



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

**LADRILLOS SÍLICO-CALCÁREOS
OBTENIDOS EMPLEANDO COMO
MATERIA PRIMA RESIDUOS:
TIERRAS DECOLORANTES Y
GEOSILEX, UN RESIDUO DE LA
INDUSTRIA DEL ACETILENO**

Alumno: Ariadna Cobo Barea

Tutoras: Dolores Eliche Quesada

María Dolores La Rubia García

Dpto: Ingeniería Química, Ambiental y de los
Materiales

Septiembre, 2019



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Química, Ambiental y de los Materiales

Doña DOLORES ELICHE QUESADA y Doña MARÍA DOLORES LA RUBIA GARCÍA , tutoras del Trabajo Fin de Grado titulado: LADRILLOS SÍLICO-CALÁREOS OBTENIDOS EMPLEANDO COMO MATERIA PRIMA RESIDUOS: TIERRAS DECOLORANTES Y GEOSILEX, UN RESIDUO DE LA INDUSTRIA DEL ACETILENO; que presenta ARIADNA COBO BAREA, autorizan su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, SEPTIEMBRE de 2019

El alumno:

ARIADNA COBO BAREA

Las tutoras:

DOLORES ELICHE

M.DOLORES LA RUBIA

ÍNDICE

1.INTRODUCCIÓN.....	13
1.1.Justificación	13
1.2. Tierras decolorantes	14
1.3.GeoSilex.....	17
1.4.Ladrillos sílico-calcáreos.....	19
2.OBJETIVOS	20
3.PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	22
3.1.Caracterización de materias primas.....	22
3.1.1.Tierras Decolorantes	22
3.1.2.GeoSilex.....	22
3.1.3.Caracterización química.....	22
3.1.3.1.Determinación del pH y del contenido de carbonatos.....	22
3.1.3.2.Fluorescencia rayos X	23
3.1.4. Caracterización física	24
3.1.4.1.Distribución del tamaño de partículas	24
3.1.4.2.Determinación densidad relativa y superficie específica.....	24
3.1.5. Caracterización mineralógica (DRX).....	25
3.2. Preparación de los ladrillos sílico-calcáreos.....	26
3.3.Caracterización de los ladrillos sílico-calcáreos	28
3.3.1.Caracterización química	28
3.3.1.1.Espectrografía IR	28
3.3.2.Caracterización física.....	29
3.3.2.1.Dimensiones de la probetas	29
3.3.2.2.Densidad y porosidad aparente.....	29
3.3.2.3.Succión de agua.....	30
3.3.2.4.Absorción de agua.....	31

3.3.3.Comportamiento mecánico	32
3.3.3.1.Resistencia a la compresión	32
3.3.3.2.Resistencia a la flexión.....	33
3.3.4. Comportamiento térmico.....	33
4.RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
4.1.Caracterización de materias primas	34
4.1.1. Determinación del pH y contenido en carbonatos	34
4.1.2. Composición química (FRX) de las materias primas	34
4.1.3. Distribución granulométrica	35
4.1.4. Densidad relativa y superficie específica	37
4.1.5. Caracterización mineralógica (DRX).....	37
4.2.Caracterización de los ladrillos sílico-calcáreos	38
4.2.1. Densidad y porosidad aparente.....	39
4.2.2. Absorción de agua.....	41
4.2.3. Succión de agua.....	43
4.2.4. Caracterización mineralógica (DRX).....	44
4.2.5. Espectrometría infrarroja (FTIR)	45
4.2.6. Resistencia a la flexión.....	47
4.2.7. Resistencia a la compresión	48
4.2.8. Conductividad térmica.....	50
6.CONCLUSIONES.....	53
7.BIBLIOGRAFÍA	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: <i>Proceso de filtrado del aceite crudo</i>	15
Figura 2: <i>Diagrama de flujo de refinado físico.</i>	15
Figura 3: <i>Proceso de obtención del residuo GeoSilex</i>	18
Figura 4: <i>Representación gráfica de la cantidad de CO₂ capaz de eliminar 1m² de GeoSilex</i>	19
Figura 5: <i>PCE-PH20 S metro de sólidos</i>	23
Figura 6: <i>Espectómetro secuencial Philips Magix Pro (PW-2440)</i>	24
Figura 7: <i>Equipo Marvel-Mastersizer 2000</i>	24
Figura 8: <i>Frasco volumétrico de LeChatelier para la obtención de la densidad relativa.</i>	25
Figura 9: <i>Difractómetro automatizado de rayos X X - Pert Pro MPD (PANalytical)</i> ...	26
Figura 10: <i>Amasadora planetaria empleada para mezclar homogéneamente las materias primas.</i>	27
Figura 11: <i>Prensa hidráulica Morh & Federhaff Ac Mannheim</i>	26
Figura 12: <i>Punzón normalizado de 60 mm de largo por 30 mm de ancho.</i>	27
Figura 13: <i>Probetas sumergidas en agua durante 28 días.</i>	28
Figura 14: <i>Dimensiones de las probetas según la norma EN 722-16:2011.</i>	29
Figura 15: <i>Máquina MTS 810 Material Testing Systems de ensayo de resistencia a la compresión.</i>	32
Figura 16: <i>Medidor de flujo de calor FOX 50 TA Instrument.</i>	34
Figura 17: <i>Tamaño de partícula de los residuos tierras decolorantes y GeoSilex</i>	36
Figura 18: <i>Patrón DRX del Geosilex</i>	38
Figura 19: <i>Serie de probetas fabricadas.</i>	39
Figura 20: <i>Densidad aparente para distintos porcentajes en peso de tierras decolorantes y GeoSilex</i>	40
Figura 21: <i>Porosidad aparente para los distintos porcentajes en peso de tierras decolorantes y GeoSilex</i>	41
Figura 22: <i>Absorción de agua para los ladrillos sílico-calcáreos de distintos porcentajes de tierras decolorantes y GeoSilex en peso.</i>	43
Figura 23: <i>Representación de la succión de agua para los ladrillos sílico-calcáreos TD-G.</i>	44
Figura 24: <i>Caracterización mineralógica (DRX) para los ladrillos sílico-calcáreos TD-</i>	

G.....	45
Figura 25: <i>Espectrometría infrarroja (FTIR) de los ladrillos sílico-calcáreos TD-G....</i>	47
Figura 26: <i>Representación de los resultados del ensayo de resistencia a la flexión para ladrillos sílico-calcáreos de composición TD-G</i>	48
Figura 27: <i>Representación de los resultados del ensayo de resistencia a la compresión para ladrillos sílico-calcáreos de composición TD-G.....</i>	49
Figura 28: <i>Representación de la conductividad térmica para los ladrillos sílico-calcáreos de distintos porcentajes de TD-G</i>	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: <i>Esta tabla muestra el efecto directo e indirecto de las tierras decolorantes sobre las características de los aceites y grasas.</i>	17
Tabla 2: <i>pH y contenido de carbonatos en las tierras decolorantes y el GeoSilex</i>	34
Tabla 3: <i>Composición química de las materias primas, tierras decolorantes y GeoSilex.</i>	35
Tabla 4: <i>Clasificación de las piezas sílico-calcáreas para fábrica de albañilería en función de la resistencia a compresión.</i>	50
Tabla 5: <i>Coste de las materias primas.</i>	52
Tabla 6: <i>Precios en €/Tm por cada composición de ladrillo.</i>	53

RESUMEN

Actualmente, casi la totalidad de materias primas que se emplean en la construcción de infraestructuras provienen de recursos naturales ya existentes. Además, estos procesos suelen tener una huella de carbono negativa, ya que los procesos de producción de estos materiales no son sostenibles ni medioambientalmente responsables.

Esta es la principal razón por la cual se acude al estudio e investigación de nuevas tecnologías que permitan fabricar materiales de construcción sostenibles y respetuosos con el medioambiente utilizando materias primas reutilizables.

Por todo ello, el objetivo principal de este estudio es evaluar la viabilidad de utilización de dos residuos como materias primas para la elaboración de ladrillos sílico-calcáreos, en este caso en particular, los residuos a emplear son las tierras decolorantes (TD) obtenidas de la industria de los aceites y grasas vegetales, y el GeoSilex (G), obtenido de la industria del acetileno. Se fabricarán distintas series de ladrillos para comprobar, según las normas UNE de fabricación de materiales de construcción, la composición que tiene las mejores propiedades físicas, mecánicas y térmicas, además de caracterizarse sus fases mineralógicas y su microestructura. Se han fabricado 8 probetas de cada serie con las siguientes composiciones: 90TD-10G, 80TD-20G, 70TD-30G, 60TD-40G, 50TD-50G, 40TD-60G, 30TD-70G, 20TD-80G, que se obtendrán conformándolas a una presión de 10 N/mm² y se curan en agua durante 28 días.

Del estudio de estas propiedades se obtiene que la incorporación de GeoSilex produce un aumento de la densidad aparente, debido a la menor densidad de las tierras decolorantes con respecto al GeoSilex. Por su parte, la porosidad aparente y la absorción de agua decrecen conforme disminuye el porcentaje de tierras decolorantes, encontrando valores máximos para una composición de 40TD-60G. La succión de agua de los ladrillos y el poder de retención de agua son factores clave para explicar la unión de los ladrillos. La succión de agua de los ladrillos sílico-

calcáreos TD-G disminuye con el aumento del porcentaje del residuo GeoSilex. También se deduce del resultado de los análisis que la resistencia a la flexión, compresión y la conductividad térmica aumentan con el porcentaje de GeoSilex, lo que se traduce en ladrillos más resistentes pero menos aislantes. Los ladrillos sílico-calcáreos 70TD-30G son los que presentan un mejor balance de las propiedades físicas, mecánicas y térmicas.

Por tanto, se puede obtener como conclusión que según los resultados obtenidos para las probetas fabricadas con tierras decolorantes y GeoSilex, puede ser viable utilizar estas materias primas como materiales base en la industria de la construcción. Lo que va a ocasionar un notable impacto positivo sobre el medioambiente y beneficios económicos al utilizar como materia prima residuos.

ABSTRACT

Currently, most of the raw materials used in the construction of infrastructures come from existing natural resources. In addition these processes have a negative carbon footprint, since the production processes of these materials are not sustainable or environmentally responsible.

This is the main reason of the study and research of new technologies that allow the manufacture of sustainable and environmentally friendly building materials using reusable raw materials are used.

Therefore, the main objective of this study is to evaluate the feasibility of using two residues as raw materials for the elaboration of silica-calcareous blocks. In this case the raw materials are; the waste of the bleaching earth obtained from the vegetable oils and fats industry of, and GeoSilex, a waste obtained from the acetylene industry. Different series of blocks will be manufactured to check, according to the UNE standards of construction materials manufacturing, the composition that has the best physical, mechanical and thermal properties, in addition to characterizing its mineralogical phases and microstructure. 8 test pieces of each of the following compositions are created: 90TG-10G, 80TF-20G, 70TD-30G, 60TD-40G, 50TD-50G, 40TD-60G, 30TD-70G, 20TD-80G, which are manufactured according to one pressure of 10 N / mm^2 and cure in water for 28 days.

From the study of these properties it is obtained that the incorporation of GeoSilex produces an increase of the apparent density, due to the lower density of the bleaching earths with respect to the GeoSilex. On the other hand, the apparent porosity and water absorption decrease as the percentage of bleaching earth decreases, finding maximum values for a composition of 40TD-60G. The water suction of the bricks and the water retention capacity are key factors in explaining the union of the blocks. Water suction of the TD-G silica-calcareous blocks decreases with the increase in the percentage of GeoSilex waste. It also follows from the results of the analyzes that the resistance to bending, compression and thermal conductivity increase with the percentage of GeoSilex, which translates into more resistant but

less insulating blocks. The 70TD-30G silica-calcareous blocks have the best balance of physical, mechanical and thermal properties.

As conclusion and according to the obtained results for specimens manufactured with bleaching earth and GeoSilex, it may be feasible to use these raw materials as base materials in the construction industry. What will cause a significant positive impact on the environment and economic benefits when using as raw material waste.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

Tradicionalmente, a la hora de construir nuestros edificios, siempre se han empleado como materias primas materiales de carácter local, lo que indica que los costes energéticos e impacto ambientales eran reducidos. Además, el diseño de las infraestructuras buscaba tener unas buenas condiciones climáticas, que se resumen en una mayor calidad del edificio y un mayor confort térmico.

Actualmente, existe un uso masivo de materiales de carácter global, como son el cemento, el aluminio, el hormigón, el PVC..., lo que ha acaecido en unos fuertes costes energéticos y medioambientales.

Estudios recientes han demostrado que la fabricación de las materias primas necesarias para construir un metro cuadrado de una edificación estándar se equivale a un gasto de energía equivalente a la producida por la combustión de más de 150 litros de gasolina. Lo que se traduce en un consumo energético de 1600kWh de media y una emisión de 0,5 toneladas de dióxido de carbono, todo ello considerando solamente el impacto asociado a los materiales. (Usón, 2014)

De todo esto se deriva que el sector de la construcción no es sostenible por dos motivos, la obtención de la materia prima y los procesos de fabricación. La reducción del impacto ambiental del sector se centra en tres aspectos: el control de consumo de los recursos, la reducción de las emisiones contaminantes en el proceso productivo y la minimización y correcta gestión de los residuos que se generan. (Construmática)

Es por todos estos impactos energéticos y medioambientales que cada día existe una mayor conciencia ecológica, que se basa en la investigación como pilar fundamental para llevar a cabo iniciativas sostenibles y materiales reutilizables y reciclables, que ayuden a reducir los impactos negativos para la salud, medioambiente, naturaleza y sociedad.

En esta línea es de gran importancia considerar los residuos como un bien, es decir, aprovecharlos como materia prima mediante reciclaje o reutilización, e

incorporarlos de nuevo en el proceso productivo, imitando en cierto modo a los ciclos naturales. Es vital, por tanto, investigar y desarrollar tecnología que se capaz de reutilizar los recursos, a partir de materiales reciclados que se empleen como materias primas y mediante procesos de fabricación con el menor impacto posible.

Siguiendo esta senda, en este Trabajo Fin de Grado se pretende dar un impulso a la idea de utilizar materiales reciclados para la construcción de infraestructuras. Para ello se emplean tierras decolorantes, producto de una industria alimentaria, y GeoSilex un residuo de la industria del acetileno; para fabricar ladrillos sílico-calcáreos. Cabe destacar el aspecto de ahorro energético en la fabricación de los ladrillos, ya que son fraguados a temperatura ambiente, sin tener necesidad de ser introducidos en hornos de las industrias que rondan los 800°C, por lo que el coste energético en su producción es notablemente inferior.

1.2. Tierras decolorantes

Desde la antigüedad se han utilizado distintos tiempo de minerales de naturaleza silícica dentro de los procesos de refinado de aceites y grasas vegetales para mejorar las características de los mismos. (2014 TOLSA GROUP) Las tierras decolorantes son, por tanto, el principal residuo del proceso de refinación en la industria del aceite y las grasas vegetales. Como se indica en el Real Decreto 308/1983, del 25 de enero, por el que se aprueba la “Reglamentación Técnico-Sanitaria de Aceites Vegetales Comestibles”, se regula la decoloración en el proceso de refinación de los aceites y grasas vegetales comestibles por medio de tierras decolorantes. (BOE-A-1983-5543)

El blanqueamiento del aceite es parte del proceso de refinación del aceite o grasas vegetales, que busca minimizar, por medio de tierras de blanqueo, el contenido de pigmentos o colorantes (carotenos, clorofilas, etc) en estos, así como los metales pesados y restos de fósforo del aceite crudo. Además, con este filtrado se produce una mejora del aspecto y el sabor del aceite.

Una tierra de blanqueo o tierra decolorante trabaja según los siguientes

procesos: (Corvetto)

- Absorción: Llenando los poros intragranulares de las partículas de tierra
- Filtración: Remoción física por la acción de las partículas en suspensión
- Catálisis: La superficie activa de la tierra degrada los peróxidos.

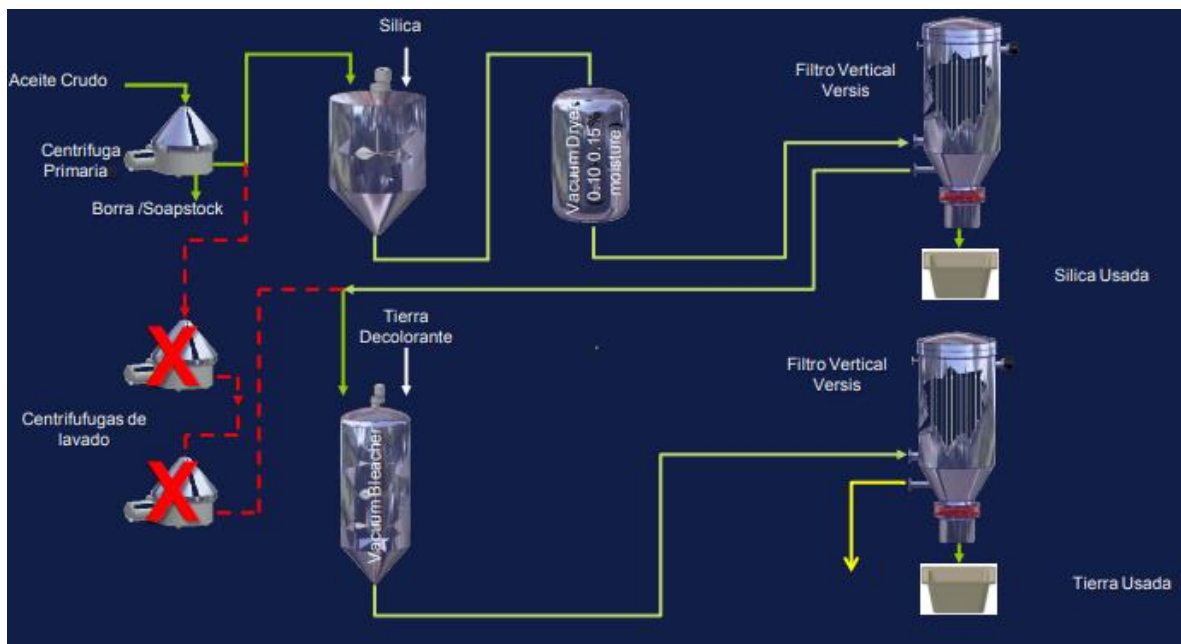


Figura 1: Proceso de filtrado del aceite crudo

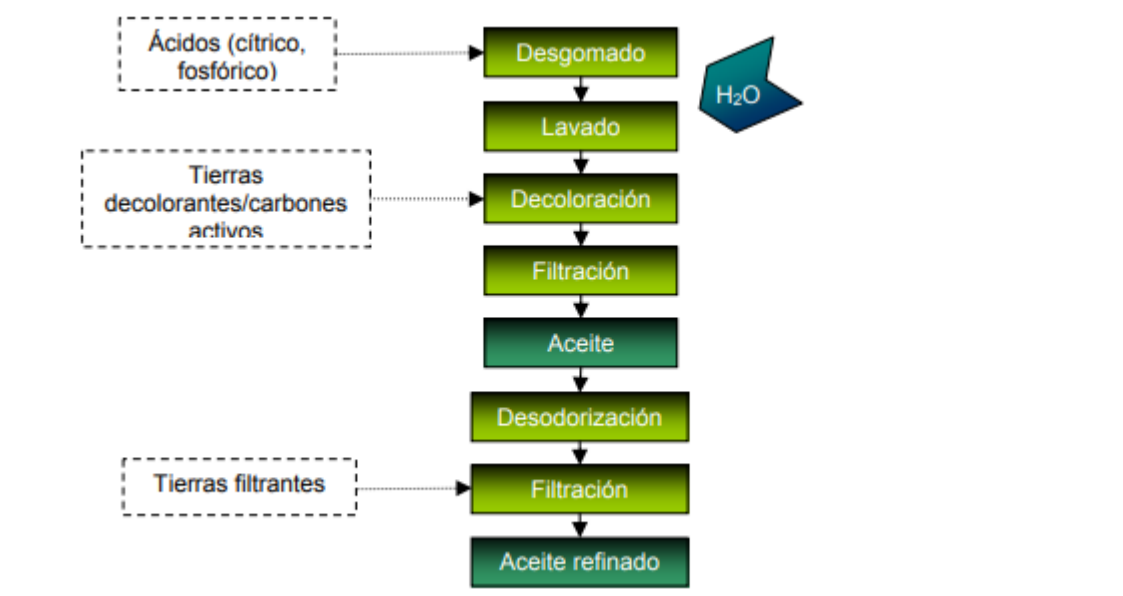


Figura 2: Diagrama de flujo de refinado físico.

Por tanto, los residuos obtenidos de esta industria, contienen un alto

contenido de grasas, entorno al 20-40% en peso de aceite residual, así como impurezas metálicas y otros compuestos metálicos. (Quesada, 2014) Las tierras de blanqueo ya agotadas son un residuo de difícil de gestionar por dos aspectos. Se considera que en torno a 120 millones de toneladas de aceite y grasas son procesados con tierras decolorantes en el mundo, lo que causa 2,5 millones de toneladas de residuo de tierras de blanqueo agotadas. (AVENTUM, 2017). Si se considera que de media la pérdida de aceite es del 30%, la pérdida económica es más que notable, ya que asciende a una pérdida de 75.000TM de aceite y grasas en el proceso de blanqueo en la filtración. Asimismo, este residuo es peligroso ya que el aceite contenido tiene riesgo de explosión. (C. Haro, 2014). La presencia de compuestos tóxicos, como aldehídos y cetonas adsorbidos en el residuo es perjudicial para el suelo y los seres vivos. Igualmente, con el transcurso del tiempo, las tierras decolorantes agotadas desprenden malos olores que también contaminan el medioambiente y propician la generación de enfermedades.

Antiguamente, la eliminación del residuo de las tierras decolorantes agotadas no se acogía a las nuevas políticas actuales de Economía Circular que se están promoviendo desde la Unión Europea, ya que en la mayoría de los casos se optaba por depositar estos residuos en un vertedero, con su consecuente impacto medioambiental. Actualmente, gracias a la legislación ambiental vigente, se han desarrollado tecnologías que permiten hacer un uso responsable de estos residuos, separando el aceite y grasas (cuya reutilización con fines comestibles es difícil debido a su alta oxidación) de las tierras de blanqueo, y estas últimas pueden ser utilizadas para la fabricación de fertilizantes, ladrillos, etc.

Para recuperar las tierras decolorantes de los residuos producidos, existen varios métodos: (C. Haro, 2014)

- Extracción del aceite contenido con solventes orgánicos como percloroetileno o hexano.
- Calcinación directa del material a temperaturas $>600^{\circ}\text{C}$.
- Extracción acuosa con carbonato de sodio.
- Extracción con CO_2 supercrítico.

Características de los aceites y grasas		Propiedades adsorbentes	Propiedades ácidas	Propiedades catalíticas	Capacidad de intercambio iónico	Distribución de partículas
Grado de Oxidación	Valores de color					
	Contenido AGL					
	Valor Peróxido					
	Valor Anisidina					
	Adsorción UV					
	Contenido de Gomas					
	Color					
Contenido de Metales Pesados						
Efecto Indirecto						
Efecto Directo						

Tabla 1: Esta tabla muestra el efecto directo e indirecto de las tierras decolorantes sobre las características de los aceites y grasas.

1.3. GeoSilex

El GeoSilex es un aditivo captador de CO₂ para hormigón, con un coste energético y medioambiental mínimo, que ha sido obtenido de los residuos de la industria del acetileno (C₂H₂). (Construnario, 2011) El hidróxido de calcio es la materia prima del GeoSilex, habitualmente este producto se solía desechar. Es un aditivo captador de CO₂ para hormigón, con coste energético y medioambiental cero, obtenido tras la selección, purificación y optimización de los residuos que se generan en la fabricación del acetileno. Su incorporación a productos prefabricados de hormigón, pavimentos y fachadas dota a las calles y a los edificios de una importante actividad depuradora de gases de efecto invernadero, especialmente CO₂, y recicla residuos de la industria química. La patente del GeoSilex pertenece a la empresa Tenzametal S.L y a la Universidad de Granada. (Trenzametal, 2011)

El hidróxido de calcio se somete a un proceso de para eliminar las impurezas presentes en él, como son los sulfuros, sulfitos, sulfatos y restos de carbono orgánico (véase Figura 3), que perjudican la reactividad de la cal en contacto con la sílice y los aluminosilicatos, además, en su fabricación se potencian las reacciones hidráulicas puzolánicas, se modula la capacidad de carbonatación, y se producen agregaciones con microestructura tridimensional muy coherente. El resultado de

este proceso es la obtención de un material con funciones cementantes para la formación de aglomerados, con una capacidad de captación de CO₂ equivalente al 50% de su peso. (Construnario, 2011) El proceso de producción del GeoSilex se hace si prácticamente ningún coste energético ni medioambiental, haciendo un ciclo sostenible de utilización de este recurso, ya que este proviene de un residuo de una industria y servirá como materia prima de la industria de construcción.

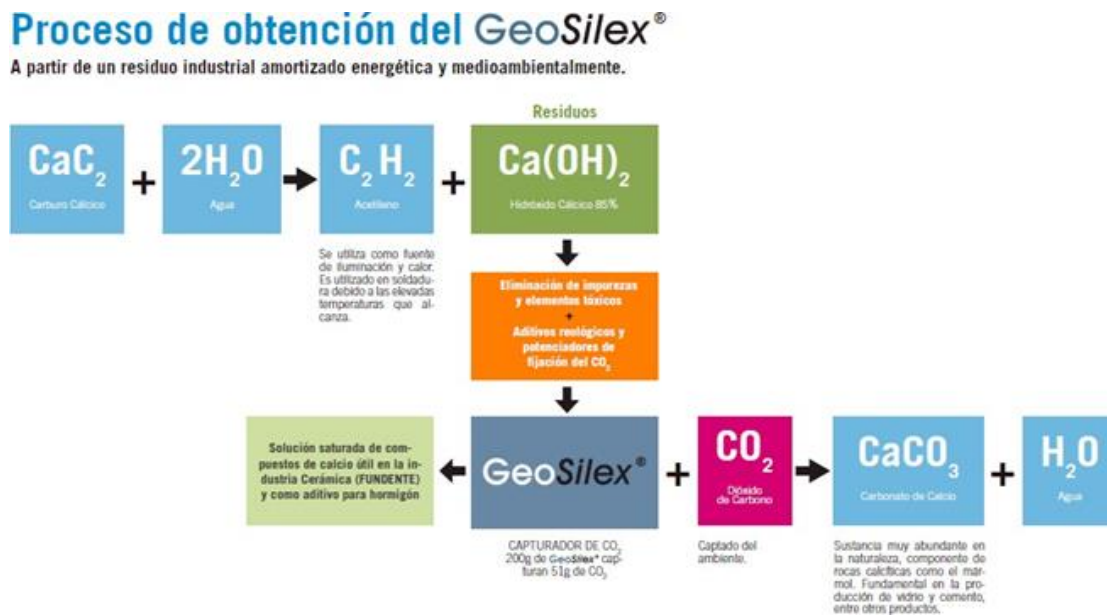


Figura 3: Proceso de obtención del residuo GeoSilex

Haciendo un balance, el GeoSilex cumple con las premisas de ser un material de construcción sostenible, ya que: (Construnario, 2011)

- La fabricación se produce a partir de residuos. El 97% de la composición del GeoSilex proviene de residuos.
- La fabricación presenta una huella de carbono cero. Obtenida sin emisiones de CO₂.
- El GeoSilex capta y almacena CO₂, reduce un 30% la huella de carbono del cemento.
- No genera residuos ni vertidos en el proceso de fabricación. El fluido sobrante se vuelve a introducir en el proceso de fabricación.
- Existe eficiencia energética en el proceso de fabricación, porque el fluido sobrante generado se introduce como fundente reduciendo el consumo de energía en la cocción de ladrillos cerámicos.
- Cooperar con el resto de los materiales para conseguir una mayor eficiencia

en los elementos en los que se aplica. La adición de GeoSilex aporta un reservorio de portlandita que alarga la vida de los hormigones.

- Coopera con otros materiales de acción medio ambiental positiva a la mayor eficiencia de su actividad: La adición de GeoSilex a los hormigones con TiO_2 fotocatalítico aumenta la reducción de los NO_x .
- El GeoSilex otorga un elevado pH y por ello contribuye a la estabilidad química del cemento a largo plazo, favoreciendo la durabilidad.

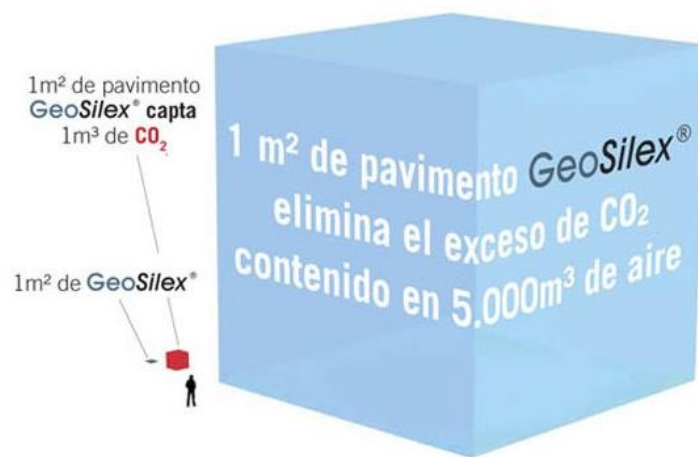


Figura 4: Representación gráfica de la cantidad de CO_2 capaz de eliminar 1m^2 de GeoSilex

Siguiendo la línea de este Trabajo Fin de Grado de utilizar residuos como recursos para la fabricación de ladrillos sílico-calcáreos, se utiliza el GeoSilex como fuente de hidróxido cálcico, sustituyendo la cal, en la búsqueda de eliminar el impacto medioambiental que produce la fabricación de ladrillos con materiales convencionales debido a las grandes emisiones de CO_2 ante la necesidad de calcinación del material a altas temperaturas. Sin embargo, como se ha demostrado anteriormente, el GeoSilex es totalmente sostenible, ya que proviene de la industria del acetileno en forma de residuo y es reutilizado, sin prácticamente ningún consumo de energía.

1.4. Ladrillos sílico-calcáreos

El material sílico calcáreo es una mezcla de cal, agregados áridos y agua. Actualmente siguiendo este esquema de composición nos encontramos en la búsqueda de nuevos materiales de construcción con menor impacto medioambiental por menor emisión de gases de efecto invernadero y menor consumo energético durante su fabricación, ha dado lugar a materiales cerámicos obtenidos por

cementación que no necesitan cocción en el horno. Su obtención se basa en la cementación del residuo en sí debido a su actividad puzolánica.

Para ello se buscan materiales puzolánicos naturales cuya composición química sea principalmente sílice, conteniendo en cantidades mínimas Fe_2O_3 y otros óxidos. Estos materiales, por su característica puzolánica, tienen gran afinidad con la cal y aunque no se endurecen por sí solos, tras un proceso de amasado con agua, hace que finalmente, en presencia de agua y a temperatura ambiente, los materiales puedan reaccionar con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para formar silicatos de calcio hidratados y aluminatos de calcio hidratados que poseen buenas propiedades mecánicas. La microestructura que se forma no sólo mejora la resistencia mecánica, sino que el material acabado tiene un tiempo de vida más largo.

Los ladrillos sílico-calcáreos, de forma genérica, se componen tradicionalmente por una mezcla en agua de cal viva finamente molida y arena fina natural con un alto contenido en sílice, que se moldean a presión y no necesitan cocción, puesto que se endurecen con vapor o inmersión en agua. Durante el tratamiento la sílice de la arena reacciona químicamente con la cal para producir silicatos-cálcicos hidratados, que actúan como agente cementante fuerte y durable que une las partículas de la arena.

En este proyecto se en lugar de arena de sílice, otro residuo con actividad puzolana como son las tierras decolorantes, que combinándolas con un residuo del acetileno, GeoSilex, como fuente de cal, da lugar a la fabricación de ladrillos sílico-calcáreos sostenibles.

2. OBJETIVOS

El desarrollo sostenible de la economía mundial que se encuentra fuertemente industrializada, nos ha conducido a una fuerte sensibilización sobre la reutilización de residuos de producción.

Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo es valorizar y aprovechar los

residuos, en este caso, tierras decolorantes, un residuo de la industria de los aceites y grasas vegetales fruto del proceso de decoloración, como fuente de sílice; y GeoSilex, un residuo de la industria del acetileno, como fuente de cal; para obtener ladrillos sílico-calcáreos sostenibles mediante un proceso de cementación.

Siguiendo esta senda, y apoyándose en la investigación, se pretende poner a disposición de la industria de la construcción una alternativa fiable, ecológica y económicamente viable y competitiva para la fabricación de ladrillos sílico-calcáreos sostenibles. Además de presentar un beneficio al medioambiente, ya que se encuentra una reutilización de los numerosos residuos producidos en la industria de los aceites y grasas vegetales, evitando así el vertido directo y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.

Asimismo se persiguen los siguientes objetivos técnicos:

- Conocer la composición de las materias primas empleadas, es decir, la composición de las tierras decolorantes y GeoSilex.
- Fabricar probetas de ladrillos sílico-calcáreos con distintas composiciones de tierras decolorantes (90%-20% en peso) y GeoSilex (10%-80% en peso), por medio de un proceso de conformación por cementación.
- Estudiar las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de los ladrillos obtenidos mediante el proceso de cementación. Este estudio de las propiedades se realizará conforme a las normas vigentes para materiales de construcción.

Una vez logrados estos objetivos, se dispondrá del conocimiento necesario para conocer los aspectos relativos a la viabilidad económica y al impacto social de los resultados, dando la posibilidad de desarrollar nuevos ladrillos sílico-calcáreos con nuevas y mejoradas prestaciones y ventajas competitivas, especialmente en sostenibilidad y respecto al medioambiente; ventajas superiores a los ladrillos sílico-calcáreos que no incorporan residuos, al suponer un ahorro en materias primas, empleando en su lugar la reutilización de residuos, economizando así el proceso de producción.

Igualmente, se les proporciona a las industrias generadoras de estos residuos una alternativa sostenible a la gestión de sus residuos generados, haciendo un Ciclo Sostenible al encontrarle uso a estos residuos.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1. Caracterización de materias primas

Para poder fabricar los ladrillos sílico-calcáreos con los que posteriormente realizar el estudio, es necesario caracterizar las materias primas que van a ser empleadas. En este caso se utilizan tierras decolorantes como fuente de sílice y geosilex, como fuente de cal.

3.1.1. Tierras Decolorantes

Las tierras decolorantes utilizadas en este proyecto, han sido suministradas por la empresa Leioa (Vizcaya), que se dedica a la fabricación de margarinas, mayonesas y salsas (Helmann's, Calvé, Flora,...) y que cuenta con una planta de refinería. Estas han sido calcinadas a 750 °C durante cuatro horas para lograr una eliminación completa de los residuos orgánico contenidos en el material.

3.1.2. GeoSilex

El GeoSilex que se ha empleado en este trabajo, es un residuo de la industria del acetileno, que ha sido suministrado por la empresa GeoSilex TrenzaMetal S.L. en forma de pasta. Para poder trabajar el material, la pasta ha sido sometida a un proceso de secado a 80 °C en estufa para eliminar la humedad en su totalidad. Después del secado se procedió a su molienda en molino de bolas para obtenerlo en forma de polvo.

3.1.3. Caracterización química

3.1.3.1. Determinación del pH y del contenido de carbonatos

Con el fin de medir el pH de las materias primas empleadas en la fabricación de los ladrillos, se utilizó un pH-metro de sólidos PCE-PH20S de la marca "PCE Instrument" (véase Figura 5).



Figura 5: PCE-PH20 S metro de sólidos

Así pues, mediante el método de calcimetría de Bernard, se pudo conocer el contenido de carbonos de los residuos. El método se basa en la reacción del ácido clorhídrico HCl con el carbonato cálcico CaCO_3 desprendiendo CO_2 y midiendo la cantidad emitida de este.

3.1.3.2. Fluorescencia rayos X

La determinación de la composición química de las materias primas utilizadas, se llevó a cabo mediante un proceso de fluorescencia de rayos X (FRX), para el que se empleó el equipo Philips Magix Pro (PW-2440), que es un espectrómetro secuencial de longitud de onda dispersiva con generador de rayos X (véase Figura 6).

Esta técnica consiste en excitar cada muestra con una fuente que emite rayos X. La radiación que incide sobre la muestra, hace que se expulsen los electrones que se encuentran en las capas interiores del átomo, logrando que los electrones de las capas exteriores ocupen las vacantes dejadas por los electrones en las zonas interiores. Esta radiación es característica de cada elemento dentro del espectro.



Figura 6: *Espectómetro secuencial Philips Magix Pro (PW-2440)*

3.1.4. Caracterización física

3.1.4.1. Distribución del tamaño de partículas

Para conocer la distribución del tamaño de las partículas de las materias primas, se utiliza un equipo Malvern-Mastersizer 2000 (véase Figura 7). Su rango de tamaño oscila entre 0.02 y 2000 micras, dependiendo de las propiedades del material. Utiliza la tecnología de difracción de luz láser para realizar el ensayo, que consiste en un rayo láser monocromático expandido que pasa a través de una muestra, que anteriormente tiene que estar hecha polvo, por lo que la luz se difracta, produciéndose una figura de difracción, en el plano de enfoque de la lente, de simetría radial (discos de Airy). Si las partículas que son atravesadas por el láser presentan tamaños diferentes, la figura de difracción que se obtiene se presenta como una superposición de figuras de Airy. Cada una de ellas se corresponde con un diámetro de partícula.

**Figura 7:** *Equipo Marvel-Mastersizer 2000*

3.1.4.2. Determinación densidad relativa y superficie específica

Para la determinación de la densidad relativa de los residuos se usa el frasco

volumétrico de LeChatelier.



Figura 8: Frasco volumétrico de LeChatelier para la obtención de la densidad relativa.

A partir de la obtención de la densidad relativa por medio del frasco volumétrico, la determinación de la superficie específica se realiza mediante el método de Blaine, conforme a la ecuación siguiente:

$$S\left(\frac{cm^2}{g}\right) = \frac{524.17 * 2.66 * \sqrt{t}}{\rho} [Eq\ 1]$$

Donde ρ , es la densidad de la muestra en g/cm^3 ; y t , el tiempo que se obtiene en el ensayo de Blaine.

3.1.5. Caracterización mineralógica (DRX)

La caracterización mineralógica se lleva a cabo mediante la Difracción de Rayos X (DRX).

Esta técnica experimental tiene como objetivo abordar la identificación de fases cristalinas de un material; y consiste en hacer incidir un haz de rayos X, con un ángulo determinado, sobre la muestra de material. Al incidir los rayos, parte del haz se dispersa, no obstante, el resto de haz produce un fenómeno de difracción de rayos X, lo que permite que se puedan determinar las fases cristalinas de la muestra.

Para evaluar estas fases, se utiliza un difractómetro automatizado de rayos X

X – Pert Pro MPD (PANalytical) equipado de un monocromador primario Ge (111), en el que usando la radiación Cu Ka ($\lambda = 1,5406$) y un detector de radios X, se pueden identificar las fases cristalinas. Para ello se emplea un software de High Score Plus de PANalytical, que usa la base de datos COD_201.



Figura 9: Difractómetro automatizado de rayos X X - Pert Pro MPD (PANalytical)

3.2. Preparación de los ladrillos sílico-calcáreos

Para la preparación de los ladrillos sílico-calcáreos se dispone de las materias primas, que son las tierras decolorantes, el geosilex y el agua destilada. Para poder utilizar el geosilex, como se ha indicado anteriormente, este se dispone a secar a 80 °C en una estufa con atmósfera controlada para que no se carbonate, con el fin de eliminar la humedad. Una vez secado, se muele en el molino de bolas para obtener un polvo fino y homogéneo.

Por otra parte, las tierras decolorantes, se calcinan a 750 °C durante 4 horas, obteniéndose en forma de polvo fino, con un tamaño de grano homogéneo, por lo que no fue necesario ningún proceso de molienda.

Posteriormente se procede a mezclar las tierras decolorantes (TD) con el geosilex (G) y el agua en distintas proporciones en peso, que dieron lugar a las siguientes muestras, que oscilan del 90 al 20 % en peso de tierras decolorantes y del 10 al 80% en peso de geosilex : 90TD-10G, 80TD-20G, 70TD-30G, 60TD-40G, 50TD-50G, 40TD-60G, 30TD-70G, 20TD-80G (véase Figura 10).

Esta mezcla se realiza en la amasadora planetaria, con el fin de obtener una

mezcla homogénea, añadiendo del 20 al 30% de agua (según la necesidad de cada caso) para conseguir la correcta plasticidad, que ayudará a la ausencia de defectos en la etapa de conformado.



Figura 10: Amasadora planetaria empleada para mezclar homogéneamente las materias primas.

El siguiente paso es la fabricación de las probetas, para ello se utiliza una prensa hidráulica, y un punzón normalizado. Para llevar a cabo el proceso de fabricación de las probetas, se utiliza una prensa hidráulica Morh & Federhaff Ac Mannheim, alcanzando una presión de confinamiento de 10 MPa. Se fabrican probetas de un peso aproximado de 40 g, obteniendo unas dimensiones de los ladrillos de 60 mm de largo, 30 mm de ancho y 12 mm de alto. Se obtienen 8 ladrillos por serie y se dejan 24 horas de secado natural al aire.



Figura 11: Prensa hidráulica Morh & Federhaff Ac Mannheim

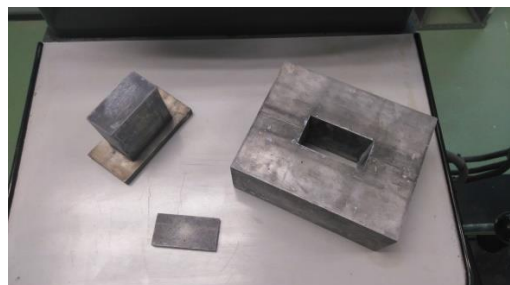


Figura 12: Punzón normalizado de 60 mm de largo por 30 mm de ancho.

En el proceso de curado, las probetas se sumergen en agua a temperatura ambiente (20 °C aproximadamente) durante 28 días, conforme a la norma EN

12390-2:2009 (EN 12390-2). Finalmente se secaron al aire.

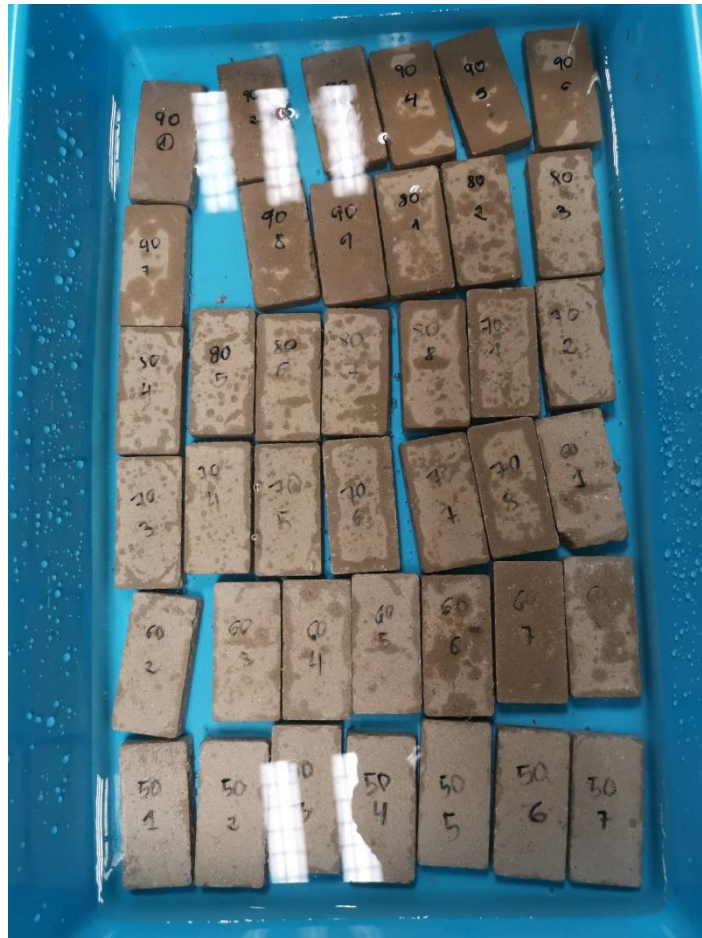


Figura 13: *Probetas sumergidas en agua durante 28 días.*

3.3. Caracterización de los ladrillos sílico-calcareos

3.3.1. Caracterización química

3.3.1.1. Espectrografía IR

El análisis por espectrografía infrarroja de los ladrillos sílico-calcareos, fabricados a partir de tierras decolorantes y geosilex, se ha realizado utilizando un espectrómetro FTIR Bruker Tensor 27, cuyo rango espectral oscila entre 7850 y 370 cm^{-1} con un divisor de haz de bromuro potásico (KBr). Está provisto de un detector DLaTDS de alta sensibilidad y ventanas de KBr e interferómetro con alineación permanente RocksolidTM de alta estabilidad.

Se utiliza el método de Reflexión Total Atenuada o ATR para evitar posibles zonas de saturación del espectro. Este método se basa en la reflexión interna total

cuando el haz incide en un medio con menor índice de reflexión y con un ángulo denominado crítico. Las probetas se analizaron con ATR en el rango entre los 4000-400 cm^{-1} , con una resolución de 4 cm^{-1} y un simple tiempo de escaneado de 100 scans en modo absorbancia.

3.3.2. Caracterización física

3.3.2.1. Dimensiones de la probetas

Las dimensiones de las probetas sílico-calcáreas TD-G, fueron tomadas de acuerdo a la norma EN 772-16: 2011 (EN 772-16, 2011). (AENOR, 2011)

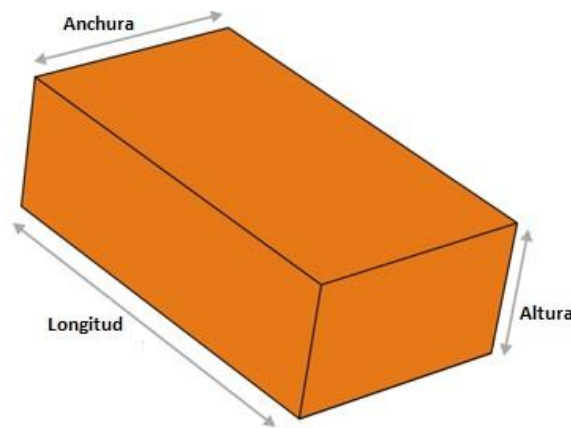


Figura 14: Dimensiones de las probetas según la norma EN 772-16:2011.

Dadas las posibles irregularidades en la superficie de la probetas, la medición se realizó aproximadamente en el punto medio de cada bloque, determinando así la longitud, anchura y altura de la muestra de todas las probetas individuales (véase Figura 14).

3.3.2.2. Densidad y porosidad aparente

En primer lugar se procede a determinar el peso seco, D , para calcular la densidad y porosidad aparentes. Para ello, se utiliza una balanza hidrostática, en la que se colocan las probetas que van a sumergirse dentro de un recipiente lleno de agua destilada a 22 °C. La bandeja metálica en la que se colocan los ladrillos, se sujeta a la balanza, la que da la masa en gramos una vez que la probeta sea sumergida en el agua.

Para calcular la densidad aparente, se utiliza la siguiente expresión:

$$B \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{M_d}{M_s - M_d} [Eq\ 2]$$

Igualmente, para calcular la porosidad aparente, se utiliza la expresión:

$$P(\%) = \frac{M_s - M_d}{M_s - M_e} \times 100 [Eq\ 3]$$

Donde M_d , es la masa de la probeta en seco (g), M_s , es la masa de la probeta saturada de agua (g) y, M_e , es la masa de empuje que ejerce la probeta cuando es depositada en el recipiente de la balanza hidrostática y sumergida en agua (g).

3.3.2.3. Succión de agua

La succión de agua mide el volumen de agua absorbida por capilaridad durante una breve inmersión parcial. Para realizar un ensayo de succión de agua, se sigue la norma UNE-EN 7722-11. (UNE, 2011)

Esta norma europea indica el método de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. En el caso de determinar la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería de hormigón, hormigón celular curado en autoclave, piedra artificial y piedra natural, y de la tasa de absorción de agua inicial de las piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería. (UNE, 2011)

Para realizar el ensayo, se secan las probetas hasta un peso constante, P_i . Posteriormente se calculan las dimensiones de la cara de la probeta que va a entrar en contacto con el agua, A . Se llena un recipiente con agua hasta una altura de 3 mm de agua, y se introducen las probetas durante un minuto. Pasado este minuto, se sacan, se secan superficialmente y se vuelven a pesar, con lo que proporciona el peso, P_f .

La expresión que mide la succión de agua es la siguiente:

$$S \left(\frac{g}{cm^2 * min} \right) = \frac{Q_i - P_i}{A} = \frac{M_s - M_d}{L \cdot h} [Eq 4]$$

Donde M_s , es la masa de la probeta saturada en agua, M_d , la masa de la probeta en seco, L , la longitud de la probeta, y h , la anchura de la probeta.

3.3.2.4. Absorción de agua

Cuando un ladrillo es sumergido en agua a temperatura ambiente durante un tiempo estimado, se produce un incremento de la masa del material seco, que es debido al agua adherida a la superficie de las partículas. Es expresado en porcentaje de masa seca y es un índice que mide indirectamente la porosidad abierta (Rodríguez, 2018), y se determina de acuerdo a la norma EN 772-21:2011. (UNE, 2011)

Esta norma europea, indica el método de ensayo de piezas para fábricas de albañilería, en el caso de querer determinar la absorción de agua de piezas para fábrica de albañilería de arcilla cocida y sílico-calcáreas por absorción de agua fría. (UNE, 2011)

Este procedimiento se basa en desecar las probetas en una estufa hasta llegar a una masa constante, M_d , a una temperatura de 100 °C aproximadamente. La masa se considerará constante cuando, al realizar dos pesadas sucesivas en un intervalo de tiempo no superior a 24 horas, dejándolas enfriar a temperatura ambiente, la pérdida de masa entre ambas probetas pesadas no sea superior al 0.1 % de la masa total.

Llegados a este punto, se sumergen las probetas en el agua durante 48 h, y finalmente se sacan las piezas del agua se secan superficialmente y se pesan, M_s . Las 8 probetas de cada serie han sido estudiadas y pesadas.

La absorción de agua, W_s , se calcula de la siguiente forma:

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

Donde M_d , es la masa de la probeta en seco (g), M_s , es la masa de la probeta saturada de agua (g).

3.3.3. Comportamiento mecánico

3.3.3.1. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión en ladrillos sólidos de construcción, es la carga unitaria aparente a la rotura bajo un esfuerzo axial de compresión. Es uno de los ensayos más importantes de los materiales con uso estructural. La resistencia a la compresión se calcula de acuerdo a la norma EN 772-1:2011 (EN-772-1:2011, 2011), que indica los métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería para determinar la resistencia a compresión. Para ello se utilizan seis probetas, empleando la prensa MTS 810 Material Testing Systems (véase Figura 15) y un útil para reducir el área sobre la que se aplicaba el esfuerzo, que da un área de 25x25mm. Los ensayos se llevarán a cabo según la norma UNE 67040:1986 para materiales de fábricas de ladrillos (UNE67040:1986, 1986).



Figura 15: Máquina MTS 810 Material Testing Systems de ensayo de resistencia a la compresión.

A todas las probetas se les aplicó un esfuerzo normal progresivamente creciente, centrado en su cara superior. La resistencia a la compresión resulta de dividir la carga máxima alcanzada, F , por la superficie sometida a carga, A , en este caso 625 mm², el área del útil para reducir el área.

La resistencia a la compresión es calculada por la siguiente expresión:

$$\sigma \left(\frac{N}{mm^2} \right) = \frac{F}{A} [Eq\ 6]$$

Donde σ , es la resistencia a la compresión, F , es la máxima fuerza que admite la probeta, y A , el área media (625 mm²).

3.3.3.2. Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión se ensaya aplicando a las probetas una carga a la mitad de la superficie, y se aumenta progresivamente la carga hasta que se produce la rotura de la pieza.

Para realizar el ensayo de resistencia a la flexión se utiliza la máquina Universal de ensayos MTS Insight 5. Esta máquina posee unos rodillos de acero, los dos inferiores, situados a una distancia de 40 mm, sirven de apoyo para la probeta, y el superior, que se coloca en mitad de los dos inferiores, que es sobre el que se aplica la carga de forma progresiva.

Para calcular la resistencia a flexión, se utiliza la fórmula siguiente:

$$f \left(\frac{N}{mm^2} \right) = \frac{3 \cdot L \cdot F}{2 \cdot h \cdot e^2} [Eq\ 7]$$

Donde, F , es la carga máxima que se le aplica a la probeta, medida en Newton, L , la distancia entre los rodillos de apoyo (40 mm), h , el ancho de la probeta, y e , la altura de la probeta.

3.3.4. Comportamiento térmico

Para determinar la conductividad térmica de los ladrillos sílico-calcáreos TD-G, se utilizó el medidor de flujo de calor FOX 50 TA Instrument (ver Figura 16), de acuerdo a la norma de aislamiento térmico ISO 8302:1991. (ISO, 1991)



Figura 16: Medidor de flujo de calor FOX 50 TA Instrument.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización de materias primas

4.1.1. Determinación del pH y contenido en carbonatos

En la tabla que se muestra a continuación se muestran los resultados del pH y del contenido de carbonatos para las materias primas tierras decolorantes (TD) y GeoSilex.

Muestra	pH	Carbonatos
Tierras decolorantes	11,15	28,2
GeoSilex	12,85	16,6

Tabla 2: pH y contenido de carbonatos en las tierras decolorantes y el GeoSilex

Las tierras decolorantes tienen un pH del 11,15 siendo mayor el pH del GeoSilex. Los valores altos de pH favorecen la reacción puzolánica entre la sílice de las tierras decolorantes y la cal del GeoSilex. En cuanto al contenido en carbonatos, las tierras decolorantes tienen un mayor porcentaje.

4.1.2. Composición química (FRX) de las materias primas

La composición química de las tierras decolorantes calcinadas (TD) y del GeoSilex, obtenidas mediante FRX, se indica en la siguiente tabla:

Contenido en óxidos (% en peso)	GeoSilex	TD
SiO ₂	1,93	55,37
Al ₂ O ₃	1,13	8,91
Fe ₂ O ₃	0,12	3,38
CaO	67,2	4,68
MgO	0,09	20,05
K ₂ O	-	1,56
Na ₂ O	-	0,42
TiO ₂	0,04	0,37
P ₂ O ₅	0,01	0,26
SO ₃	1,62	1,02
Cl	0,03	-
LOI	27,8	3,05

Tabla 3: Composición química de las materias primas, tierras decolorantes y GeoSilex.

Las tierras decolorantes contienen principalmente sílice, en un 55,37% en peso, así como óxido de magnesio (20,05 %), alúmina (8,91 %), óxido de calcio (4,68 %) y óxido férrico (3,38 %). Por su composición química, es decir, su alto contenido en sílice y alúmina, son atractivas para ser emplearlas como materia prima en materiales de construcción, debido a que estos compuestos favorecen la reacción puzolánica con el residuo GeoSilex. Las tierras decolorantes presentan una composición química similar a la utilizada en la fabricación de ladrillos silico-calcáreos industriales.

El GeoSilex está compuesto principalmente por CaO (67,2 %), siendo su pérdida de ignición elevada (27,7 %) debido la fácil carbonatación de este residuo. La presencia de cloro y potasio en materiales cementantes puede deteriorar la microestructura, reduciendo su durabilidad (Filipponi, 2003). El contenido de estos compuestos es bajo en ambos residuos.

4.1.3. Distribución granulométrica

La distribución granulométrica de las partículas de las materias primas cenizas de tierras decolorantes y GeoSilex se muestra en la Figura 17. El residuo GeoSilex tiene un tamaño de partícula inferior al residuo TD, como indica el tamaño medio de partícula, D_{50} , que es $44,8 \mu\text{m}$ para las TD y de $21,8 \mu\text{m}$ para el GeoSilex.

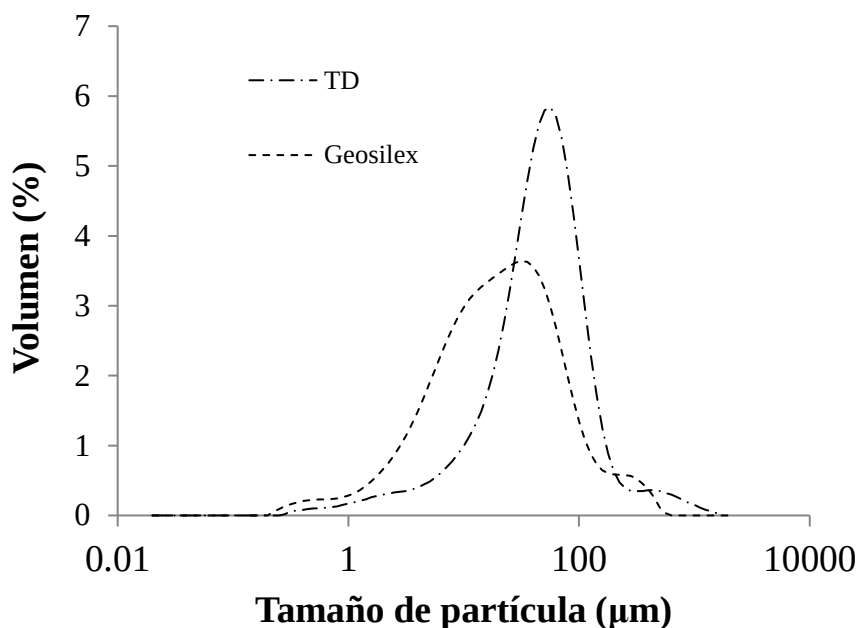


Figura 17: *Tamaño de partícula de los residuos tierras decolorantes y GeoSilex*

La fracción principal de ambos residuos está constituida principalmente por partículas del tamaño del limo ($0,063\text{--}2 \text{ mm}$) presentando ambas materias primas una baja proporción de partículas finas ($<0,002 \text{ mm}$) (Tabla 5). El tamaño de partícula de las materias primas influye en la actividad puzolánica, ya que, la disminución del tamaño de partícula aumenta la superficie específica y la velocidad de la reacción hidráulica.

Distribución de tamaño de partícula (mm)	TD (% part.)	GeoSilex (% part.)
Contenido en arcilla < 0,002	2,37	4,35
Contenido en limo (0,002-0,063)	59,22	74,68
Contenido en arena (0,063-2)	38,41	20,97

Tabla 5: Distribución de tamaño de partícula de las tierras decolorantes y del GeoSilex.

4.1.4. Densidad relativa y superficie específica

Los valores de densidad relativa y de superficie específica se encuentran en la Tabla 6. Como se puede observar la superficie específica obtenida por el método de Blaine es bastante más alta, para el GeoSilex que para las TD. En cuanto a la densidad relativa obtenida mediante el frasco volumétrico de Le Chatelier indica que las tierras decolorantes son más ligeras que el GeoSilex.

Muestra	Superficie específica (cm ² /g)	Densidad relativa (kg/m ³)
GeoSilex	6224	2378
TD	2297	2176

Tabla 6: Superficie específica y densidad relativa de GeoSilex y tierras decolorantes.

4.1.5. Caracterización mineralógica (DRX)

Las fases cristalinas presentes en los residuos empleados como materias primas de los ladrillos sílico-calcáreos se han determinado por difracción de rayos X. En el patrón de difracción de las tierras decolorantes calcinadas (Figura 18), se observa como la fases cristalinas principales el cuarzo (SiO₂) y periclasa (MgO), debido fundamentalmente a la riqueza en Si y Mg del residuo. Observándose además la presencia de siderita (FeCO₃) y dolomita [CaMg(CO₃)₂], así como de silicatos de hierro y aluminio. La desviación respecto a la línea base indica la presencia de un alto grado de material amorfo en el residuo. El patrón de DRX del residuo GeoSilex es más simple indicando que está compuesto fundamentalmente por portlandita (Ca(OH)₂), además se pueden observar pequeños picos de difracción correspondientes a la presencia de carbonato de calcio, debido a la carbonatación del subproducto (Figura 18).

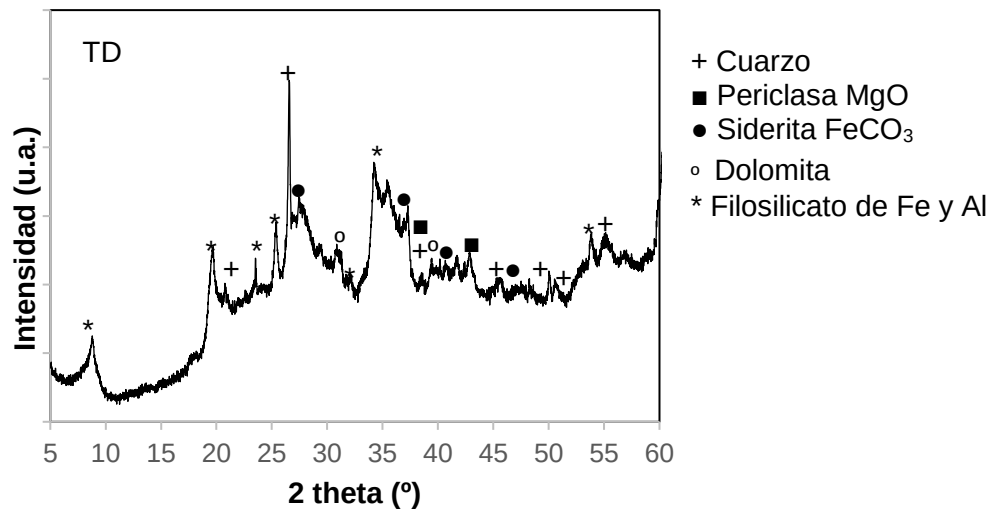


Figura 18: Patrón DRX para tierras decolorantes.

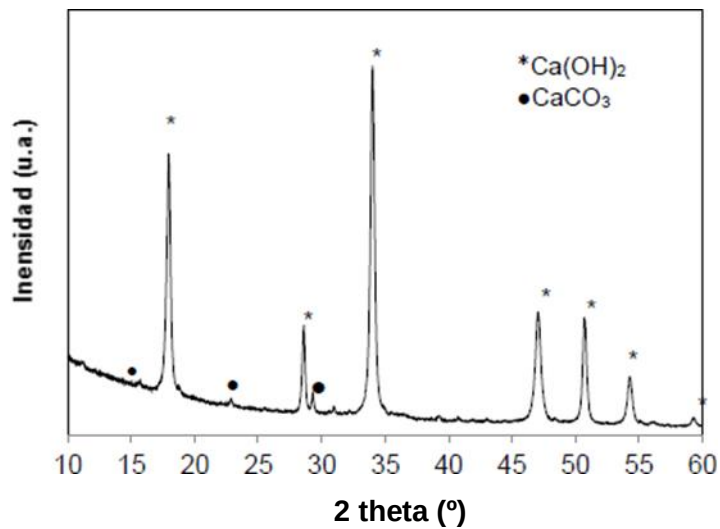


Figura 18: Patrón DRX del Geosilex

4.2. Caracterización de los ladrillos sílico-calcáreos

Los ladrillos sílico-calcáreos han sido obtenidos utilizando como materias primas tierras decolorantes calcinadas a 750 °C (TD) y GeoSilex. Utilizando, en cada caso, composiciones que oscilan entre el 90 y 20 % en peso de tierras decolorantes y del 10 al 80 % en peso de GeoSilex. Haciendo una observación ocular, se aprecian

los distintos tonos de las probetas, teniendo una tonalidad más marrón oscura aquellos ladrillos con una composición en tierras decolorantes más alta (90TD-10G), pasando a un tono más blanquecino conforme se aumenta el porcentaje de GeoSilex (Figura 19). Las muestras con mayor composición en GeoSilex, fueron finalmente más pequeñas en peso después del proceso de conformado de los ladrillos, debido a una mayor absorción de agua del GeoSilex, que hizo el material más plástico.

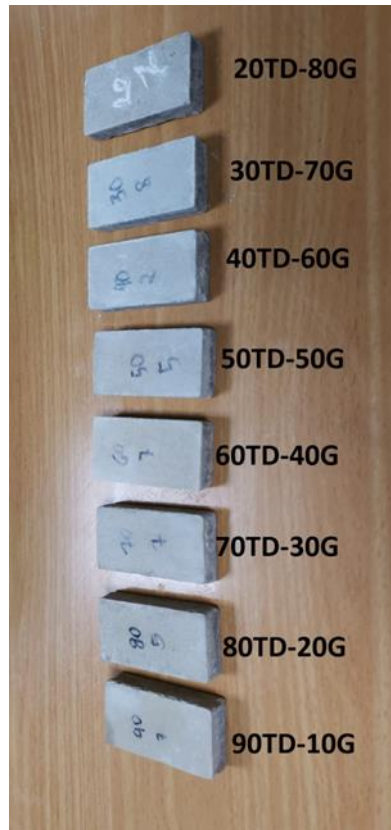


Figura 19: Series de probetas fabricadas.

4.2.1. Densidad y porosidad aparente

La densidad y porosidad aparentes de los ladrillos sílico-calcáreos obtenidos empleando distintas proporciones de residuos, TD-G, se muestran en la Figura 20:

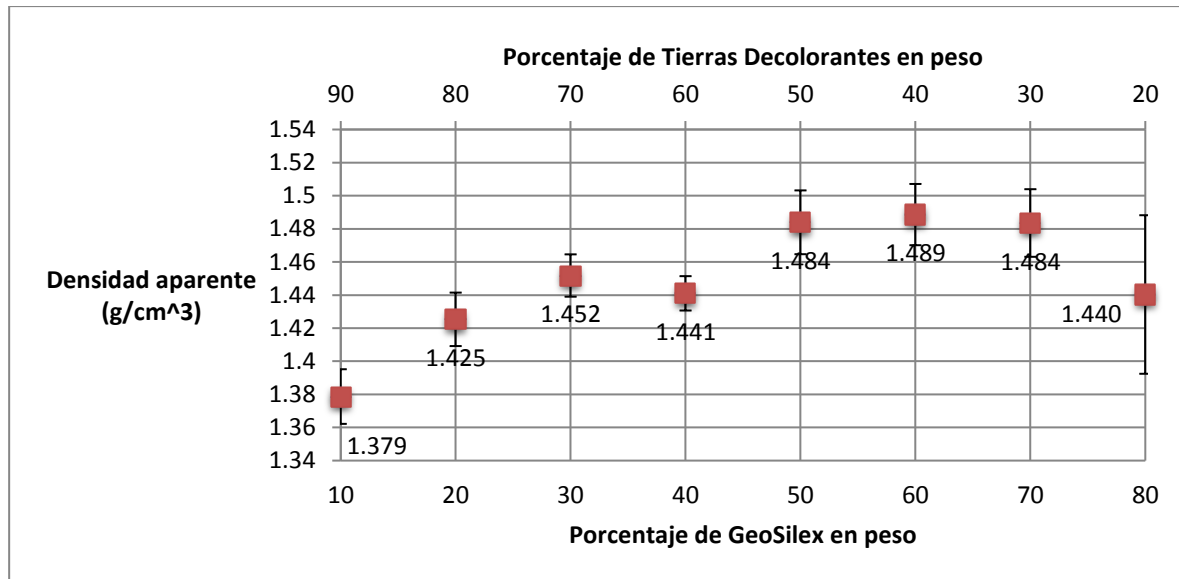


Figura 20: Densidad aparente para distintos porcentajes en peso de tierras decolorantes y GeoSilex

La densidad aparente de los ladrillos sílico-calcáreos se ve incrementada a medida que aumenta el porcentaje en residuo GeoSilex en las probetas, hasta llegar a un máximo de 1,489 g/cm³ para los ladrillos sílico-calcáreos 40TD-60G. Así pues, la menor densidad aparente se obtiene para los ladrillos sílico-calcáreos 90TD-10G, que presentan una densidad aparente de 1,379 g/cm³, la adición de geosilex produce un incremento de la densidad aparente, obteniendo un máximo para los ladrillos 40TD-60G, lo que supone un incremento del 7,9 %. Esto puede ser debido a la menor densidad de las tierras decolorantes con respecto al GeoSilex. A partir de la adición del 60 % del residuo geosilex, probetas 40TD-60G, se produce una disminución de esta propiedad, hasta 1,440 g/cm³.

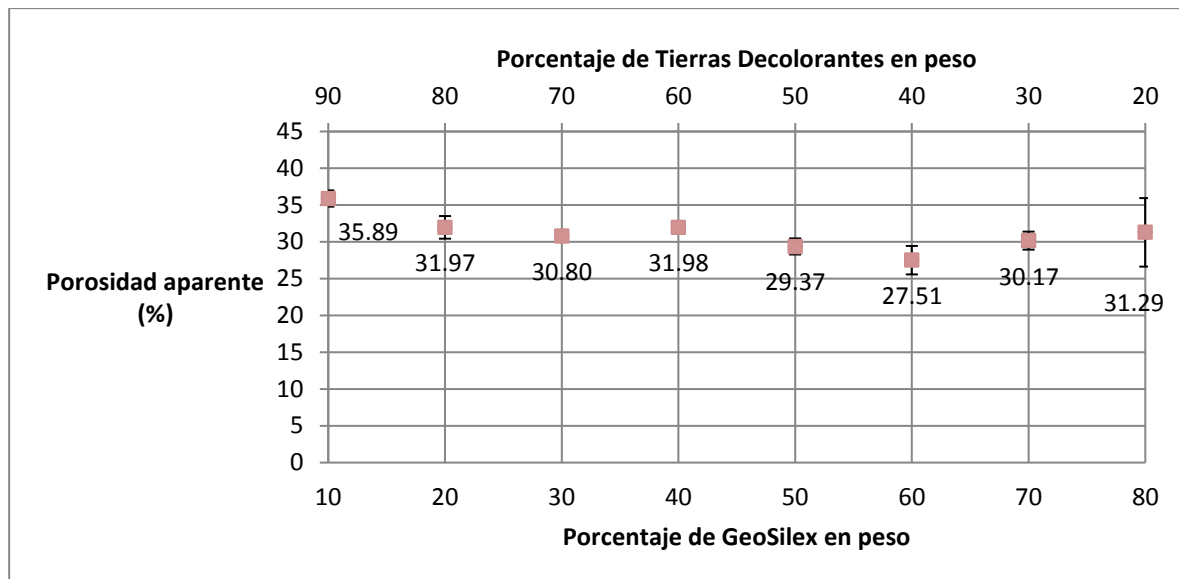


Figura 21: Porosidad aparente para los distintos porcentajes en peso de tierras decolorantes y GeoSilex

La porosidad aparente es una importante característica propia de los materiales de construcción, ya que muestra la vulnerabilidad de estos ante el desgaste físico y las condiciones ambientales.

En la Figura 21 se muestran los datos de porosidad aparente de los ladrillos sílico-calcáreos xTD-yG. Se puede observar que la porosidad aparente, se aprecia que la tendencia de la porosidad aparente es contraria a la de la densidad aparente, es decir, se tiende a un decremento de la porosidad aparente conforme se aumenta el porcentaje de residuo GeoSilex, hasta un valor mínimo de porosidad aparente de 27,51 % para los ladrillos sílico-calcáreos 40TD-60G. El valor mayor de porosidad aparente (35,89 %) se obtiene para los ladrillos sílico-calcáreos 90TD-10G, reduciéndose la porosidad para los ladrillos sílico-calcáreos 60TD-40G, en un 23,3 %. A mayores porcentajes en peso de GeoSilex (60-80 %) las porosidades aparentes vuelven a aumentar, pasan del 27,51 % al 31,29 %.

4.2.2. Absorción de agua

La absorción de agua es un factor importante que afecta a la durabilidad del ladrillos sílico-calcáreo y es una medida indirecta de la porosidad abierta. Como se observa en la Figura 22, donde se muestra la absorción de agua (W_s) para las distintas composiciones de los ladrillos sílico-calcáreos, la absorción de agua varía

de igual forma que la porosidad aparente, disminuyendo esta propiedad hasta la adición del 60 % de geosilex. Así los ladrillos sílico-calcáreos 90TD-10G presentan el valor máximo de absorción de agua 26,0 %, disminuyendo un 29,7 % para los ladrillos sílico-calcáreos 40TD-60G, que presentan un valor de absorción de agua del 18,3 %. Los ladrillos sílico-calcáreos de composición 50TD-50G y 40TD-60G presentan los menores valores tanto de absorción de agua como de porosidad aparente, lo que indica que se ha formado una mayor cantidad de silicatos cálcicos hidratados que hacen que, por tanto, la red de poros sea más compacta. El mínimo valor de absorción de agua que establece la norma ASTC67-07a:2003 (C67-07a:2003, 2007) depende por una parte de la finalidad principal de los ladrillos, y además del medio ambiente al que vayan a ser expuestos. En un caso en el que los ladrillos sílico-calcáreos vayan a ser expuestos a condiciones climatológicas severas, la absorción de agua no puede superar el 17 %. Para los ladrillos que sean expuestos a condiciones climatológicas moderadas, la absorción de agua no puede ser superior al 22 %, y no se establece límite para los ladrillos no expuestos a la intemperie. Por tanto todos los ladrillos sílico-calcáreos excepto los ladrillos 90TD-10G, 80TD-20G y 60TD-20G, al presentar valores de absorción de agua inferiores al 22 %, se pueden emplear a la intemperie. Los porcentajes altos de absorción de agua son perjudiciales cuando los ladrillos sílico-calcáreos son empleados en condiciones climatológicas extremas con frío, ya que el efecto de la congelación del agua en ellos, puede producirles daños. Además los valores elevados de absorción de agua pueden dar lugar a que los sulfatos solubles se solubilizcen si se emplean en condiciones climáticas donde hay humedad, dando lugar al defecto de eflorescencias.

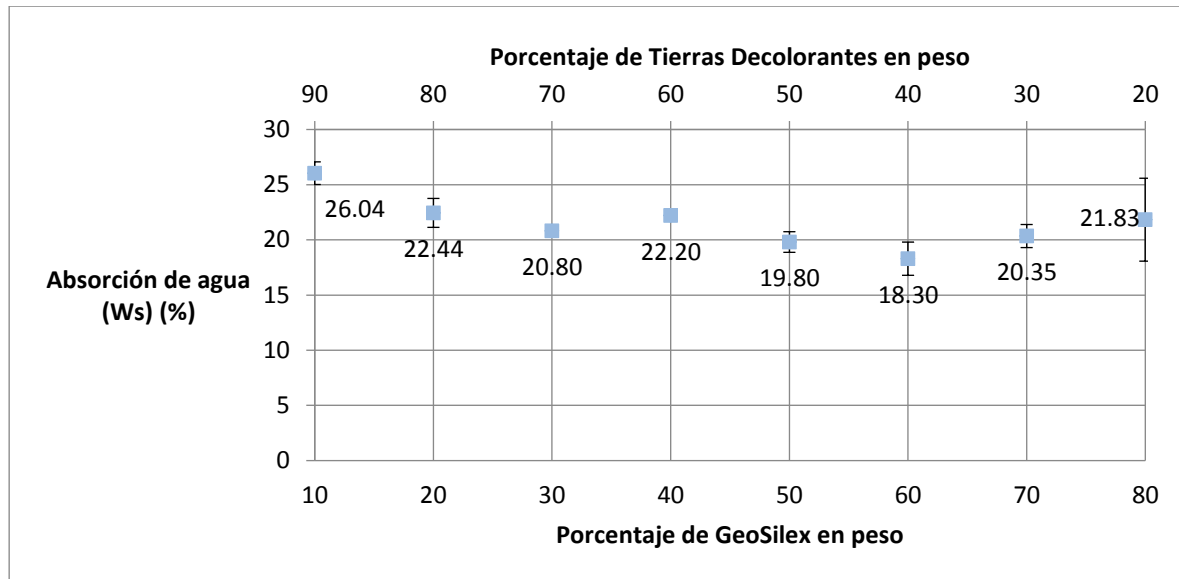


Figura 22: Absorción de agua para los ladrillos sílico-calcáreos de distintos porcentajes de tierras decolorantes y GeoSilex en peso.

4.2.3. Succión de agua

La succión de agua de los ladrillos y el poder de retención de agua son factores clave para explicar la unión de los ladrillos sílico-calcáreos con el mortero. Como se puede observar en la figura 19, la succión de agua de los ladrillos sílico-calcáreos TD-G disminuye con el aumento del porcentaje del residuo GeoSilex. Los ladrillos 90TD-10G presentan un valor máximo de succión de agua de 0,118 g/cm²min, reduciéndose para los ladrillos 40TD-60G hasta un mínimo de succión de 0,032 g/cm²min, lo que indica una disminución del 72,6% de esta propiedad. De nuevo, mayores adiciones de residuo Geosilex produce un incremento en el valor de succión de agua, incrementándose la succión de agua hasta 0,080 g/cm²min para los ladrillos sílico-calcáreos 20TD-80G. De acuerdo con el reglamento RL-88 (RL-88, 2004), se deben evitar ladrillos con valores de succión de agua superiores a 0,45 g/cm²min, ya que pueden ser ladrillos con menor durabilidad. Cabe destacar que si el valor de succión del agua es superior a 0,15 g/cm²min, es necesaria una inmersión breve en agua del ladrillo antes de su colocación para evitar la deshidratación del mortero. Todos los ladrillos fabricados TD-G cumplen la normativa del “Pliego general de condiciones para la recepción de los cerámicos en las obras de construcción” (RL-88, 2004) ya que ningún valor supera los 0,45 g/cm²min de succión. Además, dado que presentan valores de succión de agua

inferiores al $0,15 \text{ g/cm}^2\text{min}$ pueden ser colocados directamente en obra, sin necesidad de ser inmersos brevemente en agua antes de su colocación, sin provocar la deshidratación del mortero.

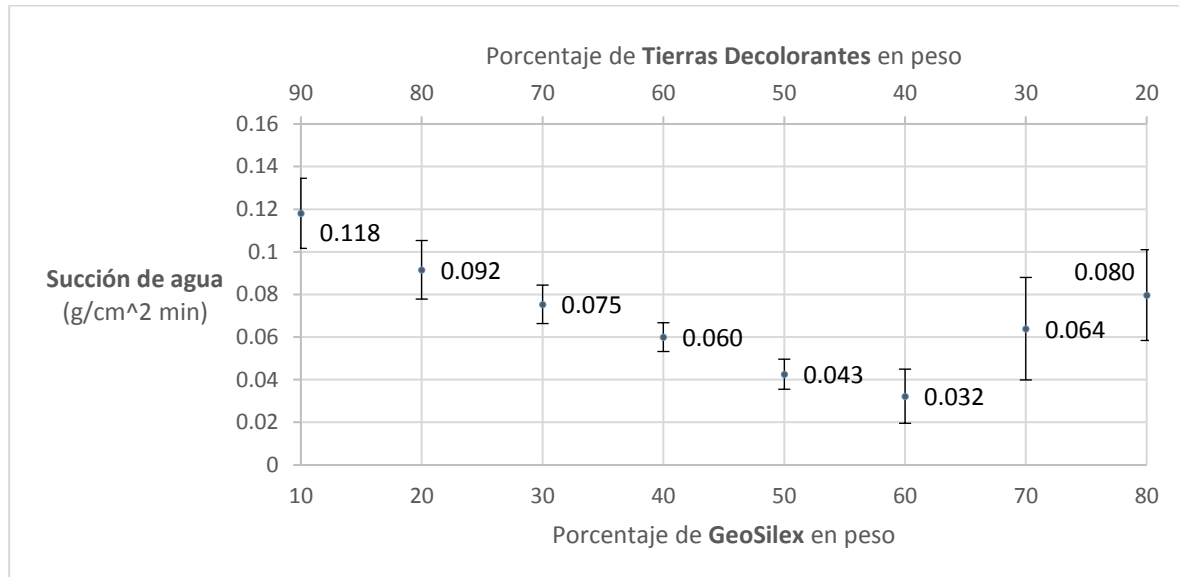


Figura 23: Representación de la succión de agua para los ladrillos sílico-calcáreos TD-G.

4.2.4. Caracterización mineralógica (DRX)

La figura 24 muestra la caracterización mineralógica (patrón DRX) de las probetas sílico-calcáreas TD-G. En todos los ladrillos sílico-calcáreos se observan los picos de difracción presentes en las materias primas sin reaccionar como el cuarzo (SiO_2), presente en las tierras decolorantes, y el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) y la calcita (CaCO_3), presentes en el residuo GeoSilex. Además en los ladrillos sílico-calcáreos con mayor porcentaje en tierras decolorantes (TD) se observan picos de difracción de mayor intensidad correspondientes al cuarzo mientras que en los que tienen mayor cantidad de geosilex los picos de mayor intensidad corresponden al hidróxido cálcico. Además, en los patrones de difracción de las probetas que contienen más de un 60 % de TD, se pueden observar mayores desviaciones de la línea base, de acuerdo con el patrón de DRX del residuo TD, que presenta un mayor carácter amorfo.

No obstante en todos los ladrillos sílico-calcáreos TD-G se observan pequeños picos de difracción, debido a su carácter amorfo, que corresponden a

silicatos cálcicos hidratados formados en la reacción puzolánica que tiene lugar entre la sílice presente en las tierras decolorantes (TD) y la cal presente en el GeoSilex.

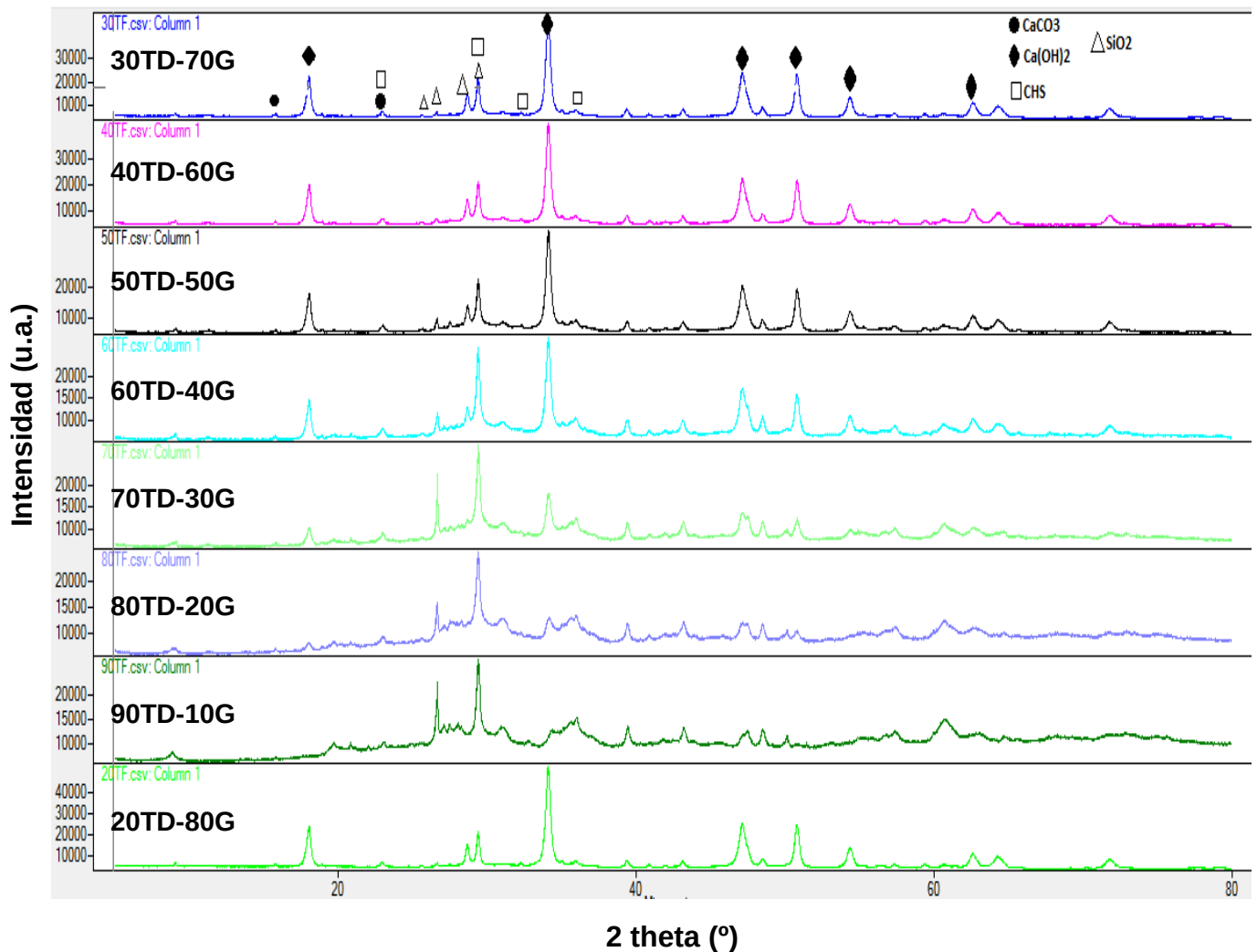


Figura 24: Caracterización mineralógica (DRX) para los ladrillos sílico-calcáreos TD-G.

4.2.5. Espectrometría infrarroja (FTIR)

En la Figura 25 se analiza la espectrografía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) de los ladrillos sílico-calcáreos TD-G. Se pueden apreciar en todos los ladrillos sílico-calcáreos tres regiones. En la primera región entre $3800-3000\text{ cm}^{-1}$ se observa un pico centrado a aproximadamente 3650 cm^{-1} en las muestras que contienen un contenido igual o superior al 40 % en Geosilex y una banda muy ancha centrada a aproximadamente 3380 cm^{-1} que se pueden relacionar con los modos de vibración de alargamiento de OH. El primer pico podría corresponder al OH libre presente en el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), siendo este pico más intenso

en los ladrillos sílico-calcáreos con mayor contenido en residuo Geosilex. La banda ancha se puede asignar a la vibración de alargamiento de las moléculas de agua presentes en el gel de silicato cálcico hidratado. En la segunda región, entre 1800 y 1200 cm^{-1} , aproximadamente, se pueden observar dos bandas, una pequeña banda, centrada entre 1410 y 1415 cm^{-1} y una banda más intensa centrada a aproximadamente 1580 cm^{-1} . Estas bandas corresponden a los modos de vibración simétricos y asimétricos del $(\text{CO}_3)^{2-}$, que indica la presencia de carbonatos en los ladrillos sílico-calcáreos. Estas bandas son más intensas a medida que se incrementa el contenido en Geosilex. En la tercera región entre 1200 y 700 cm^{-1} , se pueden observar una banda ancha centrada a 1000 cm^{-1} correspondiente a los modos de estiramiento del Si---O presente en las TD sin reaccionar, así como en el gel de silicato cálcico hidratado (CSH). Esta banda es más intensa a medida que los ladrillos sílico-calcáreos contienen más cantidad de TD, debido a la mayor cantidad de sílice del residuo. El pico centrado a aproximadamente 874 cm^{-1} corresponde a un pico secundario de la vibración de flexión de los carbonatos (Allali, 2016).

Finalmente, la banda centrada a 450 cm^{-1} aproximadamente, puede ser debida a la vibración del estiramiento del enlace Si-O o del enlace Al-O del grupo silicato y aluminato, respectivamente. (Singh, 2000)

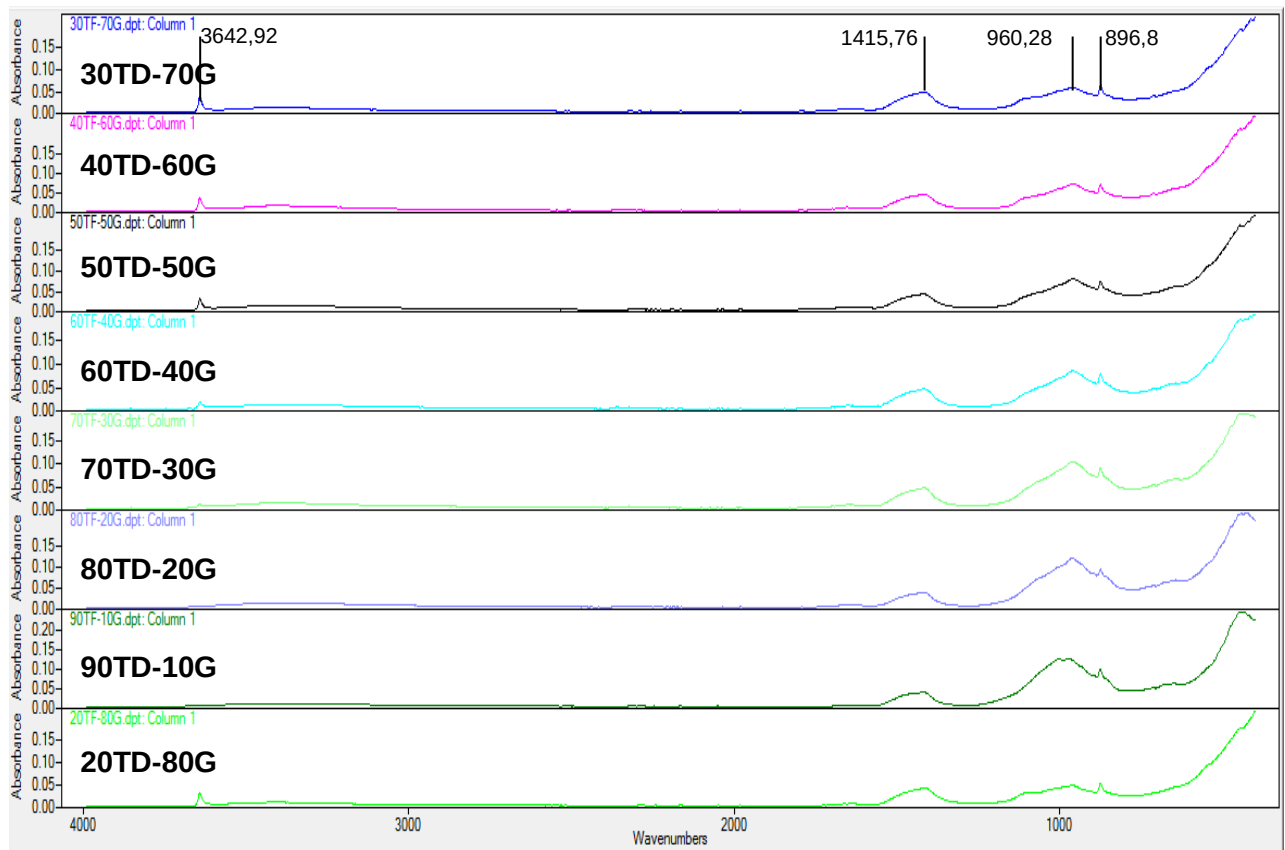


Figura 25: Espectrometría infrarroja (FTIR) de los ladrillos sílico-calcáreos TD-G.

4.2.6. Resistencia a la flexión

En la Figura 26 se puede observar el resultado del ensayo a flexión. Como se puede ver, la resistencia a la flexión aumenta a medida que se incrementa el contenido en peso del residuo GeoSilex. Las probetas que tienen una flexión mínima son los ladrillos sílico-calcáreos con mayor contenido en el residuo TD, 90TD-10G, que presentan una resistencia a flexión de 6,6 N/mm², aumentando la resistencia a flexión conforme se incrementa el porcentaje en peso de GeoSilex en la mezcla, hasta un valor máximo de 14,0 N/mm² para los ladrillos sílico-calcáreos 30TD-70G, lo que indica un incremento del 113%. La baja resistencia a la flexión en altos porcentajes de tierras decolorantes es debido a que a estos porcentajes, la densidad aparente de los ladrillos sílico-calcáreos da lugar a una mayor cantidad de poros, debido a la menor formación de silicatos cálcicos hidratados, lo que hace que aumenten los concentradores de tensiones de la probeta, por lo que las propiedades mecánicas disminuyen.

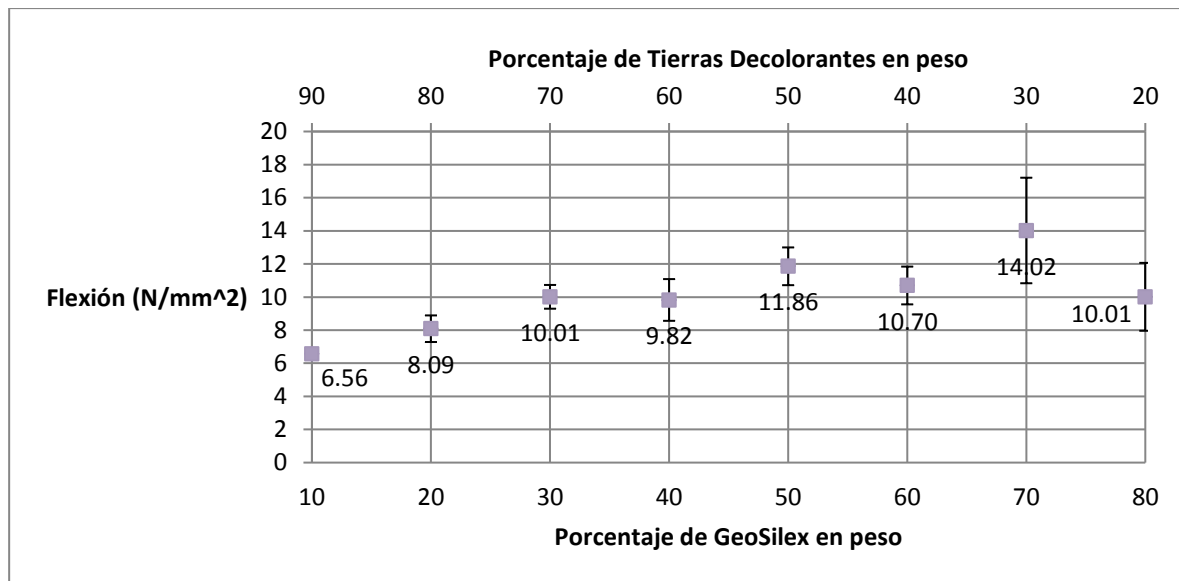


Figura 26: Representación de los resultados del ensayo de resistencia a la flexión para ladrillos sílico-calcáreos de composición TD-G

4.2.7. Resistencia a la compresión

En la Figura 27 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión de los ladrillos sílico-calcáreos TD-G., Como se puede observar, la resistencia a la compresión aumenta, al igual que la resistencia a la flexión, conforme se incrementa el porcentaje de la materia prima GeoSilex en los ladrillos sílico-calcáreos TD-G. La resistencia mecánica se atribuye a dos factores principales, que son la densificación y los productos cementantes de la reacción puzolánica. El resultado del estudio de la densidad aparente muestra que a mayor porcentaje de GeoSilex, los ladrillos tienen una densidad aparente mayor, por lo que son más densos presentando menor porosidad. Además, al hidratarse la mezcla de tierras decolorantes y el GeoSilex, se producen silicatos de calcio hidratados. El SiO_2 amorfo o vítreo presente en las tierras, reacciona con el Ca(OH)_2 del GeoSilex, lo que produce gel C-S-H, siendo estos silicatos de calcio hidratados, que tiene una estructura más compacta, los responsables del desarrollo de la resistencia mecánica que se produce durante la hidratación de los residuos.

Los ladrillos que presentan mayor resistencia a la compresión, con 50,3 N/mm² son los formados por 20TD-80G, y se observa como el valor de la resistencia a la compresión disminuye conforme disminuye la proporción en peso de GeoSilex y aumenta la de tierras filtrantes, lo que va de la mano con la densidad

aparente. No obstante la resistencia a la compresión de los ladrillos sílico-calcáreos que contienen entre un 70 y un 30% de TD y entre un 30 y un 70 % de Geosilex, presentan resistencias a compresión elevadas, superiores a 35 MPa. Este incremento en la resistencia a la compresión podría ser debido a que se tiene una cantidad óptima de ambas materias primas en los ladrillos sílico-calcáreos, residuo Geosilex que contiene hidróxido cálcico ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) en cantidad suficiente para que reaccione con las cantidades adecuadas de los materiales puzolánicos (SiO_2 y Al_2O_3) de las tierras decolorantes, formándose una cantidad suficiente de gel CHS, y, por tanto, los ladrillos sílico-calcáreos son más resistentes a la compresión.

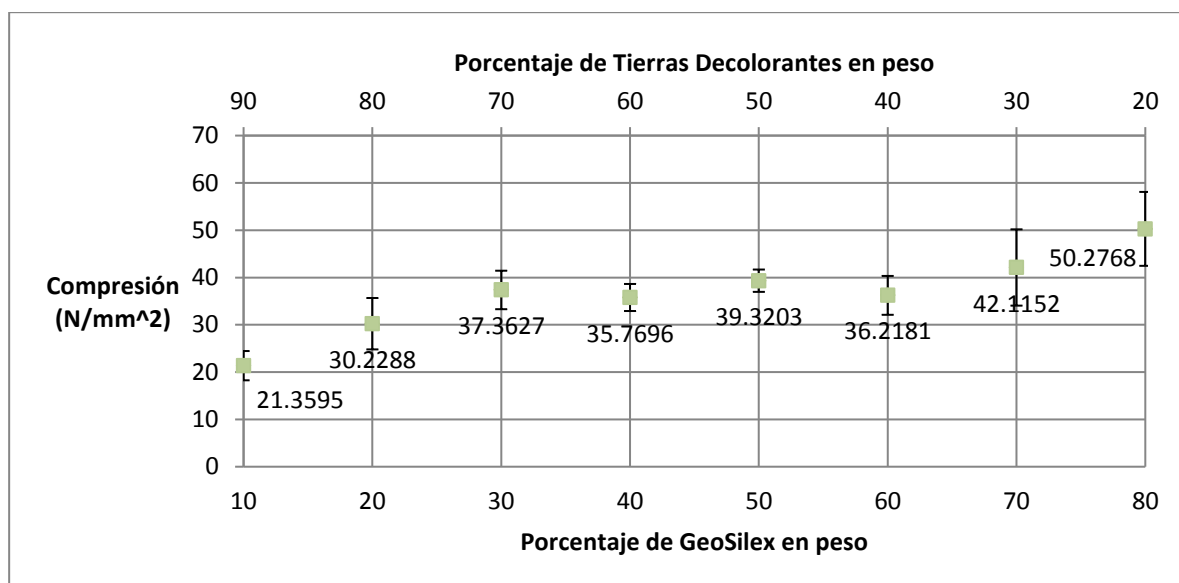


Figura 27: Representación de los resultados del ensayo de resistencia a la compresión para ladrillos sílico-calcáreos de composición TD-G

Según la norma UNE-EN 771-2:2011+A1:2016 sobre especificaciones de piezas para fábrica de albañilería sílico-calcáreas, se pueden clasificar los ladrillos sílico-calcáreos de acuerdo a su resistencia a la compresión de acuerdo con la Tabla X. Por tanto los ladrillos 90TD-20G se clasifican en clase 20; los ladrillos 80TD-30G se clasifican en clase 30, los ladrillos 70TD-30G, 60TD-40G, 50TD-50G y 40TD-60G se clasifican en clase 35; los ladrillos 30TD-70G en clase 40 y los ladrillos 20TD-80G en clase 50.

Clase de resistencia a compresión	Resistencia a compresión normalizada N/mm ²
5	5,0
7,5	7,5
10	10,0
15	15,0
20	20,0
25	25,0
30	30,0
35	35,0
40	40,0
45	45,0
50	50,0
60	60,0
75	75,0
NOTA: Cuando se declara una clase de resistencia, el valor medio de la resistencia a compresión normalizada no debe ser inferior al valor de la clase de resistencia definida en esta tabla.	

Tabla 4: Clasificación de las piezas sílico-calcáreas para fábrica de albañilería en función de la resistencia a compresión.

4.2.8. Conductividad térmica

La conductividad térmica es una propiedad que define la velocidad a la que el calor se transmite en el material, siendo un factor de máxima importancia en aplicaciones que involucren la transferencia de calor. Por lo tanto es una propiedad importante en los materiales de construcción para conseguir un buen aislamiento térmico, lo que produce un ahorro energético y de consumo. Los materiales de baja conductividad térmica se utilizan como aislantes térmicos.

En la Figura 28, se representa la conductividad térmica de los ladrillos sílico-calcáreos en función de la composición. Se puede apreciar que la conductividad térmica aumenta de forma creciente conforme aumenta el porcentaje de residuo GeoSilex en la mezcla. Por lo que se puede deducir de esta figura que conforme aumenta el porcentaje en GeoSilex, aumenta la conductividad térmica del ladrillo y, por tanto, las probetas tendrán menos propiedades como aislantes térmicos.

Los valores obtenidos para los ladrillos sílico-calcáreos TD-G oscilan entre 0,296 W/mK para los que presentan una composición 90TD-10G, hasta un máximo

de 0,542 W/mK los ladrillos 20TD-80G. Los ladrillos que contienen entre un 20 y un 40 % de TD, presentan valores bajos de conductividad térmica entre 0,329 y 0,413 W/mK, y por tanto buenas propiedades aislantes.

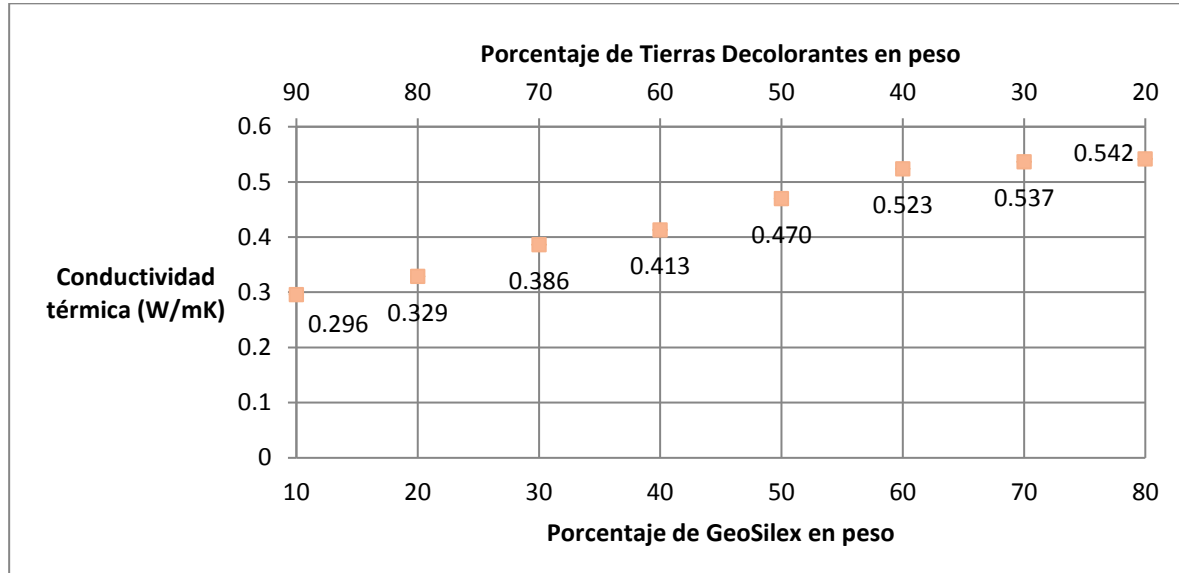


Figura 28: Representación de la conductividad térmica para los ladrillos sílico-calcáreos de distintos porcentajes de TD-G

5. ESTUDIO ECONÓMICO

Una vez que se han realizado todas las valoraciones de las propiedades mecánicas y físicas de los ladrillos fabricados con GeoSilex y tierras decolorantes, se valorará la parte económica correspondiente a la fabricación de los mismos; pues será un dato importante, ya que de manera orientativa se podrá analizar el coste de cada ladrillo y compararlos entre ellos.

Como punto de partida se estudia la mezcla formada por el residuo GeoSilex, el residuo tierras decolorantes y el agua.

No se incluirán costes de mano de obra, transporte, de energía, inmovilizados, etc, pero sí los costes de cocción de las tierras decolorantes.

Primero, se ha buscado en el mercado real, los precios de cada materia prima por separado respecto a unidad de masa (Toneladas) y de volumen (m³) ya que normalmente, la demanda de hormigón se realiza en volumen.

Las tierras decolorantes se adquieren saturadas, por lo que habrá que hacer un proceso de cocción para eliminar las grasas presentes en ellas.

Los precios se encuentran en la siguiente tabla.

Materia prima	Precio (€/tm)
GeoSilex	303,5
Tierras Decolorantes	235,32
Agua	1,27

Tabla 5: Coste de las materias primas.

Observando la tabla de datos se puede ver que los precios fluctúan en función de los componentes utilizados, si se emplea más cantidad de GesoSilex, el precio inicial se incrementa, debido al precio elevado del residuo, aunque el coste “medio ambiental” disminuye considerablemente.

En cuanto al valor inicial de las tierras decolorantes, este es cero, aunque estas tienen que pasar por un proceso de cocción durante 4h a 750°C para eliminar las grasas que contienen, por lo que hace que se incremente un poco el coste.

Se puede deducir que en aquellos ladrillos en los que aumente el contenido de tierras decolorantes, el coste baja, ya que las tierras tienen un coste menor que el GeoSilex, aunque también bajan la propiedades mecánicas, la resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión, aumentando la densidad aparente y absorción de agua.

Por tanto, el precio más bajo se obtendrá para el ladrillo 90TD-10G cuya composición es del 90% de tierras decolorantes y un 10% de GeoSilex. Obteniendo un precio de 242,14 €/Tm.

%TD	%G	€/Tm TD	€/Tm G	Coste total €/Tm)
90	10	211,788	30,35	242,138
80	20	188,256	60,7	248,956
70	30	164,724	91,05	255,774
60	40	141,192	121,4	262,592
50	50	117,66	151,75	269,41
40	60	94,128	182,1	276,228
30	70	70,596	212,45	283,046
20	80	47,064	242,8	289,864

Tabla 6: Precios en €/Tm por cada composición de ladrillo.

6. CONCLUSIONES

A lo largo de los años, se ha visto que la gestión de los residuos de la industria de los aceites y grasas vegetales era una tarea difícil de gestionar, y es por ello que se depositaban en los vertederos directamente. Dado el alto volumen de tierras decolorantes producidas en esta industria alimentaria, la gestión de las mismas es una tarea fundamental a día de hoy. Todo ello unido a una necesidad cada vez más fuerte de reducir los costes energéticos e impactos medioambientales, ha buscado en el estudio e investigación una forma de desarrollar la tecnología para aprovechar al máximo los recursos para realizar ladrillos sílico-calcáreos utilizando como materias primas residuos. En este caso se han empleado tierras decolorantes como fuente de sílice, y GeoSilex como fuente de cal para elaborar ladrillos sílico-calcáreos sostenibles.

Las tierras de blanqueo, gracias a su carácter puzolánico que le aporta la sílice, junto al contenido en cal del residuo GeoSilex, son buenas candidatas para su uso como materias primas en la fabricación de ladrillos sílico-calcáreos debido a la alta cantidad de SiO_2 y al alto contenido en Ca(OH)_2 del residuo GeoSilex.

Observando los resultados de los ensayos realizados a los ladrillos para conocer sus características físicas, mecánicas y térmicas se puede concluir:

- La densidad aparente aumenta, mientras que la porosidad aparente y la absorción de agua disminuyen a medida que se incorporan cantidades

crecientes del residuo Geosilex, hasta la composición 40TD-60G debido probablemente a la menor densidad relativa de las tierras decolorantes con respecto al residuo GeoSilex y a la mayor formación de silicatos cálcicos hidratados que tienen una estructura más compacta.. La succión de agua de los ladrillos sílico-calcáreos TD-G disminuye con el aumento del porcentaje del residuo GeoSilex.

- En cuanto a las propiedades mecánicas de resistencias a compresión y flexión, los ladrillos sílico-calcáreos presentan de forma general, mayor resistencia a compresión a medida que se incrementa el contenido en el residuo Geosilex. Los ladrillos con composiciones comprendidas entre un 70 % TD y un 30% Geosilex y un 30 % de TD y un 70 % de Geosilex presentan resistencias a compresión superiores a 35 MPa y resistencias a flexión superiores a 9,5 MPa. La conductividad térmica de los ladrillos sílico-calcáreos aumenta a medida que se incrementa el contenido en Geosilex, de acuerdo con los de densidad aparente. La conductividad térmica oscila entre 0,30 W/mK para los ladrillos 90TD-10G y 0,54 W/mK para los ladrillos 20TD-80G

Considerando los resultados obtenidos en las propiedades físicas, mecánicas y térmicas, los ladrillos conteniendo entre un 70 y un 30 % de TD y un 30 y un 70 % de Geosilex, presentan un balance adecuado de propiedades físicas mecánicas y térmicas para su uso como material de construcción. Introduciendo el factor económico, y considerando que el coste del residuo tierras decolorantes es menor al del residuo GeoSilex, los ladrillos sílico-calcáreos con porcentajes más elevados en TD, 70TD-30G son los que presentan propiedades adecuadas a menor coste. Estos ladrillos sílicos calcáreos presentan una densidad aparente de 1,452 g/cm³, una absorción de agua del 20,8 %, una resistencia a compresión de 37,4 MPa y una conductividad térmica de 0,39 W/mK.

Por tanto, se puede concluir que la fabricación de ladrillos sílico-calcáreos empleando como materias primas sólo residuos, tierras decolorantes y GeoSilex es viable, ya que se obtienen materiales de construcción sostenibles con propiedades físicas, mecánicas y térmicas adecuadas.

7. BIBLIOGRAFÍA

- 2014 TOLSA GROUP. (s.f.). Obtenido de Refinado de aceites y grasas:
http://www.tolsa.com/refinado-depuracion/productos_soluciones/refinado-de-aceites-y-grasas/
- AENOR. (2011). Norma UNE-EN 772-16. En A. E. Certificación. Madrid.
- Allali, F. (2016). The influence of calcium content on the mixture of sodium silicate with different additives . En E. J. F. Allali, *Construction and Building Materials*. Board.
- AVENTUM. (16 de mayo de 2017). *TIERRAS DE BLANQUEO DE ACEITES ¿HAY ALTERNATIVAS AL VERTEDERO?* Obtenido de <https://aventum.net/2017/05/16/tierras-de-blanqueo-de-aceites-hay-alternativas-al-vertedero/>
- BOE-A-1983-5543. (s.f.). Real Decreto 308/1983, de 25 de enero, por el que se aprueba la Reglamentación Técnico-Sanitaria de Aceites Vegetales Comestibles.
- C. Haro, E. D. (2014). Regeneración de Arcillas de Blanqueo Empleadas en la Decoloración de Aceites Vegetales Comestibles. *REVISTA EPN*.
- C67-07a:2003, A. (2007). Stadar Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile. En A. International. West Conshohocken.
- Construmática. (s.f.). Obtenido de https://www.construmatica.com/construpedia/Impactos_Ambientales_en_el_Sector_de_la_Construcci%C3%B3n
- Construnario. (25 de julio de 2011). *GeoSilex®: reductor del CO2 ambiental*. Recuperado el 12 de agosto de 2019, de <https://www.construnario.com/notiweb/29166/geosilex-reductor-del-co2-ambiental#>
- Corvetto, F. (s.f.). *Conceptos básicos y optimización del proceso de blanqueo*. Buenos aires.
- EN-772-1:2011. (2011).
- Filipponi, F. (2003). Physical and mechanical properties of cement-based products containing incineration bottom ash. Waste Management.
- ISO. (1991).

Marvel *Panalytical*. (s.f.). Obtenido de
<https://www.malvernpanalytical.com/es/support/product-support/mastersizer-rang>

Quesada, D. E. (2014). Valorización de tierras filtrantes y decolorantes de la refinación de aceites y grasas en la fabricación de ladrillos cerámicos. *ECONAMA 2014 Congreso Nacional del Medio Ambiente*, (pág. 24).

RL-88, R. (2004). Pliego general de condiciones para la recepción de los cerámicos en las obras de construcción.

Rodríguez, E. L. (2018). ABSORCIÓN DE HUMEDAD EN LOS LADRILLOS.

Singh, N. B. (2000). Hydration of bagasse-ash blended Portland cement, *Cement & Concrete Research*.

Trenzametel. (2011).

UNE. (2011). Methods of test for masonry units - Part 16: Determination of dimensions.

UNE67040:1986. (1986). FÁBRICA DE LADRILLO. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

(s.f.). Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería. Parte 2: Piezas silicocalcáreas. En UNE-EN771-2:2011+A1:2016.

Usón, A. A. (13 de enero de 2014). *EcoHabitar*. Recuperado el 16 de agosto de 2019, de <http://www.ecohabitar.org/analisis-de-ciclo-de-vida-de-los-materiales-de-construccion/>