



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y MATERIALES

“Elaboración de materiales de construcción con agregados reciclados
y diatomita”

Tesis

Que para obtener el grado de
Maestro en Ciencias de los Materiales

P R E S E N T A:

Ing. Juan Rubén Serralde Lealba

Directores de tesis:

Dr. Juan Hernández Ávila
Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz

Mineral De la Reforma, Hgo. Junio 2019



Mineral de la Reforma, Hgo., a 3 de junio de 2019

Número de control: ICBI-D/698/2019

Asunto: Autorización de impresión de tesis.

M. EN C. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO
DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Por este conducto le comunico que el comité revisor asignado al C. Juan Rubén Serralde Lealba, alumno de la Maestría en Ciencias de los Materiales con número de cuenta 195572, se le autoriza la impresión del proyecto de tesis titulado "Elaboración de materiales de construcción con agregados reciclados y diatomita" en virtud de que se han efectuado las revisiones y correcciones pertinentes.

A continuación, se registran las firmas de conformidad de los integrantes del comité revisor.

PRESIDENTE	Dr. Eleazar Salinas Rodríguez	
SECRETARIO	Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz	
VOCAL	Dr. Juan Hernández Ávila	
SUPLENTE	Dra. María Isabel Reyes Valderrama	

Sin otro particular reitero a Usted la seguridad de mi atenta consideración.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Dr. Óscar Rodolfo Suárez Castillo
Director del ICBI

ORSC/BO



Ciudad del Conocimiento
Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5 Colonia Carbon
Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42101
Teléfono: 4624771/71 220 69 ext. 2031 Fax 2100
direccion_ichbi@uaeh.edu.mx

www.uaeh.edu.mx

AGRADECIMIENTOS

Dedico esta tesis a:

MIS PADRES.

ALEJANDRO SERRALDE GARCÍA Y MARIELA LEALBA GUADARRAMA que han sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores. Brindándome ese apoyo incansable en cualquier circunstancia, inculcándome valores que hoy poseo; por estar conmigo en la buenas y las malas, por todos esos desvelos que hoy culminan en este trabajo que también es suyo.

A ustedes hermanos **ALEJANDRO SERRALDE LEALBA Y SERGIO SERRALDE LEALBA**, por el apoyo moral que durante mis estudios me brindaron en el logro de un importante objetivo en mi vida.

A mi Comité Tutorial, **DR. JUAN HERNÁNDEZ ÁVILA, DR. ELEAZAR SALINAS RODRÍGUEZ, DRA. MARÍA ISABEL REYES VALDERRAMA, DR. EDUARDO CERECEDO SÁENZ**. Quienes confiaron en mí y me brindaron sus conocimientos y apoyo en estos 2 años.

A todo el personal académico técnico y administrativo, que facilitó mi desempeño en el Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales y la Unidad Central de Laboratorios de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, UAEH.

Por último, a todas las personas que en algún momento durante estos dos años me brindaron su apoyo, compañía y ayuda. Principalmente a:

DR EMILIANO MORENO, cuya experiencia y conocimientos me auxilió en puntos clave de esta investigación.

ARQ. KARLA LAUREL, que con su precisión me ayudó a saber que la báscula estaba mal y con su apoyo logré concentrarme y terminar a tiempo esta investigación.

Gracias a todos

ING JUAN RUBEN SERRALDE LEALBA

ÍNDICE

RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
GLOSARIO DE TÉRMINOS	VIII
RELACIÓN DE FIGURAS	X
RELACIÓN DE TABLAS	XIII
1. GENERALIDADES	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.3 JUSTIFICACIÓN	2
1.4 HIPÓTESIS	4
1.5 OBJETIVO GENERAL	4
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.2 ANTECEDENTES.....	5
1.2.1 Residuos de Construcción y Demolición.....	5
1.2.1.1 Actualidad de la gestión de RCD en México.....	8
1.2.2 Diatomita.	9
1.2.3 Pumicita.	12
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
3.1 BLOQUES EN LA CONSTRUCCIÓN.....	13
2.2 EFECTO PUZOLÁNICO	15
.3 RECICLAJE DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN	18
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
2.1 ESTUDIOS PRELIMINARES	20
2.2 DIATOMITA.....	20
2.2.1 Muestreo	20
2.2.2 Molienda	21
2.2.3 Calcinación.	21
2.3 PUMICITA.....	23
2.3.1 Muestreo.	23
2.3.2 Análisis Granulométrico.....	23

2.4 RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN	24
2.4.1 Obtención.....	24
2.4.2 Técnica de cuarteo.....	25
2.4.3 Análisis granulométrico.....	27
2.4.4 Molienda.	28
2.5 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS	28
2.5.1 Difracción de Rayos X.	29
2.5.2 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	29
2.5.3 Fluorescencia de Rayos X.	30
3. RESULTADOS	31
3.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS	31
3.1.1 Composición mineralógica.	31
3.1.2 Composición química.....	33
5.1.3 Análisis granulométrico.....	39
3.2 ELABORACIÓN DE BLOCKS SÓLIDOS (1RA ETAPA)	41
3.2.1 Resistencia a la compresión.	44
3.3 ELABORACIÓN BLOCKS SÓLIDOS (2DA ETAPA)	47
3.3.1 Resistencia a la compresión.....	47
3.4 CARACTERIZACIÓN DE PRODUCTO OBTENIDO.....	48
3.4.1 Microscopía Electrónica de Barrido.....	49
3.5 CONCLUSIONES	52
BIBLIOGRAFÍA	54

RESUMEN

Elaborar materiales de construcción con Agregados Reciclados y minerales de baja densidad para caracterizarlos por medio de diferentes técnicas de análisis instrumental, y determinar sus mejores condiciones para su uso y reaprovechamiento.

Las técnicas de Análisis instrumental realizadas fueron: Difracción de Rayos X, (DRX) por medio del software Match se indexaron los difractogramas para conocer las fases mineralógicas presentes, y se realizó Microscopía Electrónica de Barrido con Espectroscopía de Dispersión de Energías (MEB-EDS) con mapping para conocer su textura y composición puntual.

La metodología utilizada consistió en que a partir de concreto reciclado de la industria de la construcción y demolición y la adición de minerales silicatados de baja densidad; uno de origen continental volcánico pumicita con contenidos de alúmina y fósforo, y otro de origen marino fosilífero diatomea con contenidos de silicatos y pequeñas cantidades de hierro.

Se determinó la composición elemental de la diatomita, compuesta principalmente por silicio y aluminio, y el agregado reciclado cuya principal fase mineral presente son los feldespatos triclinicos. Se obtuvo incrementos en la resistencia a temprana edad en la fabricación del material de construcción, oscilando entre el 10-20% (22 a 24 kg/cm²) en comparación al que se encuentra a nivel comercial (20 kg/cm²).

ABSTRACT

Elaborate construction materials with Recycled Aggregates and low-density minerals to characterize them by means of different instrumental analysis techniques and determine their best conditions for their use and reuse.

The techniques of instrumental Analysis performed were: X-ray diffraction, (XRD) by means of the Match software the diffractograms were indexed to know the present mineralogical phases, and Scanning Electron Microscopy and Energy Dispersive Spectroscopy (MEB-EDS) with mapping was performed to know its texture and punctual composition.

The methodology used was that from recycled concrete from the construction and demolition industry and the addition of low-density silicate minerals; one of pumicite volcanic continental origin with contents of alumina and phosphorus, and another of fossiliferous diatom marine origin with silicate contents and small amounts of iron.

The elemental composition of the diatomite composed mainly of silicon and aluminum, and the recycled aggregate whose main mineral phase is triclinic feldspars was determined. Increases in early age resistance were obtained in the manufacture of construction material, ranging from 10-20% (22 to 24 kg / cm²) compared to that found commercially (20 kg / cm²).

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Aditivos aireantes: Son aditivos cuya función es estabilizar el aire ocluido en la masa del hormigón o mortero fresco, durante su fabricación y puesta en obra, produciendo gran cantidad de burbujas de tamaño microscópico homogéneamente distribuidas en toda la masa.

Calcinación: Es el proceso de calentar una sustancia a temperatura elevada, para provocar la descomposición térmica o un cambio de estado en su constitución física o química.

Cementante: Son materiales inorgánicos que contribuyen en las propiedades de una mezcla cementicia a través de la actividad hidráulica, puzolánica o ambas.

Cemento Portland: Cemento compuesto de una mezcla de caliza y arcilla, que fragua muy despacio y es muy resistente; al secarse adquiere un color semejante al de la piedra de las canteras inglesas de Portland.

Desarrollo sustentable: es el resultado de una acción concertada de las naciones para impulsar un modelo de desarrollo económico mundial compatible con la conservación del medio ambiente y con la equidad social.

Diatomeas: Son un grupo de algas unicelulares que constituye uno de los tipos más comunes de fitoplancton.

Feldespatos: Son un grupo de minerales formados por silicatos dobles de aluminio y de calcio, sodio, potasio, algunas veces de bario o mezclas de esas bases.

Mineral: Es un cuerpo producido por procesos de naturaleza inorgánica, con una composición química característica y una estructura cristalina, que generalmente suele presentarse en formas o contornos geométricos.

Puzolanas: Aquellos materiales que, aunque no son conglomerantes por sí solos, contienen constituyentes que combinarán con la cal a temperatura ordinaria, y en presencia de agua, para formar compuestos insolubles y estables con propiedades conglomerantes

Reciclar: Someter materiales usados o desperdicios a un proceso de transformación o aprovechamiento para que puedan ser nuevamente utilizados.

Residuos: Son todos los desechos que producimos en nuestras actividades diarias, y de los que nos tenemos que desprender porque han perdido su valor o su utilidad.

Sostenibilidad: Características del desarrollo que asegura las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de futuras generaciones.

Tabicón: Es un material de construcción que se usa para cerrar o dividir espacios internos; se utiliza frecuentemente en la construcción de bodegas, casas y muros.

Tepojal: También conocido como cacahuatillo, es una pequeña piedra pómic de origen volcánico recubierto de arcilla, más ligero que el tezontle.

RELACIÓN DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de Reciclado de Concreto Agregado.....	3
Figura 2. Origen y destino de los RCD (la descarga ilegal está prohibida).	3
Figura 3. Origen de los Residuos de Construcción y Demolición (http://www.coavnbiz.org/evento/curso-sobre-gestion-de-residuos-en-la-construccion-y-demolicion-en-aplicacion-del-decreto-1122012)	5
Figura 4. Composición de los Residuos de Construcción y Demolición en la Ciudad de Pachuca de Soto.	7
Figura 5. Diatomita obtenida de Acatlán, Hidalgo	9
figura 6. Iglesia de Santa Sofía, en Estambul donde se aprecia la cúpula de estilo Bizantino.	11
Figura 7. Piedra Pómez	12
Figura 8. Bloque de pumicita de medidas comerciales 12x40x20.	14
Figura 9. Banco de material de grava y arena natural.....	15
Figura 10. Cemento puzolánico Portland. Imagen tomada de CEMEX	16
Figura 11. Etapas de la hidratación del cemento y reacción puzolánica, observándose a los C-S-H cuya forma característica es de aguja que se entrelazan entre sí trabando al agregado. Imagen tomada de Moreno, 2018	17
Figura 12. Localización del yacimiento de diatomita. (Google maps, 2017)	20
Figura 13. Molienda de diatomita utilizando Metate.....	21
Figura 14. Horno Lindberg ISB ubicado en la Unidad Central de Laboratorios (UCL) en la Ciudad del Conocimiento, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH). Disponible en http://www.rsulab.mx/product_info.php/products_id/287	22
Figura 15. Muestras de a) Diatomita natural y b) Diatomita después de ser calcinada.	22
Figura 16. Región de Perote, Veracruz (Marin, 2012)	23
Figura 17. Tamizado de pumicita.	24
Figura 18. Cúmulos de agregados reciclados en la empresa Concretos Reciclados S.A....	25
Figura 19. Cuarteo de Grava Reciclada según norma NMX-C-170-ONNCCE-1997.....	26
Figura 20. Agitador mecánico tamizando los agregados reciclados.....	27
Figura 21. Molienda de agregado reciclado en quebradora de quijadas	28

Figura 22. Difractómetro de Rayos X Equinox 2000 (INEL, Artenay, Francia) con radiación CoK α 1 (1.79026 Å)	29
Figura 23. Microscopio Electrónico de Barrido JEOL modelo JSM-6300.....	30
Figura 24. Espectrómetro portátil XRF BRUKER, modelo S1 TITAN UNAM	30
Figura 25. Espectros de DRX donde se aprecian las principales fases mineralógicas presentes. Los espectros son: a) Pumicita b) Diatomita y c) Agregados Reciclados	32
Figura 26. a) Clasificación de rocas ígneas de acuerdo a su mineralogía, b) Diagrama ternario de los feldespatos.	33
Figura 27. Micrografías de las materias primas a) Agregado reciclado; Se notan algunos silicatos y calcita adherida en partículas, b) Pumicita; Se notan algunos poros característicos de esta espuma volcánica, c) Diatomita Natural; Se notan algunos fósiles de algas de diatomeas, d) Diatomita calcinada; Se nota la ruptura de fósiles y más amorfa, e) Diatomita calcinada con fundente; Se aprecia la oxidación en un fósil de diatomea.	35
Figura 28. Mapeo de los agregados reciclados donde se nota la distribución elemental....	36
Figura 29. Espectros de MEB-EDS a) Agregados Reciclados b) Pumicita c) Diatomita Natural d) Diatomita Calcinada e) Diatomita Calcinada con Fundente.....	36
Figura 30. Curva granulométrica de agregados gruesos reciclados.	40
Figura 31. Medidas de un bloque de pumicita estándar a nivel comercial.	41
Figura 32. Molde para elaboración de probetas de block cuyas medidas son de 60 x 200 x 100 cm.	42
Figura 33. Esquema de la elaboración de un bloque de pumicita.	43
Figura 34. Prensa ELVEC para pruebas de resistencia a la compresión. Imagen disponible en equipos ELVEC.	44
Figura 35. La resistencia a la compresión del bloque de pumicita mezclado con diferentes tipos de diatomita (a) La muestra mezclada con diatomita normal DN (b) La muestra mezclada con diatomita calcinada DC (c) La muestra mezclada con diatomita calcinada con fundente DCF d) Comparativa de los resultados óptimos obtenidos de cada prueba contra el Block normal.	45
Figura 36. Gráfico que muestra la resistencia a la compresión de las muestras de bloques con agregados reciclados a los 7, 14 y 28 días.	47

Figura 37. Microscopio Electrónico de Barrido marca Jeol del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo..... 49

Figura 38. Micrografías donde se puede cotejar la presencia de C-S-H en un a) bloque común y un b) bloque con diatomita al 5% y Agregados Reciclados al 10%. 50

Figura 39. Micrografía donde se aprecia un gel de C-S-H a 3,000 aumentos y un voltaje de 30 KV..... 51

RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 1. Fuentes Representativas de generación de Residuos de la Construcción y Demolición.	8
Tabla 2. Propiedades físicas de la diatomita requeridas en la industria. (Borgel, 2007)	10
Tabla 3. Clasificación de piezas de acuerdo a los materiales empleados en su fabricación (NMX-C-404-ONNCCE-2005).....	13
Tabla 4. Composición química de algunas puzolanas naturales y artificiales. Tabla tomada y modificada de Soria, 1962.....	16
Tabla 5. Clasificación y especificaciones del concreto reciclado. (Rilem, 1994).	26
Tabla 6. Fases mineralógicas presentes en las materias primas.	32
Tabla 7. Análisis semi-cuantitativo de elementos presentes en la muestra de Agregado Reciclado.....	37
Tabla 8. Análisis semi-cuantitativo de elementos presentes en la muestra de Pumicita.....	37
Tabla 9. Análisis semi-cuantitativo de elementos presentes en la muestra de Diatomita Natural.....	37
Tabla 10. Análisis semi-cuantitativo de elementos presentes en la muestra de Diatomita Calcinada.....	37
Tabla 11. Análisis semi-cuantitativo de elementos presentes en la muestra de Diatomita Calcinada con Fundente.	38
Tabla 12. Análisis de Fluorescencia de Rayos X de Agregados Reciclados.....	38
Tabla 13. Análisis de Fluorescencia de Rayos X de Diatomita.....	38
Tabla 14. Análisis de Fluorescencia de Rayos X de Pumicita.	38
Tabla 15. Resultados del análisis granulométrico de los agregados gruesos reciclados.....	39
Tabla 16. Diseño de composición del bloque de pumicita.	42
Tabla 17. Resistencias de diatomitas según la cantidad de SiO ₂	46

1 GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día el término Sostenibilidad ya no es tan atípico y ha adquirido mayor impacto, principalmente en el ámbito de la construcción ya que esta industria contiene muchos elementos que producen gran huella de carbono, entre ellos se encuentra el cemento, cuyo impacto ambiental genera un 7% de las emisiones totales de CO₂ en el mundo (Oh et al., 2014). La sostenibilidad en la industria de la construcción es inevitable y no solo significa que se debe reducir la huella de carbono, sino que también debe contribuir a conservar los recursos naturales que son cruciales para el crecimiento continuo (Akhtar, 2018). Por lo que, al crear materiales de construcción que sean sustentables y con mejores características que los existentes, es una forma en la cual se puede reducir el impacto ambiental generado también por los Residuos de Construcción y Demolición (RCD).

Cada año se producen grandes cantidades de estos desechos, los cuales son considerados inertes, no peligrosos y poseen alta susceptibilidad de ser aprovechados mediante transformación y reincorporación como materia prima de agregados en la fabricación de nuevos productos. En su mayoría, los agregados de concreto reciclado están compuestos de una mezcla de pasta de mortero endurecida adherida a ellos. Una gran parte de ellos se podría reutilizar en la fabricación de nuevos materiales de construcción para disminuir las cantidades de desechos cuyo destino final son vertederos clandestinos como barrancas o terrenos cuyo uso se podría aprovechar para realizar actividades productivas y así preservar los recursos naturales (Serralde et al, 2015). El concepto de reciclaje de los RCD se ha estado abordando en diversos trabajos de investigación anteriores, sin embargo, son investigaciones a nivel local, por lo que en México aún no se tiene un control total de la disposición final de estos escombros.

En la industria de la construcción es primordial el uso de materiales resistentes y ligeros con una vida útil prolongada, por lo que se pretende elaborar un Block de pumicita. Los objetivos de este trabajo se desarrollaron en 2 etapas: en primer lugar se exploró la influencia de la diatomita en sustitución con el cemento y evaluar sus propiedades para obtener un porcentaje óptimo que logrará mejorar sus características principalmente las mecánicas; evaluándose la

influencia del porcentaje de reemplazo o la fracción de reemplazo de pumicita por agregado reciclado, generando diversas probetas para hallar la dosificación adecuada y analizar las propiedades de los bloques sólidos de pumicita a los 28 días de curado.

Se analizaron las propiedades de los bloques de pumicita en base a la normativa NMX-C-036-ONNCCE-2004 “Industria de la construcción – bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines – resistencia a la compresión – método de prueba”, y por la técnica de caracterización Microscopía Electrónica de Barrido evaluando las comparativas de la resistencia a la compresión y la microestructura.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El reciclaje de materiales es de suma importancia en la actualidad, ya que la contaminación del medio se ha convertido en una de las principales problemáticas en el mundo, por lo que la correcta gestión de RCD, así como el reciclaje y creación de nuevos materiales de construcción, permita el mejoramiento del medio. El crear materiales de construcción con residuos reciclados y además que sean innovadores, es una de las soluciones viables para reducir el impacto generado por los RCD en México.

Los Residuos de la Construcción y Demolición de construcciones representan cerca de la mitad del volumen de residuos que llegan a los sitios de disposición final, por lo cual su separación y recuperación temprana, con fines de aprovechamiento, demandan atención prioritaria en el contexto de la nueva legislación de los residuos de México. En especial, porque la mayor parte de estos residuos son susceptibles de valorización y por la necesidad de disminuir la presión que ejerce sobre los recursos naturales la obtención de materiales vírgenes que emplea el Sector de la Construcción.

Las figuras 1 y 2 resumen de manera gráfica la forma que en Japón se ha implantado la recuperación y reciclado de los residuos de la construcción y demolición, y se promueve el aprovechamiento de los materiales secundarios, particularmente en lo que se refiere a los residuos de concreto y asfalto o a los restos de madera.

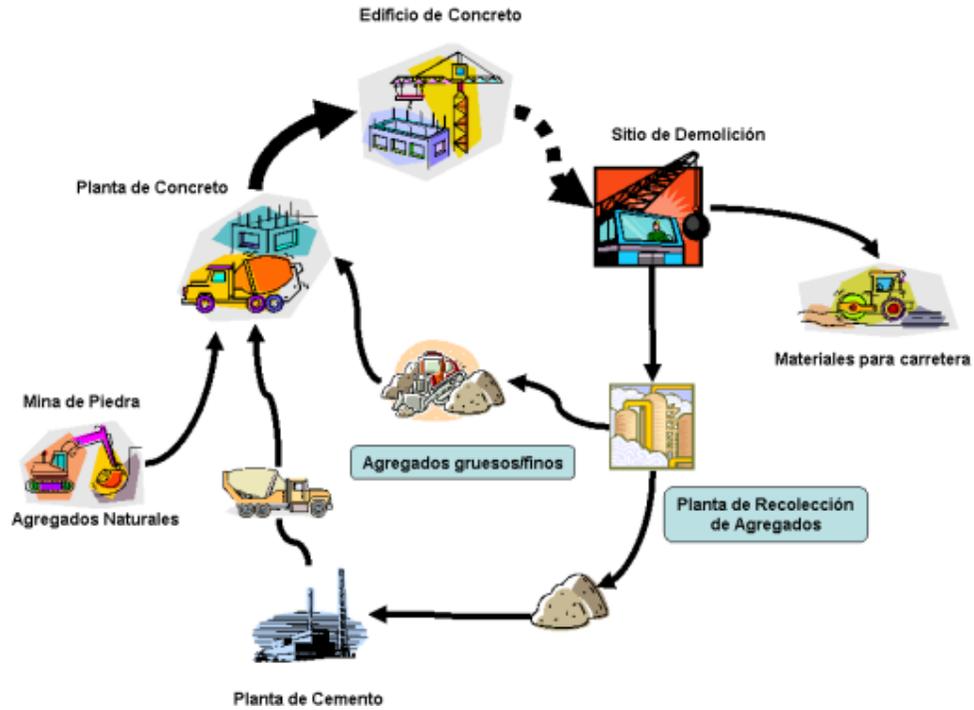


Figura 1. Ejemplo de Reciclado de Concreto Agregado.

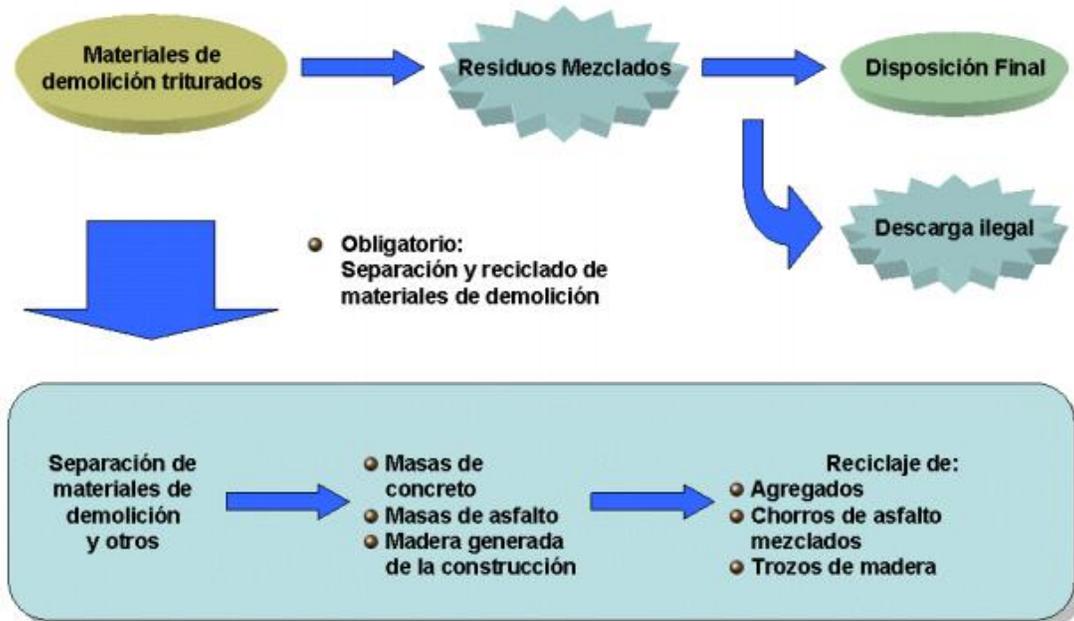


Figura 2. Origen y destino de los RCD (la descarga ilegal está prohibida).

Al ser un material muy utilizado por los constructores, resulta importante el crear nuevos materiales o mejoras de éstos, y el reducir el peso de los blocks macizos se optimizarían procesos, dando lugar a un menor tiempo de realización de trabajos, una mayor facilidad en su manejo y distribución. El elaborar blocks con material reciclado, generaría la disminución de contaminación causada por RCD.

1.3 HIPÓTESIS

La adición de diatomita, así como Residuos de Construcción y Demolición en la elaboración del material de construcción (block de pumicita) podrían mejorar sus propiedades físicas y mecánicas.

1.4 OBJETIVO GENERAL

- Elaborar material de construcción a partir de la utilización de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) y diatomita para mejorar sus propiedades mecánicas.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar materias primas (RCD, diatomita) por Análisis Granulométrico, Difracción de Rayos X (DRX), Fluorescencia de Rayos X (FR X) y Microscopía Electrónica de Barrido con analizador de dispersión de energías de rayos X (MEB-EDS).
- Elaborar primeras mezclas en distintos porcentajes para obtener el porcentaje óptimo de Diatomita en sustitución con el cemento.
- Realizar pruebas mecánicas a los productos obtenidos para determinar el tipo y cantidad de diatomita óptima.
- Elaborar segundas mezclas del bloque de pumicita incorporando los agregados reciclados.
- Realizar pruebas mecánicas a los productos finales obtenidos.
- Caracterizar el producto óptimo obtenido por medio de la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido con analizador de dispersión de energías de rayos X (MEB-EDS).

2 ANTECEDENTES

2.1 RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN.

Los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) son materiales de desecho, generados en las actividades de construcción, demolición y reforma de edificaciones, obra civil y espacio público. Estos son considerados inertes (no peligrosos) y poseen alta susceptibilidad de ser aprovechados mediante transformación y reincorporación como materia prima de agregados en la fabricación de nuevos productos (Castaño, et al 2013). La reducción o minimización de los Residuos de Construcción y Demolición es definida como cualquier técnica, proceso o actividad que evite, elimine o reduzca un desecho desde su fuente u origen (Williams, 1998). La clasificación y la minimización de los RCD se hace cada vez más necesaria en México ya que el incremento poblacional y la urbanización acelerada del país (Buenrostro et al., 2001b) han ocasionado un flujo de basura incontrolado en los municipios y provoca costos sociales y económicos crecientes asociados a su recolección, manejo y disposición final (Castillo, 1983; Castillo, 2003) (Figura 3).



Figura 3. Origen de los Residuos de Construcción y Demolición
(<http://www.coavnbiz.org/evento/curso-sobre-gestion-de-residuos-en-la-construccion-y-demolicion-en-aplicacion-del-decreto-1122012>)

La utilización secundaria de residuos de construcción es extremadamente alta en países desarrollados. El estudio sobre el reciclaje de residuos de construcción se ha realizado durante muchos años en los Estados Unidos, Japón y algunos países europeos, especialmente para el concreto reciclado. La tasa de reciclaje de los residuos de construcción y demolición alcanza aproximadamente el 75% en algunos países europeos desarrollados (Antonios et al, 2014), y cada año se reciclan 140 millones de toneladas de concreto residual en los Estados Unidos. Si bien la mayor parte de los RCD generados en las obras pequeñas son retirados por vehículos recolectores de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), y se estima que cerca del 10 % de los residuos son dispuestos en suelos de conservación o en la vía pública. Para en caso de las obras públicas y privadas, se estima que el 67% de sus residuos son transportados por vehículos de carga privados, sin embargo, tan solo el 20% se dispone en sitios autorizados y un 3% se recicla, disponiendo el resto para la estabilización de suelos (Moreno, 2018) y nivelación de terrenos, rellenos sanitarios y de manera inapropiada en suelos de conservación o la vía pública. (PM-RCD-CMIC, 2013). España es el quinto país europeo en producción de residuos de construcción y demolición reciclándose solo el 5 % de lo producido (Del Rio, 2010).

La composición de los Residuos de Construcción y Demolición es muy heterogénea estando formados, en su mayor parte, por mezcla de áridos, concretos, piedra, materiales cerámicos, gravas, arenas y, en menor medida, por maderas, metales, vidrio, papel, plásticos y otros elementos. El 60% de los residuos de construcción y demolición de las obras, proviene de obras de demolición y mantenimiento de infraestructuras públicas. Mientras que el 40% restante corresponde a residuos mixtos de nueva edificación, reformas y reparaciones (CIB, 2000).

Aunque la composición de estos residuos puede variar notablemente por diversas razones, en México el concreto demolido representa hasta el 25% de la composición de los residuos de construcción y demolición (Rangel et al., 2009). A nivel local, en la figura 4 se aprecia la composición de los RCD de la Ciudad de Pachuca de Soto, Hidalgo (Rangel et al, 2009).

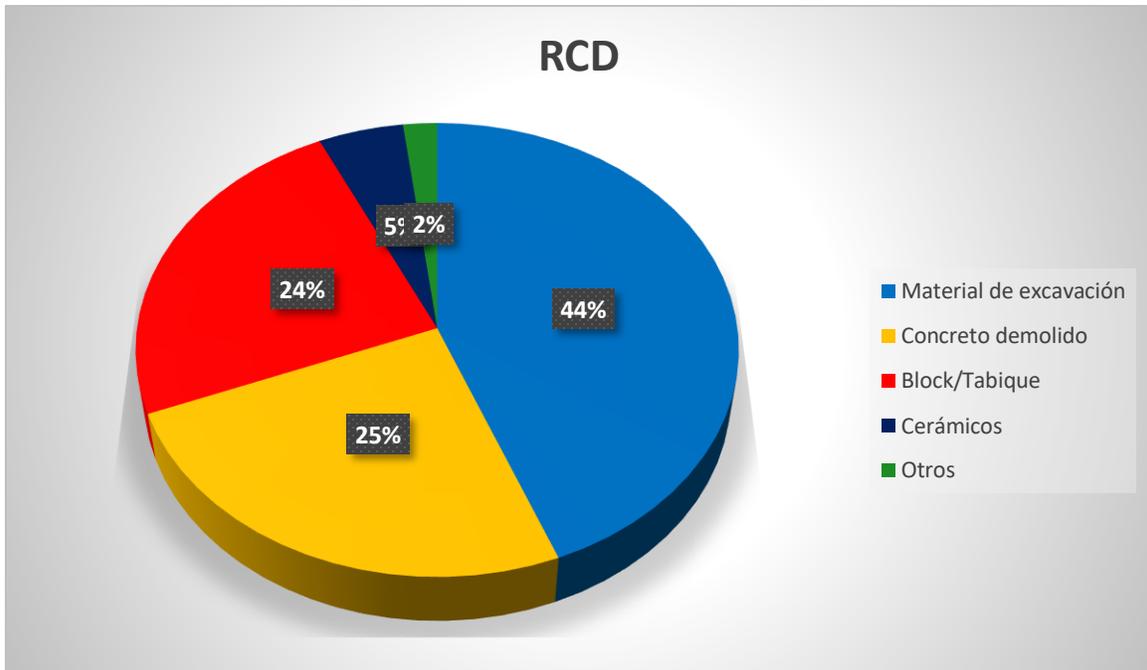


Figura 4. Composición de los Residuos de Construcción y Demolición en la Ciudad de Pachuca de Soto.

El agregado reciclado tiene defectos internos y está envuelto con mortero de cemento original, lo que lo hace diferente del concreto normal en cuanto a rendimiento térmico (Zhu et al, 2015). El reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición se llevó a cabo por primera vez después de la Segunda Guerra Mundial en Alemania (Khalaf et al., 2004), dada la cantidad de escombros producidos por los bombardeos. Con ello la necesidad de utilizar maquinaria pesada para mover esos grandes volúmenes de residuos cuyo plan de gestión aún no era puesto en marcha.

La correcta gestión de los RCD se ha convertido en una preocupación importante en los últimos años para los países en desarrollo. La mayoría de ellos son transportados ilegalmente en vertederos abiertos, para evitar los costos de transporte en las instalaciones de eliminación de residuos.

2.1.2 Actualidad de la gestión de RCD en México.

En México a partir de agosto de 2013 los constructores están obligados a cumplir con la formulación de un plan de manejo de residuos de construcción y demolición conforme a la norma NOM-161-SEMARNAT-2011, la cual establece que los residuos de la construcción se clasifican como residuos de manejo especial, lo que obliga a realizar acciones para su reutilización y reciclaje o, en su caso, la correcta disposición.

Datos reportados en INEGI en el 2014, indican que el promedio diario de Residuos Sólidos Urbanos recolectados a nivel nacional es de 102,887.3 Toneladas. En el Distrito Federal hay 9 millones de habitantes que producen 12,364 toneladas de residuos sólidos cada 24 horas. Entre las fuentes principales en las que se originan este tipo de residuos, se encuentran las referidas en la tabla 1.

Tabla 1. Fuentes Representativas de generación de Residuos de la Construcción y Demolición.

Fuentes de generación	Tipos de desechos generados
-Materiales de la limpieza de sitios	-Arbustos, árboles y materiales de poda
-Materiales de excavación	-Tierra, rocas y materiales granulares
-Materiales de carreteras	-Lozas y pedazos de concreto o asfalto de la construcción de carreteras, caminos y puentes o de su renovación
-Materiales de nuevas construcciones	-Residenciales, comerciales e industriales
-Materiales de renovaciones, reparaciones o remodelaciones	-Residenciales, comerciales e industriales
-Materiales de demolición, incluyendo desmantelamiento, deconstrucción, implosión, destrucción	-Residenciales, comerciales e industriales
-Restos de desastres (por ejemplo, sismos)	-Residenciales, comerciales e industriales

El 19 de septiembre de 2017 en México se presentó un sismo de 7.1 grados en la escala de Richter cuya devastación generó bastantes escombros, en consecuencia, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) presentó sus "Criterios para el manejo de los residuos de construcción y demolición", que incluyen la ubicación, operación, saneamiento y clausura de sitios para disposición final, aprovechamiento y reciclaje de residuos. En su caso la Agencia de Gestión Urbana (AGU) fue la responsable de darle una disposición adecuada a estos residuos en 21 sitios autorizados por la SEMARNAT ubicados en el Estado de México y el Bordo Poniente (Hernández, 2017). Pero aún no se tiene una guía para poder darles un tratamiento adecuado y así hacer posible un correcto reciclaje.

2.3 DIATOMITA.

La diatomita es una roca silícica de tipo fósil que se formó por la acumulación sedimentaria de capas silíceas de algas, compuesta de esqueletos opalinos de sílice amorfa y tiene una fórmula química de $\text{SiO}_2 - n\text{H}_2\text{O}$ (Mete Z, 1988) (Figura 5). La característica principal que distingue a las diatomeas es que sus células tienen una cubierta silícea resistente a la degradación que se llama frústulo y que está formado por dos mitades, cada una de las cuales se llama valva con ornamentaciones características que les permite distinguirse entre especies (Battarbee et al., 2001).



Figura 5. Diatomita obtenida de Acatlán, Hidalgo

El 61% de la producción global de diatomita es usada como filtro, principalmente en las bebidas como cerveza, vinos, etc. El 39% restante, se aplica como agente de carga en diferentes industrias, destacando la fabricación de pintura y plástico (Perfil de mercado de la diatomita), existiendo estudios de las propiedades y usos de la Diatomita de Acatlán, Hidalgo (Borgel, 2007). Hay muchas razones para el uso de diatomita en la filtración, tales como; Su alta porosidad y volumen, su estructura porosa y permeable, su resistencia a los productos químicos y su alta pureza (Bullent & Nezahat, 2006). Recientemente se ha estado demostrando que la diatomita se puede agregar al cemento para mejorar sus propiedades (Stamatakis et al, 2003) siendo químicamente inerte y ligera, teniendo alta resistencia a las temperaturas y alta porosidad (Diatomita 2016), tabla 2.

Tabla 2. Propiedades físicas de la diatomita requeridas en la industria. (Borgel, 2007)

Concepto.	Características.
Aspectos macroscópicos.	Roca pulverulenta, fina y porosa con aspecto margoso.
Color.	Por lo regular blanco brillante (alta pureza). Blanco (calcinada con fundente). Rosa (calcinada). Gris (sin calcinar).
Porosidad.	Alta porosidad.
Capacidad para absorber líquidos.	Muy alta.
Capacidad abrasiva.	Suave.
Conductividad térmica.	Muy baja.
Resistencia a la temperatura.	Alta resistencia.
Punto de fusión.	Entre 1400 y 1750 °C.
Peso específico.	2.0 g/cm ² (calcinada aumenta a 2.3 g/cm ²).
Química.	Químicamente inerte.
Dureza (Mohs).	4.5 -5 (calcinada incrementa 5.5-6).

La diatomita ha sido conocida como un material puzolánico desde la antigüedad, ya que tiene alto contenido de sílice y/o alúmina. Se sabe que la cúpula de la iglesia de Santa Sofía en Estambul (Figura 6) fue reconstruida en el año 562 por Isidoro *el joven*, utilizando materiales ligeros (ladrillos con diatomita) para aligerar el peso (Mete Z, 1988).

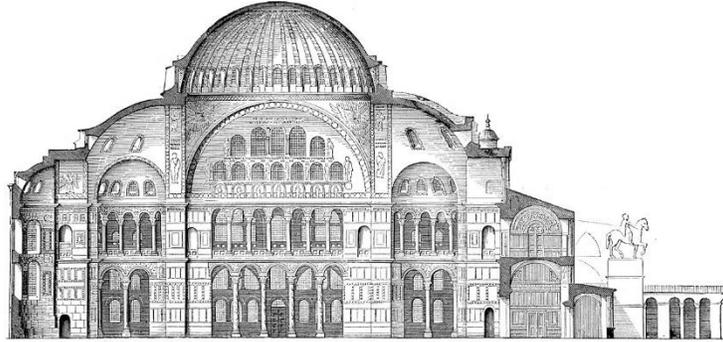


figura 6. Iglesia de Santa Sofía, en Estambul donde se aprecia la cúpula de estilo Bizantino.

Se ha determinado que las diatomitas que poseen alto contenido de sílice tienen sílice reactiva, mientras que las que contienen bajo contenido de sílice, tienen reactivas sílices bajas (Stamatakis et al, 2003). Este tipo de SiO_2 puede reaccionar con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y producir hidratos de silicato de calcio (C-S-H), que son responsables del desarrollo de la resistencia (Kastis et al, 2006). En el ámbito de la construcción se ha aplicado en materiales para recubrimientos, en materiales de aislamiento térmico de paredes (Uygunoglu & Unal, 2005), ladrillos aislantes y en agregado para cemento.

En otros estudios se obtuvo que la diatomita puede ser utilizada en sustitución con el cemento portland dando buenos resultados en pruebas de resistencia a la compresión (Liu et al, 2016) en donde con el 5% de Diatomita calcinada de primer grado se obtuvo un aumento en la resistencia a la compresión de hasta el 50% a una edad temprana de 7-14 días; ,mientras que la diatomita de primer grado y segundo grado obtuvieron un aumento de 15.4% y 10.2% respectivamente. En el mismo estudio se analiza la hidratación microestructural de la diatomita, donde las diferentes partículas de ésta pueden influir en el crecimiento de la resistencia a la compresión. La reacción puzolánica de la diatomita conduce a la formación de mayores cantidades de productos hidratados (C-S-H), especialmente a la edad de 28 días (Kastis et al, 2006).

2.3 PUMICITA.

La piedra pómez volcánica es un agregado ligero natural con una estructura similar a una esponja y se observa en la forma granulada que se produce a partir del rápido enfriamiento de la lava fundida (Sari & Pasamehmetoglu, 2005) (Figura 7). Debido a la repentina liberación de los gases en la estructura de la piedra pómez durante su enfriamiento y formación, la conectividad de la estructura de poros puede variar desde completamente cerrada hasta completamente abierta (Binici et al, 2012). Es un material utilizado bastante en la industria de la construcción debido a su baja densidad y su estructura porosa, reduciendo la carga muerta y elaborando concreto liviano estructural (Zaetang et al, 2013), entre otros materiales resultando ser aislantes térmicos, acústicos y contra incendios (Unal et al, 2007).



Figura 7. Piedra Pómez

El block sólido está elaborado principalmente de pumicita (piedra pómez), que es un mineral en forma pétreo con buenas características aislantes, pero que, al ser sometido a un proceso de pulverización, todas sus esferas de aire son desintegradas, por lo que pierde capacidad además de que incluye como mezcla, materiales con impurezas orgánicas. (Lechuga, 2002). Por ello en base a la normativa NMX-C-441-ONNCCE-2013 su uso recae en un material no estructural.

La región de Perote cuenta con grandes recursos de pumicita que se explotan en aproximadamente 500 bancos que se ubican en los municipios de Perote, Jalalcingo y Ayahualulco, Xico e Ixhuacán de los Reyes. (Roman and Santos, 2013). Es considerado el principal yacimiento de pumicita en el país, debido a la alta demanda de la zona centro de la República.

3. MARCO TEÓRICO.

3.1 BLOQUES EN LA CONSTRUCCIÓN

El uso de bloques elaborados con diversos materiales constituye parte fundamental en el campo de la construcción porque en conjunto con diferentes componentes, como el techo, las paredes, las puertas, las ventanas y el piso crean a la envolvente de un edificio (Uriarte et al, 2019). La industria de la construcción ha implementado algunas acciones, como la modificación de los materiales de construcción para mejorar sus propiedades termo-físicas, así como su geometría. Para tal fin, es esencial comprender el comportamiento de estos materiales, así como su procesamiento para sugerir mejoras y contribuir a maximizar la resistencia. Los bloques se utilizan en las paredes según el uso que tengan y los materiales empleados para su elaboración es como se diferencian (Tabla 3).

Tabla 3. Clasificación de piezas de acuerdo a los materiales empleados en su fabricación (NMX-C-404-ONNCCE-2005)

Tipo de pieza	Material	Forma
Bloques	Grava-Cemento	Rectangular
	Arena-Cemento	Rectangular
	Barro extruido	Rectangular
	Barro recocado	Rectangular
	Silico Calcáreo	Otros
Tabique (Ladrillo)	Barro Recocado	Rectangular
Macizo	Barro extruido	Rectangular
Hueco	Otros (concreto)	Rectangular
Multiperforado		Otros
Tabicón	Grava-Cemento	Rectangular
	Arena-Cemento	Rectangular
	Tepojal-Cemento	Rectangular

En este estudio nos enfocaremos en el tipo de piezas Tabicones de Tepojal-Cemento (Figura 8), cuyo principal uso es en paredes de viviendas y bardas perimetrales, siendo un material de fabricación simple y no necesita de procesos mecánicos complejos, ronda un precio relativamente económico (\$8.00 pesos mexicanos). Es considerado un concreto por la mezcla de agregados con cemento, pero está ubicado en la categoría de elemento no estructural con una resistencia entre 20 y 25 kg/cm² (NMX-C-441-ONNCCE-2013).



Figura 8. Bloque de pumicita de medidas comerciales 12x40x20.

Tanto en México como a nivel mundial se exige una gran cantidad de consumo de agregados naturales (Figura 9) y cemento en la edificación de viviendas, debido al hecho de que la industria de la construcción utiliza en su mayoría ladrillos rojos, bloques huecos y bloques sólidos para la construcción de las paredes, combinada con la falta de conocimiento sobre aspectos técnicos como el rendimiento térmico, mecánico y acústico de los materiales de construcción y su uso adecuado junto con el gran número de casas de construcción propia, aproximadamente el 60-70% (Sánchez, 2012). Este aumento en la demanda de recursos en México desata la oportunidad de explorar nuevas alternativas como los materiales reciclados y sustitutos para el cemento que ayuden en su mejora.



Figura 9. Banco de material de grava y arena natural.

3.2 EFECTO PUZOLÁNICO

El cemento es un importante material de construcción cuya producción aumenta día a día.; siendo los cementos puzolánicos cada vez más comunes (Bülent and Nezahat, 2008) (Figura 10). Las puzolanas se definen como aquellos materiales que, aunque no son conglomerantes por sí solos, contienen constituyentes que combinarán con la cal a temperatura ordinaria, y en presencia de agua, para formar compuestos insolubles y estables con propiedades conglomerantes (Soria F, 1962). Se pueden encontrar en la naturaleza son en su mayor parte materiales de origen volcánico (cenizas volcánicas, tobas, pumicita) y, en menor escala, de origen biológico tal como las tierras de diatomeas. En su mayoría estos materiales consisten en una masa amorfa vitrificada acompañada de microcristales alterados o en fase de descomposición (feldespatos, piroxenos, ópalo, cuarzo, etc.) pero la causa principal de sus cualidades puzolánicas recae en la porción amorfa o vítrea (Soria F, 1962).



Figura 10. Cemento puzolánico Portland. Imagen tomada de CEMEX

Los materiales puzolánicos poseen, de acuerdo con su definición, la propiedad de reaccionar con el hidróxido cálcico, en presencia de agua, para formar compuestos con propiedades conglomerantes; éstos serán los mismos, independientemente del material puzolánico puesto en contacto con la cal. En el sentido de aptitud de combinación de la puzolana (actividad puzolánica), deberán tenerse en cuenta tres cosas; los constituyentes químicos, el tipo de unión o enlace entre ellos y su estado físico (Tabla 4) (Soria F, 1962).

Tabla 4. Composición química de algunas puzolanas naturales y artificiales. Tabla tomada y modificada de Soria, 1962

Puzolanas	Composición						
	P F	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O + K ₂ O
Trass Baviera (Europa)	14.50	57.00	11.40	5.60	6.00	2.20	3.30
Pumicita (USA)	4.20	72.30	13.30	1.40	0.70	0.40	7.00
Diatomita cruda (USA)	8.30	86.00	2.30	1.80	T	0.60	0.40
Cenizas volantes (España)	1.10	38.60	23.00	28.30	7.03	0.04	-

De los constituyentes químicos del cemento puzolánico, los más importantes son el sílice y la alúmina (alúmina-silicato) (Lea F, 1976). Ambos óxidos son vulnerables contra la cal y una vez que interaccionan los fenómenos físicos y químicos que se producen son:

- Aparición de silicato cálcico hidratado de tipo tobermorítico en forma de gel. Su composición varía con el contenido y naturaleza de la puzolana y el tiempo (Figura 11). Son abreviados con las letras C-S-H; donde C corresponde al óxido de calcio (CaO), S significa dióxido de silicio (SiO_2) y H para el agua (H_2O) (Diamond et al, 1963).
- Presencia de aluminato cálcico hidratado, muy probable tetracálcico.

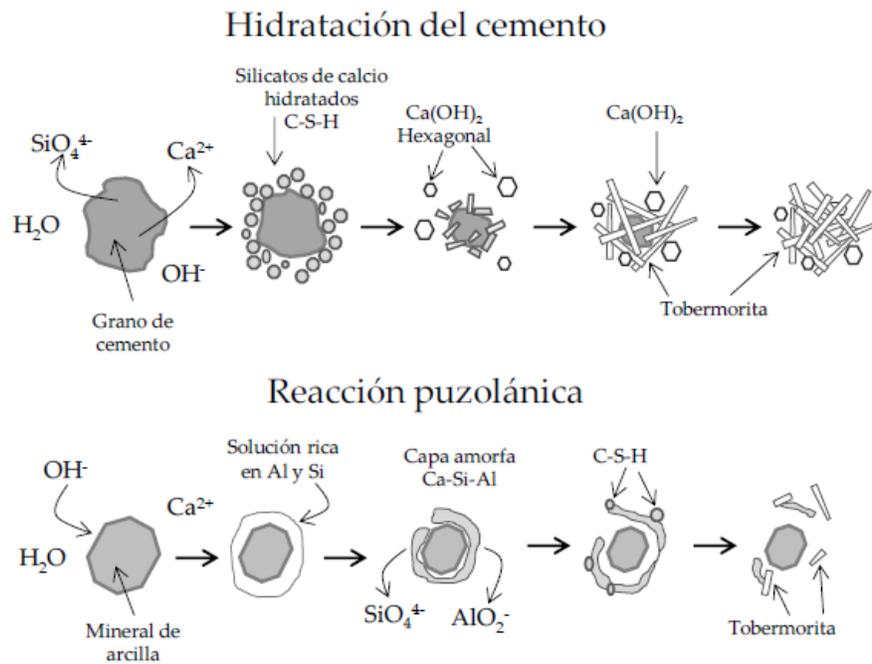


Figura 11. Etapas de la hidratación del cemento y reacción puzolánica, observándose a los C-S-H cuya forma característica es de aguja que se entrelazan entre sí trabando al agregado. Imagen tomada de Moreno, 2018

3.3 RECICLAJE DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

El reciclaje de materiales se ha convertido en una parte fundamental en estos últimos años, los objetivos de un programa de 3R, Reducir, Reutilizar y Reciclar para llevar a cabo una correcta gestión de Residuos de construcción y Demolición RCD son:

Reducción. Promover que la industria de la construcción se comprometa a reducir la cantidad de residuos que generan sus actividades a través de:

- Incorporar la consideración del enfoque 3R desde la etapa de pre-planeación de proyectos.
- Investigar nuevas técnicas de construcción, tecnologías y diseños que contribuyan a producir menos residuos.
- Establecer metas respecto a factores que en la actualidad contribuyen a generar volúmenes excesivos de residuos.
- Adoptar prácticas de adquisiciones sustentables de materiales de construcción.
- Evitar o minimizar los daños a la salud y al ambiente que conlleva la generación y manejo de los residuos de la construcción y demolición.

Reutilización. Fomentar la adopción de métodos y procedimientos para:

- Reutilizar materiales in situ, cuando sea apropiado.
- Separar materiales reutilizables in situ.
- Retirar y recuperar apropiadamente los materiales reutilizables durante los procesos de demolición y renovación.
- Crear redes locales de comercializadores de materiales reutilizables recuperados durante actividades de construcción y demolición y fortalecer los mercados correspondientes.

Reciclado. Alentar y Facilitar:

- La investigación de métodos para el reciclado de recursos materiales.
- La separación in situ de materiales con fines de reciclado, cuando esto sea práctico.
- La utilización de materiales de construcción que contengan componentes reciclados.
- La cooperación entre gobierno e industria para desviar los materiales reciclables de los sitios de disposición final.
- La creación de redes locales de comercializadores de materiales reciclables recuperados durante actividades de construcción y demolición y fortalecer los mercados correspondientes.

Usar el concreto de desecho como áridos para producir concreto reciclado es una importante dirección de desarrollo de los materiales de construcción para la protección ambiental. El reciclaje de concreto no solo logra una utilización secundaria eficiente de los materiales de construcción, sino que también resuelve el problema de la escasez de agregados naturales (Matar & Dalati, 2001).

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 ESTUDIOS PRELIMINARES

Las materias primas utilizadas en esta investigación fueron cemento portland, diatomita y pumicita, en la primera etapa, anexando agregados reciclados provenientes de los Residuos de Construcción y Demolición RCD de la empresa de “Concretos Reciclados S.A. de C.V.” (México) en la segunda etapa. El cemento portland se adquirió de una casa de materiales (Pachuca de Soto / México). La diatomita se obtuvo de la región de Acatlán / Hidalgo (México) a unos 52 km respecto a la ciudad de Pachuca de Soto, y se preparó en forma natural (DN), calcinada (DC) y calcinada con fundente (DCF). En la preparación de las muestras de bloques sólidos, se usaron agregados de pumicita estándar provenientes de la región de Perote, (Veracruz / México) obtenidos de una bloquera y agua del grifo.

4.2 DIATOMITA

4.2.1 Muestreo

La diatomita se obtuvo de Loma Larga en la región de Acatlán en el Estado de Hidalgo (Figura 12) aproximadamente a 2 horas de la ciudad de Pachuca de Soto.



Figura 12. Localización del yacimiento de diatomita. (Google maps, 2017)

Para la obtención de la diatomita, se realizó un muestreo de forma selectiva en la zona consiguiendo 3 muestras de las cuales se estableció un compósito de todas ellas para obtener una muestra representativa.

4.2.2 Molienda

La Preparación de la diatomita se llevó a cabo moliendo de forma manual en un metate (Figura 13), ya que debido a su baja dureza no es necesario el uso de equipo especial.



Figura 13. Molienda de diatomita utilizando Metate.

4.2.3 Calcinación

Se realizó un tratamiento térmico (calcinación) a dos muestras de diatomita; una utilizando fundente de hidróxido de sodio (NaOH) al 7%; y la otra sin fundente. La calcinación de las muestras de diatomita se realizó utilizando un horno controlado por proceso Lindberg-ISB en atmósfera de aire (Figura 14). El proceso se programó de tal manera que creó un calentamiento de hasta 1000 °C a una velocidad de entre 10-20 °C / min y una parada a 1000 °C durante 1 hora y luego se enfrió a temperatura ambiente esto con el fin de aumentar la cantidad de óxido de silicio, así como eliminar impurezas orgánicas y gases (Borgel 2007).



Figura 14. Horno Lindberg ISB ubicado en la Unidad Central de Laboratorios (UCL) en la Ciudad del Conocimiento, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH). Disponible en http://www.rsulab.mx/product_info.php/products_id/287

La diatomita calcinada presentó un cambio físico de un color blanco a un color rosado/naranja y una mayor fragilidad al contacto como se muestra en la figura 15.

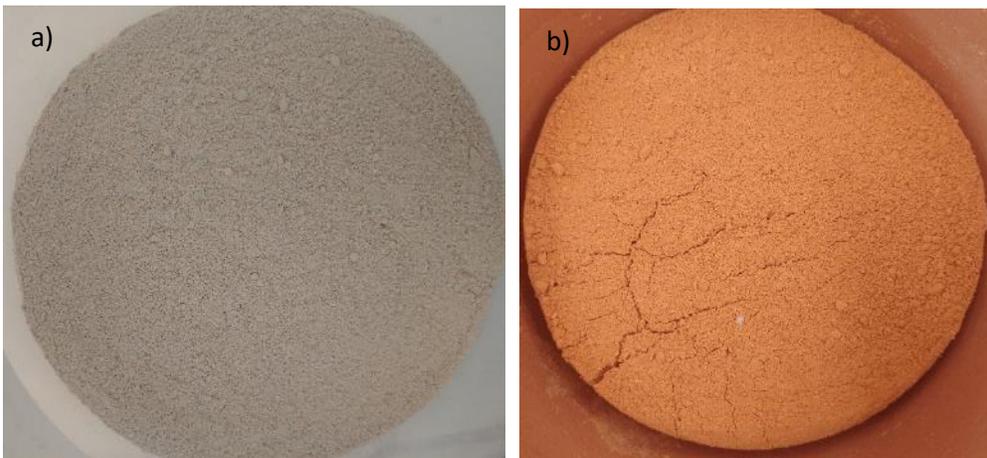


Figura 15. Muestras de a) Diatomita natural y b) Diatomita después de ser calcinada.

4.3 PUMICITA

4.3.1 Muestreo

La pumicita o piedra pómez, se obtuvo de una casa de materiales donde se fabrican bloques sólidos de pumicita. El material es procedente de la región de Perote, Veracruz, (Figura 16) siendo este yacimiento el más explotado a nivel nacional debido a la cercanía con la capital del país.



Figura 16. Región de Perote, Veracruz (Marín, 2012)

4.3.2 Análisis Granulométrico

Se determinó el tamaño promedio del agregado en base a un análisis granulométrico por medio de tamices cuyos resultados se muestran en la figura 17 dando como resultado un tamaño promedio de 1/8" para el agregado. Es importante mencionar que los tamaños de pumicita varían según la casa de materiales que fabrique los bloques. Resultando; a mayor tamaño de pumicita, un block más poroso, con mayor disgregación y ligero (9.850 kg); mientras que a menor tamaño un block más compacto, con menor disgregación y más pesado (10.350 kg).



Figura 17. Tamizado de pumicita.

4.4 RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

4.4.1 Obtención

Los agregados reciclados gruesos se obtuvieron directamente de cúmulos procesados de la planta de Concretos Reciclados S.A. (Figura 18). Las muestras se tomaron de un aglomerado de gravas, aproximadamente $\frac{3}{4}$ de pulgada en tamaño, colectándose en bolsas de plástico, como recomienda la norma NMX-C-030-ONNCCE-2004 "Industria de la Construcción (Agregados).



Figura 18. Cúmulos de agregados reciclados en la empresa Concretos Recicladados S.A.

4.4.2 Técnica de cuarteo

Con la finalidad de obtener muestras representativas, los agregados reciclados se homogeneizaron y cuartearon manualmente, según la normativa NMX-C-170-ONNCCE-1997, requiriendo el siguiente equipo:

- Pala
- Cucharón
- Cuchara de albañil
- Brocha o cepillo
- Lona de aproximadamente 2.0 x 2.5 m

La utilización de la lona se justifica cuando el material del piso del laboratorio pueda contaminar a la muestra representativa. En este caso, la homogenización de la muestra se realiza levantando cada esquina de la lona alternadamente y jalándola sobre la muestra hacia la esquina diagonalmente opuesta, para que el material sea volteado, el proceso se repite según criterio. Después de varias repeticiones, la mezcla se lleva hacia el centro de la lona formando una pila cónica y por medio de la pala se aplana cuidadosamente hasta obtener espesor y diámetro uniformes, cuidando que cada sector que abarque una cuarta parte de la pila resultante no se mezcle con las otras partes.

Posteriormente, la pila aplanada se divide en 4 partes iguales con ayuda de la cuchara de albañil, eliminando dos de las 4 partes, estas dos partes deben ser diagonalmente opuestas, incluyendo el material fino, cepillando los espacios vacíos para limpiarlos. Las 2 partes restantes, se vuelven a mezclar repitiendo el procedimiento y cuarteando sucesivamente hasta reducir la muestra al tamaño requerido por las pruebas (Figura 19).

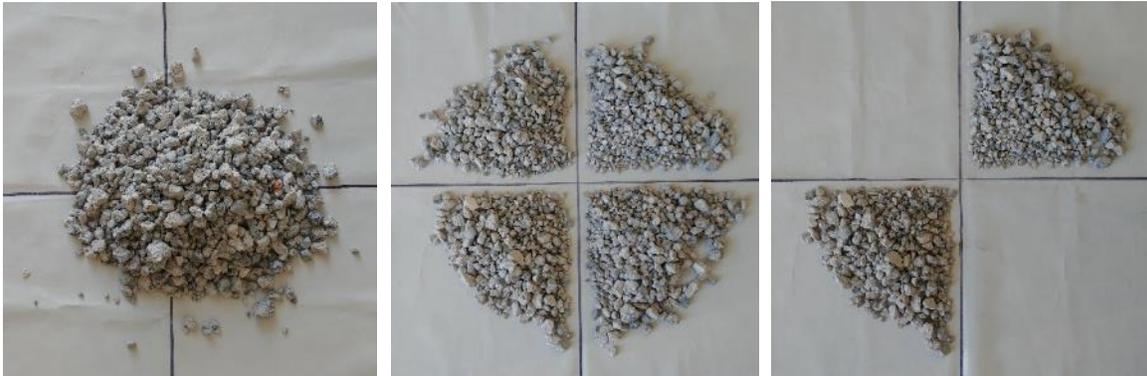


Figura 19. Cuarteo de Grava Reciclada según norma NMX-C-170-ONNCCE-1997.

El agregado reciclado se clasifica en 3 tipos, donde el agregado tipo 1 es el de mayor calidad y se puede emplear en armados de acero con fines estructurales, mientras que el agregado tipo 2 es adecuado para losas y el tipo 3 para concretos pobres. Otra clasificación dependiendo la composición del agregado reciclado se puede notar en la tabla 3 (Rilem, 1994).

Tabla 5. Clasificación y especificaciones del concreto reciclado. (Rilem, 1994).

TIPO	ORIGEN
TIPO I	Agregados procedentes en su mayoría de escombros de fábrica de ladrillo.
TIPO II	Agregados procedentes en su mayoría de escombros de concreto (cerámicos < 10%).
TIPO III	Agregados compuestos por una mezcla de agregados naturales superior al 80% y agregados TIPO I inferior al 10% (o hasta 20% de agregado TIPO II).

4.4.3 Análisis granulométrico.

Obtenidas las muestras representativas se realiza un análisis granulométrico, que es la distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un agregado. La granulometría de los agregados es uno de los parámetros más importantes empleados para la dosificación de las mezclas, puesto que constituye su esqueleto y tiene una gran influencia sobre sus propiedades. El análisis granulométrico de un agregado consiste en determinar la distribución por tamaños de las partículas que lo forman, o sea, en separar el agregado en diferentes fracciones de partículas del mismo tamaño, o de tamaños comprendidos dentro de determinados límites y en hallar el porcentaje de peso retenido de cada tamaño de agregado. El análisis granulométrico se hace cribando la muestra representativa de agregado a través de una serie de tamices normalizados NMX-C-077-1997-ONNCCE y complementados con las NMX-B-231, NMX-C-030-0NNCCE, NMX-C-177-1997- ONNCCE y NMX-C-084. La configuración de tamices está comprendida entre la malla de abertura 2 pulgadas hasta la malla no. 4 en forma descendente. Para el proceso de tamizado se utilizó el agitador mecánico durante 2 minutos (Figura 20).



Figura 20. Agitador mecánico tamizando los agregados reciclados.

Las curvas granulométricas se determinan pesando el agregado retenido en cada malla y tomando en cuenta los límites granulométricos establecidos en la norma NMX-C-111-OONCCE-2014, que proporciona las especificaciones y los métodos de prueba para agregados que fueron usados para fabricar concreto en la industria de la construcción.

4.4.4 Molienda

Se procedió a moler en una quebradora de quijadas para reducir el tamaño de agregado, el cual oscilaba entre la pulgada, y así reducirlo a entre $\frac{1}{8}$ " y $\frac{1}{4}$ " (Figura 21).



Figura 21. Molienda de agregado reciclado en quebradora de quijadas

4.5 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

Para la caracterización de las materias primas del bloque sólido, se utilizaron las técnicas de Difracción de Rayos X, Microscopía Electrónica de Barrido con microanálisis de Energías Dispersivas de Rayos X y Fluorescencia de Rayos X, para conocer tanto la composición química-mineralógica, como la morfología y topografía.

4.5.1 Difracción de Rayos X.

La composición mineralógica se determinó mediante difracción de rayos X (DRX), en un difractómetro Equinox 2000 (INEL, Artenay, Francia) con radiación $\text{CoK}\alpha_1$ (1.79026 Å) (Figura 22). La identificación de fases se llevó a cabo usando las bases de datos COD Inorganics 2015 y Cements 2014 de la Crystallography Open Database, también se usó la base de datos PDF-2 (2004), Powder Diffraction File del ICDD (International Centre for Diffraction Data). Así como el software Match 3, Phase Identification from Powder Diffraction, versión 2. Para esta técnica se tamizaron las muestras entre 74 y 53 micras (μm) aproximadamente por las mallas 200 y 270. Se colocaron en un portamuestras de aluminio.



Figura 22. Difractómetro de Rayos X Equinox 2000 (INEL, Artenay, Francia) con radiación $\text{CoK}\alpha_1$ (1.79026 Å)

4.5.2 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Para conocer la morfología de las materias primas, así como la obtención de su microestructura y su composición elemental semicuantitativa se realizaron en un Microscopio Electrónico de Barrido con microanálisis de Energías Dispersivas de Rayos X JEOL modelo JSM-6300 (JEOL Ltd., Tokio, Japón) (Figura 23) utilizando un voltaje de

aceleración de 30 KV. Las muestras se recubrieron previamente con una capa de oro en un sistema de preparación de muestras marca Denton, modelo Vaccum Desk II.

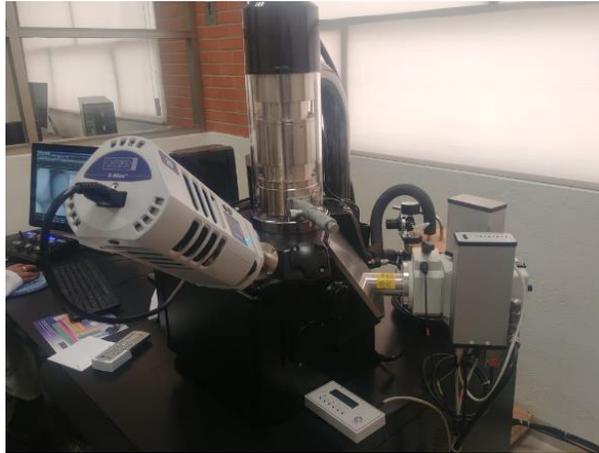


Figura 23. Microscopio Electrónico de Barrido JEOL modelo JSM-6300.

4.5.3 Fluorescencia de Rayos X.

El análisis químico se determinó por medio de la técnica de fluorescencia de rayos X (XRF), mediante un espectrómetro portátil XRF BRUKER, modelo S1 TITAN (Bruker, Kennewick, WA, E.U.). Para estos análisis se usó la calibración GeoChem incluida en el software del equipo. En la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (Figura 24)



Figura 24. Espectrómetro portátil XRF BRUKER, modelo S1 TITAN UNAM

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

5.1.1 Composición mineralógica

La figura 25 nos muestra los resultados de la técnica de Difracción de Rayos X de las muestras de diatomita, pumicita y agregados reciclados, observándose picos anchos y traslape de reflexiones, característicos de mezclas multifase en los agregados reciclados, mientras que en las muestras de diatomita y pumicita se presenta ruido debido a la forma amorfa de su estructura. Como ya se había comentado previamente, la identificación de fases se realizó con ayuda del software Match, obteniéndose la presencia de diversas cantidades de fases cristalinas como feldespatos, piroxeno, cuarzo, etc. (tabla 6) en proporción dada la intensidad de los principales picos del espectro de cada una de las muestras. Los espectros están ordenados de acuerdo con su cristalinidad, siendo el agregado reciclado el más cristalino y la pumicita la menos cristalina (amorfa).

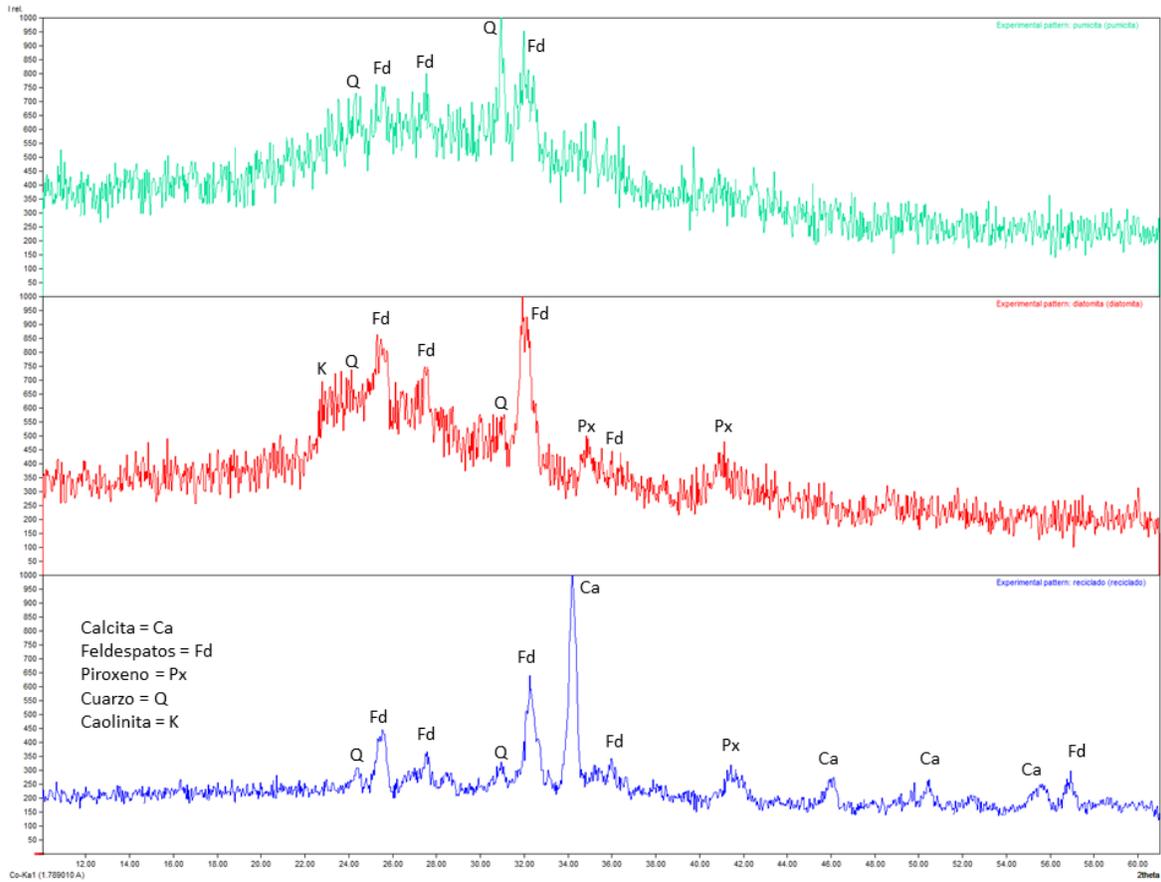


Figura 25. Espectros de DRX donde se aprecian las principales fases mineralógicas presentes. Los espectros son: a) Pumicita b) Diatomita y c) Agregados Reciclados

Tabla 6. Fases mineralógicas presentes en las materias primas.

	Pumicita	Diatomita	Agregados Reciclados
Feldespatos	**	**	***
Calcita	-	-	**
Cuarzo	***	**	*
Piroxeno	-	*	*
Caolinita	-	*	-

Proporciones *** Mayor ** Mediana * Menor

Se considera que la pumicita es ácida y los agregados del concreto reciclado y la diatomita de composición intermedia. Los feldespatos son triclínicos y pueden ser albita, anortita, andesina y oligoclasa, en pocas palabras son plagioclasas y por su parte el piroxeno parece ser enstatita. (Figura 26).

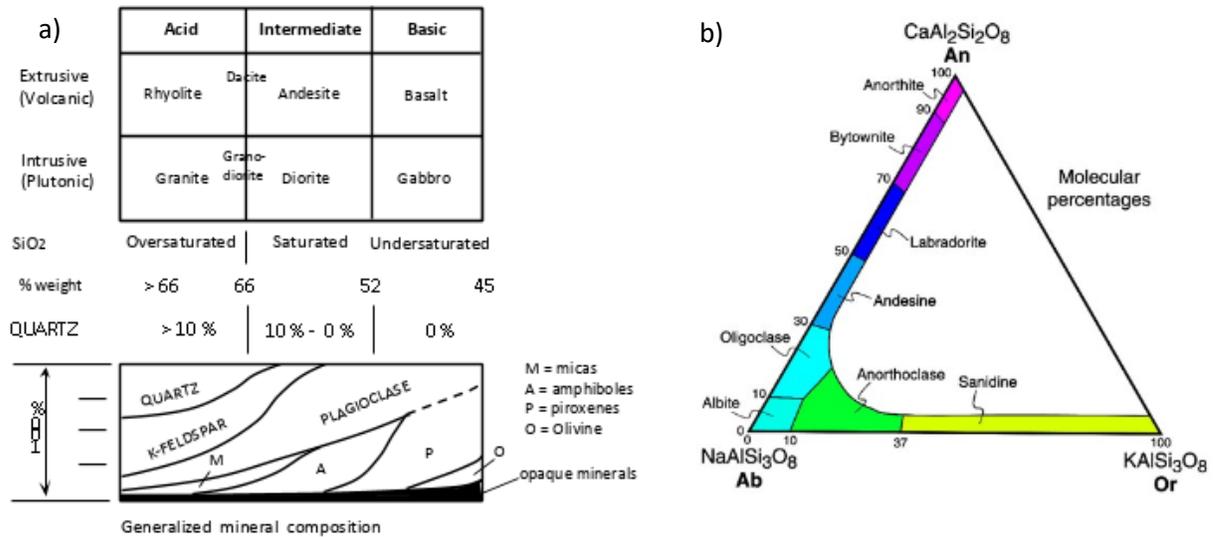


Figura 26. a) Clasificación de rocas ígneas de acuerdo a su mineralogía, b) Diagrama ternario de los feldespatos.

5.1.2 Composición química

En la figura 27 se aprecia la morfología de las muestras analizadas por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) La primera micrografía a) es de una muestra de agregado reciclado, donde se observa la pasta de cemento adherida a los agregados y algunos feldespatos. Se realizó un mapeo (figura 28) para tener una idea de la distribución elemental en la zona analizada. Los espectros y datos del microanálisis EDS (Figura 29) (tabla 7) nos muestran la variación en porcentajes de peso de los elementos presentes observando que los resultados muestran calcio en su mayoría, convergiendo con los datos obtenidos en la

composición mineralógica por difracción de Rayos X, donde la fase principal fue la calcita. Así mismo el silicio de las materias primas se encuentra presente.

En la siguiente micrografía se muestra la pumicita donde debido a la finura de los polvos (<75 micras) no proporciona información sobre la morfología. Sin embargo, se logran apreciar algunas arcillas y vesículas características de los vidrios volcánicos. Los datos del microanálisis por energías dispersas (tabla 8) muestran la proporción semicuantitativa elemental en peso, donde el silicio y aluminio prevalece sílico-aluminato que es la clasificación de los vidrios volcánicos.

Las últimas micrografías son de diatomita y sus diferentes tratamientos (Calcinada y calcinada con fundente). En la diatomita natural se aprecian los fósiles de las diatomeas, las frústulas y sus válvulas, así como el tamaño de poro (400 nm) y su microanálisis por energías dispersas (EDS) (tabla 9) se encuentra el porcentaje en peso de los elementos presentes, principalmente el silicio, consistente con la intensidad de los picos del dióxido de silicio en DRX. En las muestras de diatomita calcinada tanto con fundente como sin él, se observa un incremento en las dimensiones de los poros y la pérdida de algunos fósiles, haciendo más amorfa la forma de las muestras. En su microanálisis (tabla 10 y 11) se aprecia un aumento en la cantidad de silicio en peso, debido a la oxidación que ocurre al calcinarla, lo que resulta de ayuda en la reacción puzolánica con el cemento.

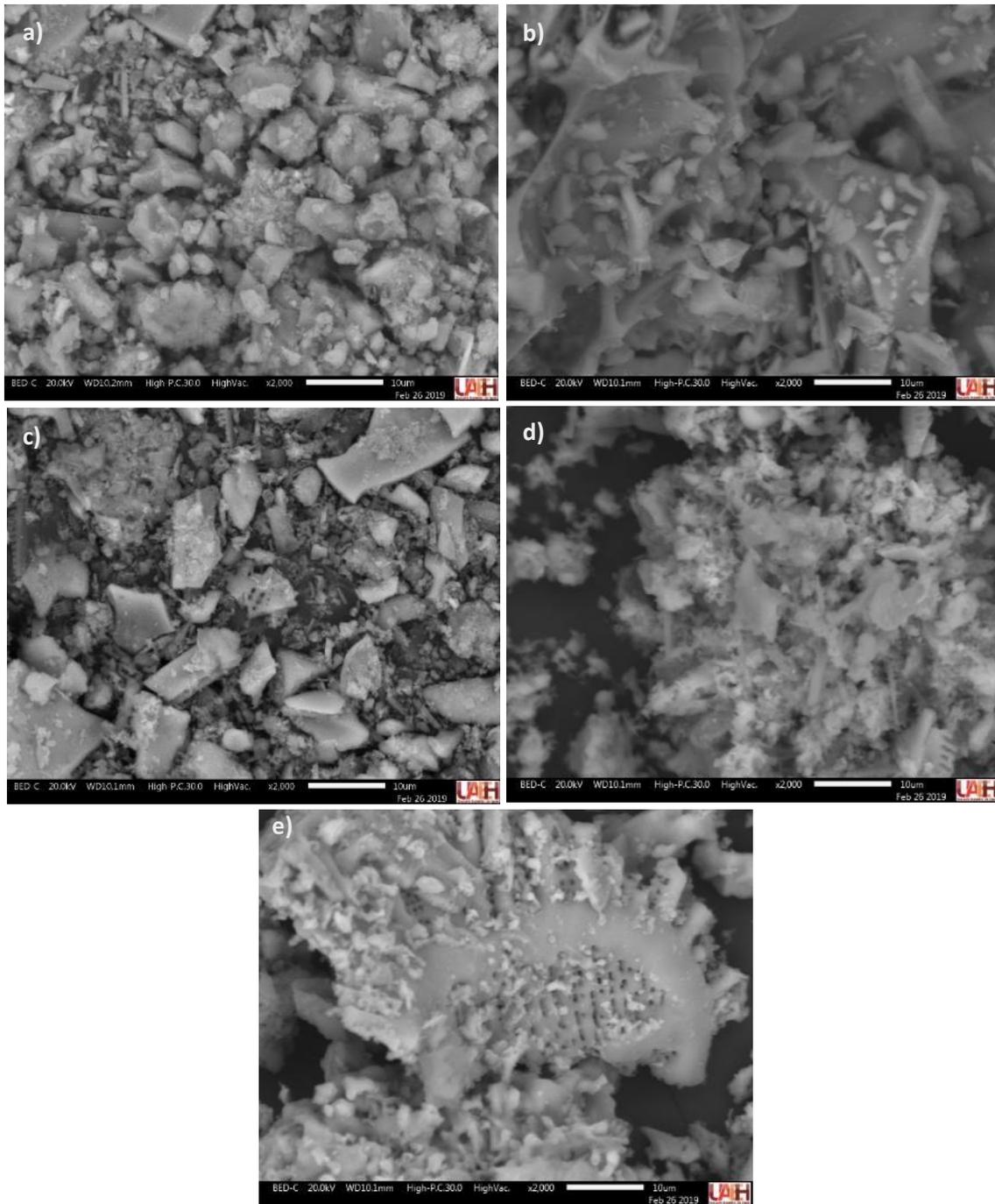


Figura 27. Micrografías de las materias primas a) Agregado reciclado; Se notan algunos silicatos y calcita adherida en partículas, b) Pumicita; Se notan algunos poros característicos de esta espuma volcánica, c) Diatomita Natural; Se notan algunos fósiles de algas de diatomeas, d) Diatomita calcinada; Se nota la ruptura de fósiles y más amorfa, e) Diatomita calcinada con fundente; Se aprecia la oxidación en un fósil de diatomea.

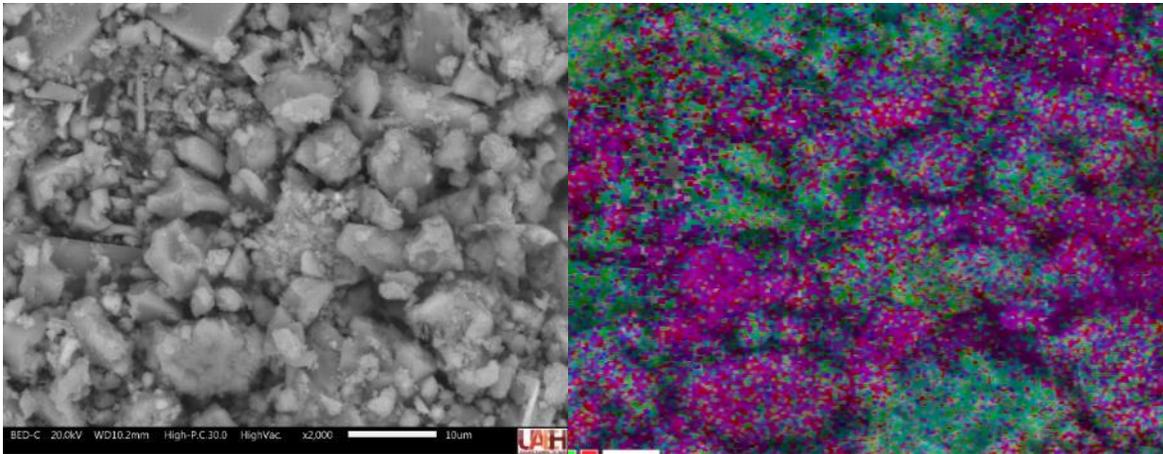


Figura 28. Mapeo de los agregados reciclados donde se nota la distribución elemental.

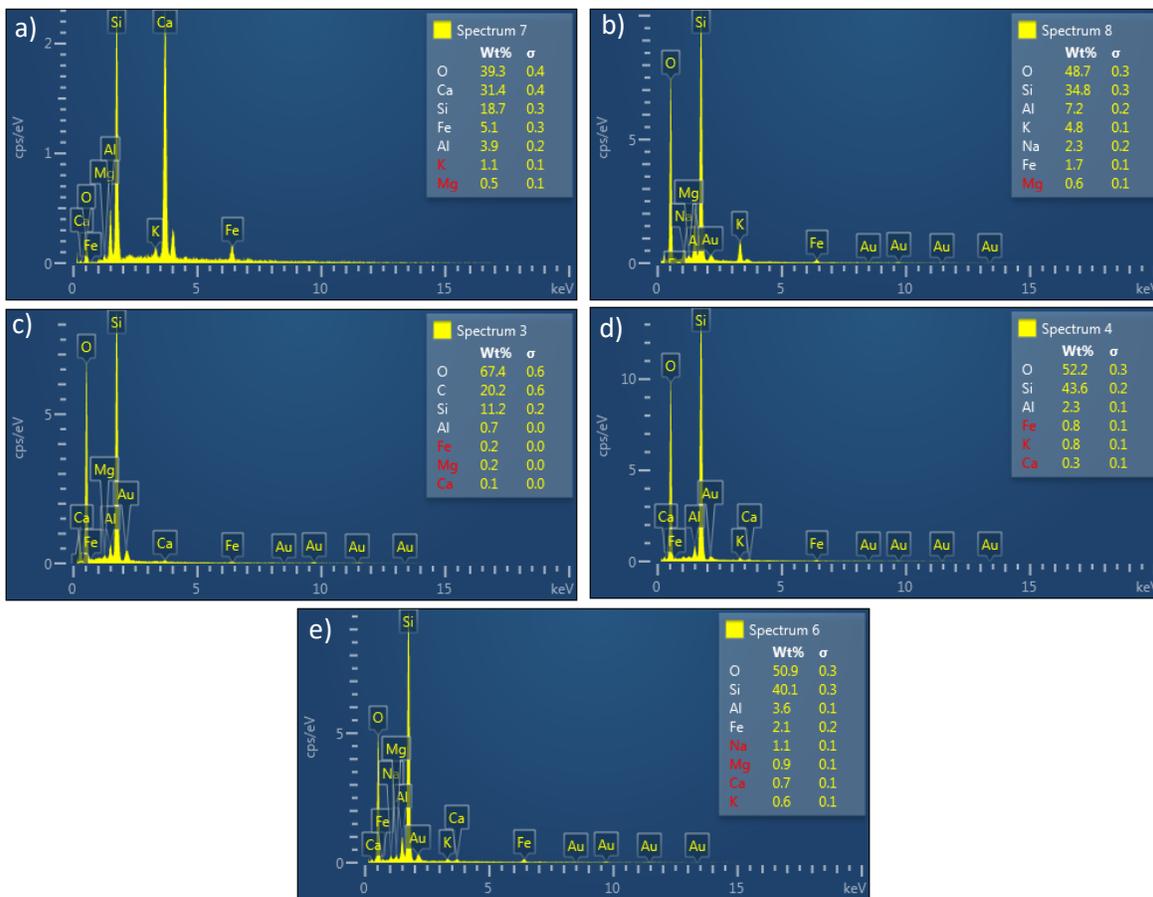


Figura 29. Espectros de MEB-EDS a) Agregados Reciclados b) Pumicita c) Diatomita Natural d) Diatomita Calcinada e) Diatomita Calcinada con Fundente.

Tabla 7. Análisis semicuantitativo de elementos presentes en la muestra de Agregado Reciclado.

Elemento	% en peso
O	39.35
Mg	0.45
Al	3.95
Si	18.73
K	1.06
Ca	31.39
Fe	5.07
Total:	100.00

Tabla 8. Análisis semicuantitativo de elementos presentes en la muestra de Pumicita.

Elemento	% en peso
O	48.68
Na	2.28
Mg	0.59
Al	7.18
Si	34.79
K	4.77
Fe	1.71
Total:	100.00

Tabla 9. Análisis semicuantitativo de elementos presentes en la muestra de Diatomita Natural.

Elemento	% en peso
C	20.16
O	67.37
Mg	0.20
Al	0.71
Si	11.23
Ca	0.13
Fe	0.22
Total:	100.00

Tabla 10. Análisis semicuantitativo de elementos presentes en la muestra de Diatomita Calcinada.

Elemento	% en peso
O	52.23
Al	2.31
Si	43.60
K	0.75
Ca	0.30
Fe	0.80
Total:	100.00

Tabla 11. Análisis semicuantitativo de elementos presentes en la muestra de Diatomita Calcinada con Fundente.

Elemento	% en peso
O	50.87
Na	1.06
Mg	0.88
Al	3.62
Si	40.09
K	0.65
Ca	0.70
Fe	2.14
Total:	100.00

La técnica de caracterización química fluorescencia de rayos X, a diferencia de la técnica de microanálisis EDS es una técnica de análisis químico, por lo tanto, sus resultados van a corroborar los datos obtenidos por el microanálisis de rayos X por dispersión de energías (EDS).

En las tablas 12, 13 y 14 se presentan los resultados de XRF. Cabe mencionar que solo se muestran los principales óxidos, porque el propósito es conocer la variación del calcio en la pasta de cemento y la cantidad de óxido de silicio en las diatomitas. El contenido de óxidos menores no se discutirá en este documento.

Tabla 12. Análisis de Fluorescencia de Rayos X de Agregados Reciclados.

Óxidos	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂
Agregados reciclados	48.368	26.526	8.423	4.572	1.118	0.516

Tabla 13. Análisis de Fluorescencia de Rayos X de Diatomita.

Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	CaO
Diatomita	77.135	7.77	2.344	1.869	1.115	1.041

Tabla 14. Análisis de Fluorescencia de Rayos X de Pumicita.

Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂
Pumicita	72.983	15.28	5.00	3.176	1.378	0.298

5.1.3 Análisis granulométrico

Para agregados reciclados tomamos 5.00 kg de muestra representativa, se tamizaron y los resultados obtenidos se muestran a continuación (Tabla 15).

Tabla 15. Resultados del análisis granulométrico de los agregados gruesos reciclados.

Análisis granulométrico de agregados gruesos			Muestra (Kg):	5.00
No. tamiz	Peso retenido	% retenido	Peso retenido acumulado	% retenido acumulado
2"	0.00	0.00	0.00	0.00
1 1/2"	0.00	0.00	0.00	0.00
1"	0.20	4.00	0.20	4.00
3/4"	1.10	22.00	1.30	26.00
1/2"	2.59	58.00	3.89	80.00
#4	0.02	18.80	4.87	98.80
Charola (arena)	0.06	1.2	5.000	100.00
$\Sigma=$	5.00			
Pérdida (Kg)=	0.00			

En base a los resultados de la tabla anterior se presenta a continuación la curva granulométrica para los agregados reciclados donde se aprecia conforma a la normativa NMX-C-111-ONNCCE-2017 “Industria de la Construcción-Agregados para Concreto Hidráulico-Especificaciones y Métodos de Ensayo” (Figura 30).

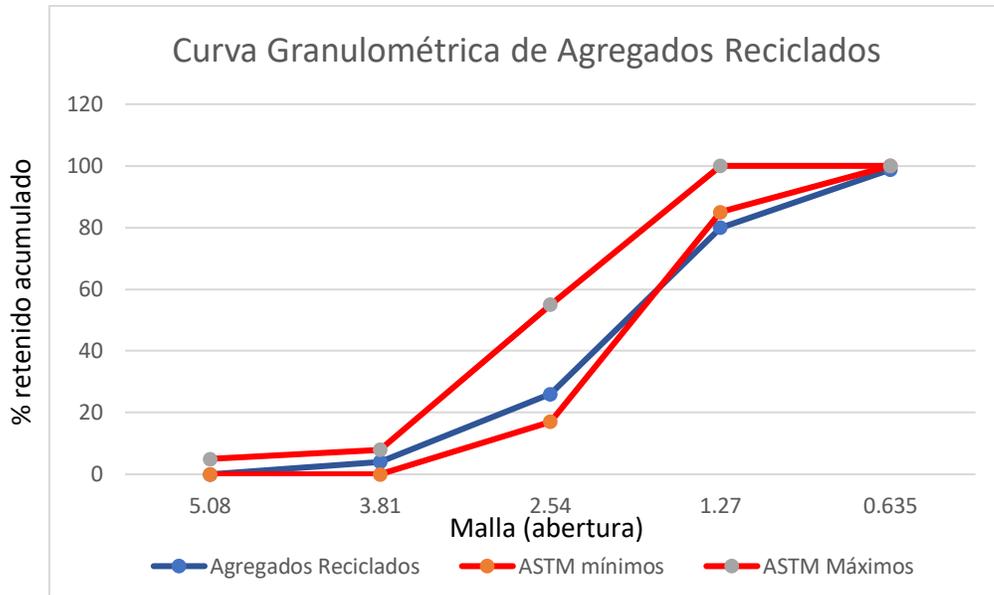


Figura 30. Curva granulométrica de agregados gruesos reciclados.

Se puede apreciar en el gráfico que al final de la curva de los agregados reciclados se encuentra fuera del límite granulométrico debido a que generan mayor cantidad de finos al momento de ser tamizados por la presencia de mortero recubriendo los agregados (Sánchez et al, 2015) pero para este estudio es despreciable, porque sólo se necesita saber la distribución de los agregados y saber si es necesario hacer una trituración secundaria para poder utilizarlos como materia prima en la elaboración de los bloques. En comparación con el tamaño de agregado promedio de pumicita ($\frac{1}{8}$ pulgada), el de los agregados reciclados fue de $\frac{3}{4}$ de pulgada, por lo que se necesitó hacer una trituración secundaria y así uniformarlo con la pumicita.

5.2 ELABORACIÓN DE BLOCKS SÓLIDOS (PRIMERA ETAPA)

Se pretende hallar la proporción óptima de diatomita en sustitución con el cemento, que maximice su resistencia, por lo que las mezclas utilizadas en las pruebas se agruparon como referencia (R), con diatomita natural (DN), diatomita calcinada (DC) y diatomita calcinada con fundente (DCF). El block de referencia se obtuvo al recabar información de 5 bloqueras cuyas proporciones variaban en cantidad de pumicita y cemento, estableciendo una media en base a un bloque de pumicita con medidas comerciales de 120 x 400 x 200 cm (Figura 31). Las muestras de bloques mezcladas con la diatomita natural (DN) se obtuvieron reemplazando el cemento portland compuesto (CPC) en varias proporciones (5%, 10% y 15%) en peso y manteniendo el agregado principal (pumicita) a la misma composición. De manera similar, las muestras de bloques mezclados con DC y DCF se obtuvieron reemplazando el cemento en varias proporciones (5%, 10% y 15%) en peso. Las muestras fueron llamadas como se muestran en la tabla 16. Se realizaron 5 probetas de cada muestra en base a la normativa mexicana NOM-NMX-C-036 “Industria de la construcción – Bloques tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines – Resistencia a la compresión – Método de prueba”, utilizando un molde de placa de metal, cuyas dimensiones son de 60 · 200 · 100 mm como se muestran en la figura 32. Dejándose secar a temperatura ambiente durante 28 días (Figura 33).

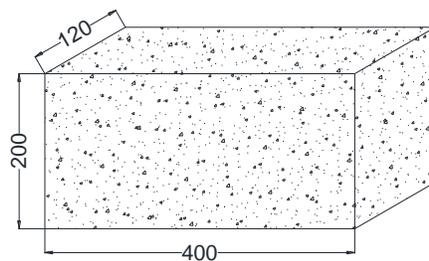


Figura 31. Medidas de un bloque de pumicita estándar a nivel comercial.

Tabla 16. Diseño de composición del bloque de pumicita.

Tipos de diatomita	Reemplazo de Diatomita (%)	Diatomita (g)	Cemento (g)	Pumicita (g)	Agua (g)
Diatomita Calcinada con fundente (NaOH) (DCF)	5	5.4	102	964.3	116
	10	10.8	96.5		
	15	16.2	91		
Diatomita Calcinada sin fundente (DC)	5	5.4	102	964.3	116
	10	10.8	96.5		
	15	16.2	91		
Diatomita Natural (DN)	5	5.4	102	964.3	116
	10	10.8	96.5		
	15	16.2	91		



Figura 32. Molde para elaboración de probetas de block cuyas medidas son de 60 x 200 x 100 cm.

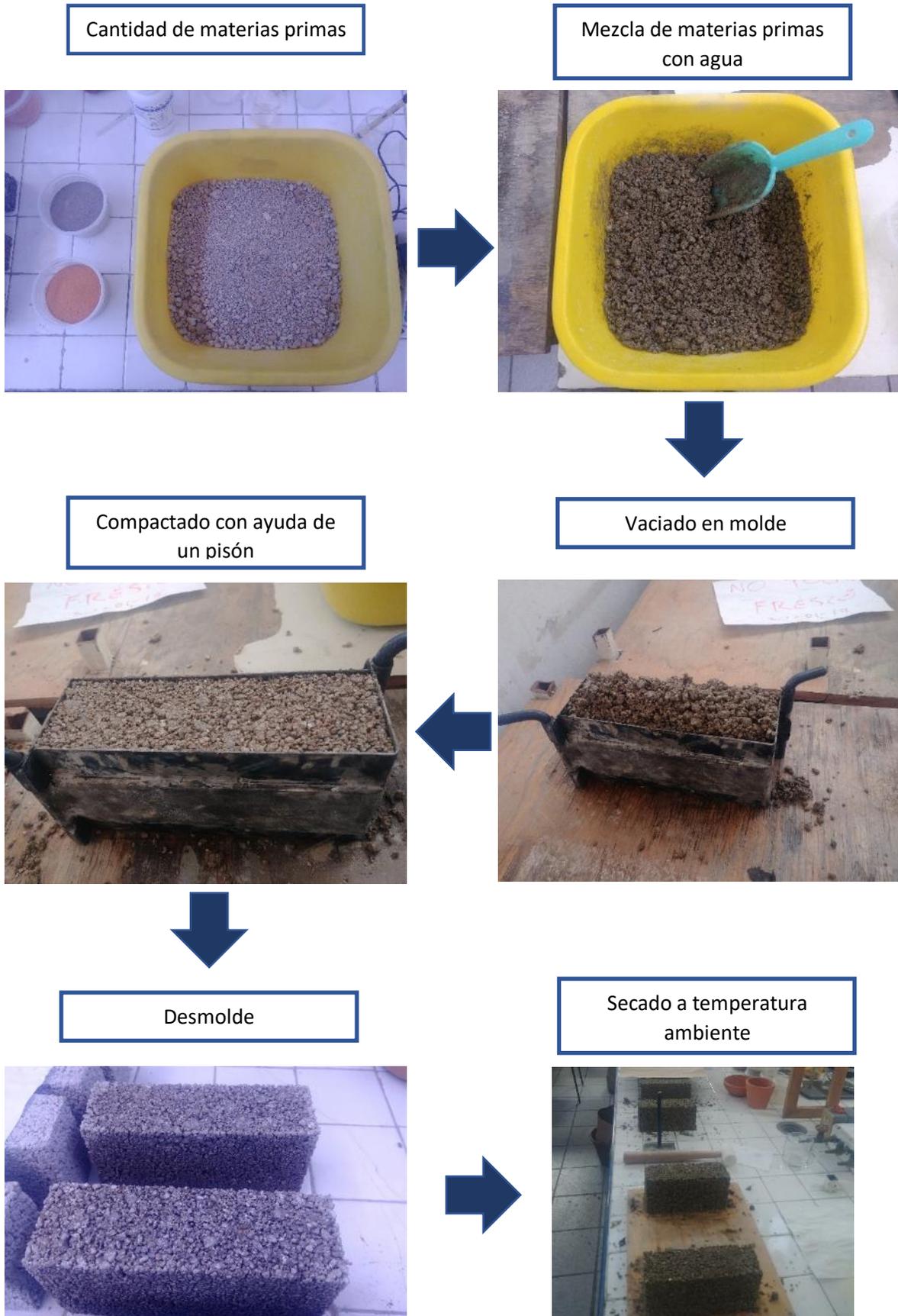


Figura 33. Esquema de la elaboración de un bloque de pumicita.

5.2.1 Resistencia a la compresión.

Para las pruebas de resistencia a la compresión, se realizaron de acuerdo a la norma NOM-NMX-C-036 utilizando una prensa ELVEC (Figura 34) en el laboratorio de resistencia de materiales ubicado en el Área Académica de Ingeniería y Arquitectura en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. En base a la NOM-NMX-C-441-ONNCCE que establece las especificaciones y métodos de prueba en la industria de la construcción, bloques, tabiques o ladrillos o tabicones para uso estructural.



Figura 34. Prensa ELVEC para pruebas de resistencia a la compresión. Imagen disponible en equipos ELVEC.

La influencia de los tipos de diatomitas en la resistencia del cemento Portland se aprecia en el gráfico de la figura 35 donde se observa la resistencia a la compresión de la muestra del bloque de pumicita con cemento Portland mezclado con diferentes tipos y contenidos de diatomita a la temperatura de curado de 20 ° C a los 7, 14 y 28 días.

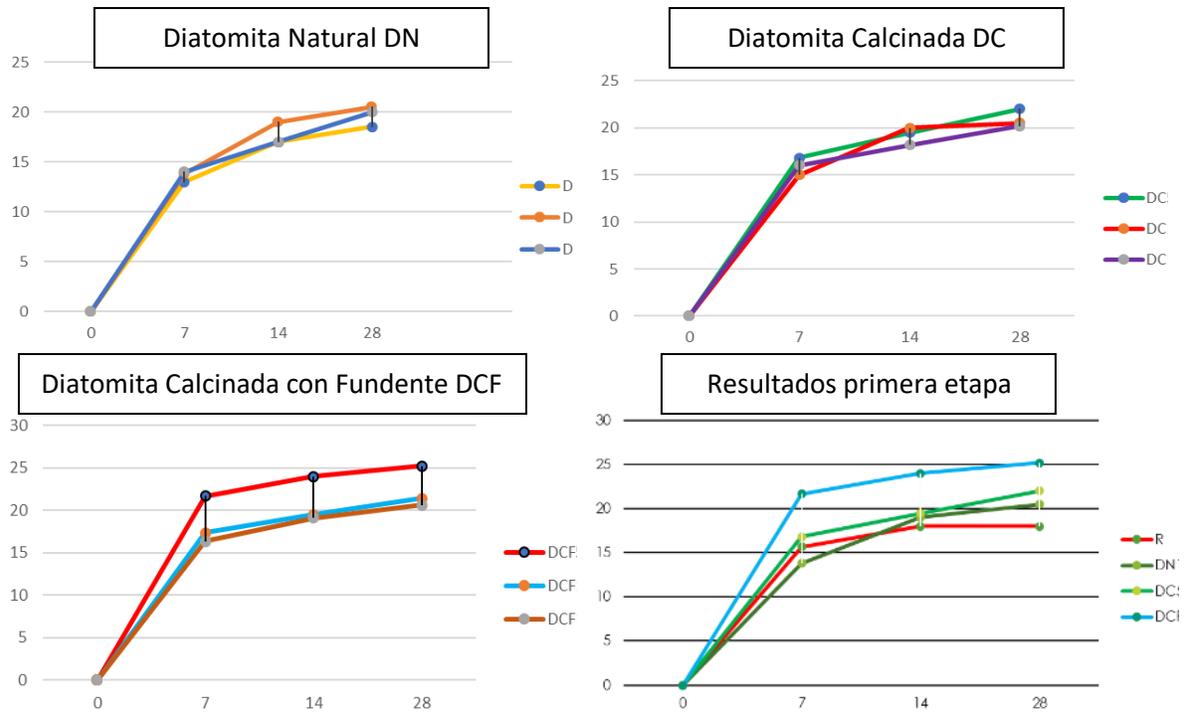


Figura 35. La resistencia a la compresión del bloque de pumicita mezclado con diferentes tipos de diatomita (a) La muestra mezclada con diatomita normal DN (b) La muestra mezclada con diatomita calcinada DC (c) La muestra mezclada con diatomita calcinada con fundente DCF d) Comparativa de los resultados óptimos obtenidos de cada prueba contra el Block normal.

Resultando que la resistencia de la muestra de block con diferentes contenidos de diatomita fue ligeramente inferior en la Diatomita Natural a la de la muestra de Referencia; a la edad de 7 días, las resistencias de la muestra de block de pumicita mezclado con la cantidad de mezcla de Diatomita Calcinada (DC) y Diatomita Calcinada con Fundente (DCF) fueron en su mayoría más altas que la de la muestra de Referencia (R). En promedio las resistencias con la cantidad de mezcla del 5% en sustitución con el cemento de DC y DCF son 22 kg/cm² y 24.4 kg/cm² respectivamente siendo superiores a las de las muestras con la cantidad de mezcla del 10% y el 15%. Se comparan con la resistencia del block normal (20 kg/cm²) contra las muestras de DC y DCF, aumentando entre un 10% y 22% respectivamente. Dando como resultado que la Diatomita Calcinada con Fundente mezclada con el cemento a un 5% puede mejorar la resistencia del espécimen de block de pumicita a temprana edad (7 días) en un 22% con respecto al block convencional.

El $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Hidróxido de Calcio) se produjo por la hidratación del SiO_2 (dióxido de Silicio) y las partículas de cemento en las partículas de diatomita y el gel de C-S-H (Silicatos de Calcio Hidratados) generado por SiO_2 en la reacción de hidratación secundaria para aumentar la resistencia a la compresión del cemento (Liu et al, 2016).

Es importante mencionar que al igual como nos muestra Liu, agregando mayor cantidad de diatomita, ésta conducirá a más partículas de diatomita que al no estar involucradas en la hidratación secundaria perjudican el desarrollo de la resistencia del bloque. En la tabla 17 se observa una comparativa tanto de las resistencias alcanzadas por pastas de cemento sustituidas al 5% por diatomitas de diferentes ordenes como de la cantidad de SiO_2 entre ellas.

Tabla 17. Resistencias de diatomitas según la cantidad de SiO_2

	Aumento de Resistencia	Cantidad de SiO_2
<u>Liu et al 2018</u>		
Diatomita 1 ^{er} grado Calcinada	54.6%	93.04%
Diatomita 1 ^{er} grado	15.4%	82.97%
Diatomita 2 ^{do} grado	10.2%	72.29%
<u>Este estudio</u>		
Diatomita Natural	-	77.13%
Diatomita Calcinada	10.0%	81.50%
Diatomita Calcinada con Fundente NaOH	22.0%	83.30%

En la tabla se aprecia que al aumentar la cantidad de SiO_2 aumenta la resistencia de la pasta de cemento, debido a la cantidad de sílica activa cuya proporción aumenta conforme al SiO_2 . Es importante mencionar que, en el estudio realizado por Liu, 2018 no hubo la interacción con algún otro material, simplemente fue la reacción de cemento-diatomita-agua; mientras que en este estudio hubo la presencia de pumicita.

5.3 ELABORACIÓN BLOCKS SÓLIDOS (SEGUNDA ETAPA)

Se pretende hallar la cantidad óptima de Agregado Reciclado en sustitución con la pumicita para lograr mejorar las propiedades mecánicas del material, teniendo en cuenta y controlado los factores de peso y absorción. Las muestras se agruparon en diferentes porcentajes (10%, 20%, 30%) creándose 5 probetas en base a normativa.

5.3.1 Resistencia a la compresión

Al igual que en la etapa 1, las pruebas de resistencia a la compresión se realizaron en base a la norma NOM-NMX-C-036 utilizando una prensa ELVEC. En base a la NMX-C-441-ONNCCE que establece las especificaciones y métodos de prueba en la industria de la construcción, bloques, tabiques o ladrillos o tabicones para uso no estructural.

La influencia del Agregado reciclado en la resistencia del bloque de pumicita se aprecia en el gráfico de la figura 36 a la temperatura de curado de 20 ° C a los 7, 14 y 28 días.

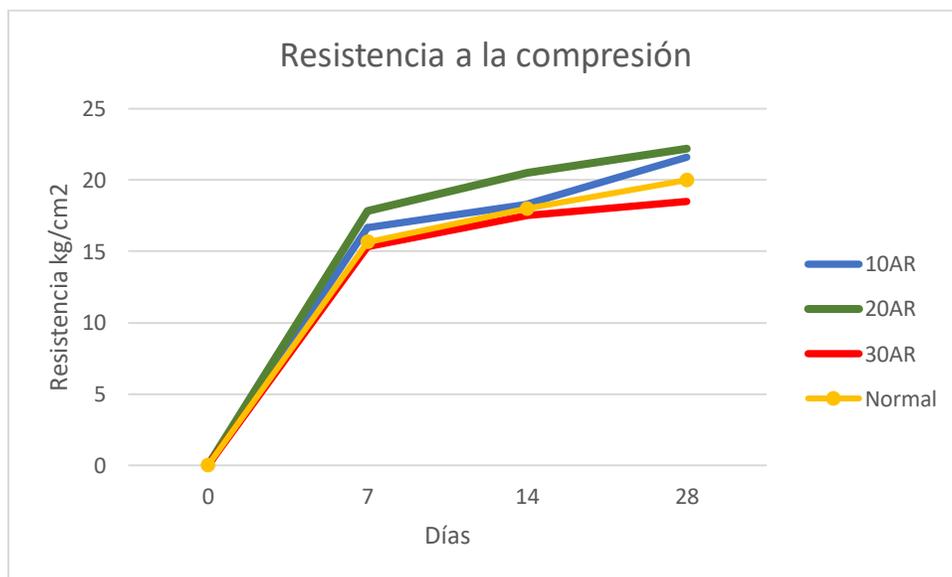
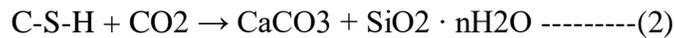


Figura 36. Gráfico que muestra la resistencia a la compresión de las muestras de bloques con agregados reciclados a los 7, 14 y 28 días.

El gráfico nos muestra que 2 muestras de bloques de pumicita con agregados reciclados 10AR y 20AR son mayores, 21.6 kg/cm² y 22.2 kg/cm² respectivamente, que las del bloque de referencia (20 kg/cm²), el que contiene el 30% de agregados reciclados en sustitución de la pumicita resultó menos eficiente (18.5 kg/cm²); En base a los resultados se elige el bloque 20AR cuya resistencia aumentó en un 12% con respecto al bloque de referencia. Es importante mencionar que la resistencia alcanzada es ligeramente menor que la obtenida anteriormente solo con la sustitución de la diatomita calcinada con fundente (10% menor). Según Moreno et al, 2018 la calcita (CaCO₃) aparece en proporciones menores en todos los agregados reciclados. Por lo tanto, la calcita se debe predominantemente a la carbonatación de los productos de la hidratación del cemento en la pasta adherida a los agregados reciclados, como la portlandita Ca (OH)₂ y los silicatos de calcio hidratado C-S-H (CaO-SiO₂-H₂O). El carbonato de calcio se considera un cementante débil (Moreno et al, 2018), por eso disminuye su resistencia. Estas fases están carbonatadas como se describe en las Reacciones (1) y (2) (Shi et al, 2016):



5.4 CARACTERIZACIÓN DE PRODUCTO OBTENIDO

Se determinó que el bloque elaborado con un 20% de agregado reciclado es el óptimo debido a que presenta una resistencia a la compresión de 22.2 kg/cm² mayor al de block de referencia 20 kg/cm² y ligeramente superior al de los otros bloques con el 10% y 30% de agregado reciclado (21.6 y 18.5 kg/cm² respectivamente). Se procede a realizar la técnica de caracterización de Microscopía Electrónica de Barrido para hacer una comparativa entre el block de pumicita comercial común y el block con agregados reciclados y diatomita; obteniendo una imagen microestructural donde se encuentren las formaciones de silicatos cálcicos hidratados C-S-H, cuya función es la de darle resistencia al cemento.

5.4.1 Microscopía Electrónica de Barrido.

Se realizó la técnica de caracterización para observar la morfología de los bloques de pumicita normal y el de agregados reciclados. Se realizó en un microscopio electrónico de barrido marca Jeol (Figura 37) con un filamento de Tungsteno a un voltaje de 20 KV con recubrimiento de grafito y plata.



Figura 37. Microscopio Electrónico de Barrido marca Jeol del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

El objetivo de este análisis es el localizar los Silicatos de Calcio Hidratados (C-S-H) formados por la reacción entre las fases de silicato del cemento portland y siendo el responsable de la resistencia del cemento trabando al árido, en este caso la pumicita y/o agregado reciclado, generando un conglomerado de estructura rígida y que se aprecian como agujas cuyos tamaños varían alrededor de las 10 micras. En la figura 38 se aprecian 4 micrografías donde las dos superiores son de un bloque de pumicita común y las inferiores son del bloque de pumicita elaborado con un 20% de agregados reciclados y un 5% de diatomita calcinada con fundente, ambos a la edad de 28 días.

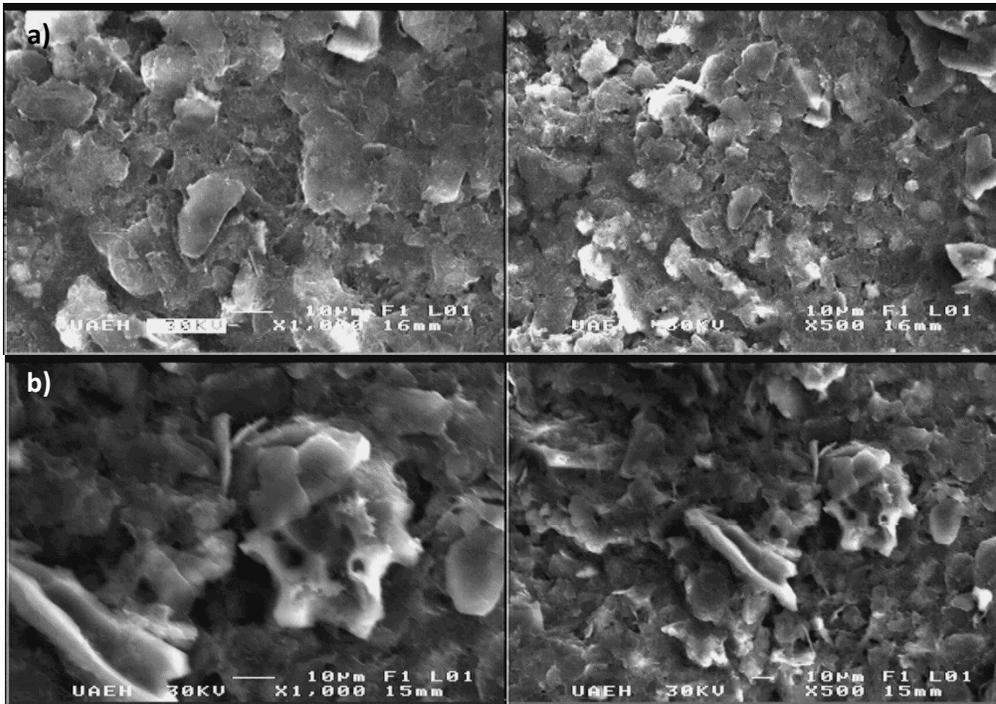


Figura 38. Micrográficas donde se puede cotejar la presencia de C-S-H en un a) bloque común y un b) bloque con diatomita al 5% y Agregados Reciclados al 10%.

Se puede observar la fracción de arena de cuarzo y la porosidad esférica producto de aditivos aireantes junto con la cantidad de C-S-H es mayor en el bloque b) lo que conlleva a coadyuvar el aumento de la resistencia del bloque y respaldan los resultados obtenidos en las pruebas de resistencia mecánica de la figura 36. Se aprecia que la diatomita está reaccionando con el cemento generando los silicatos de calcio hidratados, por lo que se nota mayor presencia de ellos cerca de ésta. En la figura 39 se nota la forma de un gel de C-S-H cuya longitud es de aproximadamente 10 micras y su forma de aguja está bien definida.

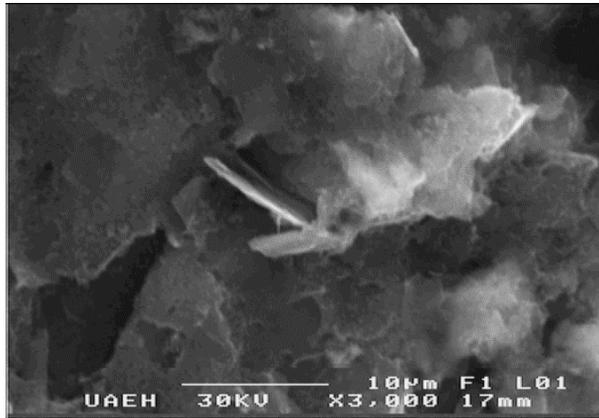


Figura 39. Micrografía donde se aprecia un gel de C-S-H a 3,000 aumentos y un voltaje de 30 KV.

6 CONCLUSIONES

En la preparación de las muestras se percató que la diatomita contenía una mayor cantidad de SiO_2 que en otros trabajos donde la han utilizado como sustituto del cemento. Es de importante mención que la cantidad de cemento utilizado es mucho menor que el ocupado para elaborar concreto de ahí un aumento ligeramente menor en la resistencia a la compresión.

En la primera etapa de elaboración de bloques de pumicita, se observó un incremento en la resistencia a la compresión a temprana edad (7 días) con la sustitución del 5% de diatomita calcinada con fundente (DCF). Incrementando un 22% a una edad de 28 días, que es cuando el concreto alcanza una resistencia cercana al 99%. Notándose que a una edad de 7 días presenta un aumento del 20% comparado a un bloque de pumicita convencional. Esto ocurre debido a que el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Hidróxido de Calcio) se produjo por la hidratación del SiO_2 (dióxido de Silicio) y las partículas de cemento en las partículas de diatomita y el gel de CSH (Silicatos de Calcio Hidratados) generado por SiO_2 en la reacción de hidratación secundaria para aumentar la resistencia a la compresión del cemento. Al aumentar la cantidad de diatomita se producen más partículas de ésta que al no reaccionar sólo perjudican la resistencia de la pasta de cemento (Liu et al, 2016), por lo cual se recomienda dejar fraguar hasta los 28 días.

La dosificación de los bloques de pumicita para la segunda etapa de elaboración, donde se sustituye el agregado reciclado por la pumicita, se llevó a cabo en base a los pesos específicos de los 2 agregados, resultando un ligero aumento de peso de 45 g en el bloque con 20% de Agregado Reciclado y un aumento de la cantidad de agua de un 7%.

El bloque con el 20% de Agregado reciclado aumentó la resistencia del block de pumicita normal en un 12%, no mostrando aumento a edad temprana, sino hasta los 14-28 días de curado. Disminuyendo un 10% comparado con la primera etapa de elaboración de bloques. Esto ocurre por la carbonatación de los productos de la hidratación del cemento en la pasta adherida a los agregados reciclados, como la portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y los silicatos de calcio

hidratado C-S-H ($\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$) como lo menciona Moreno et al, 2018, reduciendo la resistencia del producto.

En la comparativa de las micrografías del Microscopio Electrónico de Barrido de un bloque normal contra uno con agregados reciclados y diatomita calcinada con fundente, se observa el aumento de estos geles de C-S-H; en especial cerca de la diatomita. Ocasionando que traben al árido y así aumentando la resistencia del producto.

Si bien el aumento con el árido reciclado fue menor que el obtenido sólo con la diatomita, sigue siendo mayor en comparación con el bloque de pumicita convencional. Haciendo énfasis en la parte sustentable del estudio, ya que se está reduciendo el impacto ambiental generado por los Residuos de Construcción y Demolición, proporcionalmente a la disminución de la pumicita al incorporarlo al block.

Siguiendo en el ámbito ambiental, al sustituir la diatomita por cemento, se está disminuyendo la huella de carbono generada por el cemento portland compuesto en su elaboración, haciendo cuentas por cada tonelada de cemento (20 bultos) utilizada en la elaboración de blocks de pumicita, se estaría ahorrando 50 kg de cemento (1 bulto). Según la revista Civilizate, No. 8, 2016 el cemento convencional produce en promedio 0,8 toneladas de CO_2 por cada tonelada de cemento; con lo que se estaría reduciendo 40 kg de CO_2 por tonelada de cemento producida. En base a Barker et al, 2009. La industria del cemento contribuye con alrededor del 7% del total de las emisiones mundiales de CO_2 (aproximadamente 1.8 Gt de emisiones de CO_2 al año). Por lo tanto, se reduciría unas .09 Gt de emisiones de CO_2 al año

En base a datos obtenidos por diversas casas de materiales, con un bulto de cemento se pueden fabricar de 30 a 35 bloques de pumicita, en base al uso del 20% de agregados reciclados en sustitución con la pumicita, se estaría ahorrando de 7 a 8 bloques de pumicita por cada bulto de cemento, usándose para elaborar otros bloques.

BIBLIOGRAFÍA

Akhtar, A., & Sarmah, A.. (2018, March 7). Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, 10.1016, p.6.

Antonios, K., Demetrios, N., & Michael, F. P. (2014). Mechanical and durability properties of concretes containing recycled lime powder and recycled aggregates. *Construction Build Mater* 53, 253-259.

Barker DJ, Turner SA, Napier-Moore PA, Clark M, Davison JE. CO2 capture in the cement industry. *Energy Procedia* 2009;1(1):87–94.

Battarbee RW, Jones VJ, Flower RJ, Cameron NG, Bennion H, Carvalho L, Juggins S (2001) Diatoms. In: *Tracking environmental change using lake sediments Vol 3: Terrestrial, algal and siliceous indicators.* (eds Smol JP, Birks HJB, Last W) pp 155-202. Dordrecht, Kluwer

Binici H., Durgun M.Y., Rizaoglu T., Kolucolak M., Investigation of durability properties of concrete pipes incorporating blast furnace slag and ground basaltic pumice as fine aggregates, *Sharif Univ. Technol.* 19 (3) (2012) 366–372.

Borgel I. (2015). Caracterización del yacimiento de diatomita de Loma Larga, Municipio de Acatlán, Hidalgo y evaluación de sus aplicaciones alternas. Tesis de Licenciatura, Área Académica de Materiales y Metalurgia, Universidad Autónoma del Estrado de Hidalgo.

Bülent Y. & Nezahat E. (2008). The use of raw and calcined diatomite in cement production. *Cement & Concrete Composites*, 30, 202–211.

Buenrostro, O., Bocco, G., & Bernache, G. (2001). Urban solid waste generation and disponsal in Mexico. *Waste MAnagement and Research*, 169-176

- Castaño, J., Misle, R., Andrés, L., Gómez, A., & Ocampo, M. (2013). Waste management from construction and demoliyion (RCD) in Bogota: Prospects and limitations. *Tecnura*, 121-129.
- Castillo Berthier, H. (2003). *The Garbage Society: Caciquism in Mexico City*. Resources, Conservation and Recycling, 193-210.
- CIB, “Agenda 21 sobre Construcción Sustentable”, Informe CIB Publicación 237, Julio, (2000).
- Del Río, M., Izquierdo, P., Salto, I., & Cruz, J. S. (2010). La regulación jurídica de los residuos de construcción y demolición (RCD) en España. El caso de la comunidad de Madrid. *Informes de la construcción*, vol 62 no 517, 81-86.
- Diamond, S., White J., & Dolch W. (1963). Transformation of clay minerals by calcium hydroxide attack. Twelfth National Conference on Clay and Clays Minerals, Purdue University, Lafayette, Indiana.
- Hernández, S. (2017, 7 de octubre). “Retiran 900 toneladas de escombros por sismo del 19-s”. *El Universal*. Recuperado de <https://www.eluniversal.com.mx/metropoli/cdmx/retiran-900-toneladas-de-escombros-por-sismo-del-19-s>.
- Kastis D, Kakali G, Tsivilis S, Stamatakis MG. Properties and hydration of blended cements with calcareous diatomite. *Cement Concrete Res* 2006;36(10):1821–6.
- Khalaf FM, DeVenny AlanS. Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in Concrete: review. *ASCE J Mater Civil Eng* 2004:331–40.
- Lea F.M. *The chemistry of cement and concrete*. 3rd ed. London: Edward Arnold, Ltd.; Reprinted in 1976.
- Lechuga Duarte, J. (2002). Plan estratégico para la comercialización de concreto celular como una nueva área de negocio en la ciudad de Chihuahua, Chih. Licenciatura en Arquitectura. Instituto Tecnológico de la Construcción. Pp. 9.
- Liu J., Shao P., Wang S. (2016). The Influence of Diatomite on the Strength and Microstructure of Portland Cement. *MATEC Web of Conferences*, 67, 07-17.

Marín, R.. (Septiembre 2012). PROYECTO :DESARROLLO SUSTENTABLE EN VERACRUZ.. Mayo, 2019, de Blog Ricardo Marín Aguirre Sitio web: <http://ricardomarinaguirre.blogspot.com/2012/09/proyecto-desarrollo-sustentable-en.html>

Matar, P., & Dalati, R. (2001). Strengh of masonry blocks made with recycled concrete aggregates. Seventh International Conference on MAterial Sciences vol. 21, 180-186.

Mete Z. Benefication of Kütahya-Alayunt Diatomite Ores (in Turkish). Akdeniz University Engineering Faculty Journal, Mining Section 1988;1:184-201.

Oh, D.-Y., Noguchi, T., Kitagaki, R., Park, W.-J., 2014. CO2 emission reduction by reuse of 14 building material waste in the Japanese cement industry. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 38, 796–810. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.036>

Rao A, Jha KN, Misra S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resour Conserv Recycl* 2007;50(1):71–81.

RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures): “Specifications for Concrete with Recycled Aggregates”. *Materials and Structures*, N°27. p.p. 557-559, 1994.

Román, J. y Santos, C. (2013). Estudio técnico-económico del sistema de transporte de mineral y tepetate en el proyecto “caballo blanco”, Veracruz. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Pp. 16

Sánchez J., La vivienda “social” en México, JSa, 2012.

Sari D., Pasamehmetoglu A.G. The effects of gradation and admixture on the pumice lightweight aggregate concrete, *Cem. Concr. Res.* 35 (5) (2005) 936–942.

Serralde, R., Sánchez, D., y López, J. (2015). Factibilidad de implementación de una empresa de base tecnológica para la fabricación de elementos urbanos, elaborados con base en residuos de la construcción y demolición (RCD): Analisis técnico de productos y maquinaria. Tesis de Licenciatura, Área Académica de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estrado de Hidalgo.

Shi, C.; Li, Y.; Zhang, J.; Li, W.; Chong, L.; Xie, Z. Performance enhancement of recycled aggregate—A review. *J. Clean. Prod.* 2016, 112, 466–472.

Stamatakis M.G., Fragoulis D., Csirik G., Bedeleian I., Pedersen S.. (2003). The influence of biogenic micro-silica-rich rocks on the properties of blended cements. *Cement & Concrete Composites*, 25, 177–184.

Unal O, Uygunog˘lu T, Yildiz A. Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation. *Build Environ* 2007;42(2):584–90.

Uriarte, J., Xamán, J., Chávez, Y., Hernández, I. & Aguilar, J. (2019). Thermal performance of walls with passive cooling techniques using traditional materials available in the Mexican market. *Applied Thermal Engineering*. Elsevier, 149, pp. 1154-1169.

Uygunoglu T ,Unal O .Use of lightweight block element produced by diatomite in the construction[D].Master Thesis Afyon kocatepe Vniversity,2005.

Williams P. T. (1998). “Waste treatment and disposal” 1st edition. Wiley & Sons, England.

Zaetang, Y., Wongsakul A., Sata V., Chindapasirt P.. (2013, August 15). Use of lightweight aggregates in pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 585–591.

Zhu, L., Jun, D., Guoliang, B., & Fengjian, Z. (2015). Study of thermal properties of recycled aggregate concrete and recycled concrete blocks. *Construction and Building Materials*, 620-628.