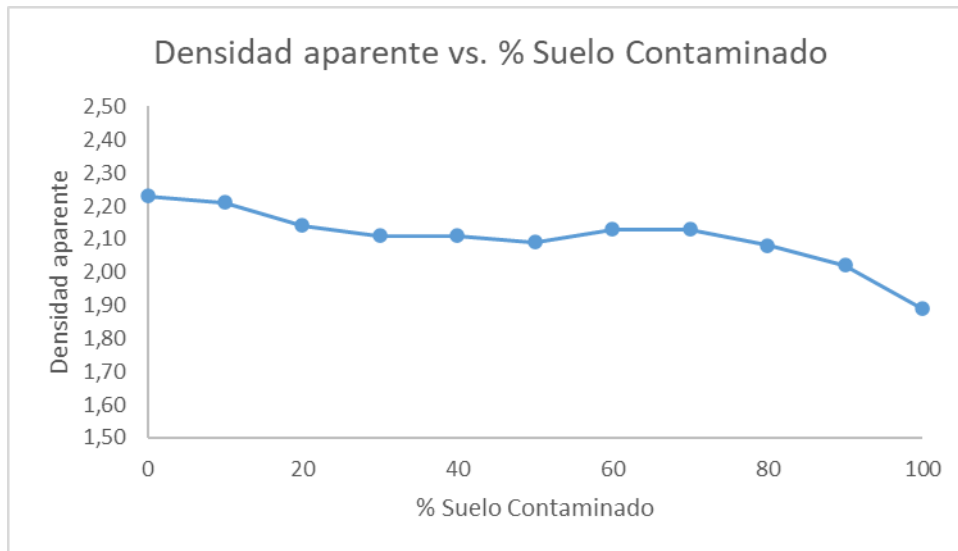


Figura 13.- Representación gráfica densidad aparente.

<i>Familia</i>	<i>% Arcilla</i>	<i>% Suelo</i>	<i>Porosidad</i>
S 0	100	0	12,98
S 1	90	10	16,58
S 2	80	20	19,91
S 3	70	30	22,23
S 4	60	40	23,04
S 5	50	50	24,04
S 6	40	60	23,12
S 7	30	70	22,98
S 8	20	80	24,89
S 9	10	90	25,33
S 10	0	100	30,59

Tabla 16.- Resultados porosidad.

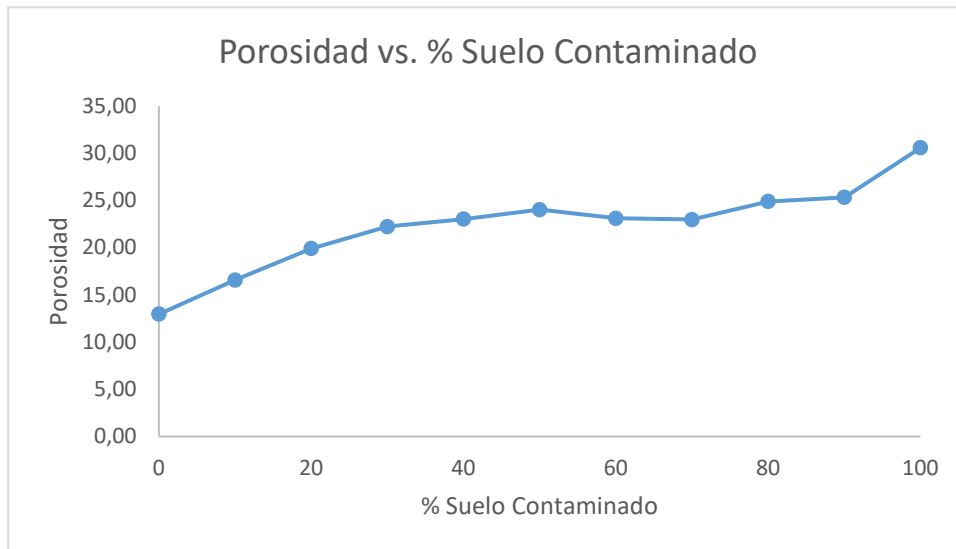


Figura 14.- Representación gráfica porosidad.

Los ensayos realizados anteriormente han reflejado una estructura con mayor porosidad en la familia de cerámicos conformados con suelos contaminados. Este hecho ha quedado patente en el ensayo de porosidad, reflejando los resultados un aumento de la porosidad con el incremento del porcentaje de suelo contaminado en el cerámico. Este aumento de porosidad condicionado a su vez, por una mayor dilatación del material cerámico, debido al incremento del porcentaje de suelo, ha mostrado como era de esperar una menor densidad del cerámico. En consecuencia, puede afirmarse que los cerámicos conformados con suelo contaminado consiguen una menor densidad y una mayor porosidad, propiedades muy interesantes si se desea obtener estructuras mucho más ligeras y con mayor aislamiento, tanto térmico como acústico. Los resultados de absorción en agua hirviendo, al igual que sucede con la absorción en agua fría, muestran como aumenta la absorción con el incremento del porcentaje del suelo. Estas propiedades, como se ha mencionado anteriormente, lejos de ser perjudiciales pueden aportar al material unas características muy deseables por el nuevo sector de la construcción sostenible. Además estos parámetros no se encuentran actualmente limitados por la normativa, por lo que serán otros ensayos los limitantes para establecer el porcentaje máximo de residuos que puede incorporarse.

5.2.6. Determinación de la resistencia a compresión.

Los resultados obtenidos para el cálculo de esta variable se recogen en la tabla y se muestra en la siguiente figura para su mejor comprensión.

<i>Familia</i>	<i>% Arcilla</i>	<i>% Suelo</i>	<i>Resistencia a compresión</i>
S 0	100	0	210,83
S 1	90	10	210,83
S 2	80	20	130,92
S 3	70	30	103,05
S 4	60	40	112,22
S 5	50	50	93,44
S 6	40	60	81,54
S 7	30	70	67,43
S 8	20	80	52,52
S 9	10	90	24,06
S 10	0	100	9,57

Tabla 17.- Resultados resistencia a compresión.

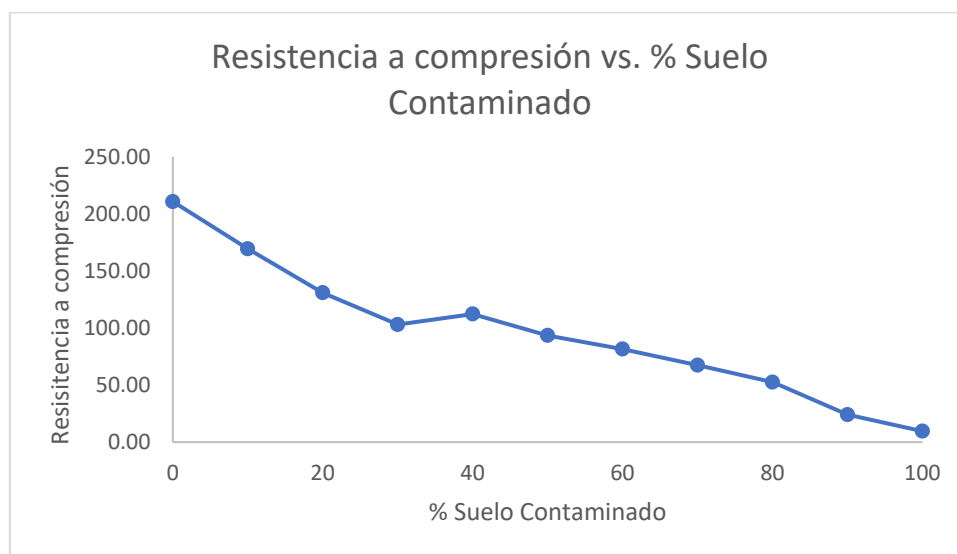


Figura 15.- Representación resistencia a compresión.

El ensayo de resistencia a compresión de las diferentes probetas de familias de cerámicos conformadas con arcilla y suelo contaminado ha reflejado como se produce una disminución de la resistencia con el aumento del porcentaje de suelo contaminado. Este hecho era totalmente esperable al obtener una disminución de la densidad del material y una mayor porosidad del mismo con el aumento del porcentaje de suelo. La normativa española respecto a la resistencia de materiales cerámicos para la construcción utilizados en albañilería limita la resistencia mínima del material a 10 MPa,

en consecuencia, solo la familia S 10 que tiene una resistencia menor a este valor y sería la rechazable para su empleo según este parámetro. No obstante, cabe destacar que los posteriores ensayos de lixiviación limitarán igualmente el porcentaje máximo de residuo que puede llegar a incorporarse.

5.2.7. Resultado del ensayo de colorimetría.

Los resultados del ensayo de colorimetría se muestran en la siguiente tabla.

<i>Familia</i>	<i>Red</i>	<i>Green</i>	<i>Blue</i>
S 0	280	163	125
S 1	275	162	125
S 2	274	167	131
S 3	261	157	123
S 4	253	155	121
S 5	276	169	127
S 6	256	161	120
S 7	239	152	116
S 8	238	158	118
S 9	245	190	145
S 10	361	303	257

Tabla 18.- Resultados colorimetría.

En la Figura 16 se muestran como varía el color de la probeta con la adición de suelo contaminado. La primera a la izquierda tiene un 100% de arcilla mientras que la primera de la derecha tiene un 100% suelo contaminado. Los incrementos han sido del 10%.



Figura 16.- Probetas.

5.3. Ensayos de lixiviación.

5.3.1. Espectrometría de masas por plasma de acoplamiento inductivo (ICP-masas).

A continuación se muestran los resultados obtenidos tras la aplicación del test TCLP.

La Tabla 19 [16] muestra los límites máximos permisibles establecidos por la EPA y que se emplearán para contrastar los datos que muestran las Tablas 20 a 24.

Máximas concentraciones permitidas en los lixiviados de TCLP (US.EPA).

<i>Metales</i>	Concentración permisible (ppb)
<i>Cr</i>	5000
<i>Pb</i>	5000
<i>As</i>	5000
<i>Cd</i>	1000
<i>Ba</i>	100000

Tabla 19.- Límites máximos permisibles establecidos por la EPA.

Determinación de cromo.

<i>% Suelo contaminado</i>	Cr (ppb)
10	24,8719764
20	34,646246
30	43,7741343
40	53,8396331
50	63,374085
60	73,8307577
70	83,4520998
80	92,7381079
90	102,82424
100	112,157157

Tabla 20.- Determinación de Cr

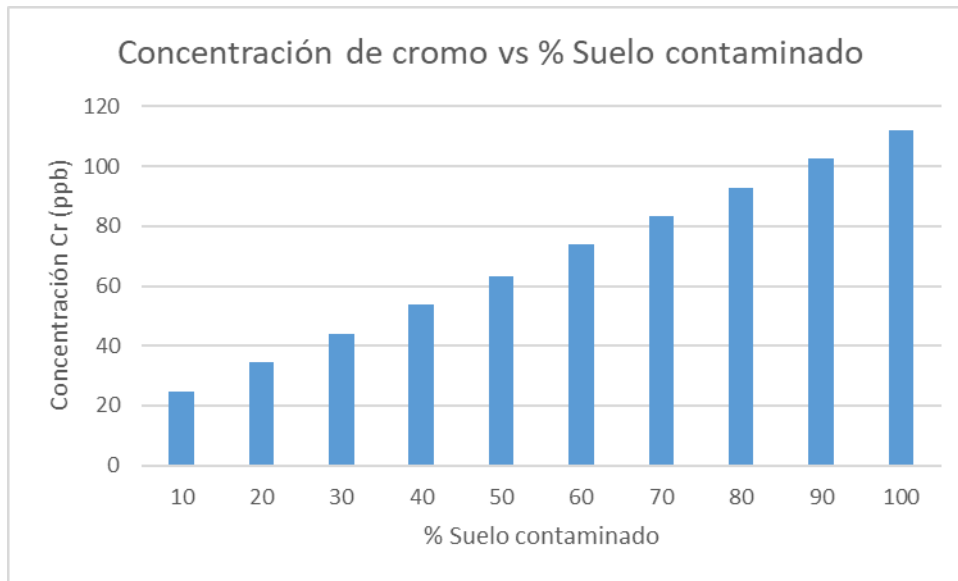


Figura 17.-Representación gráfica concentración de Cr.

Determinación de plomo.

<i>% Suelo contaminado</i>	Pb (ppb)
10	21,4257898
20	226,029422
30	428,678457
40	638,719596
50	840,838396
60	1053,27716
70	1244,25657
80	1455,22299
90	1640,70107
100	1861,732

Tabla 21.- Determinación de Pb.

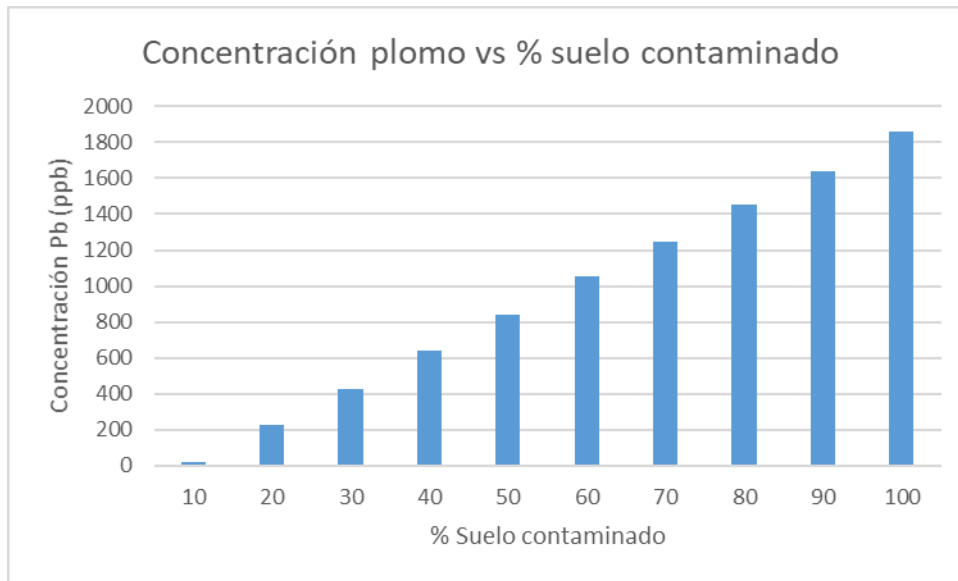


Figura 18.-Representación gráfica concentración de Pb.

Determinación de arsénico.

<i>% Suelo contaminado</i>	As (ppb)
10	197,392225
20	416,007128
30	633,008843
40	851,782459
50	1076,66198
60	1278,78357
70	1500,55178
80	1719,14632
90	1938,34902
100	2166,65945

Tabla 22.- Determinación de As.

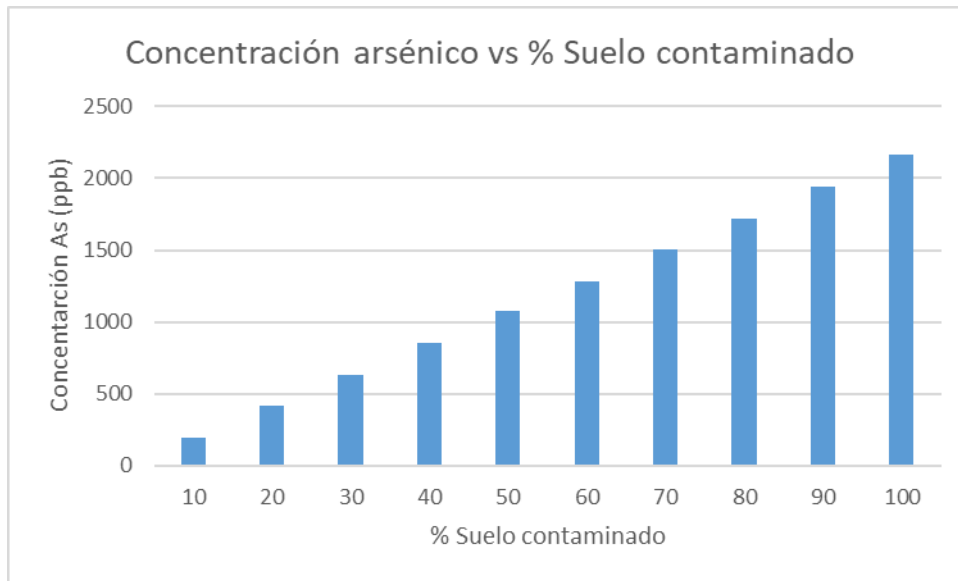


Figura 19.-Representación gráfica concentración de As.

Determinación de cadmio.

% Suelo contaminado

Cd (ppb)

10

2,78411744

20

14,9711587

30

27,4000465

40

40,0597242

50

51,8635861

60

64,0849221

70

76,8171493

80

88,4245283

90

101,420101

100

114,345613

Tabla 23.- Determinación de Cd.

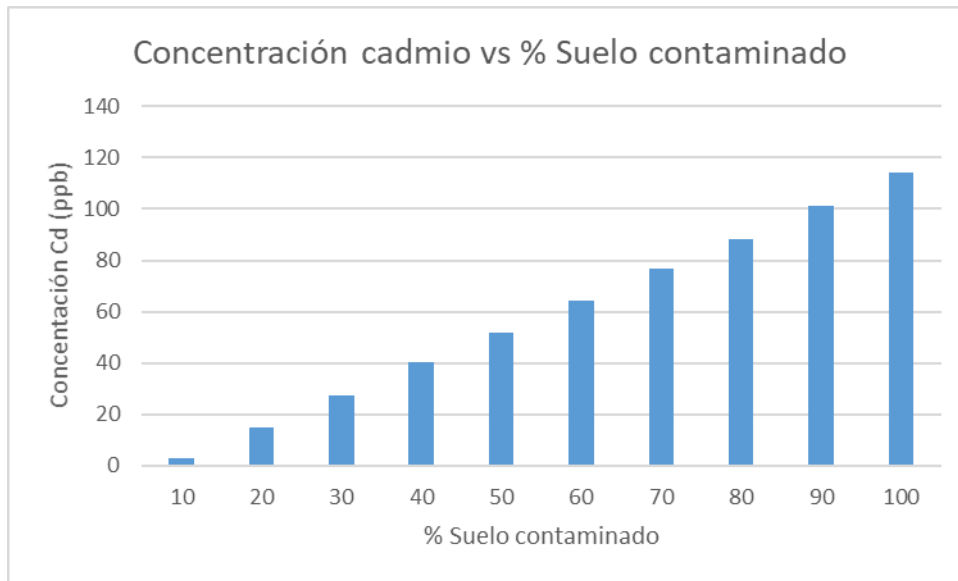


Figura 20.-Representación gráfica concentración de Cd.

Determinación de bario.

<i>% Suelo contaminado</i>	Ba (ppb)
10	258,003021
20	242,427477
30	226,735894
40	207,04751
50	191,748865
60	174,539293
70	157,244775
80	139,666714
90	124,071648
100	105,523197

Tabla 24.- Determinación de Ba.

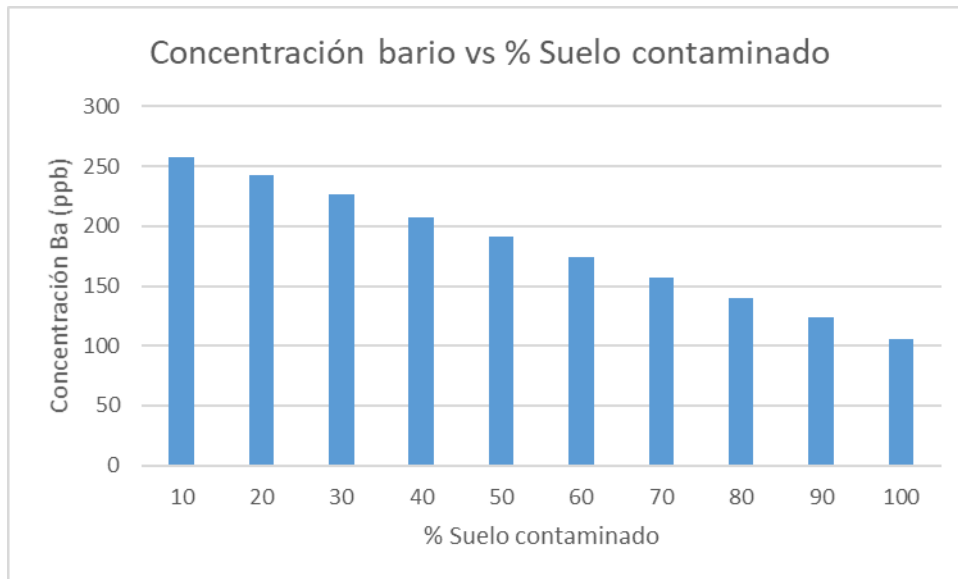


Figura 21.-Representación gráfica concentración de Ba.

En base a los resultados obtenidos del ensayo de lixiviación según la metodología TLCP, de los elementos químicos cromo, plomo, arsénico, cadmio y bario, se puede afirmar que todas las familias de cerámicos conformadas cumplen con los límites permisibles establecidos por la EPA. En consecuencia, se puede afirmar que este ensayo no es limitante para la incorporación máxima de suelo contaminado y que el material cerámico ha encapsulado en la matriz cerámica los elementos tóxicos en estudio tal y como se deseaba.

5.3. Análisis del ciclo de vida de los materiales cerámicos conformados con suelo contaminado.

Una vez evaluadas las diferentes familias de cerámicos conformadas con suelo contaminado y arcilla (física, mecánica y químicamente) se procedió a la determinación de las afecciones ambientales que producía cada una de estas familias.

Cabe destacar que una de las afecciones más utilizadas para evaluar el coste ambiental de un proceso es el calentamiento global. Este factor se mide en kilogramos de dióxido de carbono equivalente. Por lo tanto, en la Figura 22 se muestra las emisiones de CO₂ equivalente que se producen por la fabricación de un cerámico tradicional sin la adición de suelo contaminado, únicamente con arcilla.

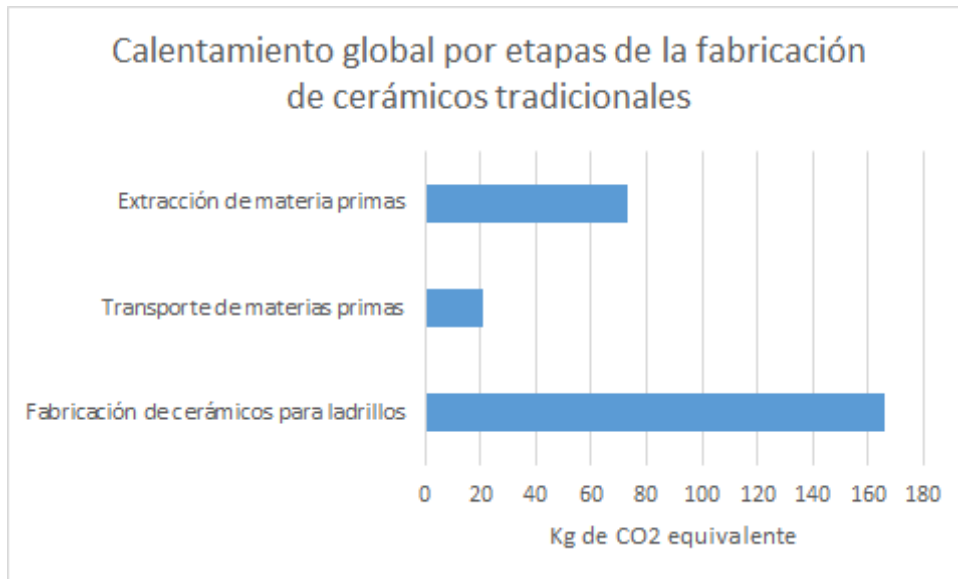


Figura 22.- Calentamiento global, en kg de CO₂ equivalente por tonelada de ladrillo fabricado, de las diferentes etapas necesarias para la fabricación de un cerámico tradicional.

Las emisiones de CO₂, como era esperable, son mayores para la etapa de fabricación de cerámicos. Este hecho se debe principalmente a que en esta etapa es donde se produce la sinterización del material a elevadas temperaturas. Por ello, se consumen enormes cantidades de energía. Por otra parte, la etapa de extracción supone a su vez unas emisiones de CO₂ importantes, ya que son necesarias distintas labores para la extracción de la arcilla. Las emisiones en esta etapa se verán reducidas por la utilización del suelo contaminado, ya que la utilización de este residuo hace posible la disminución de la extracción de materias primas. En último lugar, es necesario transportar las materias primas de la zona de extracción a la industria cerámica, este proceso es similar para el residuo y para la arcilla. En consecuencia, las emisiones serán invariables según este parámetro.

Seguidamente, y con el fin de determinar las ventajas ambientales que se producen por la utilización del suelo contaminado con materia prima para cerámicos, la Figura 23 muestra las emisiones de CO₂ para las diferentes familias de cerámicos conformadas con suelo contaminado y arcilla.

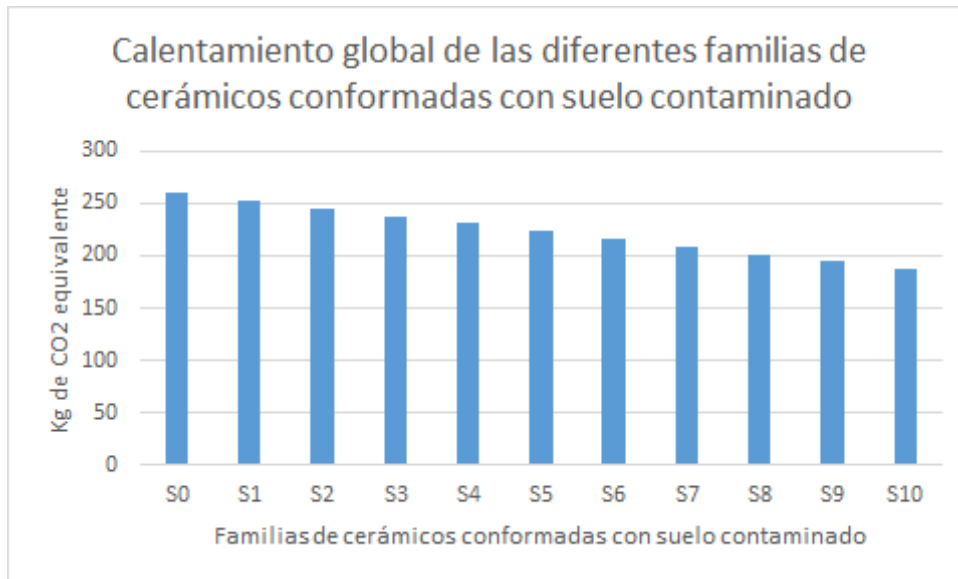


Figura 23.- Calentamiento global, en kg de CO₂ equivalente por tonelada de ladrillo fabricado, de las diferentes familias de cerámicas conformadas con suelo contaminado.

Como puede observarse, las emisiones de CO₂ producidas por la fabricación de cerámicos con suelo contaminado se reducen paulatinamente a medida que aumenta el porcentaje de suelo contaminado en el material. Este hecho es esperable si se tiene en cuenta que se reduce la extracción de materias primas, por lo tanto, esta etapa produce menores emisiones. La etapa de transporte y fabricación son similares para todas las familias de cerámicos, por lo que únicamente se produce una reducción en la extracción de materias primas.

En definitiva, y a la vista de los resultados, puede afirmarse que la utilización de suelo contaminado como materia prima para materiales cerámicos reduce significativamente las emisiones de CO₂.

6. CONCLUSIÓN.

Las conclusiones parciales extraídas a partir de los resultados de los diferentes ensayos detallados en la metodología permiten confirmar la conclusión final de la presente investigación. Esta conclusión final deriva directamente del objetivo del presente Trabajo Fin de Grado, reutilizar un suelo contaminado por actividades mineras para la fabricación de materiales cerámicos destinados a ladrillos de construcción, así como encapsular aquellos elementos tóxicos presentes en el suelo para evitar la contaminación ambiental. En consecuencia, las conclusiones parciales que se originan en la presente investigación son:

- La densidad del suelo contaminado es muy similar a la de la arcilla utilizada usualmente para el conformado de cerámicos, por lo tanto, no deben existir problemas de mezclado y homogenización en el proceso industrial. Además, el ensayo de análisis elemental ha reflejado resultados muy parecidos entre la arcilla y el suelo contaminado, existiendo unos porcentajes prácticamente nulos de nitrógeno e hidrogeno y un porcentaje reducido de carbono. Por lo tanto, esto valores demuestran que el porcentaje de materia orgánica en ambas muestras es muy reducido.
- La pérdida por ignición de la muestra de suelo contaminado es inferior incluso a la de la arcilla, demostrando la calidad de este material para su empleo en cerámicos. Tanto es así, que el ensayo de fluorescencia de rayos x ha reflejado una similitud de ambos elementos en cuanto a su composición química, siendo ambos materiales aluminosilicatos. No obstante, cabe destacar la presencia en el suelo contaminado de un mayor porcentaje de calcio, que supondrá un decremento de la calidad del cerámico conformado, así como de la existencia de ciertos elementos tóxicos que deben ser controlados en el proceso como son el zinc, el plomo, el arsénico, el cromo, etc.
- Las probetas de las familias de cerámicos conformadas presentaban una expansión durante el proceso de sinterización con el aumento del porcentaje de suelo contaminado existente, así como una pérdida de masa menor. Este hecho condiciona enormemente las propiedades físicas posteriores, existiendo una mayor succión de agua por capilaridad cuanto mayor es el porcentaje de suelo en el cerámico. Esta mayor succión de agua refleja la estructura más abierta de los cerámicos con suelo contaminado, existiendo una red de poros interconectados entre sí.

- La absorción en agua fría y la absorción en agua caliente de los cerámicos conformados aumenta a medida que lo hace el porcentaje de suelo contaminado. En consecuencia, este hecho refleja al igual que el ensayo anterior una estructura con mayor número de poros, como se ha determinado en el ensayo de porosidad. Por lo tanto, el incremento del porcentaje de suelo contaminado en el cerámico crea un cerámico con mayor porosidad. Este hecho lejos de ser un problema, puede presentar características muy interesantes al material como son el aislamiento térmico o el aislamiento acústico, siempre y cuando, se obtenga una resistencia adecuada del cerámico.
- La densidad aparente del cerámico disminuye a medida que aumenta el porcentaje de suelo contaminado, algo esperable si se tiene en cuenta los ensayos anteriores. En consecuencia, la resistencia disminuye paulatinamente hasta obtener que la familia conformada con el 100 % de suelo contaminado no cumple con los límites establecidos por la normativa de 10 MPa.
- El color de las diferentes familias de probetas fabricadas con porcentajes variables de arcilla y suelo contaminado también varían del color del cerámico tradicional conformado únicamente con arcilla. Este hecho se ha reflejado con los resultados de la colorimetría; no suponiendo en principio una limitación según normativa, pero si un factor a tener en cuenta para la comercialización de los materiales.
- Finalmente, el ensayo de lixiviados según la norma TCLP ha mostrado que la concentración de elementos tóxicos en el lixiviado de todas las familias de probetas es menor a los límites fijados por la EPA. Por lo tanto, todas las familias de cerámicos son utilizables según este ensayo, demostrándose que existe la encapsulación en la matriz cerámica de estos elementos contaminantes.
- El análisis de ciclo de vida ha demostrado que se produce una disminución del calentamiento global, medido en kilogramos de dióxido de carbono por tonelada de ladrillos, por la fabricación de cerámicos a medida que aumenta el porcentaje de suelo contaminado en el material. Este hecho se debe principalmente a que es necesaria una menor extracción de arcilla si se utiliza el suelo contaminado como materia prima.

En base a las conclusiones parciales, detalladas anteriormente, se puede afirmar que es posible la ejecución de materiales cerámicos capaces de retener los elementos contaminantes del suelo evaluado, creando un material que cumple con la normativa, reduce la extracción de materias primas, evita la contaminación ambiental provocada por este suelo y crea un material sostenible. Es por lo tanto la

presente investigación un ejemplo del potencial que reside aún en los residuos mineros del distrito de Linares, así como de las diferentes vías que existen para la reutilización de residuos, evitando la contaminación producida por ellos.

7. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.

El desarrollo del presente Trabajo permite obtener una serie de líneas de investigación futuras derivadas directamente de esta investigación. Estas líneas se detallan a continuación:

- Evaluación del aislamiento térmico de los cerámicos conformados con arcilla y suelo contaminado.
- Evaluación de la variación de las propiedades físicas y mecánicas de los cerámicos conformados con arcilla y suelo contaminado con el tiempo.
- Estudio del ciclo de vida de los cerámicos conformados con arcilla y suelo contaminado en comparación con cerámicos tradicionales.
- Estudio del coste económico de la fabricación de cerámicos con suelo contaminado y arcilla.
- Estudio de hormigones con suelo contaminado del distrito minero de Linares.
- Desarrollo de mezclas bituminosas con suelo contaminado como filler de aportación.
- Estudio de materiales poliméricos con suelo contaminado, así como análisis de los beneficios mecánicos obtenidos.
- Evaluación de diferentes suelos contaminados del distrito minero de Linares.
- Reutilización de residuos mineros del distrito de Linares en materiales para la construcción.

8. BIBLIOGRAFÍA.

La bibliografía empleada para la elaboración de este Trabajo Fin de Grado se muestra a continuación:

- [1] Elias Castells X., Bordas Alsina S. (2011). Energía, agua, medioambiente, territorialidad y sostenibilidad. Díaz de Santos. Madrid.

- [2] William D. Callister, Jr., Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Editorial Reverté S.A., (1995), Barcelona; traducción de: William D. Callister, Jr., Materials Science and Engineering, an Introduction, 3ed. Ed., John Wiley and Sons, Inc., New York.

- [3] Shackelford, J.F.: "Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros". 7ª edición, Prentice-Hall, Inc., 2010.

- [4] Asociación Española de fabricantes de ladrillos y tejas de arcilla cocida. Online: www.hispalyt.es [Consultado: 20-07-2021].

- [5] Elias Castells X. (2009). Tecnologías aplicadas al tratamiento de residuos. Valorización y fabricación de materiales a partir de residuos. En: Reciclaje de Residuos Industriales. 2ª Ed. pp. 91-172. Díaz de Santos. España.

- [6] Europa. Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos.

- [7] Europa. Directiva 2006/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de marzo de 2006 , sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas y por la que se modifica la Directiva 2004/35/CE.

- [8] España. Ley 5/2013, de 11 de junio, por la que se modifican la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación y la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.

- [9] España. Ley 11/2012, de 19 de diciembre, de medidas urgentes en materia de medio ambiente.
- [10] España. Real Decreto 777/2012, de 4 de mayo, por el que se modifica el Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por las actividades mineras.
- [11] Andalucía. Decreto 18/2015, de 27 de enero, por el que se aprueba el reglamento que regula el régimen aplicable a los suelos contaminados.
- [12] Andalucía. Decreto 73/2012, de 22 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento de Residuos de Andalucía.
- [13] Luis Alberto Toscano Morales. "Análisis de los parámetros y Selección de hornos para la combustión de biomasa". Tesis Doctoral. Escuela Superior Politécnica del Litoral. 2009.
- [14] Martínez, C., Cotes, T., Corpas, F.A. Recovering wastes from the paper industry: Development of ceramic materials. Fuel Processing Technology, n° 103 (2012).
- [15] M.L. Martínez, F.A. Corpas, N. Cruz, D. Eliche. (2012). Utilización de bagazo de la industria cervecera para la producción de ladrillos de construcción. Materiales de construcción. 62, 199-212.
- [16] U.S. EPA Test Method 1311 (TCLP) Toxicity Characteristic Leaching Procedure, 40 CFR part 261, Appendix II (EE. UU) Code of Federal Regulations, Julio 1991.