



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

Estudio del comportamiento mecánico y físico de morteros modificados con desecho de lana mineral

T E S I S

Para obtener el grado de:
Maestro en Metalurgia e Ingeniería de Materiales

Presenta:
Ing. Oscar Eliécer Ojeda Pérez

Asesora:
Dra. Juana María Miranda Vidales



AGRADECIMIENTOS

Agradezco incansablemente a DIOS y a mi Señor Jesucristo por la fortaleza y el darme nuevas fuerzas en los momentos más oscuros cuando los esfuerzos humanos no eran la solución ni la respuesta a lo que parecía una historia sin fin.

A mi amada esposa Diana Marcela, quien siempre estuvo allí en los momentos difíciles para levantarme y contagiarme con su enorme fe. Por ser refugio de mis lamentos, y por su complicidad en mis deseos.

A mi hermosa hija Danna Isabella, quien cada día con su hermosa sonrisa, amor y naturalidad me llena de motivos para continuar.

A mis padres, Fanny Leonor Pérez y Eliécer Ojeda, quienes siempre me han apoyado incondicionalmente, pero sobre todo, me han bendecido con su amor.

A mi hermana Zaida, por inquietarme, por sus correcciones y por ser la causante de esta aventura.

A mi cuñado Agobardo y a mis sobrinos Zara y Manuel, por su paciencia y su compañía.

A mi hermano Didier que me ha demostrado que con esfuerzo todo es posible.

A mis compañeros de postgrado y ahora amigos, María Guadalupe Hernández y Edwing Rogelio Salazar. Inmensas gracias por su apoyo incondicional tanto en lo académico como en lo personal. Gracias por mostrarme y enseñarme lo más hermoso de México, la calidez y hospitalidad de su gente. Gracias por su compañía y por darle el mayor valor agregado a todo el tiempo invertido en este trabajo, su amistad.

La presente tesis se realizó con el apoyo por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) mediante la beca No. 662172. Por lo anterior agradezco al CONACYT.

La culminación de este trabajo de investigación es el reflejo de más de un año trabajo y de la colaboración tanto de instituciones como de profesionales que

me brindaron su apoyo y compartieron sus conocimientos, a quienes también quiero agradecer fervientemente.

Especial agradecimiento a la Dra. Juana María Miranda Vidales, asesora de este trabajo, por su orientación, apoyo y por facilitarme los medios para el desarrollo de mi investigación, pero sobre todo, por su tiempo y su enorme paciencia para conmigo.

A mis sinodales, la Dra. Lilia Narváez Hernández y el Dr. Jorge García Rocha, por transmitirme sus conocimientos y por los valiosos aportes que sin duda enriquecieron esta investigación, pero sobre todo por su tiempo y esfuerzo en hacer de mí un mejor profesional y una mejor persona.

Al Dr. Rafael Mercado Solís, de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México, por su incondicional apoyo, amabilidad y cordialidad al abrirme las puertas de su laboratorio y darme acceso los equipos empleados en la caracterización térmica de los materiales.

A la M.C. Rosalina Tovar por su apoyo con los análisis de Difracción de Rayos X.

Al Ing. Fernando Rodríguez por su asistencia en los análisis de Microscopía Electrónica de Barrido.

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

Al señor Alfredo Ruiz Prado, por su apoyo y orientación en el uso de los equipos de corte, desbaste y preparación de muestras.

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 su dedicación y contribuir con sus conocimientos a mi formación profesional.

Dedicado al hacedor de milagros.

*SOLO ÉL ME HA DADO LA VICTORIA EN TIEMPOS
DE LOCURA Y DESESPERACIÓN.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
INTRODUCCIÓN.....	III
CAPÍTULO I. ASPECTOS GENERALES SOBRE LA INFLUENCIA DE LOS AGREGADOS EN LAS PROPIEDADES DE LOS MORTEROS BASE CEMENTO.	1
1.1. COMPONENTES DEL CONCRETO E INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES FINALES.....	1
1.1.1. El cemento Portland como aglomerante: tipos de cemento y mecanismo de endurecimiento.....	2
1.1.2. Los agregados en el concreto.....	7
1.1.3. Características e influencia del agregado fino en la resistencia a la compresión del concreto.....	10
1.1.4. Algunos desechos industriales usados como agregados alternativos en el concreto.	11
1.2. DESECHO INDUSTRIAL DE LANA MINERAL (DLM) EN EL CONCRETO.	13
1.2.1. Producción de lana de mineral.....	14
1.2.2. Generación del Desecho de Lana de Mineral (DLM).	16
1.2.3. Desechos de lana mineral en compuestos base cemento.....	16
1.3. PROPIEDADES TÉRMICAS DEL CONCRETO.....	17

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DEL DESECHO DE LANA MINERAL EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS MORTEROS BASE CEMENTO.....20

2.1. MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DE MORTEROS MODIFICADOS CON DESECHO DE LANA MINERAL.20

2.2. TÉCNICAS Y MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS FINOS.....22

2.2.1. Análisis granulométrico de la arena y del Desecho de Lana Mineral (DLM).22

2.2.2. Determinación de la densidad, gravedad específica y absorción de los agregados finos (arena y el DLM).23

2.2.3. Análisis del DLM y de la arena mediante Difracción de Rayos X.24

2.2.4. Análisis químico del DLM y de la arena.25

2.2.5. Análisis de la morfología de las partículas de los agregados mediante Microscopia Electrónica de Barrido.25

2.3. ELABORACIÓN DE MORTEROS Y DETERMINACIÓN DEL EFECTO DEL DLM EN SUS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS.....25

2.3.1. Probetas para análisis de Resistencia a la Compresión, Porosidad, Absorción y Densidad.....26

2.3.2. Probetas para análisis de resistencia a la flexión.....27

2.3.3. Probetas para análisis de las propiedades térmicas de morteros con DLM.....28

2.3.4. Determinación de la influencia del DLM sobre la absorción, densidad y porosidad del mortero.29

2.3.5. Determinación de la Resistencia a la Compresión de morteros modificados con DLM.....30

2.3.6. Determinación de la Resistencia a la Flexión de morteros modificados con DLM.....31

2.3.7. Determinación de las propiedades térmicas de morteros con DLM por el método transitorio de puente caliente (*THB - Transcient Hot Bridge*).32

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL EFECTO DE LA ADICIÓN DEL DESECHO DE LANA MINERAL EN LOS MORTEROS BASE CEMENTO....	36
.....	36
3.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS	36
3.1.1. Distribución de tamaño de partícula del DLM y de la arena.....	37
3.1.2. Densidad, gravedad específica y absorción de la arena y el Desecho de Lana Mineral (DLM).	38
3.1.3. Cristalinidad del DLM y de la arena.	39
3.1.4. Composición química del Desecho de Lana Mineral (DLM) y de la arena.	41
3.1.5. Morfología de las partículas de Desecho de Lana Mineral.	41
3.2. EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL DLM SOBRE LA POROSIDAD, ABSORCIÓN Y DENSIDAD DE LOS MORTEROS.	47
3.3. INFLUENCIA DEL DESECHO DE LANA MINERAL EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MORTEROS.....	49
3.4. EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL DESECHO DE LANA MINERAL (DLM) SOBRE LA RESISTENCIA MECÁNICA A LA FLEXIÓN DE MORTEROS.	55
3.5. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL DESECHO DE LANA MINERAL (DLM) SOBRE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MORTEROS.....	59
CONCLUSIONES	63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

RESUMEN

El uso de desechos sólidos industriales como reemplazo de las materias primas naturales de compuestos base cemento, es una buena alternativa para contribuir a la problemática ambiental actual. Este trabajo tiene como objetivo usar Desecho industrial de Lana Mineral (DLM) para sustituir el agregado fino natural (arena) en morteros base cemento y evaluar su influencia en las propiedades físicas y mecánicas del nuevo compuesto. Se elaboraron probetas de mortero con una relación cemento/agregado fino/agua de 1/2.75/0.485, respectivamente, sustituyendo el 15, 30, 45 y 60% de la arena por DLM.

Se determinó el efecto del DLM sobre las propiedades de los morteros. La densidad, absorción y porosidad se determinó de acuerdo a 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 la resistencia a la flexión fue determinada de acuerdo a la norma ASTM C348. Las propiedades térmicas de los morteros, como conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico, fueron determinadas mediante la técnica de Puente Caliente en estado Transitorio (*THB*, por sus siglas en inglés).

Los resultados de las pruebas sobre los morteros muestran que al sustituir hasta el 60% del agregado fino natural (arena) por DLM, se reduce la porosidad del mortero, aumenta su densidad, mejora la resistencia a la compresión e incrementa su resistencia a la flexión. Por su parte, el comportamiento térmico de los morteros con DLM se mantuvo dentro de los valores típicos reportados para los morteros tradicionales.

ABSTRACT

The use of industrial solid waste as a replacement for the natural raw materials of the cementitious materials, is a good alternative to contribute to the actual environmental problems. In this study, the Mineral Wool Waste (MWW) was used to substitute the natural fine aggregate (sand) in cement-based mortars, and to evaluate their influence on the mechanical and physical properties of the new composite. Mortar specimens with a cement/fine aggregate/water ratio of 1/2.75/0.485, respectively, were prepared, replacing 15, 30, 45 and 60% of the sand by MWW.

The effect of MWW on the properties of mortars was determined. Density, absorption and porosity were determined in accordance with the American Society of Testing Materials (ASTM) standard C642; the compressive strength was determined according to ASTM C109 and the flexural strength was determined in accordance with ASTM C348. The thermal properties of the mortars, such as thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat, were determined by the Transient Hot Bridge (THB) technique.

The test results show that the replacement up to 60% of natural fine aggregate (sand) by MWW, it reduces the porosity of the mortar, increases its density, improves the compressive strength and increases its resistance to flexion. On the other hand, the thermal behavior of the mortars with MWW remained within the typical values reported for traditional mortars.

INTRODUCCIÓN

Anualmente se consumen alrededor de 25 billones de toneladas de concreto a nivel mundial, convirtiéndolo en el material de mayor consumo después del agua [1]. Los agregados en el concreto ocupan entre el 60 al 75% de su volumen [2]. El procesamiento, transformación y transporte de estas enormes cantidades de materias primas no renovables, hace responsable a la industria de la construcción de al menos el 30% de la huella global de carbono [3], y genera sólo en Europa, alrededor del 40% de los desechos sólidos[1], cifra que va en aumento y hace cada vez más difícil su manejo y disposición final. Por lo anterior, muchas investigaciones han buscado sustituir los agregados tradicionales del concreto por materiales reciclados. Así, otros países se han permitido el uso de hasta el 30% de agregados reciclados en la fabricación de concreto convencional, dado que con el tratamiento adecuado, su comportamiento mecánico es similar al elaborado con agregados vírgenes[1].

Estudios recientes han demostrado que utilizar los Desechos de Lana Mineral (DLM) provenientes de la elaboración de aislantes térmicos, pueden ser una alternativa como agregados a los concretos tradicionales. En el año 2011, Cheng *et. al* [4], sustituyeron hasta un 10% el volumen del concreto por desechos de lana de roca (un tipo de Lana Mineral), con tamaños de partícula entre 17 a 250 μm . Se reportó mejoras en la resistencia a la compresión, en la resistencia a la tracción indirecta, en la resistencia a la abrasión y en la durabilidad del compuesto. Más recientemente, en el año 2013, Lin *et. al* [5] sustituyeron, hasta un 40% en peso, el cemento de los morteros por partículas de lana de roca con tamaño máximo de 75 μm . Se evidenció que las partículas de lana de roca mejoraron la resistencia a la compresión y redujeron la penetración de cloruros.

Por otro lado, el comportamiento térmico de un material utilizado para construcción, es de gran importancia, ya que está ligado al diseño de la vivienda con el fin de crear espacios habitables confortables con el menor consumo de energía posible. Así, parámetros como la conductividad térmica, la difusividad térmica y el calor específico, son fundamentales en el diseño de edificaciones ambientalmente amigables [6, 7]. Adicionalmente, si las

propiedades térmicas del compuesto son variadas en mayor grado por la adición de materiales alternativos a los tradicionales, esto puede repercutir en su comportamiento ante fenómenos como retracción por cambios de temperatura, o crear gradientes de temperatura que puede afectar la durabilidad del concreto [8, 9].

Sin embargo, es necesario continuar con la búsqueda de materiales alternativos que puedan sustituir a los agregados finos y gruesos, aprovechando materiales de desecho industrial que puedan cumplir con las características requeridas dentro del ámbito de la construcción y que contribuya a mitigar la explotación de recursos naturales. En este trabajo se propone la utilización de un material de Desecho de Lana Mineral (DLM) proveniente de la fabricación de materiales aislantes térmicos, para sustituir a la arena natural empleada en la elaboración de morteros base cemento.

Como objetivo principal de esta investigación, se plantea estudiar la influencia del Desecho de Lana Mineral (DLM) en las propiedades mecánicas y físicas de morteros base cemento, al sustituir hasta el 60% del agregado fino por DLM.

En el capítulo uno de esta tesis se describe los aspectos generales sobre la influencia de los agregados en las propiedades de los morteros base cemento y de algunos desechos industriales que se han empleado para sustituir los agregados tradicionales del concreto (arena, grava). En el capítulo dos se describen los materiales usados en esta investigación y los métodos empleados para determinar la influencia de la adición de DLM en el comportamiento de los morteros base cemento. En el capítulo tres se analizan y se discuten los resultados obtenidos en las pruebas mecánicas y físicas realizadas. Finalmente se presentan las conclusiones más importantes de este trabajo.

CAPÍTULO I. ASPECTOS GENERALES SOBRE LA INFLUENCIA DE LOS AGREGADOS EN LAS PROPIEDADES DE LOS MORTEROS BASE CEMENTO.

En este capítulo se describen los principales componentes del concreto. Se hace un estudio de sus características y de su influencia en las propiedades de este material. También se hace una descripción de algunos desechos industriales que se han empleado para sustituir los agregados tradicionales del concreto (arena, grava).

1.1. COMPONENTES DEL CONCRETO E INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES FINALES.

Aglomerante (generalmente cemento Portland), agregados (ya sean finos como la arena o gruesos como la grava) y agua, son los principales componentes del concreto. Cada uno de estos materiales (teniendo en cuenta sus propiedades físicas, químicas, mecánicas, distribución de tamaño, etc.), influyen en las propiedades físicas y mecánicas del concreto. Muchas de las propiedades en el concreto se pueden establecer variando el tipo de agregado, su distribución de tamaño, su forma, incluyéndolos en el concreto como fibras (metálicas[10], poliméricas y orgánicas[11, 12]), o con agregados porosos y de bajo peso para los concretos ligeros. Algunos investigadores han sustituido el agregado grueso del concreto por agregados orgánicos reciclados como la cáscara de la fruta de la palma de aceite, logrando reducir el peso unitario del concreto a valores por debajo de 1990 kg/m³, y aun así logrando resistencias a la compresión de hasta 48 MPa a los 28 días de curado [13].

Aquellos concretos fabricados con materiales reciclados, se les conocen como Concretos Verdes [14], y se han convertido en una verdadera herramienta ambiental, al servir de “recipiente” de muchos materiales de desecho.

Los concretos de mayor uso se conocen como concretos convencionales, cuya resistencias a la compresión están entre los 21 y 55 MPa [15]. Aquellos cuya resistencia es superior a 55 MPa, de acuerdo al Instituto Americano del Concreto, se conocen como concretos de alta resistencia [16].

1.1.1. El cemento Portland como aglomerante: tipos de cemento y mecanismo de endurecimiento.

El cemento Portland es el aglomerante de mayor uso en la actualidad. También es, entre los componentes del concreto, el que en su producción genera la mayor parte de gases invernadero. Se le ha calificado como ambientalmente no amigable, ya que por cada tonelada de cemento Portland producida, se genera una tonelada de gases de efecto invernadero[17].

Se puede considerar al concreto un compuesto multifásico. El cemento, junto con los agregados finos, forman la fase matriz del concreto que envuelve al agregado grueso o fase refuerzo. A su vez, en el mortero, el agregado fino es refuerzo de la pasta que se crea cuando el cemento es hidratado. De los componentes del concreto, el cemento desempeña un papel primordial, es el responsable de unir a los agregados y finalmente del endurecimiento de la mezcla. La Fig. 1 muestra la sección transversal de dos tipos de concreto (izquierda – con agregados redondeados; derecha – con agregados triturados), donde se observa a la fase matriz (arena-cemento) envolviendo a los agregados (fase refuerzo). En la macro estructura se puede observar la distribución de tamaño de los agregados y su forma, que afecta la trabajabilidad de la mezcla y la resistencia a la compresión del concreto.

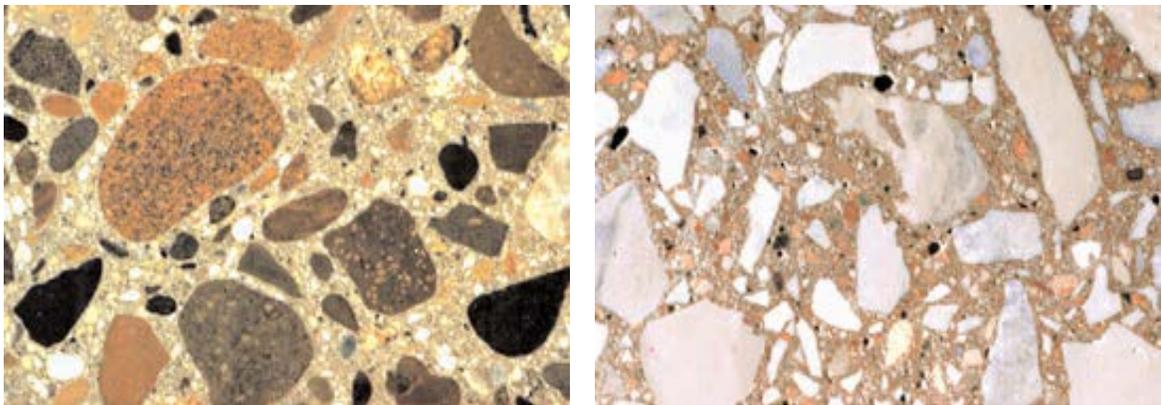


Fig. 1. Apariencia física del concreto en estado endurecido. Izq. Agregados redondeados. Der. Agregados triturados [2].

El principal componente del concreto es el clinker, que es producto del sinterizado a alta temperatura (aproximadamente 1450 °C) principalmente de calizas y marga (un tipo de roca sedimentaria compuesta principalmente de calcita y arcillas). La composición típica del clinker contiene aproximadamente 67% de Cal (CaO), 22% de Sílice (SiO₂), 5% de Alúmina (Al₂O₃), 3% de Óxido de Hierro (Fe₂O₃), y 3% de otros componentes menores [18, 19]. La combinación de estos materiales en cantidades específicas, da

origen a los cuatro principales compuestos del clinker (ver Tabla 1). Finalizando el proceso de producción del clinker, se le adiciona sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), comúnmente conocido como yeso, u otras fuentes de sulfato de calcio. La adición de yeso es fundamental en el cemento, ya que ayuda a controlar (retardar) el inicio del fraguado, la retracción por fraguado y puede influir en la resistencia mecánica.

Tabla 1. Principales compuestos del clinker [19, 20].

Nombre	Formula Química	Abreviatura	Contenido
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	50 – 80%
Silicato Dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	2 – 30%
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	0 – 14%
Aluminoferrito Tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	5 – 15%

A. Tipos de cemento portland y sus características especiales.

Las propiedades finales del cemento, pueden ser establecidas mediante el ajuste de su composición química, y/o la adición de ingredientes complementarios a su material base, el clinker. Lo anterior, da lugar a que exprese en mayor o menor grado unas propiedades que otras, y de allí, que se clasifique generalmente en cinco tipos. En la Tabla 2 se enuncian los tipos de cemento de acuerdo a la norma ASTM C150 [21]. Adicionalmente, esta tabla describe sus características especiales y sus principales usos [2, 18]. Las propiedades especiales de los diferentes tipos de cemento Portland, se orientan hacia mejorar la resistencia mecánica (adicionando materiales que promuevan el mayor desarrollo de Silicatos de Calcio Hidratados – SCH, principal promotor del endurecimiento del cemento), aumentar su resistencia a ambientes agresivos que contienen sulfatos (controlando la presencia máxima de C_3A a valores no mayores al 8%), así como también a controlar el calor de hidratación que puede causar agrietamientos en el concreto por esfuerzos internos generados a causa de los altos gradientes de temperatura entre la superficie y el centro de la masa [2].

Por lo anterior, el cemento de mayor uso en la elaboración de concreto convencional es del Tipo II. En México, este tipo de cemento se conoce con la referencia CPC (Cemento Portland Compuesto)[22, 23]. Sus principales componentes se listan en la Tabla 3, que también muestra la composición de otros tipos de cemento de uso a nivel nacional.

Tabla 2. Tipos de cemento Portland de acuerdo a la norma ASTM C150 [21] – Descripción y Uso [2, 18].

Tipo de cemento ¹	Denominación	Características especiales	Usos más comunes
I – IA	Cemento Portland.	Normal.	Adecuado para todos los usos cuando no se requieren propiedades especiales.
II – IIA	Cemento Portland con adiciones.	Moderada resistencia a los sulfatos. – Moderado calor de hidratación.	Para uso general. Especialmente en ambientes con presencia moderada de sulfuros (agua de mar – 150 a 1500 ppm de SO ₄ ; suelo con 0.10 a 0.20% en peso de SO ₄). Su resistencia a los sulfuros se da por el bajo contenido de C ₃ A (Aluminato Tricálcico) que reaccionan con los sulfuros del ambiente (suelo, agua, etc). Concretos expuesto a agua de mar. Cuando se requiere moderado calor de hidratación.
III	Cemento Portland con escoria de alto horno.	Alta resistencia a edades tempranas.	Adecuado cuando se requiere alta resistencia inicial (una semana). Muy similar al Tipo I (físicoquímicamente), solo que sus partículas son más finas y las reacciones de hidratación son más eficientes y rápidas. Elementos prefabricados. Construcciones Verticales.
IV	Cemento puzolánico	Bajo calor de hidratación.	Adecuado cuando se requiere bajar la velocidad y el calor de hidratación. Generalmente en estructuras sólidas de grandes dimensiones (espesor mayor a 1 m). El bajo calor de hidratación ayuda a controlar los esfuerzos generados en el concreto por enfriamiento diferencial de la masa. Raramente disponible.
V	Cemento Compuesto	Alta resistencia a los sulfatos.	Ideal para construcciones en ambientes con severo contenido de sulfuros (Agua con 1500 a 10000 ppm de SO ₄ ; suelo con 0.20 a 2.00% en peso de SO ₄). La alta resistencia a los sulfuros se atribuye al bajo contenido de C ₃ A (<5%). La relación agua – cemento (a/c) usada es también un factor determinante en la resistencia a los sulfatos.

¹ La designación “A” en cada tipo de cemento, hace referencia a la posibilidad de sumar, a la característica especial mencionada, algunos aditivos incorporadores de aire.

Tabla 3. Tipos de cemento de uso estándar en México y sus principales componentes según NMX-C-414-ONNCCE-2004 [23]. (Valores en porcentaje en peso).

Tipo	Denominación	Clinker + Yeso	Escoria granulada de alto horno	Materiales puzolánicos	Humo de sílice	Caliza	Otros
CPO	Cemento Portland ordinario.	95 – 100	-	-	-	-	0 – 5
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno.	40 – 94	6 – 60	-	-	-	0 – 5
CPC	Cemento Portland Compuesto	50 – 94	6 – 35	6 – 35	1 – 10	6 – 35	0 – 5
CEG	Cemento con Escoria Granulada de alto horno.	20 – 39	61 – 80	-	-	-	0 – 5

B. Endurecimiento del cemento Portland: reacciones de hidratación.

En presencia de agua, los compuestos del cemento (Tabla 1), se hidratan y reaccionan químicamente. Los compuestos formados en estas reacciones de hidratación (Tabla 4) son los responsables del endurecimiento del cemento. Durante la hidratación, se forman geles SCH (Silicatos de Calcio Hidratado) e Hidróxidos de Calcio (HC) generados a partir del silicato tricálcico (C_3S) y del silicato dicálcico (C_2S) respectivamente, que con el tiempo forman cristales microscópicos, que luego crecen formando una intrincada red que envuelve e inmoviliza a los agregados [24]. El SCH es el principal responsable del endurecimiento del cemento. Cabe mencionar que la adición de yeso en el clinker causa que la reacción del silicato tricálcico (C_3A) con el agua no sea tan “violenta” o muy rápida. Esto se logra debido a que el yeso crea una fina capa que cubre a las partículas de silicato tricálcico (C_3A), obstaculizando temporalmente su contacto con el agua [18], lo que permite aumentar el tiempo de fraguado del cemento y por ende facilita su trabajabilidad y aplicación.

En la Fig. 2, se esquematiza el complejo proceso de hidratación del cemento. Las diferentes imágenes (Fig. 2 a–f) muestran una secuencia en el tiempo de la aparición y el crecimiento de los geles SCH [18]. La Fig. 2a muestra una partícula de cemento Portland previo al inicio de la hidratación. Luego de ser hidratada (Fig. 2b), es rodeada por la precipitación de un gel con elevado contenido de alúmina que crea una envoltura. Así, los productos de hidratación se forman al interior y exterior de dicha envoltura.

Tabla 4. Principales reacciones de hidratación del cemento Portland y sus productos [2, 24].

Compuestos y sus reacciones				Observaciones [24]
2 (3CaO•SiO ₂) Silicato Tricálcico (C ₃ S)	+ 11 H ₂ O Agua	= 2SiO ₂ •3CaO•8H ₂ O Silicato de Calcio Hidratado (SCH)	+ 3 (CaO•H ₂ O) Hidróxido de Calcio (HC)	Rápida
2 (2CaO•SiO ₂) Silicato Dicálcico (C ₂ S)	+ 9 H ₂ O Agua	= 2SiO ₂ •3CaO•8H ₂ O Silicato de Calcio Hidratado (SCH)	+ CaO•H ₂ O Hidróxido de Calcio (HC)	Lenta
3CaO•Al ₂ O ₃ Aluminato Tricálcico (C ₃ A)	+ 3 (CaO•SO ₃ •2H ₂ O) + Yeso	26 H ₂ O Agua	= 6CaO•Al ₂ O ₃ •3SO ₃ •32H ₂ O Etringita (Aft)	Muy rápida
2 (3CaO•Al ₂ O ₃) Aluminato Tricálcico (C ₂ A)	+ 6CaO•Al ₂ O ₃ •3SO ₃ •32H ₂ O + O Etringita	4 H ₂ O Agua	= 3(4CaO•Al ₂ O ₃ •SO ₃ •12H ₂ O) Monosulfoaluminato de Calcio	
3CaO•Al ₂ O ₃ Aluminato Tricálcico (C ₃ A)	+ CaO•H ₂ O Hidróxido de Calcio (CH)	+ 12 H ₂ O Agua	= 4CaO•Al ₂ O ₃ •13H ₂ O Aluminato Tetracálcico Hidratado	
4CaO•Al ₂ O ₃ •Fe ₂ O ₃ Alumino Ferrito tetracálcico (C ₄ AF)	+ 10 H ₂ O Agua	+ 2 (CaO•H ₂ O) Hidróxido de Calcio (HC)	= 6CaO•Al ₂ O ₃ •Fe ₂ O ₃ •12H ₂ O Alumino ferrito de calcio hidratado.	
CaO	+ H ₂ O Agua		= Ca(OH) ₂ (HC)	Expansiva
Mg	+ H ₂ O Agua		= Mg(OH) ₂	Muy Lenta Expansiva

NOTA: La notación se da en Óxidos. La composición del SCH no es estequiométrica.

Aproximadamente 10 horas después de la hidratación, comienza el crecimiento del SCH (Fig. 2c) a partir de los núcleos de trisulfato o etringita (denotados como Aft), que se generan en forma de barras a partir de la reacción del C₃A con los iones de sulfato del yeso. Después de 18 horas de la hidratación (Fig. 2d) la partícula de cemento se va consumiendo, otras fracciones de C₃A, C₂A y Aft son alcanzadas por el agua y se comienza una nueva hidratación formando SCH dentro de la envoltura. Pasados 1 a 3 días, (Fig. 2e) cuando el yeso ha sido consumido, los iones de alúmina reaccionan con la etringita creando un monosulfato (C₃A.CaSO₄.12H₂O) en forma de placas hexagonales denominado AFm, que nuclean dentro de la envoltura, y a partir de ellos se desarrollan SCH internos. Finalmente el SCH se desarrolla

y crece en todas direcciones (Fig. 2f), lo que genera una red que rodea a los agregados y finalmente endurece haciendo al compuesto monolítico [18]. Si el tamaño de la partícula de cemento es muy grande (mayor a 100 micras), es posible que no se de la transformación del 100% de la misma, ya que el agua puede no llegar hasta su interior. Esto repercute en bajas resistencias mecánicas en el concreto [15].

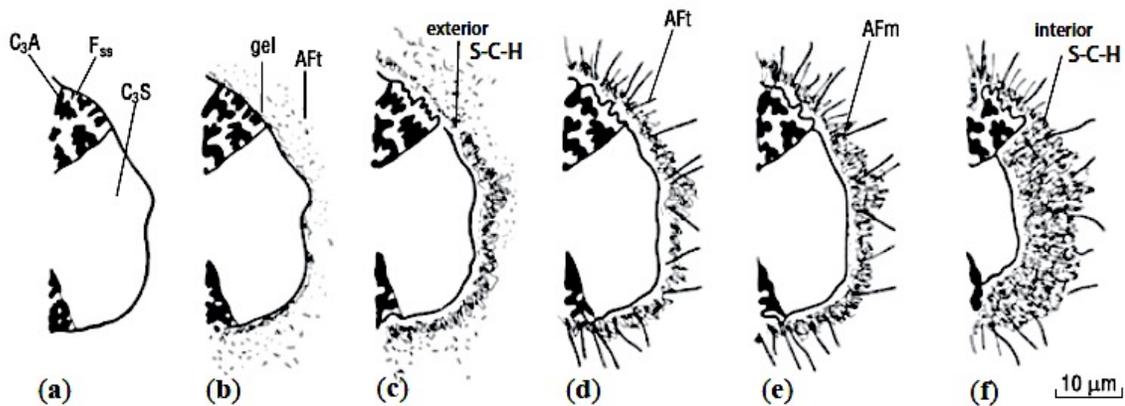


Fig. 2. Desarrollo de la microestructura del cemento Portland durante la hidratación [18].

1.1.2. Los agregados en el concreto.

Los agregados en el concreto ocupan entre el 60 al 75% de su volumen (ver Fig. 3) [2, 25]. Hay una gran variedad de agregados de uso en el concreto, desde los tradicionales como arena y grava, pasando por algunos más exóticos como arenas procesadas con diámetros inferiores 75 μm de uso común en concretos de alto desempeño [26], hasta los Agregados Reciclados de Concreto (ARC) que sustituyen a las materias primas naturales.

Los agregados desempeñan un papel fundamental en el concreto, son fase refuerzo tanto de la matriz (agregado fino) como del compuesto en general (agregado grueso). Las propiedades del concreto tienen una gran dependencia de los agregados. Kaplan [27], experimentó con 13 tipos de agregados y observó diferencias en la resistencia a la flexión y a la compresión del concreto de hasta el 40% y el 29% respectivamente. Concluyó que la forma, rugosidad de la superficie y el módulo de elasticidad de los agregados, fueron los principales factores que influenciaron la resistencia del material.

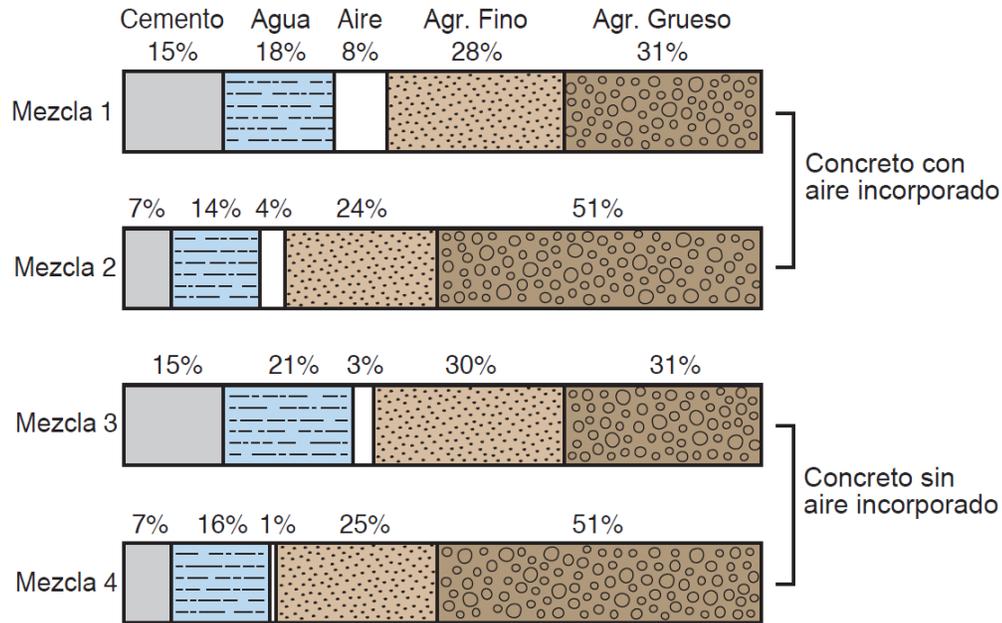


Fig. 3 Distribución de los componentes del concreto en volumen [2].

En los concretos convencionales, se considera agregado grueso, todas aquellas partículas de tamaño superior a 4.75 mm (tamiz #4), y fino, aquellas entre el tamiz #4 y el tamiz #200 [28].

La norma ASTM C33 [29], especifica las características que el agregado debe cumplir. Algunos parámetros a tener en cuenta en la selección de los agregados son:

- **Su composición:** Se deben elegir agregados que no sean reactivos ni contengan altos contenidos de fluoruros o sulfuros, ya que estos pueden reaccionar con los componentes del cemento y promover el desarrollo excesivo o ralentizado de algunas fases del cemento cuya cinética de formación es muy lenta, que pueden afectar al material, debido a que su desarrollo trae consigo un cambio volumétrico que puede generar fisuras en el concreto [15, 29].
- **Resistencia Mecánica:** Se deben evitar agregados fracturados, ya que los mismos son fuente de futuras fisuras internas del concreto. A mayor resistencia mecánica del agregado, generalmente, mayor resistencia del concreto. En la Fig. 4, se muestra un modelo planteado por Zaitsev y Wittmann [30], donde se esquematiza el inicio y la propagación de las fisuras en el concreto teniendo en cuenta la resistencia mecánica de los agregados. En los concretos convencionales, si el agregado es de menor resistencia mecánica que la pasta de cemento, las fisuras se pueden

propagar a través del mismo. Caso contrario, el agrietamiento se puede transmitir preferencialmente por la periferia del agregado. Esta zona alrededor de los agregados se conoce como Zona de Transición Interfacial (ZTI) pasta/agregado, y se considera la zona de menor resistencia mecánica en los concretos convencionales debido a su alta porosidad [26].

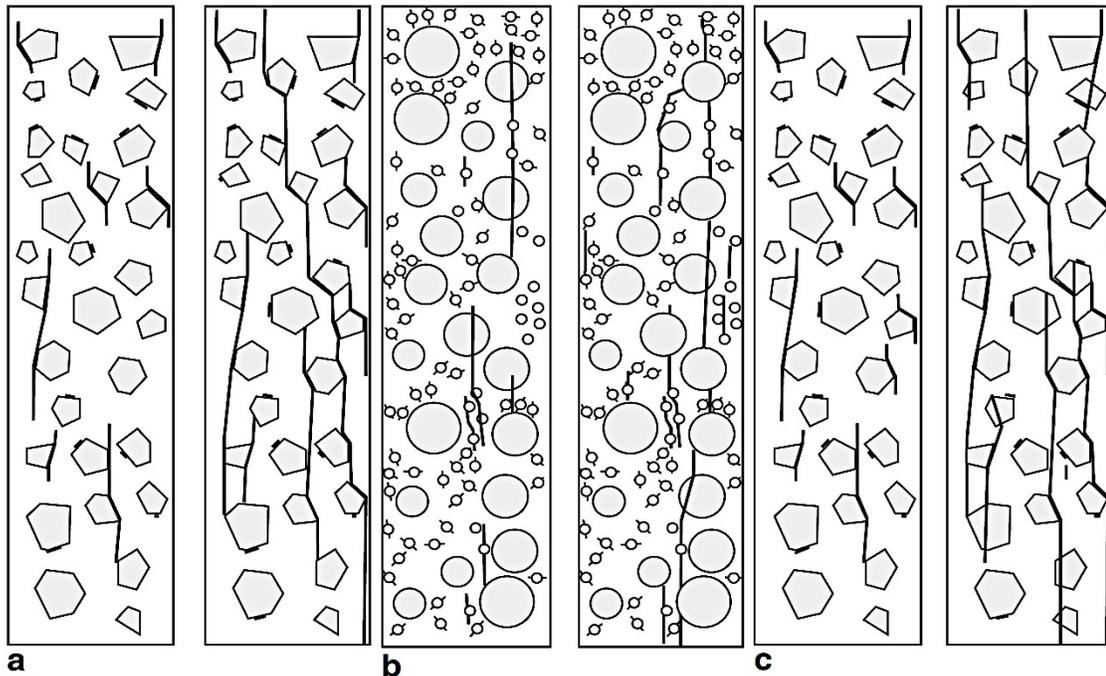


Fig. 4. Modelo de propagación de fisuras en diferentes tipos de concretos. **a.** Concreto Convencional (las fisuras se propagan bordeando el agregado). **b.** Concreto Ligero (la fisura corre a través del agregado – agregado de menor resistencia por su alta porosidad). **c.** Concreto de alta resistencia (las fisuras inician en la ZTI y se propagan por la ZTI y a través de algunos agregados – la unión de la pasta al agregado es de mayor resistencia) [18].

- **Forma:** Los agregados redondeados por lo general presentan una superficie lisa respecto a los triturados. Esto ocasiona que la adhesión física causada por la fricción entre el agregado y la pasta de cemento pueda ser menor lo que puede repercutir en la resistencia mecánica del concreto [31]. Sin embargo, los agregados redondeados aumentan la trabajabilidad del concreto [2] lo que puede permitir una reducción en la cantidad de agua de amasado y por ende reducir la porosidad del material logrando un material más denso y con mejor desempeño mecánico.

La Fig. 5, muestra la amplia gama de tamaños de partícula que han sido empleados en la elaboración de concretos. Se incluyen aquellos como la nano sílice, que ha sido usada como agente nucleante para el crecimiento de las fases del cemento, así como para llenar vacíos y reforzar la Zona de Transición Interfacial (ZTI) pasta/agregado [26].

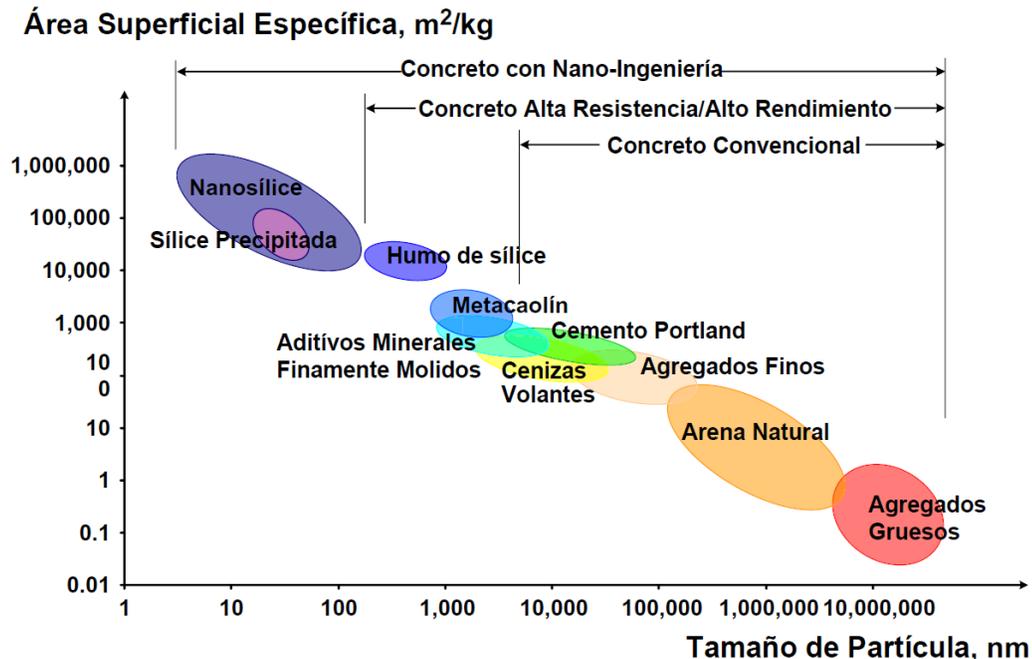


Fig. 5. Rango de tamaños de partícula y área superficial de algunos materiales usados en la elaboración de concretos [32].

1.1.3. Características e influencia del agregado fino en la resistencia a la compresión del concreto.

El Agregado Fino, cumple la función de reforzar la pasta de cemento generada a partir de las reacciones de hidratación. Jiménez Montoya *et. al* [15], consideran al agregado fino “*el árido de mayor responsabilidad. A diferencia de la grava, el agua e incluso el cemento, se puede decir que no es posible hacer un buen hormigón sin una buena arena*”. El agregado fino junto con el cemento forman lo que se conoce como mortero, que envuelve al agregado grueso y evita que los componentes se disgreguen (en estado fresco), y cuando endurece, mantiene al compuesto como monolito. Adicionalmente, es responsable de la durabilidad del concreto la cual está ligado a la porosidad del mismo. Una adecuada distribución del tamaño de partícula del agregado fino es fundamental, ya que de esto depende que el agregado desarrolle un

adecuado efecto llenador de vacíos, lo que hace a la mezcla un material más denso. Esta densificación, por lo general, repercute en una resistencia a la compresión más elevada y disminuye su susceptibilidad al ataque de agentes ambientales agresivos. Así, se podría decir que entre los agregados, el agregado fino es responsable, en mayor parte, de controlar la porosidad y absorción de humedad del concreto, e influye en su resistencia mecánica, dado que refuerza la pasta de cemento que comúnmente tiene menor resistencia que el agregado grueso.

De acuerdo a la norma ASTM C125 [28], se considera agregado fino a aquellas partículas que pasan el tamiz #4 (4.75 mm) y son retenidas en el tamiz #200 (75 μm). Como se muestra en la Fig. 5, conforme disminuye el tamaño de las partículas, su área superficial aumenta; una mayor área superficial del agregado fino en el concreto representa mayor cantidad de agua de amasado. Por lo anterior, el límite máximo para las partículas más finas a 150 μm de arena, es de 10% en peso del material. Los concretos que contiene elevada cantidad de partículas de agregado más finas a 150 μm , son de difícil manejabilidad y requieren mayor cantidad de agua, lo que significa, mayor porosidad y por ende menor resistencia mecánica [29].

1.1.4. Algunos desechos industriales usados como agregados alternativos en el concreto.

La masificación del uso de agregados alternativos a los de origen natural (consideradas materias primas no renovables), debe ser una práctica que todos los ingenieros tienen que contemplar. Ser conscientes del gran impacto ambiental que causa la industria de la construcción (más del 30% de la huella global de carbono[33]), debe ser motivo de innovación en la selección de materiales alternativos, a la vez que es una práctica que adicionalmente puede resultar atractiva económicamente. Muchos trabajos se han realizado respecto al uso de agregados reciclados. En países como Estados Unidos ya se ha normalizado su uso para la construcción de carreteras [34]. Lamentablemente esta práctica aún no es una tendencia debido al relativo bajo costo de los agregados.

A continuación, se listan algunos agregados reciclados y se muestra su influencia sobre las propiedades del concreto.

Agregados Reciclados de Concreto (ARC): Este tipo de agregados provienen principalmente de la demolición de estructuras, ya sean edificios, pavimentos, etc. En el año 2009, en Europa, Estados Unidos y Japón, se generaron alrededor de 900 millones de toneladas de desechos de construcción [1].

Debido a los resultados de muchas investigaciones que demostraron su factibilidad técnica como sustitutos de los agregados tradicionales del concreto y los consecuentes beneficios en ahorro de energía y reducción de emisiones, los Agregados Reciclados de Concreto se han convertido en la primera fuente de agregados reciclados para concreto. Por lo general, este tipo de agregados presentan una alta absorción de humedad respecto de los naturales causando una reducción de la trabajabilidad del compuesto; esto repercute en mayor cantidad de agua para el amasado por lo cual es normal el uso de súper plastificantes en su preparación [2]. La resistencia mecánica del concreto con estos agregados es adecuada para aplicaciones como pavimentos, rellenos y otros; e inferior a la de los concretos con agregados nuevos [35, 36]. Para aplicaciones estructurales, es posible sustituir hasta el 20% de los agregados naturales por Agregados Reciclados de Concreto [1].

Agregados reciclados a partir de caucho de neumático. Varias investigaciones se han hecho agregando partículas de caucho al concreto como sustitutos de los agregados. Siddique *et. al* [37] revisó alrededor de 25 investigaciones al respecto. Sus conclusiones muestran que, por su composición, el principal campo de aplicación son los concretos asfálticos de uso en la construcción de carreteras. Cuando las partículas de caucho sustituyen a los agregados naturales del mortero en bajos porcentajes (menores al 10% en peso) se ha conseguido mejorar su trabajabilidad; sin embargo, con mayores porcentajes de sustitución en los morteros esta propiedad decrece gradualmente y se pierde casi en su totalidad con un 40% de sustitución. El tamaño, proporciones y la textura de la superficie de las partículas del caucho, determinan en mayor grado el efecto sobre la resistencia mecánica del concreto, esto debido a la pobre adherencia entre el caucho y la pasta de cemento por sus marcadas diferencias en composición química. Sustituir el 100% del agregado grueso por partículas de caucho, representa una pérdida de la resistencia mecánica del 85%. El efecto fue menor al sustituir el total del agregado fino con una pérdida de resistencia mecánica del 50%. Sin embargo, otras propiedades fueron mejoradas: menor peso unitario, resistencia a los impactos y tenacidad, ductilidad y aislamiento acústico. Otras investigaciones han mostrado que el concreto base cemento de oxiclورو de magnesio al adicionarse con partículas de caucho, puede exhibir hasta 2.5 veces mayor resistencia a la compresión que el concreto convencional [37]. Corinaldesi *et. al* [38], sustituyó agregado fino por partículas de poliuretano. Cuando se sustituyó el agregado fino hasta el 30% en volumen de los agregados, se redujo hasta un 20% el peso unitario y la conductividad térmica (2031 a 1621 kg/m³ y 0.739 a 0.598 W/mK respectivamente) del compuesto base cemento Portland con una afectación de la resistencia a la compresión del 50%.

Agregado fino reciclado de arena de fundición. Los concretos de Alta Resistencia demandan materias primas con especificaciones mayores a las otorgadas por los agregados tradicionales. Uno de los materiales de reciclaje que puede cumplir con estos requerimientos es la arena de fundición. Guney *et. al* [39], sustituyeron la arena natural hasta por un 15% de arena reciclada de fundición. Encontraron en todos los casos que esta arena disminuye la trabajabilidad del material en estado fresco por el elevado contenido de partículas más finas que 150 μm . Al sustituir el 10% de la arena tradicional por arena reciclada de fundición se mantuvo la resistencia a la compresión de la mezcla en rangos similares a las muestras testigo, logrando valores de resistencia de hasta 60 MPa. Cuando el concreto fue sometido a ciclos de congelación y descongelación, se observó que en todos los casos, hubo una menor resistencia a la compresión que las muestras testigo. Finalmente, concluyeron que, con un 10% de sustitución de agregado fino por arena reciclada de fundición, las propiedades finales de la mezcla permiten su uso como concretos de alta resistencia.

1.2. DESECHO INDUSTRIAL DE LANA MINERAL (DLM) EN EL CONCRETO.

El término “lana mineral” abarca varios productos de uso en la industria de aislantes térmicos. Dentro de ellos se encuentran la Lana de Roca, Lana de Escoria y Lana de Vidrio. Esta clasificación tuvo en cuenta las materias primas de cada material y su composición química final como producto, en donde el óxido de silicio (SiO_2) y el óxido de calcio (CaO) predominan en la lana de roca y lana de escoria, mientras que el óxido de silicio y el óxido de aluminio (Al_2O_3) en la lana de vidrio [40]. Teniendo en cuenta esto, Sirok *et. al* [41], sugieren el uso del término “lana mineral” para referirse mas específicamente a la lana de roca y lana de escoria cuya composición química es más semejante entre ellas como se muestra en la Tabla 5.

Se puede decir que toda industria genera desechos, los cuales deben ser tratados, movilizados y depositados de acuerdo a normativas establecidas por los gobiernos para mitigar su impacto ambiental. Se han realizado muchas investigaciones que buscan encontrar un uso adecuado para los desechos industriales con el fin lograr procesos más eficientes y sustentables. Es así como recientes investigaciones han incluido a la lana mineral como material de sustitución de los componentes tradicionales del concreto [4, 5].

Tabla 5. Composición química típica de las lanas minerales [41].

Componente	Lana de Escoria	Lana de Roca
SiO ₂	32-41	40-52
CaO	27-40	10-12
MgO	4-13	8-15
Al ₂ O ₃	8-15	8-13
K ₂ O	0-0.5	0.8-2
Na ₂ O	0-0.2	0.8-3.3
TiO ₂	0-0.5	1.5-2.7
Fe ₂ O ₃	0-2	5.5-6.5
S	0-2	0-0.2
P ₂ O ₅	0-1	
MnO	0.1-0.5	0.1-0.3

A continuación se describe brevemente el proceso de fabricación de la lana mineral y la generación del desecho de lana mineral.

1.2.1. Producción de lana de mineral

Las materias primas de mayor uso en la producción de lana mineral son: roca volcánica (basalto), caliza y escoria de alto horno. Por su estructura amorfa, la lana mineral posee buenas propiedades como aislante térmico [41]. En la Fig. 6, se observan las etapas del proceso de la elaboración de la lana mineral, que comienza con la fusión de las materias primas en proporciones preestablecidas por medio de un horno. Allí, los materiales se funden hasta una consistencia similar a la lava. Posteriormente, la lava se deposita lentamente (en forma de delgados hilos) sobre un fibrador que se encuentra a baja temperatura (ver Fig. 7). Al entrar en contacto la lava con los rodillos del fibrador, se solidifica en forma de fibras que son expulsadas por chorros de aire y posteriormente son aglomeradas con resina y depositadas en capas para formar colchonetas. Por último, el material se corta en medidas comerciales y es empacado y despachado a los consumidores [42].

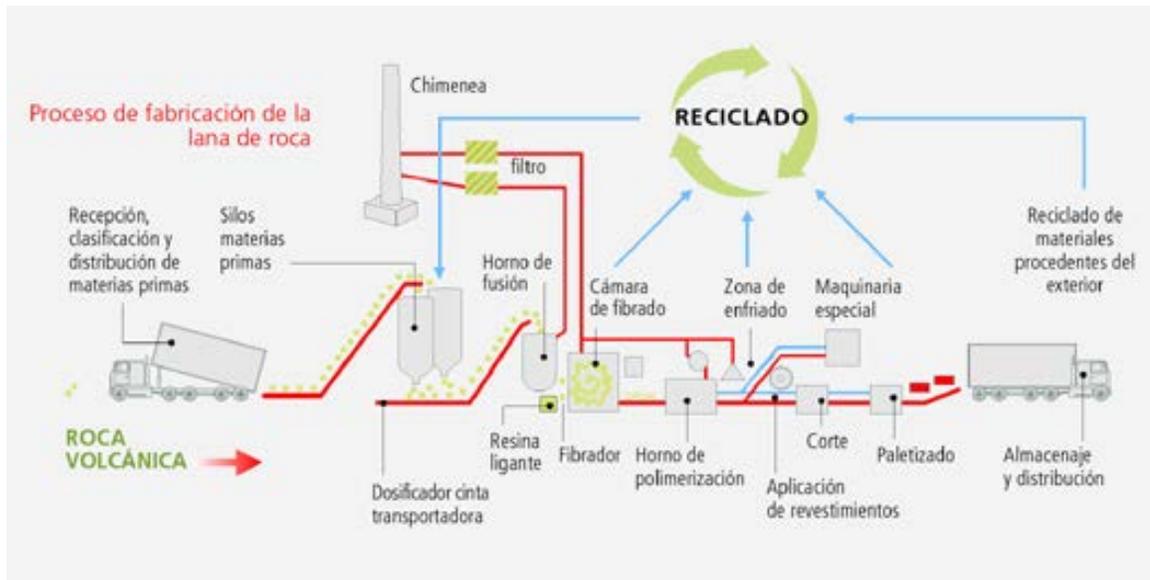


Fig. 6. Esquematzación del proceso de producción de lana mineral [42].

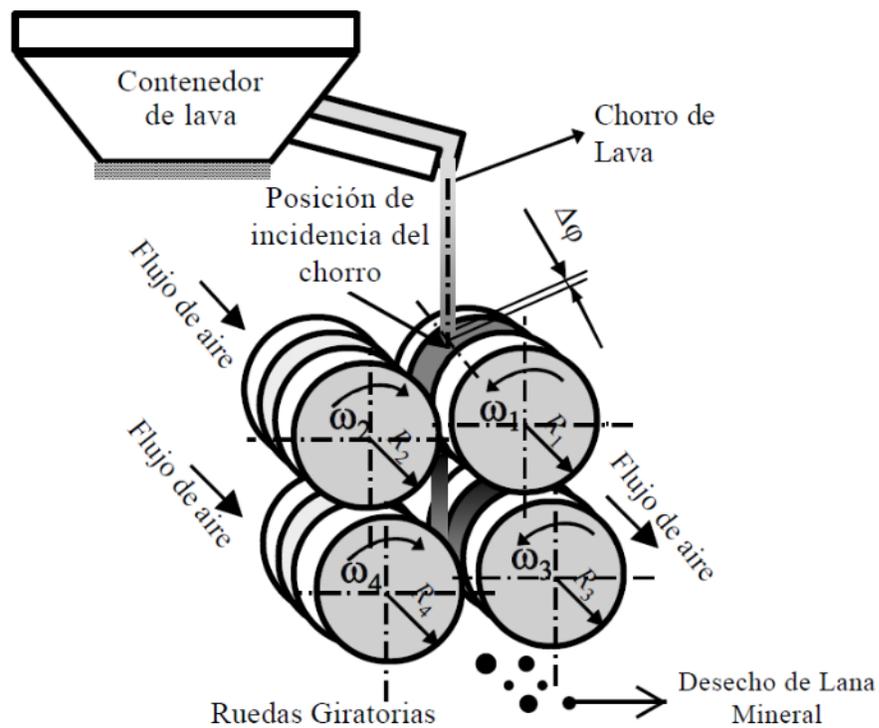


Fig. 7. Esquematzación del fibrador empleado en la elaboración de lana mineral. Modificada de Sirok *et. al* [41].

1.2.2. Generación del Desecho de Lana de Mineral (DLM).

Cuando la lava cae sobre los rodillos del fibrador, una cantidad de lava no se transforma en fibras, sino que solidifican en forma de partículas de diferentes tamaños (que van desde micras hasta varias pulgadas) que son expulsadas de la línea de producción por gravedad (ver Fig. 7). Posteriormente, este material es clasificado por tamaño, donde las partículas con tamaños superiores a dos pulgadas, son realimentadas al proceso. El material sobrante (Desecho de Lana Mineral) en la actualidad no cuenta con una aplicación por lo cual se desecha y por ende genera un impacto ambiental.

1.2.3. Desechos de lana mineral en compuestos base cemento.

Los desechos de lana de mineral tienen oportunidad para ser usados en el concreto como sustitutos de las materias primas tradicionales, dentro de ellas, el agregado fino. Algunos estudios se han realizado sobre el efecto de partículas y desechos de lana de roca (materiales clasificados dentro de las lanas minerales) en compuestos base cemento.

Cheng *et. al* [4], sustituyeron los agregados (finos y gruesos) del concreto por desechos de lana de roca (del inglés *rock wool wastes*), con valores máximos del 10% en volumen de concreto. En su estudio, el desecho de lana de roca fue previamente triturado y procesado hasta obtener una granulometría entre 17 a 250 μm . Cabe aclarar que dicho rango de tamaño de partícula no corresponde ni al agregado fino, y mucho menos al agregado grueso de acuerdo a la ASTM C125 [28] y la ASTM C33 [29]. Finalmente, la mezcla mostró varias mejoras: su resistencia a la compresión aumentó hasta un 18% respecto a la muestra control; disminuyó la absorción y por ende la penetración de cloruros, y aumentó ligeramente la resistencia a la abrasión. Estas mejoras se atribuyeron principalmente a la capacidad de las partículas del desecho de lana de roca (con tamaño inferior a 75 μm) de reaccionar con los Hidróxidos de Calcio (HC) del cemento, para promover la producción de más Silicatos de Calcio Hidratados (SCH). Adicionalmente, observaron que las partículas de lana de roca con formas alargadas pueden inhibir y detener la aparición de fisuras (*crack-arrester effect*). Cheng *et. al* [4], identificaron que las partículas de desecho de lana de roca con tamaño inferior a 75 μm reaccionaron químicamente con los Hidróxidos de Calcio del cemento. Lo anterior podría indicar que las partículas de desecho de lana de roca con

tamaño superior a 75 μm , se podrían considerar inertes debido a su baja o casi nula reactividad.

Lin *et. al* [5], sustituyeron hasta el 40% en peso el cemento de los morteros con partículas de lana de roca. El material fue previamente procesado para obtener un tamaño máximo de partícula de 75 μm . Aunque a los 28 días de curado, la resistencia a la compresión de las mezclas bajó gradualmente con el incremento del contenido de partículas de lana de roca, a los 91 días de curado se observó un incremento gradual de la resistencia conforme se incrementa el contenido de dichas partículas, llegando hasta un 19% por arriba de la muestra control. Estos resultados se atribuyeron a la reducción del contenido de Hidróxidos de Calcio (HC) en el mortero, que fueron consumidos por su reacción con las partículas de lana de roca para producir más Silicatos de Calcio Hidratados (SCH); y al efecto partícula estacionada (del inglés *particle parking effect*) causado por las partículas de forma alargada que obstaculizan la propagación de fisuras. La baja resistencia de los morteros a los 28 días y su posterior incremento a los 91 días, es atribuible a que la reacción química entre las partículas de lana de roca y los Hidróxidos de Calcio (HC) del cemento es lenta [5].

1.3. PROPIEDADES TÉRMICAS DEL CONCRETO.

El estudio de las propiedades térmicas de los materiales de construcción, en la última década, ha cobrado importancia dadas las “recientes” políticas de uso energético responsable que involucra a la industria de la construcción. Una de las actividades más representativas de ésta industria, es la construcción de edificaciones de uso residencial y terciario (hoteles, comercios, oficinas), que en funcionamiento, son responsables de más del 30% del consumo global de energía [43], de la cual, gran parte se destina a mantener espacios habitables térmicamente confortables. Parámetros como la conductividad térmica y la difusividad térmica de los materiales de construcción, son fundamentales para los diseñadores de edificaciones que buscan un ahorro en el consumo energético de dichas construcciones [6, 7].

Por otro lado, cuando se sustituyen los agregados tradicionales del concreto o de morteros base cemento por agregados alternativos, se hace necesario conocer su efecto sobre las propiedades térmicas del compuesto, ya que cambios significativos en dichas propiedades pueden repercutir en su comportamiento ante fenómenos como retracción por cambios de temperatura, o crear elevados gradientes de temperatura entre la superficie

del mortero y el centro de la masa, lo que llevaría a la generación de esfuerzos internos que puede afectar la durabilidad del concreto [6, 44].

Entender el comportamiento de la conductividad térmica en materiales compuestos, requiere se abarquen temas como el flujo de calor. El calor es la manifestación externa de la vibración interna de los átomos de un material. Las propiedades térmicas de un material, son el reflejo de su tipo de enlace, la fuerza de unión interatómica y el tipo y forma de su microestructura [45]. La Ley de Fourier, permite cuantificar la transferencia de calor mediante la ecuación (1).

$$\frac{dq}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

donde dq/dt , es el flujo de calor o cantidad de energía suministrada, la cual es directamente proporcional al gradiente de temperatura por unidad de distancia dT/dx causado en el material; A , es el área de la sección transversal normal a la dirección del flujo de calor y k , es una constante de proporcionalidad llamada Conductividad Térmica [45]. La conductividad térmica (k), mide la capacidad de un material de transportar calor y se define como la cantidad de calor transmitida en un segundo, a través de una unidad de espesor de material, en dirección normal a una superficie de unidad de área, cuando la temperatura de entre sus caras se eleva un grado [7]. A menores valores de conductividad térmica, la cantidad de calor transferida por unidad de tiempo será menor.

En un material compuesto como el concreto o el mortero, la conductividad térmica depende de las propiedades térmicas independientes de cada uno de sus componentes, como también de la matriz que los envuelve y de su porosidad y su densidad. La Fig. 8, ilustra el comportamiento típico de la conductividad térmica de los concretos y muestra su dependencia de la densidad del compuesto y del contenido de humedad que está relacionado con la porosidad del mismo. Un aumento en la densidad del concreto normalmente representa un aumento de su conductividad térmica, al igual que cuando se aumenta el contenido de humedad a causa de una mayor porosidad [44, 46].

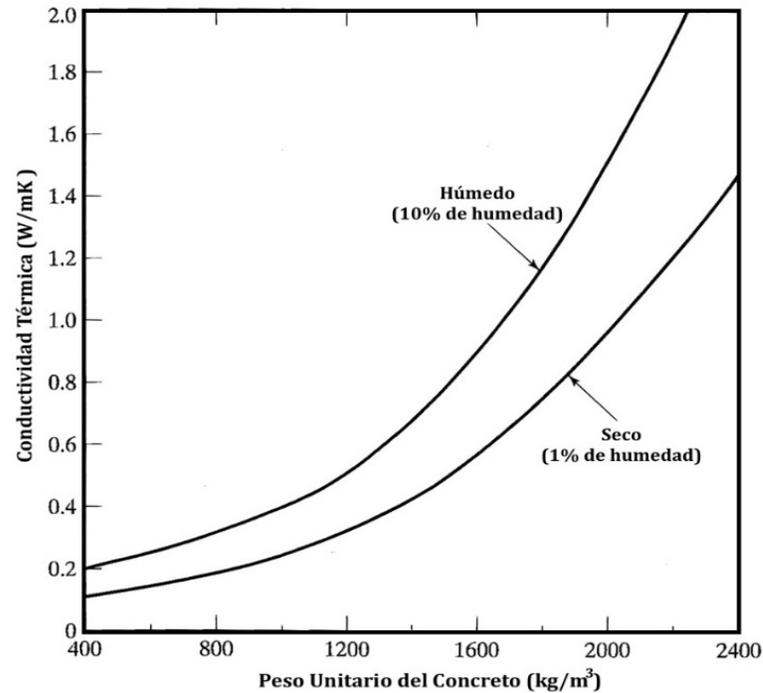


Fig. 8. Efecto de la humedad y de la densidad de los concretos en su conductividad térmica [47].

De acuerdo a lo anterior se puede observar que la densidad del concreto, su porosidad y contenido de humedad están ligados entre sí y son fuertemente influenciados por las propiedades de los agregados. Así, agregados menos porosos causarán un incremento de la densidad del mortero y por ende, una reducción de su porosidad y del contenido de humedad.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DEL DESECHO DE LANA MINERAL EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS MORTEROS BASE CEMENTO.

En este capítulo se describen los materiales y métodos empleados para determinar las propiedades físicas (absorción, densidad y volumen de poros permeables), mecánicas (resistencia a la compresión y resistencia a la flexión) y térmicas (conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico), de morteros modificados con hasta un 60% de sustitución del agregado fino natural (arena) por Desecho de Lana Mineral (DLM).

2.1. MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DE MORTEROS MODIFICADOS CON DESECHO DE LANA MINERAL.

Dentro de los materiales tradicionales para la elaboración de morteros base cemento se encuentran el cemento Portland como aglomerante, arena como agregado fino natural y agua. Por otro lado, muchas investigaciones han hecho uso de materiales alternativos para sustituir las materias primas naturales, dentro de los cuales se encuentran los desechos sólidos industriales no peligrosos. Así, en esta investigación se usó un desecho industrial denominado Desecho de Lana Mineral (DLM) para sustituir el agregado fino natural (arena). A continuación, se describen los materiales usados en este trabajo.

A. CEMENTO: Tipo Portland CPC30R (Cemento Portland Compuesto con 30 MPa de resistencia nominal).

Es el cemento de mayor uso en México y cumple con las especificaciones de la NMX-C-414-ONNCCE [23]. Se clasifica, de acuerdo a la ASTM C150 [21], como un cemento Tipo II. Algunas de sus características y usos se describen en la Tabla 2.

B. AGREGADO FINO NATURAL: Arena de Río comercial.

La arena de río usada en este estudio cumple con lo requerido por la norma ASTM C109 [48] y con la granulometría exigida por la norma ASTM C778 [49], clasificándose así, como arena graduada. Este tipo de arena es la de

mayor uso en San Luis Potosí, México, para la construcción de obras civiles. La arena de río es adecuada en la fabricación de morteros y concretos 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 [15]. En San Luis Potosí, México, se tiene acceso a dos tipos de arena de río: gruesa y fina. Para lograr la granulometría requerida (Tabla 6), fue necesario el uso de las dos arenas en diferentes proporciones.

Tabla 6. Granulometría de la arena graduada de acuerdo a la ASTM C778 [49] y NMX-061-ONNCCE [50], para uso en pruebas de morteros base cemento.

Tamiz		Porcentaje 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. AGREGADO FINO SUSTITUTO: Desecho de Lana Mineral (DLM).

El Desecho de Lana Mineral (DLM) empleado en esta investigación proviene de la industria productora de aislantes térmicos ubicada en la ciudad de San Luis Potosí, México. Este desecho se genera en las etapas iniciales de la producción de lana mineral la cual se emplea como aislante térmico en diversas aplicaciones. El DLM contiene partículas con tamaños superiores a los establecidos por la norma ASTM C778 [49] (Tabla 6), para los agregados finos de uso en la elaboración de morteros. Por lo anterior, en este trabajo se usó la porción del DLM que pasó el tamiz #16 la cual representa aproximadamente el 70% en peso del desecho. Esta porción de desecho tiene una apariencia similar a la arena ya que lo conforman una gran cantidad de partículas de diferentes tamaños. En la sección 1.2 de este trabajo se describe más detalladamente el origen del DLM.

D. AGUA: Agua potable proveniente de la red municipal.

Para la elaboración de los morteros se usó agua de grifo, proveniente de la red de acueducto municipal. Esta agua es de aspecto claro, no se observan partículas flotantes, no presenta olor, color, ni sabor.

2.2. TÉCNICAS Y MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS FINOS.

En este estudio se utilizó el DLM como sustituto del agregado fino natural (arena), empleado en la elaboración de morteros. Se determinaron las características principales de los agregados finos (arena y DLM).

2.2.1. Análisis granulométrico de la arena y del Desecho de Lana Mineral (DLM).

La granulometría de los agregados finos de uso en materiales base cemento se rige por la norma ASTM C778 [49]. La distribución de tamaño de partícula tanto de la arena como del DLM, fue determinada de acuerdo a la metodología ASTM C136 [51] que da los lineamientos para el análisis granulométrico de los agregados. El peso de los materiales se registró mediante una balanza con precisión de 0.1 gr. La metodología empleada se resume a continuación: se tomó una muestra representativa de agregado fino de acuerdo a la norma ASTM C702 [52] de 500 gr, que fue secada en horno a una temperatura aproximada de 110 °C hasta peso constante. Entiéndase por peso constante, una diferencia menor al 0.5% en peso entre dos lecturas sucesivas de la balanza, con un lapso entre ellas (de secado o de inmersión en agua) de mínimo 24 horas, registradas inmediatamente después de cumplido el periodo de tiempo mencionado. Posteriormente, el material se depositó en un arreglo de tamices desde el #16 hasta el #100 (listados en la Tabla 6), que fueron montados en un agitador mecánico marca RO-TAP RX29. Finalmente, se determinó el peso retenido en cada uno de los tamices y el porcentaje que pasa. Con estos datos se elaboraron curvas granulométricas de los agregados y se compararon respecto los límites inferior y superior de la norma ASTM C778 [49].

La arena usada en este estudio se obtuvo a partir de la mezcla de arena de río fina y gruesa. Estas arenas fueron tamizadas y clasificadas por tamaño de partícula usando los tamices mencionados en la norma ASTM C778 [49] que se listan en la Tabla 6. Posteriormente se mezclaron en diferentes proporciones hasta lograr que su granulometría cumpliera con los parámetros establecidos por la norma ASTM C778 [49] para un agregado fino bien graduado.

2.2.2. Determinación de la densidad, gravedad específica y absorción de los agregados finos (arena y el DLM).

Se determinó la densidad, la gravedad específica (densidad relativa) y la absorción tanto de la arena como del DLM. Las pruebas se realizaron de acuerdo a la metodología de la norma ASTM C128 [53]. De acuerdo a esta norma, a continuación se resumen las principales definiciones:

Absorción: se define como el incremento en la masa de los agregados debido a la penetración del agua dentro de los poros de las partículas, durante un periodo de tiempo preestablecido, sin tener en cuenta la cantidad de agua en la superficie externa de las partículas, expresada como un porcentaje de la masa seca.

Saturado Superficialmente Seco (SSS): es la condición en que los poros permeables de las partículas de los agregados están llenos con agua por inmersión durante un tiempo determinado, pero sin agua libre en la superficie de las partículas.

Densidad (SH): la masa de las partículas de agregado Secadas en Horno (SH) por unidad de volumen de las partículas de agregado, incluyendo el volumen de poros permeables e impermeables dentro de las partículas, pero no los vacíos entre las mismas.

Gravedad Específica (Densidad Relativa), (SH): La relación de la densidad del agregado a la densidad del agua a 23 °C.

Para determinar los diferentes pesos se empleó una balanza con capacidad mayor a 1 kg y una precisión de 0.1 gr. La metodología se resume a continuación.

Una muestra representativa de agregado fino de 1 kg fue secada en horno a una temperatura aproximada 110 °C hasta peso constante. Posteriormente, se enfrió al aire y se cubrió con agua hasta quedar totalmente sumergida, manteniendo esta condición por un periodo de 24 horas. A continuación, el agua se decantó cuidadosamente para evitar el arrastre de finos y se procedió al secado de la muestra en una plancha hasta alcanzar el estado Saturado Superficialmente Seco (SSS), que fue determinado por medio de la prueba de humedad superficial de los agregados descrita en la norma ASTM C128 [53]. Ésta prueba de humedad superficial hace uso de un pequeño molde cónico que es llenado totalmente con el agregado en proceso de secado el cual es compactado con 25 golpes de un apisonador. Seguidamente el molde es levantado verticalmente. Un “ligero derrumbamiento” (traducción literal de

slight slumping, tomado de la norma ASTM C128 [53]) del agregado moldeado indica que se ha alcanzado la condición Saturado Superficialmente Seco (SSS); si la humedad superficial sigue presente en el agregado mantendrá la forma del molde; si el agregado se desploma en su mayoría se ha secado en exceso. Posteriormente en un picnómetro de capacidad 500 ml lleno parcialmente con agua, se introdujo 500 gr de material en estado SSS, y se llenó con agua hasta aproximadamente el 90% de su capacidad. El picnómetro se rodó, se invirtió y se agitó manualmente durante 20 minutos para eliminar las burbujas de aire atrapadas entre las partículas de agregado; se verificó que su temperatura estuviera a 23 ± 2 °C, se llenó hasta la graduación y se registró el peso del picnómetro con agua y muestra. A continuación, se sacó la muestra del picnómetro, se secó en horno a 110 ± 5 °C hasta peso constante, se dejó enfriar en aire por 1.5 horas y se determinó su peso. Se determinó el peso del picnómetro lleno de agua hasta la graduación a 23 ± 2 °C.

Cálculos.

$$\text{Densidad Relativa (gravedad específica) (SH)} = \frac{A}{(B + S - C)} \quad (2)$$

$$\text{Densidad (SH), kg/m}^3 = 997.5 \frac{A}{(B + S - C)} \quad (3)$$

$$\text{Absorción, \%} = 100 \left[\frac{(S - A)}{A} \right] \quad (4)$$

El valor constante 997.5 corresponde a la densidad del agua a 23 °C dada en kg/m³; *A*, es el peso de la muestra Secada en Horno (SH); *B*, es el peso del picnómetro lleno con agua hasta su marca de calibración; *C*, es el peso del picnómetro lleno con la muestra de agregado (en estado Saturado Superficialmente Seco) y agua hasta la marca de calibración; y *S*, es el peso de la muestra, saturada superficialmente seca, introducida en el picnómetro. *A*, *B*, *C* y *S*, están dados en gramos.

2.2.3. Análisis del DLM y de la arena mediante Difracción de Rayos X.

Mediante difracción de Rayos X, se identificó el estado cristalino del DLM y de la arena y las fases presentes en la última. Se usó un difractómetro marca BRUKER modelo D8 ADVANCE. El barrido se realizó a una velocidad de 3.5° por minuto, con un tamaño de paso de 0.02° y radiación Cu-K α , con longitud

de onda de 0.154 nm. El intervalo para el ángulo 2θ fue de 5 a 75° . La fuente de poder del difractómetro se fijó a 36KV y 30 mA.

2.2.4. Análisis químico del DLM y de la arena.

Una muestra representativa de DLM fue procesada y molida hasta obtener un tamaño de partícula inferior a 45 μm . Mediante Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X se determinó su composición química. Se usó un equipo marca BRUKER modelo S2 PUMA, con tubo de emisión de Rayos X de hasta 50 W. Para determinar la composición química de la arena, se obtuvo una muestra representativa de material la cual fue analizada por Espectrometría de Dispersión de Rayos X mediante un Microscopio Electrónico de Barrido marca PHILLIPS modelo XL-30.

2.2.5. Análisis de la morfología de las partículas de los agregados mediante Microscopía Electrónica de Barrido.

Se obtuvieron imágenes por Microscopía Electrónica de Barrido del DLM y de la arena con el fin de observar la forma, apariencia superficial y tamaño de las partículas. Se observaron muestras representativas del DLM, como también de las partículas retenidas en cada uno de los tamices listados en la Tabla 6, que componen su granulometría general. El equipo empleado fue un Microscopio Electrónico de Barrido marca PHILLIPS modelo XL-30.

2.3. ELABORACIÓN DE MORTEROS Y DETERMINACIÓN DEL EFECTO DEL DLM EN SUS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS.

Para determinar el efecto del DLM sobre las propiedades de los morteros, se elaboraron probetas con 5 porcentajes de sustitución del agregado fino natural por DLM (0, 15, 30, 45 y 60%), que fueron seleccionados en base a lo reportado en investigaciones previas [4, 54]. La Tabla 7 lista la nomenclatura empleada para las mezclas y las proporciones usadas en la elaboración de las probetas de mortero. La relación cemento/agregado fino/agua usada fue de 1/2.75/0.485, de acuerdo con las normas ASTM C109 [48] y NMX-C-061-ONNCCE [50] y se mantuvo constante para todos los morteros.

Tabla 7. Proporciones de las mezclas empleadas en la elaboración de morteros.

MEZCLA	% DE DLM	ARENA (gr)	DLM (gr)	CEMENTO (gr)	AGUA (gr)	a/c
M0	0	227.0	0	82.2	39.9	0.485
M1	15	193.0	34.1	82.2	39.9	0.485
M2	30	158.9	68.1	82.2	39.9	0.485
M3	45	124.9	102.2	82.2	39.9	0.485
M4	60	90.8	136.2	82.2	39.9	0.485

2.3.1. Probetas para análisis de Resistencia a la Compresión, Porosidad, Absorción y Densidad.

Las probetas de mortero se elaboraron y se curaron de acuerdo a los lineamientos de la norma ASTM C109 [48]. Las probetas se fabricaron con forma cúbica de sección 50 x 50 x 50 mm como se observa en la Fig. 9. Las muestras se mantuvieron en agua saturada con cal hasta el día de la prueba (28 y 56 días para las muestras de porosidad, absorción y densidad; 7, 14, 28, 56 días para las pruebas de resistencia a la compresión). En total se fabricaron 90 probetas, 60 para análisis de resistencia a la compresión y 30 para pruebas de porosidad, absorción y densidad.



Fig. 9. Moldes y probetas de mortero para pruebas de resistencia a la compresión, porosidad, absorción y densidad.

Cabe mencionar que durante la preparación de estos morteros se observó el fenómeno de sangrado en las mezclas elaboradas con DLM y que el mismo se incrementó al aumentar el contenido de DLM. La Fig. 10 muestra imágenes de la elaboración de los morteros una vez terminado el proceso de compactación de las mezclas. Se observa que a diferencia de los morteros testigo (Fig. 10B), la mezcla con el 60% de DLM (Fig. 10A), muestra tanto en

su superficie como en la parte inferior, una cantidad de agua que fue expulsada del interior de la mezcla a causa de la compactación (a este fenómeno se le conoce como sangrado).

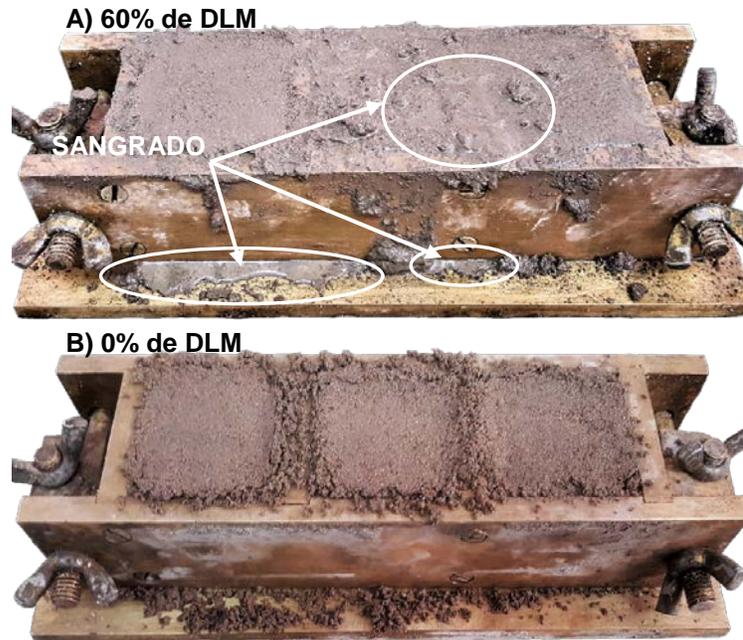


Fig. 10. Fenómeno de exudación o sangrado presente en los morteros con DLM (A), y ausente en los morteros testigos (B).

Es posible que este fenómeno en los morteros con DLM, pudiera ser un indicativo de que para altos porcentajes de sustitución de arena por DLM (mayor al 45%), la cantidad de agua recomendada por las normas ASTM C109 [48] y NMX-061-ONNCCE [50] para la preparación de morteros es elevada.

2.3.2. Probetas para análisis de resistencia a la flexión.

Para determinar la influencia del DLM sobre la resistencia a la flexión de los morteros, se fabricaron 15 probetas de mortero de acuerdo a la norma ASTM C348 [55]. Las probetas se elaboraron con forma de prisma cuadrangular de 40 x 40 x 160 mm como se observa en la Fig. 11. Las cantidades y proporciones de materiales usados en la elaboración de las probetas se muestran en la Tabla 8. Las muestras se mantuvieron en agua saturada con cal (para prevenir la lixiviación de los Hidróxidos de Calcio del mortero) por 56 días hasta el momento de la prueba.



Fig. 11. Probetas de mortero para pruebas de resistencia a la flexión.

Tabla 8. Cantidades y proporciones de materiales empleados en la elaboración de probetas de mortero de sección 40 x 40 x 160 mm para ensayos de resistencia a la flexión.

MEZCLA	% DE DLM	ARENA (gr)	DLM (gr)	CEMENTO (gr)	AGUA (gr)	a/c
M0	0	464.9	0	169.0	82.0	0.485
M1	15	395.2	69.7	169.0	82.0	0.485
M2	30	325.4	139.5	169.0	82.0	0.485
M3	45	255.7	209.2	169.0	82.0	0.485
M4	60	186.0	278.9	169.0	82.0	0.485

2.3.3. Probetas para análisis de las propiedades térmicas de morteros con DLM.

Las probetas para el análisis térmico de los morteros se elaboraron de acuerdo a la norma ASTM C192 [56] y ASTM C109 [48]. Se obtuvieron probetas dobles en forma placa cuadrangular de sección 50 x 50 x 10 mm como se observa en la Fig. 12. Una vez alcanzado el tiempo de curado, las probetas fueron pulidas por sus caras de mayor área, hasta lograr una superficie plana. Posteriormente, las probetas fueron secadas en horno por un periodo de 24 horas a una temperatura de 110 °C. Su enfriamiento se llevó a cabo en un desecador por un periodo de 2 horas. A continuación, se almacenaron en recipientes plásticos herméticos que contenían gel de sílice para absorber la humedad hasta el día de las pruebas. Cada una de las mezclas se fabricó por triplicado.



Fig. 12. Probetas de mortero para análisis de propiedades térmicas.

A continuación se describen las técnicas y métodos empleados para determinar el efecto de sustituir hasta el 60% del agregado fino natural por DLM, en las propiedades de morteros base cemento.

2.3.4. Determinación de la influencia del DLM sobre la absorción, densidad y porosidad del mortero.

Para determinar la influencia del DLM sobre la densidad, absorción de humedad y la porosidad de los morteros, se siguió la metodología de la norma ASTM C642 [57]. Los morteros se analizaron a los 28 y 56 días de curado. Todas las lecturas se registraron en gramos mediante una balanza con precisión de 0.1 gr.

- A) Masa seca en horno (designada A):** Las muestras se secaron en horno a una temperatura de 100 °C, por periodos de 24 horas hasta peso constante. Se dejaron enfriar en aire hasta temperatura ambiente y se registró su peso.
- B) Masa saturada después de inmersión (designada B):** Una vez determinado A, las muestras se sumergieron en agua de grifo proveniente de la red municipal a una temperatura aproximada de 21 °C, por un periodo mínimo de 48 horas y se registró su peso. Posteriormente, se sumergieron nuevamente en agua por periodos de 24 horas hasta alcanzar un peso constante. Para registrar el peso de las muestras, luego de sacadas del agua, se removió la humedad de su superficie con una toalla.

- C) **Masa saturada después de ebullición** (designada C): Obtenido B, las muestras fueron puestas en agua en ebullición durante 5 horas. Cumplido este tiempo, el recipiente con las muestras fue retirado de la fuente de calor y se enfrió al aire por cerca de 14 horas, hasta una temperatura del agua aproximada de 22 °C. Se retiraron, una a una, las probetas del agua, se removi6 la humedad superficial con una toalla y se determin6 su masa.
- D) **Masa aparente en inmersi6n** (designada D): Posterior a la inmersi6n y ebullici6n, las muestras suspendidas por un hilo, se sumergieron dentro de un recipiente con agua ubicado sobre una balanza, cuidando que no tocaran las paredes ni el fondo. Se registr6 la lectura de la balanza y posteriormente se determin6 la masa aparente de la muestra sumergida en agua.

Los valores de absorci6n, porosidad y densidad de los morteros, se obtuvieron mediante las siguientes ecuaciones,

$$\text{Absorci6n despu6s de inmersi6n, \%} = \frac{(B - A)}{A} \times 100 \quad (5)$$

$$\text{Densidad Bulk, seca} = \left[\frac{A}{(C - D)} \right] \cdot \rho = g_1 \quad (6)$$

$$\text{Densidad Aparente} = \left[\frac{A}{(A - D)} \right] \cdot \rho = g_2 \quad (7)$$

$$\text{Volumen de poros permeables, \%} = \frac{(g_2 - g_1)}{g_2} \times 100 \quad (8)$$

donde, $\rho = 1 \text{ gr/cm}^3$ (densidad del agua) y g_1, g_2 se obtienen en gr/cm^3 .

2.3.5. Determinaci6n de la Resistencia a la Compresi6n de morteros modificados con DLM.

La resistencia a la compresi6n se determin6 sobre los morteros con hasta el 60% de sustituci6n de arena por DLM. Tambi6n sobre morteros elaborados s6lo con arena como muestras testigo. Estas pruebas se realizaron por triplicado de acuerdo a las normas ASTM C109 [48] y la NMX-C-061-ONNCCE [50]. La resistencia a la compresi6n de las cinco mezclas con el 0, 15, 30, 45 y 60% de DLM se determinaron a 4 tiempos de curado (7, 14, 28 y 56 d6as) recomendados por estas normas, ya que son los m6s representativos para el mortero, toda vez que el cemento Portland desarrolla m6s del 90% de su resistencia a la compresi6n a los 28 d6as y alrededor del

98% a los 56 días. Se usó una maquina universal marca SHIMADZU con capacidad de 300 KN. La carga se aplicó a una velocidad de 1 mm/min, sobre las caras planas de las probetas que estuvieron en contacto con las paredes verticales de los moldes, con el fin de lograr una adecuada distribución de la misma sobre el mortero (Fig. 13A). La Fig. 13B, muestra la falla característica del mortero con 60% de DLM. Una vez obtenida la carga máxima de rotura, se calculó la resistencia a la compresión para cada una de las mezclas con la ecuación,

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (9)$$

donde $f'c$, es la resistencia a la compresión obtenida en megapascales (MPa), P , es la carga máxima total en Newton (N), y A , es el área de la superficie de carga en mm^2 .

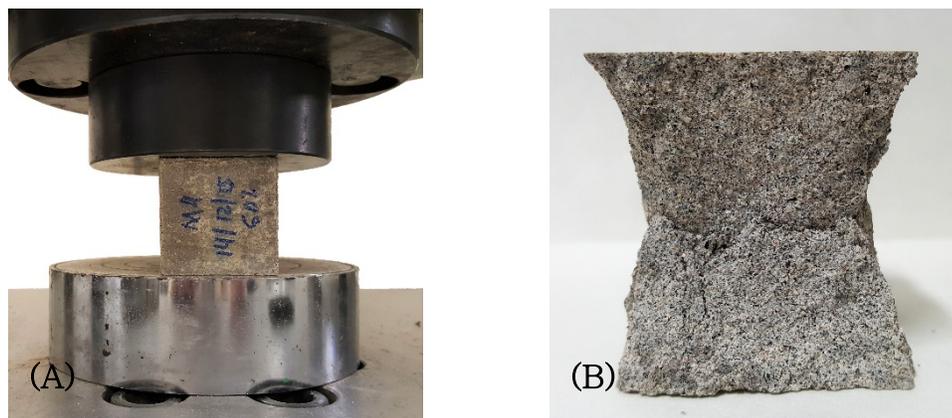


Fig. 13. Prueba de compresión sobre probeta de mortero con 60% de DLM. A) Durante la Prueba y B) Posterior a la falla.

2.3.6. Determinación de la Resistencia a la Flexión de morteros modificados con DLM.

Se realizaron pruebas de resistencia a la flexión de tres puntos, de acuerdo a la norma ASTM C348 [55]; sobre los morteros modificados con hasta el 60% DLM en sustitución de la arena y sobre probetas testigo con el 0% de sustitución. La resistencia a la flexión de los morteros fue evaluada a 56 días de curado. Las muestras se mantuvieron en agua saturada con cal hasta el día de la prueba. Alcanzado el tiempo de curado, las probetas fueron sacadas del agua y se secaron superficialmente con una toalla. A continuación, se trazaron marcas sobre las caras de mayor área que estuvieron en contacto con las paredes del molde: una en el centro de una cara como indicación del

punto de aplicación de la carga, y dos en la cara posterior a ésta, ubicadas a 2 cm de cada borde, como indicación de la ubicación de los puntos de apoyo. Posteriormente, las probetas fueron colocadas sobre un soporte con dos puntos de apoyo con rodillos, distanciados centro a centro 120 mm como se observa en la Fig. 14.

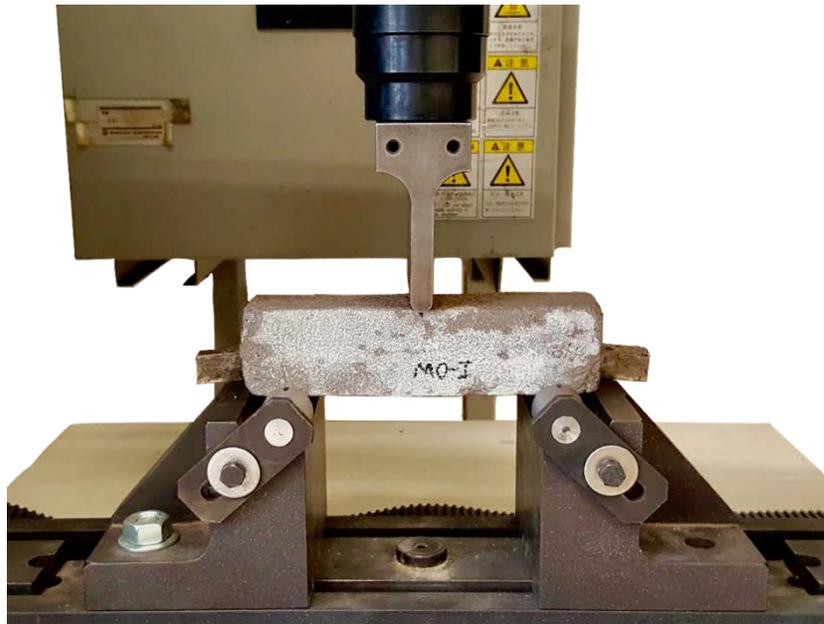


Fig. 14. Montaje de probeta de mortero para prueba de flexión de tres puntos.

Para esta prueba se usó una máquina universal Marca SHIMADZU modelo AG-1, con una capacidad máxima de 300 KN. La carga se aplicó a una velocidad de desplazamiento de 0.1 mm/min, cuidando que el dispositivo de carga quedara paralelo a la cara superior de la probeta. Una vez obtenido el valor máximo de la carga para cada probeta, se calculó la resistencia a la flexión de acuerdo a la ecuación,

$$S_f = 0.0028 P \quad (10)$$

donde, S_f , es la resistencia a la flexión en MPa, y P , es la carga total máxima en Newton (N).

2.3.7. Determinación de las propiedades térmicas de morteros con DLM por el método transitorio de puente caliente (*THB - Transcient Hot Bridge*).

Se practicaron pruebas para determinar el efecto del DLM sobre la conductividad térmica, la difusividad térmica y el calor específico de los morteros que contenían el 60% de DLM, por ser estos los que presentaron

mayor resistencia en los ensayos de compresión. También se midieron estas propiedades sobre las probetas de mortero elaboradas sólo con arena, como muestras testigo. La conductividad térmica y la difusividad térmica de los morteros, fue determinada mediante un equipo marca LINSEIS modelo THB-1 (del inglés *Transient Hot Bridge*), que tiene un rango de lecturas de 0.01 a 1 W/mK, y un valor de incertidumbre de las lecturas inferior al 5%. Para obtener las lecturas tanto de conductividad térmica como de difusividad térmica, se emplearon dos probetas de mortero por mezcla, de sección 50 x 50 x 10 mm previamente preparadas como se mencionó anteriormente en la sección 2.3.3 (Fig. 15a). En medio de las probetas se colocó el sensor de medición del THB-1, creando un montaje en forma de sándwich, el cual se sujetó por medio de un dispositivo de fijación y se procedió con las pruebas (Fig. 15b). La temperatura y la humedad relativa del laboratorio estuvieron entre los 19 a 21 °C y 50 a 68%, respectivamente.

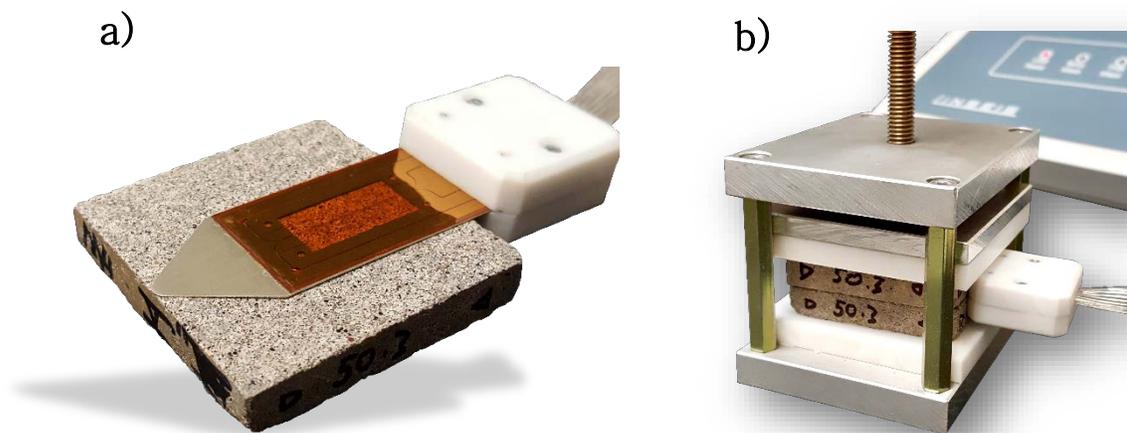


Fig. 15. Montaje de probetas de mortero para determinación de propiedades térmicas. a) Sensor THB sobre probeta cuadrangular, b) sándwich probeta-sensor-probeta en dispositivo de fijación.

A continuación se describe el funcionamiento del equipo THB-1 [58]. El equipo THB realiza las mediciones de las propiedades térmicas de los materiales en estado transiente, es decir, las mediciones son dependientes del tiempo. El sensor del THB que se muestra en la Fig. 15a es a la vez una fuente de calor y un sensor de temperatura; esto se logra a través de una serie de bandas de níquel (con propiedades térmicas y de resistencia eléctrica conocidas), que están dispuestas a lo ancho del sensor (Fig. 16A). Cuando el sensor es colocado en medio de dos piezas de la muestra (Fig. 15b), las

bandas internas del sensor emiten un flujo de calor (causado por un voltaje eléctrico, Us) de forma constante durante la medición. Esto causa un incremento de la temperatura, por lo cual el calor fluye a través de las muestras desde la zona interior del montaje hacia el exterior, como se observa en la Fig. 16C. Por su parte, las bandas externas que están ubicadas a una distancia conocida desde el eje central del sensor, se encargan de detectar y registrar el incremento de la temperatura de la muestra en el tiempo, causado por el calor transmitido a través de la misma desde la zona central del montaje. El aumento de la temperatura en el tiempo corresponde a las propiedades de transporte térmico de la muestra. Así, el máximo gradiente de temperatura causado por la corriente I_m ($d[Us]$), es proporcional a la conductividad térmica (W/mK) de la muestra, mientras que el tiempo t_{max} necesario para alcanzar este máximo valor es proporcional a la difusividad térmica del material (mm^2/s).

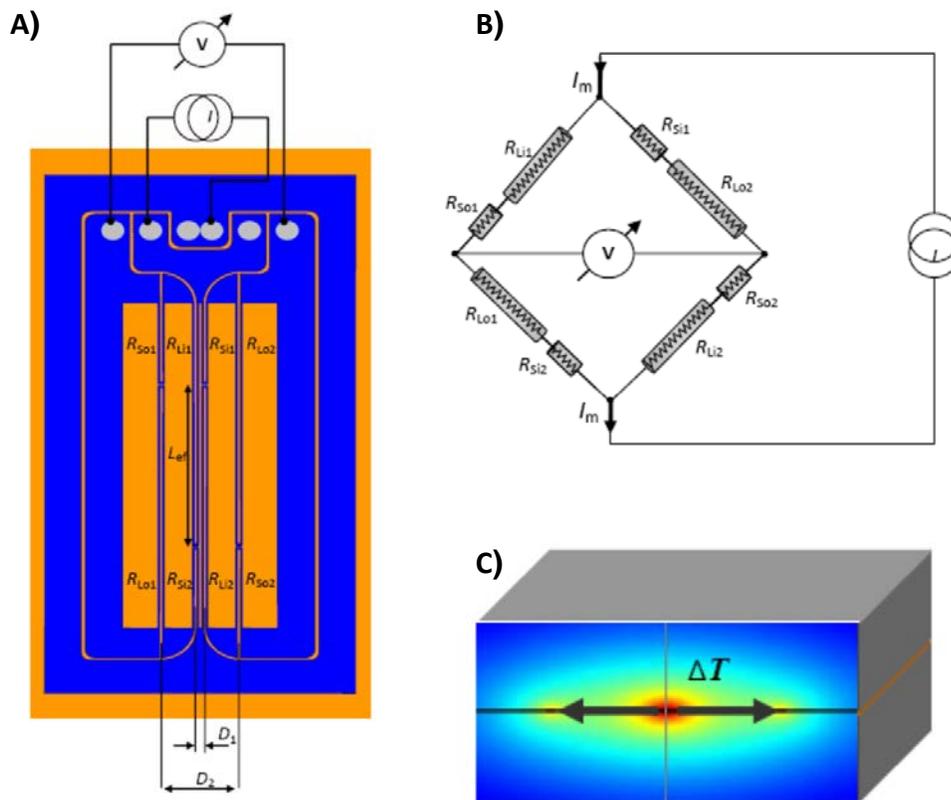


Fig. 16. A) Esquema del sensor usado por el equipo THB mostrando la ubicación de la bandas de níquel en paralelo; B) diagrama eléctrico del sensor del THB; C) esquema de la sección transversal de una muestra durante el proceso de medición [58].

La conductividad térmica y la difusividad térmica se calculan a partir de las siguientes ecuaciones:

$$CT = \frac{\alpha \cdot R_{eff} \cdot \ln(g)}{4\pi \cdot L_{eff} \cdot d(Us)_{max}} \cdot \left(\frac{I_m}{2}\right)^3 \cdot m_{max}, \text{ donde} \quad (11)$$

$$m_{max} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{\frac{2D_1^2}{D_2^2 - D_1^2}} - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{\frac{2D_2^2}{D_2^2 - D_1^2}} \quad (12)$$

$$DT = \frac{D_2^2 - D_1^2}{8t_{max} \cdot \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)} \quad (13)$$

donde,

CT : Conductividad térmica de la muestra de estudio

DT : Difusividad térmica de la muestra de estudio

L_{eff} : Longitud efectiva del sensor.

I_m : Corriente suministrada al sistema.

R_{eff} : Resistencia de la longitud efectiva del sensor.

α : Coeficiente térmico de la resistencia específica de la banda de níquel.

D_1 : Distancia entre el eje central a el eje de las bandas internas.

D_2 : Distancia entre el eje central al eje de las bandas externas.

t_{max} : Tiempo máximo necesario para alcanzar el máximo gradiente de temperatura causado por la corriente I_m .

En un material como el mortero, la difusividad térmica (α) y la conductividad térmica (k) se pueden relacionar entre sí a través de la ecuación (15) [8, 59, 60],

$$\alpha = \frac{k}{\rho Cp} \quad (14)$$

donde, ρ , es la densidad del mortero en g/cm^3 y Cp , es el calor específico del material en J/gK . Una vez determinados los valores para conductividad térmica y difusividad térmica mediante el equipo THB-1, el calor específico de los morteros, se obtuvo a partir de la ecuación (15),

$$Cp = \frac{k}{\rho \alpha} \quad (15)$$

donde, Cp , es el calor específico obtenido en J/gK ; k , es la conductividad térmica del mortero en W/mK ; α , es la difusividad térmica del mortero en mm^2/s ; y ρ , es la densidad del mortero en g/cm^3 .

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL EFECTO DE LA ADICIÓN DEL DESECHO DE LANA MINERAL EN LOS MORTEROS BASE CEMENTO.

En las últimas décadas, los componentes tradicionales del concreto han sido sustituidos, parcial y totalmente, por materiales alternativos como desechos industriales, con el fin de reducir el consumo de materias primas no renovables, la contaminación y contribuir con la construcción sustentable.

Para usar un nuevo material como el Desecho de Lana Mineral (DLM), en reemplazo del agregado fino natural de los morteros base cemento, es necesario determinar y analizar su efecto sobre las propiedades físicas y mecánicas del mismo. Es posible que materiales alternativos a los tradicionales, por sus propias características, hagan que los morteros base cemento desarrollen o manifiesten en mayor grado alguna propiedad específica que puede mejorar su desempeño, o, por otro lado, puede que cause un detrimento de su durabilidad o de otras propiedades.

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas realizadas sobre los morteros base cemento cuyo agregado fino natural (arena), ha sido sustituido hasta en un 60% por DLM. Se discute sobre los posibles factores que influenciaron la absorción, densidad y porosidad de morteros, como también la resistencia mecánica a la compresión, a la flexión y las propiedades térmicas del compuesto como, conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico.

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

Como se mencionó en el Capítulo II, los agregados usados en este estudio fueron arena de río (como agregado fino natural) y DLM (como agregado fino sustituto o alternativo). Se determinaron parámetros fundamentales del agregado fino natural, que fueron comparados con los obtenidos para el DLM. Adicionalmente, se profundizó en el estudio del DLM, debido a que no se cuenta con información respecto de este material para ser usado como agregado fino en la elaboración de morteros.

3.1.1. Distribución de tamaño de partícula del DLM y de la arena.

Se determinó la distribución de tamaño de partícula de los agregados empleados en este estudio, mediante la metodología mencionada en la norma ASTM C136 [51]. La Fig. 17 y Fig. 18, muestran respectivamente, la granulometría del agregado fino natural (arena) y del agregado fino sustituto (DLM), usados en la elaboración de los morteros. El análisis granulométrico de la arena (Fig. 17), muestra que este material cumple con lo requerido por la norma ASTM C778 [49], que establece las granulometrías para el agregado fino de uso en pruebas de compuestos base cemento.

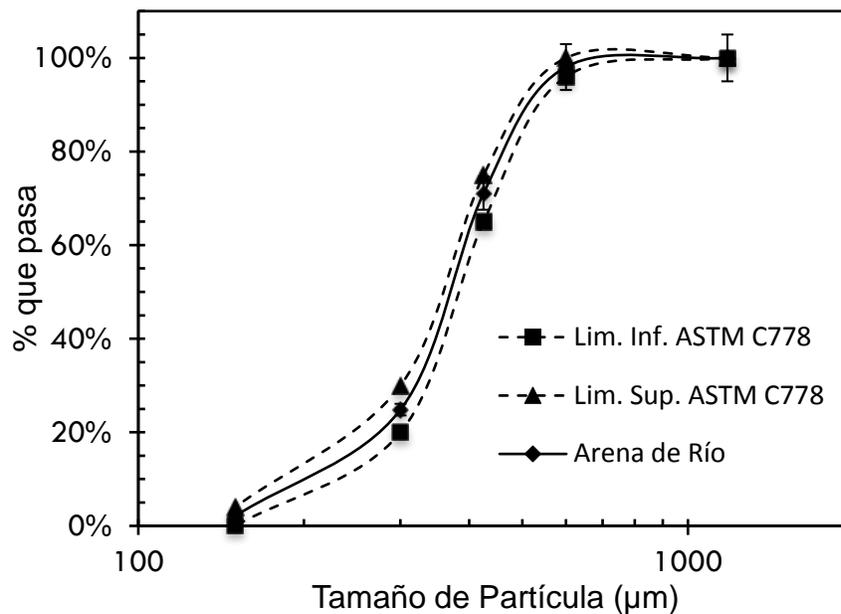


Fig. 17. Granulometría del agregado fino (arena) empleado en este trabajo.

Por su parte, el DLM producido en industria contiene partículas con tamaños superiores a los establecidos por la ASTM C778 [49] para el agregado fino natural, por esta razón en este estudio, se usó la porción del desecho que pasó el tamiz #16, la cual representa alrededor del 70% de este material. En la Fig. 18, que presenta la granulometría obtenida para el DLM, se puede observar que en comparación con la granulometría establecida por la norma ASTM C778 [49] para el agregado fino natural (arena), el DLM contiene mayor cantidad de partículas gruesas (aproximadamente un 10%) con tamaños superiores a 600 µm. Para las demás partículas con tamaños entre 150 a 600 µm que comprenden el resto de la granulometría del DLM, se observa que la distribución de tamaño se ajusta a los límites establecidos por la ASTM C778 [49]. A nivel general, se puede decir que la distribución de tamaño de partículas del DLM sin procesamiento previo, es similar

aproximadamente en un 85% a la distribución de tamaño de partículas del agregado fino natural.

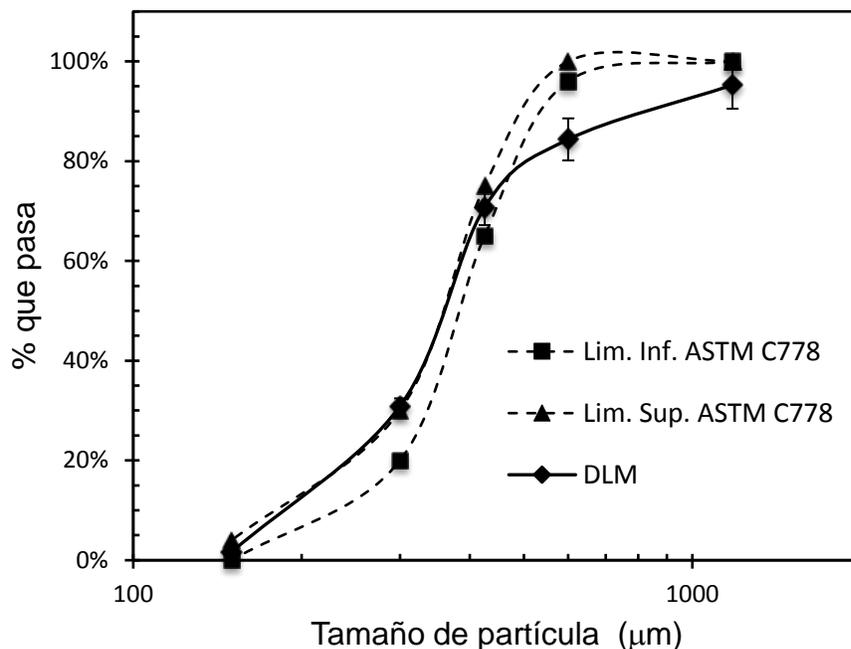


Fig. 18. Granulometría del Desecho de Lana Mineral empleado como sustituto de la arena.

Adicional a lo anterior, el análisis granulométrico permitió identificar que aproximadamente el 70% de las partículas del DLM se encuentran en el rango de tamaño de 150 a 425 µm como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Distribución de tamaño de partículas del DLM por rango de tamaños.

	Tamaño de Partícula					
	< a 150 (µm)	150 – 300 (µm)	300 – 425 (µm)	425 – 600 (µm)	600 - 1180 (µm)	> a 1180 (µm)
% en peso	2	30	40	13	10	5

3.1.2. Densidad, gravedad específica y absorción de la arena y el Desecho de Lana Mineral (DLM).

La Tabla 10, muestra los valores de densidad, absorción y gravedad específica, obtenidos para los agregados empleados en este estudio. Se puede observar que, respecto a la arena, el DLM presenta una mayor gravedad específica, es 16% más denso y su absorción es significativamente más baja o casi nula (aproximadamente 30 veces menos).

Tabla 10. Absorción, densidad y gravedad específica de los agregados finos.

Propiedad	Arena de Río	DLM
Gravedad Específica (SH)	2.423	2.817
Densidad (kg/m ³) (SH)	2416.9	2809.8
Absorción	2.74%	0.09%

SH: Secada en Horno.

En los morteros base cemento, un parámetro fundamental que influye directamente en sus propiedades físicas y mecánicas es el contenido de agua. El agua, además de generar las reacciones de hidratación del cemento (y por ende su endurecimiento y posterior resistencia mecánica), se emplea para controlar la fluidez (trabajabilidad) del compuesto en estado fresco [18]. La absorción y la densidad del agregado fino tienen la capacidad de influenciar la relación agua/cemento/agregado y por ende su comportamiento tanto en estado fresco como endurecido. Por lo general, en la elaboración de morteros y concretos, son deseables los agregados con una menor absorción debido a que esto le puede conferir a la mezcla mayor trabajabilidad sin modificar la cantidad de agua de amasado [2].

3.1.3. Cristalinidad del DLM y de la arena.

La Fig. 19, presenta los resultados de difracción de Rayos X obtenidos para el Desecho de Lana Mineral (DLM). Como se puede observar, este difractograma presenta un pico con gran anchura angular entre los 18 y 37° para el ángulo de difracción 2θ . Éste patrón de difracción es característico de un material amorfo y es similar al patrón de difracción del ópalo-A (una clase de sílice amorfa) reportado en otras investigaciones, el cual presenta un pico con gran anchura angular entre los 17 y los 33° para el ángulo de difracción 2θ [61].

Por su parte, en la Fig. 20 se presentan los resultados de difracción de Rayos X obtenidos para la arena. En éste difractograma se observan picos bien definidos lo que es característico de un material cristalino. Los mismos fueron identificados con la base de datos PDF-2 del Centro Internacional de Datos de Difracción (ICDD por sus siglas en inglés) y corresponden principalmente a las fases cuarzo (SiO₂), identificada con el archivo PDF 01-070-7344 y a la fase sanidina [(K,Na)AlSi₃O₈] identificada con el archivo PDF 01-083-1657 [62].

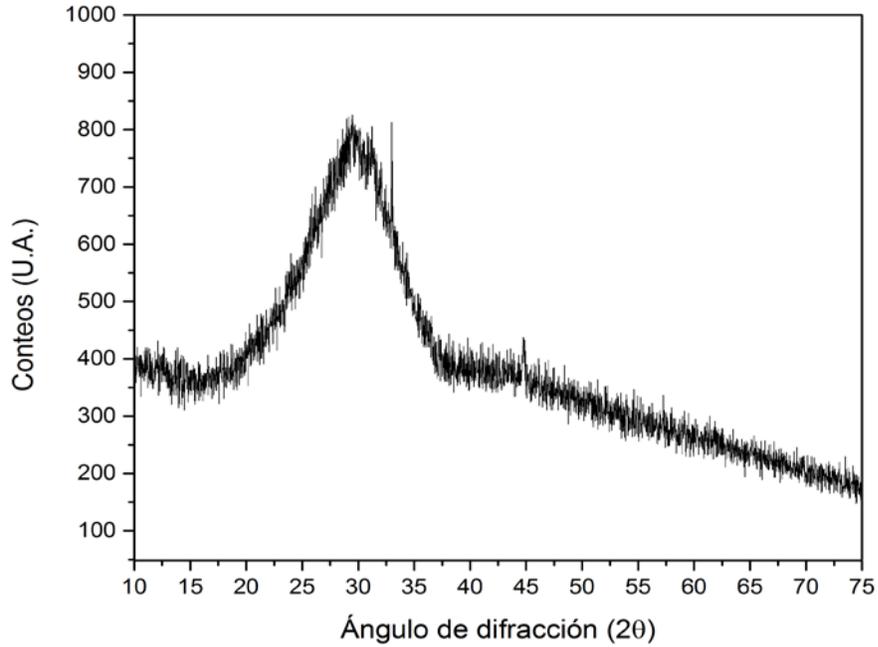


Fig. 19. Difractograma de Rayos X para el DLM.

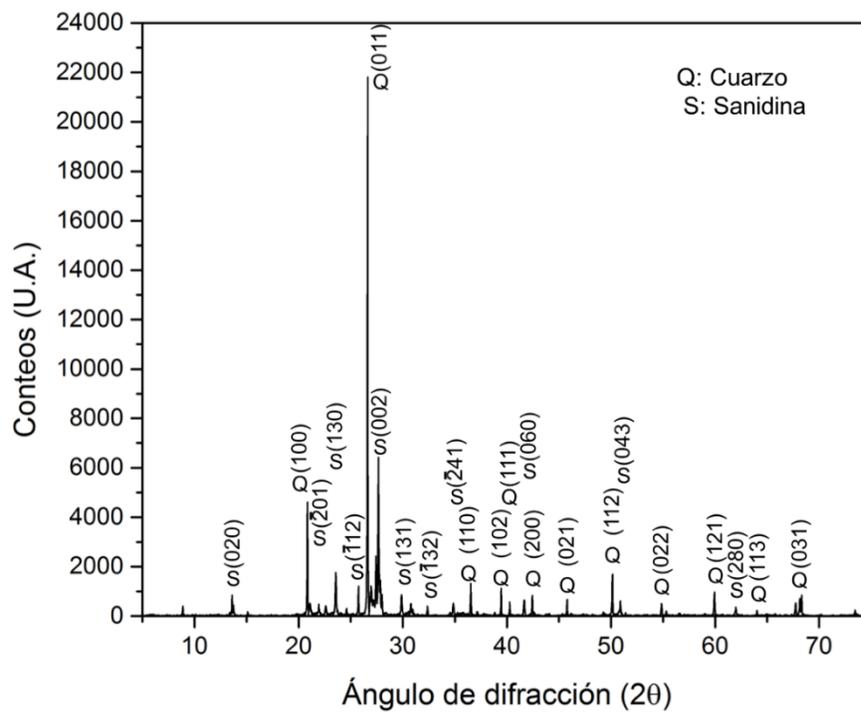


Fig. 20. Difractograma de Rayos X para la arena.

3.1.4. Composición química del Desecho de Lana Mineral (DLM) y de la arena.

Los resultados del análisis de composición química para la arena y el DLM se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Composición química del DLM y de la arena.

	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MnO	Na ₂ O	MgO	Otros
DLM (%)	52.4	25.3	17.8	0.5	1.1	0.5	1.7	0.4	-	-	0.3
ARENA (%)	72.3	1.1	15.3	3.5	0.8	3.8	-	-	1.8	1.4	-

Se puede observar que en el DLM su principal componente es el óxido de silicio (SiO₂) con un 52.4%, seguido por el óxido de calcio (CaO) con un 25.3% y el óxido de aluminio (Al₂O₃) con un 17.8%, entre los cuales conforman 95.5% del DLM. Para la arena, al igual que en el DLM, su principal componente es el óxido de silicio (SiO₂), aunque en mayor proporción (72.3%), el contenido de óxido de aluminio (Al₂O₃) es ligeramente menor en comparación al DLM con un 15.3%; sin embargo, se observa que el contenido de óxido de calcio (CaO) de la arena (1.1%) es significativamente menor en comparación con el del DLM (25.3%).

La composición química del DLM se encuentra dentro de los valores típicos de composición reportados para las lanas minerales producidas por la industria de aislantes térmicos que se listan en la Tabla 5 [41]. Se observa que el contenido de SiO₂ del DLM (52.4%) es similar al reportado para las lanas de roca industriales que contienen entre 40 al 52% de SiO₂. Sin embargo, el porcentaje de CaO del DLM (25.3%), está más cercano a los valores reportados para las lanas de escoria las cuales contiene entre el 27 al 40% de CaO. Dado lo anterior, el DLM no puede ser clasificado como desecho de lana de roca, ni de lana de escoria, siendo adecuado clasificarlo como un desecho de lana mineral.

3.1.5. Morfología de las partículas de Desecho de Lana Mineral.

La Fig. 21 presenta la morfología de las partículas de DLM. Se puede observar que el DLM contiene partículas con una gran variedad de formas, entre las

que se distinguen partículas alargadas (1), esféricas (2), tipo fibra (3), algunas con forma de gota (4) y otras con formas muy irregulares (5). Adicionalmente se observa que en las partículas de DLM predominan los bordes redondeados. Las partículas alargadas tiene una longitud aproximada de hasta 1830 μm y su sección transversal puede ir aproximadamente desde 90 μm hasta 350 μm ; por su las partículas esféricas se observan de diferentes tamaños que pueden llegar hasta las 650 μm de diámetro.

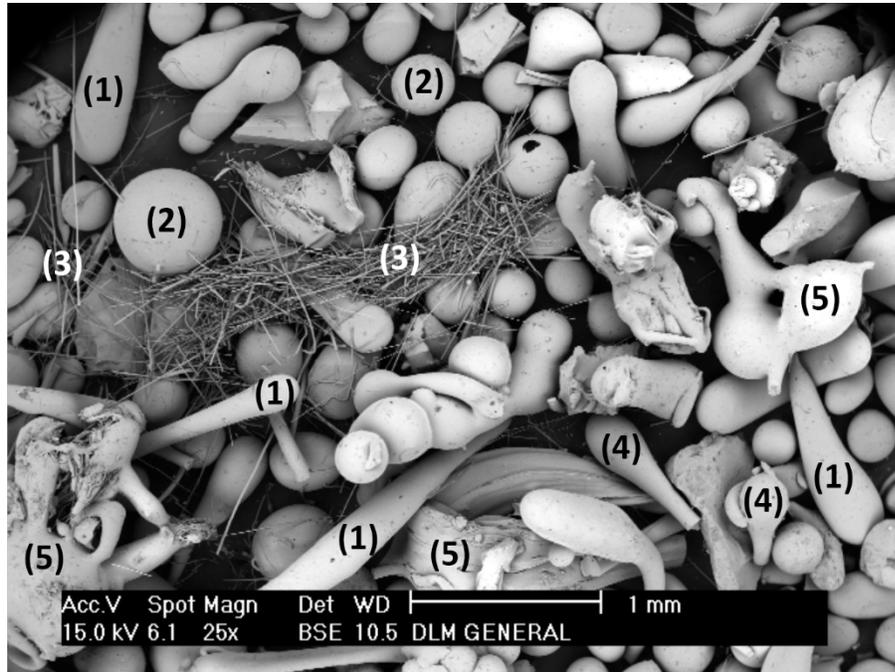


Fig. 21. Micrografía de las partículas de DLM obtenida por Microscopía Electrónica de Barrido.

Por otro lado, en la Fig. 22 se observa que las partículas de arena presentan bordes angulares, caras planas y la presencia de partículas alargadas es mínima. A diferencia de partículas de DLM, en las partículas arena no se observan gran variedad de formas. El tamaño de las partículas de la arena puede ir desde las 80 μm hasta las 1090 μm aproximadamente.

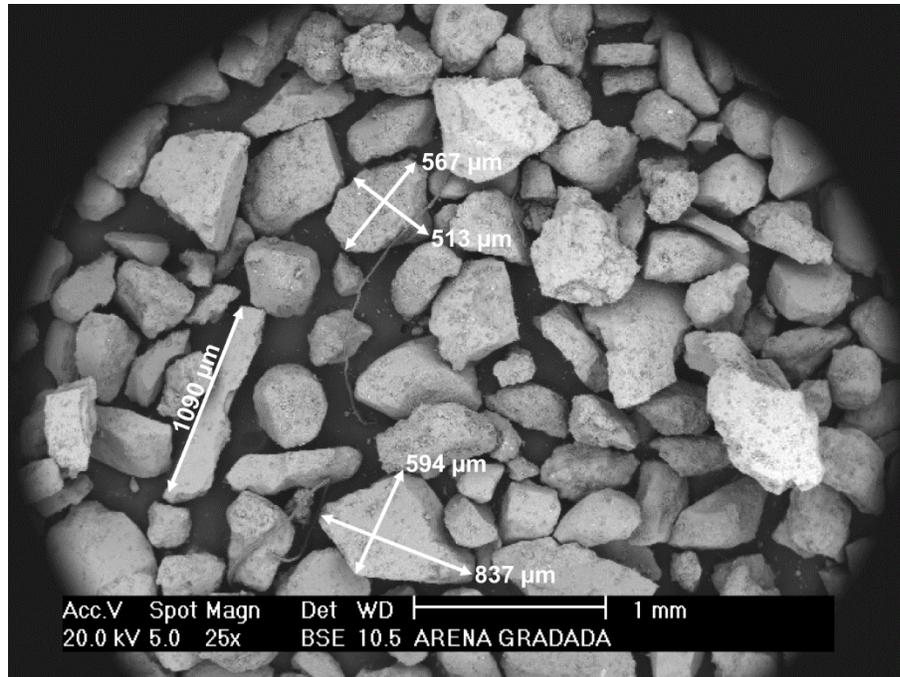


Fig. 22. Micrografía de las partículas de arena obtenida por Microscopía Electrónica de Barrido.

Como se mencionó en la sección 1.1.2 de este trabajo, la forma y la distribución de tamaño de las partículas del agregado, influyen en las propiedades tanto físicas como mecánicas de los morteros base cemento. Mediante microscopía electrónica de barrido se realizó un análisis de la forma de las partículas de DLM clasificadas por tamaño de acuerdo a la distribución mencionada en la Tabla 9.

La Fig. 23 muestra la morfología de las partículas con tamaño de sección transversal superior a 600 μm y la Fig. 24, muestra las partículas con tamaño de la sección transversal entre 425 a 600 μm . Como se puede observar en estas dos figuras, predominan las formas irregulares sin haber una tendencia establecida en su forma y se observan algunas partículas alargadas cuya longitud puede llegar a ser mayor a las 2000 μm ; estas partículas representan el 28% en peso del Desecho de Lana Mineral (Tabla 9).

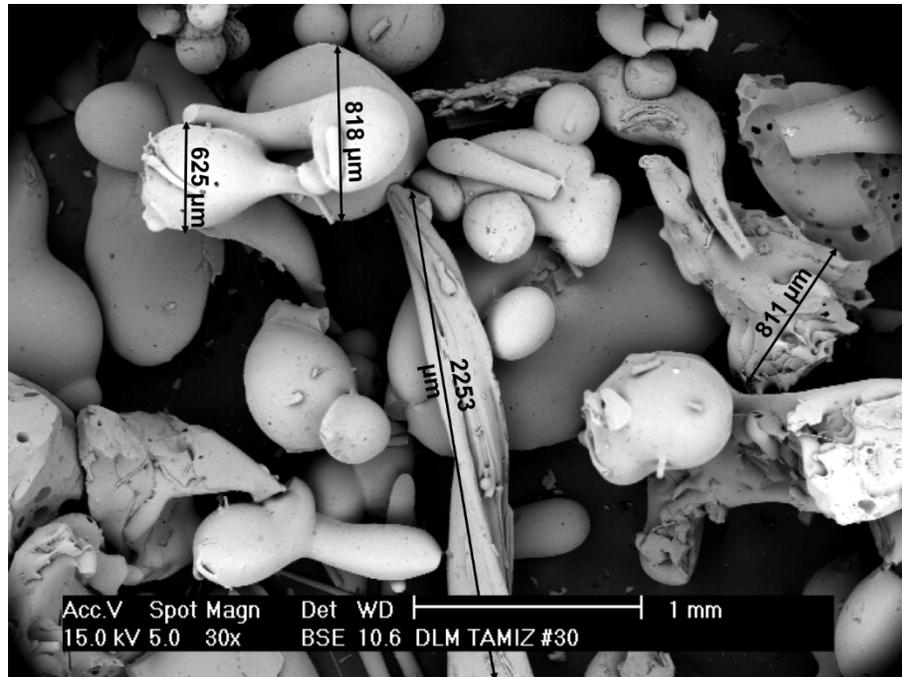


Fig. 23. Morfología de las partículas de DLM con tamaño de sección transversal mayores a 600 μm .

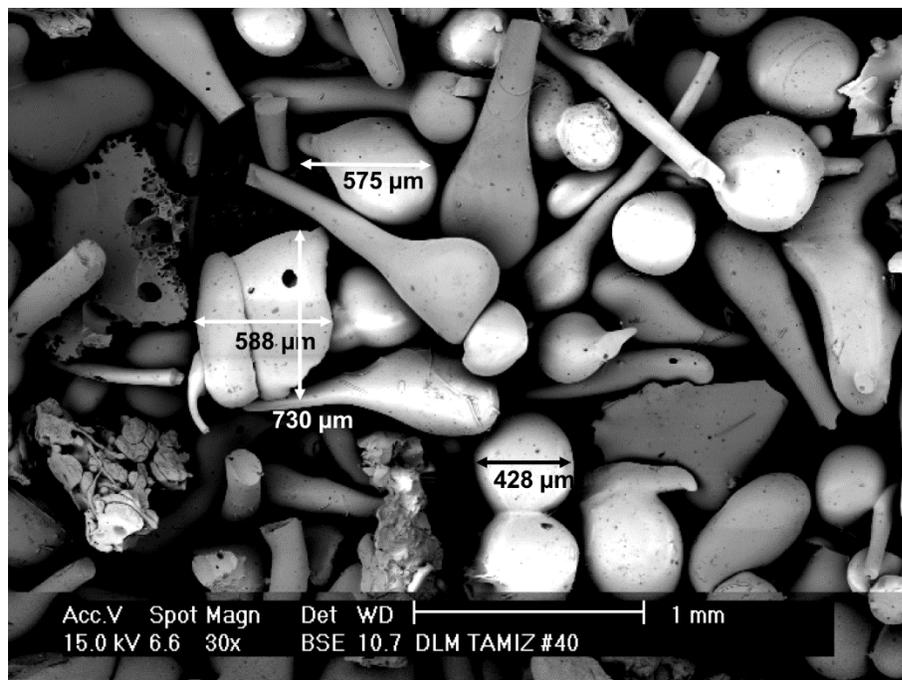


Fig. 24. Morfología de las partículas de DLM con tamaños de sección transversal entre 425 a 600 μm .

Las partículas de DLM con tamaño de la sección transversal entre 300 a 425 μm se muestran en la Fig. 25. Se observa que entre estas partículas predominan las formas alargadas y se observan algunas con longitudes superiores a 1500 μm ; algunas partículas presentan un encuellamiento hacia su parte central (1) y otras presentan terminación ovoide y en algunos casos esférica (2), lo que representa cambios en la sección transversal de las partículas (por ejemplo algunas partículas pueden pasar de 345 μm de sección transversal en sus extremos a 180 μm en su zona central, aproximadamente). Estas partículas representan la mayor parte del DLM con un 40% en peso (Tabla 9).

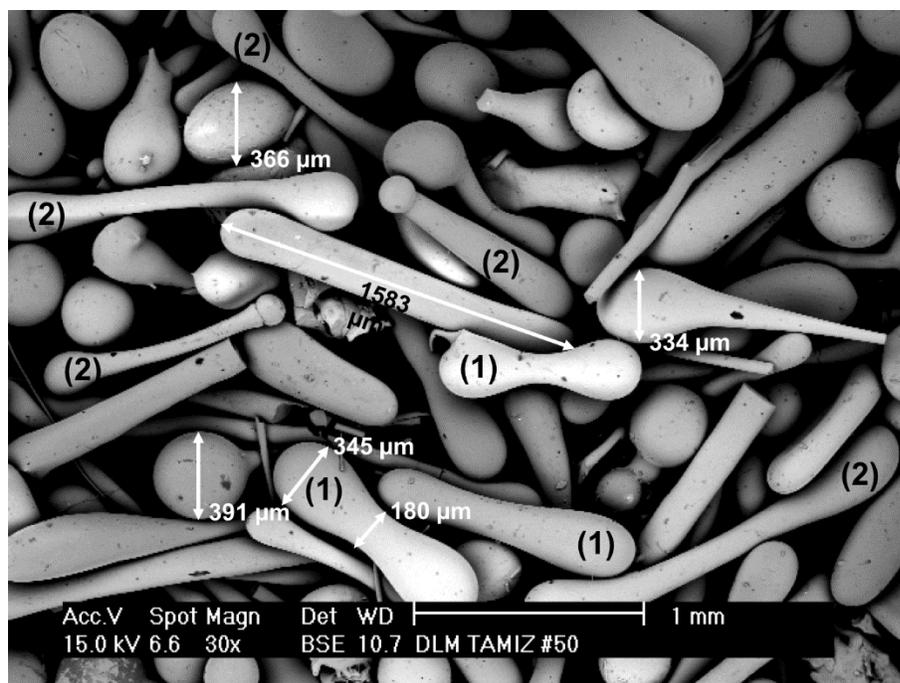


Fig. 25. Morfología de las partículas de DLM con tamaños de sección transversal de 300 a 425 μm .

En la Fig. 26, se observan en su mayoría partículas con forma esférica y tamaños que van entre 150 a 300 μm ; estas partículas representan el 30% en peso del DLM (Tabla 9).

En la Fig. 27, se muestran las partículas con tamaño inferior a 150 μm que ocupan el 2% del DLM (Tabla 9); se observa que en su mayoría son de forma alargada tipo fibra con longitudes de hasta 1250 μm aproximadamente y en menor proporción están presentes partículas con forma esférica.

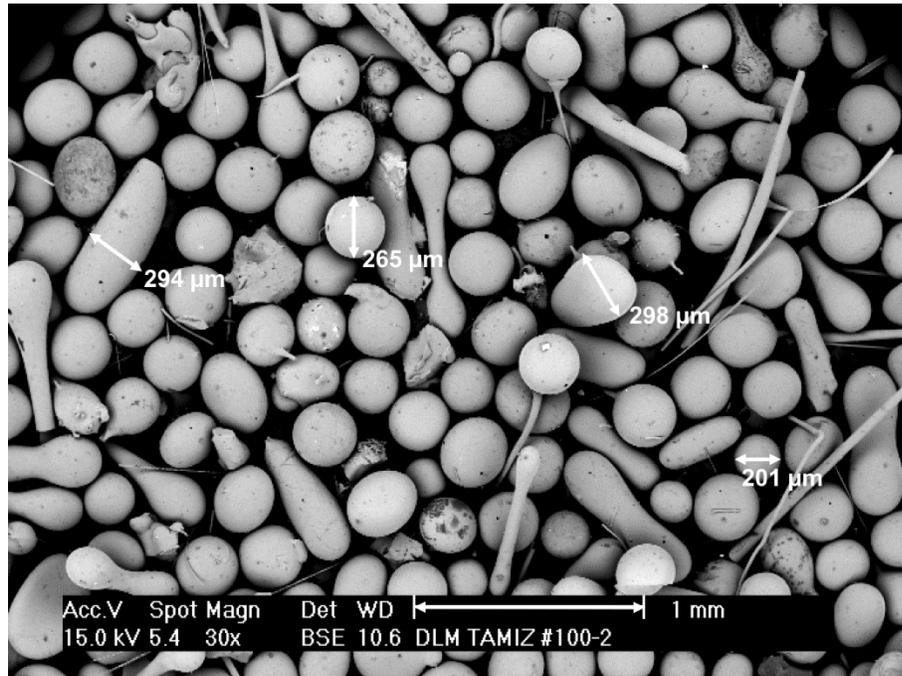


Fig. 26. Morfología de las partículas de DLM con tamaños de sección transversal entre 150 a 300 μm .

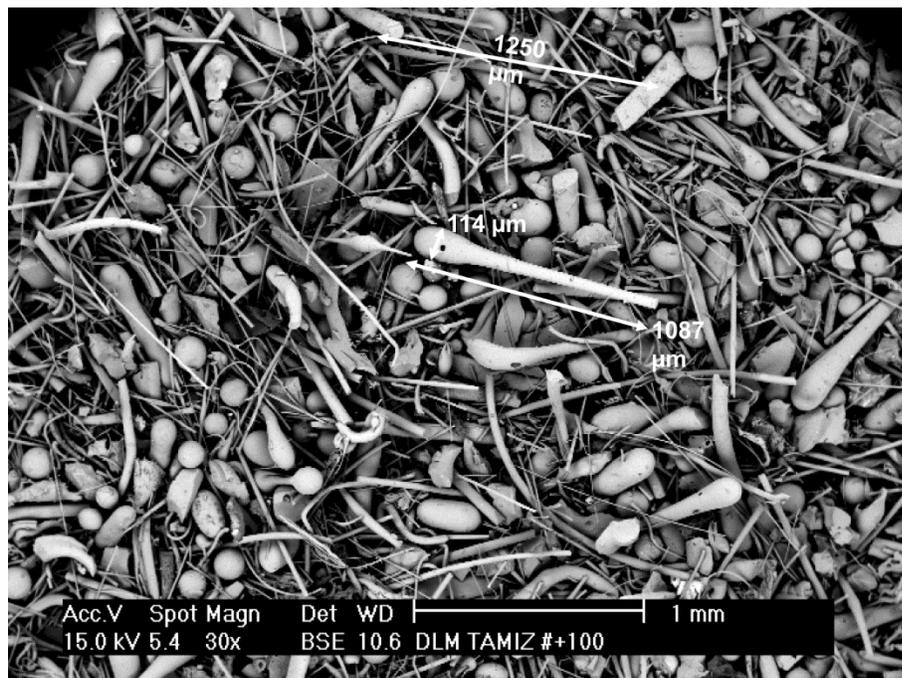


Fig. 27. Morfología de las partículas de DLM con sección transversal inferior 150 μm .

A nivel general, el análisis morfológico de las partículas de DLM permitió identificar que en este material predominan las partículas con formas alargadas (Fig. 25 y Fig. 27) las cuales ocupan aproximadamente un 42% en peso del DLM (Tabla 9) y las partículas con formas esféricas (Fig. 26) las cuales representan aproximadamente el 30% en peso del DLM (Tabla 9). Por otro lado se pudo observar que en las partículas de DLM predominan los bordes redondeados.

3.2. EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL DLM SOBRE LA POROSIDAD, ABSORCIÓN Y DENSIDAD DE LOS MORTEROS.

En los morteros base cemento, la absorción, porosidad y la densidad, son propiedades que están ligadas entre sí y son responsables, en parte, de las propiedades mecánicas del compuesto. Por lo general, en los morteros, una menor porosidad y una mayor densidad representan una mejora en la resistencia a la compresión [63]. La Fig. 28, muestra la influencia del DLM sobre el volumen de poros permeables de los morteros. Se observa que a los 28 y 56 días de curado, el volumen de poros disminuye gradualmente conforme se incrementa el porcentaje de sustitución de arena por DLM. El contenido de poros permeables de los morteros a los 28 días de curado se redujo de 20.7% en los morteros testigo, a 12.8% en los morteros con el 60% de DLM; y a los 56 días pasó de 16.7% a 12.6%, lo que representa una reducción del volumen de poros del 38% y 24%, respectivamente.

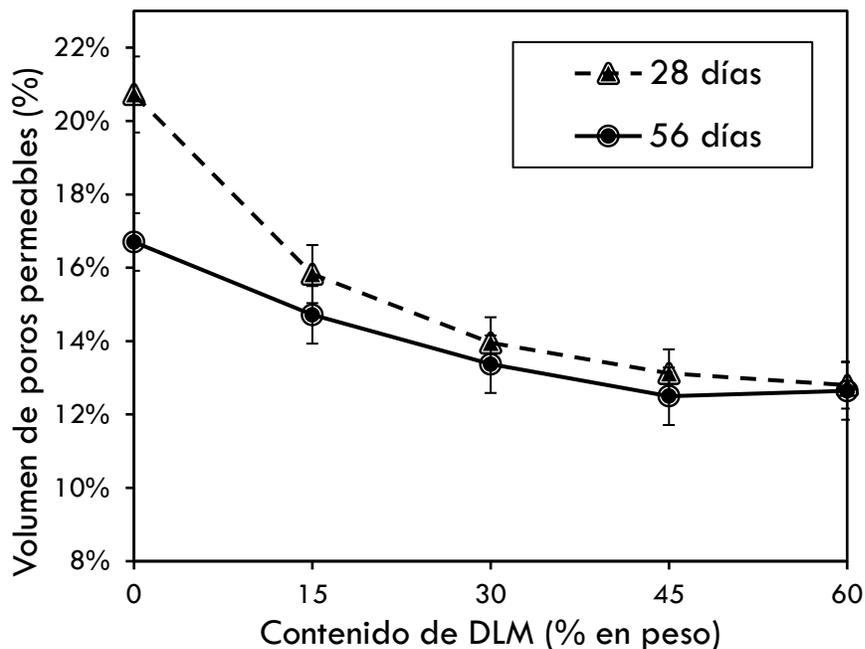


Fig. 28. Efecto del DLM sobre el volumen de poros permeables de los morteros.

La absorción de los morteros con el 60% de DLM decreció un 43% y un 21% a los 28 y 56 días de curado, respectivamente, como se observa en la Tabla 12. Este resultado está de acuerdo con la reducción de la porosidad de los morteros modificados con DLM.

Tabla 12. Efecto del DLM en la absorción de los morteros.

Tiempo de Curado	Absorción (% en peso)				
	M0	M1	M2	M3	M4
28 días	9.0	6.9	6.2	5.7	5.1
56 días	7.1	6.3	5.9	5.5	5.6

Por su parte, la densidad de los morteros con DLM aumentó ligeramente en comparación a los morteros testigo (0% de DLM). Como se observa en la Fig. 29, la densidad del mortero se incrementó gradualmente al aumentar el contenido de DLM hasta el 60%, siendo un 8% superior respecto al mortero testigo, a los 56 días de curado. Este comportamiento es coherente con los resultados anteriores para porosidad y absorción, toda vez que una microestructura menos porosa representa un material más denso en este tipo de materiales.

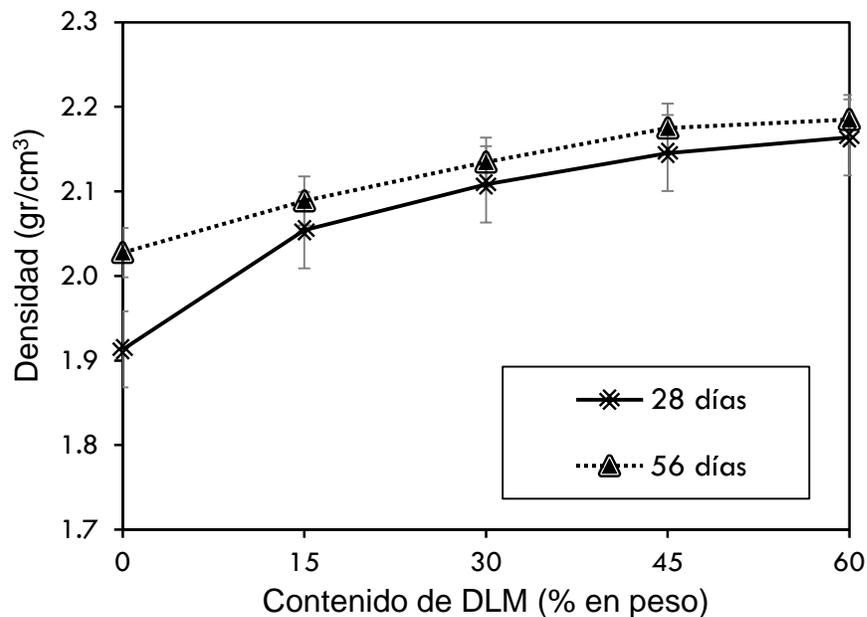


Fig. 29. Influencia del DLM sobre la densidad de morteros.

La reducción del volumen de poros permeables, de la absorción y el incremento de la densidad de los morteros modificados con DLM, posiblemente se podría atribuir a la marcada diferencia en la absorción del DLM respecto a la arena, la cual es aproximadamente 30 veces menor, como

se mencionó en la Tabla 10. Adicionalmente, en el DLM, se identificaron gran cantidad de partículas con formas redondeadas que representan aproximadamente el 30% del DLM (Fig. 26). Este tipo de partículas, a diferencia de las partículas de la arena que tiene caras planas y bordes angulares (Fig. 22), pueden desplazarse dentro del material con mayor fluidez por la vibración causada durante el proceso de fabricación, y así lograr un acomodo de las partículas más compacto y por ende puede contribuir a la densificación del material [15].

Los resultados anteriores muestran que el DLM respecto a la arena, mejora las propiedades físicas del mortero al reducir la cantidad de poros permeables, y están de acuerdo con los resultados reportados en otras investigaciones [4].

3.3. INFLUENCIA DEL DESECHO DE LANA MINERAL EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MORTEROS.

Se evaluó la influencia del Desecho de Lana Mineral (DLM) sobre la resistencia a la compresión de los morteros. Los resultados se presentan en la Fig. 30, que muestra la evolución de la resistencia a la compresión contra el tiempo de curado (7, 14, 28 y 56 días), de los morteros adicionados con hasta un 60% de DLM.

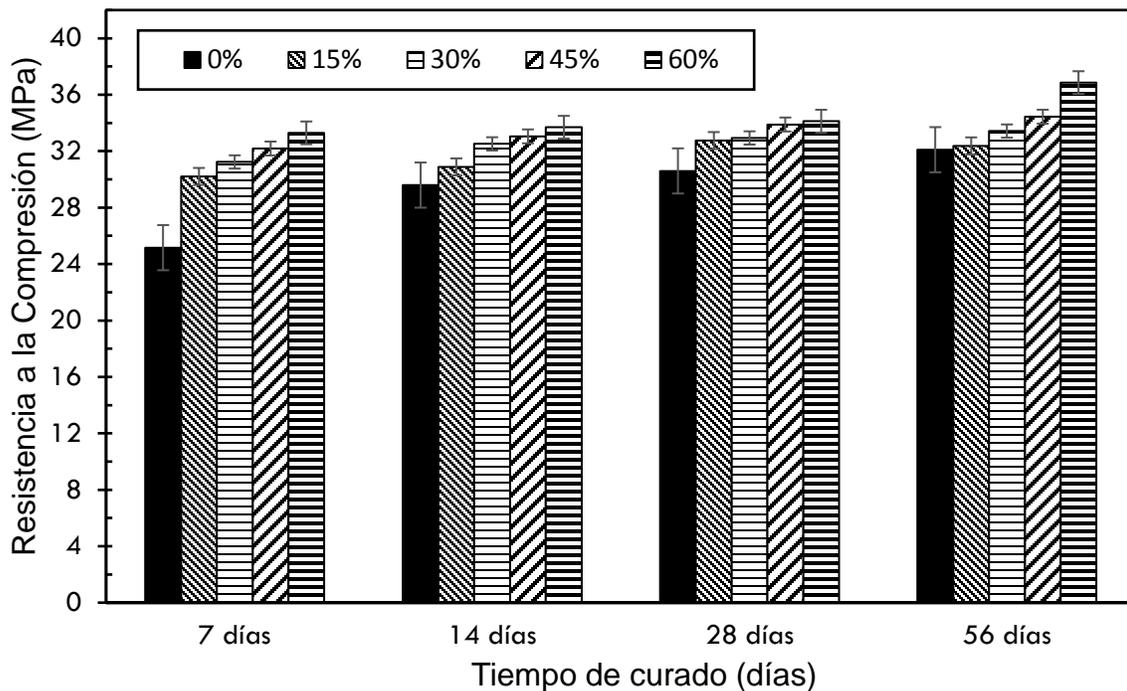


Fig. 30. Influencia del DLM sobre la resistencia a la compresión de morteros.

Se puede observar a nivel general que, en comparación con las muestras testigo, la resistencia a la compresión de los morteros modificados, se incrementa conforme se aumenta el contenido de DLM. Este comportamiento fue el mismo para todos los tiempos de curado evaluados. Los morteros con el 60% de DLM a los 28 días y a los 56 días, muestran un ligero aumento de la resistencia a la compresión de un 12 y un 15%, respectivamente, con respecto a las muestras elaboradas solo con arena. Así, a los 56 días de curado la resistencia pasó de 32.1 MPa (0% de DLM) a 36.9 MPa (60% de DLM).

Por otro lado, en la misma Fig. 30 se puede observar que la velocidad de curado en los morteros que contenían DLM fue mayor que los morteros de referencia. Como puede observarse en esta figura a los 7 días de curado, los morteros con DLM presentan un crecimiento gradual de la resistencia a la compresión respecto a la muestra testigo del 20, 24, 28 y 32%, conforme se incrementa el contenido de DLM en un 15, 30, 45 y 60%, respectivamente. Este incremento a nivel general de la resistencia a la compresión se pudo deber a los siguientes factores:

A). Reducción del contenido de poros y aumento de la densidad de los morteros con DLM: la presencia del DLM en los morteros representó un decremento gradual en el contenido de poros permeables de las mezclas a medida que se aumentó la sustitución de arena, mostrando una reducción de poros del 38% y 24% para las muestras con el 60% de DLM a los 28 y 56 días de curado, respectivamente (Fig. 28). A su vez, la densidad del mortero aumento hasta un 8% a los 56 días (Fig. 29), con el mismo porcentaje de sustitución. Así, posiblemente la menor cantidad de poros permeables del mortero con DLM y su mayor densidad respecto a los morteros testigo, pudiera representar una reducción de sitios de iniciación de fisuras, lo que lo que pudiera causar un posible aumento de la resistencia a la compresión de los morteros con DLM [39]. En la Fig. 31 se muestra la resistencia a la compresión de los morteros, en función de su volumen de poros permeables. Como se puede observar, a medida que el volumen de poros permeables disminuye con el incremento del contenido de DLM en el mortero, la resistencia a la compresión aumenta, creándose una tendencia lineal en la resistencia a la compresión del mortero con la porosidad. Esta tendencia es un comportamiento normal de los compuestos base cemento como el mortero y el concreto.

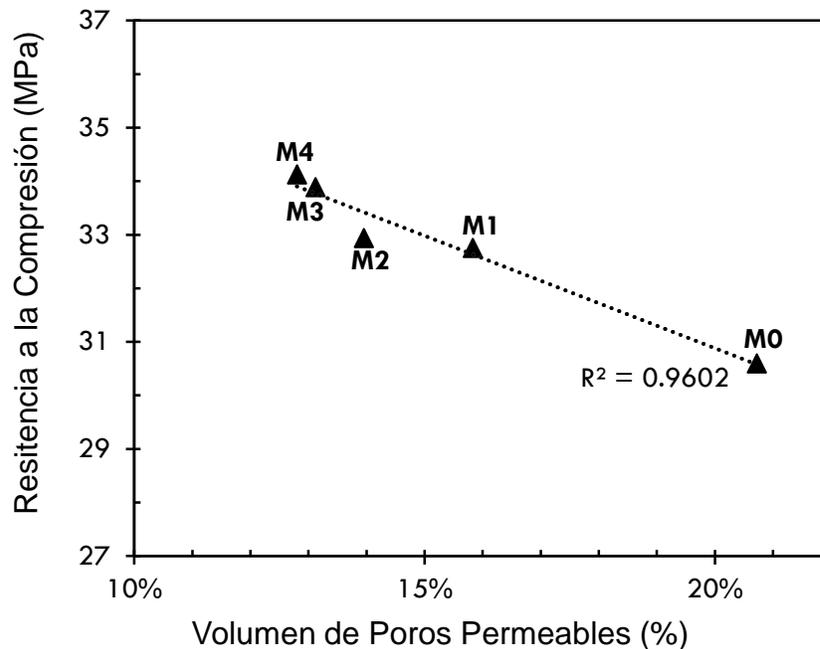


Fig. 31. Relación de la resistencia a la compresión y la porosidad de morteros modificados con 0, 15, 30, 45 y 60% de DLM (M0, M1, M2, M3, M4 respectivamente), a 28 días de curado.

B). Reducción de humedad en la Zona de Transición Interfacial (ZTI) pasta/DLM: en los concretos y morteros base cemento, por lo general, la Zona de Transición Interfacial pasta/agregado, es la zona con menor resistencia mecánica [26]; esto se debe a un exceso de agua que se acumula en los agregados, tanto en su superficie (por su rugosidad) como en su interior (por su absorción), que satura dicha zona. Este exceso de agua no es consumido en las reacciones de hidratación del cemento (Tabla 4), por lo cual se podría generar una alta cantidad de espacios vacíos lo que posiblemente aumentaría la porosidad de la Zona de Transición Interfacial y así se debilitaría mecánicamente [64].

Por lo anterior, es posible que agregados como el DLM, que tienen una absorción hasta 30 veces menor que la arena (Tabla 10), pueda reducir la cantidad de agua presente en la Zona de Transición Interfacial pasta/DLM contribuyendo con la reducción de la porosidad y por lo tanto mejorando su desempeño mecánico.

Adicionalmente, como se observa en la Fig. 32, las partículas de DLM tienen una superficie más mayormente lisa y libre imperfecciones, en comparación con las partículas de arena (Fig. 33), lo que puede disminuir la cantidad de agua adherida a la periferia de sus partículas y así contribuir en la reducción del exceso de humedad de la zona de transición interfacial.

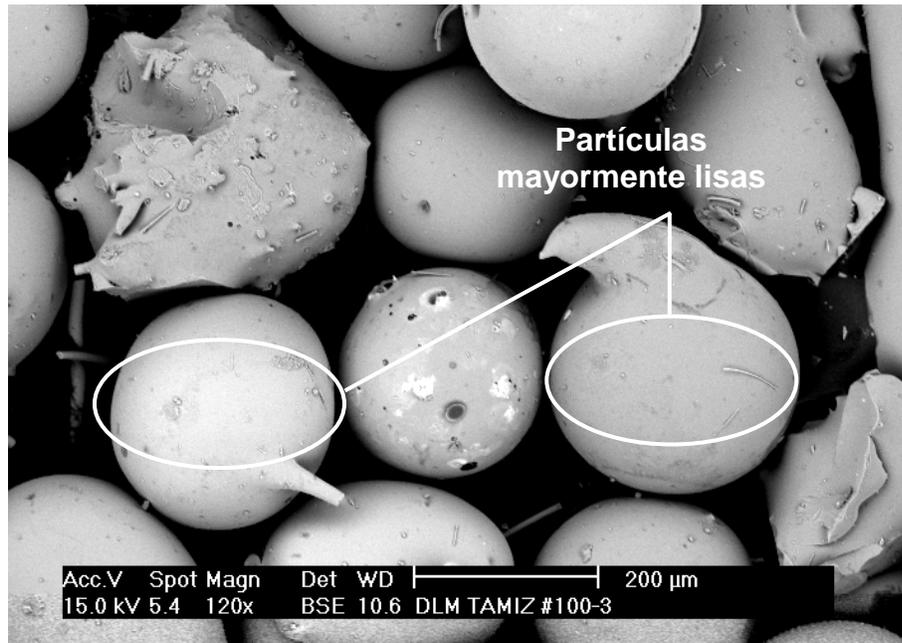


Fig. 32. Detalle de la superficie de las partículas de DLM.

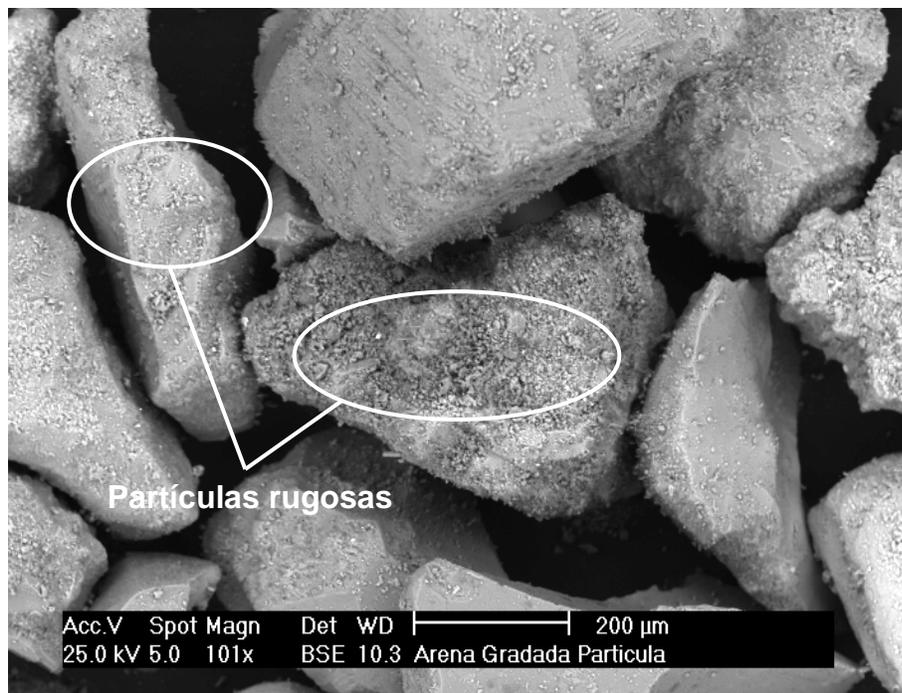


Fig. 33. Detalle de la superficie de las partículas de arena.

De acuerdo a lo anterior, es posible que el DLM en los morteros, pueda generar una Zona de Transición Interfacial pasta/DLM con menor porosidad en comparación a la generada por las partículas de arena, debido a la posible reducción de humedad en dicha zona, y por ende, puede contribuir a densificarla, lo que repercute en una mejora de su resistencia mecánica [39, 64].

C). Morfología de las partículas de DLM en la microestructura del mortero: la Fig. 34 muestra la microestructura de los morteros elaborados con 60% de DLM y la Fig. 35 la microestructura de los morteros testigo elaborados sólo con arena.

Como observa en la microestructura de los morteros con el 60% de DLM (Fig. 34), predominan las partículas con formas redondeadas y hay presencia de partículas alargadas de DLM con longitudes de hasta 1477 μm . Por su parte, en los morteros tradicionales (Fig. 35), la presencia de partículas alargadas es mínima, sin embargo las mismas son de longitudes relativamente cortas en comparación con las del DLM (aproximadamente 499 μm).

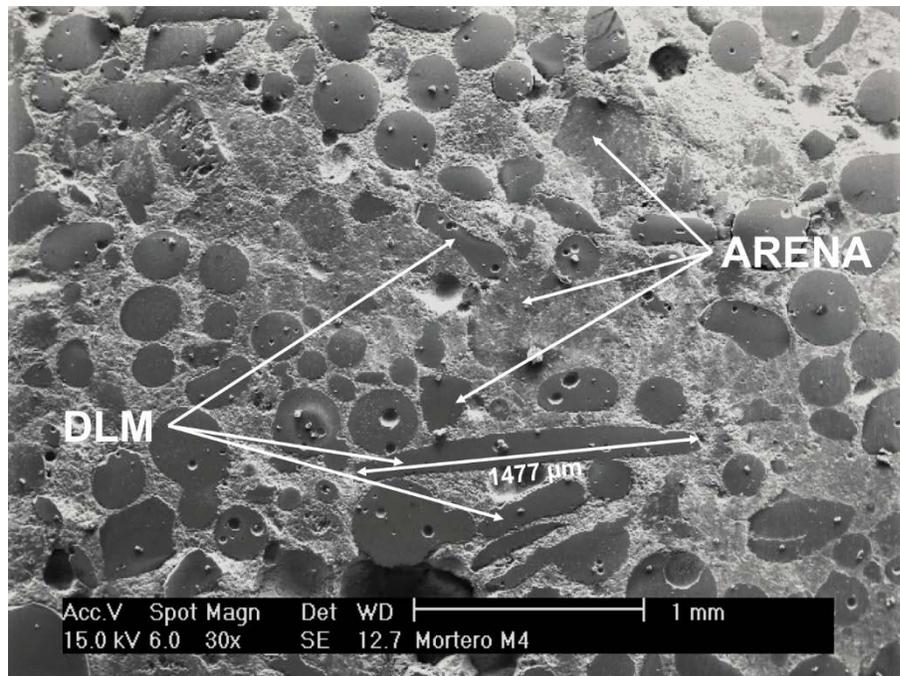


Fig. 34. Microestructura del mortero elaborado con 60% de DLM.

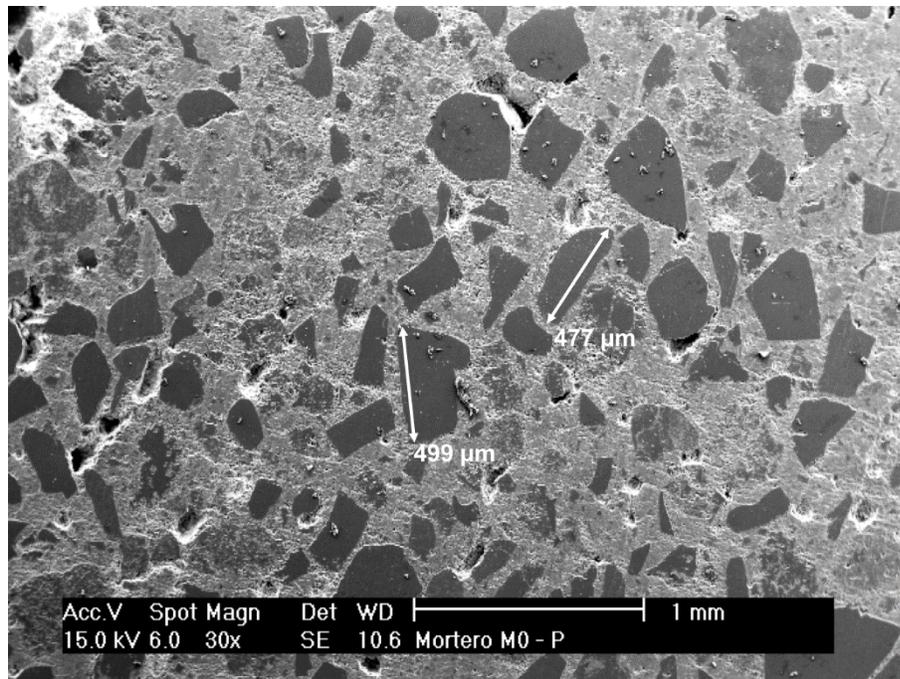


Fig. 35. Microestructura del mortero tradicional elaborado sólo con arena.

En los concretos y morteros convencionales por lo general, las fisuras se propagan a través de la Zona de Transición Interfacial (ZTI) pasta/agregado, por ser esta zona la que generalmente presenta menor resistencia mecánica en el concreto [18, 26]. Se ha reportado que, las partículas con formas alargadas en los morteros, pueden obstaculizar la propagación de las fisuras al interferir su recorrido y conducirlos a recorrer una mayor distancia a través de la Zona de Transición Interfacial (ZTI), lo que generalmente pudiera representar una mayor resistencia mecánica del mortero [4, 64]. De acuerdo a esto, en los morteros con DLM es posible que se presente este comportamiento ya que el DLM contiene gran cantidad de partículas alargadas (aproximadamente el 42% en peso del DLM, Tabla 9, Fig. 26A, Fig. 27.), respecto a la arena. Adicionalmente y como se mencionó en la sección 3.3-B de este trabajo, es posible que las fisuras deban propagarse a través de una posible Zona de Transición Interfacial pasta/DLM menos porosa y probablemente más densa. Esta característica de la microestructura de los morteros elaborados con DLM, pudo haber contribuido a mejorar la resistencia a la compresión de los morteros, que como se observó en la Fig. 30, se incrementa gradualmente con el aumento del porcentaje de sustitución de arena por DLM.

Por su parte, el aumento de hasta el 32% de la resistencia a la compresión a los 7 días de curado de los morteros con hasta el 60% de DLM, pudo ser causado principalmente por la posible ZTI pasta/DLM mejorada, lo que podría

representar una adhesión pasta/DLM más fuerte y con mayor capacidad de absorber esfuerzos antes de la falla. Se ha reportado que una mejor adhesión de los agregados a la pasta de cemento puede representar un aumento en la resistencia a la compresión con un efecto más representativo a tempranas edades de curado [65].

Como se mencionó en la sección 2.3.1, durante la elaboración de los morteros para las pruebas de compresión se presentó el fenómeno de sangrado en los morteros que contenían porcentajes de sustitución por arriba del 45%. Es posible que este fenómeno se presentara debido a la baja absorción del DLM respecto a la arena (Tabla 10). Adicionalmente, es posible que durante el proceso de compactación de los morteros, las partículas con formas redondeadas del DLM (Fig. 26) pudieran haberse desplazado con mayor facilidad dentro de la mezcla que las partículas de arena, a causa de sus bordes redondeados, logrando posiblemente un acomodo más compacto y así, desplazando parte del agua hacia el exterior del mortero [15, 66]. El fenómeno de sangrado en los morteros con DLM pudiera ser un indicativo de un posible exceso de agua para el amasado, es decir que, para porcentajes de sustitución por arriba del 45% de arena por DLM, pudiera ser posible una reducción de la cantidad de agua de amasado sin comprometer la trabajabilidad del mortero con DLM respecto a los morteros testigo, lo que pudiera representar una mayor reducción de la porosidad del mortero y una posible mayor resistencia a la compresión respecto a los morteros elaborados sólo con arena.

3.4. EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL DESECHO DE LANA MINERAL (DLM) SOBRE LA RESISTENCIA MECÁNICA A LA FLEXIÓN DE MORTEROS.

El concreto y el mortero se han considerado materiales frágiles, debido a que ante esfuerzos de flexión y/o tracción su resistencia es baja (10 a 15% de su resistencia a la compresión) [67], dado esto se refuerza con barras de acero las cuales asumen en mayor parte los esfuerzos mencionados; sin embargo, dicho refuerzo no es tan efectivo en el control del inicio de la fisuración, por lo cual se han realizado investigaciones que contemplan la adición y/o sustitución de los agregados naturales por otros que contengan partículas con formas alargadas y fibras con el fin de mejorar su desempeño mecánico [64].

Los resultados de las pruebas de flexión de los morteros a 56 días de curado se muestran en la Fig. 36.

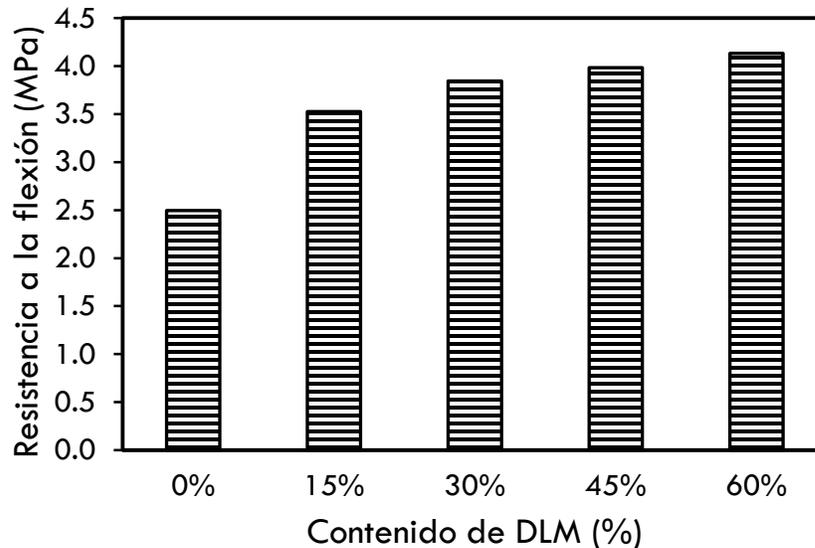


Fig. 36. Influencia del DLM sobre la resistencia a la flexión de morteros.

En esta figura se puede observar que la resistencia a la flexión de los morteros se va incrementando a medida que se aumenta la cantidad de DLM adicionada. Los morteros testigo presentaron una resistencia a la flexión de 2.49 MPa; mientras que las muestras con el 15, 30, 45 y 60% de DLM obtuvieron valores promedio de resistencia de 3.53, 3.85, 3.98 y 4.13 MPa, respectivamente. Estos resultados representan una mejora considerable en la resistencia a la flexión de los morteros de hasta el 66% respecto a las muestras testigo elaboradas sólo con arena.

Este aumento en la resistencia a la flexión debida a la presencia del DLM en el mortero se puede explicar de la siguiente manera.

El desempeño mecánico del mortero está fuertemente relacionado con la interacción entre los agregados y la pasta de cemento. Dicha interacción depende de varios factores, entre ellos la adhesión física y química de los agregados a la pasta de cemento, así como también el anclaje mecánico entre los mismos. Este último factor es más relevante cuando el mortero es sometido a esfuerzos de flexión o tracción y está determinado mayormente por la morfología de las partículas del agregado, siendo más efectivas aquellas con formas alargadas y de geometría compleja e irregular dado que por lo cambios de sección en su longitud posiblemente pudieran generar un mejor anclaje mecánico y adicionalmente funcionar como puente o enlace entre las partes del mortero que han sido divididas por alguna fisura [64]. El anclaje mecánico se puede dar en las partículas de los agregados por cambios en la sección transversal sobre su mayor longitud (por ejemplo, una sección transversal de mayor tamaño a los extremos y delgada hacia el centro de la

partícula- Fig. 37c), que al ser envueltas por la pasta de cemento, cuando esta endurece, esta región sólida restringe su movimiento y/o evita que las partículas se deslicen.

Cuando el mortero contiene partículas con formas alargadas (Fig. 37a) y de geometría compleja (caso del mortero adicionado con DLM - Fig. 37c), al ser sometido a cargas de flexión (Fig. 37a), Bentur *et. al* [64] mencionan que se generan una serie de esfuerzos de tensión (σ_f) y de corte (τ) (Fig. 37b) los cuales se concentran en las terminaciones o extremos de las partículas tipo fibras [64].

En los morteros elaborados con agregados que contienen partículas con caras planas (arena - Fig. 22), la cantidad de esfuerzos transmitidos de la pasta de cemento al agregado dependen de: 1) la adhesión física, que está influenciada por rugosidad de la superficie de la partículas (fricción); 2) por la adhesión química, relacionada con la afinidad química entre los agregados y la pasta de cemento, que de existir, genera un flujo de iones entre la pasta y el agregado lo que crea fuerzas de atracción electrostática que los mantiene unidos, y 3) por la resistencia mecánica de la Zona de Transición Interfacial pasta/agregado.

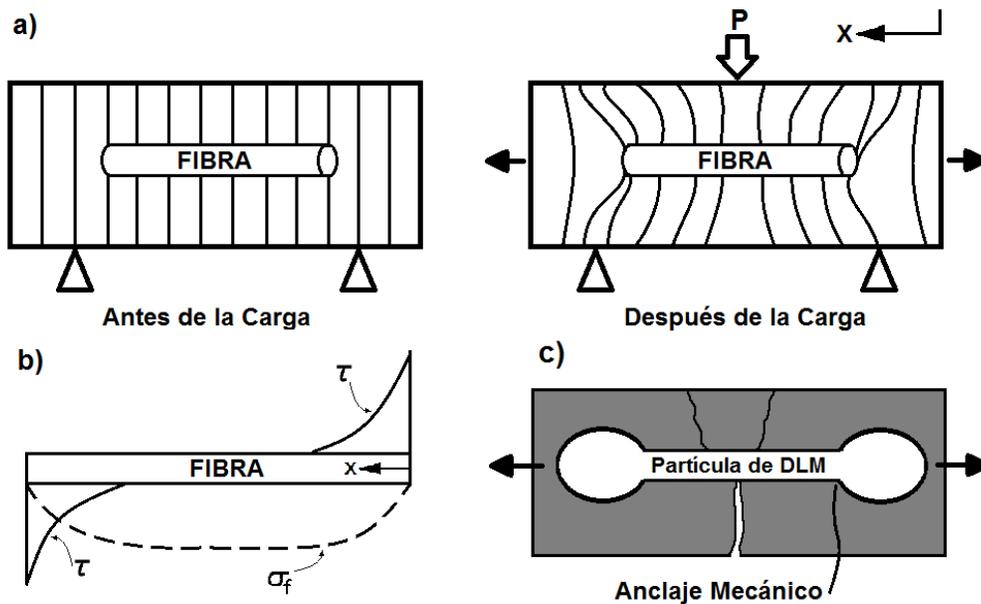


Fig. 37. Descripción esquemática del campo de esfuerzos generado por una fuerza P alrededor de una fibra embebida en la matriz de cemento: a) deformación en la matriz alrededor de la fibra antes y después de la carga; b) distribución de esfuerzos de corte (τ) y de tensión en la fibra (σ_f); c) esquema de una partícula de DLM de geometría compleja rodeada por la pasta de cemento posterior a la aplicación de la carga. Adaptada de Bentur *et. al* [64].

Cuando el mortero es sometido a esfuerzos de flexión y estos tres factores fallan, la transferencia de esfuerzos de la pasta de cemento al agregado con caras planas (como las partículas de la arena) se pierde y la pasta de cemento asume todos los esfuerzos hasta la falla [18]. En los morteros elaborados con agregados que contienen partículas con geometría compleja y formas alargadas (como el DLM), la cantidad de esfuerzos transmitidos de la pasta de cemento al agregado dependen de, además de los tres factores mencionados para los agregados con caras planas, de un cuarto factor que es el anclaje mecánico (Fig. 37c), el cual podría incrementar considerablemente la cantidad de esfuerzos transmitidos desde la matriz del mortero al agregado. Esto se debe a que cuando los factores 1), 2) y 3) fallan (es decir, no hay adhesión entre la pasta y el agregado), el anclaje mecánico creado por las partículas alargadas y con formas irregulares (como las del DLM), permite continuar transfiriendo esfuerzos de la pasta de cemento a los agregados hasta el momento en que la partícula falla, o su envoltura se rompe, lo que aumenta su resistencia a la flexión a causa de la energía adicional que ha sido absorbida por las partículas del agregado.

Como se observa en la Fig. 38, el DLM contiene gran cantidad de partículas alargadas y de geometría compleja las cuales tiene la posibilidad, en mayor grado que la arena, de generar el efecto del anclaje mecánico debido a los cambios de sección que tienen estas partículas a lo largo de su longitud. Esto posiblemente pudiera contribuir al aumento de la resistencia a la flexión de los morteros con DLM en comparación de los elaborados sólo con arena.



Fig. 38. Micrografía de las partículas de DLM observadas por MEB a bajos aumentos.

Adicional a lo anterior cabe mencionar que, como se explicó en la sección 3.3 de este trabajo, es posible que la Zona de Transición Interfacial pasta/DLM presente una menor porosidad lo que puede mejorar su desempeño mecánico. Si se tiene en cuenta que la Zona de Transición Interfacial influye en la transferencia de esfuerzos de la pasta a los agregados, este factor también puede contribuir al aumento de la resistencia a la flexión de los morteros adicionados con DLM.

Por su parte el incremento gradual de la resistencia a la flexión de los morteros a causa del aumento porcentual del contenido de DLM (Fig. 36), se puede deber a una mayor cantidad de partículas alargadas y de formas complejas con capacidad de desarrollar un anclaje mecánico en el mortero.

3.5. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL DESECHO DE LANA MINERAL (DLM) SOBRE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MORTEROS.

Se determinó el efecto del DLM sobre la conductividad térmica (k), difusividad térmica (α) y sobre el calor específico (C_p) de los morteros que contenían el 60% de DLM en sustitución del agregado fino natural, por ser estos los morteros que obtuvieron la mayor resistencia a la compresión en los ensayos anteriores. Adicionalmente, estos morteros al contener la mayor cantidad de DLM usado en este trabajo (60%), son los que pueden variar en mayor grado su comportamiento térmico. De igual forma, se determinaron los mismos parámetros sobre muestras testigo elaboradas con 0% de DLM, con el fin de tener un punto de comparación.

Los resultados obtenidos para la conductividad térmica de los morteros se muestran en la Fig. 39. Se puede observar que los morteros con el 60% de DLM presentan una reducción del coeficiente de conductividad térmica de un 25%, respecto a los morteros testigo, pasando de 0.95 W/mK (0% de DLM) a 0.71 W/mK (60% de DLM).

Aun así, y teniendo en cuenta los valores reportados para conductividad térmica de morteros elaborados con arenas naturales en otras investigaciones (0.5 a 1.4 W/mK) [8, 68], esta diferencia se puede considerar mínima, ya que los valores de conductividad térmica obtenidos tanto para los morteros elaborados sólo con arena como de aquellos elaborados con DLM, se encuentran dentro de los valores típicos de conductividades térmicas reportados para los morteros tradicionales.

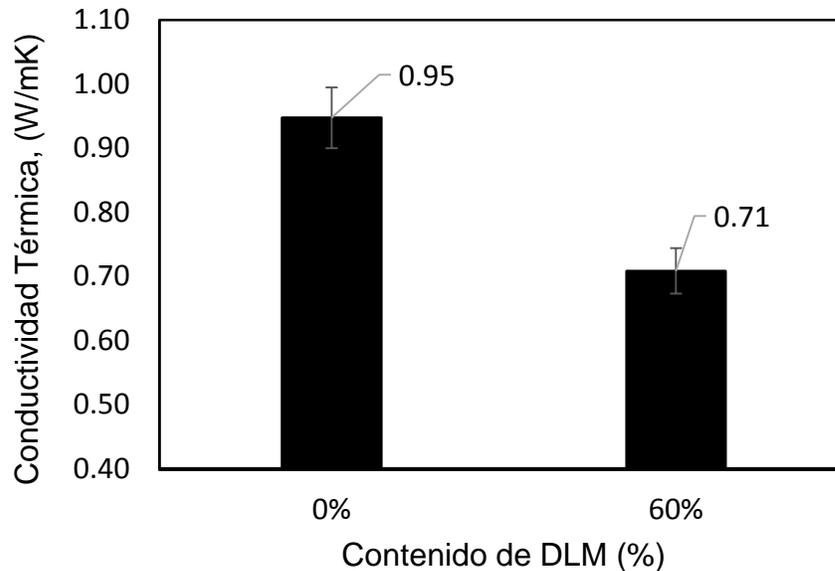


Fig. 39. Efecto del DLM sobre la Conductividad Térmica de morteros base cemento.

Sin embargo, cabe mencionar que, el comportamiento de la conductividad térmica de los morteros adicionados con DLM, puede presentar algunas variaciones respecto al comportamiento de la conductividad térmica de los morteros tradicionales (Fig. 8). En los morteros tradicionales elaborados con arena, normalmente un decremento de su porosidad y un aumento de su densidad (caso de los morteros con DLM) genera un incremento de la conductividad térmica del mortero [47]; en los morteros adicionados con el 60% de DLM aun cuando su porosidad disminuyó un 24% (Fig. 28) y su densidad aumentó un 8% (Fig. 29) respecto a los morteros testigo, su conductividad térmica permaneció por debajo de los valores obtenidos para las muestras de referencia elaboradas sólo con arena (Fig. 39). Así, probablemente el 60% de DLM en los morteros, podría contrarrestar un posible aumento de la conductividad térmica del mismo a causa de su menor porosidad y mayor densidad. Esto se pudo deber a que el DLM presenta una estructura amorfa (Fig. 19), a diferencia de la estructura cristalina de la arena (Fig. 20). Se tienen reportes que indican que los materiales cerámicos como la sílice (principal componente del DLM - Tabla 11), en estado amorfo, puede tener una conductividad térmica hasta 15 veces menor a la de la sílice en estado cristalino como la presente en la arena empleada en este estudio [45].

Respecto a la difusividad térmica de los morteros, los resultados obtenidos se presentan en la Fig. 40. Se puede observar que entre el valor promedio obtenido para los morteros testigo ($0.76 \text{ mm}^2/\text{s}$) y el obtenido para los morteros adicionados con DLM ($0.66 \text{ mm}^2/\text{s}$), la diferencia es mínima por lo cual se considera poco significativa.

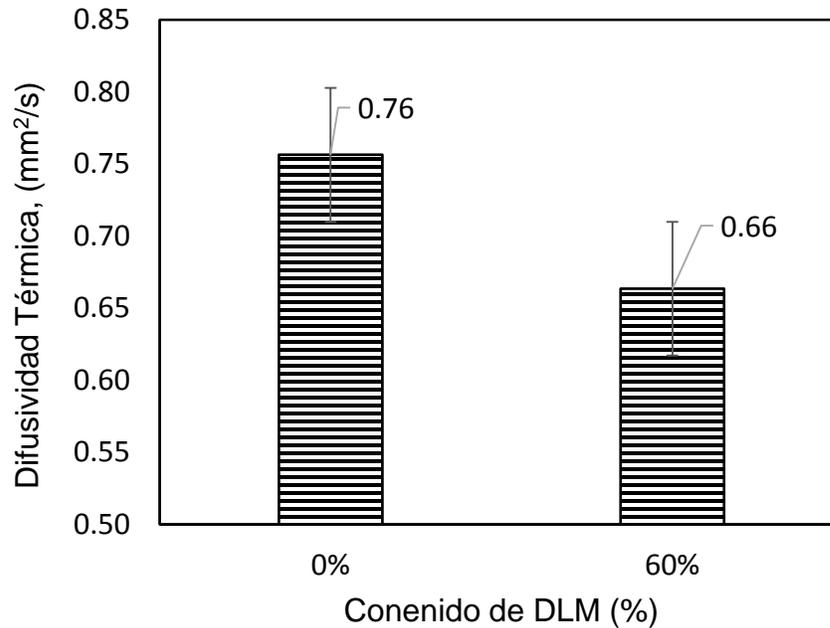


Fig. 40. Efecto del DLM sobre la Difusividad Térmica de morteros.

Este mismo comportamiento se dio para el Calor Específico de los morteros, cuyos resultados se muestran en la Fig. 41. Los morteros testigo obtuvieron un valor de calor específico de 0.51 J/gK, mientras que para los morteros con el 60% de DLM fue de 0.42 J/gK.

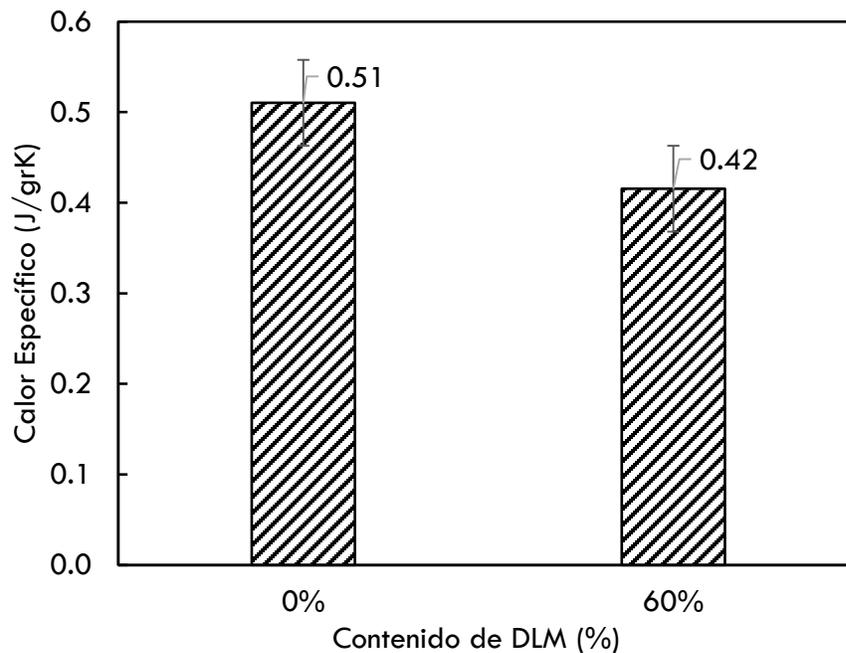


Fig. 41. Efecto del DLM sobre el Calor Específico de los morteros.

De acuerdo a los resultados obtenidos para la Difusividad Térmica (Fig. 40), y para el Calor Específico de los morteros (Fig. 41), se puede observar que en ambos casos, estas propiedades no presentan variaciones significativas respecto a las muestras testigo. Esto se pudo deber a que tanto en la arena como en el DLM, su principal componente, el SiO_2 , tanto en estado cristalino (arena), como en estado amorfo (DLM), pueden tener valores de calor específico similares [59].

De acuerdo a lo anterior, se puede decir a nivel general que la sustitución del 60% de la arena por Desecho de Lana Mineral en los morteros, no representa una variación significativa de las propiedades térmicas estudiadas. Así, se puede considerar que los morteros adicionados con DLM presentan un comportamiento térmico similar a los morteros elaborados sólo con arena.

CONCLUSIONES

1. El DLM como sustituto del agregado fino natural (arena), logró disminuir el volumen de poros permeables y la absorción de humedad de los morteros; la reducción fue mayor para las mezclas con el máximo porcentaje de sustitución usado.
2. La presencia de hasta un 60% de DLM en los morteros a los 56 días de curado, incrementó la resistencia a la compresión un 15%, respecto a los morteros testigo.
3. Los morteros con DLM alcanzan su resistencia máxima a menores tiempos de curado respecto a los morteros testigo. A los 7 días de curado, el 60% de DLM en los morteros incrementó su resistencia a la compresión en un 32%.
4. La resistencia a la flexión de los morteros aumentó gradualmente a medida que se aumenta el contenido de DLM, siendo hasta un 66% superior a la de las muestras testigo.
5. Las propiedades térmicas de los morteros no se ven afectadas significativamente por la sustitución del 60% de arena por DLM.
6. De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo, el Desecho de Lana Mineral podría ser empleado como sustituto de hasta el 60% del agregado fino natural para la elaboración de morteros base cemento, sin que ello implique algún detrimento de sus propiedades físicas, mecánicas y térmicas estudiadas en este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WBCSD, "The Cement Sustainability Initiative - Recycled Concrete," World Business Council for Sustainable Development, Switzerland, 2009, Available: <http://www.wbcscement.org/pdf/CSI-RecyclingConcrete-FullReport.pdf>.
- [2] S. H. Kosmatka, B. Kerkhoff, and W. C. Panarese, "Desing and Control of Concrete Mixtures", 14 ed. Portland Cement Association, 2003.
- [3] E. Giama and A. M. Papadopoulos, "Assessment tools for the environmental evaluation of concrete, plaster and brick elements production," *Journal of Cleaner Production*, vol. 99, pp. 75-85, Jul 15 2015.
- [4] A. Cheng, W.-T. Lin, and R. Huang, "Application of rock wool waste in cement-based composites," *Materials & Design*, vol. 32, no. 2, pp. 636-642, Feb 2011.
- [5] W.-T. Lin, A. Cheng, R. Huang, and S.-Y. Zou, "Improved microstructure of cement-based composites through the addition of rock wool particles," *Materials Characterization*, vol. 84, pp. 1-9, Oct 2013.
- [6] R. Demirboga, "Thermal conductivity and compressive strength of concrete incorporation with mineral admixtures," *Building and Environment*, vol. 42, no. 7, pp. 2467-2471, Jul 2007.
- [7] M. Y. J. Liu, U. J. Alengaram, M. Z. Jumaat, and K. H. Mo, "Evaluation of thermal conductivity, mechanical and transport properties of lightweight aggregate foamed geopolymer concrete", *Energy and Buildings*, Article vol. 72, pp. 238-245, Apr 2014.
- [8] Y. S. Xu and D. D. L. Chung, "Effect of sand addition on the specific heat and thermal conductivity of cement," *Cement and Concrete Research*, vol. 30, no. 1, pp. 59-61, Jan 2000.
- [9] K. H. Kim, S. E. Jeon, J. K. Kim, and S. C. Yang, "An experimental study on thermal conductivity of concrete", *Cement and Concrete Research*, Article vol. 33, no. 3, pp. 363-371, Mar 2003.
- [10] P. Park, S. El-Tawil, S. Y. Park, and A. E. Naaman, "Cracking resistance of fiber reinforced asphalt concrete at-20 degrees C," *Construction and Building Materials*, vol. 81, pp. 47-57, Apr 2015.
- [11] S. M. Abtahi, M. Sheikhzadeh, and S. M. Hejazi, "Fiber-reinforced asphalt-concrete - A review", *Construction and Building Materials*, Review vol. 24, no. 6, pp. 871-877, Jun 2010.
- [12] S. J. Lee, J. P. Rust, H. Hamouda, Y. R. Kim, and R. H. Borden, "Fatigue cracking resistance of fiber-reinforced asphalt concrete," *Textile Research Journal*, vol. 75, no. 2, pp. 123-128, Feb 2005.
- [13] P. Shafigh, M. Z. Jumaat, and H. Mahmud, "Oil palm shell as a lightweight aggregate for production high strength lightweight concrete", *Construction and Building Materials*, Article vol. 25, no. 4, pp. 1848-1853, Apr 2011.
- [14] A. M. Grabiec, D. Zawal, and J. Szulc, "Influence of type and maximum aggregate size on some properties of high-strength concrete made of pozzolana cement in respect of binder and carbon dioxide intensity indexes," *Construction and Building Materials*, vol. 98, pp. 17-24, Nov 15 2015.
- [15] P. Jiménez Montoya, A. García Meseguer, and F. Morán Cabré, Hormigón Armado : basada en la EHE ajustada al código modelo y al eurocódigo, 14 ed. Barcelona, España.: Editorial Gustavo Gili, 2004.
- [16] *Committee ACI 363R, High-Strength Concrete*, 2005.
- [17] T. R. Naik, "Sustainability of cement and concrete industries," in *Proceedings of the International Conference on Achieving Sustainability in Construction*, 2005, pp. 141-150.

- [18] W. Kurdowski, *"Cement and Concrete Chemistry"*. Dordrecht: Springer, 2014.
- [19] H. F. W. Taylor, *"Cement chemistry"*, 2 ed. London: Thomas Telford Publishing, 1997, p. 459.
- [20] J. M. Paris, J. G. Roessler, C. C. Ferraro, H. D. DeFord, and T. G. Townsend, "A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete", *Journal of Cleaner Production*, Review vol. 121, pp. 1-18, May 2016.
- [21] *ASTM C150/C150M-16, Standard Specification for Portland Cement*, 2016.
- [22] Cementos Cruz Azul. (2016). Cemento Tipo II Compuesto CPC 30R RS - Cemento Cruz Azul. Available: <http://cemento-cruzazul.com/cemento-tipo-ii-compuesto/>
- [23] 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.
- [24] J. A. González F. and J. M. Vidales, *Corrosión en las estructuras de hormigón armado: fundamentos, medida, diagnóstico y prevención*. Madrid, España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas: Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, 2007.
- [25] O. Sengul, S. Azizi, F. Karaosmanoglu, and M. A. Tasdemir, "Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 2-3, pp. 671-676, Feb-Mar 2011.
- [26] C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, D. Wang, Z. Huang, and Z. Fang, "A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design," *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 741-751, Dec 30 2015.
- [27] M. F. Kaplan, "Flexural and Compressive Strength of Concrete as Affected by the Properties of Coarse Aggregates," *Journal Proceedings*, vol. 55, no. 5, 1959.
- [28] *ASTM C125-00a^{E1}, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates*, 2001.
- [29] *ASTM C33/C33M-16, Standard Specification for Concrete Aggregates*, 2016.
- [30] Y. B. Zaitsev and F. H. Wittmann, "Simulation of crack propagation and failure of concrete," *Matériaux et Construction*, journal article vol. 14, no. 5, pp. 357-365, 1981.
- [31] C. G. Rocco and M. Elices, "Effect of aggregate shape on the mechanical properties of a simple concrete," (in English), *Engineering Fracture Mechanics*, Article vol. 76, no. 2, pp. 286-298, Jan 2009.
- [32] F. Sanchez and K. Sobolev, "Nanotechnology in concrete – A review," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 11, pp. 2060-2071, 2010.
- [33] T. Blankendaal, P. Schuur, and H. Voordijk, "Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: a scenario approach", *Journal of Cleaner Production*, Article vol. 66, pp. 27-36, Mar 2014.
- [34] D. Leuckenhoff, M. Hunt, and J. Harrington, "Recycling and Beneficial Reuse," vol. FS. 03, ed. USA: *Green Highways Partnership*, 2008, p. 4.
- [35] S. W. Tabsh and A. S. Abdelfatah, "Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete," (in English), *Construction and Building Materials*, Article vol. 23, no. 2, pp. 1163-1167, Feb 2009.
- [36] L. Evangelista and J. de Brito, "Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates," *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, no. 5, pp. 397-401, 2007.
- [37] R. Siddique and T. R. Naik, "Properties of concrete containing scrap-tire rubber - an overview," (in English), *Waste Management*, Article vol. 24, no. 6, pp. 563-569, 2004.

- [38] V. Corinaldesi, A. Mazzoli, and G. Moriconi, "Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles," *Materials & Design*, vol. 32, no. 3, pp. 1646-1650, Mar 2011.
- [39] Y. Guney, Y. D. Sari, M. Yalcin, A. Tuncan, and S. Donmez, "Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete", *Waste Management*, Article vol. 30, no. 8-9, pp. 1705-1713, Aug-Sep 2010.
- [40] Navy Enviromental Health Center, "Man-Made Vitreous Fibers - Technical Manual NEHC-TM6290.91-1 Rev. A.," Rev. A. ed: Navy Enviromental Health Center, 1997.
- [41] B. Sirok, B. Blagojevic, and P. Bullen, "Mineral wool: production and properties". Elsevier, 2008.
- [42] ROCKWOOL Peninsular S.A.U. (2016). Proceso de Fabricación de Lana de Roca. Available: <http://www.rockwool.es/rockwool+peninsular/proceso+de+fabricaci%C3%B3n>
- [43] A. Stefanovic and D. Gordic, "Modeling methodology of the heating energy consumption and the potential reductions due to thermal improvements of staggered block buildings," *Energy and Buildings*, vol. 125, pp. 244-253, Aug 2016.
- [44] U. J. Alengaram, B. A. Al Muhit, M. Z. bin Jumaat, and M. L. Y. Jing, "A comparison of the thermal conductivity of oil palm shell foamed concrete with conventional materials," (in English), *Materials & Design*, Article vol. 51, pp. 522-529, Oct 2013.
- [45] C. B. Carter and M. G. Norton, "Ceramic materials: science and engineering". Springer Science & Business Media, 2007.
- [46] L. Zhu, J. Dai, G. Bai, and F. Zhang, "Study on thermal properties of recycled aggregate concrete and recycled concrete blocks," *Construction and Building Materials*, vol. 94, pp. 620-628, Sep 30 2015.
- [47] S. Mindess, J. F. Young, and D. Darwin, *Concrete*. Prentice Hall, 2003.
- [48] ASTM C109/C109M-02, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*, 2002.
- [49] ASTM C778-02, *Standard Specification for Standard Sand.*, 2002.
- [50] NMX-C-061-ONNCC-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.
- [51] ASTM C136-01, *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.*, 2001.
- [52] ASTM C702 - 03, *Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size*, 2003.
- [53] ASTM C128-01, *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate.*, 2001.
- [54] K. Kovler and N. Roussel, "Properties of fresh and hardened concrete," (in English), *Cement and Concrete Research*, Review vol. 41, no. 7, pp. 775-792, Jul 2011.
- [55] ASTM C348-02, *Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars*, 2002.
- [56] ASTM C192/C192M-02, *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.*, 2002.
- [57] ASTM C642-97, *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*, 1997.
- [58] Linseis Messgeräte GmbH, *User's Manual of Transient Hot Bridge Analyzer THB-1*, Germany, 2011.
- [59] T. L. Bergman, F. P. Incropera, D. P. DeWitt, and A. S. Lavine, "Fundamentals of heat and mass transfer", 7 ed. United States of America: John Wiley & Sons, 2011.

- [60] G. De Schutter and L. Taerwe, "Specific heat and thermal diffusivity of hardening concrete," *Magazine of Concrete Research*, vol. 47, no. 172, pp. 203-208, 1995.
- [61] D. J. Tobler, A. Stefansson, and L. G. Benning, "In-situ grown silica sinters in Icelandic geothermal areas," *Geobiology*, vol. 6, no. 5, pp. 481-502, 2008.
- [62] *International Centre for Diffraction Data, "Database PDF-2," ed. United States of America, 2010.*
- [63] P. Chindapasirt, S. Hatanaka, T. Chareerat, N. Mishima, and Y. Yuasa, "Cement paste characteristics and porous concrete properties," *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 5, pp. 894-901, May 2008.
- [64] A. Bentur and S. Mindess, *Fibre reinforced cementitious composites, 2nd Edition ed. (Modern Concrete Technology)*. CRC Press, 2006, p. 624.
- [65] C. S. Poon, Z. H. Shui, L. Lam, H. Fok, and S. C. Kou, "Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete", *Cement and Concrete Research*, Article vol. 34, no. 1, pp. 31-36, Jan 2004.
- [66] T. C. Ling and C. S. Poon, "Properties of architectural mortar prepared with recycled glass with different particle sizes", *Materials & Design*, Article vol. 32, no. 5, pp. 2675-2684, May 2011.
- [67] Comité ACI 318, Requisitos de reglamento para concreto estructural (ACI 318S-05) y comentario (ACI 318SR-05), 2005.
- [68] M. I. Khan, "Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models," *Building and Environment*, vol. 37, no. 6, pp. 607-614, Jun 2002.