



**Universidad Autónoma de San Luis Potosí**

**Facultad de Ingeniería**

**Centro de Investigación y Estudios de Posgrado**

**Estudio del comportamiento mecánico de morteros  
base cemento reforzados con desechos de lanas industriales  
expuestos a medio ácido y elevadas temperaturas**

**TESIS**

Para obtener el grado de:

**Maestría Metalurgia e Ingeniería de Materiales**

Presenta:

**Ing. Alain Pacheco Pazos**

Asesor:

**Dra. Juana María Miranda Vidales**

San Luis Potosí, S. L. P.

Octubre de 2022





17 de marzo de 2022

**ING. ALAIN PACHECO PAZOS  
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por la **Dra. Juana María Miranda Vidales**, Asesora de la Tesis que desarrollará Usted con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Metalurgia e Ingeniería de Materiales**, me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 17 de marzo del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

**TEMARIO:**

**“Estudio del comportamiento mecánico de morteros base cemento reforzados con desechos de lanas industriales expuestos a medio ácido y elevadas temperaturas”**

Introducción.

1. Antecedentes generales de materiales tradicionales y de reciclaje utilizados en sistemas constructivos.
2. Caracterización de los materiales y metodología experimental.
3. Análisis de resultados y discusión de la influencia de la sustitución del agregado fino por desechos de lanas industriales en morteros base cemento.

Conclusiones.

Referencias.

**“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”**

**A T E N T A M E N T E**

**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN  
DIRECTOR.**



[www.uaslp.mx](http://www.uaslp.mx)

Copia. Archivo.  
\*etn.

Av. Manuel Nava 8  
Zona Universitaria • CP 78290  
San Luis Potosí, S.L.P.  
tel. (444) 826 2330 al39  
fax (444) 826 2336

“Rumbo al centenario de la autonomía universitaria”

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres Marisol Pazos Iquera y Arturo Pacheco Aguilera por darme la vida, por darme una infancia llena de felicidad, por la formación y educación que con mucho esfuerzo e ímpetu lograron enseñarme, pero sobre todo por su incondicional y bendecido amor.

A mis hermanos Arturo, Sol Yenitze y Manuel por compartir alegrías y tropiezos de los cuales salimos triunfadores, por su confianza y por permitirme estar en sus vidas, los amo y siempre estarán presentes en mi vida.

A Daniela por dejarme compartir su vida con la mía, por darme su amor, por aguantarme y perdonar, por darme la confianza y no dejarme caer, por su apoyo incondicional.

A mi asesora de tesis la Dra. Juana María Miranda Vidales, por la orientación y ayuda que me brindó para la realización de esta tesis, por su tiempo y paciencia que me permitieron aprender mucho más que lo estudiado en el proyecto. Sus consejos fueron siempre útiles cuando no salían de mi pensamiento las ideas para escribir lo que hoy he logrado.

A mis sinodales la Dra. Lilia Narváez Hernández y el Dr. Emmanuel José Gutiérrez Castañeda y al sinodal suplente el Dr. José de Jesús Cruz Rivera por sus enseñanzas, ideas y conocimientos compartidos para la elaboración de esta tesis.

Al director del Centro de Capacitación en ingeniería de Materiales (CCIM), el Dr. Mitsuo Osvaldo Ramos y a los técnicos Adolfo Cuellar, Nicole Frías y Brenda Villegas por las facilidades y asistencia otorgadas durante los ensayos a compresión y a la flexión.

Al Dr. Emmanuel José Gutiérrez Castañeda por su apoyo con los análisis de TGA y DSC

Al personal técnico del instituto de metalurgia, M. IM. Claudia Elías Alfaro, M. IM. Rosa Lina Tovar Tovar, Lorena Hernández Hernández y Alfredo Ruíz Prado, por su apoyo en los diferentes laboratorios y talleres del instituto.

Al señor Francisco Núñez Ruiz (Pancho), por su excelente trabajo en la elaboración de moldes empleados en esta investigación.

A todo el personal académico del postgrado en Metalurgia e Ingeniería de Materiales, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, por contribuir con sus conocimientos a mi formación profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico brindado a través de la beca con número CVU: 1007283 para la realización de esta tesis.

A mis amigos, Cristian Mata, Carlos Galicia y Edgar Armendáriz, por el apoyo que me han brindado durante el tiempo que tengo de conocerlos.

## **DEDICATORIA**

---

**A MI DIOS, A MIS PADRES, A MIS HERMANOS Y A MI  
COMPAÑERA DE VIDA.**

En cada momento de mi vida a nuestro Dios amoroso, por haberme bendecido con mis padres Marisol Pazos Iquera y Arturo Pacheco Aguilera, quienes han luchado por hacerme persona de bien a mí y a mis hermanos, que con paciencia e inmenso amor nos ha sabido impulsar para que sigamos adelante, y buscar el sendero del camino deseado.

<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>II</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>III</b>
<b>JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>V</b>
<b>HIPÓTESIS:.....</b>	<b>V</b>
<b>OBJETIVO GENERAL:.....</b>	<b>VI</b>
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....</b>	<b>VI</b>
<b>CAPÍTULO I. ANTECEDENTES GENERALES DE MATERIALES TRADICIONALES Y DE RECICLAJE UTILIZADOS EN SISTEMAS CONSTRUCTIVOS.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1.1 <i>Cemento Portland.....</i>	2
1.2 <i>Características de los agregados en el mortero base cemento.....</i>	8
1.2.3 <i>Agua Potable.....</i>	12
<b>1.3 DESECHOS INDUSTRIALES.....</b>	<b>13</b>
1.3.1 <i>Impacto de los desechos industriales en el medio ambiente. ....</i>	13
<b>1.3.2 MORTEROS MODIFICADOS CON DESECHOS INDUSTRIALES.....</b>	<b>14</b>
1.3.3 <i>Desecho de Lana Mineral (DLM).....</i>	16
1.3.6 <i>Desecho de Lana Animal (DLA).....</i>	18
<b>1.4 DURABILIDAD DEL MORTERO.....</b>	<b>21</b>
1.4.1 <i>Causas del deterioro del concreto. ....</i>	21
1.4.2 <i>Deterioro del concreto y mortero por ataque físico.....</i>	21
1.4.3 <i>Deterioro del concreto por ataque químico.....</i>	22
<b>CAPÍTULO II. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1 MATERIAS PRIMAS PARA LA ELABORACIÓN DE MORTEROS .....</b>	<b>25</b>
<b>2.2 TÉCNICAS Y MÉTODOS USADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.....</b>	<b>27</b>
2.2.1 <i>Análisis de los agregados (arena, DLM y DLA) mediante difracción de rayos X.....</i>	27
2.2.2 <i>Análisis granulométrico de la arena y el Desecho de Lana Mineral (DLM).....</i>	29
2.2.3 <i>Determinación de la densidad y absorción de los agregados finos arena y DLM.....</i>	30
<b>2.3 ELABORACIÓN DE MORTEROS BASE CEMENTO PARA LA FABRICACIÓN DE PROBETAS.....</b>	<b>30</b>
2.3.1 <i>Elaboración de probetas de mortero de referencia y modificadas con Desecho de Lana Mineral (DLM) y Desecho de Lana Animal (DLA).....</i>	32
<b>2.4 TÉCNICAS ANALÍTICAS EMPLEADAS PARA LA DETERMINACIÓN DEL EFECTO DEL DLM Y DLA EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MORTEROS BASE CEMENTO.....</b>	<b>34</b>
2.4.1 <i>Ensayos de porosidad, absorción y densidad del mortero.....</i>	34

2.4.2	<i>Ensayo de resistencia a la compresión de morteros tradicionales y modificados con DLM y con DLA.</i>	34
2.4.3	<i>Estudio de morteros con diferentes dosificaciones agua/agregado fino-cemento.</i>	37
2.4.4	<i>Ensayo de Flexión.</i>	38
2.4.5	<i>Ensayo de deterioro de morteros en un medio ácido.</i>	38
2.4.6	<i>Ensayo de deterioro a temperaturas elevadas de morteros tradicionales y modificados con DLM y DLA.</i>	40

<b>CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA SUSTITUCIÓN DEL AGREGADO FINO POR DESECHOS DE LANAS INDUSTRIALES EN MORTEROS BASE CEMENTO.</b>		<b>41</b>
<b>3.1</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS.</b>	<b>41</b>
3.1.1	<i>Distribución de tamaño de partícula del agregado fino natural (arena) y el agregado sustituto Desecho de Lana Mineral (DLM).</i>	41
3.1.2	<i>Densidad y absorción de humedad de los agregados (arena, DLM y DLA).</i>	43
<b>3.2</b>	<b>EFFECTO DE LOS AGREGADOS (DLM Y DLA) SOBRE LA POROSIDAD, ABSORCIÓN Y DENSIDAD DE LOS MORTEROS.</b>	<b>44</b>
<b>3.3</b>	<b>INFLUENCIA DE EL DLM Y EL DLA EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LOS MORTEROS BASE CEMENTO.</b>	<b>46</b>
<b>3.4</b>	<b>EVALUACIÓN DE LA DISMINUCIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA EN MORTEROS MODIFICADOS CON DLM.</b>	<b>49</b>
<b>3.5</b>	<b>INFLUENCIA DEL DLM Y EL DLA EN LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE LOS MORTEROS.</b>	<b>50</b>
<b>3.6</b>	<b>EVALUACIÓN DEL DETERIORO DE LOS MORTEROS EN MEDIOS ÁCIDOS: ÁCIDO CLORHÍDRICO Y ÁCIDO SULFÚRICO (HCL Y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).</b>	<b>52</b>
<b>3.7</b>	<b>INFLUENCIA DE ELEVADAS TEMPERATURAS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MORTEROS MODIFICADOS CON DLM Y DE LOS MODIFICADOS CON DLA.</b>	<b>56</b>
<b>CONCLUSIONES</b>		<b>63</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.</b>		<b>65</b>

## RESUMEN

La sustitución del cemento y agregados por materiales de desechos industriales en los sistemas constructivos a base de concretos o morteros ha sido una buena alternativa para dar un nuevo uso a estos materiales considerados como basura. En este trabajo se pretende utilizar Desecho de Lana Mineral (DLM) y de Desecho de Lana Animal (DLA) proveniente de la industria de aislantes térmicos y la industria textil, para sustituir el agregado fino natural (arena) en morteros base cemento y evaluar el efecto en las propiedades físicas y mecánicas del nuevo compuesto. Para ello se fabricaron probetas con una dosificación cemento/arena/agua de 1/3/0.5, respectivamente, sustituyendo el 50, 75 y 100% del peso de la arena por DLM y sustituyendo el 0.9, 1.5 y 2.1% del peso de la arena por DLA. Se evaluó la influencia del DLM y el DLA sobre las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los morteros. La densidad, absorción y porosidad se determinó de acuerdo a lo establecido en la norma C642 de la Sociedad Americana de Pruebas de Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés); la resistencia a la compresión se determinó de acuerdo a la norma ASTM C109 y a la norma mexicana NMX-C-061-ONNCCE (2004), la resistencia a la flexión fue determinada de acuerdo a la norma ASTM C348, los ensayos en medios ácidos se llevaron a cabo en base las normas ASTM C267 y ASTM C1012. Las probetas de mortero modificadas con DLM y DLA fueron expuestas a temperaturas de 400°C y 700°C y después evaluadas mediante ensayos mecánicos para conocer su desempeño.

Los resultados de este estudio muestran que la sustitución del 100% de la arena por DLM, reduce la porosidad del mortero, aumenta la densidad, mejora la resistencia a la compresión, incrementa la resistencia a la flexión, disminuye el deterioro y la pérdida de resistencia a la compresión al ser expuestos a ácido sulfúrico, ácido clorhídrico. También se observó que resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión a las temperaturas de 400 y 700 °C disminuye cuando estos morteros se comparan con el mortero de referencia. Con respecto a los morteros adicionados con 0.9% de la arena por DLA se observa que estos mantienen aproximadamente el 80% de las propiedades en base a los morteros de referencia. Se puede decir que es posible utilizar DLM como sustituto total de la arena en la elaboración de morteros base cemento obteniendo un mortero con mejores propiedades químicas físicas y mecánicas que un mortero tradicional. Mientras que también es posible utilizar morteros con un 0.9% de DLA sustituyendo la arena siempre y cuando la utilidad del mortero sea acorde a las propiedades físicas, mecánicas y químicas obtenidas en este estudio.

## ABSTRACT

The substitution of cement and aggregates for industrial waste materials in construction systems based on concrete or mortar has been a good alternative to give a new use to these materials considered as garbage. In this work it is intended to use Mineral Wool Waste (MWW) and Animal Wool Waste (AWW) from the thermal insulation industry and the textile industry, to replace the natural fine aggregate (sand) in cement-based mortars and evaluate the effect on the physical and mechanical properties of the new compound. For this, test tubes were manufactured with a cement/sand/water dosage of 1/3/0.5, respectively, substituting 50, 75 and 100% of the weight of the sand for DLM and substituting 0.9, 1.5 and 2.1% of the weight of the sand. sand by DLA. See the influence of MWW and AWW on the physical, chemical and mechanical properties of mortars. The density, absorption and porosity will be prolonged according to what is established in the C642 standard of the American Society for Testing Materials (ASTM); the compressive strength will be extended according to the ASTM C109 standard and the Mexican standard NMX-C-061-ONNCCE (2004), the flexural strength was determined according to the ASTM C348 standard, the tests in acid media carried out based on the standards ASTM C267 and ASTM C1012. Mortar specimens modified with MWW and AWW were exposed to temperatures of 400°C and 700°C and then evaluated by mechanical tests to determine their performance.

The results of this study show that the substitution of 100% of the sand by MWW reduces the porosity of the mortar, increases the density, improves the compressive strength, increases the flexural strength, decreases deterioration and loss of strength. To the compression when exposed to sulfuric acid, hydrochloric acid. It was also observed that compressive strength and flexural strength at temperatures of 400 and 700 °C decrease when these mortars are compared with the reference mortar. With respect to the mortars added with 0.9% of the sand by MWW, it is observed that these maintain approximately 80% of the properties based on the reference mortars. It can be said that it is possible to use MWW as a total substitute for sand in the preparation of cement-based mortars, obtaining a mortar with better chemical, physical and mechanical properties than a traditional mortar. While it is also possible to use mortars with 0.9% AWW replacing the sand as long as the usefulness of the mortar is consistent with the physical, mechanical and chemical properties obtained in this study.

## INTRODUCCIÓN

En el año 2016 el consumo mundial de cemento alcanzó los 4,129 millones de toneladas, convirtiéndose en el material de mayor consumo después del agua (ASOCEM, 2018), el aumento de la población y la economía del mercado hasta la fecha han incrementado la demanda mundial de energía, creciendo la huella ecológica de la raza humana, siendo el calentamiento global una de sus secuelas más relevantes. Para la elaboración de un material tan usado como el mortero base cemento, se requieren materias primas no renovables comúnmente denominadas agregados finos y gruesos (generalmente arena y grava) que constituyen entre el 60% al 75% de su volumen y se obtienen principalmente mediante minería a cielo abierto, la cual constituye más del 40% de la huella global de carbono (Kosmatka S. et. al. 2002). La extracción genera otros problemas como: degradación de la corteza terrestre, material particulado en la atmósfera, arrastre de sólidos por mantos acuíferos, generación de grandes emisiones de CO<sub>2</sub> y acumulación de desechos en vertederos por los procesos de construcción y demolición (Cagiao, 2010).

Tan solo en la Ciudad de México se producen un aproximado de 11.7 toneladas al día de residuos sólidos urbanos de los cuales la industria de la construcción es responsable de la generación de 7 toneladas al día de residuos de construcción y demolición de acuerdo con la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-007-RNAT (2013). Estadísticamente, se puede decir que el sector de la Construcción es responsable del 50% de los recursos naturales empleados, del 40% de la energía consumida (incluyendo la energía en uso) y del 50% del total de los residuos generados (Landeró, 2011).

En la actualidad se han buscado distintas alternativas con base en el proceso de reciclado de algunos materiales, como han sido los desechos industriales con el objetivo de evitar la explotación de recursos naturales, dando una solución parcial a los vertidos y acumulación de desechos industriales, generando un uso para ellos y reduciendo la huella de carbono generada por la industria de la construcción (Medeiros M. et al., 2021). Estas alternativas son menos invasoras para nuestro planeta y dan pie a la aplicación de las 3R's (reducir, reciclar y rehusar) (Block y Bokalders, 2010).

Algunos investigadores han descubierto que los desechos de lana mineral (lana de roca) son alternativas viables para la elaboración de morteros base cemento, mejorando o manteniendo las propiedades físicas y mecánicas de los morteros tradicionales. Lin. et al. (2013) sustituyeron hasta el 40% de cemento por lana de roca por cemento logrando aumentos del 15% en la resistencia a

compresión y reduciendo la penetración de cloruros. En 2017, Pérez (2017) utilizó desechos de lana mineral o lana de roca como sustituto parcial del agregado fino arena en concentraciones de hasta el 60%. Los resultados obtenidos disminuyen el volumen de poros y se incrementa la densidad del compuesto, se incrementa la resistencia a flexión hasta un 66% y la resistencia a compresión aumentó un 15%. Otros investigadores han utilizado desechos de lana animal en la elaboración de morteros obteniendo resultados favorables para ser usados como alternativas en la fabricación de morteros. Fantili, Sicardi y Dotti (2017) investigaron la incorporación del 1% en volumen de fibras de lana de oveja en morteros base cemento. Esta investigación, reportó mejoras en la resistencia a la flexión del 18%. Alyousef. et al. (2019) reveló que las fibras de lana de oveja en 1.5% de fibras de 70 mm de longitud mejoran la resistencia a flexión en un 20.8% y la ductilidad del mortero. Mientras Maia, Veiga y de Brito J (2019) elaboraron morteros a base de cemento con un 20% de fibras de lana, con longitud no mayor a 30 mm, obtuvieron un aumento del 40% y 26% en las resistencias a la flexión y a la compresión, respectivamente.

Por otro lado, es importante seguir con la innovación de materiales alternativos que puedan sustituir a los agregados finos y gruesos, reutilizando materiales de desecho industrial que cumplan con las características y propiedades requeridas en el ámbito de la construcción y que contribuyan a mitigar la contaminación generada por la explotación de recursos naturales (Piña, 2018). Siempre se debe tener en consideración los cambios en las propiedades de los morteros al usar áridos reciclados (Cagliaio, 2010). Por lo cual, el objetivo de este trabajo es proponer la utilización de materiales provenientes de industrias productoras de aislantes térmicos y de la industria textil en morteros base cemento, con el fin de reducir el impacto ambiental generado por su acumulación.

El capítulo uno de este trabajo describe las características de los morteros base cemento y la influencia de los agregados tradicionales en sus propiedades, además se analiza la influencia de algunos desechos industriales usados como sustitutos parciales de los agregados (arena y grava) en morteros. El capítulo dos describe los materiales empleados en esta investigación, se caracterizan las materias primas y se explica el plan experimental desarrollado para determinar la influencia de la sustitución de los agregados tradicionales por desechos de lana mineral y lana animal en el comportamiento físico y mecánico de morteros base cemento. En el capítulo tres se analizan y discuten los resultados obtenidos de los ensayos físicos y mecánicos realizados a los morteros tradicionales y modificados con desechos de lanas industriales. Finalmente se presentan las conclusiones de este trabajo.

## JUSTIFICACIÓN

Uno de los mayores problemas al construir, es el desconocimiento de las características que involucran el desempeño físico y mecánico de morteros y concretos con materiales alternativos para su elaboración, lo cual es un vacío científico que se convierte en la principal dificultad al emprender proyectos de construcción con estructuras de concreto reciclado.

Considerando los motivos expuestos anteriormente, la búsqueda e innovación de nuevas vías de reciclaje para proyectos de construcción, que empleen concretos con agregados reciclados de las industrias, resulta fundamental para la reducción de la explotación de los recursos naturales disponibles y con ello contribuir al desarrollo sostenible en el ámbito de la edificación. Además, se debe considerar el ahorro económico que genera utilizar un material de desecho industrial el cual no tiene un uso y es acumulado en vertederos

Por lo tanto, el presente trabajo de investigación pretende generar información científica acerca de los efectos del uso de Desecho de Lana Mineral (DLM) y Desecho de Lana Animal (DLA) los cuales han sido utilizados como sustituto de agregados finos, gruesos y aglutinantes en la elaboración de morteros. Se busca mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los morteros base cemento sustituyendo el agregado fino (arena) por DLM o DLA. Así, los residuos recuperados se valorizan y reutilizan, generando un compuesto base cemento más económico y atractivo para las empresas que los tradicionales, teniendo un impacto positivo al medio ambiente, evitando su almacenamiento descontrolado en la naturaleza e incrementando el ahorro energético, generado por la extracción de agregados naturales, además de obtener un compuesto más ecológico que los morteros tradicionales y principalmente se dará un uso a estos desechos industriales, promoviendo la regla de las tres R (reducir, rehusar y reciclar).

## HIPÓTESIS:

La sustitución parcial o total del agregado fino (arena) por desechos de lana mineral (DLM) o la adición de fibras de refuerzo de desechos de lana animal (DLA) a morteros base cemento, mejora las propiedades físicas y mecánicas de los morteros tradicionales. La utilización de estos desechos como sustituyentes del agregado fino (AR), son una alternativa para reducir los costos de elaboración de los

elementos constructivos y ayudar a reducir la contaminación emitida por la extracción de agregados naturales.

### **OBJETIVO GENERAL:**

Evaluar el efecto de la sustitución del agregado fino (arena) por partículas de desechos industriales derivados de la obtención de lana mineral (DLM) y lana animal (DLA) en morteros base cemento, mediante el análisis de sus propiedades físicas, químicas y mecánicas.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Establecer la relación cemento/agua/agregado/DLM óptima, sustituyendo el agregado fino (arena) por desechos de lana mineral (DLM) en 50, 75 y 100% en morteros base cemento en función a la resistencia a la compresión resultante de cada mezcla.
- Establecer la relación cemento/agua/arena/DLA óptima sustituyendo 0.9%, 1.5 % y 2.1% en peso del contenido del agregado en morteros base cemento en función a la resistencia a la compresión de cada mezcla.
- Analizar el comportamiento físico (porosidad, densidad, absorción) y mecánico (resistencia a compresión y flexión) de los morteros adicionados con DLM y DLA y realizar una comparación con morteros de referencia.
- Determinar la cantidad de agua óptima para la elaboración de morteros con desechos de lana mineral, sin que se afecte la relación agua /cemento que interfiera de manera negativa en las propiedades mecánicas de los morteros,
- Evaluar el deterioro químico de los morteros modificados con DLM y DLA inducido por medios agresivos mediante la inmersión en soluciones de ácido clorhídrico y ácido sulfúrico.
- Evaluar la resistencia a elevadas temperaturas (400°C y 700° C) de los morteros modificados con DLM y DLA mediante ensayos mecánicos.

## **CAPÍTULO I. ANTECEDENTES GENERALES DE MATERIALES TRADICIONALES Y DE RECICLAJE UTILIZADOS EN SISTEMAS CONSTRUCTIVOS.**

En este capítulo se describen los principales componentes del mortero y del concreto. Se analizan las características principales y el efecto de los agregados en las propiedades físicas y mecánicas de los morteros. Además, se hace mención de algunos desechos industriales que han sido utilizados para sustituir parcial o totalmente los agregados naturales del mortero y/o concreto (arena y grava).

### **1.1 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.**

El mortero y el concreto son los materiales de construcción más usados en el mundo, su fácil y rápida preparación, la alta eficacia y trabajabilidad, hacen del concreto y del mortero materiales ideales para cualquier exigencia constructiva. Dentro de los materiales de construcción se encuentran los compuestos base cemento, de los cuales hay tres categorías de productos y sus agregados fino y gruesos (arena y grava). En primer lugar, se tiene la pasta de cemento producto de la mezcla de cemento con agua, en segundo lugar, está el mortero producto de la pasta de cemento más agregado fino (arena) y en tercer lugar el concreto mismo que se compone de mortero, pero además de incluir agregado fino, contiene agregado grueso (grava). Tanto el mortero como el concreto se logran a partir de la unión de los áridos mediante la pasta de cemento que actúa como conglomerante hidráulico. Cada uno de estos materiales influyen en las propiedades físicas y mecánicas del concreto y variando las características del agregado como lo son: el tipo de agregado, su forma, la distribución de tamaño o añadiendo fibras de refuerzo (metálicas, orgánicas, poliméricas, etc.), se pueden modificar algunas propiedades del concreto y del mortero (Betancourt, S. 2017). Además, en el concreto y el mortero, el cemento es el componente principal responsable de unir a los agregados y finalmente del endurecimiento de la pasta como un compuesto sólido (Álvarez, J. et al. 1995).

El cemento junto con sus agregados, forman la fase matriz del concreto que envuelve al agregado grueso o fase refuerzo. A su vez, en el mortero, el agregado fino es la fase refuerzo que se crea cuando es hidratada la mezcla siendo los morteros mezclas plásticas que en estado pastoso tienen la propiedad de poderse moldearse, de adherirse fácilmente a otros materiales y unirlos entre sí. Los morteros también tienen propiedades protectoras que mediante su endurecimiento logran alcanzar

buena resistencia mecánica. A través de los años los morteros se han ido modificando, actualmente son elaborados con cemento Portland. Sin embargo, los daños causados al medio ambiente han motivado a que se busquen nuevas alternativas para el ahorro de recursos naturales y el aprovechamiento de materiales de desecho industrial para la elaboración de morteros (Ramírez C, et al., 2020). Por estas razones la industria de la construcción ha desempeñado y desempeña un rol fundamental en la sociedad de todos los tiempos, gracias a ella se logra la construcción de obras de distinto tipo. A continuación, se describen los componentes del mortero y algunos agregados alternativos.

### 1.1.1 Cemento Portland.

El cemento Portland es conglomerante o cemento hidráulico que al mezclarse con áridos y agua conforma una pasta moldeable que después de un proceso de curado, fragua y se endurece. El cemento reacciona químicamente con el agua y en conjunto con los agregados forma una pasta moldeable que finalmente forma un compuesto monolítico rígido y resistente. Las materias primas para la producción del Portland son minerales con óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  o alúmina), óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) obtenidos en canteras, generalmente con una composición deseada. La mezcla es calentada en un horno especial cilíndrico casi horizontal que rota lentamente mientras la temperatura aumenta hasta alcanzar una temperatura de 1400 -1550 °C transformando químicamente la materia prima en clínker (Kosmatka S. et. al. 2002).

Los cementos Portland, se encuentran entre los materiales actualmente más empleados y con mayor nivel de producción a escala mundial, tan solo en el período 2000–2011 la industria del cemento duplicó su producción, alcanzando las 3600 millones de toneladas, imponiéndose en el mercado de la construcción con amplia ventaja respecto a otros aglomerantes y las razones están relacionadas con la eficiencia del cemento Portland, por sus altas resistencias mecánicas adquiridas en la Clinkerización o sinterización llevada a cabo a las temperaturas de 1300 – 1450 °C. Las materias primas principales utilizadas en la fabricación del cemento Portland (calizas y arcillas) son muy abundantes y se encuentran muy bien distribuidas en la superficie de la corteza terrestre, las cuales presentan similitud en su composición química. El comportamiento durable de los materiales aglomerados fabricados a partir del cemento Portland, por ser resistente a la intemperie, a la humedad y otros ambientes (Troyano M, 2019).

### 1.1.1.1 Composición del cemento Portland.

La composición química de los cementos se compone de óxido de calcio (CaO) del 58.2 al 65.4 %, óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) del 19.8 al 26.45 %, alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) del 4.1 al 9.5 %, óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) del 2.1 al 4.5 %, entre otros componentes menores al 3 % y normalmente contiene cinco fases principales llamadas alita, belita, celita, felita y residuos vítreos. El principal componente del cemento Portland es el Clínter, es obtenido después de la clinkerización (aproximadamente a 1450 °C) y es el principal constituyente activo que más influye en el comportamiento del mortero y concreto, un conglomerante hidráulico que endurece tras su hidratación. Está formado a partir de la unión de arcillas (aporta silicato de alúmina hidratado) y caliza (aporta carbonato de calcio CaCO<sub>3</sub>). La combinación de estos materiales y la clinkerización a altas temperaturas, dan origen a los principales compuestos que conforman al clínter elemento principal del cemento. En la Tabla 1 se puede observar el nombre del componente, su fórmula química, la concentración típica utilizada en cementos, además de los rangos de concentración en que pueden modificarse la adición de dichos materiales según el uso y las propiedades requeridas (Sanjuan, M. 2014).

*Tabla 1. Composición química del clínter (% en Masa) (Sanjuan, M. 2014).*

Nombre	Fórmula Molecular	Abreviatura	Concentración típica	Rango de concentración %
Silicato tricálcico	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	61	46 – 79 %
Silicato dicálcico	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	15	5 – 30 %
Ferritoaluminato tetracálcico	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF	8	4 – 16 %
Aluminato tricálcico	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	12	6 – 18 %
Óxido de calcio (cal libre)	CaO	CaO	1	0.1 – 4 %
Óxido de magnesio libre	MgO	M	1.5	0.7 – 1.5 %

### 1.1.1.2 Características principales de los cementos Portland.

La adición de materiales complementarios en la producción del clínter, da lugar a la modificación de las propiedades finales del cemento. De acuerdo a la norma ASTM C150 (2016) hay ocho tipos de cementos; Tipo I para cuando no se requieren propiedades especiales del cemento, Tipo II de uso general con moderada resistencia a los sulfatos y moderado calor de hidratación, Tipo III de altas resistencias iniciales, Tipo IV de bajo calor de hidratación, Tipo V de alta resistencia a los sulfatos, y Tipos IA, IIA, y IIIA, con los mismos usos que los tipos I, II y III, pero con algunos aditivos

incorporadores de aire. En la Tabla 2 se describen los tipos de cemento, sus características principales y el uso principal de cada cemento. Las características principales en los cemento Portland, generalmente se orientan a la mejora de las propiedades mecánicas y de su rápido endurecimiento favoreciendo el desarrollo de la formación de SCH (Silicatos de Calcio Hidratados) en el cemento, el aumento de la resistencia a medios agresivos que contienen sulfatos, así como controlar el calor de hidratación, evitando agrietamiento en el concreto por esfuerzos internos de hinchamiento o gradientes de temperatura entre la superficie y la zona interna del concreto (Pérez, 2017). El Cemento Portland Ordinario (CPO) Tipo I en México, es uno de los cementos con mayor uso para la elaboración de mortero y concreto en la industria de la construcción.

*Tabla 2. Características de los cementos Portland ASTM C150 (2016).*

<b>Tipo de cemento</b>	<b>Designación</b>	<b>Usos más comunes</b>	<b>Características principales</b>
<b>I - IA</b>	Cemento Portland	Uso General	1, 5
<b>II - IIA</b>	Cemento Portland con Adiciones	Uso general; calor de hidratación moderada y resistencia moderada a los sulfatos	1, 4, 5
<b>III - IIIA</b>	Cemento Portland con escoria de alto horno	Alta resistencia inicial	1, 2, 3, 5
<b>IV</b>	Cemento puzolánico	Bajo calor de hidratación	5
<b>V</b>	Cemento Compuesto	Alta resistencia a los sulfatos	5,6

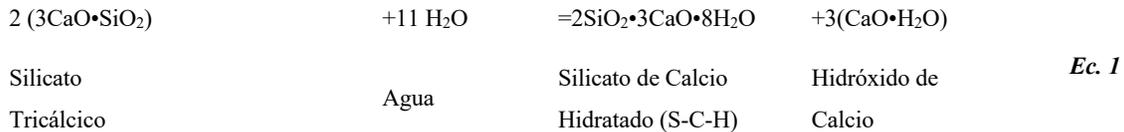
Características Principales:

1. Aire incluido, IA, IIA, IIIA.
2. Resistencia moderada a los sulfatos: C<sub>3</sub>A máximo, 8%.
3. Alta resistencia a los sulfatos: C<sub>3</sub>A máximo, 5%.
4. Calor de hidratación moderado: calor máximo de 290 KJ/kg (70cal/g) a los 7 días, o la suma de C<sub>3</sub>S y C<sub>3</sub>A, máximo 58%.
5. Alkali bajo: máximo de 060%.
6. El límite de resistencia Alternativa de sulfatos está basado en el ensayo de expansión de barras de mortero.

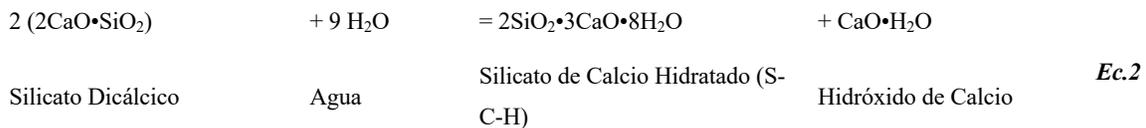
### **1.1.1.3 Reacciones de hidratación del cemento Portland**

Los componentes del clínker, principal elemento del cemento, se muestran en la Tabla 1, se puede apreciar las fases primarias alita y belita (también conocidos como C<sub>3</sub>S y C<sub>2</sub>S respectivamente). Al estar en presencia de agua los componentes principales del cemento reaccionan químicamente con el agua para formar nuevos sólidos que son la infraestructura de la pasta de cemento endurecida en el

concreto. La pasta de cemento Portland hidratada contiene típicamente del 15% a 25% de Hidróxido de Calcio (HC) y aproximadamente 50% de Silicato de Calcio Hidratado (SCH) en masa, este último eleva la resistencia mecánica siendo el principal responsable del endurecimiento del cemento (Kosmatka S. et. al. 2002). El resumen de algunas reacciones de hidratación del cemento encontradas por algunos autores se menciona a continuación.



En la Ec. 1 usando difracción de rayos X se ha demostrado que alrededor del 70% de los Silicatos Tricálcicos ( $\text{C}_3\text{S}$ ) reaccionan rápidamente y a los 28 días el mortero desarrolla el 70 % de su resistencia y el 100 % lo desarrolla en el lapso de 1 año, mientras que los productos de la reacción son hidróxido de calcio (HC) y un silicato de calcio hidratado (SCH) con propiedades de un gel rígido (Taylor, 1997).



En la Ec. 2 el Silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ) se comporta de manera similar a los  $\text{C}_3\text{S}$ , pero con una tasa de reacción más lenta y con menos formación de HC, el 30 % de la resistencia la alcanza a los 28 días y el 100 % en el lapso de un año.

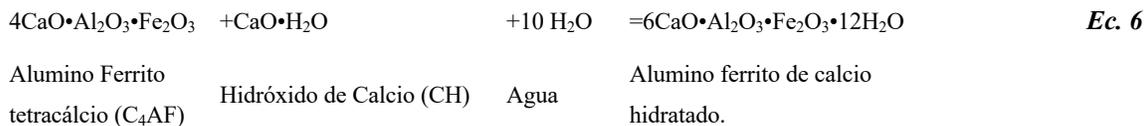
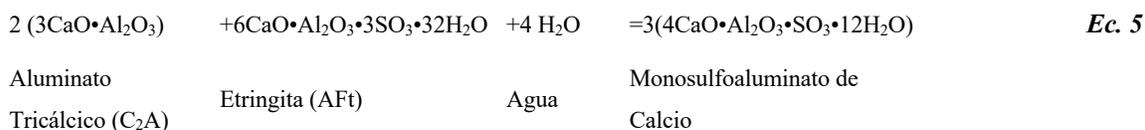


En la Ec. 3 el aluminato tricálcico reacciona con los hidróxidos de calcio para formar aluminato tetracálcico hidratado con una tasa de reacción muy rápida.



Aluminato Tricálcico (C <sub>3</sub> A)	Yeso	Agua	Etringita (AFt)
--	------	------	-----------------

En la Ec. 4 los aluminatos tricálcicos (C<sub>3</sub>A), sulfatos (yeso anhidrita u otra fuente de sulfatos) y el agua se combinan para formar etringita (trisulfatoaminato de calcio hidratado) En la Ecu. 5 la etringita (AFm) reacciona con el aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) para formar monosulfatoaminato de calcio y otros compuestos relacionados (Kosmatka S. et. al. 2002).

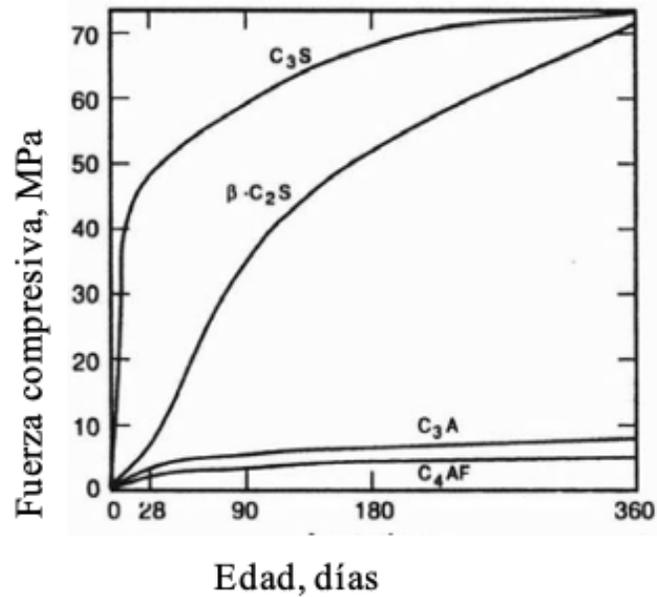


En la Ec. 6 el alumino ferrito tetracálcico reacciona con los hidróxidos de calcio y el agua para formar hidrato de aluminoferrita de calcio (Taylor, 1997).

En la Fig. 1 se pueden apreciar los principales compuestos del cemento y como influyen en la resistencia mecánica adquirida durante el fraguado de la pasta de cemento Portland después de reaccionar químicamente con agua, como el silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S) que, al hidratarse endurece rápidamente, siendo responsable del fraguado inicial y la resistencia inicial. Con mayores porcentajes de C<sub>3</sub>S la fuerza inicial del concreto es mayor. Al contrario del silicato dicálcico (C<sub>2</sub>S) que, al hidratarse endurece lentamente y contribuye en gran medida al aumento de la fuerza a edades superiores a una semana. El aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A), los sulfatos (yeso, anhidrita u otra fuente de sulfato) y el agua que al combinarse las reacciones liberan una gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento, contribuyen ligeramente al desarrollo temprano de la fuerza. Y el C<sub>4</sub>AF contribuye poco a la fuerza y da al cemento su característico color gris.

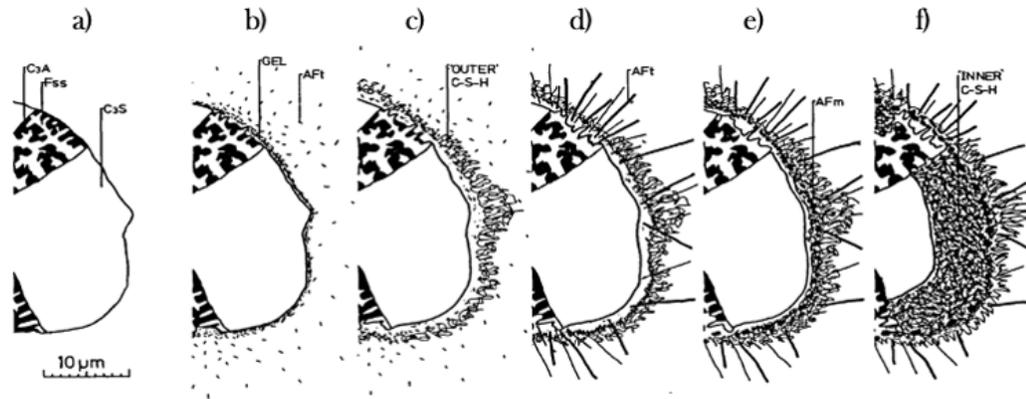
Los cementos con bajos porcentajes de C<sub>3</sub>A son más resistentes a suelos y aguas que contienen sulfatos, pero sin sulfato, el cemento fraguaría demasiado rápido. Además de controlar el fraguado y la ganancia de resistencia temprana, el sulfato también ayuda a controlar la contracción por secado y

puede influir en la resistencia durante 28 días (tiempo necesario para la correcta hidratación del cemento) (Viera, S. et al. 2014).



*Fig. 1. Resistencia mecánica de las principales fases del cemento Portland (Viera S. et al. 2014).*

En la Fig. 2 se puede ver el proceso de hidratación de una partícula de cemento, a diferentes edades de hidratación. Durante los primeros 10 min (Fig. 2. b) los aluminatos reaccionan con el yeso dando lugar a un gel rico en aluminato en la superficie del grano. Sobre este gel comienza a nuclear una fase amorfa llamada etringita (denotados como AFt) que crece en forma de barras cortas. Después de 10 horas (Fig. 2. c), el C<sub>3</sub>S (Silicato Tricálcico) produce gel de SCH (Silicato de Calcio Hidratado) en la superficie de la etringita formada anteriormente, esto produce gel SCH en la superficie de la etringita formada anteriormente. Al gel producido se le denomina “SCH externo” porque crece desde la superficie del grano de cemento hacia el espacio libre en su contorno. A las 18 horas (Fig. 2. d), la segunda etapa de formación de gel SCH se produce hacia el interior del grano de cemento, donde se forma una pequeña cantidad de gel que recibe el nombre de “SCH interno”.



*Fig. 2 Hidratación de la microestructura del cemento Portland. a) Partícula de cemento anhidro; b) tras 10 min de hidratación; c) tras 10 horas; d) tras 18 horas; e) entre 1-3 días; f) 14 días después. (Scrivener, 1984).*

Después de 1-3 días de fraguado se observa cómo el C<sub>3</sub>A (Aluminato Tricálcico) reacciona con la etringita y se forma monosulfoaluminato. En la Fig. 2. e, el gel “SCH interno” continúa su crecimiento hacia el interior del grano de cemento. Después de dos semanas de hidratación, la formación de gel “SCH interno” es muy pronunciada como refleja la Fig. 2. f. El gel “SCH externo” a los 14 días presenta claramente un aspecto fibroso mientras que el gel “interno” es masivo y carece aparentemente de una estructura definida, lo que genera una red que envuelve a los agregados y finalmente endurece haciendo el compuesto monolítico (Scrivener, 1984). Si las partículas de cemento son mayores a 100 micras es posible que no se dé la transformación completa de la misma, ya que el agua puede no llegar hasta su interior. Esto repercute en las resistencias mecánicas del concreto.

## 1.2 Características de los agregados en el mortero base cemento.

Todos los concretos que se elaboran en México, utilizan para su fabricación agregados o también llamados áridos, éstos pueden ser extraídos de dos fuentes; de origen natural o artificial. Estos elementos presentes en el concreto están aglomerados por una pasta de cemento, buscando formar una estructura resistente. Por lo tanto, la presencia de éstos y su calidad tiene gran importancia en el concreto, pues los áridos suponen un porcentaje aproximado del 80% respecto del total del volumen endurecido en concretos y del 70% en morteros (Alva R. et al. 2019). Por estas razones los áridos tienen un rol importante como agregados en el concreto y el mortero, siendo fase refuerzo tanto en la matriz como en el compuesto en general. Algunas propiedades del mortero son influenciadas por los agregados.

La norma ASTM C33 (2013) establece las especificaciones estándar para los agregados del concreto. Algunos de los requisitos a cumplir que se mencionan son: la calidad (que no sea liviano o pesado), el tamaño máximo nominal, el límite de sustancias nocivas en el agregado y la solidez. Y de acuerdo al tamaño de los agregados la norma los divide en dos grupos: Agregado Fino: Se denomina así al agregado que proviene de la disgregación de origen natural o artificial, cumple lo requerido en la norma y pasa por el tamiz 9.5 mm (3/8"). Estos comúnmente consisten en arena natural o piedra triturada siendo la mayoría de sus partículas menores que 5 mm. Agregado Grueso: Se denomina así al agregado que consisten en una grava o una combinación de gravas o agregado triturado cuyas partículas sean predominantemente mayores que 4.75 mm (tamiz #4) y generalmente entre 9.5 mm (3/8") y 38 mm (1 1/2").

Algunas propiedades importantes de los áridos finos y gruesos que deben cumplir, para darles un uso ingenieril óptimo: deben consistir en partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y de otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento. Por eso se deben de elegir áridos que no reaccionen con los componentes del cemento, evitando los materiales con altos contenidos de fluoruros y sulfuros, esto con el fin de prevenir el desarrollo excesivo o ralentizado de algunas fases del cemento cuya cinética de formación es muy lenta y pueda afectar el material, debido a que su desarrollo trae un hinchamiento o cambio volumétrico que puede generar fisuras en el concreto (Martínez, L. et al. 2013).

Las partículas de agregado que sean desmenuzables o susceptibles a resquebrajarse son indeseables, a mayor resistencia mecánica del agregado, generalmente, mayor resistencia del concreto. Los áridos redondeados presentan una superficie lisa, lo que ocasiona que la adhesión física entre pasta/agregado sea menor con respecto a los triturados, esto repercute en las resistencias mecánicas, pero los áridos redondeados aumentan la trabajabilidad de la mezcla, lo que se permite una reducción en la cantidad de agua, por ende, una menor porosidad, mayor densidad del material y un mejor desempeño mecánico (Pérez, 2017). También es de suma importancia la granulometría de los agregados y el tamaño máximo del agregado (para la grava), tanto en el comportamiento del concreto en estado fresco, como endurecido.

### **1.2.1 Influencia de los agregados en las propiedades del concreto fresco y endurecido.**

Las principales características de los agregados que afectan las propiedades del concreto son forma y textura, gradación, absorción, resistencia mecánica, módulo de elasticidad, tamaño máximo,

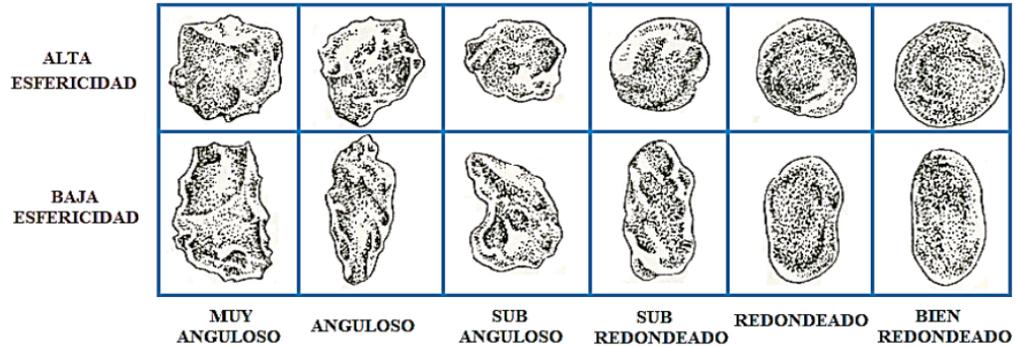
gravedad específica, resistencia al ataque de sulfatos, dureza y porosidad. La absorción es la propiedad del agregado que quizá más influye en la consistencia del concreto, puesto que las partículas absorben agua directamente en la mezcladora, reduciendo la manejabilidad de la mezcla y reduciendo las resistencias mecánicas. Otros factores secundarios que serán de importancia en la consistencia de la pasta son: la forma, tamaño y graduación; ya que mientras mayor superficie del agregado sea necesario cubrir con pasta, se tendrá menor fluidez. Una buena consistencia y manejabilidad de la mezcla se obtiene con la combinación de índices bajos de absorción y un coeficiente bueno de forma, en donde las partículas son aproximadamente redondas (Ruiz E, 2020).

La forma de las partículas afecta la trabajabilidad y colocación del concreto en estado fresco. El requerimiento de pasta de cemento de la mezcla de concreto está asociado a la superficie específica de los agregados. Las partículas con una superficie específica menor como las de forma cúbica o redondeada requieren menos pasta de cemento para alcanzar la misma trabajabilidad que una mezcla de concreto producida con agregados de mayor superficie específica como aquellos que contienen partículas alargadas y aplanadas. Adicionalmente, las partículas aplanadas, alargadas, angulares y rugosas (Fig. 3) al acomodarse tienen un alto contenido de vacíos, que hacen que la mezcla requiera de más arena para proporcionar un concreto manejable. Cuando esto sucede, la finura de la mezcla de agregados es mayor, es decir que tiene una superficie específica mayor y por ende el requerimiento de pasta incrementa (Yam, J. et al. 2003).

La forma de los agregados también tiene efecto en la resistencia y la durabilidad de concreto endurecido. La textura afecta la adherencia entre las partículas gruesas y la matriz de mortero reflejándose en la variación de la resistencia. Las partículas rugosas tienden a generar mayores resistencias que las partículas lisas, especialmente la resistencia a la flexión. Sin embargo, las partículas rugosas incrementan la demanda de agua para una mejor trabajabilidad, reduciendo de esta forma la resistencia y la durabilidad del concreto. La durabilidad está asociada a un contenido bajo de agua, por esta razón los agregados angulares, aplanados y alargados afectan negativamente la durabilidad del concreto ya que incrementan la demanda de agua. Por lo anterior, la morfología de los agregados influye en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido (Yam, J. et al. 2003).

Por otro lado, la granulometría y el Tamaño Máximo del Agregado (TMA) para las gravas, afectan las porciones relativas de los agregados, así como los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad y la durabilidad del concreto. Cuando los agregados son muy gruesos, pueden producir

mezclas rígidas; mientras que aquellos agregados que no poseen una gran deficiencia o exceso de algún tamaño y tienen una curva granulométrica suave, producirán resultados más satisfactorios en las propiedades del concreto fresco.

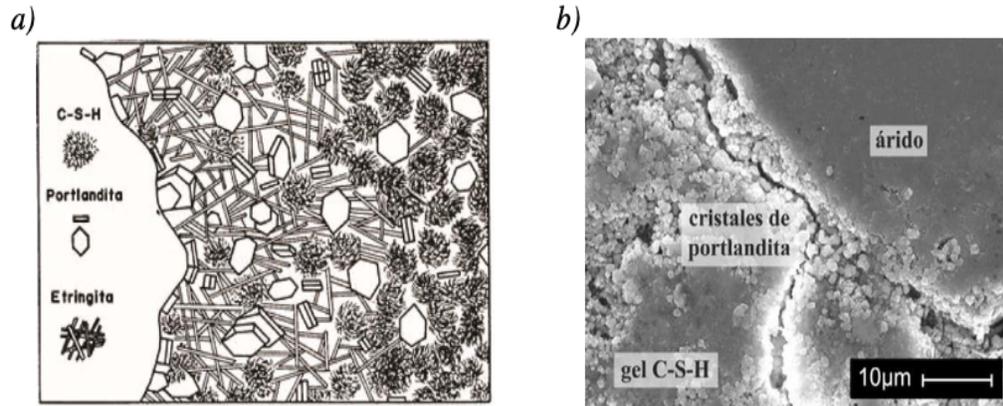


*Fig. 3. Angulosidad y redondeamiento de las partículas de los áridos.*

En cuanto a la interrelación mecánica entre la matriz y el agregado grueso, la textura superficial de éste es principalmente responsable de la adherencia. La roca triturada produce una adherencia superior comparada con la grava de canto rodado por ende una mayor resistencia mecánica; aunque la adherencia también tiene influencia en la relación agua/cemento que afecta tanto física como químicamente la zona de interfase.

### 1.2.2 Zona de Transición Interfacial (ZTI).

A la zona alrededor de los agregados se le denomina Zona de Transición Interfacial (ZTI) pasta/agregado, esta zona es considerada la de menor resistencia mecánica en los concretos, debido a su alta porosidad. Por ende, el agrietamiento puede propagarse preferentemente por la periferia del agregado. En la Figura 4 se detallan, mediante un esquema (Fig. 4 a) y una foto de microscopía electrónica de barrido (SEM) (Fig. 4. b) la microestructura en la interfaz del árido y de la pasta.



*Fig. 4. Microestructura de la interfaz árido-pasta. a) Diagrama esquemático de la interfaz árido-pasta. b) Imagen de SEM de la interfaz árido-pasta. Fuente: (Viera S. et al. 2014).*

La interfaz árido-pasta presenta un espesor del orden de los micrómetros que se caracteriza por poseer una relación a/c superior a la media en la pasta, lo que aumenta la porosidad y la precipitación de CH. Este aumento de agua en la interfaz, se debe en parte a la exudación superficial de los áridos.

La porosidad y absorción de los áridos son características que influyen notablemente en la adherencia con la pasta de cemento y en su durabilidad. La adherencia también está en función de la forma del árido y del estado superficial del mismo, siendo necesaria una aspereza mínima y una gran limpieza de su superficie (León, M y Ramírez, F. 2010).

### 1.2.3 Agua Potable.

El agua es un componente básico tanto para el amasado como para el curado de los materiales de base cemento. Su principal función es hidratar los componentes activos del cemento, actuar como lubricante para obtener una masa trabajable y crear espacio en la pasta para alojar los productos resultantes de la hidratación del cemento. Es la misma que provoca las reacciones de hidratación del cemento y que confiere al concreto la trabajabilidad necesaria para una correcta puesta en obra. Un exceso de agua puede provocar una elevada porosidad que se traduce en malas resistencias mecánicas a largo plazo, al contrario, usar menos del agua requerida genera que no se hidrate por completo el cemento.

### 1.3 DESECHOS INDUSTRIALES.

Los desechos industriales son cualquier elemento, sustancia u objeto, obtenido como resultado de un proceso industrial, por la realización de una actividad de servicio o por estar relacionado directa o indirectamente con la actividad, incluyendo eventuales emergencias o accidentes, del cual su productor o generador, no pueda utilizarlo y se deba tirarlo o tenga la obligación legal de hacerlo. Algunos ejemplos de desechos industriales son fierro, cobre, madera, hierro, arena, cartón, PET, concreto, solventes, químicos, materiales peligrosos y hasta basura orgánica. Una forma de clasificar estos remanentes industriales es por su densidad. Así se tienen residuos industriales sólidos, semisólidos líquidos y gaseosos; a su vez estos se clasifican en no peligrosos y peligrosos (Bedoya, C. 2015).

Gran cantidad de estos residuos industriales puede ser rehusados y reciclados, pero el problema de esto es que las técnicas que deben ser usadas en dichos procesos son demasiados costosas y al final se terminan convirtiendo en una pérdida económica para las empresas. Aun así, cada vez más hay más industrias que están comenzando a usar estos procesos para favorecer a la ecología y al planeta Tierra (Mendoza, I y Chávez, S. 2017).

#### 1.3.1 Impacto de los desechos industriales en el medio ambiente.

El impacto ambiental que las industrias tienen sobre el medio ambiente y los recursos naturales ha sido considerable, no tan sólo como resultado del crecimiento de la producción, sino también gracias a que dicho crecimiento se concentró en sectores de alto impacto ambiental. Se estima que la generación de residuos industriales peligrosos en México alcanza la cifra de 8 millones de toneladas al año y solo el 26 % recibe un manejo adecuado. La diferencia, equivalente a casi 6 millones de toneladas anuales, se acumula en las instalaciones o se dispone de manera ilegal (Cagiao, 2010).

Los desechos inertes, aunque no causan un daño directo a la salud, pueden tardar muchos años en degradarse. Por lo que generan contaminación visual y en el caso de escombro, pueden volverse el lugar ideal para la reproducción de especies dañinas como ratas y cucarachas. Por eso es importante que una empresa especializada en el manejo de chatarra y desperdicios industriales se encargue de la recolección y disposición correcta de estos materiales.

El impacto negativo de estas sustancias se ve agravado cuando son difíciles de degradar en la naturaleza. Los ecosistemas naturales están muy bien preparados, por millones de años de evolución, para asimilar y degradar las sustancias naturales. Pero en la actualidad se sintetizan miles de productos

que nunca habían existido antes, como la diversidad de plásticos que permanecen por muchos años antes de desintegrarse. Los remanentes tóxicos y corrosivos de muchas fábricas contaminan ríos, lagos y distintos cuerpos de agua. Igualmente, pequeñas partículas contaminantes pueden llegar a nuestro sistema respiratorio a través del aire. Es decir, el almacenamiento y disposición incorrecta de desperdicios industriales peligrosos es una amenaza seria a la salud de toda la sociedad, no solo de las personas que se encuentran en contacto directo con ellos (Castells, X. 2012).

Muchos investigadores han buscado distintas alternativas para sustituir los agregados naturales, reciclando algunos materiales como han sido los desechos industriales, con el objetivo de reducir la huella de carbono generada por la industria de la construcción. Estas alternativas son menos invasoras para nuestro planeta y dan pie a la aplicación de las 3 R's (reducir, reciclar y rehusar); lo cual ha resultado beneficioso, ya que han mejorado o mantenido algunas propiedades mecánicas y físicas de los morteros, además de evitar la explotación de recursos naturales, dando una solución parcial a los vertidos y acumulación de desechos, generando un uso para ellos, lo cual es un gran impacto positivo ambientalmente (Cagiao, 2010).

### **1.3.2 MORTEROS MODIFICADOS CON DESECHOS INDUSTRIALES.**

La reutilización de residuos de materiales de construcción no solo presenta beneficios ambientales, además se puede reducir los costos de producción de otros materiales a partir de los mismos. El reciclaje de concreto para la fabricación de agregados gruesos y el fin de sustituir al agregado natural debe ser una práctica que debe empezar a realizarse a la brevedad posible ya que los bancos de materiales pétreos cada día son más escasos y la acumulación de desechos en vertederos es un problema cada vez mayor. La necesidad de reciclar los residuos de construcción no solamente concierne a los países industrializados, sino que también a los semi desarrollados que presentan una demanda global con más prioridades. A continuación, se listan algunos agregados reciclados utilizados en concretos y morteros (Bedoya C y Dzul L, 2015).

Residuos de Construcción y Demolición (RCD). La obtención de agregados de concreto reciclado se da como fruto de la trituración del concreto proveniente de la demolición de estructuras o del concreto sobrante de algunos procesos en que muchas veces se solidifica y se dispone como escombros. Generalmente se conforma por tierras, concreto, ladrillos, cerámicos, madera, metales, yesos, plásticos, etc. Este material se utiliza como base o sub-base para construir nuevas carreteras o

para rehabilitar estructuras existentes, entre otras aplicaciones. Los RCD se mezclan con cemento, agregado natural (grava y arena), agua y aditivos para obtener un concreto de características físicas y mecánicas similares a las del concreto tradicional (Mendoza I y Chávez S, 2017). Este varía según el tipo de estructura de la cual provenga, debido a que en algunos casos va asociado a un refuerzo embebido o a materiales como plásticos, vidrio, madera, etc. (Collantes J, y Eslava D, 2018).

Ramírez C. et al. (2018) estudiaron la viabilidad de utilizar fibras de lana reciclada de RCD con experimentos para clasificar el comportamiento físico-químico concluyendo que tanto la estructura y composición química como la microestructura de los morteros que incorporan fibras aditivas es similar a la del mortero común. Ramírez C. et al. (2019) analizó el comportamiento mecánico de morteros con 3 tipos de fibras de lana mineral procedentes de RCD lo cual resultó beneficioso en concentraciones del 50% en los tres casos, aumentando la resistencia a la flexión, lo cual supone un gran ahorro de materia prima y un reciclaje de un gran volumen de residuos. Los morteros modificados con RCD tienen un adecuado comportamiento a la resistencia al fuego directo. La incorporación de estos residuos de fibras permite mantener adecuadas propiedades mecánicas para su uso y evita el desprendimiento explosivo de morteros en concentraciones del 50% de RCD sustituidos (Ramírez C. et al. 2020).

Fibras de Polipropileno. Varias investigaciones han utilizado botellas de tereftalato de polietileno (PET) como agregado en la mezcla de mortero y concreto. Las principales ventajas de la adición de fibras sintéticas en el concreto son en estado endurecido, el incremento de la tenacidad y de la resistencia al impacto y en el estado fresco, el control de la contracción plástica. Adicionalmente, controla la aparición de fisuras durante la vida útil de la estructura y brinda mayor resistencia a la fatiga (Mendoza C, 2011). Algunos de estos resultados son contradictorios respecto a los efectos de las fibras de polipropileno en las resistencias a compresión y flexión del concreto. Algunos estudios indican que la presencia de las fibras tiene efectos negativos en la resistencia a compresión, aunque se alcanzan ligeros incrementos en la resistencia a flexión, cuando el contenido de fibra es relativamente alto. Otros estudios presentan efectos favorables de la adición de fibra sobre la tenacidad e incremento en la resistencia a compresión, del orden de 25%, cuando se emplea un porcentaje volumétrico de 0.5% de fibras de polipropileno (Nalia y Korody M, 2008).

Partículas de caucho. El caucho molido se deriva más comúnmente de los neumáticos reciclados de automóviles y camiones. Durante el proceso de reciclaje de los neumáticos, se retira todo el material que no sea caucho como suciedad, alambres y borra. Los residuos restantes de caucho y el procesamiento continuo reducen el tamaño del molido bruto en partículas de caucho granulado, las cuales tienen diversas clasificaciones con base en el tamaño y el color de las partículas de caucho molido. Las propiedades físicas y mecánicas son similares a las del concreto convencional, a cantidades menores al 10%. La tendencia a usar materiales reciclados ha incrementado la demanda del caucho granulado. La fabricación de caucho para asfalto es la aplicación de caucho granulado más importante por sí misma, consumiendo un estimado de 220 millones de libras o aproximadamente 12 millones de neumáticos al año. El caucho granulado puede mezclarse con asfalto para mejorar las propiedades del mismo, usado en la construcción de carreteras, además de mejorar el precio (Guerrero J. et al. 2020).

### **1.3.3 Desecho de Lana Mineral (DLM).**

La roca es procesada a partir de la fusión de roca y convertidos a fibras con un proceso de centrifugación a alta velocidad o a través de dados de estirado o la combinación de ambos. Las fibras están distribuidas en forma multidireccional espaciadas por aire y pueden estar o no unidas entre sí. La lana mineral aislante es un material constituido por un entrelazado de filamentos de materiales pétreos que forman un tejido que mantiene entre ellos aire en estado inmóvil. Esta estructura permite obtener productos aislantes muy ligeros. Las lanas minerales están reconocidas internacionalmente como aislantes térmicos; por el entrelazado que mantiene el aire inmóvil, aislantes acústicos; por su estructura flexible, siendo, además, materiales incombustibles por su origen inorgánico (NOM-009-ENER-1995).

Dentro de las lanas minerales se distinguen tres tipologías principales: la lana de vidrio, la lana de roca o mineral y la lana de escoria, ambas provienen de materias primas naturales (la arena silícea conforma la lana de vidrio y la roca basáltica compone la lana de roca) que pasan por un proceso de producción para dar como resultado estos materiales aislantes ligeros, versátiles y con forma irregular o fibrosas. El óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y el óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) son los principales compuestos de la lana de roca y lana de escoria, pero el óxido de silicio y el óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) predominan en la lana de vidrio (NOM-009-ENER-1995).

### 1.3.4 Proceso de fabricación.

La lana mineral se elabora a partir de arena de sílice y vidrio reciclado mediante fusión y fibrado. La mezcla inicial se funde a 1450°C y después, mediante una rotación mecánica se producen unas fibras muy finas que en el proceso de enfriamiento se entremezclan hasta llegar a formar colchonetas formadas por finos hilos. En el caso de elaborar paneles, los ligantes son polimerizados y después se aplican revestimientos de papel, aluminio u otros materiales para dar propiedades mecánicas, acústicas, etc. A continuación, en la Fig. 5 se puede ver el esquema del proceso de fabricación de la lana de roca.

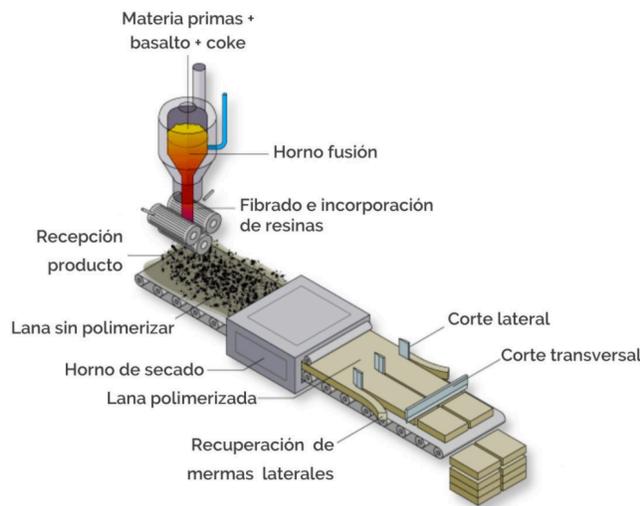


Fig. 5. Esquema de fabricación de la lana de roca.

El desecho de lana mineral se genera cuando el material fundido cae sobre los rodillos del fibrador o incorporados de resinas, donde gran porción del material no se transforma en fibras delgadas, al contrario, se solidifica en elementos de distintos tamaños, desde micras hasta varias pulgadas que caen fuera del mecanismo, mismos elementos que son clasificados y las partículas de mayor tamaño son reutilizadas y pasan de nuevo por el proceso.

### 1.3.5 Desecho de Lana Mineral en el mortero.

En 2011 Cheng A.et al. analizaron las propiedades de los compuestos a base de cemento con adición de desechos de lana de roca o mineral (DLM). Adicionando el 10% de desperdicio de lana mineral en compuestos a base de cemento, logrando mejorar la resistencia a compresión del 19%, tracción de 33%, reducción a la resistencia a la abrasión del 5% y disminución en la absorción de agua

del 33% en comparación con las muestras control. Lin W. et al. (2013) investigaron las propiedades de morteros con desecho de lana mineral (DLM), variando la sustitución de cemento por DLM en la mezcla en: 0%, 10%, 20%, 30% y 40% en peso. Como resultado se aumentó la resistencia a la compresión y la reducción de la carga total pasada en los morteros con más lana mineral a los 91 días de curado. Pérez O, (2017) analizó la sustitución de agregado fino (arena) por (DLM) en 0, 15, 30, 45 y 60%, el incremento en la cantidad de DLM resultó en una menor cantidad de poros, con el 60% de DLM, se incrementó la resistencia a la flexión hasta un 66% y la resistencia a la compresión aumentó un 15%.

El DLM no solo ayuda a prevenir la propagación de grietas, sino que también transfiere la carga a áreas no agrietadas, promoviendo efectivamente la resistencia a la tracción por rotura. La inhibición de la propagación de fisuras internas de la lana de roca es similar a la apariencia del vidrio de desecho triturado por Cheng A. et al. (2006). También mejora la resistencia a la abrasión que está directamente relacionada con la unión de la pasta de cemento con el agregado fino, la cual es más fuerte con la adición de lana de roca y el tamaño del poro es influenciado por el tamaño del agregado; con agregados más grandes aumenta la conectividad de poros, mientras que con más pequeños se reduce Sumanasooriva y Neithalath (2011).

### **1.3.6 Desecho de Lana Animal (DLA).**

Se conoce como lana a una fibra animal típica de ciertos animales caprinos (como la oveja) y camélidos (como la llama, la vicuña y la alpaca), obtenidos mediante un proceso llamado esquila. Dicha fibra es empleada en la industria textil como materia prima en la elaboración de prendas de diverso tipo. En sus distintas versiones, la lana es una fibra gruesa y elástica, que retiene muy bien el calor ya que se trata de un aislante térmico. Por ende, protege del frío tanto a los animales de los que proviene, como a los usuarios de la ropa confeccionada con ella.

La lana se origina a partir de la piel de animales vivos quienes la producen para abrigarse y preservar el calor corporal. Se produce en los folículos: estructuras internas de la piel del animal que penetran profundamente dentro de su dermis, vinculadas con las glándulas sebáceas y sudoríparas. Dependiendo del ciclo vital del animal, la lana se genera a partir de ciertas etapas, pudiendo incluso variar en propiedades y en calidad. Por ejemplo, la lana más valiosa de la oveja se produce entre sus 3 y 6 años de edad.

La lana está compuesta mayormente por una proteína animal llamada queratina, la misma que en otras condiciones permite la formación de las uñas, pezuñas, plumas, pelo y cuernos en los animales y en el ser humano. Es una macromolécula insoluble, resistente, que es segregada por células epidérmicas del animal, y por lo general está recubierta de sustancias cerosas y lipídicas como la lanolina.

### **1.3.7 Características de la lana animal.**

La lana animal es un tejido extensible, capaz de estirarse sin romperse, ya que sus fibras por lo general están plegadas entre sí; Pero es también elástica de modo que tiende a preservar su forma y es sumamente flexible. Quizá su propiedad más interesante es su enorme capacidad de aislamiento térmico, dado que sus fibras al no compactarse, mantienen un espacio de aire que funciona como aislante. Además, es sumamente higroscópica en su lado interno, es decir, que puede absorber normalmente hasta un tercio de su peso en agua del ambiente en una atmósfera húmeda. Sin embargo, su secado es lento pues su costado exterior es hidrofóbico, de modo que retiene la humedad de la piel que protege y no la reseca, conservándole el calor.

Las propiedades químicas de la lana son ignífugas, no produce llamas y para quemarse requiere altas temperaturas. Igualmente, es resistente a los solventes orgánicos y a los ácidos suaves, no así a los álcalis, que son capaces de desnaturalizar la queratina y romper la macromolécula. Su constitución química además le confiere un margen de resistencia a la proliferación de hongos y bacterias, pero al mismo tiempo la hace vulnerable a los insectos, que pueden alimentarse de ella. Los grandes usos de la lana son obviamente textiles, son comunes las piezas de ropa para abrigarse del frío (guantes, bufandas, suéteres, etc.), así como las mantas, colchas y alfombras. Es un material usado como relleno de almohadas, asientos y tapicerías. Otro uso de la lana es como aislante en pianos, maquinaria pesada o como absorbente de olores y sonidos (Vilchez, S. 2005).

### **1.3.8 Proceso de obtención de la lana.**

La obtención de la lana atraviesa distintos procesos, que son:

Esquila: Una vez por año se reúne a los animales lanudos y se les poda, sin hacerles daño, reuniendo la lana cruda. Hay dos métodos para hacerlo: el criollo o maneado, atando al animal, o el australiano, con el animal suelto.

Lavado: La lana cruda está usualmente sucia y debe ser lavada industrialmente, eliminándole el polvo, arena y demás impurezas (restos vegetales, insectos, etc.). Para ello se usa agua fría y caliente.

Escarmenado: La lana se estira durante su escarmenado, separando manualmente las fibras sin cortarlas.

Hilado: Empleando métodos industriales o tradicionales, se tuercen las fibras de lana para formar un hilo grueso. Con éste se fabrican las piezas de ropa o de lo que se desee.

Teñido: Se emplean colorantes naturales o artificiales para darle a la lana sus colores deseados.

### **1.3.9 Desecho de Lana Animal en el mortero.**

En 2016 se examinó la influencia de las fibras de lana de oveja y las cenizas volantes en la resistencia a la compresión y a la tracción del concreto probando siete tipos de mezclas, con y sin la adición de cenizas volantes y de dos porcentajes (0.35% y 0.80% en peso) de fibras de lana (con una longitud comprendida entre 25 mm y 55 mm). Esta adición no mejoró las propiedades mecánicas del mortero, en los casos estudiados (Grădinaru C. et al. 2016). (2017) investigaron la incorporación del 1% en volumen de fibras de lana de oveja como refuerzo en morteros. Como resultado se mejoró la resistencia a la flexión y la tenacidad a la fractura en flexión aumentando un 18% y 300%, respectivamente. Fiore V et al. (2019) adicionaron lana animal en 13%, 23% y 46% en peso de cemento. La resistencia a la compresión fue menor en los compuestos reforzados con lana animal, en comparación a los de referencia independientemente del contenido y la longitud de las fibras. De Fazio y Feo (2017) presentaron conclusiones similares. En su investigación, la adición de fibras de lana de oveja fue mucho menor, 2%, 5% y 7% por masa de materia prima seca. Como resultado, se redujo la resistencia a la flexión y a la compresión del 9.1% y el 14.7%, respectivamente.

Alyousef R. et al. (2019) reveló que las fibras de lana de oveja (hasta un 1.5% de fibras de 70 mm de longitud) pueden reducir la resistencia a la compresión del concreto en un 30.7%, pero sin duda mejoran la resistencia a tracción y flexión en un 20.8%, así como la ductilidad del concreto (con mayor capacidad de absorción de energía). Maia, Veiga y de Brito (2019) elaboraron morteros a base de cemento con un 20% de fibras de lana con longitud no mayor a 30 mm y reveló un aumento del 40% y 26% en la resistencia a la flexión y compresión, respectivamente. Además, el mortero obtuvo una disminución similar del 20% del módulo de elasticidad en comparación con el mortero de control y el

incremento a la tenacidad fue mayor cuando se incorporaron fibras más largas, comprobando que la lana animal mantiene las propiedades mecánicas del compuesto base cemento.

#### **1.4 DURABILIDAD DEL MORTERO.**

La durabilidad se define como: «...la capacidad para resistir la acción de la meteorización, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Un concreto durable conservará su forma, calidad y serviciabilidad originales al estar expuesto a su ambiente.» (Araya J, 2012). Se puede decir que, en función del origen del proceso de deterioro, logramos hacer una clasificación de las causas que producen deterioro en el concreto en función de si el daño es de origen físico o químico. Cabe señalar que ambas causas están interconectadas y actúan simultáneamente.

##### **1.4.1 Causas del deterioro del concreto.**

El concreto es un material vulnerable a varios agentes agresivos, por eso debe tomarse en cuenta el ambiente al que será expuesto. El deterioro del concreto puede deberse al comportamiento de sus componentes, tanto el agregado, como la pasta de cemento y las causas de deterioro pueden ser físicas o químicas. Para que se produzcan la mayoría de los procesos físicos y químicos, que puedan beneficiar o perjudicar el concreto se necesita agua (Araya J, 2012). Los materiales de buena calidad, con un buen procesamiento y composición adecuada son de vital importancia para lograr un concreto durable que resista los efectos perjudiciales del agua, soluciones agresivas y elevadas temperaturas.

La impermeabilidad es una de las principales propiedades que beneficia al concreto y su durabilidad. Casi cualquier estructura está en contacto con el suelo, aguas o intemperie, ambientes que contienen sustancias solubles que pueden perjudicar el concreto, estos penetran la red de poros internos y fisuras del concreto para dañar la estructura.

##### **1.4.2 Deterioro del concreto y mortero por ataque físico.**

Las causas físicas del deterioro del concreto pueden ser por estos factores; por desgaste superficial ya sea por abrasión, erosión o cavitación, por agrietamiento causado por cambios de volumen, por una carga estructural o por exposición a temperaturas extremas. El deterioro por desgaste superficial del concreto debido a la pérdida progresiva de masa por abrasión proceso de desgaste por rozamiento en seco, la fricción provoca la erosión superficial del material y la cavitación pérdida de masa por la formación de burbujas debido al cambio repentino de un fluido (Araya J, 2012).

El deterioro por fisuración procedente de los ciclos hielo-deshielo (congelamiento – descongelamiento) se debe a la presión hidrostática que ejerce el agua de los poros al pasar del estado líquido al estado sólido. El agua experimenta una dilatación del 9% en volumen al cambiar de estado. La presión depende de la permeabilidad del material, de la velocidad a la que se forma el hielo y de la distancia entre los poros de aire. El efecto que produce es de fisuración interna o descascarillamiento superficial del material (Al- Assadi G, 2009).

El efecto de la exposición al fuego y su deterioro depende del grado de hidratación y del estado de humedad de la pasta. Pese a que el concreto tiene una mejor respuesta que el acero, una exposición prolongada a temperaturas superiores a 1000 °C puede agotar la capacidad portante del material llegando a ocasionar un colapso. Esto es porque a 1000 °C se han descompuesto todos los SCH (Silicato de Calcio Hidratado) responsables del aporte de resistencia al material (Mendoza H, 2011).

### **1.4.3 Deterioro del concreto por ataque químico.**

La mayoría de los procesos químicos que influyen en la durabilidad de las estructuras de concreto están asociados a procesos de transporte a través de poros y grietas. Las circunstancias bajo las cuales el concreto es atacado por agentes químicos sólidos son prácticamente nulas. Los agentes químicos agresivos suelen estar disueltos siendo el agua el medio de transporte para los mismos. Los mecanismos de transporte pueden ser de difusión, capilaridad, permeabilidad, migración o convección, mediante estos mecanismos se rompe la pasividad del concreto.

El deterioro del concreto por ataque químico puede darse por tres tipos de reacciones: reacciones de intercambio entre el agente agresivo y la pasta de cemento, reacciones de hidrólisis y lixiviado de los componentes de la pasta de cemento y reacciones con formación de productos expansivos (incrementando esfuerzos internos). Estos ataques pueden generar: pérdida de alcalinidad, pérdida de masa, incremento del deterioro, pérdida de resistencia y rigidez, agrietamiento, descascarillamiento y deformación (Mehta P y Monteiro P, 2008).

#### **1.4.3.1 Reacciones de intercambio entre el agente agresivo y la pasta de cemento**

Hay disoluciones que contienen sales y las disoluciones ácidas. La formación de sales solubles de calcio se debe a soluciones ácidas que contienen aniones que forman sales solubles de calcio. El intercambio de cationes de las soluciones ácidas con la pasta de cemento, dan lugar a sales solubles de

calcio tales como el cloruro de calcio, el acetato de calcio y el bicarbonato de calcio, que son removidas por medio de lixiviación.

La exposición al agua de mar constituye un tipo de exposición particular por su elevado contenido en iones de cloro, sodio y sulfato. Las principales consecuencias del contacto directo con estas sales son el ataque químico al concreto por la presencia de sulfatos y la corrosión del acero por el alto contenido en cloruros. Este ataque puede reducirse mediante el uso de concretos con Aluminato Tricálcico ( $C_3A$ ) del 10%.

Los ácidos sulfúrico, oxálico, fosfórico y los ácidos orgánicos pueden reaccionar con el CH (Hidróxido de calcio) produciendo sales de calcio solubles al agua que son lixiviadas por soluciones acuosas. Un ejemplo particular es la carbonatación, se produce cuando hay elevadas concentraciones de  $CO_2$  en medios urbanos e industriales con humedad relativa del 50-70%. El  $CO_2$  absorbido por la lluvia ingresa en concretos porosos y permeables formando ácido carbónico, que reacciona con el CH provocando una contracción volumétrica (Mehta P y Monteiro P, 2008).

La carbonatación también puede producirse durante la molienda y/o el almacenamiento del cemento. Pasado el tiempo destruye el gel SCH mediante la formación de sílice hidratada, las principales consecuencias de la carbonatación del concreto son la reducción de la alcalinidad de la pasta, el incremento de la porosidad, la despasivación y corrosión del acero en concretos armados, la reducción de las resistencias y la disminución de su durabilidad (Taylor, 1997).

#### **1.4.3.2 Reacciones de hidrólisis y lixiviado**

El agua pura de la condensación de la niebla o vapor de agua y el agua suave de la lluvia o del deshielo y la nieve, pueden contener pocos iones de calcio y al estar en contacto con la pasta de cemento Portland, tiende a hidrolizar o disolver los productos que contienen calcio, proceso que termina al alcanzar el equilibrio químico, mismo que en aguas que fluyen no se alcanza y la hidrólisis continua. La portlandita es la fase más soluble en aguas puras. Su disolución y/o lixiviación produce el incremento de la porosidad, la disminución de las resistencias y la formación de eflorescencias. El incremento de la porosidad y la permeabilidad puede producir a su vez pérdida de alcalinidad, pérdida de masa, incremento de los procesos de deterioro o pérdida de la resistencia y de la rigidez (Taylor, 1997).

### 1.4.3.3 Reacciones con formación de productos expansivos

Las consecuencias del incremento de la tensión interna por la formación de productos expansivos son la fisuración por laminación, la deformación o la pérdida de resistencia. Las causas que pueden originar este deterioro son el ataque por sulfatos, las reacciones árido-álcali, la hidratación del CaO y del MgO o la corrosión del acero en el concreto.

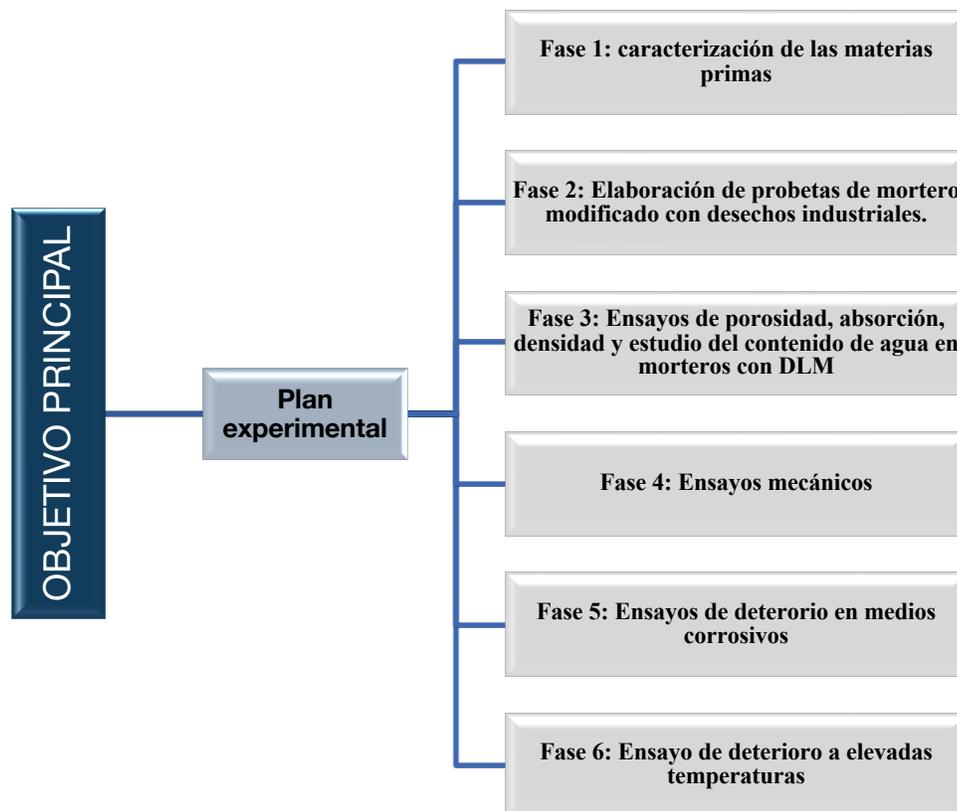
El ataque por ácido sulfúrico supone una combinación de procesos físicos y químicos que implican la formación de etringita en el material expuesto. La etringita puede generar un aumento de volumen en el interior del sólido con la consiguiente fisuración, mientras que el yeso puede provocar ablandamiento y pérdida de resistencia del concreto. Se pueden distinguir tres tipos de etringita en función del origen de su formación (Skalny J. et al. 1996):

- I. **Etringita primaria:** producto de la reacción de hidratación del cemento Portland. Presenta una distribución homogénea y se genera en cuestión de horas cuando el cemento está aún en estado plástico. Este tipo de etringita no produce expansión.
- II. **Etringita secundaria:** aparece en concretos endurecidos y húmedos tras un tiempo suficiente. La etringita se disuelve y cristaliza en espacios disponibles. No produce expansión.
- III. **Etringita retrasada:** Se produce de forma heterogénea y al cabo de meses o incluso años de exposición al agua o a condiciones húmedas. La expansión asociada produce grietas y pérdidas de material ya que aparece en un concreto endurecido. Su procedencia puede ser por ataque interno o externo de sulfatos.

En el ataque por sulfatos interno, los constituyentes para el ataque están presentes en la muestra al colocarla. La fuente de los sulfatos suele ser el árido que en ocasiones introduce yeso contaminante. Como consecuencia, se forma etringita retrasada y se evidencia por la ausencia de una fuente externa de sulfatos, una historia de curado a altas temperaturas, la presencia de huecos alrededor de los áridos y el tamaño de huecos similares al tamaño de las partículas.

## CAPÍTULO II. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

En este capítulo se describen los materiales y se caracterizan algunas propiedades físicas y químicas de los agregados. Se describe el plan experimental desarrollado para la elaboración de probetas de mortero tradicional y morteros con sustituto parcial o total de agregado fino (arena) por Desecho de Lana Mineral (DLM) o Desecho de Lana Animal (DLA) como fibras de refuerzo en la mezcla, además de explicar los ensayos físicos (porosidad, densidad, absorción), mecánicos (resistencia a compresión y flexión) y de durabilidad (deterioro en medio ácido y elevadas temperaturas) a los que fueron sometidos los morteros modificados y los tradicionales para un análisis comparativo.



*Fig. 6. Esquema y fases del plan experimental.*

### 2.1 MATERIAS PRIMAS PARA LA ELABORACIÓN DE MORTEROS

Los materiales tradicionales para la elaboración de morteros son: cemento Portland como aglomerante, arena como agregado fino y agua. Aunque muchas investigaciones han utilizado

materiales reciclados de la industria como alternativas para la sustitución de agregados naturales en los morteros base cemento. Por lo tanto, en esta investigación se usaron dos desechos industriales: lana mineral y lana animal como sustituto del agregado fino (arena). A continuación, se describen los materiales empleados en esta investigación.

**A. CEMENTO PORTLAND.** Se usó Cemento Portland Ordinario CPO Tipo I 30R de mayor uso en México. Cumple con las especificaciones de la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE (2004) y se clasifica conforme a la norma ASTM C150/C150M-16 (2016) como Tipo I, siendo de los más usados en el sector de la construcción.

**B. ARENA DE RÍO.** La arena de río usada en el estudio cumple con lo requerido por las normas ASTM C109 (2008) y NMX-C-061-ONNCCE (2004) y con la granulometría exigida en la norma ASTM C778 (2013), para ser considerada como arena estándar bien graduada. La arena de río es la más usada en el sector de la construcción ya que por su origen, presenta bajos contenidos de arcillas y limos y por su alto contenido de sílice, tiene una muy buena resistencia mecánica y al desgaste. Los componentes principales de la arena son un 72 % óxido de silicio y de un 15 % de óxido de aluminio y otros compuestos (Pérez, O. 2017).

*Tabla 3. Granulometría de la arena bien graduada de acuerdo a las normas ASTM C778 (2013) y NMX-C-061-ONNCCE (2004), para uso en morteros base cemento.*

#	Tamiz	% que Pasa	
	Abertura (µm)	Límite Inferior	Límite Superior
16	1180	100%	100%
30	600	96%	100%
40	425	65%	75%
50	300	20%	30%
100	150	0%	4%

**C. DESECHO DE LANA MINERAL (DLM).** Se usó DLM como sustituto del agregado fino (arena), proveniente de la industria productora de aislantes térmicos ubicada en San Luis Potosí, México. El material fue previamente triturado y la granulometría reveló que contiene un porcentaje despreciable de partículas mayores a las establecidas por los límites en la norma ASTM C778 (2013).

**D. DESECHO DE LANA ANIMAL (DLA).** El Desecho de Lana Animal (DLA) (Fig. 7) utilizado en esta investigación proviene de la industria textil identificada como orilla de cardado y será adicionado como fibra de refuerzo a la mezcla de mortero base cemento. Este material es esponjoso, parecido al algodón, por lo que se corta con tijeras hasta lograr una longitud de fibra no mayor de 10 mm. En la Tabla 4 se aprecia la composición química promedio de la lana de ovino (Korjenic A. et al. 2015).



*Fig. 7. Desecho de Lana Animal previamente cortado.*

*Tabla 4. Composición química promedio de lana de ovino (Korjenic A. et al. 2015).*

Elemento	C	H	O	N	S
%	50	7	22-25	16-17	03-04

**E. AGUA POTABLE.** Se usó agua del grifo para la elaboración de los morteros, proveniente de la red de acueductos municipales. El aspecto de esta agua es transparente, no se observan partículas flotantes, ni olor, color ni sabor según la norma ASTM C 94/C 94M (2004).

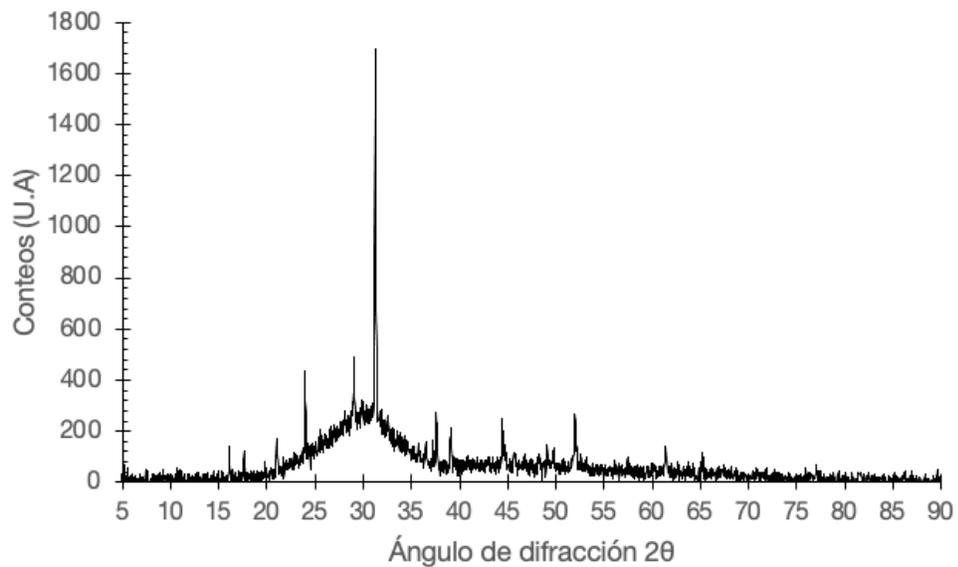
## 2.2 TÉCNICAS Y MÉTODOS USADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.

### 2.2.1 Análisis de los agregados (arena, DLM y DLA) mediante difracción de rayos X.

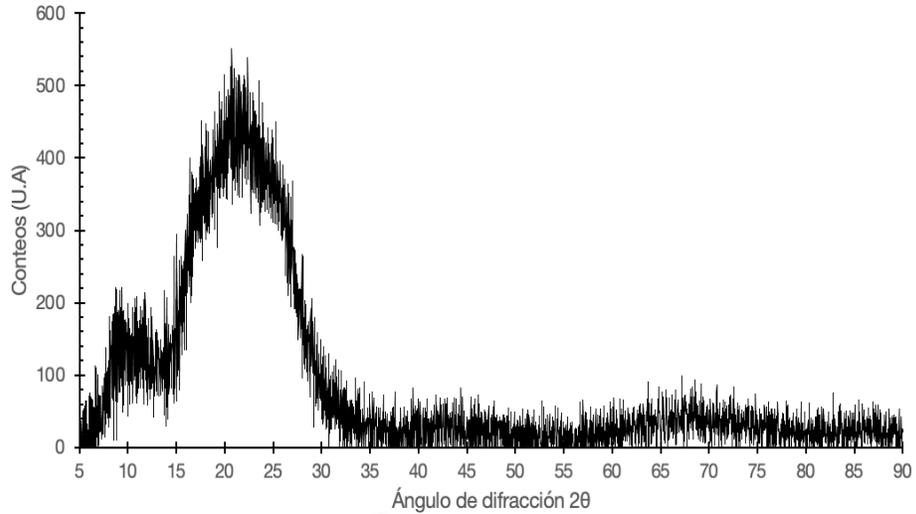
El ensayo de Difracción de Rayos X (XRD) determinó las fases cristalinas presentes en los materiales estudiados y estimó la concentración de las mismas. El ensayo se lleva a cabo haciendo incidir un haz de rayos X (onda electromagnética cuya longitud es de 1.5418 Angstroms, ya que se usa

un tubo de rayos X cuyo ánodo es de cobre) sobre la muestra y registrando la radiación difractada. Se realizó con un equipo BRUKER modelo D8 ADVANCE con un barrido a una velocidad de  $3.5^\circ$  por minuto, un tamaño de paso de  $0.02^\circ$ . El intervalo para el ángulo  $2\theta$  fue de  $5$  a  $90^\circ$  y la fuente de poder del difractor se fijó a  $36$  KV y  $30$  mA.

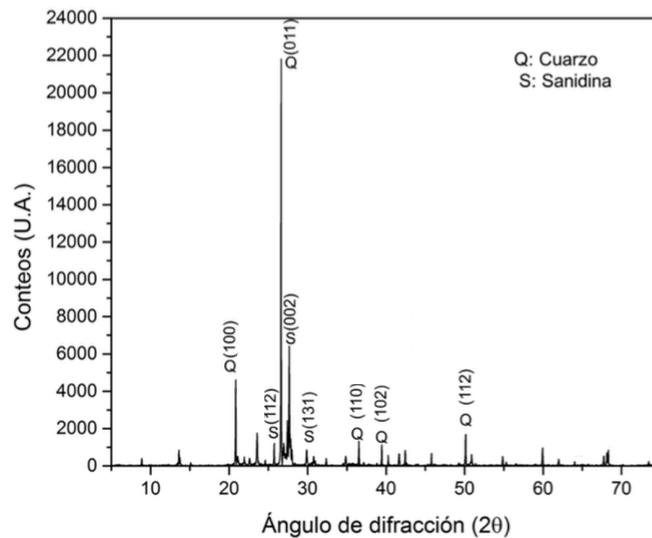
En las Fig. 8 y 9 se puede apreciar los difractogramas para el Desecho de Lana Mineral (DLM) y para el Desecho de Lana Animal (DLA) respectivamente, ambos resultados presentan un pico de anchura de entre los  $5$  a los  $40^\circ$  para el ángulo de difracción  $2\theta$ , característicos de materiales amorfos. Por su parte, en la Fig. 10 muestra el resultado de difracción de Rayos X obtenidos para la arena. En este difractograma se aprecian picos bien definidos característicos de un material cristalino. Se observan la fases que corresponden principalmente a la fase cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y la fase sanidina  $[(\text{K},\text{Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8]$  (Tobler D. et al. 2008).



*Fig. 8. Difractograma de rayos X del DLM.*



*Fig. 9. Difractograma de rayos X del DLA.*



*Fig. 10. Difractograma de rayos X para la arena.*

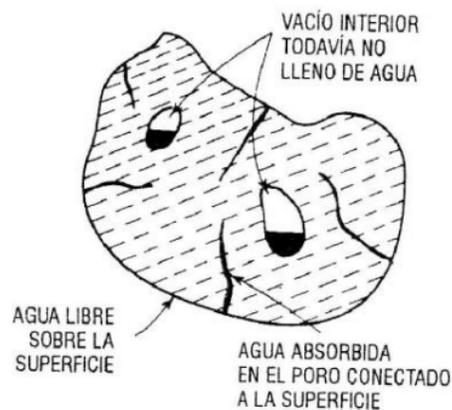
### 2.2.2 Análisis granulométrico de la arena y el Desecho de Lana Mineral (DLM).

El ensayo para determinar la granulometría de la arena y del desecho de lana mineral (DLM) materiales usados en esta investigación, se realizó siguiendo el método de tamizado de acuerdo a la norma ASTM C136 (2006) y consiste en una serie de tamices en orden decreciente según el tamaño de abertura en las mallas y agitando mecánicamente la muestra durante un tiempo determinado, posteriormente el árido queda retenido en las mallas de diferentes tamaños; de esta manera se obtiene la distribución de tamaño de partícula. Se usó un tamizador mecánico TYLER RO – TAP modelo RX – 29 con un gabinete de caja de sonido R – 30050 para este ensayo. Para lograr el tamaño adecuado de

las muestras, la norma ASTM C702 (2003) indica el procedimiento para la reducción de tamaño del agregado.

### 2.2.3 Determinación de la densidad y absorción de los agregados finos arena y DLM.

Se determinó la densidad, la gravedad específica y la absorción tanto de la arena como del DLM, mediante el método de prueba estándar descrito en la norma ASTM C128 (2012). Para medir las características anteriores es importante entender que todos los agregados son porosos hasta cierto punto, lo que posibilita la entrada de agua en los espacios de los poros. Un agregado húmedo puede entonces tener agua tanto en su interior como en el exterior, como se muestra en la Fig. 11.



*Fig. 11. Partícula de agregado húmedo con la distribución de agua interior y exterior. Fuente: (Cañas, J, 2014).*

Se conoce como Absorción, al incremento en masa del agregado debido a la penetración de agua en los poros de las partículas, durante un período de tiempo prescrito, sin incluir el agua adherida en la superficie de las partículas, expresado como porcentaje de la masa seca.

La Densidad de un material se define, como la masa por unidad de volumen de un material, expresada en  $\text{kg/m}^3$  ( $\text{lb/pe}^3$ ). En los agregados se pueden obtener distintos valores, en función de la condición en que la masa se esté considerando en el cálculo.

## 2.3 ELABORACIÓN DE MORTEROS BASE CEMENTO PARA LA FABRICACIÓN DE PROBETAS.

En esta investigación se emplearon Desecho de Lana Mineral (DLM) y Desecho de Lana Animal (DLA) como sustitutos del agregado fino (arena) en la elaboración de morteros base cemento.

Se fabricaron morteros de referencia, morteros modificados con DLM y morteros modificados con DLA, todos con una dosificación cemento/agregado fino/agua de 1/3/0.5 respectivamente como se muestra en la Fig. 12, consistencia y mezcla del mortero estándar descritos en las normas ASTM C109 (2008) y NMX-C-061-ONNCCE (2004).

Estos morteros fueron usados para la fabricación de dos diferentes tipos de probetas: cúbicas de 50 mm (Fig. 13) conforme a las normas ASTM C109 (2008) y NMX-C-061-ONNCCE (2004) para ensayos a compresión y prismáticas de 40x40x160 mm (Fig. 13) conforme a la norma ASTM C348 (2008) para ensayos a flexión. Se curaron en agua saturada con cal (para prevenir la lixiviación de los Hidróxidos de Calcio en el mortero) todas las probetas durante 28 días tiempo en que los morteros de cemento Portland alcanzan más del 90% de su resistencia. Se fabricó un lote por triplicado para cada ensayo con el fin de obtener resultados más fiables. Se elaboraron un total de 78 probetas cúbicas y 27 probetas rectangulares para los diferentes análisis.

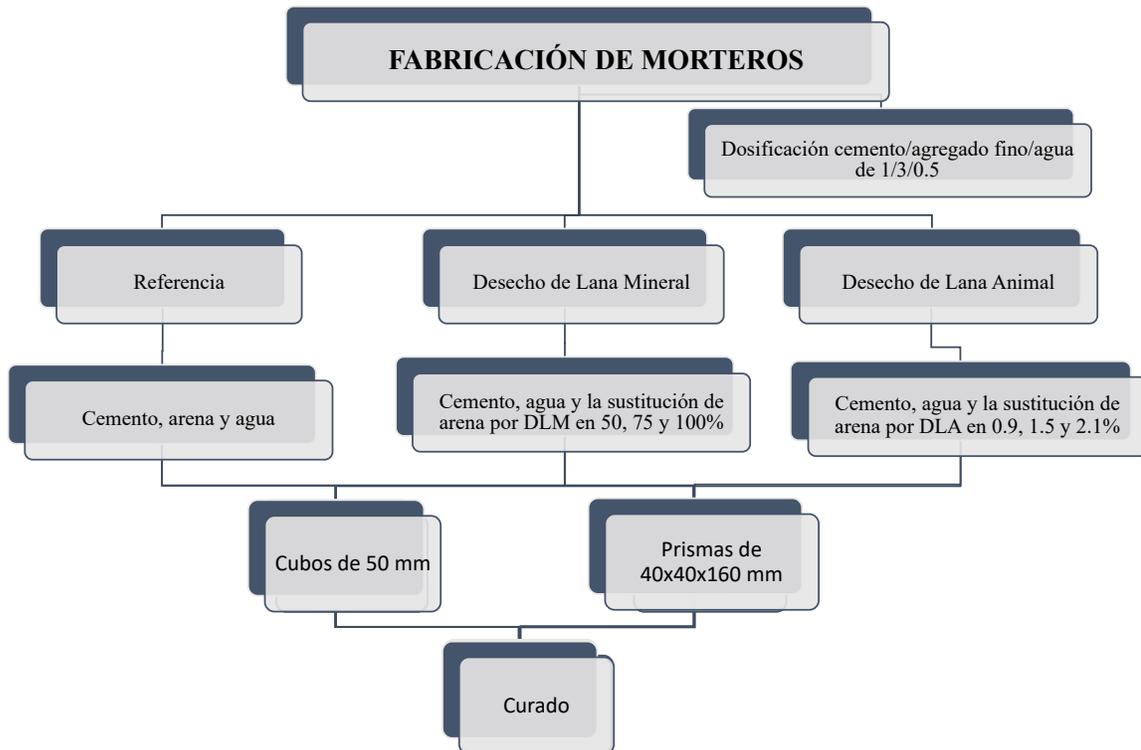
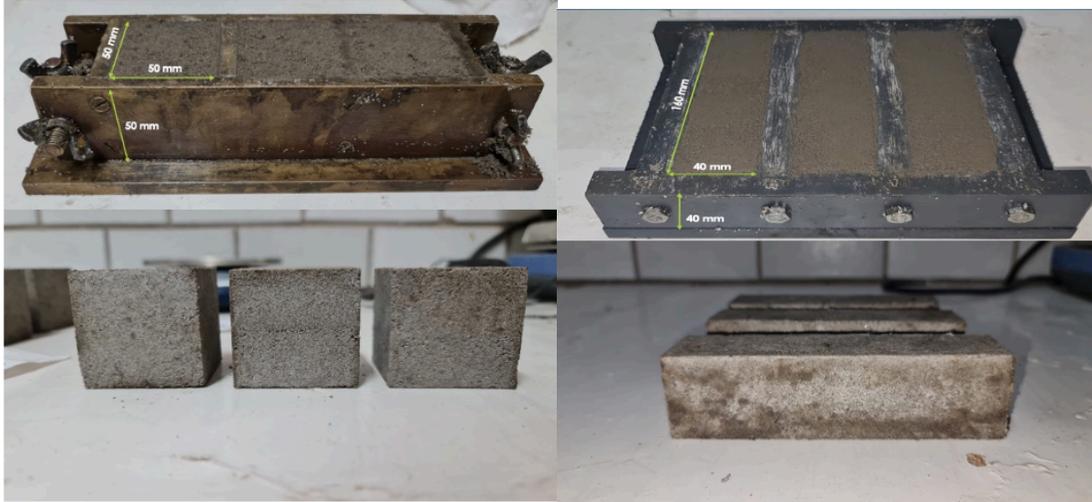


Fig. 12. Proceso de fabricación de los morteros.



*Fig. 13. Moldes y probetas para ensayo de compresión con sección cubica de 50 mm y para ensayo a la flexión con sección de 40x40x160 mm*

### **2.3.1 Elaboración de probetas de mortero de referencia y modificadas con Desecho de Lana Mineral (DLM) y Desecho de Lana Animal (DLA).**

En la Tabla 5 y Tabla 6 se pueden observar las dosificaciones empleadas para la elaboración de probetas de mortero base cemento, tanto para probetas cúbicas como para probetas rectangulares. Los morteros preparados fueron: morteros de referencia, morteros modificados con la sustitución del agregado fino (arena) por DLM y morteros modificados con la sustitución de la arena por DLA.

En las Tablas que se muestran a continuación se observa: en la primera columna el número de la mezcla, seguido del nombre de la mezcla empezando por el tipo de agregado, el porcentaje de sustitución de agregado fino (arena por DLM o DLA) y la nomenclatura para el tipo de análisis al que será sometido “C” para compresión y “F” para flexión. Después se observan en las dos columnas siguientes el porcentaje de arena que será sustituida por el DLM y el DLA. En la siguiente columna se indica la cantidad de material en gramos que será usado para la elaboración del mortero y en la última columna la relación agua/cemento. En las filas se puede observar el porcentaje de desecho que será sustituido en la mezcla, el nombre de las columnas y como primera mezcla tenemos la de referencia, seguido de las tres dosificaciones empleadas para sustituir a la arena por el DLM (50, 75 y 100 %) y por último las tres mezclas empleadas para sustituir a la arena por el DLA (0.9, 1.5 y 2.1 %).

*Tabla 5. Dosificaciones empleadas en la elaboración de morteros de referencia, de morteros modificados con DLM y de morteros modificado con DLA usados para la fabricación de probetas cúbicas de 50mm.*

# Mezcla	% de DESECHO		DLM, g	DLA, g	Arena, g	Cemento, g	Agua, g	a/c
	DLM	DLA						
1 REFERENCIA-C	0	0	0.0	0.0	250.0	83.3	41.7	0.5
2 DLM50%-C	50	0	125.0	0.0	125.0	83.3	41.7	0.5
3 DLM75%-C	75	0	187.5	0.0	62.5	83.3	41.7	0.5
4 DLM100%-C	100	0	250.0	0.0	0.0	83.3	41.7	0.5
5 DLA0.9%-C	0	0.9	0.0	3.0	247.0	83.3	41.7	0.5
6 DLA1.5%-C	0	1.5	0.0	5.0	245.0	83.3	41.7	0.5
7 DLA2.1%-C	0	2.1	0.0	7.0	243.0	83.3	41.7	0.5

*Tabla 6 Dosificaciones empleadas en la elaboración de morteros de referencia, de morteros modificados con DLM y de morteros modificado con DLA usados para la fabricación de probetas rectangulares de 40x40x160 mm.*

# Mezcla	% de DESECHO		DLM, g	DLA, g	Arena, g	Cemento, g	Agua, g	a/c
	DLM	DLA						
8 REFERENCIA-F	0	0	0.0	0.0	512.0	170.6	85.4	0.5
9 DLM50%-F	50	0	256.0	0.0	256.0	170.6	85.4	0.5
10 DLM75%-F	75	0	384.0	0.0	128.0	170.6	85.4	0.5
11 DLM100%-F	100	0	512.0	0.0	0.0	170.6	85.4	0.5
12 DLA0.9%-F	0	0.9	0.0	6.1	505.9	170.6	85.4	0.5
13 DLA1.5%-F	0	1.5	0.0	10.2	501.8	170.6	85.4	0.5
14 DLA2.1%-F	0	2.1	0.0	14.3	497.7	170.6	85.4	0.5

Las mezclas para la elaboración de morteros con la sustitución parcial o total de agregado fino (arena) por Desecho de Lana Mineral (DLM) se muestran en la Tabla 5, donde se observan las mezclas de referencia con su dosificación para probetas cúbicas (mezcla 1). Posteriormente se puede apreciar la sustitución parcial o total del agregado fino (arena) por Desecho de Lana Mineral en tres dosificaciones diferentes 50, 75 y 100% de sustitución (mezclas 2, 3 y 4 para probetas cúbicas). Mientras en la Tabla 6 se aprecian las dosificaciones para la elaboración de probetas rectangulares, en la Mezcla 8 se

encuentra la de referencia y las mezclas 9, 10 y 11 expresan los mismos porcentajes de sustitución de arena por DLM en 50, 75 y 100%.

Para las mezclas elaboradas con la sustitución parcial del agregado fino (arena) por Desecho de Lana Animal (DLA) se sustituyó el 0.9, 1.5 y 2.1 % en peso, correspondiente a 3, 5 y 7 g respectivamente para las mezclas 5, 6 y 7 para la elaboración de probetas cúbicas y para la elaboración de probetas rectangulares se encuentran las mezclas 12, 13 y 14 a las cuales se les sustituye el mismo porcentaje, correspondiente a 6.1, 10.2 y 14.3 g de sustitución en peso.

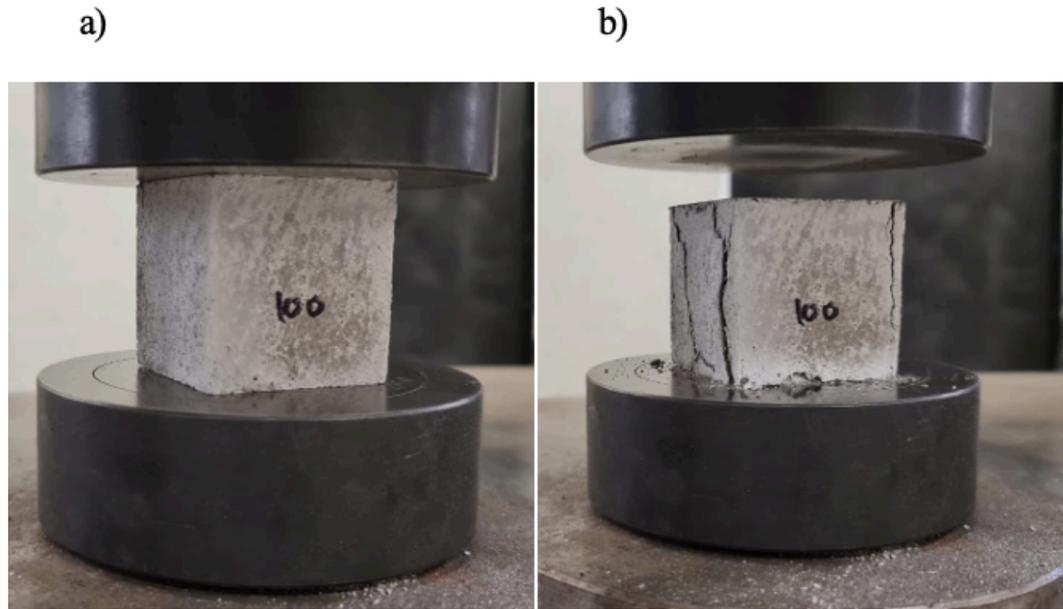
## **2.4 TÉCNICAS ANALÍTICAS EMPLEADAS PARA LA DETERMINACIÓN DEL EFECTO DEL DLM Y DLA EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MORTEROS BASE CEMENTO.**

### **2.4.1 Ensayos de porosidad, absorción y densidad del mortero**

La metodología usada para en el ensayo de porosidad, densidad y absorción de humedad de los morteros de referencia y los modificados con la sustitución del 100 % de arena por DLM y con la sustitución del 0.9 % de arena por DLA, se llevó a cabo mediante lo descrito en la norma ASTM C642 (2013). Se usaron probetas cúbicas de 50 mm para este ensayo y se obtuvieron la masa seca en horno, la masa saturada después de ser inmersa en agua, la masa saturada después de la ebullición y la masa aparente en inmersión.

### **2.4.2 Ensayo de resistencia a la compresión de morteros tradicionales y modificados con DLM y con DLA.**

Se empleó la metodología descrita en las normas ASTM C109 (2008) y NMX-C-061-ONNCCE (2004) para ensayos a compresión. Se usó una maquina universal SHIMADZU modelo UH-600kNI con capacidad de 600 KN (60 toneladas). La carga se aplicó a una velocidad de 2 mm/min, sobre las caras planas de las probetas que estuvieron en contacto con las paredes del molde, con el fin de que la carga se aplique uniformemente sobre el mortero. En la figura 14 a) se puede apreciar la probeta colocada sobre las placas planas de la maquina y las caras que estuvieron en contacto con el molde son las que están en contacto con las placas, mientras en la Fig. 14 b) se aprecia la misma probeta después de fallar por las cargas a las que fue sometida.



*Fig. 14. Prueba de compresión sobre probeta de mortero. A) Durante la Prueba y B) Posterior a la falla.*

Una vez obtenida la carga máxima de rotura, se calculó la resistencia a la compresión para cada una de las mezclas con la siguiente ecuación

$$f'c = \frac{P}{A} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

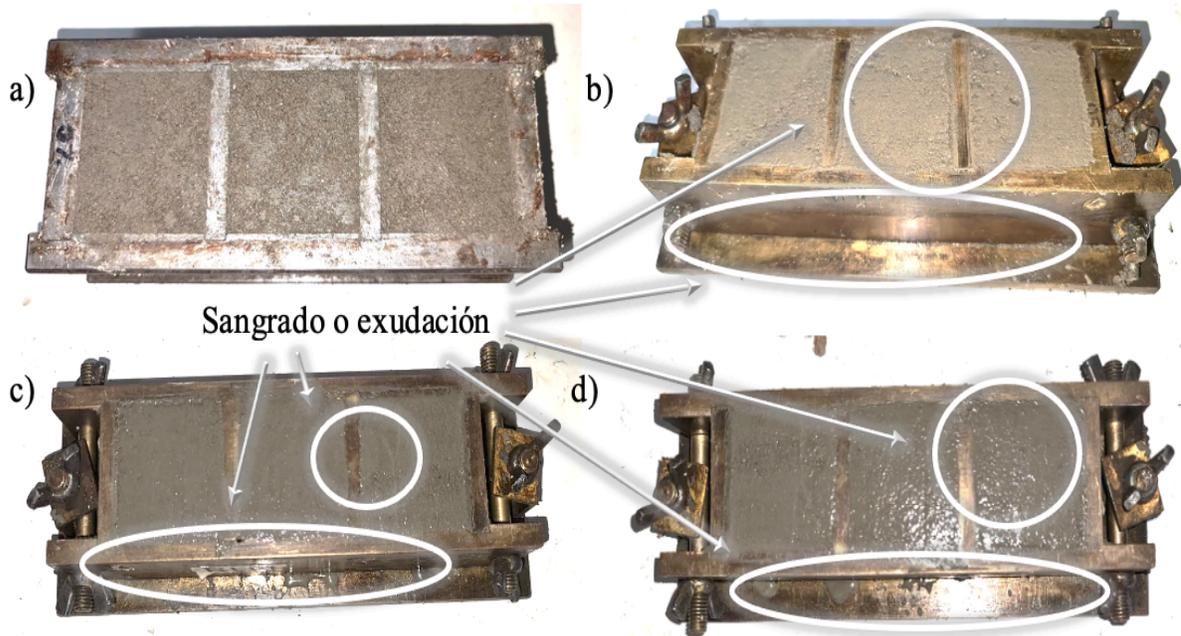
$f'c$  = es la resistencia a la compresión obtenida en megapascales (MPa).

$P$  = Es la carga máxima total en Newton (N)

$A$  = Es el área de la superficie de carga en  $mm^2$ .

Cabe destacar que de las probetas con mejor comportamiento mecánico se eligió una dosificación de cada mortero diferente, obteniendo tres mezclas diferentes para los posteriores ensayos; la de referencia y las que obtuvieron mejor resistencia mecánica a compresión de las modificadas con DLM y de las modificadas con DLA, quedándonos con una dosificación de cada tipo para la fabricación de probetas para los ensayos posteriores.

Se aprecia a diferencia de los morteros de referencia Fig. 15 a), que las mezclas de mortero mientras más contenido de DLM contienen, muestran tanto en su superficie como en la parte inferior del molde, una gran cantidad de agua que fue expulsada del interior de la mezcla a causa de la compactación, a este fenómeno se le conoce como sangrado o exudación y es una forma de segregación, en la cual una parte del agua de la mezcla tiende a elevarse a la superficie de un concreto recién colado y es provocado por el asentamiento de los materiales (Sanchez y Ruben, 2018).



**Fig. 15. Fenómeno de exudación o sangrado presente en morteros con DLM. a) mortero tradicional. b) Mortero con 50% de sustitución. c) mortero con 75% de sustitución. d) mortero con 100% de sustitución de agregado fino arena por DLM.**

Es posible que el fenómeno de sangrado esté relacionado con la cantidad de DLM en la mezcla, por ende, es un indicativo de que para altos porcentajes de sustitución de arena por DLM mayores al 50%, la cantidad de agua recomendada por las normas ASTM C109 (008) y NMX-061-ONNCCE (2004) para la preparación de morteros es elevada. Por lo cual se propone el estudio siguiente: preparar morteros con una disminución del 10 y del 20 % en el contenido de agua a morteros con 100% DLM como agregado fino, con el fin de observar el comportamiento mecánico en relación del agua/agregado fino (DLM).

Se observa en la Fig.16 que la mezcla de mortero con la sustitución de arena por DLA como fibra de refuerzo, presenta una consistencia menos fluida mientras aumenta la cantidad de sustitución

de arena, debido a la aparente falta de agua, misma que es absorbida por el DLA al ser un material higroscópico, la absorción de ésta agua puede promover que las reacciones de hidratación del cemento no se den correctamente y las partículas de cemento no cumplan con la función de aglomerante. Además, las partículas de DLA no se esparcen homogéneamente en la mezcla, al contrario, se aglomeran formando bolas de material fibroso (Fig. 16 a), lo cual dificultó la fluidez de la mezcla y el moldeo del mismo, incluso parte del DLA se adhirió al aspa del mezclador mecánico (Fig. 16 b).



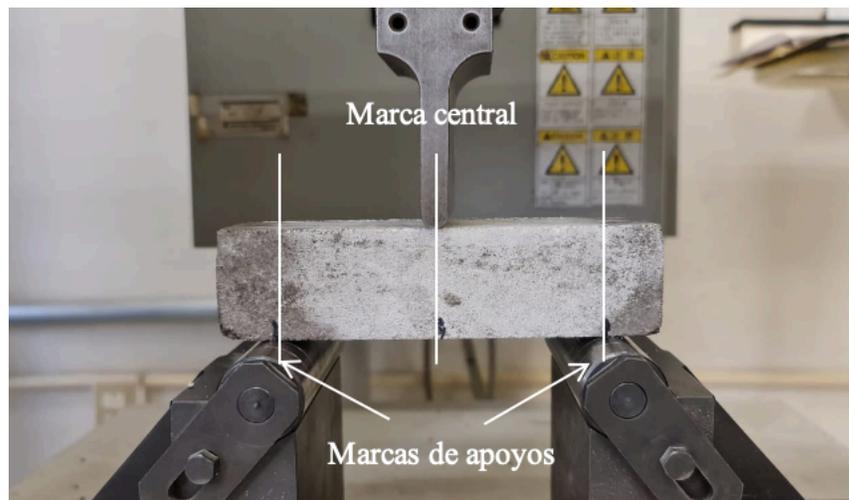
*Fig. 16. Mezcla de morteros con adición de DLA. a) DLA aglomerado en la mezcla. b) DLA adherido al aspa del mezclador mecánico.*

### 2.4.3 Estudio de morteros con diferentes dosificaciones agua/agregado fino-cemento

Una vez determinada la composición óptima de agua/agregado fino-cemento, se prepararon morteros modificados con la sustitución del agregado fino (arena) por el 100% de DLM, con una disminución en el contenido de agua del 10 y el 20 % a los establecidos en la Tabla 5 para la fabricación de probetas cúbicas de 50 mm para ser ensayadas a compresión conforme a la norma ASTM C109 (2008), con el fin de observar la fluidez de la mezcla, el fenómeno de sangrado que se presentó en el estudio previo y el comportamiento mecánico en relación con los morteros preparados con 100 % DLM (mezcla 4).

#### 2.4.4 Ensayo de Flexión.

Para determinar la resistencia a la flexión a tres puntos, se hizo de acuerdo a la norma ASTM C348 (2008), se ensayaron probetas de tres tipos diferentes de morteros base cemento: los de referencia (Mezcla 8), morteros modificados con 100% de sustitución de arena por DLM (Mezcla 11) y con la sustitución del 0.9% de DLA en volumen de probeta (Mezcla 12). Para el ensayo, los especímenes fueron sacados del agua después de 28 días de curado y secados superficialmente con una toalla, después se marcaron unas líneas perpendiculares a las caras de mayor longitud, una central a 80 mm de cualquier extremo indicando el punto de aplicación de la carga y otras líneas a 20 mm de distancia de cada extremo del espécimen donde se ubican los puntos de apoyo. Los puntos de apoyo son rodillos a 120 mm de separación como se aprecia en la Fig. 17.



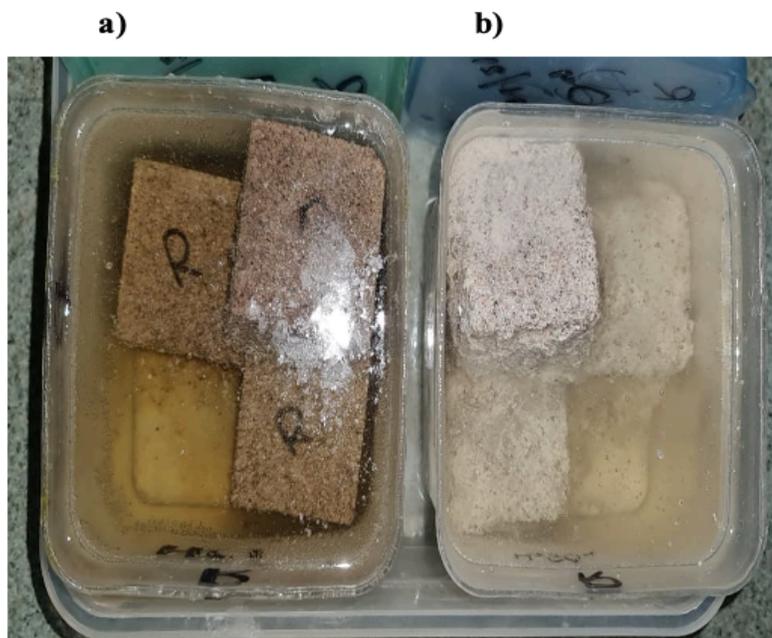
*Fig. 17. Ensayo a Flexión a tres puntos según la norma ASTM C348 (2008).*

En esta prueba se usó una máquina universal SHIMADZU modelo AG-100KNI con capacidad máxima de 100 KN (10 toneladas), la carga se aplicó a una velocidad de 2 mm/min, cuidando que la probeta esté paralela a la superficie de carga, que la carga se aplique perpendicularmente a la marca central de la probeta y que los apoyos estén correctamente posicionados bajo las marcas que les corresponden.

#### 2.4.5 Ensayo de deterioro de morteros en un medio ácido.

Se usaron probetas de mortero cúbicas, para analizar el deterioro de los morteros de referencia (Mezcla 1) y morteros modificados con 100% de sustitución de arena por DLM (Mezcla 4) y

adicionados con 0.9% de DLA en volumen de probeta (Mezcla 5), estas fueron expuestas a dos medios corrosivos por separado; ácido clorhídrico (HCl) según la norma ASTM C 267 (2006) y ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) según la norma ASTM C1012 (2009). La metodología se resume a continuación, ambos medios de prueba se prepararon a una concentración de 50 ml/l, los especímenes fueron curados previamente y fueron inmersos completamente en los medios ácidos, cuidando que las caras de las probetas, no estuvieran en contacto con las paredes del recipiente, ni las caras de otro espécimen. Cabe destacar que antes y después de dicha inmersión las probetas a ensayar se secan en horno a  $105 \pm 5$  °C, con el fin de tomar el peso y obtener la pérdida de peso de los especímenes. Las probetas permanecieron sumergidas por un lapso de 7 días, como se observa en la Fig. 18 donde los morteros de referencia (Mezcla 4) se encuentra inmersos en los ácidos; en la Fig. 18 a) en ácido clorhídrico y en la Fig. 18 b) en ácido sulfúrico. Posteriormente se retiraron del medio, se enjuagaron, se secaron en horno y se pesaron. Finalmente se determinó la pérdida de peso, se observó la apariencia del medio de prueba y se analizó la resistencia mecánica a la compresión de acuerdo a la norma ASTM C109 (2008) y NMX-C-061-ONNCCE (2004).



*Fig. 18. Probetas de referencia inmersas en medios ácidos a) ácido clorhídrico ASTM C267 b) ácido sulfúrico ASTM C1012.*

#### 2.4.6 Ensayo de deterioro a temperaturas elevadas de morteros tradicionales y modificados con DLM y DLA.

Se utilizaron probetas cúbicas y probetas rectangulares para determinar el comportamiento del mortero base cemento de referencia (Mezcla 1 y 8) y morteros modificados con 100% DLM (Mezclas 4 y 11) y los modificados con 0.9 % de DLA (Mezclas 5 y 12) ante dos temperaturas: 400 °C y 700 °C, ambos estudios se realizaron por separado.

Se sometieron tres probetas de cada tipo a la temperatura de 400 °C durante un tiempo de 2 horas, dentro de una mufla como se observa en la Fig. 19, conforme a lo reportado por Robayo (2013). Después de ser expuestas a dicha temperatura se procede a retirarlas y dejarlas enfriar a temperatura ambiente para su posterior ensayo a compresión conforme a la norma ASTM C109 (2008) y a flexión conforme a lo descrito en la norma ASTM C348 (2008). Se repite el mismo procedimiento para la temperatura de 700 °C, con el fin de evaluar la pérdida de resistencia a compresión y flexión provocada por la calcinación de materiales en la matriz del mortero base cemento.



*Fig. 19. Probetas en mufla para ensayo a elevadas temperaturas.*

**CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA SUSTITUCIÓN DEL AGREGADO FINO POR DESECHOS DE LANAS INDUSTRIALES EN MORTEROS BASE CEMENTO.**

En este capítulo se aportan e interpretan de manera estructurada los resultados obtenidos de las técnicas analíticas empleadas para evaluar el efecto de la adición del Desecho de Lana Mineral (DLM) y el Desecho de Lana Animal (DLA) como sustituto parcial o total del agregado fino (arena) en morteros base cemento. Se analizan los resultados y se discuten los posibles factores que influyen en las propiedades físicas y mecánicas de los morteros de referencia y los morteros modificados, además se analiza el deterioro de los morteros en ambientes ácidos y a elevadas temperaturas. Se comparan los resultados entre los morteros de referencia y los morteros modificados con desechos industriales.

**3.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS.**

En esta sección se presenta la caracterización de los materiales utilizados para la elaboración de morteros base cemento tradicionales y modificados con el DLM y con el DLA, con la finalidad de tener un mejor conocimiento y sobre su influencia en los morteros analizados. Los materiales fueron cemento como aglomerante, agua como hidratante y arena de río como agregado fino natural, además del DLM y el DLA como agregados finos sustitutos o alternativos.

**3.1.1 Distribución de tamaño de partícula del agregado fino natural (arena) y el agregado sustituto Desecho de Lana Mineral (DLM).**

En las Fig. 20 y Fig.21, se muestran respectivamente las curvas granulométricas del agregado fino natural (arena) y del agregado fino sustituto (DLM), utilizado en la fabricación de morteros para esta investigación. El análisis granulométrico de la arena (Fig. 20), cumple con los criterios requeridos en la norma ASTM C778 (2013) y se puede observar en la curva de la arena denotada por una línea continua, misma que se ajusta a los límites descritos por la misma.

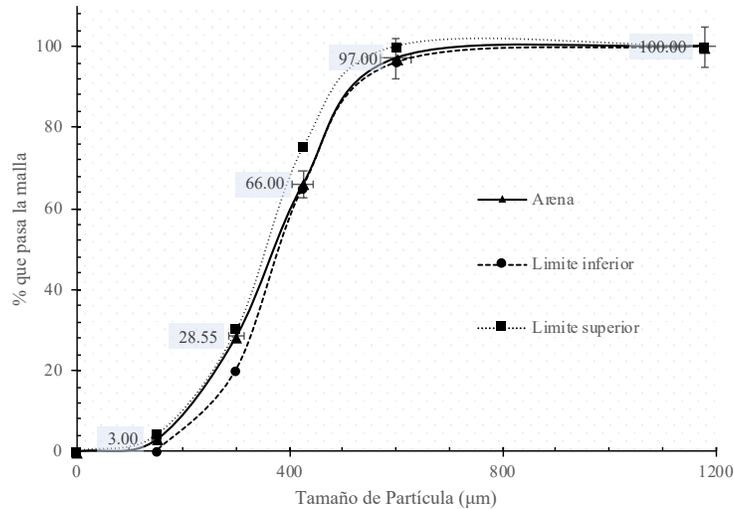


Fig. 20. Granulometría de la arena y límites establecidos por la norma ASTM C778 para la arena estándar.

En la Tabla 7 se puede observar el porcentaje de la distribución de tamaños de partículas tanto de la arena bien graduada, como la del DLM expresados en porcentaje en peso que pasa el tamiz según la norma ASTM C136 (2006), se observa que la diferencia más marcada se encuentra en las partículas entre 425 a 600 µm en donde la arena tiene un 20% más de partículas, pero en las partículas que están entre 600 a 1180 µm el DLM contiene casi un 8% más, por esta razón se puede decir que ambos materiales presentan una similitud aproximada del 80%. El exceso de finos contenidos en la composición del DLM puede ser benéfico para los morteros, ya que la función de estos es llenar los espacios generados por las partículas de mayor tamaño, pudiendo así beneficiar la compactación y densidad del compuesto según Lin W. et al. (2013). Por esta razón, se decidió utilizar la porción del material con tamaños inferiores a las 1180 µm.

Tabla 7. Distribución de tamaño de partícula de la arena y del DLM.

	Tamaño de Partícula				
	< a 150 (µm)	150 - 300 (µm)	300 - 425 (µm)	425 - 600 (µm)	600 - 1180 (µm)
% de arena en peso	3	25.6	37.4	31	3
% de DLM en peso	7.2	26.2	44.5	11.3	10.8

En la Fig. 21 se puede ver la curva granulométrica del DLM denotada con una línea continua, la cual se desfasa de los límites establecidos por la norma ASTM C778 (2013), esto pasa al llegar a los tamaños superiores a las 400  $\mu\text{m}$ , mientras que a tamaños inferiores la curva permanece muy similar al límite superior de la norma.

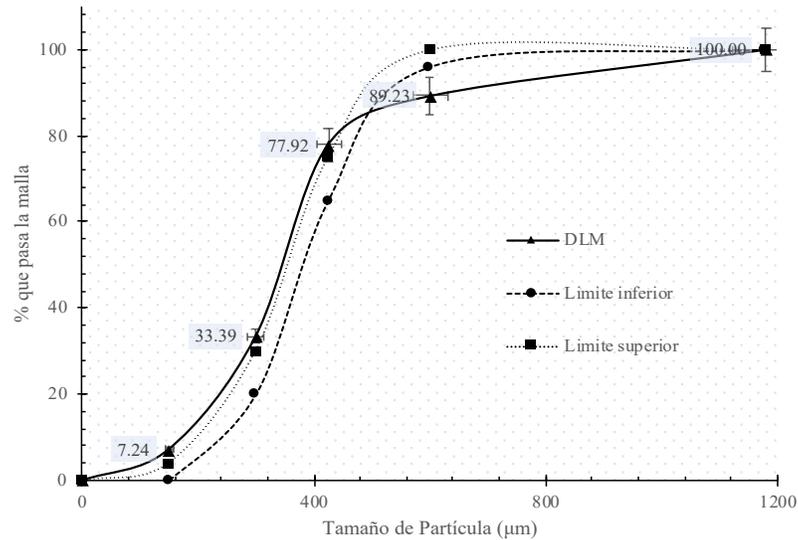


Fig. 21. Granulometría del DLM y los límites establecidos por la norma ASTM C778 (2013) para arena estándar.

Los desechos de lana de roca no solo ayudan a prevenir la propagación de grietas por su tamaño y forma, sino que también transfieren la carga a áreas no agrietadas, promoviendo efectivamente la resistencia a la tracción por rotura e inhiben la propagación de fisuras internas en el mortero (Cheng A. et al. 2006).

### 3.1.2 Densidad y absorción de humedad de los agregados (arena, DLM y DLA).

En la Tabla 8 se pueden ver los resultados del ensayo de densidad, gravedad específica y absorción de humedad, obtenidos de los agregados empleados en este estudio. Estas propiedades están ligadas entre sí y son responsables, en parte de las propiedades mecánicas del compuesto. Es evidente que el DLM en comparación con la arena, presenta un aumento en la gravedad específica (12% mayor), es un material 16.4% más denso debido a su naturaleza y la absorción de humedad es significativamente más baja o casi nula (aproximadamente 34 veces menor). Mientras que las fibras de refuerzo (DLA) tiene una gravedad específica 48% menor, es un material 46% menos denso y su absorción es casi 12

veces mayor comparada con el agregado natural (arena). Estas propiedades son características naturales de la lana animal como lo menciona Grădinaru (2016) en sus estudios.

*Tabla 8. Gravedad específica, densidad y absorción de los agregados finos arena, el DLM y el DLA.*

Propiedad	Arena de Río	DLM	DLA
Gravedad específica	2.532	2.842	1.31
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2.4	2.8	1.3
Absorción, %	2.810	0.082	33.5

En los morteros base cemento, el contenido de agua es un parámetro fundamental el cual influye directamente en las propiedades físicas y mecánicas del mortero. El agua, además de favorecer las reacciones de hidratación al cemento (por consecuencia el endurecimiento y posterior resistencia mecánica), se utiliza para mejorar la fluidez o consistencia del compuesto en estado fresco (Fallas G. et al. 2012). La absorción y la densidad son las propiedades del agregado que más influyen en la consistencia del concreto, puesto que las partículas absorben el agua directamente de la mezcla, disminuyendo la manejabilidad de la misma. Una buena consistencia y manejabilidad de la mezcla se obtiene con la combinación de índices bajos de absorción, alta densidad y un buen coeficiente de forma (sub anguloso o sub redondeado) de los agregados, en donde las partículas son aproximadamente redondas, debido a que no se modifica la cantidad de agua de amasado (Yam J. et al. 2003).

### **3.2 EFECTO DE LOS AGREGADOS (DLM Y DLA) SOBRE LA POROSIDAD, ABSORCIÓN Y DENSIDAD DE LOS MORTEROS.**

En la Tabla 9, se muestran los resultados del estudio de la porosidad, absorción de humedad y densidad de los tres tipos de morteros: los de referencia (tradicionales), los modificados con la sustitución del 100% del agregado fino (arena) por el DLM y los que sustituyeron el 0.9% en peso del agregado natural (arena) por el DLA, dosificaciones descritas en la Tabla 5. Se aprecia en la Tabla 9 que los valores de absorción de humedad de los morteros fabricados con la sustitución del 100% arena por el DLM, presentan una menor absorción de humedad aproximadamente del 20% en comparación con los morteros de referencia, esto se puede atribuir a la casi nula absorción del agregado sustituto (DLM), misma que al evaporarse durante el proceso de fraguado genera una menor cantidad de poros o espacios vacíos en la estructura interna del mortero. La baja absorción por parte de los agregados mejora la fluidez de la mezcla permitiendo que las partículas de menor tamaño fluyan a los espacios

generados por las partículas de mayor tamaño, este acomodo de partículas genera un compuesto endurecido más denso y menos poroso en comparación a los de referencia (Lin. et al., 2013).

*Tabla 9. Efecto de el DLM y el DLA en la absorción, porosidad y densidad de morteros a 28 días de curado.*

Morteros	Arena	DLM	DLA
	Referencia	C100DLM	C0.9DLA
Absorción (% en peso)	9.41	7.51	10.45
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	2.00	2.23	1.96
Volumen de poros permeables (% en peso)	24.65	18.48	27.30

Mientras que los morteros modificados con DLA presentan una absorción mayor del 11% en comparación a los morteros de referencia, resultados que coinciden con los estudios preliminares de absorción de humedad del agregado fino sustituto (DLA), el cual es un material 12 veces más absorbente que la arena, la alta absorción por parte del agregado provoca que el material pueda ser más poroso y menos denso.

La densidad de los morteros elaborados con el DLM genera un aumento del 11%, mientras que los fabricados con el DLA disminuyen en un 2% en comparación a los morteros de referencia. Estos resultados son coherentes con respecto a los resultados obtenidos para la densidad de los agregados, donde el DLM fue 16% más denso y el DLA es 46% menos denso en base a la arena.

El resultado más notable es la reducción del 25% en el volumen de poros permeables para los morteros fabricados con el DLM, mientras que los adicionados con el DLA generan un aumento del 11%. Estos resultados coinciden con los obtenidos para absorción de humedad de los agregados, ensayo en el que el DLM resultó ser un material con absorción casi nula en base a la arena y el DLA fue 12 veces más absorbente. Un agregado con mayor porosidad generalmente proporciona una mayor fuerza de adhesión entre el agregado y la pasta de cemento, de manera que los agregados gruesos con una mayor densidad y resistencia al desgaste presentan una menor porosidad y como resultado una menor absorción de humedad (Yam J. et al. 2003).

Al analizar los morteros con DLM se observó una alta densidad, esto puede ser atribuido a varios factores como puede ser la elevada densidad del DLM como agregado, al acomodo de las partículas más finas que llenan los espacios provocados por las partículas de mayor tamaño dejando

una menor cantidad de poros, además, al utilizar un material con una absorción casi nula respecto a la arena, permite la correcta hidratación del cemento y al ser un material que retiene una menor cantidad de humedad genera menos poros al evaporarse el agua durante el proceso de curado del mortero, todos estos factores en conjunto elevan la densidad del mortero.

Caso contrario para los morteros modificados con el DLA, siendo que la lana animal es un material que retiene mucha humedad en comparación a la arena, lo que da como resultado una disminución en la cantidad de agua necesaria para la correcta hidratación del cemento y su posterior endurecimiento, además, al curarse el mortero se evapora el agua retenida en las fibras de la lana animal, dejando una red de poros por donde el agrietamiento puede viajar con mayor facilidad ser sometidos a una fuerza provocando una falla en el mortero y debilitándolo mecánicamente.

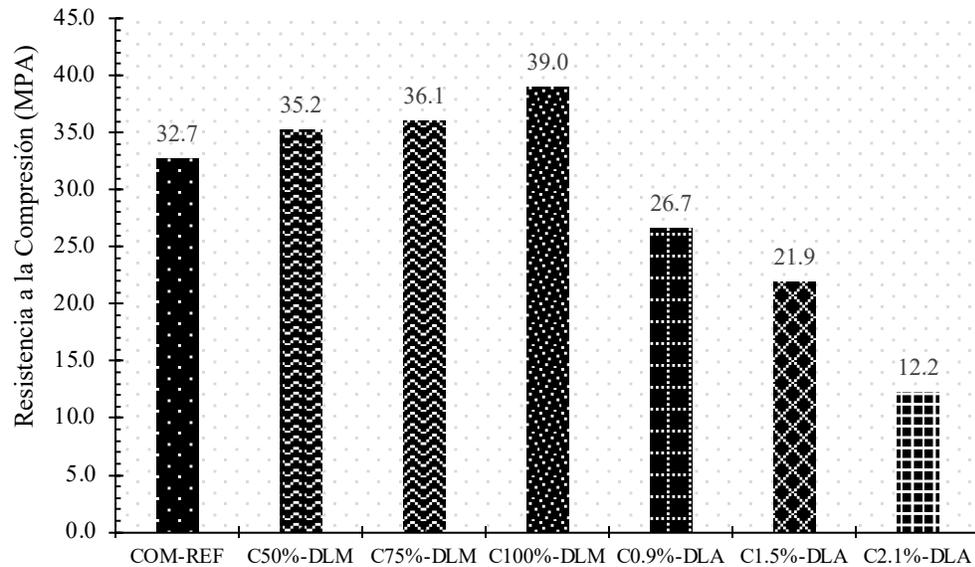
Los resultados de la Tabla 9, demuestran que el DLM con respecto a la arena, mejora las propiedades físicas del mortero aumentando su densidad, reduciendo la cantidad de poros permeables y la absorción, caso contrario para los morteros adicionados con DLA mismos que reducen la densidad, aumentan la absorción y el volumen de poros.

### **3.3 INFLUENCIA DE EL DLM Y EL DLA EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LOS MORTEROS BASE CEMENTO.**

En la Fig. 22 se muestran los resultados de resistencia a la compresión de los morteros modificados con DLM, de los modificados con DLA y se comparan con los morteros de referencia. Se puede observar que los morteros con 50, 75 y 100 % de DLM presentaron un aumento en la resistencia a la compresión del 6.6, 10.4 y del 19% con respecto al mortero de referencia. Los morteros elaborados con el 100% de DLM resultan ser un compuesto con mayor resistencia a la compresión, además de ser más amigable ambientalmente ya que sustituye en su totalidad el agregado fino natural reduciendo la explotación de los recursos naturales, generando un mortero más resistente y ecológico.

Por lo antes mencionado el desecho de lana mineral (DLM) puede ser utilizar como material de reemplazo de agregado fino parcial, dependiendo del tamaño y la forma de las partículas. La variedad de tamaños entre las partículas permite formar una estructura menos porosa, más densa y un compuesto parcialmente impermeable (Lin w. et al. 2009). Adicionalmente las partículas de DLM pueden inhibir y detener la propagación de fisuras debido al anclaje mecánico entre la matriz de refuerzo

y las partículas (Cheng A. et al. 2006). La sustitución de la arena por partículas de DLM en morteros base cemento, mejora las propiedades mecánicas a la compresión.



*Fig. 22. Resistencia a la compresión de morteros base cemento con la sustitución de 50, 75 y 100% del agregado fino arena por DLM, morteros con la sustitución del 0.9, 1.5 y 2.1% de la arena por DLA y los morteros de referencia.*

En la Fig. 22, se puede observar que a mayor adición de fibras de DLA la resistencia a la compresión disminuye gradualmente en relación a los morteros de referencia y el mortero con mejor comportamiento mecánico a la compresión correspondió al mortero con una sustitución del 0.9% del peso de la arena por el DLA, llegando a los 26.7 MPa disminuyendo la resistencia tan solo un 18% en comparación a los morteros de referencia que obtuvieron 32.7 MPa, mientras que los morteros preparados con el 1.5 y 2.1% de DLA disminuyeron un 33 y 62% la resistencia a la compresión respectivamente.

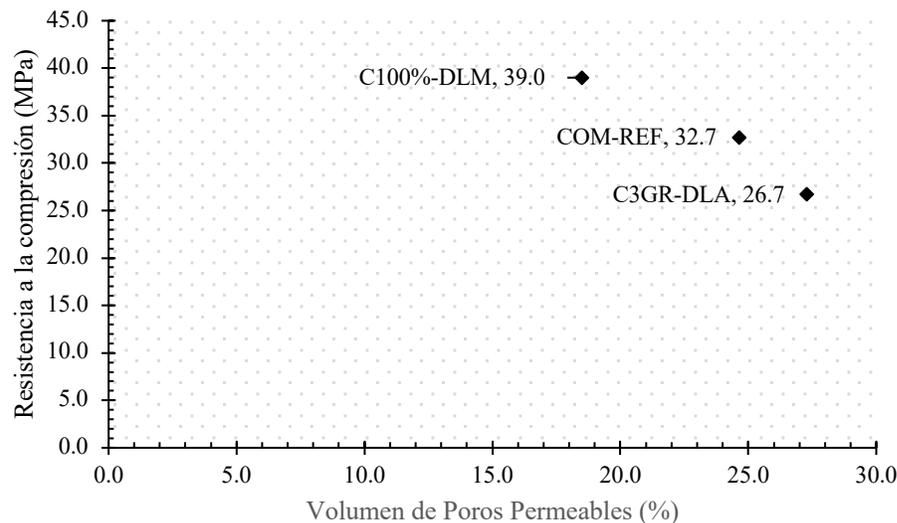
### **3.3.1 Influencia del contenido de poros permeables en la resistencia a la compresión de los morteros modificados con DLM y con DLA.**

En la Fig. 23 se presenta la resistencia a la compresión de los morteros en función al porcentaje de poros permeables de los morteros de referencia (REF-C), los modificados con la sustitución del 100% arena por DLM (DLM100%-C) y con la sustitución del 0.9% de arena por DLA (DLA0.9%-C). Se puede apreciar que a mayor porcentaje de poros permeables la resistencia a la compresión disminuye gradualmente; los morteros modificados con el 100% de DLM presentan una disminución

del 25% en el volumen de poros permeables en relación a los morteros de referencia, esta propiedad mejora el comportamiento mecánico a la compresión en un 24%.

Por lo anterior, se puede decir que la reducción en la cantidad de poros permeables del mortero con DLM con respecto al morteros de referencia, puede presentar una reducción de sitios de iniciación de fisuras y prevenir la propagación de grietas transfiriendo la carga a áreas no agrietadas, promoviendo la resistencia a la compresión en los morteros modificados con 100% de DLM. Además, las partículas finas del DLM, incrementan la densidad llenando los espacios entre partículas de mayor tamaño lo que da como resultado una matriz menos porosa y un compuesto relativamente impermeable, ya que el tamaño del poro es influenciado por el tamaño del agregado; con agregados más grandes aumenta la conectividad de poros, mientras que con más pequeños se reduce (Sumanasooriva y Neithalath, 2011).

En los morteros, el agua que no es consumida por las reacciones de hidratación del cemento en la ZTI pasta/agregados, al endurecerse el mortero o concreto el aire atrapado se evapora y genera espacios vacíos en el interior del mortero. El agua no consumida queda retenida en los agregados, tanto en su superficie por su rugosidad, como en su interior por su absorción y al fraguar el concreto el agua se evapora generando porosidad y un debilitamiento mecánico en su interior, por esta razón la ZTI es la zona de menor resistencia mecánica (Viera S. et al. 2014).



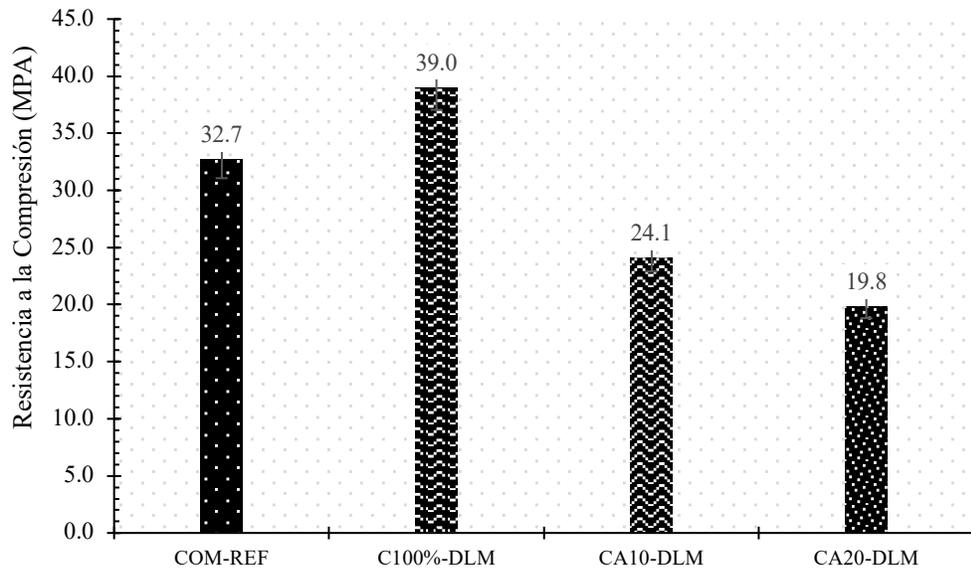
**Fig. 23. Relación del volumen de poros y la resistencia a compresión del mortero de referencia y los modificados con 100 % de DLM y el 0.9 % de DLA.**

En la Fig. 23 se muestra la resistencia a compresión de los morteros con la sustitución del 0.9% de agregado fino (arena) por DLA como fibras de refuerzo, en función del volumen de poros permeables. Se puede ver el aumento del 11% en el volumen de poros de en los morteros elaborados con DLA en comparación al mortero de referencia. Lo anterior puede ser atribuido a la alta absorción de humedad del agregado sustituto (DLA), ya que produce una reducción de agua.

La relación agua/cemento es de gran importancia ya que están ligadas a una gran cantidad de propiedades finales del material, mientras mayor cantidad de agua es adicionada, la mezcla aumenta su fluidez, su trabajabilidad y plasticidad, lo cual beneficia la mano de obra, no obstante, aumenta la cantidad de poros creados por el agua libre presente en la mezcla. Así, se puede afirmar la resistencia del concreto depende en gran medida de la relación agua/cemento, a mayor agua, más porosidad, por consecuencia menos resistencia (Fallas G. et al. 2012). Por estas razones, es posible que para morteros modificados con 100% de DLM en este estudio, se pueda reducir la relación de agua/cemento (0.5/1 respectivamente) debido a la presencia de sangrado o exudación en las mezclas modificadas con DLM, atribuido a la casi nula absorción del agregado que es 34 veces menor en comparación a la arena.

### **3.4 EVALUACIÓN DE LA DISMINUCIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA EN MORTEROS MODIFICADOS CON DLM.**

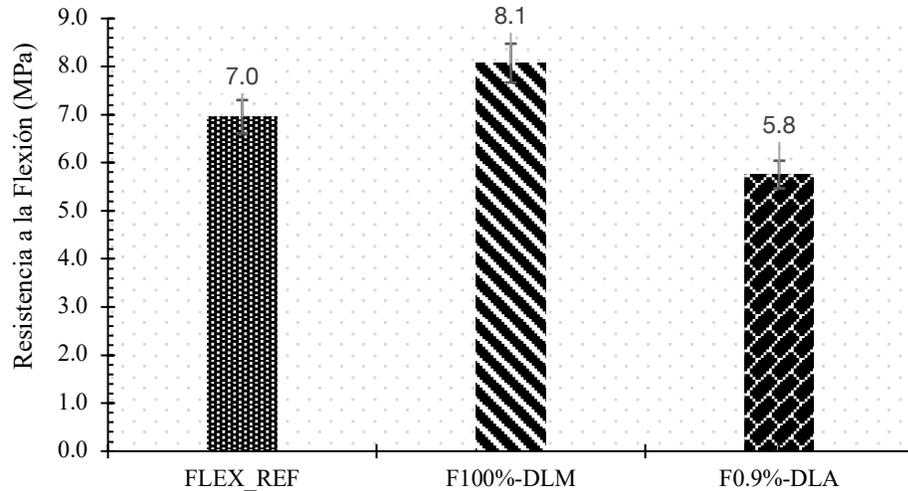
En la Fig. 24 se observan los resultados de la resistencia a la compresión de los morteros de referencia y de los morteros modificados con 100% DLM con relaciones de agua/cemento del 0.5/1, del 0.45/1 y del 0.4/1 correspondientes a una disminución en el contenido de agua del 0%, 10 % y 20%. Los resultados obtenidos demuestran que la disminución en el contenido de agua, afecta a los morteros modificados con DLM disminuyendo la resistencia a la compresión hasta 24.1 y 19.8 MPa para los morteros con relaciones agua/cemento de 0.45/1 y 0.40/1 respectivamente, disminuyendo la resistencia a la compresión un 26% y 39% con respecto al mortero de referencia. Estos resultados se pueden atribuirse a la falta de agua en la mezcla, provocando que no se lleven a cabo correctamente las reacciones de hidratación del cemento, por lo tanto, se puede decir que produce un debilitamiento mecánico de la estructura.



*Fig. 24. Resistencia a la compresión de morteros modificados con 100% de DLM, con la reducción del 10 y 20% en el contenido de agua.*

### 3.5 INFLUENCIA DEL DLM Y EL DLA EN LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE LOS MORTEROS.

En la Fig. 25 se exponen los resultados de la resistencia a la flexión de los morteros modificados con DLM (F100%-DLM), de los morteros modificados con DLA (F0.9%-DLA) y se comparan con el mortero de referencia (FLEX\_REF). Se puede observar que la resistencia a la flexión de los morteros modificados con 100% de DLM presentaron valores de 8.1 MPa, mientras que el mortero de referencia obtiene una resistencia de 7 MPa, lo que corresponde a un aumento del 16 % de la resistencia a la flexión del mortero con 100% DLM con respecto al de referencia. Los morteros adicionados con el 0.9% de DLA obtuvieron una resistencia a la flexión de 5.8 MPa, lo que corresponde a morteros 17% menos resistentes en comparación a los morteros de referencia.



*Fig. 25. Influencia del DLM y DLA en la resistencia a flexión de morteros base cemento a 28 días de curado.*

Los factores que influyen en los esfuerzos transmitidos de la pasta de cemento al agregado y su eficacia para mejorar el rendimiento mecánico a la flexión de la matriz frágil del mortero dependen en gran medida de la interacción con los agregados como: la adherencia física basada en el anclaje entre la pasta de cemento y la superficie de los agregados, la adhesión química basada en la formación de enlaces (iónicos o covalentes) entre la pasta de cemento y el agregado que los atrae y mantiene unidos, la fricción entre la partícula y la pasta de cemento, y finalmente al anclaje mecánico entre la partícula y la pasta de cemento. En los morteros cuando estos factores fallan, los esfuerzos son transmitidos a través del anclaje mecánico entre la pasta de cemento y la partícula, esto permite que la transferencia de esfuerzos continúe hacia la partícula absorbiendo energía adicional hasta que las partículas del agregado fallan (Bentur A y Mindess S, 2006). Por esta razón los agregados con partículas que contengan formas alargadas e irregulares incrementan considerablemente la cantidad de esfuerzos transmitidos de la pasta de cemento a las partículas a través del anclaje mecánico.

La morfología de la lana de mineral se compone de partículas alargadas, esféricas, tipo fibra y con formas irregulares según la NOM-009 (1995) lo cual puede favorecer el anclaje mecánico. Las partículas funcionan como puente entre los esfuerzos, aumentando considerablemente la resistencia mecánica, transmitiendo los esfuerzos desde la matriz del mortero hasta las partículas de DLM adicionadas a la mezcla. Caso contrario para el DLA que, al contener partículas menos densas y rígidas, no poseen un buen anclaje mecánico entre la pasta y el agregado, por esta razón los morteros modificados con DLA solo dependen de la adhesión física y química.

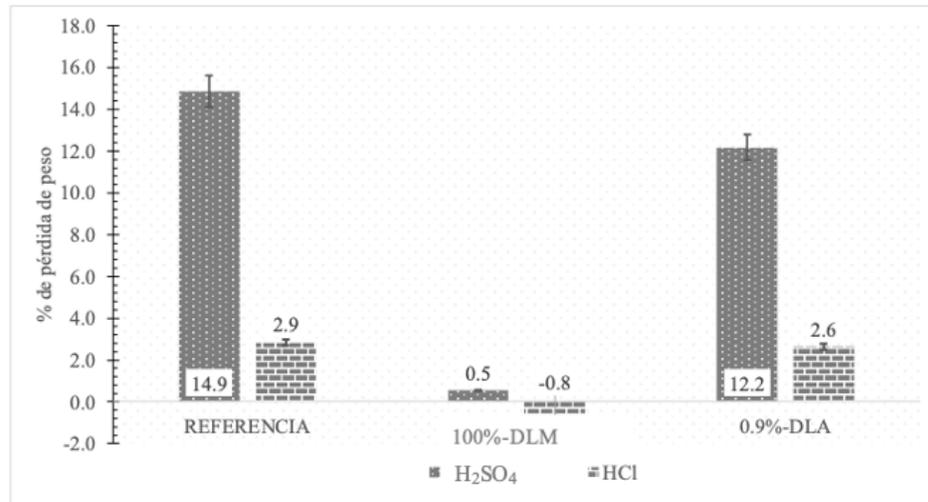
El concreto y el mortero son materiales de construcción que resisten elevados esfuerzos a la compresión, sin embargo, la resistencia a la flexión disminuye significativamente, por esta razón necesita ser reforzado con materiales que sí posean una gran resistencia a la flexión y/o tracción como lo son las varillas de acero, éste refuerzo forma un nuevo compuesto denominado concreto armado (Corral J, 2004).

### **3.6 EVALUACIÓN DEL DETERIORO DE LOS MORTEROS EN MEDIOS ÁCIDOS: ÁCIDO CLORHÍDRICO Y ÁCIDO SULFÚRICO (HCl Y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).**

#### **3.6.1 Pérdida de masa de los morteros expuestos a medios ácidos (HCl Y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).**

En la Fig. 26, se muestran la pérdida de peso de las probetas modificadas con el 100% de sustitución de la arena por DLM (100%-DLM) y las modificadas con el 0.9% de peso de arena por DLA (0.9%-DLA), comparadas con los morteros de referencia (REFERENCIA). Se aprecia en la Fig. 26, que la mayor pérdida de masa de los morteros ensayados, tanto los de referencia, como los modificados con DLM y los modificados con DLA, se da en el medio de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) después de la inmersión por 7 días, mientras que las ensayadas en ácido clorhídrico (HCl) presentaron una pérdida mínima de masa.

Las probetas expuestas en ácido sulfúrico (Fig. 26) que tuvieron la mayor pérdida de masa fueron las de referencia con una pérdida del 14.9% de su masa, seguido de las probetas fabricadas con DLA perdiendo 12.2% de su masa, sin embargo, los morteros modificados con DLM presentaron una pérdida de 0.5% de su peso. Los hidróxidos de calcio Ca(OH)<sub>2</sub> son el producto que se disuelve más rápidamente al estar en contacto con el ácido sulfúrico, pero generalmente todos los componentes que contienen calcio como los hidratos de silicato de calcio también reaccionan con el ácido y son diluidos (Türkel, S et al. 2007). La pérdida de peso presente en los morteros modificados con DLM en ambos ácidos es menor al margen de error de las muestras por lo que se podría considerar una pérdida de peso despreciable.

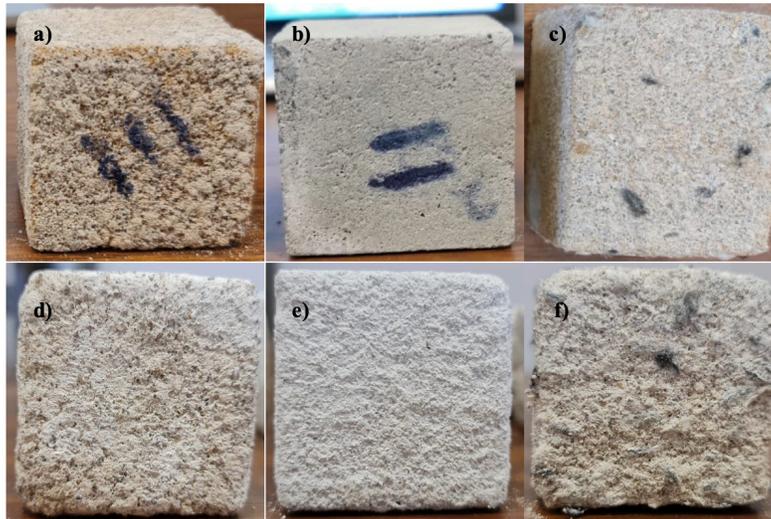


*Fig. 26. Pérdida de peso de morteros modificados con el DLM, morteros modificados con DLA y de los morteros de referencia, después de 7 días sumergidos en medios ácidos (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y HCl por separado).*

En la Fig. 26 se puede apreciar que los morteros ensayados en HCl obtuvieron una pérdida de peso despreciable siendo la pérdida más alta para los morteros de referencia, mismos que disminuyeron 2.9% de su peso, mientras los elaborados con DLA llegaron a obtener una pérdida 2.6% de su peso, sin embargo, los modificados con DLM no presentaron pérdida de peso. La disminución en la masa de los morteros se atribuye a la solubilidad de algunos productos de hidratación y el posterior incremento en la porosidad, incluyendo el proceso de descalcificación y la solubilidad de la alúmina y los óxidos de hierro que ocurre preferentemente a un pH por debajo del 3.0 como los casos de estudio (Izquierdo S. et al. 2015) (American Concret Institute, 2017).

En la Fig. 27 se presenta una imagen superficial de las probetas expuestas a medios ácidos durante 7 días. Las probetas del inciso a) al c) fueron las ensayadas en ácido clorhídrico y las probetas del inciso d) al f) son las probetas ensayadas en ácido sulfúrico. Se puede apreciar que las probetas ensayadas en ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) presentan un mayor deterioro si se comparan con las probetas ensayadas en ácido clorhídrico (HCl). También se puede observar que las probetas elaboradas con DLM (b) ensayadas en HCl presentan una superficie aparentemente lisa y sin deterioro visible, mientras que las probetas modificadas con DLM (e) ensayadas en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> presentan una superficie rugosa mostrando pérdidas de material en la superficie. La probeta elaborada con DLA (f) expuesta a H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> presenta un deterioro visible con una superficie rugosa con protuberancias en comparación con la probeta elaborada con DLA (c) ensayada en HCl la cual presenta una superficie rugosa. Sin embargo,

las probetas de referencia (a) y d) expuestas en HCl y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> respectivamente se observan superficialmente deterioradas con superficie rugosa y con protuberancias.



*Fig. 27. Probetas después de 7 días de exposición en medios ácidos. a) Probetas de referencia en HCl. b) Probetas con DLM en HCl. c) Probetas con DLA en HCl. d) Probetas de referencia en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. e) Probetas con DLM en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. f) Probetas con DLA en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.*

Las probetas elaboradas con DLM son las que presentaron menor deterioro en comparación con los morteros de referencia y los modificados con DLA y es atribuido a la baja porosidad por parte de los morteros y a la baja reactividad del agregado (DLM) propiedades, que forman una barrera casi impermeable que evita la penetración de los líquidos en su interior.

### **3.6.2 Resistencia a la compresión de los morteros expuestos a medios ácidos (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y HCl).**

En la Tabla 10 se exponen los resultados de la resistencia a la compresión de los morteros de referencia (COM\_REF), de los morteros con 100% de DLM (COM-100%DLM) y de los morteros con 0.9% de DLA (COM-0.9%DLA), antes y después de ser expuesto en ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y en ácido clorhídrico (HCl). A nivel general se puede observar que los morteros expuestos en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y HCl muestran valores de resistencia a la compresión menores si se comparan con los morteros que no fueron expuestos a medios ácidos. En esta tabla se puede observar que las probetas de mortero expuestas en ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) presentaron una disminución de la resistencia a la compresión del 32.4% para el mortero de referencia, de 33% para el mortero con DLM y de 45% para el mortero con DLA si se comparan con los morteros que no fueron expuestos en un medio ácido. Esta disminución en la resistencia a la compresión de los morteros se puede atribuir a la disolución de los productos de

hidratación contenidos en la matriz cementicia del mortero y como consecuencia a la generación de una mayor porosidad que facilita el paso de la fase ácida al interior del mortero, esto se explica en la sección 3.6.1. Por otro lado, la formación de ciertos compuestos generados por la presencia del ácido sulfúrico y los compuestos propios del cemento ya descritos anteriormente producen la formación de algunos compuestos que pueden generar aumento del volumen en el interior del sólido y por consiguiente el fisuramiento de la estructura. Esto se le atribuye a la fase conocida como etringita, reacción que se presenta en la Ec. 7, por otro lado, también se habla de la formación de yeso al cual se le atribuye el ablandamiento y por ende la pérdida de resistencia del mortero. Esta formación de yeso por el ácido sulfúrico se presenta en la Ec. 8 (Izquierdo S. et al. 2015) (American Concret Institute, 2017). Las reacciones del ácido sulfúrico con los productos de hidratación de los morteros base cemento Portland se pueden explicar en la Ec. 7 y Ec. 8 que se describen a continuación:

En la Ec. 7 se presenta la reacción del hidróxido de calcio [ $Ca(OH)_2$ ] al estar en contacto con el ácido sulfúrico reacciona formando yeso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) que provoca ablandamiento y pérdida de resistencia en el mortero. En la Ec. 8 el yeso reacciona con el aluminato tricálcico ( $3CaO \cdot Al_2O_3$  o  $C_3A$ ) en un ambiente acuoso y forma un producto expansivo llamado etringita que puede generar un aumento de volumen en el interior del sólido con la consiguiente la expansión y el fisuramiento del mortero (Türkel, S et al. 2007) (Skalny J. et al. 1996).

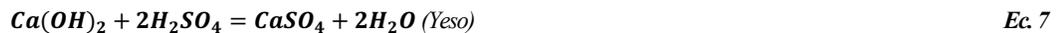


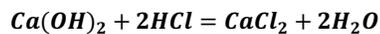
Tabla 10. Resistencias a la compresión de probetas ensayadas en  $H_2SO_4$  y  $HCl$  con sus respectivos porcentajes de reducción o aumento de la resistencia a compresión.

	Resistencia a compresión, MPa			% de reducción de la resistencia a compresión	
	SIN ATAQUE	$H_2SO_4$	$HCl$	$H_2SO_4$	$HCl$
COM_REF	32.7	22.1	29.1	32.4	10.4
COM-100%DLM	39.0	26.1	36.3	33.0	7.0
COM-0.9%DLA	26.7	14.7	23.0	45.0	14.0

Con respecto a los resultados mostrados de los morteros inmersos en ácido clorhídrico en la Tabla 10, se puede observar que la resistencia a la compresión disminuyó un 10.4% para el mortero de referencia, 7% para el mortero con DLM y de 14% para el mortero con DLA cuando se comparan con

los morteros sin ser expuestos al medio ácido. La pérdida de la resistencia a la compresión en los morteros puede ser debida al incremento en la porosidad de los morteros causada por la exposición de las probetas en HCl. Türkel, S. et al. (2007) mencionan que el HCl reacciona con el hidróxido de calcio produciendo cloruro de calcio, esta sal con ayuda del agua es transportada al exterior del mortero generando un aumento en la porosidad. Las reacciones del ácido clorhídrico con los productos de hidratación de los morteros base cemento Portland se pueden explicar en la Ec. 9 que se describen a continuación:

En la Ec. 9 se puede observar que el HCl reacciona con los productos de hidratación del cemento Portland, en particular los hidróxidos de calcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y los productos resultantes son la formación de cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) que, con la ayuda del agua, estas sales pueden ser transportadas al exterior del mortero aumentando la porosidad y por consecuencia la penetración de líquidos (Türkel, S et al. 2007).



*Ec. 9*

### **3.7 INFLUENCIA DE ELEVADAS TEMPERATURAS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MORTEROS MODIFICADOS CON DLM Y DE LOS MODIFICADOS CON DLA.**

#### **3.7.1 Comportamiento de la resistencia a compresión de morteros ante elevadas temperaturas (400 y 700 °C).**

En la Tabla 11 se muestran la resistencia a la compresión de los morteros de referencia (C-REFERENCIA), los morteros con el 100% de DLM (C-100%-DLM) y los morteros con el 0.9 % de DLA (C\_0-9%-DLA) después de ser expuestos a 400 y 700 °C durante dos horas, además se incluye la resistencia a la compresión de los morteros sin previo tratamiento térmico. A nivel general se observa que los morteros expuestos a 400 y 700 °C disminuyeron su resistencia a la compresión en comparación a los morteros que no fueron expuestos a elevadas temperaturas. En esta tabla se observa que los morteros de referencia y los morteros elaborados con DLM expuestos a 400 °C no presentaron cambio significativo en su resistencia a la compresión en comparación a los morteros sin previo tratamiento térmico. Esto fenómeno puede ser atribuido a que los materiales presentes como los agregados de arena o DLM se mantienen estables a estas temperaturas, por lo que las propiedades mecánicas no se ven

modificadas. Con respecto a los morteros que contienen DLA y que presentaron pérdidas del aproximadamente 20 % en la resistencia mecánica se puede decir que, este decremento es debido a la pérdida de material orgánico contenido en la lana animal; estudios previos han demostrado que a temperaturas de 220 – 250 °C se lleva a cabo la descomposición de la queratina presente en estas fibras de origen animal (Sun, X. et al. 2021). A temperaturas de 400 °C es muy probable que este proceso se haya llevado a cabo, provocando la reducción en el volumen de la fibra y favoreciendo la aparición de huecos dentro de la matriz del mortero.

*Tabla 11. Resistencias a compresión de morteros expuestos a 400 y 700 °C durante 2 horas.*

	Resistencia a la compresión, MPa			% de reducción de la resistencia a la compresión	
	SIN TRATAMIENTO TÉRMICO	400 °C	700 °C	400 °C	700 °C
C-REFERENCIA	32.7	30.9	9.9	5.5	69.7
C-100% - DLM	39	38.7	25.5	0.8	34.6
C-0.9%DLA	26.7	21.3	9.7	20.2	63.7

En la Tabla 11 se observan que los morteros expuestos a 700 °C presentan decremento en su resistencia de 69.7% para los morteros de referencia, 34.6% para los morteros con DLM y 63.7% para los morteros con DLA, en comparación con los morteros sin previo tratamiento térmico. Esta pérdida de resistencia mecánica en los morteros puede ser atribuida a varios factores como la deshidratación de los hidróxidos de calcio que ocurre a 400 °C y se descompone químicamente al llegar a los 500 °C, a partir de los 600 °C los agregados pétreos principalmente los agregados silíceos presentes en la arena y en el DLM comienzan su degradación, por consecuencia los morteros pierden estabilidad y resistencia mecánica (Ripani, M. et al. 2016). En los morteros con DLA la carbonización de las fibras se alcanza a los 500 °C, lo que puede explicar la pérdida de resistencia mecánica, debido al incremento de la porosidad en el mortero causado por la reducción del contenido orgánico presente en el mortero (Sun, X. et al. 2021).

### **3.7.2 Comportamiento de la resistencia a flexión ante elevadas temperaturas.**

En la Tabla 12 se analizan los morteros de referencia (FF-REF), los morteros modificados con 100% DLM (FF-100%-DLM) y los elaborados con el 0.9 % de DLA (FF\_0-9%-DLA), con el fin de analizar el comportamiento de la resistencia a la flexión al ser expuestos a las temperaturas de 400 y 700 °C, además se incluye la resistencia a la flexión de los morteros sin previo tratamiento térmico. Se

puede observar en la tabla que los morteros de referencia disminuyeron su resistencia a la flexión un 28 y 81% para las temperaturas de 400 y 700 °C a las que fueron expuestos, si son comparados con los morteros sin previo tratamiento térmico, también se puede apreciar que los morteros elaborados con DLA presentaron una disminución del 48% cuando fueron expuestas a 400 °C, mientras que a 700 °C su resistencia se redujo un 86%. Sin embargo, los morteros elaborados con DLM presentaron una disminución en la resistencia del 16 y 68% para las temperaturas de 400 y 700 °C a las que fueron expuestos. A nivel general se puede observar que los morteros con DLA fueron los más afectados a la temperatura de 400 °C, mientras que a 700 °C presentó una resistencia similar a la obtenida por los morteros de referencia. Mientras que el mortero elaborado con DLM presentó pérdidas de resistencia menores a las dos temperaturas que fueron expuestos si se comparan con el mortero de referencia.

*Tabla 12. Resultados de ensayos a flexión de morteros de referencia, morteros con el 100 % de DLM y morteros con 0.9% DLA, ensayados a temperaturas (400 y 700 °C) durante dos horas.*

	Resistencia a la flexión, MPa			% de reducción o aumento de la resistencia a compresión	
	SIN TRATAMIENTO	400 °C	700 °C	400 °C	700 °C
<b>FF-REF</b>	7.0	5.0	1.3	28.6	81.4
<b>FF-100%DLM</b>	8.0	6.7	2.5	16.3	68.8
<b>FF-0.9%DLA</b>	5.8	3.0	0.8	48.3	86.2

### 3.7.3 Termogravimetría (TG) y análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC).

En la Figs. 28, 29 y 30 se presentan los resultados del análisis termogravimétrico de los morteros de referencia, los morteros modificados con DLM y los morteros modificados con DLA respectivamente. Se puede apreciar que la menor pérdida de peso lo presentaron los morteros modificados con DLM con un valor del 6.17% (Fig. 29), mientras el mortero de referencia mostró una pérdida de peso del 6.4% (Fig. 28) y los morteros modificados con DLA perdieron el 7.65% de su peso (Fig. 30). En general en los morteros base cemento la pérdida de masa en los primeros 100 °C corresponde al agua presente, aproximadamente a los 473 °C ocurre otra pérdida de masa debido a la deshidroxilación del hidróxido de calcio y llegando aproximadamente a los 800 °C se descompone el carbonato de calcio y genera otra disminución de masa como consecuencia de la pérdida de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Betancourt S, 2017).

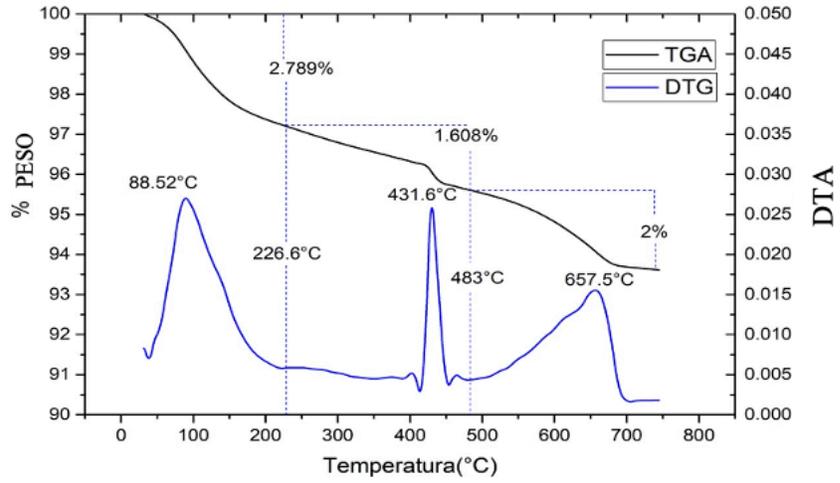


Fig. 28. Análisis TGA y DTA del mortero de referencia.

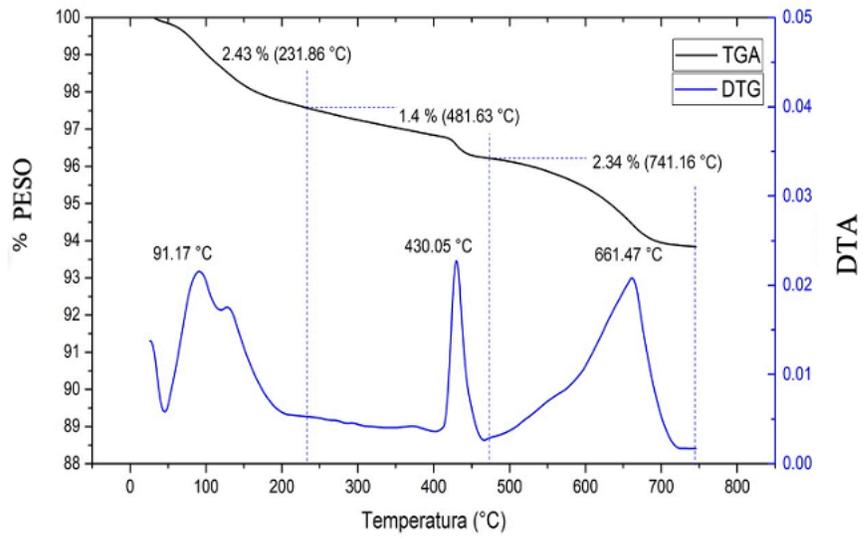


Fig. 29. Análisis TGA y DTA de mortero modificado con 100 % DLM.

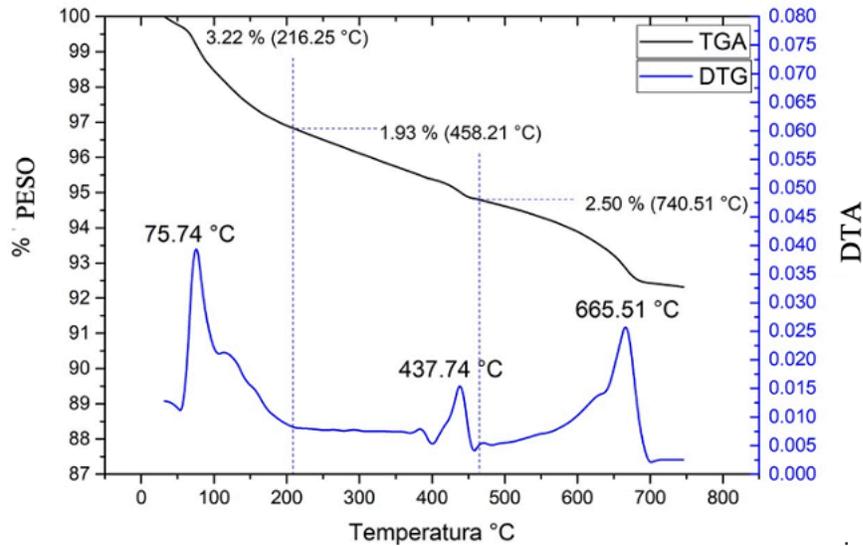


Fig. 30. Análisis TGA y DTA de mortero modificado con 0.9 % DLA.

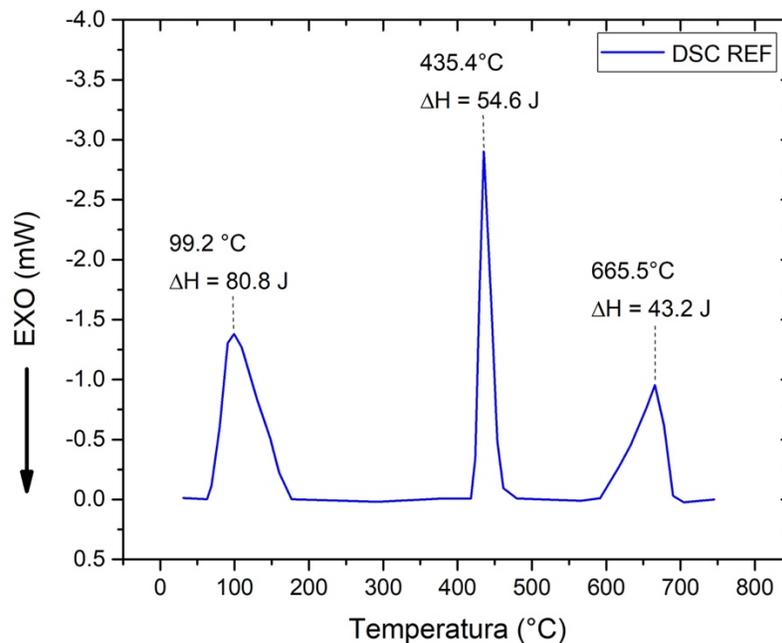
En los análisis DTA podemos apreciar los tres eventos de pérdida de masa, siendo el primero de temperatura ambiente hasta aproximadamente los 400 °C, el tercero de entre 400 a 500 °C y el último de entre 500 a 700°C. Podemos apreciar que los picos en las Fig. 28, Fig. 29 y Fig. 30 son muy semejantes.

En la primera transición hasta los 400 °C el agua se evapora y se pierde por deshidratación de los compuestos de silicatos de aluminio y calcio formados durante la hidratación del cemento Portland. Este evento es el que reduce mayormente el peso de las probetas en 2.78, 2.43 y 3.22 % para las de referencia, las modificadas con DLM y las modificadas con DLA respectivamente. El segundo pico se encuentra a  $426.2 \pm 8$  °C para todos los morteros, teniendo un evento endotérmico en la curva DTA correspondiente a la descomposición del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  formado en la reacción del cemento con el agua. El  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se descompone para formar  $\text{CaO}$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , lo que representa menos del 1% en peso de la masa total de morteros. Este pico disminuye el peso en menos del 2 % para todos los morteros. La tercera pérdida de masa surge aproximadamente a los  $663.45 \pm 8$  °C presentando una curva asimétrica de descomposición endotérmica para generar  $\text{CaO}$  y  $\text{CO}_2$ . El carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) proviene del cemento y se puede producir en el mortero a partir de la reacción de carbonatación lenta de la fase  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  del mortero con el  $\text{CO}_2$  atmosférico (Piña R, 2018). Esta pérdida disminuye alrededor del 2 al 2.5% el peso de los especímenes.

Estos resultados indican que la adición de fibras de DLM y DLA en los morteros base cemento no modifican sustancialmente la composición y la estructura de los mismos, indicando que no hay

diferencia importante, lo que posiblemente indica que los desechos de lana mineral y lana animal pueden ser usados en morteros base cemento sin necesidad de un proceso de separación.

El análisis DSC mide directamente el calor absorbido o liberado en función de la temperatura y se compara con una referencia. Además, se utiliza para determinar la temperatura a la que se producen transiciones de fase concretas, incluida la temperatura de transición vítrea, los eventos de fusión y cristalización. Fueron identificadas tres reacciones endotérmicas (liberan calor) muy similares para los morteros de referencia, los morteros modificados con DLM y los morteros modificados con DLA, durante el calentamiento de las probetas (Fig. 31, Fig. 32 y Fig. 33). En el análisis DSC podemos observar que para los morteros con DLM la sumatoria del  $\Delta H$  consumido fue de 127.1 J mientras que para los morteros de referencia tienen un  $\Delta H$  de 178.6 J lo que nos indica que para que las reacciones se lleven a cabo en el mortero con DLM se necesita un menor gasto energético en comparación al mortero de referencia, mientras que para el mortero elaborado con DLA se necesitó un  $\Delta H$  de 181.4 J aumentando el gasto energético.



*Fig. 31 Análisis DSC del mortero de referencia.*

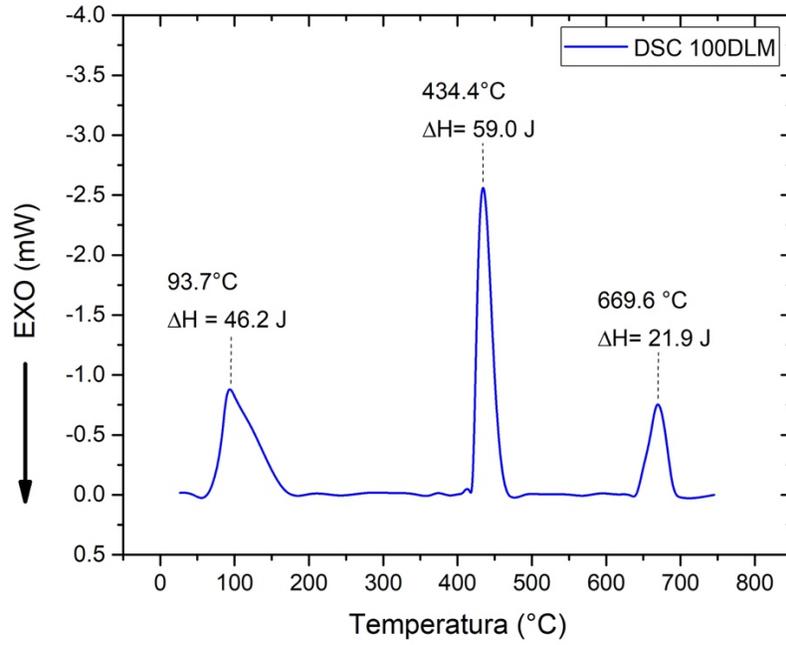


Fig. 32 Análisis DSC del mortero modificado con 100 % DLM.

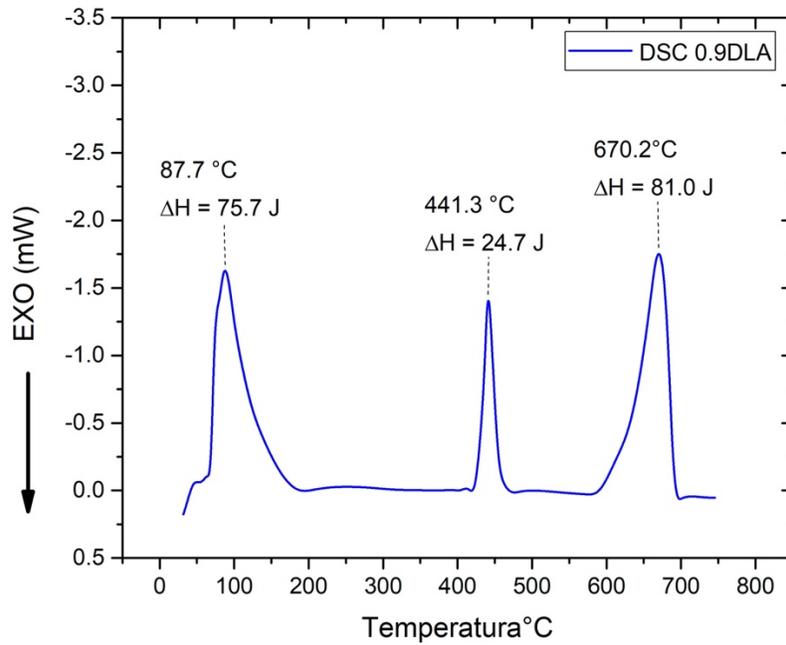


Fig. 33 Análisis DSC del mortero modificado con 0.9 % DLA.

**CONCLUSIONES**

1.- La adición de partículas de DLM favoreció la trabajabilidad de la mezcla durante la preparación de los morteros base cemento, a mayor cantidad de DLM mejor trabajabilidad. Sin embargo, las sustituciones de arena por DLA, dificultaron la trabajabilidad de la mezcla de mortero durante su preparación, todo esto compara con las mezclas de un mortero tradicional cemento/arena/agua (mortero de referencia).

2.- La adición de DLM permitió obtener morteros con mayor densidad, menor contenido de poros y menor absorción de humedad, conforme aumentaba el contenido de DLM. Por otro lado, la adición de DLA a los morteros propició un decremento en la densidad, una mayor porosidad y un mayor porcentaje de absorción de humedad a medida que se incrementaba con el contenido de DLA. Todo esto cuando los morteros son comparados con los morteros de referencia.

3.- El mortero con 100% de agregado de DLM mostró un comportamiento similar al mortero de referencia al estar expuesto en soluciones de ácido sulfúrico, mostrando una reducción de su resistencia a la compresión en un aprox. de 32 %, mientras que el mortero adicionado con 0.9% de DLA mostró un deterioro más significativo en este ácido, presentando una reducción en su resistencia a la compresión de un 45%.

4.- Las soluciones de ácido clorhídrico resultaron menos agresivas para el deterioro de los morteros en comparación con las soluciones de ácido sulfúrico, mostrando reducciones en la resistencia a la compresión de 7% - 14 % en los morteros de referencia, morteros adicionados con DLM y morteros adicionados con DLA. Los morteros menos deteriorados fueron los morteros adicionados con 100% de DLM.

5.- Los morteros que mejor comportamiento presentaron en resistencia a la compresión y resistencia a la flexión después de haber sido expuestos a temperaturas de 400 °C, fueron los morteros con 100% de DLM, mostrando una reducción de un 0.8% y 16.3 % respectivamente cuando se comparan con los morteros de DLM sin exponer. Estos mismos morteros presentaron los valores de mayor resistencia a la compresión después de ser expuestos a una temperatura de 700°C, observándose mayores pérdidas en su resistencia de compresión y flexión (34.6% y 68.8%) cuando se comparan con los valores de resistencia a la compresión y flexión a 400°C.

6.- Los resultados obtenidos en este trabajo permiten establecer que los desechos de lana mineral (DLM) pueden ser usados como material sustituto hasta del 100% del agregado fino (arena) para la elaboración de morteros base cemento.

7.- Los desechos de DLA pueden ser una opción para utilizar como reemplazo del agregado fino en un 0.9%, en morteros base cemento en sistemas constructivos que requieran de una resistencia a la compresión de aproximadamente 26 MPa.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ACI Committee 216. (1982). *Guide for determining the fire endurance of concrete elements*. American Concrete Institute.

Al-Assadi, G. (2009). *Influencia de las condiciones de curado en el comportamiento del hormigón sometido a ciclos hielo-deshielo* (Doctoral dissertation, Caminos).

Alva Reyes, L. A., y Asmat Ruíz, K. L. (2019). *Influencia del reemplazo de agregado grueso por concreto reciclado sobre las propiedades de un concreto endurecido*.

Alvarez, J. I., Martín, A., y García Casado, P. J. (1995). *Historia de los morteros*. Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico.

Alyousef, R., Aldossari, K., Ibrahim, O., Mustafa, H., y Jabr, A. (2019). *Effect of sheep wool fiber on fresh and hardened properties of fiber reinforced concrete*. *Int. J. Civ. Eng. Technol*, 10, 190-199.

American Concrete Institute. (2017). *ACI Manual of Concrete Practice, 2017*. ACI, American Concrete Institute.

American Society for Testing and Materials (ASTM C136). (2001). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*.

American Society for Testing and Materials. Committee C-1 on Cement. (2013). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. ASTM International.

Anink, D., Boonstra, C., y Mak, J. (1996). *Handbook of sustainable building: an environmental preference method for selection of materials for use in construction and refurbishment*. Earthscan/James y James.

ARAYA, J. P. B. (2012). *Evaluación del desempeño de aditivos impermeabilizantes por cristalización como agentes promotores de la durabilidad del hormigón confeccionado con cementos Portland Puzolanicos* (Doctoral dissertation, Universidad de Chile).

ASOCEM. (2018). *Panorama mundial de la industria del cemento*. 3/6/20121, de ASOCEM  
 Sitio web:  
<http://www.asocem.org.pe/archivo/files/Vision%20General%20de%20la%20Industria%20del%20Cemento%20y%20sus%20Principales%20Actores.pdf>

ASTM C33/C33M. (2013). *Standard specification for concrete aggregates*.

ASTM-C150/C150M-16. (2016). *Standard specifications for portland cements*. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.

ASTM, C. (2003). *Standard practice for reducing samples of aggregate to testing size*. ASTM Annual Book of ASTM Standards, 4, 702-798

ASTM, C. (2004). 94, *Standard Specification for Ready Mixed Concrete*.

ASTM, C. (2006). *Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*. ASTM C136-06.

ASTM, C. (2008). C348-02. *Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars*.

ASTM, C. (2009). 1012-04. *Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution*. ASTM, Philadelphia.

ASTM, C. (2012). *Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate*.

ASTM, C. (2013). *Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete*. C642-13.

ASTM, C. 267-01 (2006) *Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes*.

ASTM. (2013). *Standard specification for standard sand*. C778-13.

Bedoya, Carlos, y Dzul, Luis. (2015). *El concreto con agregados reciclados como proyecto de sostenibilidad urbana*. Revista ingeniería de construcción, 30(2), 99-108. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732015000200002>

Bentur, A., y Mindess, S. (2006). *Fibre reinforced cementitious composites*. Crc Press.

Betancourt Rodríguez, S. (2017). *Materiales para la construcción*. Feijóo.

Cagiao Villar, J. (2010). *Cálculo de la huella ecológica de una industria cementera y propuesta de medidas de ingeniería sostenible destinadas a su reducción*.

Cañas, J. S. (2014). *Densidad, Densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso*.

Castells, X. E. (2012). *Reciclaje de residuos industriales: residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora*. Ediciones Díaz de Santos.

CEMEX (2020). *Ficha de Datos de Seguridad del Clínter de Cemento Portland*.

Chen, C. H., Huang, R., Wu, J. K., y Yang, C. C. (2006). *Waste E-glass particles used in cementitious mixtures*. Cement and concrete research.

Cheng, A., Huang, R., Wu, J. K., y Chen, C. H. (2005). *Influence of GGBS on durability and corrosion behavior of reinforced concrete*. Materials Chemistry and Physics.

Cheng, A., Lin, W. T., y Huang, R. (2011). *Application of rock wool waste in cement-based composites*. Materials y Desig.

Collantes Delgado, J. A., y Eslava Urbina, D. A. (2018). *Influencia del agregado reciclado sobre la compresión, abrasión, asentamiento y permeabilidad en el concreto permeable no estructural*.

Comité, A. C. I. (2008). 318, *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-08)*.

Corral, J. T. (2004). *Patología de la construcción grietas y fisuras en obras de hormigón; origen y prevención*. Ciencia y sociedad, 29(1), 72-114.

De Fazio, P., y Feo, A. (2017). *Thermal and mechanical characterization of panels made by cement mortar and sheep's wool fibres*. In 50th AiCARR International Congress on Beyond NZEB Buildings (Vol. 140). Elsevier Ltd.

Designation, A. S. T. M. (2002). C192/C192M-02. *Making and Curing Concrete Test Specimens in Laboratory*.

Fallas, G. G., Madrigal, C. H., García, M. P., Valenciano, I. R., Vega, L. D. R., y Guzmán, G. S. (2012). *Efecto de la variación agua/cemento en el concreto*. Tecnología en marcha, 25(2), 80-86.

Fiore, V., Di Bella, G., y Valenza, A. (2019). *Effect of sheep wool fibers on thermal insulation and mechanical properties of cement-based composites*. Journal of Natural Fibers.

Grădinaru, C. M., Bărbuță, M., Șerbănoiu, A. A., y Babor, D. (2016). *Investigations on the mechanical properties of concrete with sheep wool fibers and fly ash*. Bulletin of the Transilvania University of Brașov • Vol, 9, 58.

Guerrero, E. J. L., Cuasapaz, D. P. G., y León, B. I. A. (2020). *Influencia de las partículas de caucho en la resistencia a la compresión de bloques de concreto*. Revista Tecnica, 43(3), 134-142.

Hertz, K. D. (2005). *Concrete strength for fire safety design*. Magazine of concrete research, 57(8), 445-453.

Izquierdo, S., Rodríguez, E. D., y de Gutiérrez, R. M. (2015). *Resistance to acid corrosion of blended cements mortars with spent fluid catalytic cracking (sFCC) catalyst*. Revista Ingeniería de Construcción, 30(3), 169-176.

Korjenic, A., Klarić, S., Hadžić, A., y Korjenic, S. (2015). *Sheep wool as a construction material for energy efficiency improvement*. Energies, 8(6), 5765-5781.

Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., y Panarese, W. C. (2002). *Design and control of concrete mixtures* (Vol. 5420, pp. 60077-1083). Skokie, IL: Portland Cement Association.

León, M. P., y Ramírez, F. (2010). *Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes*. Revista ingeniería de construcción, 25(2), 215-240.

Lin, W. T., Cheng, A., Huang, R., y Zou, S. Y. (2013). *Improved microstructure of cement-based composites through the addition of rock wool particles*. Materials characterization.

Lin, W. T., Huang, R., Chang, J. J., y Lee, C. L. (2009). *Effect of silica fumes on the permeability of fiber cement composites*. Journal of the Chinese institute of engineers.

Lin, W. T., Huang, R., Lee, C. L., y Hsu, H. M. (2008). *Effect of steel fiber on the mechanical properties of cement-based composites containing silica fume*. Journal of Marine Science and Technology.

Maia Pederneiras, C., Veiga, R., y de Brito, J. (2019). *Rendering mortars reinforced with natural sheep's wool fibers*. Materials, 12(22), 3648.

Martínez-López, C., Torres-Agredo, J., Mejia-De Gutierrez, R., MELLADO-ROMERO, A. N. A., Paya-Bernabeu, J., y MONZÓ-BALBUENA, J. O. S. É. (2013). *Use of leaching test to determine contaminant migration in mortars cement substituted with catalyst catalytic cracking residue (FCC)*. Dyna.

Medeiros, M. G., Nadaleti, W. C., Rocha, J. C., Cheriaf, M., Gleise, P. J. P., y de Castilhos Jr, A. B. (2021). *A cleaner material production by the incorporation of the rockwool waste into portland cement matrices*. Journal of Cleaner Production, 293, 126059.

Mendoza, Carlos Javier, Aire, Carlos, y Dávila, Paula. (2011). *Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto en estados plástico y endurecido*. Concreto y cemento. Investigación y desarrollo, 2(2), 35-47. Recuperado en 07 de agosto de 2021, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-30112011000100003&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112011000100003&lng=es&tlng=es).

Mendoza, H. L. R. (2011). *Deterioro del hormigón sometido a ensayos acelerados de hielo-deshielo en presencia de cloruros*. (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Madrid).

Mendoza, I., y CHÁVEZ, S. (2017). *Residuos de construcción y demolición como agregado de concreto hidráulico nuevo*. Revista de Ingeniería Civil, 1(2), 9-14.

MEXICANOS, P. NOM-009-ENER-1995 NORMA OFICIAL MEXICANA," *EFICIENCIA ENERGETICA EN AISLAMIENTOS TERMICOS INDUSTRIALES*.

NMX-C-061-ONNCCE-2001, *"Industria de la construcción - cemento - determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos,"* ed. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.: México, 2001.

NMX-C-414-ONNCCE-2004, *"Industria de la Construcción - Cementos Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Prueba,"* ed. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.: México, 2009.

Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-007-RNAT (2013).

Pérez, O. E. O. (2017). *Estudio del comportamiento mecánico y físico de morteros modificados con desecho de lana mineral.* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de San Luis Potosí).

Piña Ramírez, C. (2018). *Comportamiento físico-mecánico y térmico de los morteros de cemento aditivados con fibras minerales procedentes de residuos de construcción y demolición.* (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Madrid).

PIZARRO CISTERNAS, A. A. (2020). *ESTUDIO TECNICO PARA LA IMPLEMENTACION DE LA LANA DE OVEJA COMO AISLANTE EN CHILE.*

Ramírez, C. P., Barriguete, A. V., Somolinos, R. S., del Río Merino, M., y Sánchez, E. A. (2020). *Analysis of fire resistance of cement mortars with mineral wool from recycling.* Construction and Building Materials, 265, 120349.

Ramírez, C. P., del Río Merino, M., Arrebola, C. V., Barriguete, A. V., y Kosior-Kazberuk, M. (2019). *Analysis of the mechanical behaviour of the cement mortars with additives of mineral wool fibres from recycling of CDW.* Construction and Building Materials, 210, 56-62.

Ramírez, C. P., Sánchez, E. A., del Río Merino, M., Arrebola, C. V., y Barriguete, A. V. (2018). *Feasibility of the use of mineral wool fibres recovered from CDW for the reinforcement of conglomerates by study of their porosity.* Construction and Building Materials, 191, 460-468.

Ripani, M., 2016. *Modelización computacional no local y análisis del hormigón en altas temperaturas.* Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires, Argentina, pp. 175.

Robayo Nuñez, E. (2013). *Comportamiento mecánico y durabilidad de morteros de cenizas volantes activadas alcalinamente*.

Ruiz Hernandez, E. (2020). *Resistencia a compresión y capacidad de absorción del mortero al reemplazar agregado fino por ladrillo, cerámica y teja de arcilla reciclados*. Cajamarca, 2018.

Sanjuan Barbudo, M. A., y Chinchón Yepes, S. (2014). *Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland*. Universidad de Alicante.

Scrivener, K. L. (1984). *The development of microstructure during the hydration of Portland cement*.

Secretaría de Economía. (2014). NMX-C-414-ONNCCE-2014. *Industria de la construcción-cementantes hidráulicos-especificaciones y métodos de ensayo*. Diario Oficial de la Federación, 5-5.

Shilstone, J. M., y International Center for Aggregates Research. (1999). *The aggregate: The most important value-adding component in concrete*. In Proceedings of the Seventh Annual Symposium International Center for Aggregates Research, Austin, Texas.

Skalny, J., Johansen, V., Thaulow, N., y Palomo, A. (1996). *DEF: Una forma de ataque por sulfatos*. *Materiales de Construcción*, 46(244), 5-29.

Standard, A. S. T. M. (2008). *ASTM C109-Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

Sun, X., Zhu, Z., Zaman, F., Huang, Y., y Guan, Y. (2021). *Detection and kinetic simulation of animal hair/wool wastes pyrolysis toward high-efficiency and sustainable management*. *Waste Management*, 131, 305-312.

Taylor, H. F. (1997). *Cement chemistry* (Vol. 2, p. 459). London: Thomas Telford.

Tobler, D. J., Stefansson, A., y Benning, L. G. (2008). *In-situ grown silica sinters in Icelandic geothermal areas*. *Geobiology*, 6(5), 481-502.

Troyano-Moreno, M. (2019). *Componentes del hormigón*.

Türkel, S. E. L. Ç. U. K., Felekoğlu, B., y Dulluc, S. (2007). *Influence of various acids on the physico-mechanical properties of pozzolanic cement mortars*. Sadhana, 32(6), 683-691.

Viera, S. M. M., Ruiz, J. C. G., y Terrades, A. M. (2014). *Estudio microestructural y de los procesos de hidratación de cementos con adiciones*. ETSI Caminos, Canales y Puertos (UPM).

Vílchez Maldonado, S. (2005). *Nuevos tratamientos de lana con enzimas*.

Xargay, H., Ripani, M., Sambataro, L., y Folino, P. (2016). *Degradación del hormigón frente a altas temperaturas*. Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Yam, J. L. C., Carcaño, R. S., y Moreno, É. I. (2003). *Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto*. Ingeniería, 7(2), 39-46.

Zhang, B., Bicanic, N., Christopher, J. P., Philips, D. V., 2002. *Relationship between brittleness and moisture loss of concrete exposed to high temperatures*. Cement Concrete Res. 32, 363–371.