



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

**“Estabilización de Suelos Arcillosos con Residuos de la
construcción y demolición”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES

MODALIDAD TRADICIONAL

PRESENTA

EMILIANO MORENO PÉREZ

DIRECTORES

DR. JUAN HERNÁNDEZ ÁVILA

DR. ELEAZAR SALINAS RODRÍGUEZ

2018



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
Institute of Basic Sciences and Engineering
Dirección
 Dean

Mineral de la Reforma, Hgo., a 10 de agosto de 2018

Número de control: ICBI-D/401/2018
 Asunto: Solicitud de impresión de tesis.

M. en A. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO
DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

Por este conducto le comunico que el jurado asignado al pasante del Doctorado en Ciencias de los Materiales, **C. Emiliano Moreno Pérez**, con número de cuenta 062013, quien presenta el trabajo de tesis titulado **“Estabilización de Suelos Arcillosos con Residuos de la construcción y demolición”**, después de revisar el trabajo en reunión de sinodales, ha decidido autorizar la impresión del mismo una vez realizadas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del jurado.

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

ORS/IBO

Ciudad del Conocimiento
 Carretera Pachuca - Tulancingo km. 4.5
 Colonia Carboneras
 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184
 Tel. +52 771 7172000 exts 2231, Fax 2109
 direccion_icbi@uaeh.edu.mx



www.uaeh.edu.mx

Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento a las siguientes personas e instituciones que hicieron posible la realización de esta tesis.

Al Estado Mexicano que a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología me otorgo la beca de Doctorado No. 388858.

Al Comité Doctoral del Programa de Doctorado en Ciencias de los Materiales (Tradicional) que en su momento me consideraron apto para ingresar a este programa, Dra. Marissa Vargas Ramírez, Dra. María Aurora Veloz Rodríguez, Dra. Rosa Icela Beltrán Hernández y Dr. Orlando Ávila Pozos.

A mi Comité Tutorial, Dr. Juan Hernández Ávila, Dr. Eleazar Salinas Rodríguez, Dra. Ma. Isabel Reyes Valderrama, Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz.

A la Dra. Yamile Rangel Martínez del Área Académica de Ingeniería del ICBI-UAEH y a mi tutora académica la Dra. Leticia Esperanza Hernández Cruz.

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

Y a mis amigas y amigos compañeros del posgrado.

ÍNDICE

Índice de figuras	vii
Índice de tablas	xii
Resumen	xiii
Abstract	xiv
1. Introducción	1
Presentación	2
Advertencia	6
Antecedentes	7
Justificación	13
Pregunta de investigación, hipótesis y objetivo	15
Pregunta de investigación e hipótesis:	15
Objetivo	16
Objetivos específicos	16
Enfoque	18
2. Marco Teórico	22
2.1 Estabilización de suelos arcillosos	22
2.2 La reacción puzolánica	29
2.3 Revisión bibliográfica	31
3. Parte Experimental	36
3.1 Materiales	36
3.1.1. Agregados reciclados provenientes de RCDs	36
3.1.2. Suelo arcilloso	41

3.1.3 Muestreo del suelo -----	43
3.1.4 Mezclas suelo - agua - agregado reciclado pulverizado -----	46
3.2 Métodos -----	50
3.2.1 Caracterización granulométrica -----	50
3.2.2 Caracterización química mineralógica -----	50
3.2.3 Caracterización microscópica por MEB -----	52
4. Resultados y Discusión -----	53
4.1 Distribución granulométrica -----	53
4.2 Composición mineralógica -----	59
4.2.1 Minerales de los agregados pétreos originales. -----	61
4.2.2 Minerales de la pasta de cemento adherida -----	63
4.3 Composición química -----	68
4.4 Propiedades químicas (alcalinidad) -----	72
4.5 Caracterización del suelo arcilloso (feozem háplico) -----	76
4.5.1 Caracterización por Microscopia Electrónica de Barrido -----	76
4.5.2 Caracterización mineralógica -----	77
4.5.3 Caracterización química por EDS -----	83
4.6 Desempeño de los agregados reciclados pulverizados como estabilizadores de suelos arcillosos -----	85
4.6.1 Observaciones macroscópicas de las mezclas suelo – agua – agregado reciclado pulverizado (grava planta) -----	86
4.6.2 Caracterización mineralógica de las mezclas suelo-agua-agregado reciclado pulverizado (grava planta) -----	94
5.8.3 Caracterización microscópica de las mezclas suelo-agua-agregado reciclado pulverizado (grava planta) -----	101

5. Conclusiones -----	112
Aportación científica y originalidad-----	116
Futuros trabajos -----	119
Recomendaciones para la práctica o la política-----	120
Otras aportaciones-----	124
Comentarios finales -----	129
Referencias -----	130

Índice de figuras

Figura 1. Paradigma de la ciencia de materiales.....	2
Figura 2. Concreto demolido (izquierda), agregados reciclados (derecha).....	5
Figura 3. Agregados reciclados pulverizados.....	5
Figura 4. Residuos de la construcción y demolición depositados al borde de una barranca de la Colonia Aves del Paraíso en la Ciudad de Pachuca.....	7
Figura 5. Composición de los residuos de la construcción y demolición en la Cd. de Pachuca.	8
Figura 6. Tiradero clandestino de residuos de la construcción y demolición ubicado al norte de la Cd. de Pachuca, véase que predomina el concreto demolido.	9
Figura 7. Izquierda, fragmento de concreto demolido. Derecha, agregados reciclados obtenidos mediante el reciclado de concreto demolido	10
Figura 8. Camino rural sobre suelo arcilloso, intransitable en época de lluvias.....	11
Figura 9. Estabilización de un suelo arcilloso con cal hidratada. Imagen tomada de http://prefanicsa.com.ni/producto/calidra/	12
Figura 10. Imagen de electrones secundarios de una pasta de cemento endurecido, donde se puede observar que los silicatos de calcio hidratados crecen en forma de fibras y la portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en forma de placas hexagonales. Imagen tomada de www.fhwa.dot.gov	15
Figura 11. Paradigma de la ciencia de los materiales.....	18
Figura 12. Objetivo de esta investigación visto desde el enfoque de la Ciencia de los Materiales, en donde la determinación de la estructura es la tarea principal.	21
Figura 13. Descripción de un mineral de arcilla (montmorillonita), en donde se ilustran sus principales características. Imagen modificada de [Hensen & Smit, 2002].....	23
Figura 14. Mecanismo de hinchamiento de los minerales de arcilla, nótese que cuando las moléculas de agua entran en la intercapa se produce la expansión de la estructura. Imagen modificada de Hensen & Smit, 2002.....	25
Figura 15. Grietas y deformación de la carpeta asfáltica provocadas por la presencia de arcilla en la sub base.	26
Figura 16. Suelo arcilloso de comportamiento geotécnico difícil.	27
Figura 17. Agrietamiento típico de un suelo arcillosos debido a la pérdida de humedad, las huellas de un perro denotan la baja resistencia y el estado plástico del suelo	27

Figura 18. Etapas de la hidratación del cemento y de la reacción puzolánica, donde es posible observar que los silicatos de calcio hidratados (tobermorita) crecen en forma de agujas y fibras que se entrelazan entre sí y con otras partículas. Imagen tomada y modificada de Takemoto & Uchikawa, 1980.	34
Figura 19. Grava reciclada del Bordo Poniente, donde es evidente la cantidad de basura, tierra y fragmentos de ladrillos.	36
Figura 20. Montones de arena reciclada en la empresa Concretos Reciclados de donde se tomaron las muestras.	37
Figura 21. Muestras de agregados reciclados obtenidas en la Planta Concretos Reciclados. ..	38
Figura 22. Foto de un vertedero clandestino de residuos de la construcción y demolición donde se recolecto parte del concreto demolido que se recicló en el laboratorio.	39
Figura 23. Foto de la trituradora de quijada usada para reciclar el concreto de vertederos. ...	39
Figura 24. Cuarteo de arena reciclada de acuerdo a la NMX-C-170-ONNCCE-1997.	40
Figura 25. Sitio seleccionado para el muestreo del suelo arcilloso ubicado a un costado de la presa de jales sur en la Cd. de Pachuca, vista en planta.	42
Figura 26. Muestreo en la pared de la excavación y detalle de la pumicita en el fondo del canal de muestreo.	44
Figura 27. Sección de la carta geológica minera Pachuca, donde se observa la ubicación del sitio de muestreo ubicado en el aluvión (Qhoal), a la izquierda se nota la toba cubitos (QpthoPu).	44
Figura 28. Corte en una obra de drenaje pluvial donde se aprecia el perfil del suelo feozem háplico y la pumicita subyacente.	45
Figura 29. Operaciones de secado, disgregado y cuarteo de la muestra del suelo feozem háplico.	46
Figura 30. Secuencia de molienda (pulverización) de los agregados reciclados, nótese que primero se usa un metate de hierro gris, seguido de cuarteos y finalmente la molienda en un mortero de ágata hasta que toda la muestra pasa por la malla #200 ASTM (< 75 μ).	47
Figura 31. Preparación de las mezclas suelo – agua – agregado reciclado pulverizado.	48
Figura 32. Ejemplo del almacenamiento de las mezclas de suelo – agua – agregados reciclados pulverizados, en la foto se observan los envases pequeños que contienen las mezclas.	49
Figura 33. Arreglo experimental usado para determinar el pH medido en agua de los agregados reciclados pulverizados.	52

Figura 34. Distribución de tamaño de partícula de gravas recicladas, las líneas punteadas corresponden a los límites granulométricos de la NMX C-111-ONNCCE-2014.....	54
Figura 35. En la parte superior grava reciclada en planta, con fragmentos enteramente formados por mortero (arena y pasta de cemento) y abajo grava reciclada en el laboratorio con agregados constituidos por roca con mortero adherido.....	56
Figura 36. Distribución de tamaño de partícula de arenas recicladas; las líneas punteadas corresponden a los límites granulométricos de la NMX C-111-ONNCCE-2014.....	57
Figura 37. Patrones de difracción de rayos X de las muestras de gravas recicladas.	59
Figura 38. Patrones de difracción de rayos X de las muestras de arenas recicladas.	60
Figura 39. Estructura típica de un feldespato triclinico, donde las esferas son los átomos de K, Na y Ca que en diferentes cantidades y con un tamaño distinto modificarán ligeramente la celda unitaria. Los tetraedros claros son de Si y los oscuros de Al. Imagen tomada de www.geo.arizona.edu	61
Figura 40. Clasificación de rocas ígneas. Imagen tomada y modificada de “A Geology for engineers”, Blyth, H., and De Freitas, H. 1984, Elsevier.	62
Figura 41. Sección tomada de la carta geológico minera Cd. de México E14-2, esc. 1: 250,000 donde se observa que la mayoría de bancos de materiales marcados con una pala, son de composición andesítica.....	63
Figura 42. En la parte superior arena reciclada en el laboratorio y abajo arena reciclada en la planta, en donde son evidentes las diferencias de color y cantidad de finos.	67
Figura 43. Imágenes de MEB mostrando las áreas del análisis EDS en las muestras de agregados reciclados: (a) grava reciclada planta; (b) arena reciclada planta; (c) grava reciclada laboratorio; (d) arena reciclada laboratorio.	68
Figura 44. Espectros EDS adquiridos de las áreas de análisis mostradas arriba: (a) grava reciclada planta; (b) arena reciclada planta; (c) grava reciclada laboratorio; (d) arena reciclada laboratorio.	69
Figura 45. Micrografías MEB de un terrón de suelo feozem háplico (Hh/2).	77
Figura 46. Patrón de difracción del suelo feozem háplico de la Cd. de Pachuca.	78
Figura 47. Estructura de las arcillas identificadas en el suelo arcilloso feozem háplico de la Ciudad de Pachuca.	78
Figura 48. Representación esquemática de la diversidad de los minerales de arcilla.	80
Figura 49. Contenido relativo de minerales de arcillas en función del tipo de roca y la precipitación.....	81

Figura 50. Foto del suelo arcilloso feozem háplico de la Cd. de Pachuca en condiciones de humedad, donde se observa el comportamiento plástico.....	82
Figura 51. Foto del suelo arcilloso feozem háplico de la Cd. de Pachuca en condiciones de humedad donde se observa el comportamiento geotécnico difícil.....	82
Figura 52. Mezcla M50, donde se observan precipitados color blanco que flotan en el líquido sobrenadante, aparentemente se trata de CaCO ₃	87
Figura 53. Vista de las mezclas destapadas donde se observan los precipitados de CaCO ₃ y el líquido sobrenadante. Se presentan por duplicado.....	89
Figura 54. Vista del fondo de los envases donde se observan los productos de reacción de las mezclas suelo-agua-agregado reciclado pulverizado, se presentan por duplicado.	90
Figura 55. Mezcla M50, donde nota la coalescencia de los productos de reacción, izq. detalle.	91
Figura 56. Mezclas secas donde se observa el efecto de los agregados reciclados pulverizados en el suelo arcilloso, a la izquierda el suelo sin tratar y hacia la derecha las mezclas M12, M25 y M50. Obsérvese que el agrietamiento típico de un suelo arcilloso disminuye.	93
Figura 57. Fotos de agrietamiento típico del suelo feozem háplico de Pachuca usado en este trabajo, donde es posible observar la contracción (encogimiento) que sufre el suelo al secarse. Nótese que el patrón de agrietamiento de la probeta testigo (M00) es muy similar a estas imágenes.	93
Figura 58. Difractogramas de las mezclas M25 y M50 comparados con el suelo sin tratar y la grava reciclada planta, donde, Fd= Feldespatos triclinicos, Q= Cuarzo, K= Caolinita, I= Arcilla inerestratificada, Cr = Cristobalita, Ca = Calcita, Hc = Hemicarboaluminato de calcio, Px = Piroxeno, Rh= Rosenhahnita, Tb= Tobermorita y T = tobermorita neoformada (círculo rojo).	95
Figura 59. Estructura de la tobermorita, los poliedros azules son de calcio con una coordinación 7 y los tetraedros de silicio en amarillo decorando a ambos lados la capa de poliedros de calcio. Imagen tomada de Biagioni et al., 2015.....	97
Figura 60. Diferencia de espaciamiento basal producida por la presencia de moléculas de agua (esferas azul claro) intercaladas en el apilamiento de las capas de poliedros de calcio y tetraedros de sílice, nótese que en la estructura de la izquierda (plombierita) también hay iones de calcio (esferas azul marino) acomodados entre las capas. A la derecha una tobermorita hidratada. Imágenes tomadas de Biagioni et al., 2015	98
Figura 61. Micrografía tomada del trabajo de Solanki & Zamanm 2012, donde es posible observar las formas aciculares y fibrosas de los C-S-H (minerales neoformados).	101

Figura 62. Modelo idealizado de las etapas de la hidratación del cemento y de la reacción puzolánica, donde es posible observar que los silicatos de calcio hidratados (tobermorita) crecen en forma de agujas y fibras que se entrelazan entre sí y con otras partículas. Imagen tomada y modificada de Takemoto & Uchikawa, 1980.	104
Figura 63. Mezcla suelo – agua M00 (suelo sin estabilizar). Estas micrografías MEB son muy similares a las presentadas en la caracterización microscópica del suelo usado en este trabajo.	105
Figura 64. Mezcla M12 suelo – agua – 12.5% en peso de agregado reciclado pulverizado. En estas micrografías no se observan cristales aciculares o fibrosos, más bien son parecidas a la muestra testigo (suelo sin estabilizador).....	105
Figura 65. Mezcla M25 suelo – agua – 25% en peso de agregado reciclado pulverizado. En estas imágenes se observa la tobermorita neoformada en forma de fibras, en la micrografía a 1500x (izquierda) se marca con un recuadro la ubicación de las fibras que se presentan a mayores magnificaciones en la foto de la derecha.	106
Figura 66. Mezcla M50 suelo – agua – 50% en peso de agregado reciclado pulverizado. En estas micrografías se observa la tobermorita neoformada con formas aciculares, en la micrografía a 1500x (izquierda) se marca con un recuadro la ubicación de las agujas que se presentan a 9000X en la foto derecha.	109
Figura 67. Tobermorita neoformada en forma de aguja en la mezcla M50 suelo – agua – 50% en peso de agregado reciclado pulverizado (grava planta).	109
Figura 68. Mezcla suelo – agua – agregado reciclado pulverizado M50. Detalle del mineral neoformado en forma de fibra.....	110
Figura 69. Sustitución del suelo original por tepetate en el relleno de una excavación para drenaje al norte de Pachuca.	120
Figura 70. Foto del banco de tepetate “Las Palomas” ubicado en el Municipio de Mineral de la Reforma, en la imagen se puede ver el acantilado generado por la extracción de miles de toneladas de materiales.	121
Figura 71. Ilustración de la problemática generada por una gestión inadecuada de los RCDs y la propuesta de solución.....	122
Figura 72. Vista interior de la capilla de Santa Mónica parcialmente derruida.	125
Figura 73. Patrones de difracción de las muestras de morteros de cal y tezontle tomadas de la capilla de Santa Mónica en Santiago de Anaya, Hgo.....	126

Índice de tablas

Tabla 1. Muestras de concreto reciclado obtenidas en la Ciudad de México.....	40
Tabla 2. Textura del suelo de acuerdo al INEGI.....	42
Tabla 3. Fases minerales presentes en los agregados reciclados.....	60
Tabla 4. Resultados del análisis químico por EDS de las muestras de agregados reciclados expresado en porcentaje en peso.....	69
Tabla 5. Análisis de fluorescencia de rayos X (XRF) de las muestras de agregados reciclados, expresado en porcentaje en peso (principales óxidos).....	71
Tabla 6. Valores de pH medidos en agua de las muestras de agregados reciclados pulverizados.....	73
Tabla 7. Análisis EDS del suelo arcilloso Feozem Háptico	83
Tabla 8. Denominación y proporción de las mezclas de suelo / agregado reciclado pulverizado (grava reciclada planta).....	86
Tabla 9. Observaciones a 10 meses de las mezclas suelo-agua-agregado reciclado pulverizado.	89
Tabla 10. Muestras de mortero que se analizaron y el lugar donde se muestrearon en la Capilla de Santa Mónica.....	125

Resumen

En esta tesis se defiende la opinión de que los agregados reciclados a partir de concreto demolido, pueden usarse como estabilizadores de suelos arcillosos considerando la alcalinidad de la pasta de cemento adherida a los agregados pétreos originales.

Para demostrar esta hipótesis se caracterizaron química y mineralógicamente, 4 muestras de agregados reciclados procedentes de residuos de la construcción y demolición de la Cd. de México, grava y arena de una planta recicladora y agregados reciclados en el laboratorio provenientes de concreto demolido recolectado en vertederos, así como una muestra de suelo feozem háplico de la Ciudad de Pachuca.

Los resultados revelan que solo la grava reciclada en la planta posee los contenidos minerales y la alcalinidad necesaria para ser considerada como un agente estabilizador.

Para probar el desempeño químico de este agregado reciclado se pulverizó a menos 75 μ , y se adicionó en diferentes proporciones en peso a muestras del suelo arcilloso feozem háplico (mezclas suelo - agua - agregado reciclado pulverizado).

Después de 12 meses de curado las mezclas suelo - agua - agregado reciclado pulverizado se estudiaron por DRX y MEB, determinándose la presencia de tobermorita neoformada (silicato de calcio hidratado), producto de la reacción puzolánica entre los componentes alcalinos (portlandita y hemicarboaluminato de calcio) de la grava reciclada en planta y los minerales de arcilla (caolinita, montmorillonita y vermiculita) del suelo feozem háplico.

En el análisis microscópico se observan los minerales neoformados con formas aciculares y fibrosas a partir de la mezcla con una adición de 25% en peso del estabilizador, la precipitación de estos cristales aciculares y fibrosos produce la trabazón (entrelazamiento) necesaria para el desarrollo de resistencia en un suelo tratado, por lo tanto, se confirma la estabilización del suelo.

Abstract

The present work supports the approach that the recycled aggregates from demolished concrete, can be used as stabilizers of clayey soils considering the alkalinity of the cement paste adhered to the original natural aggregates.

To demonstrate this hypothesis, chemical and mineralogical characterization were made on 4 samples of recycled aggregates from construction and demolition waste of Mexico City, gravel and sand from a recycling plant and recycled aggregates in the laboratory from demolished concrete collected in landfills, as well as sample of haplic phaeozem soil from the Pachuca City.

The results reveal that only the gravel recycled in the plant possesses the mineral contents and the necessary alkalinity to be considered as a stabilizing agent.

To test the chemical performance of this recycled aggregate, it was pulverized at minus 75 μ , and added in different proportions by weight to samples of the clayey soil (mixtures of soil - water - pulverized recycled aggregates).

After 12 months of curing the mixtures of soil - water - pulverized recycled aggregates were studied by XRD and SEM, determining the presence of neoformed tobermorite (calcium silicate hydrates), product of the pozzolanic reaction between the alkaline components (portlandite and calcium hemicarboaluminate) of the recycled gravel in the plant and the clay minerals (kaolinite, montmorillonite and vermiculite) of the haplic phaeozem soil.

Also in the microscopic analysis, neoformed minerals with acicular and fibrous forms are observed from the mixture with an addition of 25% by weight of the stabilizer, the precipitation of these acicular and fibrous crystals produces the necessary interlock for the development of resistance in a treated soil, therefore the stabilization of the soil is confirmed.

1. Introducción

En esta tesis de doctorado titulada “Estabilización de suelos arcillosos con residuos de la construcción y demolición”, se vinculan dos temas que cobran cada vez más importancia en la problemática ambiental de la intensa expansión urbana en México y en general en el sector de la construcción, por un lado el aprovechamiento de los residuos de la construcción y demolición RCDs, específicamente el concreto demolido en forma de agregados reciclados y por otro, la estabilización de suelos arcillosos un tema de ingeniería civil o más bien de geotecnia; ambos asuntos son abordados en este trabajo desde el enfoque de la Ciencia de los Materiales.

Este trabajo surge del interés personal del autor en los problemas ambientales provocados por la disposición inadecuada de los residuos de la construcción y demolición, de acuerdo a lo siguiente:

ACTO 1.

En México nadie obliga a gestionar los residuos de la construcción y demolición en instalaciones autorizadas, en consecuencia, las personas se deshacen de estos desechos como si fueran una carga que hay que tirar porque estorba.

ACTO 2.

Los desechos son depositados en la calle, en una barranca, en terrenos baldíos, en fin, en espacios que las personas consideran lugares de nadie, ajenos.

ACTO 3.

Los residuos de la construcción y demolición deterioran el paisaje, contaminan el suelo, el agua...etc.

Desenlace: “todos pagamos la factura ambiental”.

Presentación

El propósito de esta tesis es defender la opinión de que uno de los residuos de la construcción y demolición más común como es el concreto demolido, tiene propiedades químicas y mineralógicas que pueden servir para la estabilización de suelos arcillosos.

La estabilización de suelos es un tema de ingeniería civil, sin embargo, en este ensayo se investigará desde el enfoque de la ciencia de los materiales, de acuerdo al paradigma de la ciencia de los materiales (figura 1) y por medio de tres técnicas básicas de caracterización (DRX, XRF y MEB-EDS).

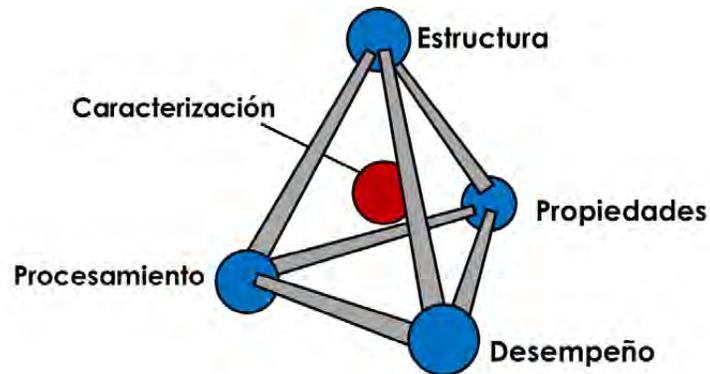


Figura 1.- Paradigma de la ciencia de materiales

El material

Residuos de la construcción y demolición (RCDs), específicamente el concreto demolido en forma de agregados reciclados. Cuando el concreto demolido se somete a un proceso de trituración y cribado para separar grava y arena, a los productos obtenidos se les denomina como agregados reciclados.

El procesamiento

La molienda (pulverización) será el procesamiento al cual se someterán los agregados reciclados del concreto demolido, para usarlos como estabilizadores de suelos arcillosos (fig.2 y fig. 3). La molienda será la manera de activarlos.

La estructura

La estructura se examinará en dos escalas, por un lado, a nivel estructura cristalina (nivel manométrico) por la técnica de Difracción de rayos X (DRX) y por otro se estudiará la estructura de los minerales a escala micrométrica por medio de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). La microestructura es el componente de este tetraedro que mejor distingue la ciencia de los materiales de la ingeniería y otras disciplinas.

Las propiedades

La propiedad química a evaluar será la alcalinidad, esta propiedad depende de la composición química. Se espera que el procesamiento tenga un impacto positivo en esta propiedad. Las propiedades dependen crucialmente de la estructura a diferentes niveles.

El desempeño

El desempeño de los agregados reciclados a partir de concreto demolido (RCDs), se probará mediante la adición de estos materiales en forma de polvo a un suelo arcilloso para conocer, si mejoran sus propiedades mecánicas y físicas. La estabilización de un suelo arcilloso (expansivo) se refiere a la permanencia de sus características físicas y mecánicas (volumen y capacidad de carga).

Las técnicas de caracterización

La caracterización se realizará por medio 3 técnicas básicas de las ciencias de los materiales, y una de la química básica, a saber:

- Difracción de rayos X, (DRX)
- Microscopía electrónica de barrido - Microanálisis de rayos X por dispersión de energías, (MEB – EDS).
- Fluorescencia de rayos X, (XRF) por sus siglas en inglés (X - Ray Fluorescence)
- Medición de pH

Nota. Se usa el acrónimo en inglés EDS, Energy-Dispersive Spectroscopy aunque también es válido EDX, Energy Dispersive X-ray o EDXS, energy dispersive X-ray spectroscopy, en cualquiera de los casos se refiere a la misma técnica de análisis.

El lenguaje

El lenguaje usado en esta tesis serán los conceptos básicos de la cristalografía. El conocimiento de la cristalografía es esencial para entender y explotar las estructuras. La cristalografía es la habilidad principal para comunicación en ciencia e ingeniería de materiales.

Una vez definido el tema, el enfoque y las técnicas, es prudente mencionar que esta tesis se inscribe dentro de los proyectos de investigación del recién formado grupo de Investigación en Materiales Avanzados del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, (Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería) de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Forman parte del grupo de investigación y también del comité tutorial de este trabajo los siguientes profesores-investigadores, Dr. Juan Hernández Ávila, Dr. Eleazar

Salinas Rodríguez, Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz y la Dra. Ma. Isabel Reyes Valderrama, quienes han estudiado entre otros temas, la mineralogía, la cinética y el aprovechamiento de residuos mineros (jales) de la Ciudad de Pachuca, razón por la cual este tema “Estabilización de suelos arcillosos con residuos de la construcción y demolición”, resulta pertinente dentro del área académica y dentro del grupo de investigación.



Figura 2. Concreto demolido (izquierda), agregados reciclados (derecha)



Figura 3. Agregados reciclados pulverizados

Advertencia

El tema de esta tesis no está alineado con el *mainstream* internacional de la ciencia de los materiales (nanoestructuras, electrocatalizadores, biomateriales, etc.), más bien trabaja con un material (concreto) que ha alcanzado un tipo de madurez técnica, pero que, por ser un material con aplicación estructural, en términos de tonelaje domina abrumadoramente el consumo de materiales ingenieriles [Ashby & Johnson, 2015], y por lo tanto llega a ser un problema ambiental al final de su vida útil.

Sumado a lo anterior está la desviación empirista o pragmática del autor, por trabajar en temas o problemáticas que aquejan a la nación. Pero, aunque se trata de un tema regional, esta investigación no deja de tener un mérito científico ya que contribuye al tema del aprovechamiento de los RCDs desde el enfoque de la ciencia de los materiales, buscando la aproximación más que la solución y haciendo énfasis en lo cualitativo más que lo cuantitativo.

Asimismo, se advierte al lector que partes de esta tesis, en particular la argumentación en el capítulo de resultados y discusión, está escrita como dice Cardona Riva [2008], en lenguaje natural, en lenguaje vivo, lleno de tradición, que incorpora una historia en constante evolución. El lenguaje natural a veces está repleto de ambigüedad, es esquivo y polisémico.

Antecedentes

Cascajo o escombros, así son conocidos comúnmente los denominados residuos de la construcción y demolición (RCDs), estos residuos consisten generalmente de pedacería o restos de materiales producto de la construcción, demolición, desmantelamiento y/o excavación, tales como materiales pétreos, tierra, concreto, morteros, varillas, ladrillos, blocks, aplanados, cerámicos, vidrio, asfalto, material de excavación, paneles de yeso, madera, metales y diferentes tipos de plásticos [NADF-007-RNAT-2013].

Estos materiales en su mayoría son depositados en vertederos clandestinos, barrancas, zonas de conservación ecológica, cauces de ríos, caminos vecinales, provocando efectos negativos para el medio ambiente, entre los cuales se destacan el deterioro del paisaje, contaminación de suelo y agua, etc. (figura 4).

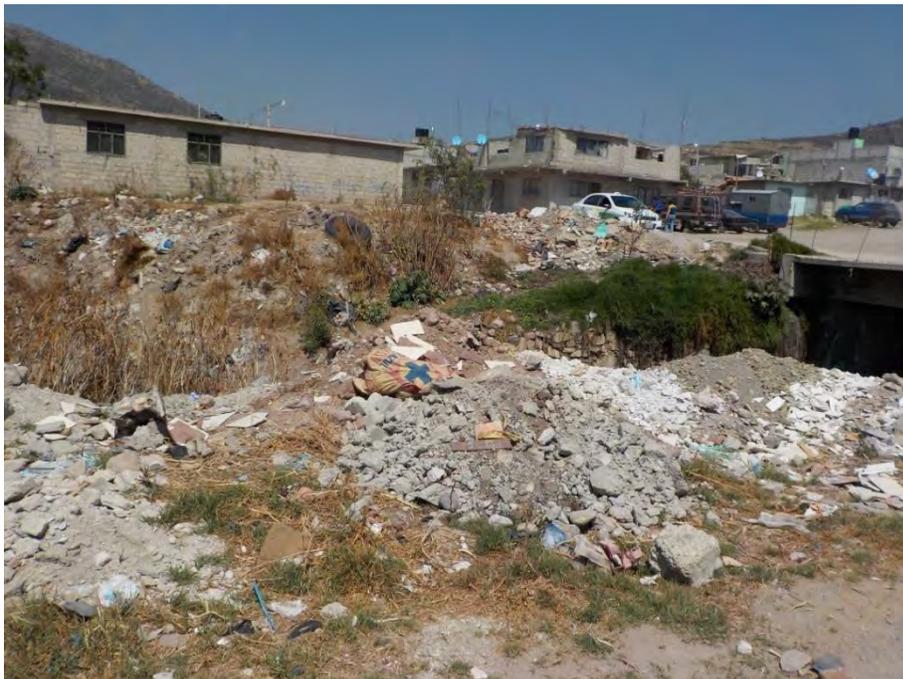


Figura 4. Residuos de la construcción y demolición depositados al borde de una barranca de la Colonia Aves del Paraíso en la Ciudad de Pachuca.

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 la construcción y demolición [Varela, 2006; Rangel et al., 2009]. En la siguiente figura (núm. 5) se sintetiza la composición de los RCDs de la Ciudad de Pachuca con datos de Rangel et al. [2009].

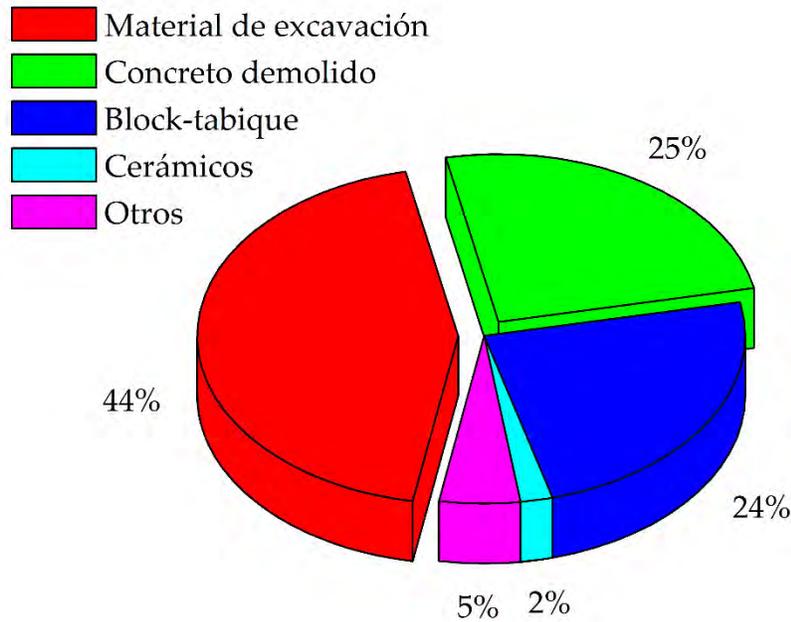


Figura 5. Composición de los residuos de la construcción y demolición en la Cd. de Pachuca.

En la figura 6 se muestra la foto de un microvertedero clandestino ubicado al sur de la ciudad de Pachuca, donde es posible observar la composición de los residuos de la construcción y demolición, en este caso se aprecia que el concreto demolido predomina sobre otros residuos. Esta acumulación de residuos en solares descampados y márgenes de calles y caminos provoca como ya se dijo la degradación paisajística, en este caso de un entorno eminentemente urbano. La generación de estos residuos en la Cd. de México alcanza valores de 7000 ton/día [NADF-007-RNAT-2013].



Figura 6. Tiradero clandestino de residuos de la construcción y demolición ubicado al norte de la Cd. de Pachuca, véase que predomina el concreto demolido.

Actualmente la investigación y aplicaciones del concreto demolido se enfocan a recuperar los agregados pétreos originales (grava y arena) que lo constituyen mediante un proceso de reciclado (selección, triturado, cribado y almacenamiento), para que puedan ser reincorporados en forma de agregados reciclados al ciclo de la construcción, ya sea aplicaciones geotécnicas, tales como sub-bases, bases, terraplenes, rellenos etc. o en la elaboración de concreto [Bustillo, 2010].

En ese sentido las propiedades que se evalúan en estos materiales (agregados reciclados del concreto demolido) son las físicas y mecánicas, sin tomar en cuenta que las propiedades químicas de estos materiales, pueden ser de utilidad, considerando que los agregados reciclados pueden definirse como una mezcla íntima entre los agregados naturales originales (grava y arena) y la pasta de cemento endurecida adherida a ellos [Zhao et al., 2015].

Dicho de otro modo, los agregados reciclados son los agregados originales (grava y arena) que constituían el concreto original, pero con cierta cantidad de pasta de cemento endurecido que los unía, la cual se queda pegada a ellos aun después del proceso de reciclado (trituración y cribado) ver figura 7.



Figura 7. Izquierda, fragmento de concreto demolido. Derecha, agregados reciclados obtenidos mediante el reciclado de concreto demolido

Tomando en cuenta lo anterior, en este ensayo se pretende sustentar la opinión de que los agregados reciclados a partir de concreto demolido, poseen cierta alcalinidad debido a que la pasta de cemento adherida a los agregados originales contiene compuestos base calcio como la portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

La portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$, también conocida comercialmente como cal, cal hidratada o calhidra, es usada en la construcción para elaborar morteros, pero también se utiliza para estabilizar suelos arcillosos, debido a que en solución genera el ambiente alcalino (~ 12.5) necesario para que ocurra la reacción puzolánica.

La reacción puzolánica se refiere al desarrollo de resistencia en los sistemas suelo - cal - agua, como resultado de las reacciones químicas que tienen lugar entre la cal y los minerales de arcilla del suelo, responsables del comportamiento expansivo.

La reacción puzolánica ocurre cuando la cal (hidróxido de calcio) es mezclada con los suelos arcillosos (expansivos) con la finalidad de evitar su variación volumétrica provocada por la humedad. Este fenómeno (reacción puzolánica) será a partir de ahora el objeto de estudio de esta tesis.

Hablemos ahora de los suelos arcillosos

Cuando un suelo arcilloso sufre un cambio de humedad, se produce una variación volumétrica que provoca fuertes presiones de expansión y la disminución de la capacidad de carga del suelo [Hernández Villares, 2009], estos procesos dañan la infraestructura, principalmente los caminos sin revestir y calles sin pavimentar, en la siguiente figura (núm. 8) se muestra un camino de tierra que durante la época de lluvias se vuelve intransitable por la presencia de suelos arcillosos.



Figura 8. Camino rural sobre suelo arcilloso, intransitable en época de lluvias.

Para abatir estos problemas existe la estabilización de suelos con cal o mejor dicho con estabilizadores base calcio, que se define como el mejoramiento de las propiedades físicas (comportamiento mecánico) de un suelo a través de procedimientos químicos (tratamiento del suelo con cal hidratada, cal viva, etc.) ver figura 9.



Figura 9. Estabilización de un suelo arcilloso con cal hidratada. Imagen tomada de <http://prefanicsa.com.ni/producto/calidra/>

Nota. El termino cal es usado en esta tesis para referirse a la cal hidratada, hidróxido de calcio, portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, la cal viva se refiere al óxido de calcio CaO .

Justificación

La hipótesis de este trabajo supone, que los agregados reciclados contienen cierta cantidad de portlandita Ca(OH)_2 en la pasta de cemento adherida a ellos, la cual puede servir para estabilizar un suelo arcilloso, por lo tanto, de conseguirse la estabilización de suelos arcillosos con estos residuos de la construcción y demolición, se lograría bajar los costos del estabilizador y por ende sería posible mejorar mayor cantidad de caminos sin revestir, pero quizás lo más importante es que se aprovecharían miles de toneladas de RCDs que actualmente se disponen inadecuadamente en barrancas, lotes baldíos, etc.

Cabe hacer mención que, a diferencia de la cal, los agregados reciclados pulverizados podrían considerarse como un estabilizador amable con el medio ambiente, ya que su procesamiento no implica la calcinación necesaria en el proceso de fabricación de la cal.

Pero ¿quién se beneficia con esta tesis?

Obviamente el principal beneficio es ambiental, ya que el desafío es mejorar la gestión de residuos de conformidad con lo acordado en la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible (Johannesburgo, septiembre de 2002), en este caso mejorar la gestión de residuos de la construcción y demolición, “prevenir y reducir al mínimo los desechos y aumentar al máximo la reutilización, el reciclado y el empleo de materiales alternativos inocuos para el medio ambiente...” (Bustillo, 2010).

Agregando a lo anterior, se inserta parte del párrafo quinto del artículo 4°, de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, que establece:

Artículo 4°. - “[...] Toda persona tiene derecho a un ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho.

Otro beneficio posible lo podrían tener los actores pertinentes del sector de la construcción, constructores y en particular especialistas en geotecnia, para que recomienden soluciones alternativas al problema de los suelos expansivos con una visión diferente.

Sin embargo, si el beneficio o ventaja alcanzable derivada del desarrollo de la presente tesis, lo tiene un ciudadano marginal carente de recursos y capacidades de todo tipo, que vive en la precariedad en una periferia urbana con calles sin pavimentar, entonces esta tesis habrá alcanzado su objetivo.

Cito las palabras del Dr. Heberto Balmori Ramírez, Investigador de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas del Instituto Politécnico Nacional, en el 5° Aniversario del Consorcio Nacional de Recursos de Información Científica y Tecnológica CONRICyT, llevado a cabo en San Luis Potosí en 2016.

“Sin retórica ni rollo, la finalidad de los programas de posgrado es formar personal para salvar el país”

Pregunta de investigación, hipótesis y objetivo

Pregunta de investigación e hipótesis:

¿Tienen los agregados reciclados de concreto demolido las propiedades químicas (alcalinidad) necesarias para estabilizar suelos arcillosos?

“Hipotéticamente sí”, porque la naturaleza del concreto es alcalina, ya que la pasta de cemento que aglomera los agregados (grava y arena) está compuesta principalmente por silicatos de calcio hidratados y portlandita Ca(OH)_2 .

En la siguiente figura (núm. 10) se presenta la imagen de electrones secundarios de la superficie de fractura de una pasta de cemento endurecido, donde se puede observar que la portlandita Ca(OH)_2 precipita en forma de placas hexagonales rellenando los espacios (poros) que genera el crecimiento de los silicatos de calcio hidratados en forma de fibras y agujas.

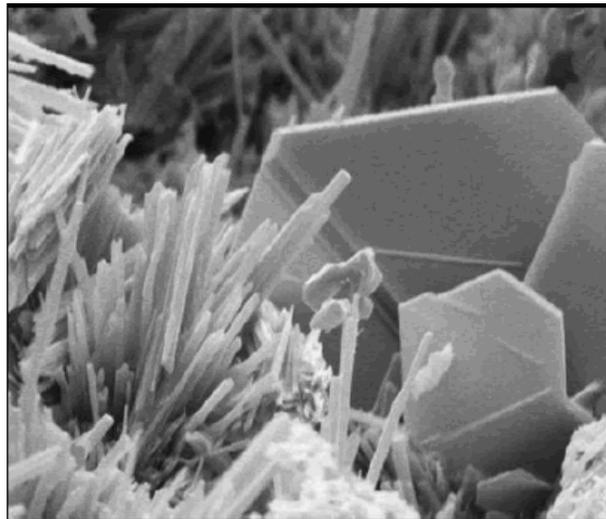


Figura 10. Imagen de electrones secundarios de una pasta de cemento endurecido, donde se puede observar que los silicatos de calcio hidratados crecen en forma de fibras y la portlandita Ca(OH)_2 en forma de placas hexagonales. Imagen tomada de www.fhwa.dot.gov

La portlandita es responsable del ambiente alcalino del concreto, y los silicatos de calcio hidratados son responsables del endurecimiento del concreto ya que cuando crecen sus fibras y agujas favorecen la trabazón (entrelazamiento) que forma puentes entre las partículas adyacentes (granos de cemento o agregados) propiciando la coalescencia y el endurecimiento del concreto [Tzschichholz et al., 1996]. Los romanos llamaron *concretus* a este material, que significa “crecer juntos”.

Objetivo

Si la pasta de cemento endurecido adherida a los agregados reciclados, contiene hidróxido de calcio Ca(OH)_2 , entonces los agregados reciclados de concreto demolido pueden tener aplicaciones químicas (no estructurales), diferentes a las que hasta ahora se les ha dado.

Por lo tanto, el principal objetivo de esta tesis es el siguiente:

Caracterizar química y mineralógicamente agregados reciclados a partir de concreto demolido para conocer si tienen las propiedades químicas necesarias para estabilizar suelos arcillosos, dicho en otras palabras, determinar si los agregados reciclados contienen la cantidad suficiente de hidróxido de calcio para producir la reacción puzolánica y contribuir al desarrollo de resistencia en un suelo expansivo.

Objetivos específicos

- Muestreo y caracterización granulométrica de agregados reciclados
- Caracterización mineralógica de agregados reciclados por medio de DRX
- Caracterización química de agregados reciclados por medio de XRF y MEB-EDS

- Muestreo y caracterización mineralógica de un suelo arcilloso
- Medición de la alcalinidad de los agregados reciclados pulverizados (pH)
- Evaluación del desempeño de los agregados reciclados pulverizados como estabilizadores de suelos arcillosos mediante mezclas suelo-agua-agregados reciclados pulverizados.

Enfoque

Es prudente mencionar a los lectores, que no deben esperar un planteamiento disciplinar específico, ya sea de la ingeniería civil o de las ciencias ambientales, porque el enfoque particular de esta tesis será el de las ciencias de los materiales, por lo tanto, se utilizará como elemento articulador de este trabajo el tetraedro de la ciencia de los materiales que a continuación se muestra.

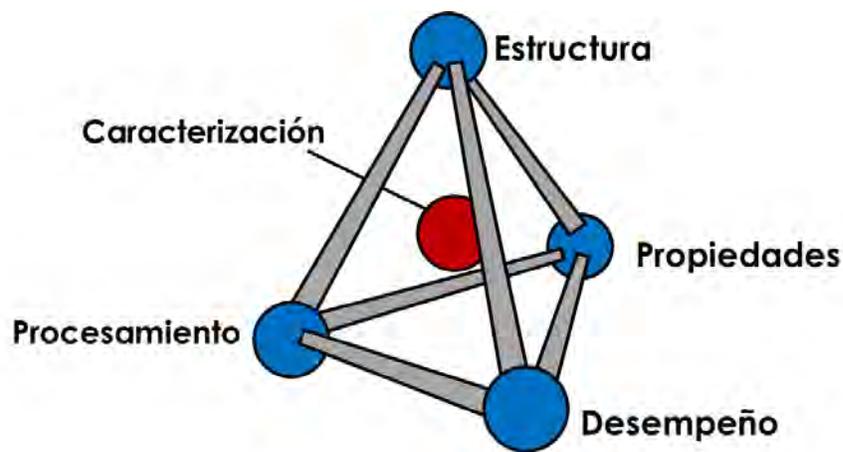


Figura 11. Paradigma de la ciencia de los materiales.

Como punto de partida, ¿Qué es la ciencia de los materiales?, La ciencia de materiales estudia la relación entre la estructura de un material, sus propiedades, su desempeño y la forma en que se procesó, esto a menudo se representa como el tetraedro de la ciencia de los materiales. La caracterización se puede ver flotando en medio, porque se aplica en todos los aspectos [nontrivialproblems].

Por otro lado, en ciencia de los materiales la estructura va más allá de la química, no es solo como se ve un átomo o molécula, sino como los átomos y moléculas se acomodan juntos en un material y como tienen un gran efecto en su comportamiento [nontrivialproblems].

El procesamiento es lo que hacemos al material antes de usarlo, el procesamiento también puede determinar la estructura. Por otra parte, las propiedades y el desempeño están estrechamente relacionados, y la distinción puede ser sutil, una idea es que las propiedades describen el comportamiento esencial de un material, mientras que el desempeño refleja cómo se traducen esas propiedades en una aplicación [nontrivialproblems].

El tetraedro de la Ciencia de los Materiales usado en este trabajo, es el propuesto por M. Flemmings [1990], con la única diferencia que se agrega al centro del tetraedro la caracterización porque, como ya se mencionó se aplica en todos los aspectos [nontrivialproblems].

En este estudio, la preocupación principal será la microestructura y la estructura atómica del material, por lo tanto, no nos aventuraremos en la mecánica del medio continuo que es un asunto de ingenieros mecánicos y civiles.

De igual manera, es necesario advertir que en esta tesis de ciencia de los materiales se utilizará predominantemente el pensamiento visual y el razonamiento inductivo [Ashby & Johnson, 2015]. Mike Ashby menciona que particularmente la ciencia de los materiales hace uso de las imágenes para comunicarse y como una manera de pensar, diagramas de flujo que ilustran las relaciones y procedimientos, gráficas que muestran magnitudes y tendencias numéricas, esquemas que muestran las estructuras moleculares o los mecanismos, micrografías que revelan las similitudes entre diferentes materiales, cartas de propiedades de materiales que relacionan tipos de materiales, etc., en resumen una imagen captura una vasta cantidad de información revelando patrones que las palabras y ecuaciones no lo hacen.

El poder de las imágenes visuales se basa en la facilidad con la que estas pueden ser manipuladas por la mente y la capacidad para detonar el pensamiento creativo, es

decir, el dibujar la información de materiales puede sugerir nuevos materiales o combinaciones, sin la imagen visual no es fácil sugerir estas ideas [Ashby & Johnson, 2015].

Por lo que se refiere al razonamiento inductivo, este se mueve de lo desconocido a lo conocido, se basa, en síntesis, dibujos, experiencias previas, usa la percepción y visualización, forma ideas e imágenes mediante disección, recombinación, permutación, en contraste el razonamiento deductivo va de lo conocido a lo desconocido, involucra análisis matemático, y en esencia es lineal y secuencial [Ashby & Johnson, 2015].

El razonamiento inductivo hace gran uso de la imaginación, es menos estructurado, pero permite saltos conceptuales a través de la libre asociación, esta manera de pensar se preferirá en esta investigación [Ashby & Johnson, 2015].

Por último, para complementar el enfoque que se usará en este trabajo, además del razonamiento inductivo, y el pensamiento visual, se utilizará como lenguaje de comunicación, los conceptos básicos de la cristalografía, entendiendo que esta describe la manera en la cual los átomos se acomodan en un cristal y como el ordenamiento de largo alcance se logra. Las propiedades físicas y químicas dependen de la estructura cristalina y el conocimiento cristalográfico es esencial para explotar estas estructuras.

De acuerdo con el enfoque de la Ciencia de los Materiales, el objetivo de esta tesis se reinterpreta de acuerdo con el tetraedro de la ciencia de los materiales de la siguiente manera (figura 12).

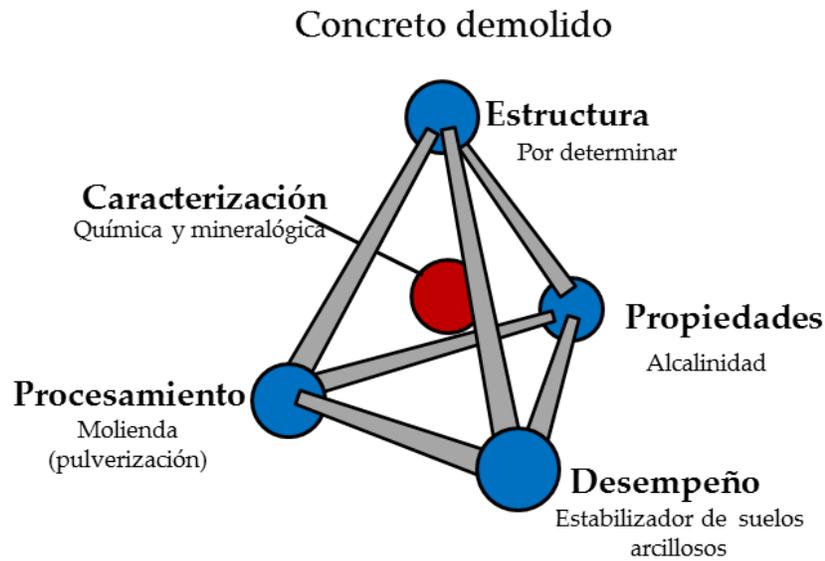


Figura 12. Objetivo de esta investigación visto desde el enfoque de la Ciencia de los Materiales, en donde la determinación de la estructura es la tarea principal.

Es importante mencionar que la caracterización mineralógica de los agregados reciclados provenientes de concreto reciclado implica determinar la estructura cristalina de todos sus componentes, sin perder de vista que el concreto es un material compuesto donde los agregados (grava y arena) son el refuerzo o esqueleto y la pasta de cemento endurecido es la matriz.

Del conocimiento de la estructura cristalina, se tendrá un mejor entendimiento de las propiedades químicas y por ende del posible desempeño de este material como un estabilizador de suelos arcillosos.

Como ya se dijo el procesamiento que se aplicará al concreto demolido (agregados reciclados) para usarlo como estabilizador será la pulverización, es decir será activado mediante molienda para poder aprovechar su potencial alcalino (portlandita remanente).

2. Marco Teórico

En este capítulo se definen los conceptos básicos mínimos que se desarrollarán, así como las ideas centrales de esta tesis.

2.1 Estabilización de suelos arcillosos

La estabilización de suelos se define como el mejoramiento de las propiedades físicas (comportamiento mecánico) de un suelo a través de procedimientos mecánicos o químicos.

Esta definición es disciplinar y corresponde a la ingeniería civil, ahora bien, cuando se habla de estabilización de suelos se debe aclarar que también se hace referencia a la permanencia de las características físicas y mecánicas (volumen y capacidad de carga) del suelo en el tiempo, dicho de otro modo, con el tratamiento de estabilización de un suelo se pretende lograr una condición estable o constante de sus características.

Los suelos arcillosos están asociados con cambios volumétricos (hinchamiento) cuando experimentan variaciones en el contenido de agua debidos a la fluctuación de la humedad estacional, este comportamiento se debe a la presencia de minerales de arcilla, principalmente montmorillonita, illita y caolinita en la fracción fina de los suelos ($<2\mu$) [Wild et al., 1986; Barrera y Garnica, 2002].

Estos minerales consisten en capas de aluminosilicatos cargadas negativamente que se mantienen unidas mediante cationes y que tienen habilidad para adsorber moléculas de agua entre sus capas, resultando en fuerzas de repulsión y el incremento del volumen de los cristales, lo que se traduce en la expansión de la arcilla [Hensen & Smit, 2002] y en consecuencia del suelo.

No confundir el término fracción arcilla de un suelo, que se refiere al material de grano fino menor a 2 micras, con el término mineral de arcilla, ya que el primero se refiere al material de grano fino presente en un suelo que además de contener minerales de arcilla, también puede incluir otras especies minerales tales como silicatos, óxidos y carbonatos [Velde & Meunier, 2008].

La definición de arcilla que se usará en este trabajo no depende del tamaño, más bien se refiere a las características de los cristales de estas especies minerales (filosilicatos), cuyo aspecto es en forma de hojas (láminas) [Velde & Meunier, 2008].

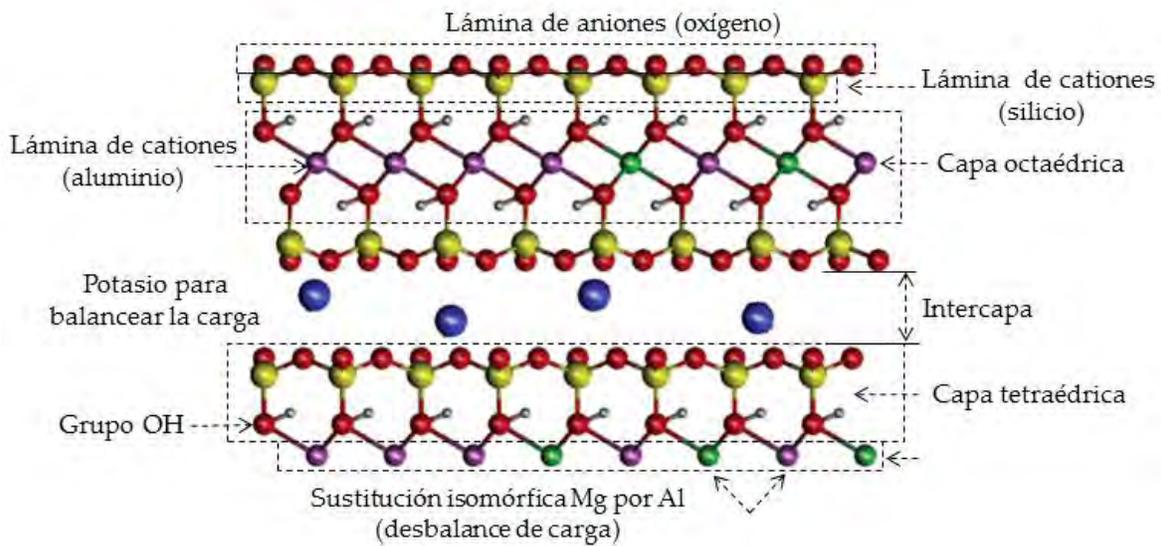


Figura 13. Descripción de un mineral de arcilla (montmorillonita), en donde se ilustran sus principales características. Imagen modificada de [Hensen & Smit, 2002].

Las propiedades de las arcillas son consecuencia de sus características estructurales, por lo tanto, es imprescindible conocer la estructura de los filosilicatos para comprender sus propiedades. Filosilicatos del griego *phyllon* que significa hoja, lamina.

Los minerales de arcilla poseen las siguientes características (figura 13):

- a) Tienen morfología laminar, planos atómicos superpuestos paralelos a (001).
- b) Estas láminas están organizadas en capas, como si fueran sándwich, donde los cationes (Si^{4+} o Al^{3+}) están en medio, unidos a dos planos de aniones (O^{2-}).
- c) Las capas de silicio son tetraédricas y las capas de aluminio octaédricas.
- d) Existen diferentes combinaciones de estas capas, dando lugar a diferentes tipos de arcillas.
- e) Contienen grupos OH^- que contribuyen a la estabilidad electrónica y que juegan un papel importante como coordinadores dentro de la estructura.
- f) La característica más importante es el espacio intercapa.
- g) La sustitución isomórfica da lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio intercapa.

Esta lista es un resumen de la información contenida en “the Origin of Clay Mineralas in Soils and Weathered Rocks” [Velde & Meunier, 2008].

Una vez comprendida la estructura y las principales características de las arcillas, ahora si es posible entender el mecanismo de hinchamiento (expansión/contracción) de estos minerales. Como ya se mencionó tienen la habilidad para adsorber moléculas de agua entre sus capas, resultando en fuerzas de repulsión y el incremento del volumen de los cristales, lo que se traduce en la expansión de la arcilla y en consecuencia del suelo [Hensen & Smit, 2002].

Lo anterior sucede en condiciones de humedad, cuando el espacio intercapa se hidrata, dicho de otra manera, cuando las moléculas de agua se empaquetan en la intercapa provocando la separación de las capas y por lo tanto el hinchamiento [Hensen & Smit, 2002].

Este mecanismo de hinchamiento (fig. 14) provoca que un suelo arcilloso en condiciones de humedad, se expanda, baje su resistencia, se vuelva plástico, en fin, que tenga un comportamiento geotécnico difícil, de ahí la importancia de la estabilización, ya que sin tratamiento un suelo arcilloso tendrá ciclos de expansión - contracción de acuerdo al clima provocando daño a las estructuras [Ingles & Metcalf, 1972].

Los problemas con las arcillas incluyen, expansión, baja resistencia (suelos blandos) y alta compresibilidad, los cuales pueden causar daños severos en la infraestructura (figura 15), que se traducen en altos costos de reparación de acuerdo a la severidad del daño, para tales problemas de suelos, las técnicas de estabilización química han demostrado ser efectivas [Barrera y Garnica, 2002].

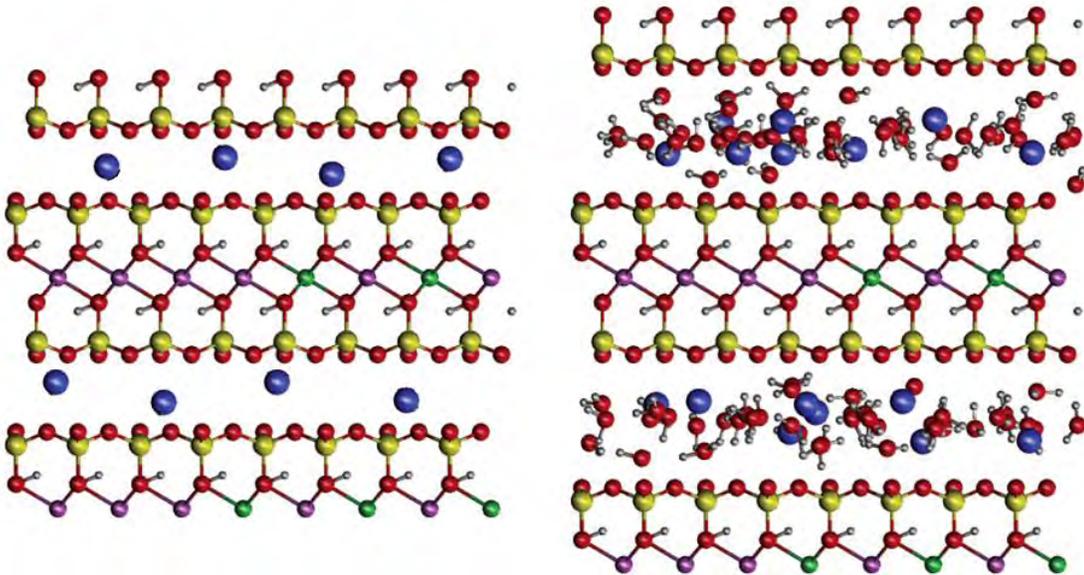


Figura 14. Mecanismo de hinchamiento de los minerales de arcilla, nótese que cuando las moléculas de agua entran en la intercapa se produce la expansión de la estructura. Imagen modificada de Hensen & Smit, 2002.



Figura 15. Grietas y deformación de la carpeta asfáltica provocadas por la presencia de arcilla en la sub base.

Para dar más claridad al comportamiento geotécnico difícil de un suelo arcilloso, en la figura 16 se muestra un suelo arcilloso después del tránsito de maquinaria pesada, del mismo modo en la figura 17 se ve el típico agrietamiento de un suelo arcilloso cuando está perdiendo humedad. Las grietas se forman cuando las moléculas de agua abandonan la intercapa de la estructura de los minerales de arcilla, provocando la contracción del suelo, en esta foto es posible notar que cuando el suelo se encuentra húmedo su estado es plástico y de baja resistencia, evidencia de lo anterior son las huellas de un perro marcadas.



Figura 16. Suelo arcilloso de comportamiento geotécnico difícil.



Figura 17. Agrietamiento típico de un suelo arcillosos debido a la pérdida de humedad, las huellas de un perro denotan la baja resistencia y el estado plástico del suelo

La estabilización de suelos arcillosos mediante la incorporación de estabilizadores base calcio como la cal hidratada, es una técnica ampliamente usada en la industria de la construcción. El tratamiento de un suelo arcilloso con cal hidratada implica reacciones químicas entre los minerales de arcilla y la cal $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en un ambiente acuoso que se caracteriza por un pH alto (~12.5) y altas concentraciones de calcio [Ingles & Metcalf, 1972].

Los mecanismos asociados con la adición de cal a materiales arcillosos son los siguientes [UN, 1992]:

- a) Absorción de agua: La cal experimenta la hidratación ya sea con el agua agregada o con la humedad del suelo.
- b) Intercambio iónico: Los iones de calcio de la cal se remplazan por cationes intercambiables de los componentes del suelo, incluido el potasio y el magnesio. La cantidad de este intercambio está en función de la capacidad de intercambio catiónico del suelo.
- c) Floculación y agregación: Las partículas de suelo floculan y se agregan debido al intercambio catiónico y al incremento de la actividad electrolítica en la solución intersticial. El efecto es que la distribución del tamaño de grano se modifica.
- d) Carbonatación: La cal agregada reacciona con el dióxido de carbono atmosférico para formar cementos carbonatados débiles.
- e) Reacción puzolánica: Esta es la reacción dominante en la estabilización de un suelo con cal. El desarrollo de resistencia en el suelo predominantemente está en función de la disolución de los minerales de arcilla en el ambiente alcalino creado por la cal y la recombinación del silicio y el aluminio derivados de las arcillas con el calcio proveniente de la cal, para formar minerales hidratados similares a los que se forman en la hidratación del cemento.

Una vez que ocurren estas reacciones (reacción puzolánica) continúan por largos periodos de tiempo para formar diferentes tipos de productos de cementación tales como silicato de calcio hidratado y aluminato de calcio hidratado los cuales son relativamente insensibles a la humedad y con propiedades ingenieriles diferentes a las arcillas [Ingles & Metcalf, 1972].

La reacción puzolánica o más bien dicho, la interacción entre los minerales de arcilla y la cal hidratada es el principal fenómeno que asegura una buena estabilización suelo - cal, contra los efectos dañinos de la humedad. En resumen, cuando ocurre la reacción puzolánica y se forman los silicatos de calcio hidratados se alcanza la permanencia de las características del suelo tratado, dicho de otro modo, un suelo estabilizado ya no aumenta de volumen con la humedad.

La American Society for Testing and Materials (ASTM), define a las puzolanas naturales como materiales silíceos o silíceo aluminosos, los cuales por si solos poseen poco o nulo valor cementante, pero finamente dividido y en presencia de humedad, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio $[Ca(OH)_2]$ a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes. En este punto es importante mencionar que no solo las arcillas son materiales puzolánicos, también los son el cuarzo, feldespatos, y otros aluminosilicatos cristalinos y amorfos.

2.2 La reacción puzolánica

La reacción puzolánica ha sido algo común en Mesoamérica desde la antigüedad, como resultado de una tarea diaria de los habitantes prehispánicos que prevalece hasta la fecha, esta actividad es la elaboración de tortillas.

Los arqueólogos no saben con certeza cuando los habitantes de Mesoamérica, comenzaron a comer tortillas de maíz, pero es un hecho que, para preparar masa, los

granos de maíz tienen que hervir en agua mezclada con cal viva, ya que esta es la única manera de quitar la cutícula (pelar) a los granos de maíz [Rivera & Krayner, 1996].

Una vez lavados los granos de maíz sin cutícula son llamados nixtamal, y después cuando son molidos se convierten en masa de maíz, este procedimiento no ha cambiado en siglos [Rivera & Krayner, 1996].

El agua usada para este proceso (lavado), se llama nejayote y contiene hidróxido de calcio y las cutículas del maíz, este líquido residual era desechado directamente en el suelo en lugares cercanos a las viviendas, de ahí que los antiguos constructores observaron el efecto endurecedor del nejayote en el suelo, (en grandes porciones de Mesoamérica los suelos son puzolánicos) y debieron inspirarse para reproducir la acción puzolánica en sus materiales de construcción [Rivera & Krayner, 1996].

Los morteros usados en el Tajín son puzolánicos, donde los constructores los usaron con fines ornamentales y estructurales, estos morteros condujeron eventualmente al desarrollo de concreto para la construcción [Rivera & Krayner, 1996].

Otro dato histórico importante es el desempeño excepcional de los morteros hidráulicos (hechos con cal y material puzolánico), usados por los romanos para construir acueductos y muros de retención frente al mar, particularmente el buen estado de preservación del viejo muro del puerto de Pozzuoli al sur de Italia, ejemplifica la longevidad y durabilidad de los morteros cal - puzolana [Müller, 2005], de hecho, la reacción puzolánica debe su nombre al descubrimiento de este fenómeno en el Puerto de Pozzuoli.

Como ya se dijo, la actividad puzolánica o reacción puzolánica se refiere al desarrollo de resistencia en los sistemas suelo - cal, como resultado de las reacciones químicas que tienen lugar entre la cal y los componentes de arcilla del suelo. Estas reacciones son acompañadas por una parcial carbonatación de la cal para formar

carbonato de calcio CaCO_3 , mineral que de acuerdo a la evidencia tiene una contribución despreciable al desarrollo de resistencia [Wild et al., 1986].

2.3 Revisión bibliográfica

En la literatura se ha reportado que en los sistemas arcilla - cal - agua se da la formación de silicato de calcio hidratado y aluminato de calcio hidratado los cuales son muy similares a los productos de la hidratación del cemento de manera tal, que cuando estas reacciones ocurren en un suelo arcilloso disminuyen dramáticamente los efectos adversos de las arcillas (expansión y plasticidad) en los suelos tratados [Diamond et al., 1963].

Aparentemente el mecanismo de reacción de la actividad puzolánica, se da por ataque químico, en gran medida por la disolución en los límites de las partículas de minerales de arcilla y otros silicatos, en un ambiente fuertemente básico característico de la solución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (pH 12.5), seguida por la precipitación de las fases silicato de calcio hidratado y aluminato de calcio hidratado [Diamond et al., 1963].

Antes de 1960 poco se sabía acerca del mecanismo de las reacciones que suceden en la estabilización de suelos con cal y casi nada acerca de la naturaleza de los productos de reacción, Eades y Grim [1960], sugirieron que las reacciones ocurren en tres pasos: Intercambio de iones de calcio por los iones contenidos en la arcilla, formación de nuevos minerales y finalmente la carbonatación del exceso de cal.

Los nuevos minerales formados en sus experimentos fueron tentativamente identificados como silicatos de calcio parecidos a la tobermorita, sin embargo, existía poca información disponible para determinar esta fase formada [Diamond, 1963].

Hilt y Davison (1961), reportaron el aislamiento de un producto de la reacción de la cal y montmorillonita, que comparativamente con el tamaño de la celda unitaria de

la arcilla era un gran cristal. Sus estudios de rayos x sugirieron que este producto era aluminato tetracálcico hidratado.

En 1963 Glenn y Handy experimentaron con hidróxido de calcio y minerales de arcilla, los productos reportados incluyen 10 Å tobermorita (con un espaciamento interplanar de 10 angstroms), aluminato tetracálcico hidratado y algunos otros productos que no se pudieron identificar conclusivamente.

La designación de tobermorita usada por varios investigadores para las fases de silicato de calcio hidratado producto de las reacciones puzolánicas está en conflicto, ya que en realidad estas fases no son verdadera tobermorita (un mineral bien cristalizado raro en la naturaleza) sino más bien se parecen a esta, en todo caso han sido reconocidas de manera general como fases producto de la reacción puzolánica [Diamond, 1963].

Estas fases producto de la reacción puzolánica, incluyen como ya se dijo, tobermorita y tres fases pobremente cristalizadas designadas por Taylor [1961] como CSH(I), CSH(II), y CSH(gel), (respectivamente silicato de calcio hidratado I, II y gel). Estos minerales, están presentes también en el concreto como componentes de la pasta de cemento endurecido, en otras palabras, los productos de la hidratación del cemento son los mismos o muy parecidos a los productos de la reacción puzolánica que se da entre el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y los minerales de arcilla [Diamond, 1963].

Como no es posible aplicar nombres apropiados a muchas de estas fases, usualmente son referidos con la notación composicional abreviada del cemento: donde S significa SiO_2 , C corresponde a óxido de calcio CaO , A para alúmina Al_2O_3 , y H para H_2O , con un apropiado subíndice para denotar el número de moles de cada uno presente [Diamond et al., 1963].

Por su parte los aluminatos de calcio hidratado son generalmente bien cristalizados tal es el caso del aluminato de calcio hexahidratado C_3AH_6 , esta fase es cúbica, y es identificada fácilmente por su patrón de rayos X [Diamond et al., 1963].

Así mismo el trabajo de Hilt & Davidson [1961], aportó datos de productos de reacción cristalinos que encontró en mezclas: arcilla - cal, suelo - cal, y ceniza - cal, con un espaciamiento interplanar de 7.6 Å que indicaba la presencia de un aluminato de calcio hidratado C_4AH_{13} [Buck & Mather, 1979].

De manera general se puede afirmar que la identificación de estas fases es complicada por la existencia de una variedad de fases polimórficas, además de la sustitución isomórfica de CO_3 , Si y otros iones que fácilmente transforman algunas de estas fases en otras [Diamond et al., 1963].

Todas las fases antes mencionadas, son los productos de reacción identificados en el estudio de la estabilización de suelos arcillosos con cal hidratada y son los responsables del endurecimiento de las mezclas de suelo, cal y agua.

Después de los descubrimientos de Eades y Grim (1960), Hilt y Davison (1961), Taylor (1961) y Glenn & Handy (1963), acerca de los minerales neoformados, producto de las reacciones puzolánicas en la estabilización de suelos arcillosos con estabilizadores base calcio, no se ha dado ningún otro descubrimiento significativo en este tema. No obstante, es necesario mencionar que a partir de estos descubrimientos realizados por medio de difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido, numerosas técnicas han sido usadas para caracterizar estos los silicatos y aluminatos de calcio hidratados producto de la reacción puzolánica, los cuales como ya se dijo son similares a los productos de hidratación del cemento.

A la fecha existen muchos trabajos, en donde las aportaciones han sido la utilización de nuevas técnicas de caracterización, y/o la evaluación de diferentes

estabilizadores sobre diferentes tipos de suelos o arcillas. Sin embargo, esta revisión bibliográfica es infructuosa, si no se menciona que la característica principal de estos minerales neo formados parecidos a la tobermorita y similares a los productos de la hidratación del cemento, crecen con un hábito fibroso y/o acicular que permite la trabazón a nivel microscópico y por lo tanto el desarrollo de resistencia en un suelo.

En la siguiente figura se ilustran a escala microscópica los pasos de la reacción puzolánica de manera paralela con las etapas que ocurren en la hidratación del cemento, con la finalidad de dejar en claro el mecanismo por el cual un suelo arcilloso alcanza la estabilización.

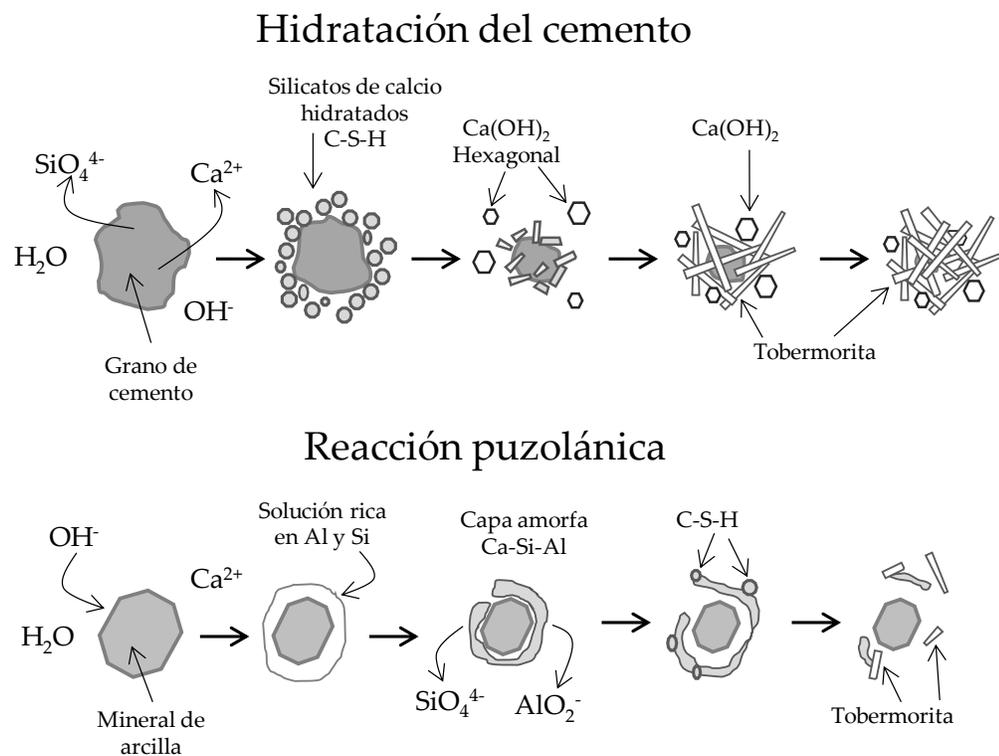


Figura 18. Etapas de la hidratación del cemento y de la reacción puzolánica, donde es posible observar que los silicatos de calcio hidratados (tobermorita) crecen en forma de agujas y fibras que se entrelazan entre sí y con otras partículas. Imagen tomada y modificada de Takemoto & Uchikawa, 1980.

Considerando el pensamiento visual y el razonamiento inductivo mencionados en la introducción, ahora queda claro cuál es el espíritu de esta investigación. El propósito es aprovechar la portlandita o Ca(OH)_2 remanente en la pasta de cemento adherida a los agregados reciclados, para propiciar la disolución alcalina de los minerales de arcilla y posteriormente la precipitación de silicatos de calcio hidratados parecidos a la tobermorita cuyo hábito cristalino sea fibroso y/o acicular de tal modo que genere la trabazón (entrelazamiento) entre las partículas del suelo, dando como resultado la estabilización del suelo.

De acuerdo a El-Mahllawy [2014], el hidróxido de calcio Ca(OH)_2 generado por la hidratación del cemento es más reactivo que la cal hidratada comercial (calhidra).

Nota. El hábito o hábito cristalino describe el aspecto que presentan los minerales. El hábito se encuentra condicionado por factores externos al mineral, por ejemplo, las condiciones ambientales que había mientras se formó. La estructura cristalina también influye sobre el hábito, aunque muchas veces el aspecto de un mineral puede despistar acerca de su estructura cristalina.

3. Parte Experimental

3.1 Materiales

3.1.1. Agregados reciclados provenientes de RCDs

Tomando en cuenta que uno de los objetivos de este trabajo, es conocer la mineralogía y la composición química de agregados reciclados (grava y arena) a partir de concreto demolido, mediante la colaboración de la Dra. Yamile Rangel Martínez del Área Académica de Ingeniería de esta Universidad, se consiguieron muestras de agregados reciclados de dos plantas recicladoras ubicadas en la Cd. de México, mismas que se mencionan a continuación:

- Planta Concretos Reciclados S.A., ubicada en la Delegación Iztapalapa
- Planta Bordo Poniente ubicado al oriente de la Ciudad de México

En necesario mencionar que las muestras (grava y arena) del Bordo Poniente se descartaron para este trabajo, debido a que estos agregados contienen cantidades considerables de suelo, ladrillos, morteros, loseta y basura, razón por la cual deben ser reclasificados como agregados reciclados mezclados [Cardoso et-al., 2016] (figura 19).



Figura 19. Grava reciclada del Bordo Poniente, donde es evidente la cantidad de basura, tierra y fragmentos de ladrillos.

Por su parte los agregados reciclados de la Planta Concretos Reciclados si se utilizaron en esta tesis, por provenir de concreto demolido triturado y con cantidades despreciables de otros materiales.

Estos agregados reciclados se obtuvieron muestreando directamente de los montones procesados formados por la unidad de reciclaje móvil McCloskey, modelo I44R (McCloskey International, Peterborough, ON, Canadá), en la planta Concretos Reciclados S.A. (figura 20).



Figura 20. Montones de arena reciclada en la empresa Concretos Reciclados de donde se tomaron las muestras.

Las muestras se tomaron de dos montones denominados arena de $\frac{1}{4}$ a finos y grava de 1", estos agregados se colectaron en bolsas de polietileno siguiendo las recomendaciones de la norma NMX-C-030-ONNCCE-2004 "Industria de la Construcción – Agregados – Muestreo (figura 21).



Figura 21. Muestras de agregados reciclados obtenidas en la Planta Concretos Reciclados.

Considerando que las muestras de agregados reciclados (grava y arena) provenientes del Bordo Poniente se descartaron, se tomó la decisión de producir agregados reciclados en el laboratorio, procesando fragmentos de concreto recolectados en vertederos clandestinos ubicados al norte de la Ciudad de México (figura 22).

El criterio para la recolección/selección manual (pepena) fue el siguiente: Solo fragmentos de concreto simple sin recubrimientos superficiales (mortero o pintura). Para producir los agregados reciclados en el laboratorio estos pedazos de concreto se procesaron usando una trituradora de quijada de laboratorio Allis Mineral System, York, PN, E.U., (figura 23) y se clasificaron manualmente utilizando la malla ASTM #4 (4.75 mm) para separar la grava de la arena.



Figura 22. Foto de un vertedero clandestino de residuos de la construcción y demolición donde se recolecto parte del concreto demolido que se recicló en el laboratorio.



Figura 23. Foto de la trituradora de quijada usada para reciclar el concreto de vertederos.

En la tabla 1 se presentan las cantidades de muestras de agregados reciclados obtenidas de una planta recicladora y en el laboratorio, pero en ambos casos con concreto demolido proveniente de la Cd. de México.

Tabla 1. Muestras de concreto reciclado obtenidas en la Ciudad de México.

Planta Concretos Reciclados S.A.		Concreto vertederos	
Grava reciclada planta	Arena reciclada planta	Grava reciclada laboratorio	Arena reciclada laboratorio
109.16 Kg	126.37 Kg	55.24 Kg	125.59 Kg

Con el fin de obtener muestras confiables al tamaño requerido para las pruebas, los agregados reciclados (gravas y arenas) arriba mencionados, se homogeneizaron y se cuartearon manualmente según la norma NMX-C-170-ONNCCE-1997. Esta norma, que no coincide con ninguna norma internacional, proporciona especificaciones para la reducción de muestras obtenidas en el campo al tamaño requerido para las pruebas. En la siguiente figura (núm. 24) se ilustra la manera de hacer el cuarteo, primero se forma un cono, enseguida se separa en cuadrantes sensiblemente iguales y se retira el material de dos cuadrantes opuestos, este procedimiento se repite las veces necesarias para obtener la muestra al tamaño requerido para las pruebas.

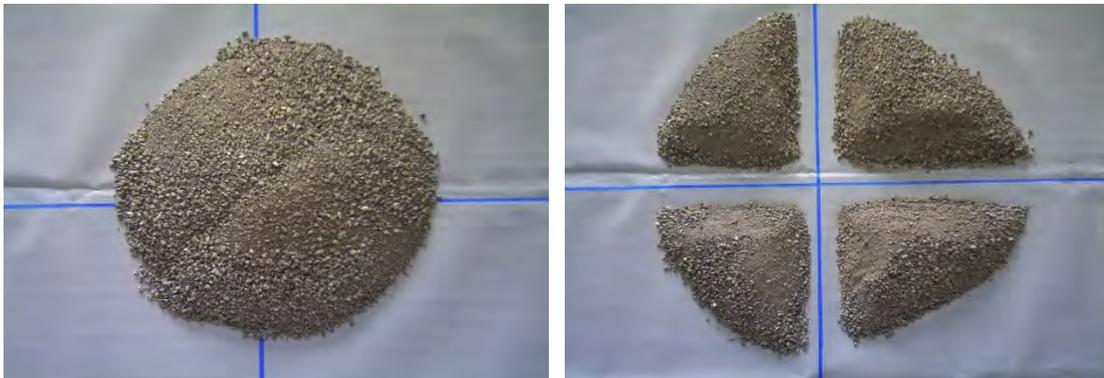


Figura 24. Cuarteo de arena reciclada de acuerdo a la NMX-C-170-ONNCCE-1997.

3.1.2. Suelo arcilloso

La selección del perfil de suelo arcilloso, se realizó a partir de un estudio de fotointerpretación, utilizando ortofotos digitales blanco y negro escala 1: 20,000 y recorridos de campo. Se usaron los métodos M-MMP-1-01/03, Muestreo de materiales para terracerías y M-MMP-1-03/03, secado, disgregado y cuarteo de muestras, de la sección suelos y materiales para terracerías, del Libro Métodos de Muestreo y Prueba de la Normativa para la Infraestructura del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes [IMT-MMP-1, 2003].

Se escogió una unidad de suelo en la carta edafológica 1:50,000 Pachuca F14D81 [2003] del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), con la denominación feozem háplico (Hh/2) de acuerdo a la clasificación FAO/UNESCO. Este suelo se presume arcilloso por su textura de acuerdo a la clasificación del diccionario de datos edafológicos del INEGI (tabla 2) [INEGI, 2001]. Esta unidad edafológica feozem háplico Hh/2 (clase textural media) pertenece fisiográficamente a la llanura del Valle Pachuca – Tizayuca.

De acuerdo al documento “Información sobre Perfiles de Suelo” del INEGI [2000], el principal tipo de suelo por su frecuencia de levantamiento es el feozem, y también, dentro de los subtipos de suelo el feozem háplico está entre los principales.

El feozem con símbolo H, se define como un suelo con una capa superficial oscura, algo gruesa, rica en materia orgánica y nutrientes. Por su parte la denominación háplico símbolo h, significa que el suelo no tiene propiedades especiales, en otras palabras, es un suelo simple, si tuviera cal sería calcárico o gléyico con un subsuelo de varios colores [INEGI, 2000]. Por su parte el número 2 se refiere a su clase textural media con menos del 35% de arcilla de acuerdo a la tabla 2 [INEGI, 2001].

Tabla 2. Textura del suelo de acuerdo al INEGI

Textura del suelo (INEGI)	
Gruesa (1)	Menos del 18% de arcilla y más del 65% de arena.
Media (2)	Menos del 35% de arcilla y menos del 65% de arena.
Fina (3)	Más del 35% de arcilla.

Para estudiar la unidad de suelo y obtener una imagen se utilizó software libre para sistemas de información geográfica con información geográfica del INEGI (Modelo digital de elevación f14d81, ortofotos f14d81b, f14d81c, f14d81e, f14d81f).

Finalmente fue determinante en la selección del perfil de suelo la facilidad para muestrear, por lo que se eligió como punto de muestreo una excavación para un drenaje cercano a la presa de jales sur. (figura 25).

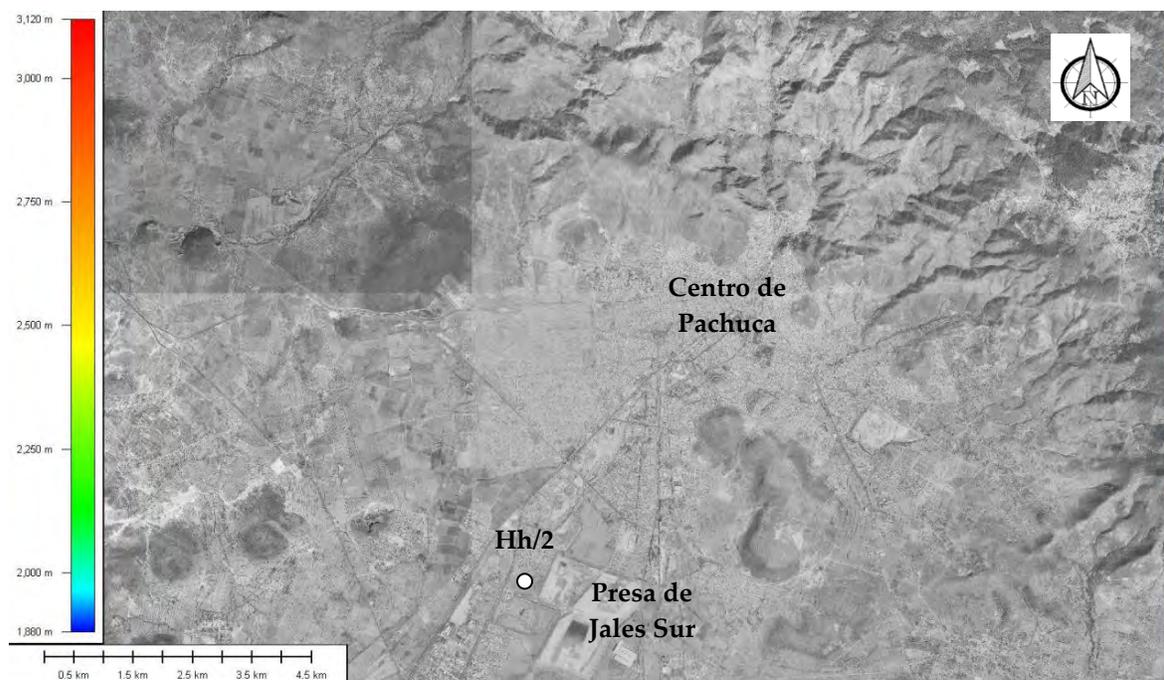


Figura 25. Sitio seleccionado para el muestreo del suelo arcilloso ubicado a un costado de la presa de jales sur en la Cd. de Pachuca, vista en planta.

3.1.3 Muestreo del suelo

Como ya se indicó, se usó el método M-MMP-1-01/03. Muestreo de materiales para terracerías, que menciona en el apartado E.3.2.2. que, para obtener muestras integrales, se debe hacer un canal vertical de sección transversal uniforme en la pared o el talud en toda su altura, cuidando de no incluir la capa de tierra vegetal, que en su caso exista, el material extraído del canal se recoge en una lona ahulada, y se envasa en un recipiente hermético para su posterior cuarteo. El tamaño de la muestra fue de 20 Kg de acuerdo al método antes mencionado [IMT-MMP-1, 2003].

En la figura 26, se puede ver el canal vertical en una de las paredes de la excavación después del muestreo, en la foto izquierda se puede observar que el perfil de suelo en toda su pared mide aproximadamente 2 metros, también es importante hacer notar que en el fondo de la excavación donde se apoya el estadal, aflora material poroso, débilmente endurecido, que podría pertenecer a la toba Cubitos (QpthoPu) de acuerdo a la información de la carta geológica minera Pachuca F14-D81 [2007] (figura 27).

Esta cartografía clasifica estos materiales como un depósito pumicitico poroso, y clasifica al suelo arcilloso como un aluvión (Qhoal).

La carta geológica minera [F14-D81, 2007] menciona con respecto a el aluvión Qhoal, que se trata de materiales depositados en abanicos aluviales sobre llanuras de inundación, y que forman parte de la cuenca de México, estos depósitos varían de masivos a bien estratificados, y están constituidos en gran parte por partículas del tamaño de la arena, el limo y la arcilla, en este caso podría considerarse que la unidad edafológica Hh/2 (feozem háptico de textura media), cabe en la descripción de aluvión con clave cartográfica (Qhoal), sin embargo la distinción de estas clasificaciones no se discutirá en este momento.

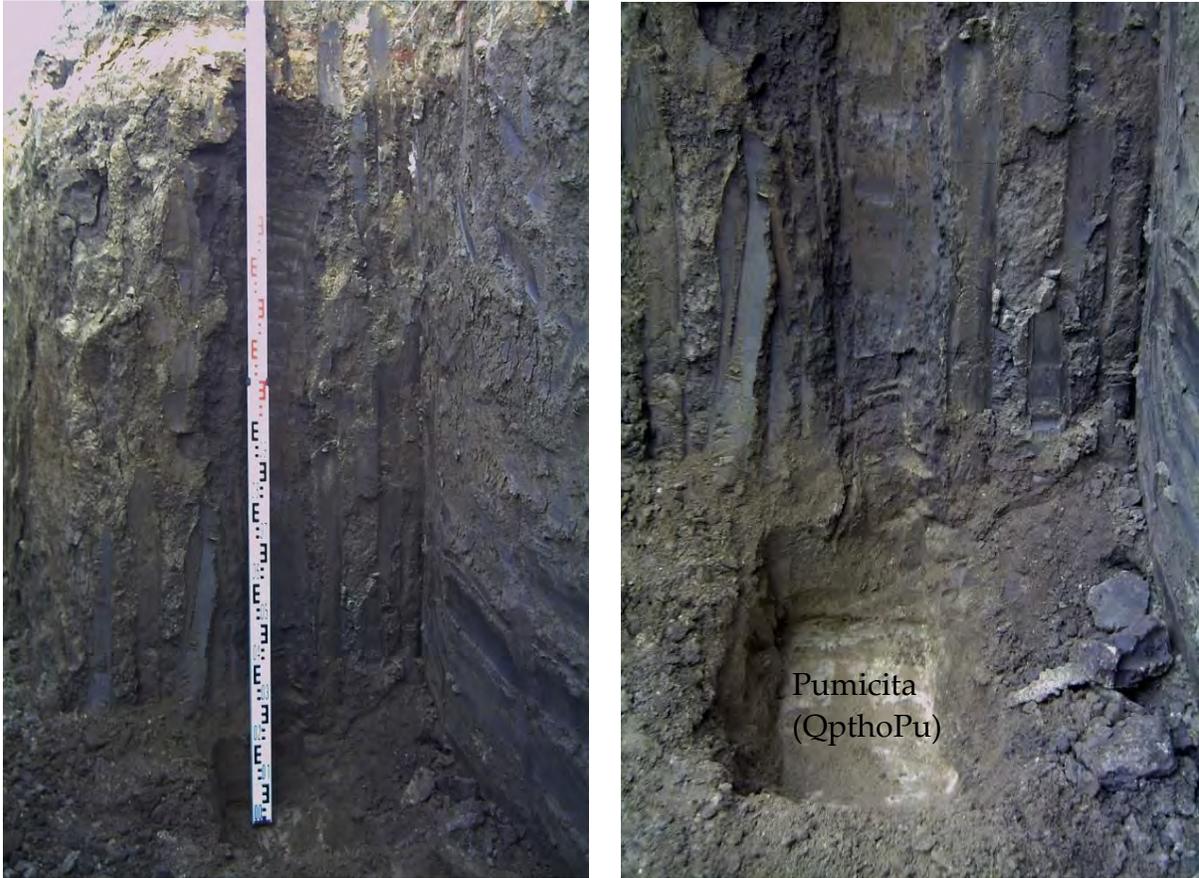


Figura 26. Muestreo en la pared de la excavación y detalle de la pumicita en el fondo del canal de muestreo

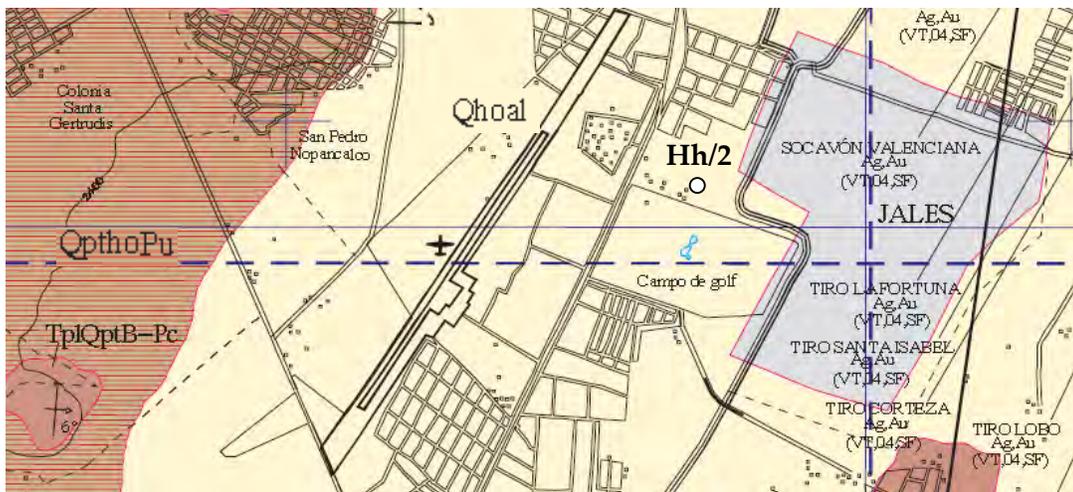


Figura 27. Sección de la carta geológica minera Pachuca, donde se observa la ubicación del sitio de muestreo ubicado en el aluvión (Qhoal), a la izquierda se nota la toba cubitos (QpthoPu).

En la figura 28, se muestra un corte en una obra de drenaje pluvial en un lugar muy cercano al sitio de muestreo, donde se aprecia que la capa de suelo feozem háplico descansa sobre materiales porosos (toba Cubitos). En la fotografía se observa el límite bien definido (línea punteada) entre el suelo y el material poroso (toba Cubitos o pumicita). La pumicita se refiere a ceniza y arena volcánica — pómez [Sánchez et-al., 2005].

Como ya se mencionó, en México de acuerdo a los informes edafológicos de campo y laboratorio del INEGI, el feozem háplico es el principal tipo de suelo por su frecuencia de levantamiento, con un valor promedio de arcilla del 26% [INEGI, 2000]. Este contenido de arcilla le confiere un potencial de expansión contracción (que cambian su volumen al humedecerse y secarse) tal, que en ocasiones se considere a estos suelos como poco adecuados por su baja resistencia a las cargas.

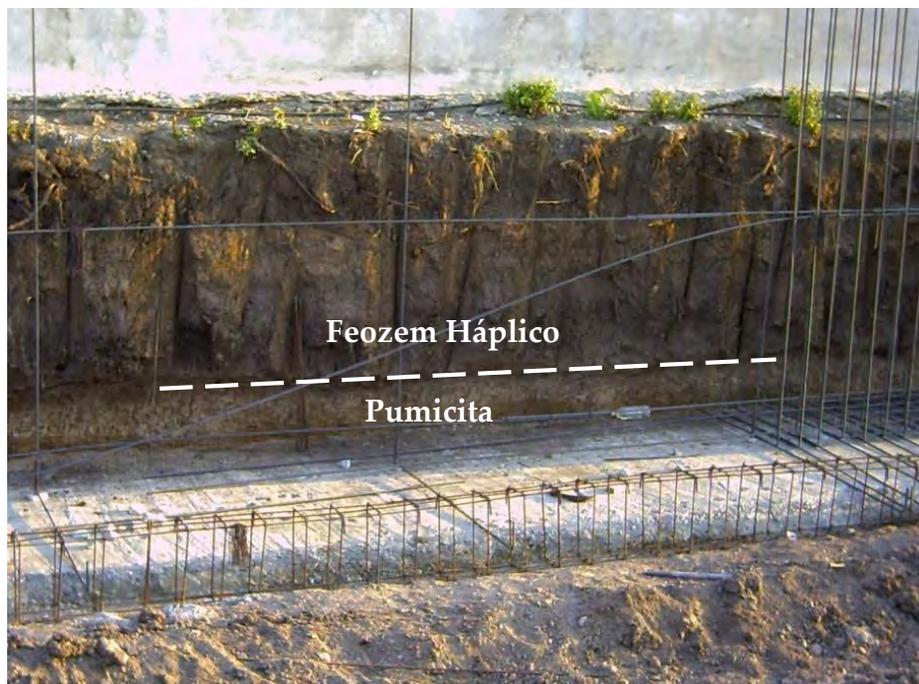


Figura 28. Corte en una obra de drenaje pluvial donde se aprecia el perfil del suelo feozem háplico y la pumicita subyacente.

En la siguiente figura (núm. 29) se pueden ver las fotos del procedimiento de secado, disgregado y cuarteo de la muestra de suelo arcilloso (feozem háplico) de acuerdo a la norma [IMT-MMP-1, 2003].

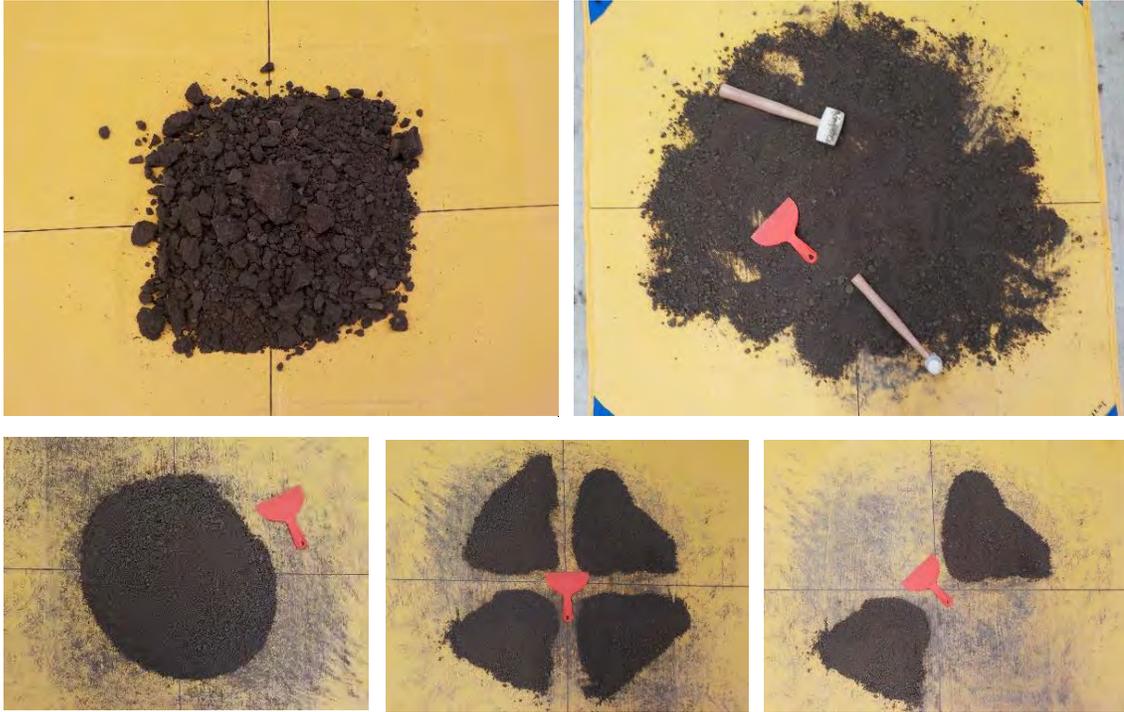


Figura 29. Operaciones de secado, disgregado y cuarteo de la muestra del suelo feozem háplico.

Una vez que se obtuvo una muestra de tamaño adecuado para las pruebas, se separó la fracción $< 45 \mu$ (finos) del suelo arcilloso por medio de la malla ASTM #325. Esta fracción fina será usada para preparar las mezclas suelo - agua - agregado reciclado pulverizado.

3.1.4 Mezclas suelo - agua - agregado reciclado pulverizado

Para este fin se utilizaron muestras de los agregados reciclados pulverizadas. De acuerdo al tetraedro de la ciencia de los materiales, el procesamiento puede determinar la estructura y las propiedades de un material. Asumiendo lo anterior la molienda será

la manera de activar los agregados reciclados para usarlos como estabilizadores de suelos arcillosos. Según lo propuesto por Engelsen et al. [2012], los materiales rocosos en su forma pulverizada manifestarán valores de pH más altos que en su forma triturada o gruesa.

En la siguiente figura (núm. 30) se presenta la secuencia de molienda de las muestras de agregados reciclados para dos propósitos, por un lado, para la caracterización y por otro para su probar su desempeño como estabilizadores, en ambos casos las muestras se molerán hasta 100% menos 75 μ .



Figura 30. Secuencia de molienda (pulverización) de los agregados reciclados, nótese que primero se usa un metate de hierro gris, seguido de cuarteos y finalmente la molienda en un mortero de ágata hasta que toda la muestra pasa por la malla #200 ASTM ($< 75 \mu$).

Para determinar el efecto de los agregados reciclados en la mineralogía de los suelos arcillosos se usaron pequeños envases cilíndricos de polietileno transparente de 34 x 14 mm, con tapa rosca para lograr un cerrado hermético.

El procedimiento de preparación (fig. 31) de las mezclas suelo - agua - agregado reciclado pulverizado fue como sigue, se pesaron 2 g de la fracción $<45 \mu$ del suelo arcilloso feozem háplico, y una vez depositados en el envase cilíndrico transparente se

adicionó el estabilizador, en este caso agregado reciclado pulverizado (<75 μ) en las siguientes proporciones en peso (12.5, 25 y 50%).



Figura 31. Preparación de las mezclas suelo – agua – agregado reciclado pulverizado.

Se agitaron manualmente en seco hasta lograr una mezcla de color homogéneo y se agregó agua destilada hasta lograr un espejo de líquido sobrenadante, estas mezclas se cerraron herméticamente [Ruff & Ho, 1965; Sloane, 1964] y se almacenaron para su curado en un lugar fresco y seco por 12 meses (1 año).

Cabe hacer mención que estas mezclas se prepararon por duplicado (figura 32), además de unas probetas sin estabilizador o testigos que son mezclas suelo - agua.



Figura 32. Ejemplo del almacenamiento de las mezclas de suelo – agua – agregados reciclados pulverizados, en la foto se observan los envases pequeños que contienen las mezclas.

3.2 Métodos

3.2.1 Caracterización granulométrica

Para determinar el tamaño de las gravas y las arenas recicladas, muestras de 10 Kg para los agregados gruesos y 1 Kg para los agregados finos [LS-602, 2001], se secaron a 100 °C hasta peso constante antes del tamizado. La distribución de tamaño se analizó de acuerdo a la norma NMX-C-077-ONNCCE-1997, que describe el análisis granulométrico y los métodos de prueba usados en los agregados para concreto.

3.2.2 Caracterización química mineralógica

Estos análisis se realizaron en muestras representativas de gravas y arenas recicladas (planta y laboratorio), las cuales fueron molidas hasta que el 100% de la muestra paso a través de la malla #200 ASTM ($< 75 \mu$), se secaron a 100 °C durante 6 horas en una estufa de laboratorio marca Felisa con controlador digital.

La composición mineralógica se determinó mediante difracción de rayos X (DRX) por la técnica de polvos, en una difractor Equinox 2000 (INEL, Artenay, Francia) con radiación $\text{CoK}\alpha 1$.

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). El software Match!, Phase Identification from Powder Diffraction, versión 2 fue usado en este procedimiento (Crystal Impact, Bonn, Germany).

Para el caso de las muestras de finos del suelo arcilloso (fracción $< 45 \mu$), estas no necesitaron preparación ya que se encuentran en forma de polvo, al igual que las mezclas suelo-agua-agregado reciclado pulverizado.

Para la caracterización química se usaron diferentes técnicas. Muestras representativas de agregados reciclados se examinaron mediante microanálisis de rayos X por dispersión de energías (EDS), utilizando un microscopio electrónico de barrido JEOL modelo JSM-IT300 (JEOL Ltd., Tokio, Japón) y un detector de rayos X OXFORD (Oxford Instruments, Oxfordshire, Reino Unido) usando un voltaje de aceleración de 30 Kv.

Con el fin de obtener análisis representativos lo más cercano a un análisis bulk/masivo, los polvos secos de las muestras se colocaron en porta muestras de aluminio formando capas uniformes, posteriormente mediante la imagen de electrones secundarios (SEI en inglés) se eligieron áreas con una distribución homogénea y se ejecutaron rutinas cuantitativas en áreas de barrido grandes (4.75 mm²). La gran área de barrido asegura análisis representativos porque abarca numerosas partículas de orden micrométrico de la mezcla de fases.

Debe quedar claro que, aunque el microanálisis químico (EDS) no es apropiado para evaluar la composición química masiva (bulk), sus resultados se compararan con los resultados que arroje la técnica de fluorescencia de rayos X.

El análisis químico por fluorescencia de rayos X (XRF) se llevó a cabo 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.

Para complementar los resultados del análisis químico de los agregados reciclados, se realizaron mediciones de pH a temperatura ambiente con un medidor de pH de la serie OAKTON 700 (Oakton, Vernon Hills, IL, E.U.), equipado con un electrodo de la misma marca.

Para este propósito se mezclaron 20 gr de agregados reciclados pulverizados con 40 ml de agua destilada, esta mezcla se agitó con una varilla de vidrio durante 5 minutos y luego se realizó la medida. En la siguiente figura (núm. 33) se presenta el arreglo experimental para medir pH.



Figura 33. Arreglo experimental usado para determinar el pH medido en agua de los agregados reciclados pulverizados.

3.2.3 Caracterización microscópica por MEB

Esta caracterización se llevó a cabo para determinar la morfología de los minerales presentes en el suelo arcilloso y poder distinguirlos de los minerales neo formados en las mezclas suelo - agua - agregados reciclados pulverizados.

Para este propósito se usó un microscopio electrónico de barrido JEOL modelo JSM-6300 (JEOL Ltd., Tokio, Japon) 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.

4. Resultados y Discusión

4.1 Distribución granulométrica

A partir de este capítulo solo haremos referencia a los agregados reciclados, grava y arena recicladas en planta y en el laboratorio, sin perder de vista que provienen del concreto demolido uno de los residuos de la construcción y demolición más comunes.

Las curvas granulométricas se determinaron para ambos tipos de agregados reciclados (planta y laboratorio) y se graficaron 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 serán usados para fabricar concreto en la industria de la construcción.

El principal objetivo de este análisis granulométrico es entender la distribución de tamaño de los agregados y relacionarla con el análisis químico.

Como ya se dijo el objetivo es probar los agregados reciclados como estabilizadores de suelos arcillosos, esto representaría una aplicación no estructural novedosa de estos materiales reciclados, cabe hacer mención que en la literatura ya existen numerosos trabajos sobre la incorporación de agregados reciclados en nuevas mezclas de concreto (aplicación estructural).

De acuerdo con [González Fonteboa, 2002], es posible remplazar hasta un 50% de grava natural con grava reciclada de concreto demolido, sin comprometer la calidad del hormigón. Se puede usar hasta un 100% de agregado reciclado en mezclas de concreto para aplicaciones de baja demanda estructural, tales como bolardos y bancas de mobiliario urbano [Serralde et al., 2015].

La figura 34 muestra que tanto la grava reciclada en planta como la grava reciclada en el laboratorio, tienen características granulométricas que se ajustan dentro de los límites de la zona recomendada para agregados con un tamaño nominal de 25 mm de conformidad con la NMX-C-111-ONNCCE-2014.

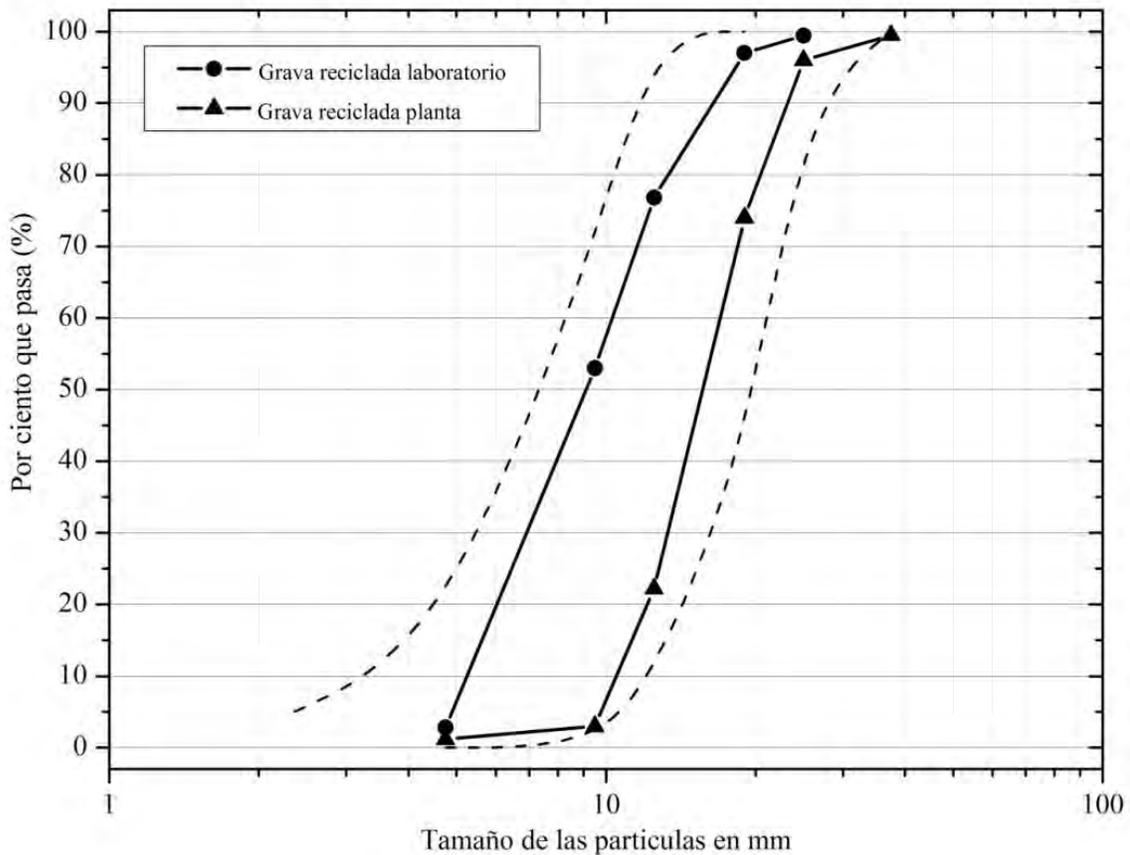


Figura 34. Distribución de tamaño de partícula de gravas recicladas, las líneas punteadas corresponden a los límites granulométricos de la NMX C-111-ONNCCE-2014.

Sin embargo, se observa una deficiencia de partículas menores de 10 mm en la curva de la grava reciclada planta, esta carencia se atribuye a la resistencia a la fragmentación de los agregados reciclados en la planta que pueden provenir de concreto armado o de concreto de alta resistencia, tómesese en cuenta que a la planta Concretos Reciclados llegan RCDs de cualquier tipo.

Con respecto a la composición granulométrica de la grava reciclada en el laboratorio, la curva presenta un comportamiento casi recto desde tamaños cercanos a 4 mm hasta 10 mm, esto implica mayor cantidad de granos finos, y se relaciona con una menor calidad del concreto, es decir más fácil de triturar.

Estos resultados coinciden con los observados por (Kobayashi & Kawano, 1998), quienes determinaron que los agregados reciclados provenientes de concreto de mayor resistencia poseen módulos granulométricos superiores al obtenido con concretos de inferior resistencia.

Agregando a lo anterior, es importante resaltar que a simple vista (figura 35), las gravas recicladas planta presentan mayor cantidad de partículas (fragmentos) enteramente formados por mortero (arena y pasta de cemento), con respecto a los fragmentos de grava original y los constituidos por la roca con mortero adherido [Vázquez y Barra, 2002], esta condición como ya se mencionó tiene relación con la calidad del concreto demolido que se procesó, es decir un concreto de mayor calidad (alta relación cementante/agregados) tendrá mayor cantidad de cemento y será más resistente. La interpretación de estos resultados sugiere la influencia de la calidad del concreto original en la granulometría de la grava.



Figura 35. En la parte superior grava reciclada en planta, con fragmentos enteramente formados por mortero (arena y pasta de cemento) y abajo grava reciclada en el laboratorio con agregados constituidos por roca con mortero adherido.

A continuación, en la figura 36, se comparan los resultados del tamizado de arenas recicladas, en la planta y en el laboratorio, en donde resalta que ambos materiales no cumplen con la norma mexicana, aun cuando manifiestan comportamientos continuos y sin cambios bruscos de pendiente. Estas arenas no satisfacen los límites granulométricos establecidos, debido a una escasez de partículas cercanas a 1 mm. Esta escasez puede atribuirse al hecho de que la pasta de cemento y el mortero constituido por pasta de cemento y micro agregados adherido a partículas milimétricas, aumenta la retención en mallas de mayor apertura.

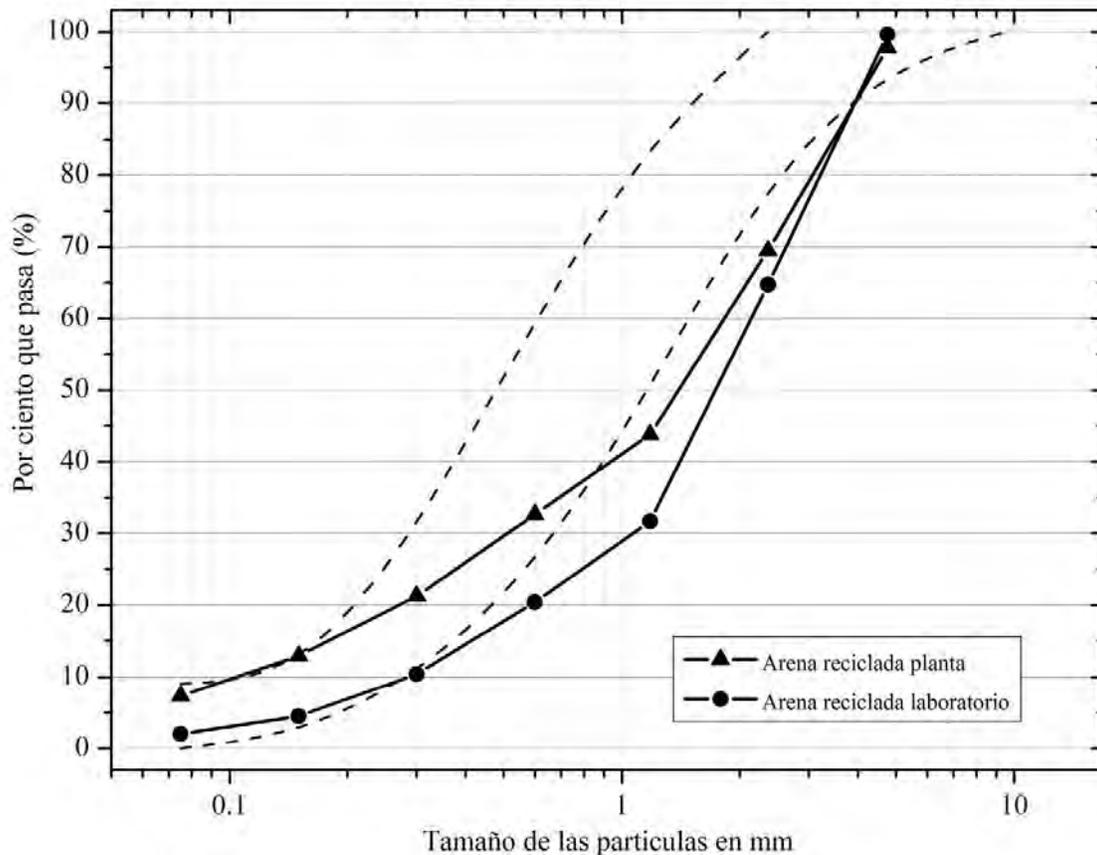


Figura 36. Distribución de tamaño de partícula de arenas recicladas; las líneas punteadas corresponden a los límites granulométricos de la NMX C-111-ONNCCE-2014.

Esta tendencia tiene sustento en las investigaciones de Bianchini et al. [2005], quienes analizaron por fluorescencia de rayos X diferentes fracciones de tamaño de agregados finos reciclados, y determinaron que existen altos contenidos de compuestos de calcio (CaO) en fracciones de tamaño entre 2 y 4.74 mm.

En relación a las arenas recicladas en la planta, curiosamente estas contienen mayor cantidad de finos ($< 75\mu$) que las tratadas en el laboratorio, este dato parece contradictorio considerando el argumento de que a mayor calidad del concreto demolido se tendrán agregados reciclados más resistentes y de mayor tamaño debido a la resistencia del material adherido, no obstante hay que tomar en cuenta que las

arenas procesadas en la planta provienen de un proceso de trituración y cribado más complejo que implica mayor fragmentación por transporte y agitación [Evangelista et al., 2015], no así las arenas recicladas en el laboratorio, las cuales fueron trituradas en un solo ciclo y cribadas manualmente.

Ahora bien, a pesar de que la distribución de tamaño de partículas de ambas arenas no se sitúa dentro de los límites granulométricos recomendados por la norma NMX C-111 para elaborar concreto, es importante enfatizar que aun cuando cumplieran con las tolerancias indicadas, existe consenso en la literatura acerca de que el uso de arenas recicladas con finos en la elaboración de concreto, tiene un efecto negativo por el alto contenido de pasta de cemento que genera una alta absorción de agua y bajas propiedades mecánicas [Bustillo, 2010].

4.2 Composición mineralógica

Las figuras 37 y 38 ilustran los resultados de difracción de rayos X de las muestras de arenas y gravas recicladas en la planta y en el laboratorio. Todos estos patrones de difracción son muy similares entre sí, y en ellos se pueden observar picos anchos y traslape de reflexiones, típico de las mezclas multifase. Como se explicó anteriormente la identificación de fases se realizó mediante el software Match, determinándose la presencia de diferentes cantidades de fases cristalinas que corresponden a los agregados originales y a la pasta de cemento adherida a ellos. En la tabla 3 se presenta la proporción de las fases minerales ordenadas considerando su cantidad inferida de la intensidad de los principales picos.

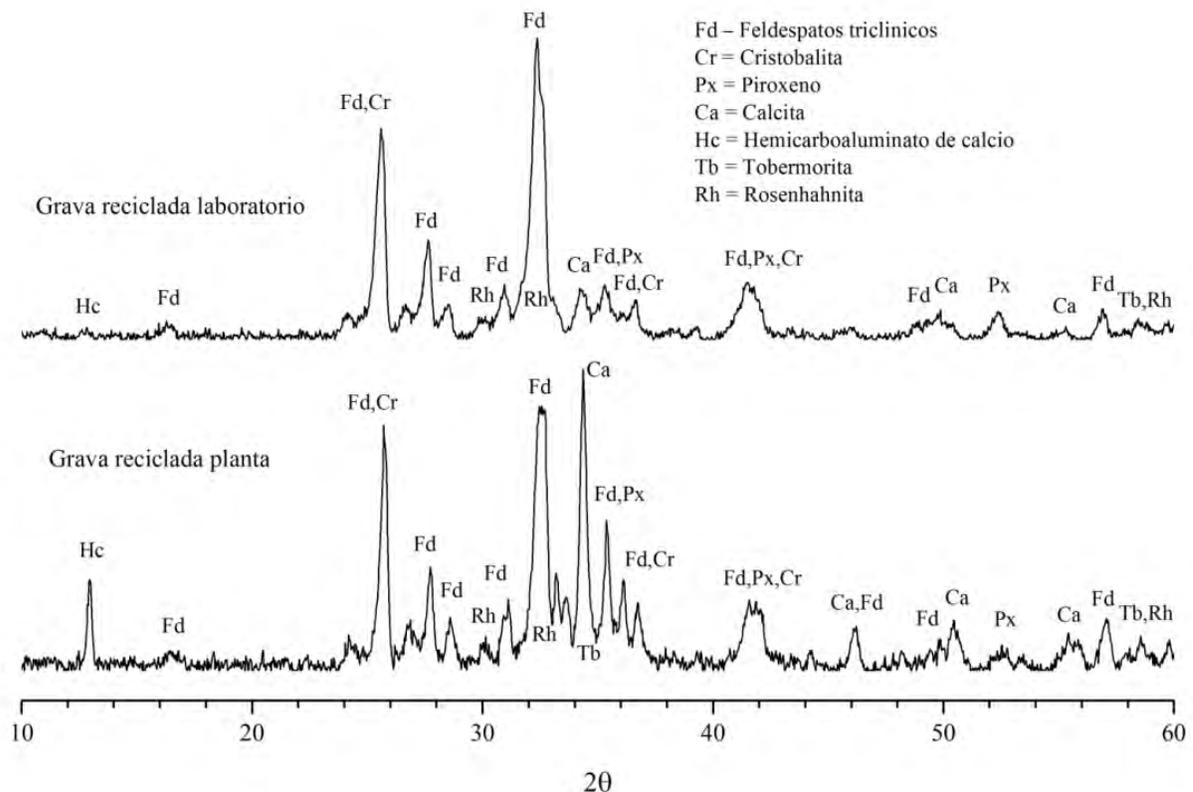


Figura 37. Patrones de difracción de rayos X de las muestras de gravas recicladas.

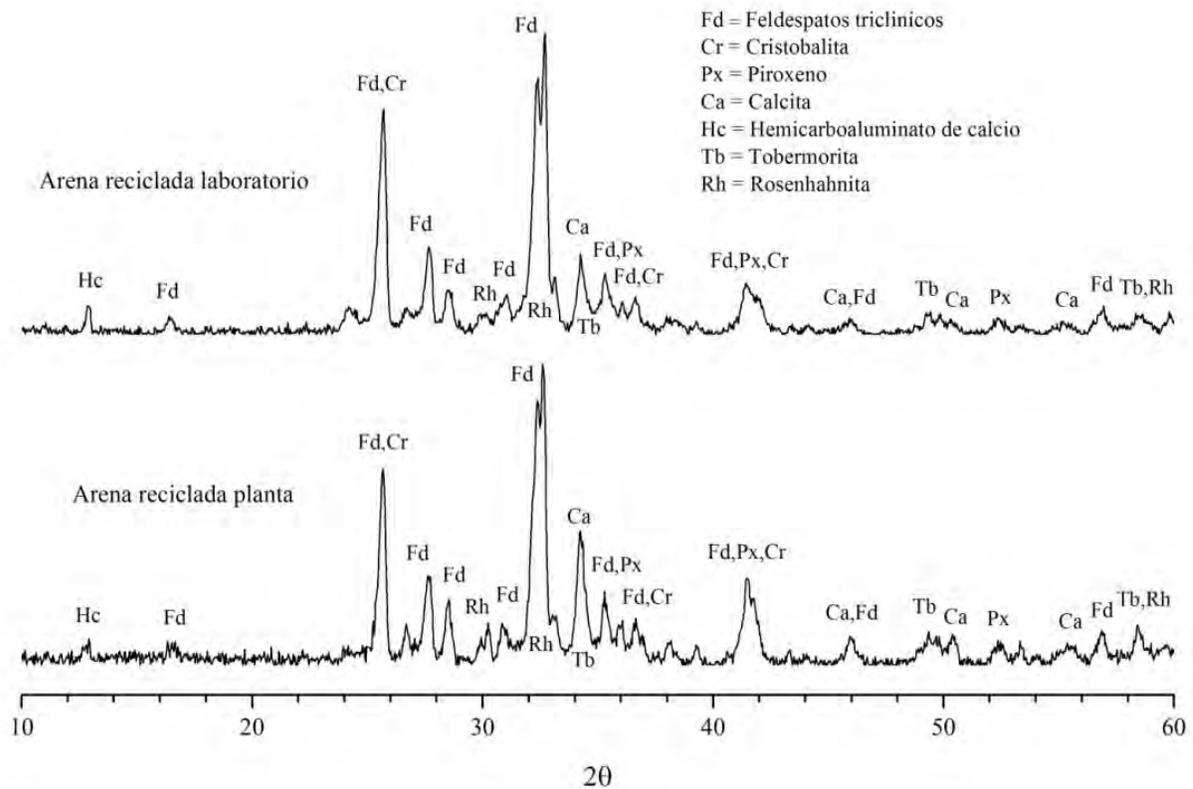


Figura 38. Patrones de difracción de rayos X de las muestras de arenas recicladas.

Tabla 3. Fases minerales presentes en los agregados reciclados

	Concretos Reciclados S.A.		Concreto vertederos	
	Grava reciclada planta	Arena reciclada planta	Grava reciclada laboratorio	Arena reciclada laboratorio
Feldespatos triclinicos	***	****	*****	****
Calcita	***	***	**	***
Cristobalita	*	*	*	*
Piroxeno	*	*	*	*
Hemicarboaluminato de calcio	**	*	*	*
Rosenhahnita	*	*	*	*
Tobermorita	*	*	*	*

Proporciones **** mayor, *** mediana, ** menor, * pequeña

4.2.1 Minerales de los agregados pétreos originales.

Como era de esperarse en un concreto, los minerales mayoritarios en todas las muestras analizadas (planta y laboratorio) pertenecen a los agregados primarios. Normalmente, los agregados representan alrededor del 70% - 80% de los componentes de los concretos [Omary et al., 2016].

En este caso se identificaron feldespatos triclinicos, de los cuales se identificaron albita, oligoclasa, andesina y anortita, que corresponden a plagioclasas (feldespatos de Na y Ca), además de anortoclasa que también es un feldespato, pero de Na y K, y que posee una estructura triclinica al igual que las plagioclasas.

Estos minerales son en realidad una solución sólida, de ahí el ensanchamiento de los picos (marcados con Fd), que corresponden a la misma reflexión, pero con una celda unitaria con diferente cantidad de átomos de K, Na y Ca, que cambiara ligeramente la estructura cristalina del feldespato, evidenciando la diferencia del tamaño de los átomos. Ver figura 39.

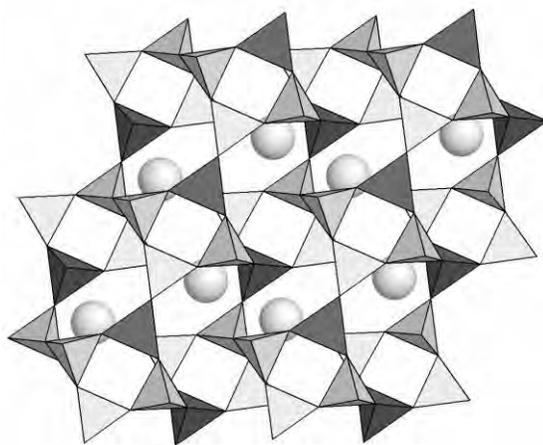


Figura 39. Estructura típica de un feldespato triclinico, donde las esferas son los átomos de K, Na y Ca que en diferentes cantidades y con un tamaño distinto modificaran ligeramente la celda unitaria. Los tetraedros claros son de Si y los oscuros de Al. Imagen tomada de www.geo.arizona.edu.

Además de los feldespatos que son silicatos abundantes en la corteza terrestre, también se identificaron en pequeña proporción en todas las muestras, cristobalita y piroxeno. Todas estas especies minerales identificadas por sus picos de difracción se consideran constituyentes de rocas ígneas intermedias y básicas (figura 40), por lo tanto, se asume que corresponden a los agregados pétreos originales usados para la elaboración del concreto que se reciclo, tanto en la planta como en el laboratorio.

La mineralogía identificada en todas las muestras de agregados reciclados, corresponde con el contexto geológico local, evidenciando que estos agregados reciclados contienen materiales pétreos extraídos en la región [Rodríguez et al., 2009], ya que de acuerdo a la carta geológico-minera de la Cd. de México [E14-2, 1997] (figura 41), existen numerosos bancos de materiales y graveras aledaños a la ciudad, de donde se han extraído y se extraen agregados con clasificaciones que van desde andesita-dacita, andesita, hasta andesita basáltica.

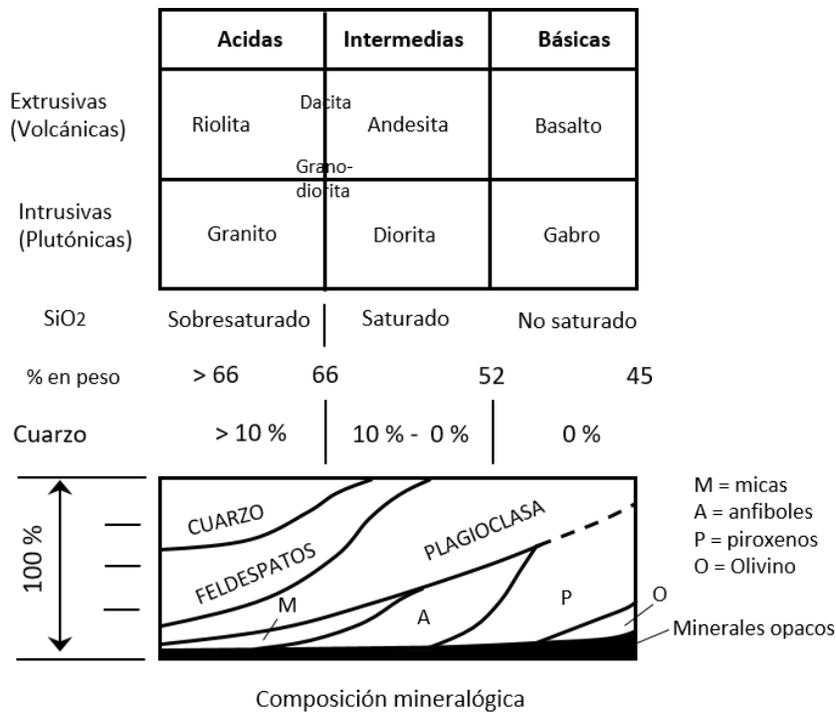


Figura 40. Clasificación de rocas ígneas. Imagen tomada y modificada de "A Geology for engineers", Blyth, H., and De Freitas, H. 1984, Elsevier.

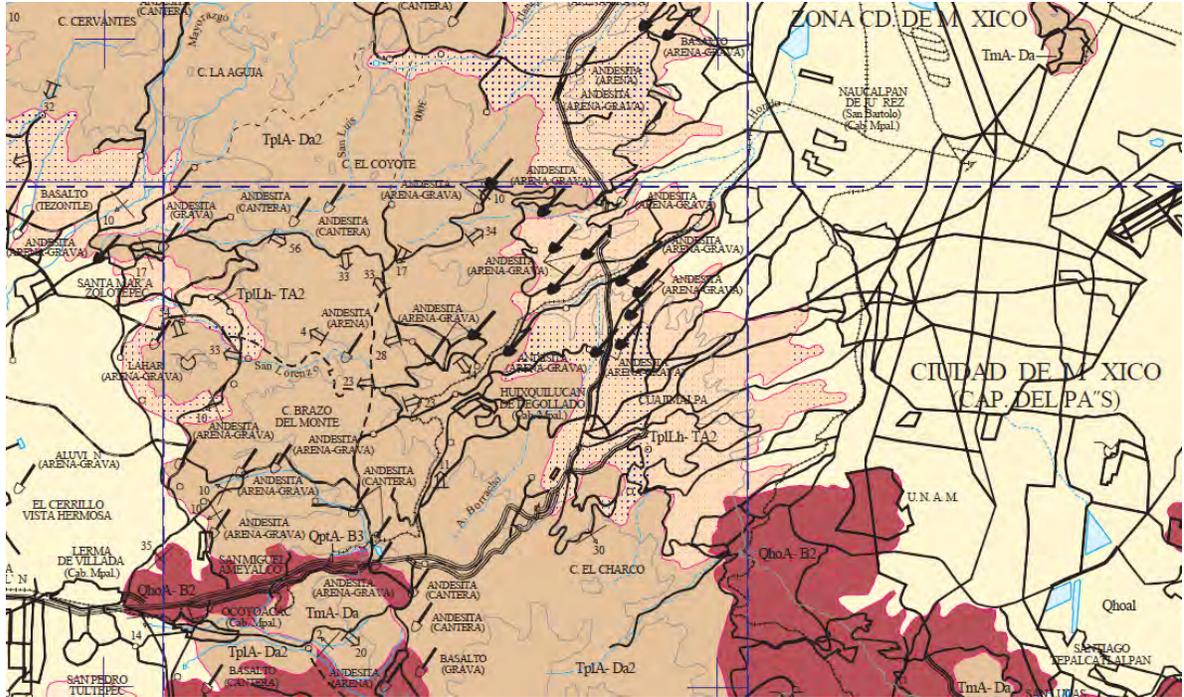


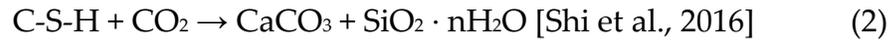
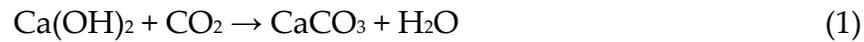
Figura 41. Sección tomada de la carta geológico minera Cd. de México E14-2, esc. 1: 250,000 donde se observa que la mayoría de bancos de materiales marcados con una pala, son de composición andesítica.

4.2.2 Minerales de la pasta de cemento adherida

Cuantificando de acuerdo a la intensidad de los picos de difracción, la calcita (CaCO_3) se encuentra en un rango de mediana a menor proporción en todos los agregados reciclados, así como en pequeñas cantidades el hemicarboaluminato de calcio y los silicatos de calcio hidratados cristalinos, rosenhahnita y tobermorita (figuras 37 y 38).

La roca caliza no se usa como agregado en la Cd. de México, por lo tanto, la presencia significativa de calcita se debe a la carbonatación de los productos de hidratación del cemento que forman la pasta adherida a los agregados reciclados, la cual está constituida principalmente de, portlandita Ca(OH)_2 y silicatos de calcio hidratados C-S-H ($\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$) [Tzschichholz et al., 1996].

Estas fases se carbonatan de acuerdo a siguientes reacciones (1 y 2):



Es importante señalar que no se detectaron picos de portlandita Ca(OH)_2 en ninguno de los materiales analizados, aunque debe estar presente, según lo propuesto por Q. Liu et al. [2014], quienes determinaron que el hidróxido de calcio Ca(OH)_2 desaparece de las muestras como resultado de una carbonatación acelerada, debido a que cuando las muestras son molidas en partículas finas para el análisis, el Ca(OH)_2 es liberado de la pasta y es expuesto directamente al CO_2 del aire, por lo tanto parte del CaCO_3 detectado en el difractograma, pertenece al carbonato generado después de la molienda necesaria para la técnica de difracción de polvos.

Mymrin et al. [2015], menciona que los picos de la portlandita Ca(OH)_2 llegan a ser inferiores al límite de detección del método de DRX (aproximadamente 5%), de la misma manera Evangelista et al. [2015], sostiene que el concreto demolido presenta bajas cantidades de Ca(OH)_2 (menores a 2.6% en peso).

Debe enfatizarse que una cantidad desconocida de calcita es generada por la carbonatación de la pasta de cemento endurecido, durante la vida útil del concreto original y también durante el tiempo de almacenamiento del concreto ya reciclado.

Adicionalmente a la carbonatación, la composición de los agregados reciclados puede incluir una pequeña cantidad de CaCO_3 de la caliza de relleno (filler) usada como remplazo parcial en el cemento [Angulo et al., 2009]. La roca caliza como relleno o filler generalmente se agrega directamente en la planta de producción de cemento [Catinaud et al., 2000].

En lo que respecta a el hemicarboaluminato de calcio detectado, este una fase formada en las primeras etapas de la carbonatación de materiales cementicios [Runcevski et al., 2012]. Específicamente, es el producto de la descomposición del monosulfoaluminato de calcio [Glasser & Matschei, 2007], un componente menor de la pasta de cemento.

Otra explicación tentativa para la presencia de hemicarboaluminato, es que se formó durante la hidratación del cemento debido a la cantidad de CaCO_3 utilizada como relleno en la producción de cemento [Matschei et al., 2007; Bonavetti et al., 2001]. El carbonato de calcio en forma de roca caliza pulverizada, es un aditivo permitido en la producción de cemento Portland, que favorece la formación de hemicarboaluminato de calcio durante la hidratación del cemento [Matschei et al., 2007]. En este caso, es posible que este mineral haya estado en el concreto antes del proceso de carbonatación y reciclaje.

Con respecto a la identificación de los silicatos de calcio hidratados (C-S-H) cristalinos, rosenhahnita y tobermorita, aunque los picos principales de estas especies no son evidentes, ya que están superpuestos por los picos intensos de los feldespatos y la calcita, se identificaron por sus picos secundarios cercanos a 60° (figuras 37 y 38).

Estos minerales resultantes de las reacciones de hidratación del cemento se encontraron en pequeñas proporciones en las 4 muestras de agregados reciclados, de acuerdo con lo establecido por Mymrin et al. [2015], quienes determinaron que la tobermorita es un componente inevitable en los concretos.

Cabe mencionar que ninguno de los patrones de difracción presento la señal típica (bandas anchas) del gel C-S-H amorfo, ni del C-S-H semicristalino, cuya señal es un pico doble cercano a 30° [Manzano et al., 2010]. Estos resultados están de acuerdo

con los obtenidos por Evangelista et al. [2015], quienes no detectaron la presencia de C-S-H amorfo o semicristalino.

Asimismo, al comparar visualmente los difractogramas de las cuatro muestras de agregados reciclados analizados (figura 37 y 38), se observa que los picos de difracción de la calcita son más intensos (altos) en la muestra de grava reciclada de la Planta Concretos Reciclados. Esta condición se debe a una mayor cantidad de fragmentos formados enteramente por mortero, por lo tanto, tendrán una mayor cantidad de pasta de cemento carbonatada.

Esta abundancia de calcita no se observó en las gravas recicladas en el laboratorio ya que solo se recolectó concreto simple durante el muestreo en los vertederos clandestinos, este concreto puede tener un contenido menor de pasta de cemento endurecida, en contraste con la muestra de grava reciclada en planta, que contiene fragmentos de concreto armado de mayor calidad — más resistente (alta relación cementante/agregados), en otras palabras, contiene mayor cantidad de cemento.

Para concluir este apartado, se tiene que los patrones de difracción de las arenas recicladas son muy similares entre sí, a pesar de que existen marcadas diferencias en la apariencia (color) y en el contenido de finos, provocado por el manejo del agregado en el caso de las arenas provenientes de la planta, (figura 42).



Figura 42. En la parte superior arena reciclada en el laboratorio y abajo arena reciclada en la planta, en donde son evidentes las diferencias de color y cantidad de finos.

4.3 Composición química

En las siguientes figuras 43 y 44 se ilustran los resultados del análisis SEM-EDS, las áreas escaneadas y los espectros EDS adquiridos. Asimismo, en la tabla 4 se presenta el análisis químico elemental expresado en porcentaje en peso para evaluar si la variación de la composición química es consistente con los resultados del análisis mineralógico (difracción de rayos X).

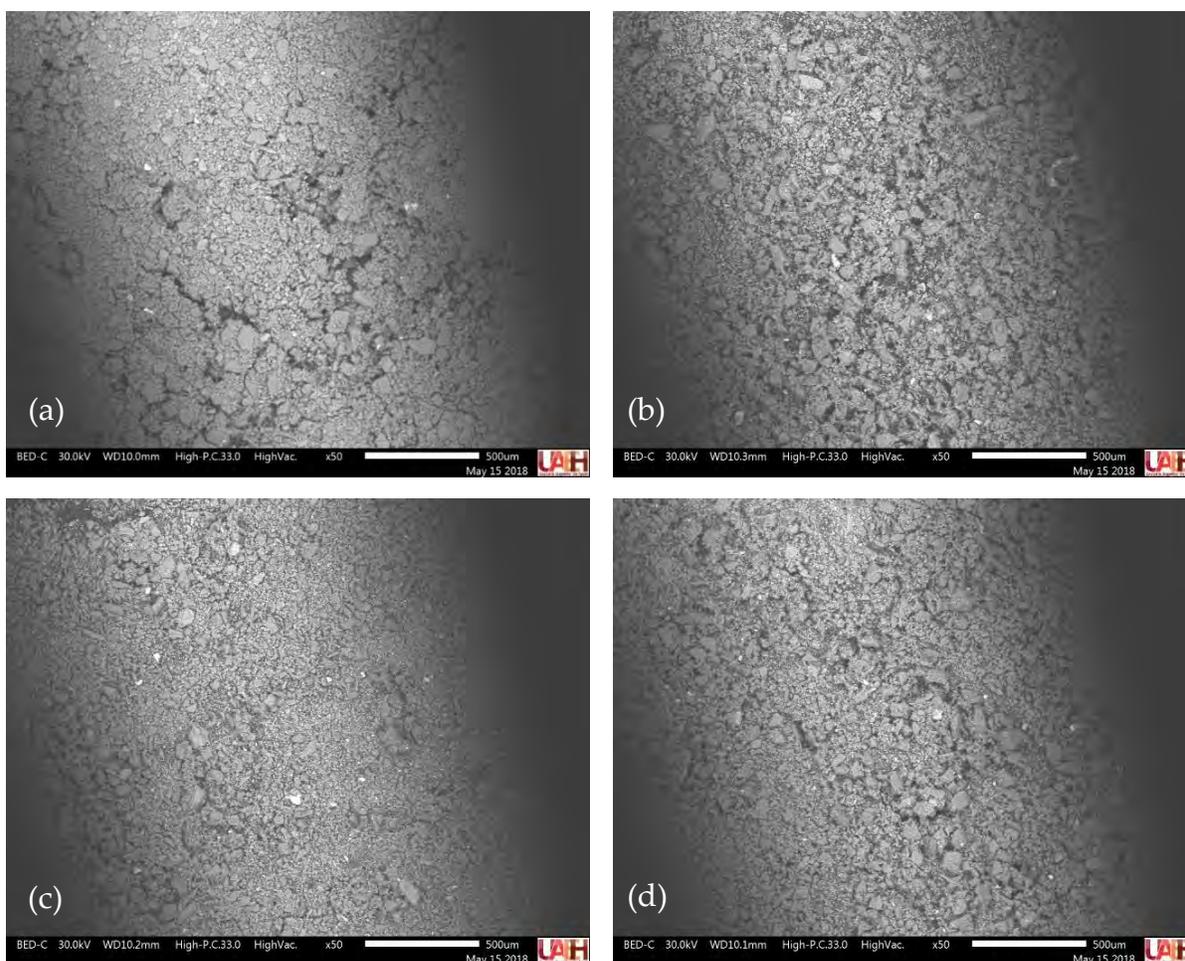


Figura 43. Imágenes de MEB mostrando las áreas del análisis EDS en las muestras de agregados reciclados: (a) grava reciclada planta; (b) arena reciclada planta; (c) grava reciclada laboratorio; (d) arena reciclada laboratorio.

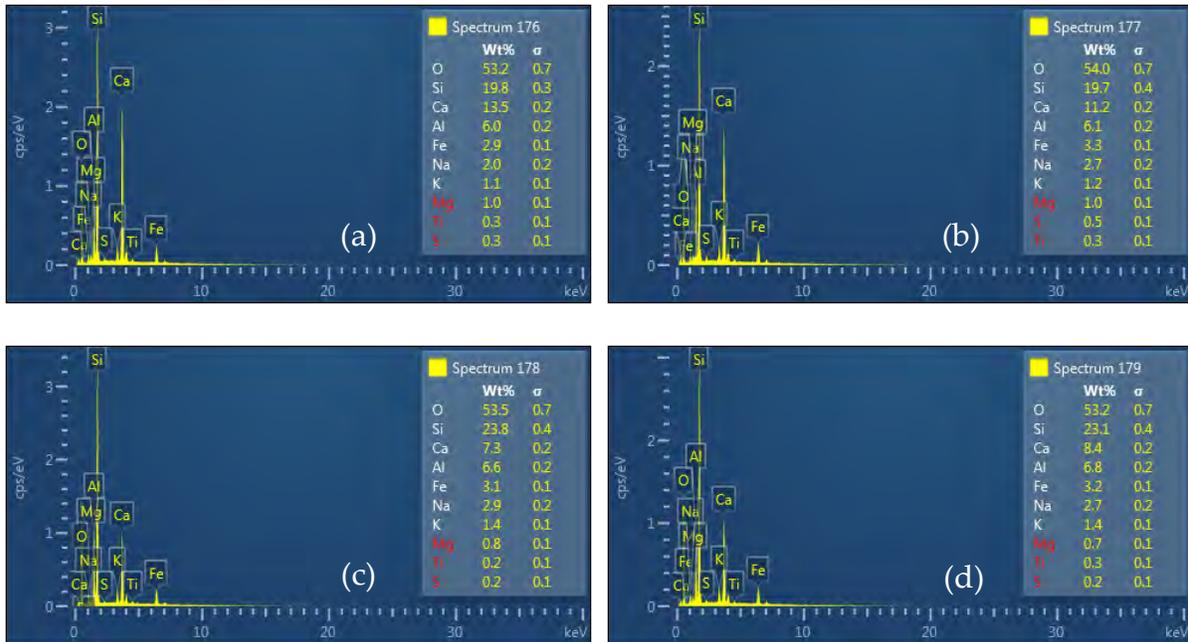


Figura 44. Espectros EDS adquiridos de las áreas de análisis mostradas arriba: (a) grava reciclada planta; (b) arena reciclada planta; (c) grava reciclada laboratorio; (d) arena reciclada laboratorio.

Tabla 4. Resultados del análisis químico por EDS de las muestras de agregados reciclados expresado en porcentaje en peso.

Elemento	Concretos Reciclados S.A.		Concreto vertederos	
	Grava reciclada Planta	Arena reciclada Planta	Arena reciclada Laboratorio	Arena reciclada laboratorio
Ca	13.53	11.24	7.34	8.36
Si	19.83	19.75	23.80	23.09
Al	5.99	6.15	6.64	6.78
Fe	2.89	3.28	3.07	3.25
Na	1.98	2.71	2.94	2.74
Mg	0.96	0.96	0.80	0.74
K	1.08	1.16	1.42	1.35
Ti	0.27	0.31	0.24	0.28
S	0.27	0.46	0.21	0.25
O	53.22	53.98	53.53	53.16
Total	100.00	100.00	100.00	100.00

La Figura 43 muestra imágenes SEM de las áreas escaneadas en el análisis EDS; estas micrografías no proporcionan información sobre la morfología de las muestras de agregados reciclados, porque las partículas tienen dimensiones muy pequeñas ($<75\ \mu$) que solo se observan a gran aumento. Sin embargo, las imágenes revelan una distribución uniforme de los polvos finos, una condición necesaria para un análisis representativo de las muestras.

Los datos del microanálisis (Tabla 4) mostraron que la variación en el porcentaje en peso de calcio, atribuido principalmente a la pasta de cemento adherida a la grava y arena reciclada, es consistente con la intensidad de los picos de calcita en DRX. En otras palabras, los mayores porcentajes de Ca en el análisis químico (EDS) corresponden a picos de calcita más intensos en el difractograma y viceversa.

Por otro lado, la cantidad de silicio permanece sin cambios significativos, al igual que la intensidad de los picos de difracción de los feldespatos (ricos en silicio), en las cuatro muestras. Por lo tanto, se puede afirmar que desde un punto de vista químico-mineralógico, los agregados reciclados tienen una composición inherente a su origen (ígneo), que se enriquece con calcio por la cantidad de mortero adherido.

La técnica de caracterización química (XRF) fluorescencia de rayos X, a diferencia de la técnica de microanálisis EDS si es una técnica de análisis químico masivo o bulk, por lo tanto, sus resultados van a permitir validar los datos arrojados por microanálisis de rayos X por dispersión de energías (EDS), ya que en este trabajo se ha usado esta técnica (EDS) para evaluar composición química bulk.

Normalmente el microanálisis EDS se utiliza para analizar una sola fase o una mezcla de fases, pero en este trabajo se ha procurado como ya se dijo, tener polvos muy finos ($<75\ \mu$) y barridos muy grandes ($4.75\ \text{mm}^2$), con el propósito de obtener análisis representativos (bulk) de las muestras de agregado reciclados.

En ese sentido, con los resultados de fluorescencia de rayos X (XRF) se conocerá la verdadera composición bulk, y por lo tanto también se validará si el microanálisis (EDS) se puede usar para evaluar composición química (bulk/masiva).

En la tabla 5 se presentan los resultados de XRF. Cabe hacer mención que solo se muestran los principales óxidos, porque el propósito es evaluar la variación del calcio que es atribuido a la pasta de cemento. El contenido de óxidos menores y elementos traza no se discutirán en este documento.

Tabla 5. Análisis de fluorescencia de rayos X (XRF) de las muestras de agregados reciclados, expresado en porcentaje en peso (principales óxidos).

Óxidos	Concretos Reciclados S.A.		Concreto de vertederos	
	Grava reciclada Planta	Arena reciclada Planta	Arena reciclada Laboratorio	Arena reciclada laboratorio
CaO	19.11	15.76	9.78	12.33
SiO ₂	49.41	50.76	55.75	56.98
Al ₂ O ₃	8.44	9.25	10.52	10.84
Fe ₂ O ₃	3.99	4.40	4.59	4.21

Los resultados de XRF son consistentes con la información química proporcionada por EDS. Para dar un ejemplo, los contenidos de Ca (EDS) y CaO (XRF), que se atribuyen al aglutinante, están bien correlacionados, ya se puede ver que la concentración de Ca en la grava reciclada planta es el doble que la concentración de la grava reciclada en el laboratorio (Tabla 4). La misma relación se observa en los contenidos de CaO medidos por XRF (Tabla 5).

En resumen, la caracterización química (EDS y XRF) revela la variación en el contenido de compuestos de calcio entre las cuatro muestras.

4.4 Propiedades químicas (alcalinidad)

Retomando el tetraedro de la ciencia de los materiales, en este trabajo ya se cumplieron varios elementos del paradigma, por un lado, ya se determinó la estructura mediante el análisis mineralógico, ya se estableció el tipo de procesamiento, que en este caso será la molienda de los agregados reciclados a menos 75μ , — con este procesamiento se pretende activar los agregados reciclados y revelar sus propiedades químicas, específicamente su alcalinidad.

De acuerdo con Mymrin et al., y Evangelista et al., la portlandita Ca(OH)_2 debe estar presente en los agregados reciclados, pero en cantidades tan pequeñas que no se pueden detectar por medio de DRX, tal como sucedió en este trabajo. En esta investigación, se asume que la portlandita está presente rellenando los poros de la pasta de cemento, razón por la cual es necesario liberarla mediante la molienda para poder medir su alcalinidad.

La alcalinidad es la propiedad química responsable de la estabilización de suelos arcillosos, específicamente es la responsable de que ocurra la reacción puzolánica en ambientes acuosos con un pH de 12.5 aproximadamente. Como ya se mencionó arriba, mediante la reacción puzolánica se da el ataque alcalino (químico) de las minerales arcillosos y la formación de productos estables en forma de silicatos de calcio hidratados (C-S-H) similares a los formados durante la hidratación del cemento Portland y que son insensibles al agua.

En esta sección se medirá el pH de los agregados reciclados pulverizados para conocer su alcalinidad y posteriormente evaluar su desempeño como estabilizadores de suelos arcillosos.

Para abordar adecuadamente la sección de medición de pH, es necesario considerar que un concreto no carbonatado tiene un valor de pH de aproximadamente 12.5, principalmente debido a la presencia de hidróxido de calcio formado durante el proceso de hidratación del cemento, y este valor disminuye por debajo de 9.5 durante la carbonatación [Krajci & Janotka, 2000].

De la misma manera, se debe considerar que cuando se habla del pH del concreto, en realidad, esto se refiere al pH de la solución que llena los poros en la pasta de cemento, de modo que las especies disueltas en esa solución solo pueden venir de la pasta de cemento ya que los agregados en sí mismos se consideran inertes.

Teniendo en cuenta lo anterior, las mediciones de pH de las muestras pulverizadas de agregados reciclados mezclados con agua (tabla 6) demostraron el carácter alcalino de estos materiales con valores que varían desde un pH muy alcalino de 12.08 para la muestra de grava reciclada a 10.15 para la muestra de grava reciclada en laboratorio.

Tabla 6. Valores de pH medidos en agua de las muestras de agregados reciclados pulverizados.

	Concretos Reciclados S.A.		Concreto vertederos	
	Grava reciclada Planta	Arena reciclada Planta	Arena reciclada Laboratorio	Arena reciclada laboratorio
pH	12.08	11.09	10.15	10.48

Hay varias explicaciones posibles para la alta alcalinidad de las cuatro muestras de agregados reciclados, las cuales se consideran predominantemente carbonatadas de acuerdo con los datos de difracción. La primera es que existen álcalis solubles (Na y K) y cantidades de portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por debajo del límite de detección de DRX, que se disuelven y liberan los iones Ca^{2+} y OH^- manteniendo así un pH alto.

Aunque no fue posible identificar la presencia de portlandita por XRD, aquí finalmente se asume su presencia considerando este pH muy alto en todos estos residuos de la construcción y demolición reciclados.

La segunda explicación posible es que además de la disolución de los álcalis y Ca(OH)_2 , también se produce la disolución/liberación de iones Ca e hidroxilos presentes en el hemicarboaluminato de calcio $\text{Ca}_4\text{Al}_2(\text{CO}_3)_{0.5}(\text{OH})_{13} \cdot 5.5\text{H}_2\text{O}$ [Lagerblad, 2005]. Facilita esta disolución el aumento en el área superficial que experimenta la muestra cuando se muele para el experimento.

Los valores de pH se correlacionan bien con la intensidad de los picos de difracción del hemicarboaluminato de calcio en las cuatro muestras (Figuras 35 y 36); en otras palabras, las muestras con la mayor cantidad de hemicarboaluminato presentaron un pH alto.

En general, los datos de pH sugieren que un agregado reciclado con una mayor cantidad de pasta de cemento será más reactivo cuando se mezcle con agua, porque la concentración de Ca^{2+} y OH^- se incrementará por la disolución/liberación de estos iones presentes en ciertas fases del cemento hidratado (portlandita y posiblemente hemicarboaluminato de calcio).

De acuerdo con la literatura, la alteración de los minerales arcillosos en un medio alcalino se produce en un medio alcalino a partir de un pH de 11.7 [Gaucher & Blanc, 2006], razón por la cual solo se probará el desempeño como agente estabilizador del agregado reciclado que cumple con el valor de pH antes mencionado.

La grava reciclada planta en forma de agregado reciclado pulverizado, cuyo valor de pH medido en agua fue de 12.08 será el agente estabilizador de suelos que se evaluará en la siguiente sección.

Antes de entrar en detalles sobre la evaluación de las mezclas suelo - agua - agregado reciclado pulverizado específicamente grava reciclada planta, es mandatorio presentar la caracterización microscópica, mineralógica y química del suelo arcilloso (feozem háplico) del Valle Pachuca-Tizayuca, con el propósito de conocer si en realidad se trata de un suelo con minerales de arcilla, del mismo modo esta caracterización servirá para determinar cómo se modificará la mineralogía, estructura microscópica y composición química del suelo arcillosos con la adición del agregado reciclado pulverizado.

4.5 Caracterización del suelo arcilloso (feozem háplico)

4.5.1 Caracterización por Microscopia Electrónica de Barrido

Antes del procedimiento de secado, disgregado y cuarteo de la muestra, se seleccionaron varios terrones de suelo bien consolidados, se secaron a 90°C en una estufa y se analizaron por microscopía electrónica de barrido.

Se conoce que la microscopía electrónica permite estudiar las particularidades superfina de la morfología, pequeñas partículas de minerales y, en particular, la estructura de los agregados, minerales finamente dispersados, criptocristalinos y amorfos (minerales arcillosos, hidróxido de hierro, neoformaciones, etc.)

Del análisis morfológico de los terrones de suelo feozem háplico, se tiene que en la figura 45 (foto izq.), se observa en toda la imagen una estructura botroidal con aglomerados alargados, también se ven partículas pequeñas semiesféricas que se atribuyen al material alofano [Domínguez et al., 2012]. Así mismo en la parte inferior de la microfotografía se notan además partículas sutilmente facetadas [Vargas et al., 2012] que sugieren cierta cristalinidad (flecha).

En la microfotografía derecha, se observa una estructura cavernosa con varios poros en la parte central, así como también una partícula prismática en el fondo de un poro (a) que sugiere la presencia de planos cristalinos de corte atribuidos al cuarzo o feldespatos, además se pueden ver pequeños agregados de configuración no uniforme adosados a la estructura cavernosa. Asimismo, se notan pequeñas partículas amorfas y estructuras aparentemente hexagonales y cúbicas (b) en la parte superior izquierda. La morfología anterior sugiere la presencia de arcillas en este suelo, así como también material amorfo, y cuarzo [Domínguez et al., 2012].

Las estructuras simétricas se relacionan con la presencia de caolinita, dickita o arcillas inter-estratificadas [Meunier, 2003]. Finalmente, la estructura botroidal y cavernosa sugiere una matriz densa que condiciona la porosidad.

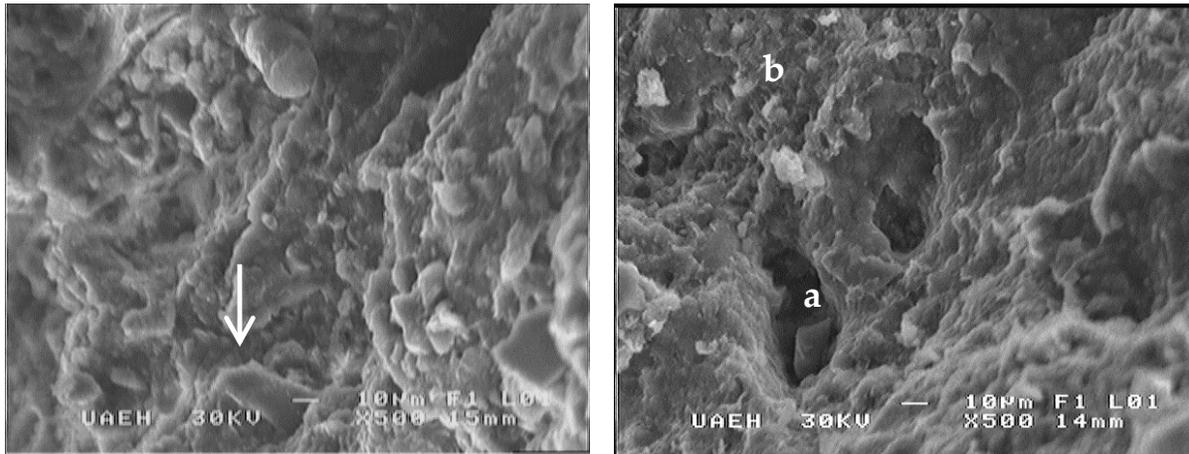


Figura 45. Micrografías MEB de un terrón de suelo feozem háplico (Hh/2).

4.5.2 Caracterización mineralógica

Mediante la técnica de difracción de rayos X, se determinó la mineralogía de este suelo (feozem háplico) — ver patrón de difracción en figura 46. Su composición está dominada por cuarzo, y feldespatos triclinicos (anortita, andesina y anortoclasa), así como en mediana proporción caolinita, y una mezcla de arcillas con irregular inter-estratificación (clorita-vermiculita-montmorillonita) ver figura 47.

Existen otros picos que no se identificaron, y una cantidad de material amorfo que se evidencia por el fondo tan alto del difractograma. Según el Dr. Juan Carvajal [2017] un fondo (background) alto significa que la muestra contiene hidrógeno, en este caso el hidrógeno se relaciona con fases amorfas (hidratadas).

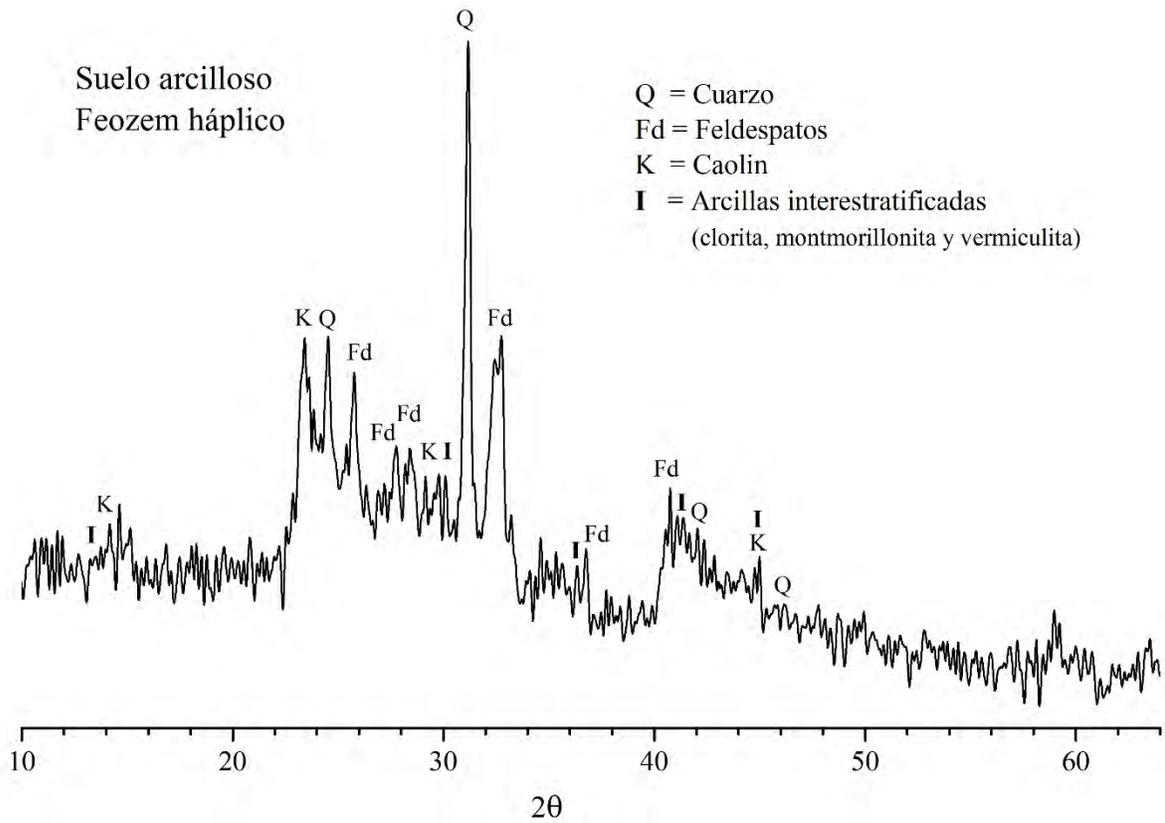


Figura 46. Patrón de difracción del suelo feozem háplico de la Cd. de Pachuca.

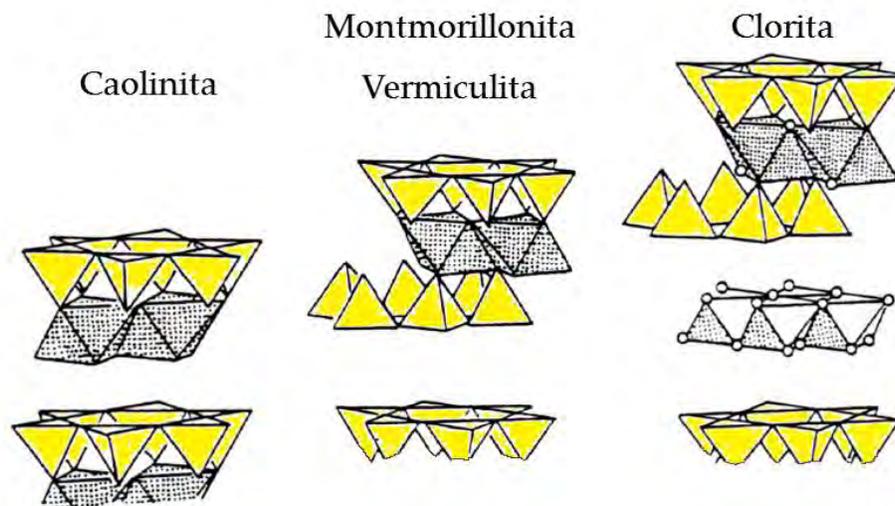


Figura 47. Estructura de las arcillas identificadas en el suelo arcilloso feozem háplico de la Ciudad de Pachuca.

La presencia mayoritaria de cuarzo se debe al contenido variable de esta especie en las rocas ácidas e intermedias que circundan la llanura del valle Pachuca-Tizayuca, y que fisiográficamente pertenecen a la sierra volcánica compleja de Pachuca (rocas riolíticas y andesíticas) [Sánchez et-al., 2005].

Por otro lado, se presume que la caolinita puede provenir de la mineralogía de alteración detectada en los distritos mineros de esta región [Sánchez et al., 2005]. Para el caso particular de la arcilla inter-estratificada (clorita-vermiculita-montmorillonita), se tiene lo siguiente: De acuerdo a Meunier [2003], la diversidad de los minerales de arcilla, se manifiesta espacialmente como una función de la época y de las condiciones de génesis tales como clima y altitud, por lo tanto es posible relacionar la presencia de cierta especie mineralógica con la siguiente representación (fig. 48), en donde se aprecia que las caolinitas ocurren en zonas planas y las mezclas de arcillas como la identificada en este suelo (clorita-vermiculita-montmorillonita), ocurren como resultado de procesos químicos muy evolucionados en zonas con cierta pendiente.

La estructura de las arcillas identificadas por difracción de rayos X, se presenta en la figura 47, en este gráfico se puede ver como es el apilamiento de los tetraedros de silicio y los octaedros de aluminio en estos minerales de arcilla, y también se observa el espacio intercapa donde se empaquetan las moléculas de agua produciendo la expansión del suelo.

La primera estructura corresponde a la caolinita cuyo potencial de expansión es limitado comparado con la estructura de los minerales de arcilla que componen la mezcla de arcillas inter-estratificadas (clorita-vermiculita-montmorillonita), ya que de acuerdo a Meunier, las esmectitas (montmorillonita) son las que poseen el mayor potencial de expansión, es decir son las más agua empaquetan en su intercapa, y en este caso la arcilla inter-estratificada contiene una de las arcillas que más se expanden (montmorillonita).

Reeves et al. menciona que la vermiculita es similar en estructura a las esmécticas (montmorillonita), pero con menor potencial de hinchamiento. Por su parte la clorita que también es un filosilicato, no puede alojar agua ni cationes en sus intercapas, por lo que no se hincha, sin embargo, es parte de la mezcla irregular de arcillas identificada.

La mezcla de arcillas es irregular, por lo tanto, no hay un orden en el apilamiento (inter-estratificación) en las capas de clorita, vermiculita y montmorillonita. Meunier [2003] afirma que la inter-estratificación es muy común en la naturaleza, así mismo Reeves et al., [2006] menciona que los minerales de arcilla de capas mixtas tienden a formarse por la transformación de micas y en menor medida, por clorita.

Cabe hacer mención que existe poca bibliografía acerca de la caracterización mineralógica de los suelos de Pachuca, de hecho, el único trabajo encontrado [Roy et al., 2010] menciona que está dominada por plagioclasas, cuarzo y minerales de arcilla, por lo que esta caracterización aporta información importante de los suelos del Municipio de Pachuca, Hgo.

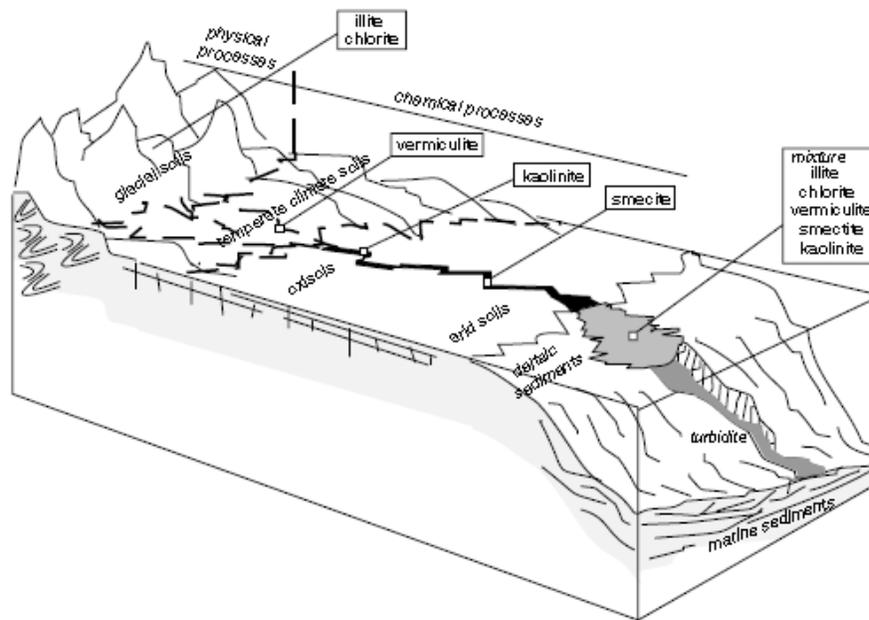


Figura 48. Representación esquemática de la diversidad de los minerales de arcilla.

Para reforzar la identificación de estos minerales de arcilla, se tiene que de acuerdo a la figura 49 [Reeves et al., 2006], para un suelo originado por rocas félsicas como este feozem háplico, y tomando en cuenta la precipitación pluvial anual de la ciudad de Pachuca que varía de 400 en el valle, hasta 900 mm en el Parque Nacional El Chico (límites montañosos con el Municipio del Mineral del Chico) [INEGI, 2009], el mineral de arcilla que predomina es la caolinita y en pequeña proporción la vermiculita y la montmorillonita (esmectita), minerales que forman parte de la arcilla interestratificada o en capas mixtas.

De conformidad con lo anterior, se confirman los resultados de difracción de rayos X, específicamente para las arcillas identificadas en esta muestra y que son responsables del comportamiento geotécnico difícil de este suelo de la ciudad de Pachuca, tal como se puede ver en las siguientes fotos tomada en condiciones de humedad en un sitio aledaño al lugar del muestreo (figuras 50 y 51).

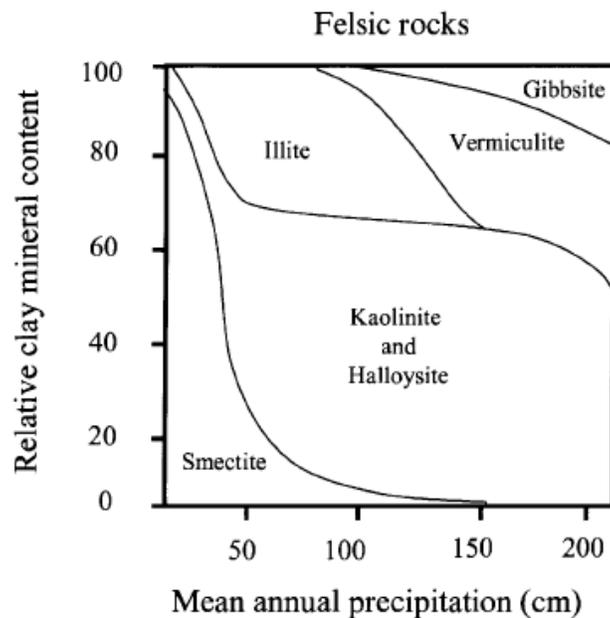


Figura 49. Contenido relativo de minerales de arcillas en función del tipo de roca y la precipitación



Figura 50. Foto del suelo arcilloso feozem háplico de la Cd. de Pachuca en condiciones de humedad, donde se observa el comportamiento plástico.



Figura 51. Foto del suelo arcilloso feozem háplico de la Cd. de Pachuca en condiciones de humedad donde se observa el comportamiento geotécnico difícil.

4.5.3 Caracterización química por EDS

En la tabla 7 se presenta los resultados del microanálisis cuantitativo EDS, de la muestra representativa del suelo arcilloso (feozem háplico de la Cd. de Pachuca), esta muestra se preparó de la misma manera que todas las demás en este trabajo.

Este análisis químico confirma los resultados de difracción de rayos X, ya que revela un enriquecimiento de silicio, lo cual le confiere una afinidad félsica, es decir, que en este suelo persiste la influencia de las rocas de las formaciones geológicas que suministraron el material (rocas félsicas predominantemente) [Reeves et al., 2006], tobas riolíticas, riolita, pórfidos riolíticos, andesita y brecha andesítica [Sánchez et al., 2005]. Estas rocas contienen principalmente cuarzo y feldespatos, ver figura 40.

Agregando a lo anterior, la cantidad de calcio, sodio y potasio es importante, porque proporcionan pistas acerca del tipo de feldespatos, en este caso la cantidad de K se relaciona bien con el tipo de feldespatos presentes en rocas félsicas. Para el caso del calcio, este se atribuye principalmente a la anortita que es un feldespato que contiene calcio.

Tabla 7. Análisis EDS del suelo arcilloso Feozem Háplico

Elemento	% en peso
Ca	1.09
Si	30.36
Al	11.42
Fe	5.60
Na	0.17
Mg	1.13
K	1.22
Ti	0.13
O	48.88
Total	100.00

De acuerdo a este apartado — caracterización del suelo arcilloso (feozem háplico) de la Ciudad de Pachuca, la principal conclusión es que, **si es un suelo arcilloso**, dicho de otra manera, si contiene minerales de arcilla (caolinita y una arcilla interestratificada), por lo tanto, si servirá para probar el desempeño de los agregados reciclados pulverizados como estabilizadores de suelo.

A continuación, el componente que faltaba del tetraedro de la ciencia de los materiales, **el desempeño** de estos materiales (agregados reciclados pulverizados) como estabilizadores de suelos arcillosos. Esta sección se divide en tres partes, primero las observaciones macroscópicas, seguida del estudio por DRX y finalmente la caracterización por MEB.

4.6 Desempeño de los agregados reciclados pulverizados como estabilizadores de suelos arcillosos

El propósito de este apartado será evaluar la actividad puzolánica de la grava reciclada en planta. Su desempeño se probará aplicando este agregado reciclado pulverizado al suelo arcilloso feozem háplico muestreado en la Ciudad de Pachuca.

Como ya se indicó en la parte experimental, para estas pruebas se utilizaron pequeños envases de polietileno transparente donde se prepararon las mezclas de suelo - agua - agregado reciclado pulverizado. Estas mezclas se elaboraron con la fracción (<45 μ) del suelo arcilloso (feozem háplico), agua destilada y grava reciclada planta molida a menos 75 μ en diferentes proporciones en peso (12.5, 25, y 50%).

Las mezclas se prepararon por duplicado y se almacenaron herméticamente por 365 días (12 meses), cabe hacer mención que como referencia (testigo) también se prepararon mezclas suelo - agua con la finalidad de evaluar el efecto del agente estabilizador en la mineralogía del suelo arcilloso de la Cd. de Pachuca.

En la tabla 8 se presenta la denominación y la proporción de las mezclas utilizadas en este experimento, aquí es importante mencionar que el agua destilada no se agregó usando alguna proporción, solo se procuró lograr un espejo de líquido sobrenadante, es decir, una vez que se mezclaron y agitaron los polvos secos dentro del envase, se agregó el agua destilada hasta que se formó una película de agua sobrante sobre la superficie de la mezcla suelo / estabilizador.

Nota. Líquido sobrenadante es el líquido que queda por encima de los sólidos, o la disolución que permanece tras la formación de un precipitado.

Tabla 8. Denominación y proporción de las mezclas de suelo / agregado reciclado pulverizado (grava reciclada planta).

Mezcla	Proporción en peso suelo / estabilizador
M00	1
M12	100 /12.5
M25	100 / 25
M50	100 / 50

4.6.1 Observaciones macroscópicas de las mezclas suelo – agua – agregado reciclado pulverizado (grava planta)

Apoyándose en la investigación de Limbachiya et al. [2007], que afirma que un agregado reciclado enriquecido con calcio asociado a la pasta de cemento liberara mayor cantidad de Ca soluble, y en el trabajo de Gaucher & Blanc [2007] que mencionan que la alteración de los minerales de arcilla en un medio alcalino ocurre a partir de valores de pH de 11.7, solamente se evaluará el desempeño de la grava reciclada pulverizada por tener un pH de 12.8 medido en agua.

De acuerdo a lo anterior, a partir de ahora cuando se hable de agregado reciclado pulverizado se hará referencia a la grava reciclada en la Planta Concretos Reciclados.

Como ya se apuntó, en este apartado se enumerarán las observaciones macroscópicas de las mezclas suelo - agua - agregado reciclado pulverizado, — estas observaciones se realizaron gracias a que los envases de las mezclas son transparentes.

Es importante señalar que cada mes durante 1 año se realizó la observación de cada muestra con la finalidad de seguir su evolución de manera macroscópica.

En el primer examen (a los 30 días de curado) se pudo observar que en la mezcla M50 con una proporción en peso suelo/estabilizador de 100/50, se habían formado precipitados color blanco que flotaban en el líquido sobrenadante (figura 52), estos precipitados en forma de nata se atribuyen a la carbonatación de pequeñas cantidades de Ca(OH)_2 remanente en la pasta de cemento adherida a los agregados reciclados.

Se cree que esta reacción es producto de la combinación del hidróxido de calcio liberado durante el proceso de molienda, con el CO_2 disuelto en el agua destilada o atrapado en los polvos, ya que las mezclas durante su curado no estuvieron expuestas al aire porque los envases se cerraron herméticamente.

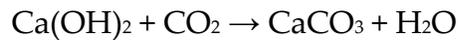


Figura 52. Mezcla M50, donde se observan precipitados color blanco que flotan en el líquido sobrenadante, aparentemente se trata de CaCO_3 .

La presencia de este precipitado CaCO_3 en forma de nata es evidencia que la portlandita Ca(OH)_2 , si está presente en lo agregados reciclados aun cuando no fue detectada por difracción de rayos X, lo anterior significa que cuando se hizo la mezcla

había pequeñas cantidades de hidróxido disponibles para favorecer la reacción puzolánica con la caolinita y la arcilla inter-estratificada del suelo arcilloso de Pachuca.

Se asume que estos precipitados (figura 52) son carbonato de calcio CaCO_3 , tomando en consideración que uno de los mecanismos asociados con la estabilización de materiales arcillosos es precisamente la carbonatación del Ca(OH)_2 adicionado (UN,1992), de acuerdo a la siguiente reacción.



Otro dato importante del examen visual de las mezclas suelo - agua - agregado reciclado pulverizado es que, el líquido sobrenadante desaparece de las muestras después de 3 meses aproximadamente, excepto en las mezclas con mayor proporción suelo/estabilizador (100/50) M50 (figura 53). En estas mezclas con mayor cantidad de agregado reciclado pulverizado el agua sobrante (líquido sobrenadante) no solo se mantuvo, sino que aparentemente aumento su nivel, por lo que se presume que, en mixturas con mayor cantidad de estabilizador, el agua que estaba empaquetada en la inter-capa de las arcillas ha sido liberada una vez que las arcillas ha colapsado debido a la acción de los compuestos alcalinos contenidos en el estabilizador (grava reciclada planta).

Es necesario resaltar, que hasta el décimo mes se hicieron evidentes los cambios en las mezclas M25 y M50, estos cambios consisten en la aparición de productos de reacción en forma de puntos redondos y dispersos aparentemente a lo largo de todo el volumen de la probeta (figura 54), estos puntos son visibles en las paredes y fondo del envase de plástico que contiene la mezcla. Las observaciones a 10 meses se resumen en la tabla 9.

Tabla 9. Observaciones a 10 meses de las mezclas suelo-agua-agregado reciclado pulverizado.

Mezcla	Proporción Suelo/estabilizador	Observaciones a 10 meses de curado
M12	100/12.5	Sin líquido sobrenadante, pero con humedad (fig. 53) Puntos aislados de precipitados en la superficie de la muestra Sin productos de reacción evidentes (fig. 54)
M25	100/25	Sin líquido sobrenadante, pero con humedad (fig. 53) Pequeñas manchas de precipitados en la superficie de la muestra Presencia de productos de reacción dispersos en el fondo y paredes del envase (fig. 54)
M50	100/50	Precipitados de CaCO_3 en el líquido sobrenadante (fig. 53) Coalescencia de abundantes productos de reacción con formas circulares en el fondo y paredes del contenedor (fig. 54)
M00	100	Sin agua sobrante, pero con humedad (fig. 53) Sin precipitados en la superficie Sin productos de reacción (fig. 54)

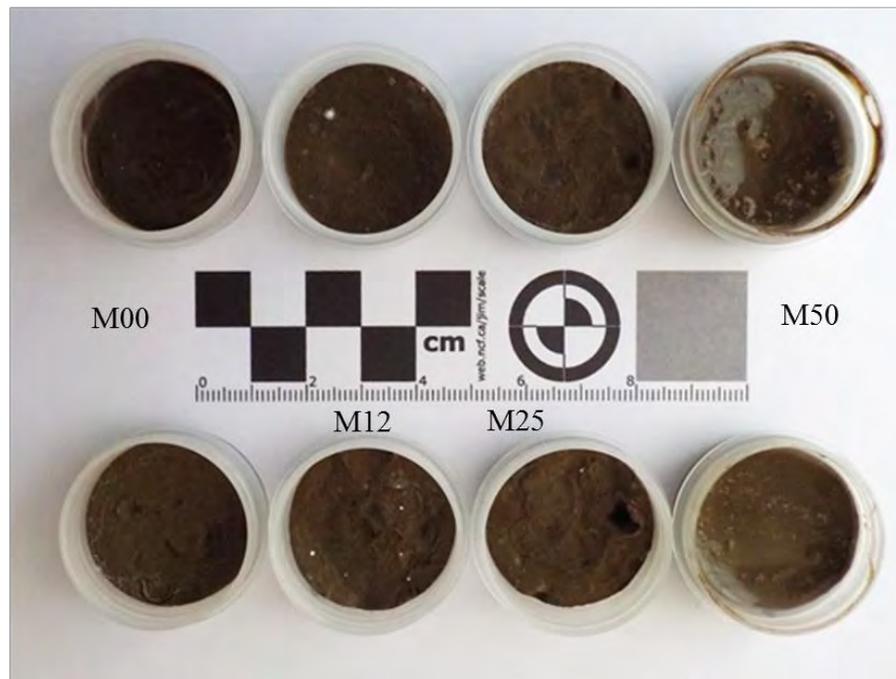


Figura 53. Vista de las mezclas destapadas donde se observan los precipitados de CaCO_3 y el líquido sobrenadante. Se presentan por duplicado.

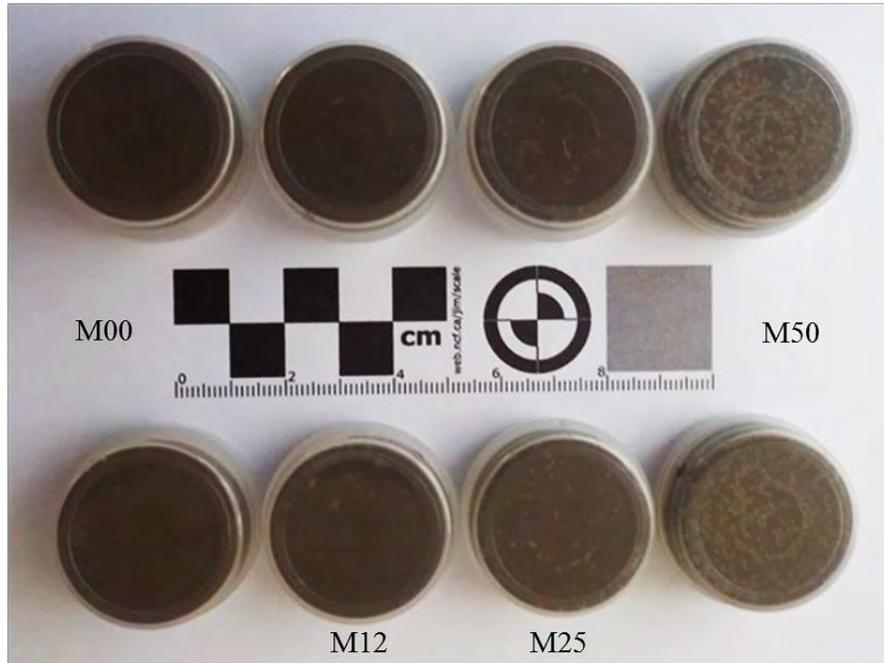


Figura 54. Vista del fondo de los envases donde se observan los productos de reacción de las mezclas suelo-agua-agregado reciclado pulverizado, se presentan por duplicado.

Por otro lado, la figura 54 es bastante reveladora ya que se puede ver a simple vista que los productos de reacción entre las arcillas del suelo y los compuestos alcalinos de los agregados reciclados (portlandita y hemicarboaluminato de calcio).

Estos productos de reacción se presentan en forma de pequeños círculos de color blanquecino, se asume que son minerales neoformados producto de la reacción puzolánica, que como ya se dijo en el apartado de antecedentes, son las reacciones químicas que tienen lugar entre la cal y las arcillas del suelo que dan como resultado la formación de silicatos de calcio hidratados (C-S-H) principalmente.

En las mezclas M12 con menor cantidad de estabilizador (grava reciclada planta), apenas se notan pequeños puntos de minerales neoformados, mientras que en las mezclas M25 y M50, los puntos son evidentes, es más, en las últimas se forma una redícula que se supone es tridimensional a lo largo del seno de la muestra contenida en el envase plástico, en la imagen (fig. 55) es posible distinguir la coalescencia de los

puntos, cual si se tratase de un mecanismo de nucleación y crecimiento lo que supondría una cinética lenta.

Estos productos de reacción (círculos de color blanquecino) se forman mediante microsistemas similares a los que alteran la roca durante el intemperismo [Meunier, 2003]. En los microsistemas las reacciones de disolución-recristalización están reguladas por las condiciones de equilibrio químico locales que provocan gradientes de altos a bajos potenciales, disparando la transferencia de componentes químicos [Meunier, 2003], lo anterior es una explicación tentativa para la forma de los productos de reacción y su distribución en las probetas (mezclas).



Figura 55. Mezcla M50, donde nota la coalescencia de los productos de reacción, izq. detalle.

Después de 12 meses (1 año), y previo a la caracterización mineralógica y microscópica, las muestras se secaron sin sacarlas del envase plástico a 70 °C en una estufa de laboratorio, se realizaron observaciones para seguir la evolución de contracción y la típica formación de grietas de los suelos arcillosos.

En la figura 56 las imágenes evidencian una verdadera estabilización del suelo arcilloso (feozem háplico) a partir de la muestra M25, es decir, una mezcla de suelo-concreto reciclado pulverizado alcanza la estabilidad volumétrica, a partir de adiciones de 25% en peso de estabilizador.

En la foto de la figura 56 se resume el proceso de estabilización, tomando en cuenta que la muestra sin estabilizador (extrema izquierda) es la de referencia, y las subsecuentes son las mezclas con 12.5, 25 y 50% en peso de concreto reciclado.

En ausencia de estabilizador (M00) el suelo arcilloso tiene un comportamiento típico, ya que, al secarse el agua abandona la inter-capa de las arcillas (caolinita, montmorillonita y vermiculita), provocando el encogimiento y la formación de grietas de contracción en la muestra.

En este caso se puede ver un patrón de agrietamiento, en donde, de una abertura más grande nace casi perpendicular una grieta más estrecha y de esta otra con ramificaciones. En las fotos de la figura 57 se presenta el patrón de agrietamiento in situ del suelo feozem háplico usado en estas pruebas, para compararlo con las mezclas.

La mezcla M12 presenta un patrón de grietas similar, pero las aberturas son más estrechas y ramificadas, esta muestra con 12.5 % de estabilizador ha sufrido una contracción significativa que puede afectar su comportamiento mecánico, por lo cual esta muestra se considera con una estabilización no satisfactoria.

En lo que respecta a M25 y M50 es evidente que el proceso de estabilización se ha llevado a cabo después de 12 meses, toda vez que ya no se presentan las grietas transversales a lo largo del envase, además la abertura de las fisuras disminuye en razón de la cantidad de estabilizante, tal es el caso de M50 (extrema derecha) donde se puede ver una fisura muy estrecha que no logra cruzar la superficie de la muestra.

De acuerdo a estas observaciones se considera que M25 y M50 han alcanzado estabilidad volumétrica, por lo tanto, se consideran estabilizadas, considerando como criterio la disminución de la contracción al secado que significa una reducción del potencial de expansión [Croft, 1967].

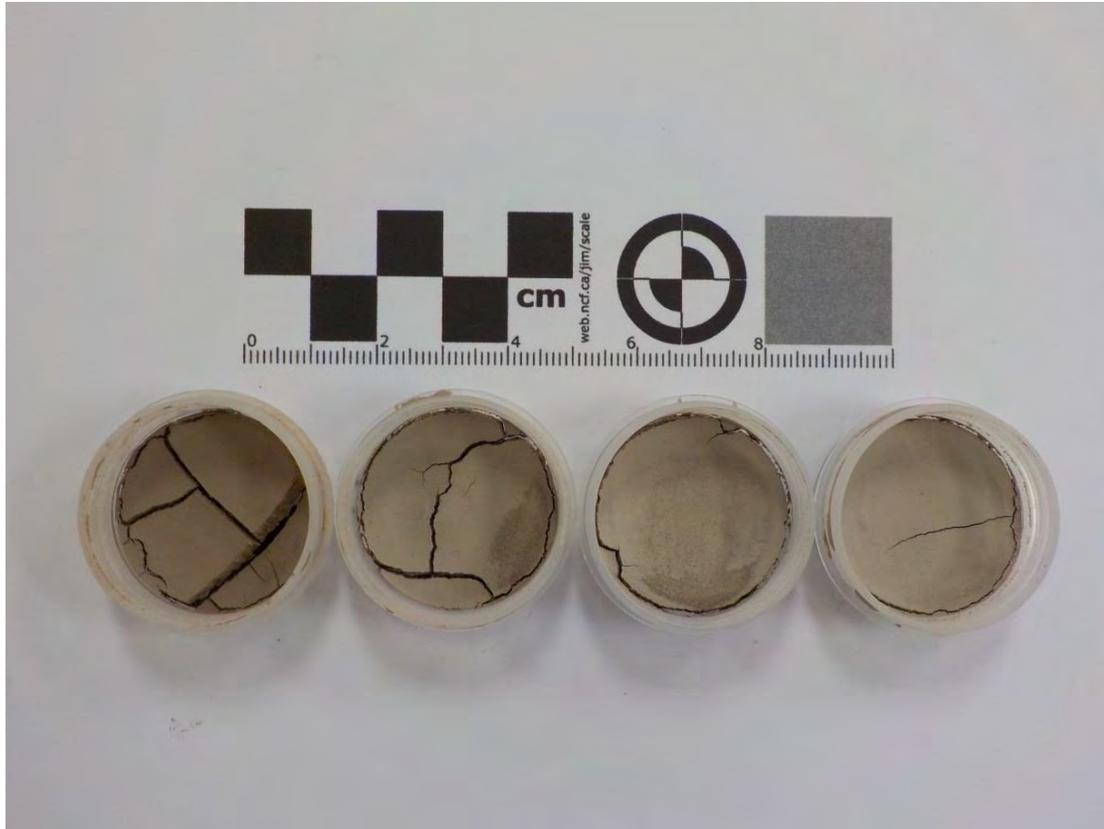


Figura 56. Mezclas secas donde se observa el efecto de los agregados reciclados pulverizados en el suelo arcilloso, a la izquierda el suelo sin tratar y hacia la derecha las mezclas M12, M25 y M50. Obsérvese que el agrietamiento típico de un suelo arcilloso disminuye.



Figura 57. Fotos de agrietamiento típico del suelo feozem háplico de Pachuca usado en este trabajo, donde es posible observar la contracción (encogimiento) que sufre el suelo al secarse. Nótese que el patrón de agrietamiento de la probeta testigo (M00) es muy similar a estas imágenes.

A pesar de que las observaciones macroscópicas indican que las muestras de suelo se han estabilizado a partir de adiciones de 25% en peso de estabilizador, es mandatorio determinar si en realidad hay productos de reacción entre los minerales de arcilla y los compuestos base calcio de los agregados reciclados, dicho de otra manera, es preciso determinar si hay minerales neo formados producto de la reacción puzolánica.

4.6.2 Caracterización mineralógica de las mezclas suelo-agua-agregado reciclado pulverizado (grava planta)

La clara desventaja de la evidencia visual, es que no se conoce la composición mineralógica de estos productos de reacción, por lo que es necesario comprobarlo por difracción de rayos X (DRX).

Las mezclas suelo - agua - agregado reciclado pulverizado se secaron a 70 °C en sus propios moldes como ya se indicó, después se sacaron de los envases y se secaron en charolas de aluminio a 100 °C por 24 horas previo a la difracción de rayos X.

En la figura 58 se revelan los resultados de este análisis, presentándose los difractogramas de las mezclas suelo-concreto reciclado (M25 y M50) comparadas con el patrón de difracción del suelo feozem háplico y de la grava reciclada planta, cabe hacer mención que la mezcla M12 no se incluye, ya que no presenta diferencias significativas con respecto a la muestra de suelo.

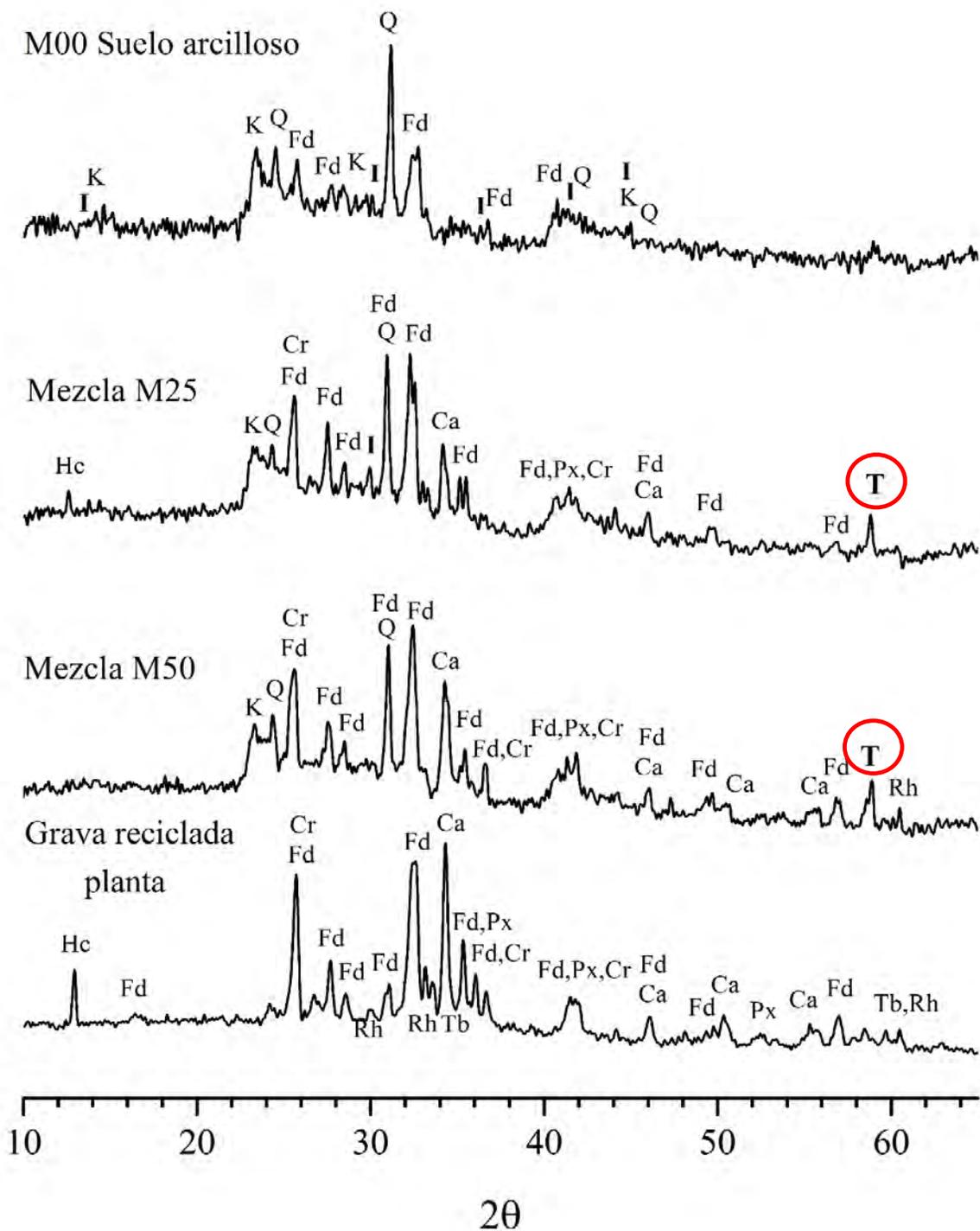


Figura 58. Difractogramas de las mezclas M25 y M50 comparados con el suelo sin tratar y la grava reciclada planta, donde, Fd= Feldspatos triclinicos, Q= Cuarzo, K= Caolinita, I= Arcilla inerestratificada, Cr = Cristobalita, Ca = Calcita, Hc = Hemicarboaluminato de calcio, Px = Piroxeno, Rh= Rosenhahnita, Tb= Tobermorita y T= tobermorita neoformada (círculo rojo).

Del análisis de estos patrones de difracción se desprenden fuertes evidencias que sustentan el argumento de que, se ha logrado la estabilización de un suelo arcilloso con un residuo de la construcción y demolición reciclado (grava reciclada en la Planta Concretos Reciclados). Primeramente, se tiene que, los picos de la caolinita y la arcilla inter-estratificada han disminuido de intensidad [Al-Rawas, 2002] y otros han desaparecido, esto significa que parte de los minerales de arcilla se han transformado en minerales estables, asumiendo que el hidróxido de calcio presente en el concreto reciclado ha reaccionado con la caolinita y la arcilla inter-estratificada.

También ha desaparecido totalmente la señal del hemicarboaluminato de calcio en la muestra M50, lo cual implica su disolución y posterior combinación con las arcillas o con silicatos amorfos que componen el suelo. Cabe destacar que en condiciones de servicio el hemicarboaluminato del concreto se transformará eventualmente a calcita [Runcevsky et al., 2012], sin embargo, en este caso el equilibrio químico es diferente por la presencia de los silicatos cristalinos y no cristalinos, además de las arcillas del suelo.

La evidencia más fuerte de este estudio mineralógico que comprueba la estabilización del suelo, es la aparición del pico de la tobermorita neoformada (T) [Diamond et al., 1963] en las mezclas M25 y M50. La presencia de este mineral neoformado (indicado en el círculo rojo), es prueba de que ha ocurrido la reacción puzolánica, por tanto, los productos de reacción observados como una red de círculos blancos en las probetas se atribuyen a la tobermorita neoformada, mineral que desarrolla resistencia en los suelos durante el proceso de estabilización [Chaunsali & Peethamparan, 2011].

En este punto es necesario resaltar que no debe confundirse la tobermorita detectada en los agregados reciclados con la tobermorita neoformada, puesto que no se trata de la misma estructura, y por ende no difractan a los mismos ángulos.

La tobermoritas de acuerdo con el trabajo de Biagioni et al. [2015], se caracterizan estructuralmente por ser capas paralelas al plano (001) formadas por poliedros de calcio coordinados entre 7 oxígenos, y que están decoradas por ambos lados por cadenas de tetraedro de sílice (SiO_2) ver figura 59.

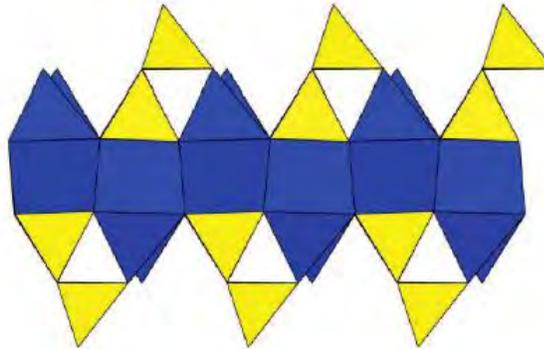


Figura 59. Estructura de la tobermorita, los poliedros azules son de calcio con una coordinación 7 y los tetraedros de silicio en amarillo decorando a ambos lados la capa de poliedros de calcio. Imagen tomada de Biagioni et al., 2015.

La tobermorita o más bien el grupo de las tobermoritas incluye un número de fases de silicato de calcio hidratado (C-S-H) que difieren entre sí por su estado de hidratación (figura 60), es decir tienen moléculas de agua intercalada entre las capas de calcio y de silicio, lo cual modifica el apilamiento y por lo tanto la distancia entre los planos basales.

La diferencia del espaciamiento basal (001) [Biagioni et al., 2015] será la condición que permitirá distinguir una tobermorita originada por la hidratación del cemento que compone la pasta de cemento adherida al agregado reciclado, de una tobermorita neoformada durante la reacción puzolánica que se da entre los minerales de arcilla y el hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

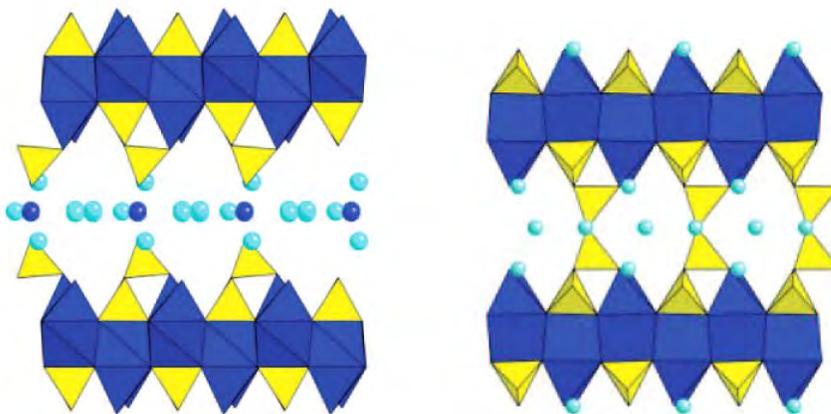


Figura 60. Diferencia de espaciamiento basal producida por la presencia de moléculas de agua (esferas azul claro) intercaladas en el apilamiento de las capas de poliedros de calcio y tetraedros de sílice, nótese que en la estructura de la izquierda (plumbierita) también hay iones de calcio (esferas azul marino) acomodados entre las capas. A la derecha una tobermorita hidratada. Imágenes tomadas de Biagioni et al., 2015

Dicho de otra manera, el contenido de agua o grado de hidratación de una tobermorita nos dará un distinto espaciamiento basal y permitirá distinguir unas estructuras de otras.

En este caso la tobermorita neoformada $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2$, tiene menor grado de hidratación que la tobermorita de la hidratación del cemento $\text{Ca}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ o tobermorita de la pasta de cemento adherida a los agregados reciclados. Sin embargo, el mineral de nueva formación muestra un pico amplio cercano a 59° (círculo rojo) que denota una baja cristalinidad, es decir puede ser una versión imperfecta de la tobermorita.

El mineral neoformado tiene un espaciamiento entre planos basales de 9.3758 \AA , mientras que la tobermorita pre-existente o de la hidratación del cemento posee un espaciamiento basal de 11.2425 \AA . En todo caso ambas son genéricamente silicatos de

calcio hidratados (C-S-H), que se ajustan al modelo estructural de la tobermorita [Manzano et al., 2010].

A propósito de los otros minerales presentes en los agregados reciclados, ¿Cuál es su participación en la reacción puzolánica? La calcita, producto de la carbonatación de la pasta de cemento, tiene una disolución limitada y no contribuye a la reacción puzolánica, puesto que su valor de pH, es de 9.

En cuanto a los silicatos de calcio hidratados cristalinos (tobermorita y rosenhahnita), estos minerales no tienen participación en la reacción puzolánica (proceso de estabilización de suelos), porque, aunque tienen cierta alcalinidad, son estables termodinámicamente, por lo tanto, tienen una disolución muy lenta, o más bien puede afirmarse que en ambientes acuosos solo se decalcifican [Jakobsen et al., 2016].

Los picos de difracción de la calcita y de los feldespatos triclinicos permanecen sin cambios aparentes considerando la proporción de las mezclas suelo - agregado reciclado pulverizado.

Por su parte es de especial interés la participación del hemicarboaluminato de calcio en el proceso de estabilización de las mezclas suelo-agua-agregado reciclado pulverizado, debido a que los picos de difracción de este compuesto de calcio desaparecen en la mezcla M50 (con mayor cantidad de estabilizador) y disminuyen en la mezcla M25 (25% en peso de agregado reciclado). Lo anterior significa que el hemicarboaluminato se está disolviendo, dando como resultado la liberación de iones de calcio Ca^{2+} y iones hidroxilo OH^- , que si contribuyen a mantener la alcalinidad necesaria para que la reacción puzolánica ocurra.

En el apartado de propiedades químicas de los agregados reciclados, ya se había propuesto que además de la disolución del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ remanente o no carbonatado,

también se producía la disolución / liberación de iones Ca e hidroxilos presentes en el hemicarboaluminato de calcio $\text{Ca}_4\text{Al}_2(\text{CO}_3)_{0.5}(\text{OH})_{13}\cdot 5.5\text{H}_2\text{O}$, y ahora con estos resultados se confirma que efectivamente el hemicarboaluminato se disuelve y contribuye a mantener el pH alcalino necesario para la reacción puzolánica.

Un incremento en la concentración de iones OH^- , incrementara el pH, produciendo la disolución de los tetraedros de silicio y los octaedros de aluminio de las arcillas [Yong & Ouhadi, 2007].

Los anteriores argumentos deben ser interpretados con cautela en cuanto al mecanismo de reacción y la termodinámica de la estabilización, hasta en tanto no se tengan datos químicos y termodinámicos que lo determinen, sin embargo, parece ser que la estabilización del suelo arcilloso ha ocurrido.

El estudio por DRX realizado a las mezclas suelo-agua-agregado reciclado pulverizado, confirma la presencia de tobermorita mineral neoformado, producto de la reacción entre los minerales de arcilla (caolinita y arcillas inter-estratificadas) del suelo en cuestión y los minerales base calcio (portlandita y hemicarboaluminato de calcio) presentes en el agregado reciclado probado en este experimento (grava reciclada planta). No obstante, aun cuando evidentemente la estabilización del suelo feozem háplico ocurre a partir de la mezcla M25 (adiciones de 25% en peso de estabilizador), es importante saber si a nivel microscópico hay cambios.

La tobermorita neoformada o genéricamente (C-S-H), tiene el hábito acicular o fibroso necesario para que se dé la trabazón o entrelazamiento que genera resistencia en un suelo estabilizado. En la figura 61 se presenta una micrografía de un suelo tratado por Solanki & Zaman [2012] con estabilizadores base calcio, con la finalidad de que el lector tenga una idea de la morfología acicular/fibrosa de los minerales neoformados producto de la reacción puzolánica.

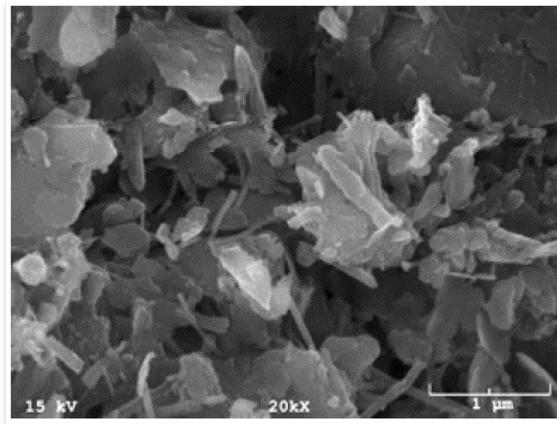


Figura 61. Micrografía tomada del trabajo de Solanki & Zamanm 2012, donde es posible observar las formas aciculares y fibrosas de los C-S-H (minerales neoformados).

A continuación, el apartado final del capítulo de resultados de esta tesis, que consiste en la caracterización por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), en estos análisis se determinará la estructura microscópica de los compuestos puzolánicos (minerales neoformados). Además, se buscará evidencia del mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas del suelo arcilloso.

5.8.3 Caracterización microscópica de las mezclas suelo-agua-agregado reciclado pulverizado (grava planta)

Como se explicó al principio, esta tesis, aunque trabaja un tema de ingeniería civil, lo hace desde el enfoque de la ciencia de los materiales sin entrar en la mecánica del medio continuo, terreno de ingenieros civiles y mecánicos.

En ese sentido lo que interesa a la ciencia de los materiales, es examinar la estructura ya sea a nivel atómico o a escala micrométrica, porque con el conocimiento de la estructura se pueden entender las propiedades de los materiales y su posible aplicación.

A partir de esta argumentación, en este apartado se estudiará la microestructura de las mezclas suelo-agua-agregado reciclado pulverizado, con la finalidad de confirmar visualmente la formación de minerales estables producto de la reacción puzolánica entre las arcillas y los componentes alcalinos solubles (portlandita y hemicarboaluminato de calcio) que se liberan cuando se pulverizan los agregados reciclados (grava reciclada planta). El lector debe recordar que la grava reciclada planta es la que más contenido de pasta de cemento posee, porque contiene mayor cantidad de fragmentos enteramente formados de mortero, en resumen, es la más alcalina con un pH de 12.08.

De acuerdo al estudio mineralógico, en las mezclas M25 y M50 se determinó que los picos de difracción de la caolinita y de la arcilla inter-estratificada (clorita-vermiculita-montmorillonita), disminuyeron en intensidad [Al Rawas et al., 2005], lo anterior significa que una porción de estos minerales arcillosos colapsó por el ataque alcalino de los iones OH⁻, generados por la disolución de la portlandita Ca(OH)₂ y el hemicarboaluminato de calcio Ca₄Al₂(CO₃)_{0.5}(OH)₁₃·5.5H₂O.

Es necesario enfatizar que en los patrones de difracción el principal pico del hemicarboaluminato desaparece en la mezcla M50 y disminuye en la mezcla M25, lo que significa que este mineral se ha disuelto y reaccionado.

Así mismo la principal evidencia de la transformación de estos minerales es la aparición del pico de difracción de la tobermorita neoformada (~59°), que no debe confundirse con la tobermorita detectada en los agregados reciclados.

Además de los resultados de DRX, la evidencia irrefutable de que la estabilización volumétrica ocurrió, se observa directamente en la mínima contracción en las mezclas M25 y M50 (fig. 56).

A pesar de que existe certeza sobre la estabilización del suelo arcilloso, es importante saber; ¿qué está pasando a nivel microscópico? — Para responder a esta pregunta se presenta el estudio por microscopía electrónica de barrido donde se confirma que la reacción puzolánica ha ocurrido, ya que se dio la formación de minerales estables (C-S-H) con hábitos cristalinos aciculares y/o fibrosos que son los responsables del desarrollo de resistencia en un suelo.

El desarrollo de resistencia ocurre por la trabazón que generan los cristales aciculares/fibrosos, de manera similar a lo que ocurre en la hidratación del cemento cuando el crecimiento de los cristales de silicato de calcio hidratado propicia el entrelazamiento y amarre, produciendo la resistencia típica del concreto.

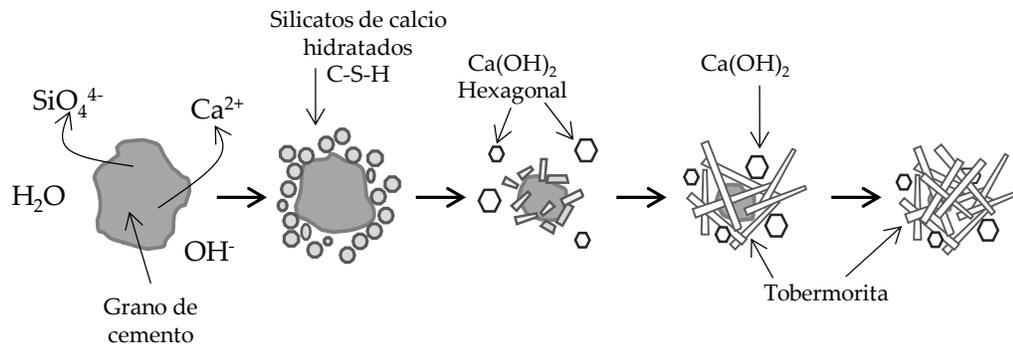
Como ya se apuntó arriba, la raíz etimológica (*del latín*) de la palabra concreto (*concretus*) significa crecer juntos, y es precisamente lo que se busca en esta sección, conocer si se dio el crecimiento de cristales fibrosos o aciculares en las mezclas suelo-agua-agregado reciclado pulverizado — el crecimiento de cristales de este tipo produce la trabazón y el desarrollo de resistencia en un suelo tratado con agentes alcalinos, al igual que en el endurecimiento del concreto.

Para ilustrar lo anterior, se presenta la figura 62 mostrada en el marco teórico donde se aprecia el modelo idealizado de lo que ocurre tanto en la hidratación del cemento como en la estabilización de suelos arcillosos con la reacción puzolánica.

Considerando lo anterior, en este análisis por MEB el objetivo será encontrar los cristales aciculares/fibrosos de la tobermorita neoformada o genéricamente (C-S-H), antes que describir la morfología de las micrografías.

Adicionalmente también se presentan las fotografías de la mezcla testigo M00 sin estabilizador para poder comparar los resultados.

Hidratación del cemento



Reacción puzolánica

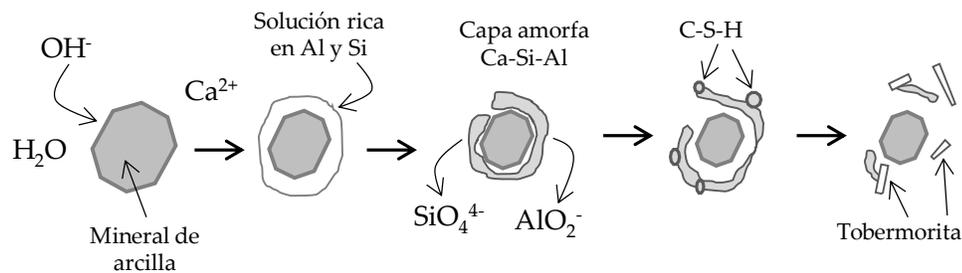


Figura 62. Modelo idealizado de las etapas de la hidratación del cemento y de la reacción puzolánica, donde es posible observar que los silicatos de calcio hidratados (tobermorita) crecen en forma de agujas y fibras que se entrelazan entre sí y con otras partículas. Imagen tomada y modificada de Takemoto & Uchikawa, 1980.

Durante las sesiones de MEB, el objetivo fue buscar a diferentes aumentos y a lo largo de toda la muestra la presencia de minerales neoformados en forma de agujas o fibras. La preparación de las muestras consistió en disgregar y homogenizar las mezclas secas antes de tomar una porción para MEB.

Para el caso de la muestra testigo o blanco que fue una mezcla de suelo - agua M00 (figura 63), los gráficos definitivamente son muy similares a los tomados al terrón de suelo, sin embargo, se presentan con el propósito de demostrar que el suelo arcilloso

feozem háptico no contiene en su composición minerales con formas alargadas que puedan causar confusión en la búsqueda de minerales fibrosos o aciculares.

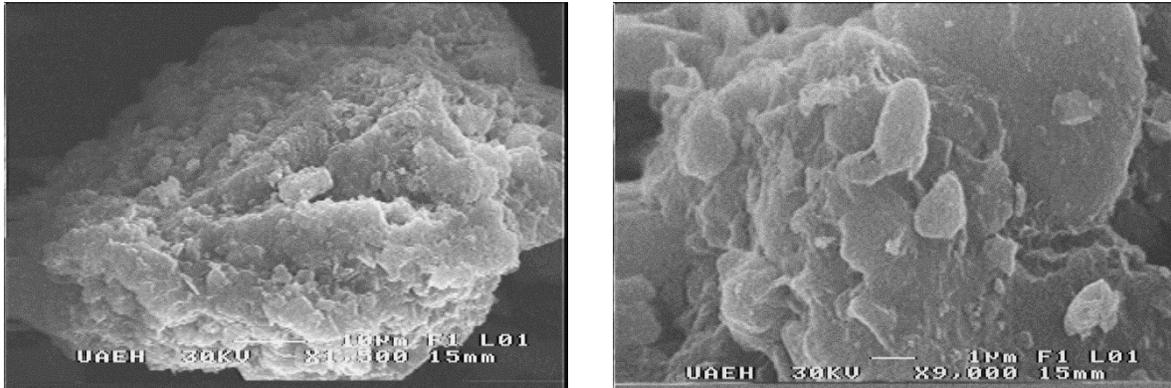


Figura 63. Mezcla suelo – agua M00 (suelo sin estabilizar). Estas micrografías MEB son muy similares a las presentadas en la caracterización microscópica del suelo usado en este trabajo.

Por su parte, en la mezcla M12 (suelo-agua-12.5% en peso de agregado reciclado pulverizado) se comprobó que no se formaron productos de reacción entre el suelo y el agregado reciclado pulverizado (grava reciclada planta), más bien las micrografías (figura 64) son muy parecidas a la muestra testigo, estos resultados coinciden con los datos de difracción de rayos, donde se determinó que a una proporción en peso de 12.5% de estabilizador no se logra la estabilización, puesto que no se produce la tobermorita neoformada.

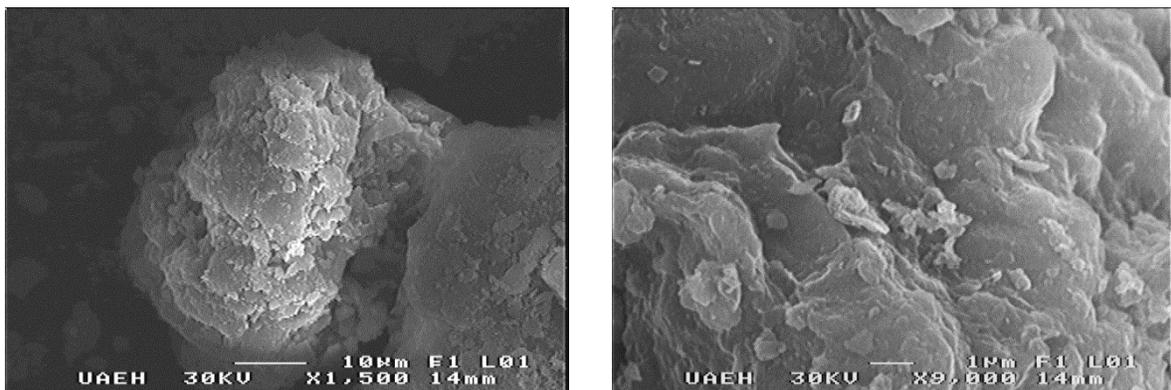


Figura 64. Mezcla M12 suelo – agua – 12.5% en peso de agregado reciclado pulverizado. En estas micrografías no se observan cristales aciculares o fibrosos, más bien son parecidas a la muestra testigo (suelo sin estabilizador).

Cabe hacer mención, que en las observaciones macroscópicas esta mezcla presenta un patrón de agrietamiento similar al suelo sin tratar, pero grietas más estrechas y menos ramificadas. En esta mezcla aparentemente ocurrió un proceso de estabilización leve, no obstante, la disminución del agrietamiento puede atribuirse a la dilución del suelo arcilloso con el agregado reciclado pulverizado, en otras palabras, se debe a un efecto físico más que a una verdadera transformación química, que es la que se busca con la estabilización de suelos.

Para el caso de la mezcla M25 suelo - agua - 25% en peso de agregado reciclado pulverizado, en las observaciones macroscópicas es evidente que la estabilización ha ocurrido, considerando como criterio la disminución de la contracción al secado de la mezcla, esta probeta (figura 56) ya no presenta el patrón de agrietamiento típico del suelo arcilloso seco, pero que sucede a nivel microscópico.

En esta mezcla M25 (figura 65) ya es posible observar el crecimiento de cristales de tobermorita neoformada en forma de racimos de fibras (micrografía a 9000x), en la micrografía tomada a 1500x se marca en un recuadro la ubicación de las fibras.

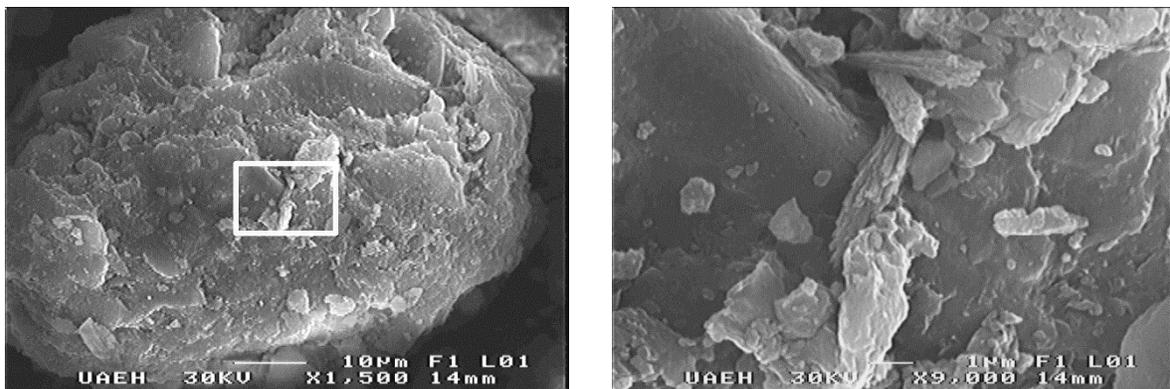


Figura 65. Mezcla M25 suelo – agua – 25% en peso de agregado reciclado pulverizado. En estas imágenes se observa la tobermorita neoformada en forma de fibras, en la micrografía a 1500x (izquierda) se marca con un recuadro la ubicación de las fibras que se presentan a mayores magnificaciones en la foto de la derecha.

Cuando se habla de que la reacción puzolánica ha ocurrido y por lo tanto la estabilización del suelo arcilloso, el proceso incluye la disminución de la cantidad de minerales arcillosos por el ataque alcalino y la formación (precipitación) de los silicatos de calcio hidratados (C-S-H) en este caso tobermorita neoformada, sin embargo para estos experimentos debe tomarse en cuenta que la proporción en peso adicionada de agregados reciclados pulverizados (25%) también tiene un efecto en la estabilización pero de carácter físico.

Este efecto como ya se mencionó arriba es la dilución, pero no una dilución química sino una dilución física de un sólido granulado con respecto a otro, en otras palabras, el efecto adverso de la expansión/contracción de las arcillas, también se ve disminuido por la contribución física del estabilizador que está compuesto por minerales que reaccionan (portlandita y hemicarboaluminato de calcio) y minerales inertes, feldespatos y calcita principalmente.

No obstante que se trata de una sumatoria de fenómenos que contribuyen a la estabilización de un suelo arcilloso, lo importante en esta caracterización microscópica es que la tobermorita neoformada detectada en la caracterización mineralógica, se puede ver a partir de la mezcla con una adición de 25% en peso de agregado reciclado pulverizado. Esto significa que este agente estabilizador (grava reciclada planta pulverizada), si tiene la cantidad suficiente de compuestos alcalinos base calcio (portlandita y hemicarboaluminato de calcio) para lograr el ataque químico de las arcillas y su posterior transformación en tobermorita neoformada con hábito fibroso.

En lo que concierne a la mezcla M50 suelo - agua - 50% en peso de agregado reciclado pulverizado, en primer lugar, debe mencionarse que en el patrón de difracción de esta mezcla (fig. 58), la reflexión (pico de difracción) de la tobermorita neoformada es más intensa que en la mezcla anterior, en segundo lugar, visualmente las grietas de contracción son mínimas y sobretodo más estrechas (fig. 56).

En esta mezcla se lograron las mejores micrografías (figuras 66, 67 y 68), ya que los minerales con formas aciculares son relativamente abundantes en esta mezcla, esto implica que una mayor cantidad de minerales arcillosos, no solo sufrió el ataque alcalino de los polvos de agregados reciclados, sino que también ocurrió la formación/precipitación de los silicatos de calcio hidratados (tobermorita neoformada).

En las figuras 66 y 67, se presenta del lado izquierdo la imagen MEB que fue capturada cuando se ubicaron los minerales con hábito acicular (en un recuadro), y a la derecha la imagen a mayores magnificaciones (9000X) de los cristales aciculares de tobermorita neoformada marcada en el recuadro. En ambas figuras queda claro que se trata de minerales producto de la reacción puzolánica, puesto que estas agujas no están presentes en la muestra testigo (suelo sin estabilizar) y tampoco en la mezcla M12 que contiene 12.5% en peso de agregado reciclado pulverizado.

Del mismo modo se presentan las micrografías de la figura 68 pero a mayores aumentos (8000X y 16000X), con un cristal de tobermorita neoformada en forma de fibra, estas formas producen que los suelos expansivos sean más trabajables y menos plásticos.

En estas tres últimas figuras se observan los minerales con forma aciculares/fibrosas identificados en DRX como tobermorita neoformada, que como ya se indicó son silicatos de calcio hidratados que se ajustan al modelo estructural de la tobermorita. Estos C-S-H se forman por la reacción puzolánica que ocurre entre los minerales de arcilla de la muestra de suelo (caolinita y arcilla inter-estratificada), y los minerales alcalinos (portlandita y hemicarboaluminato de calcio), presentes en los polvos del agregado reciclado (polvos de grava reciclada planta). La grava reciclada pulverizada demostró poseer la alcalinidad necesaria (pH de 12.08) para estabilizar el suelo arcilloso.

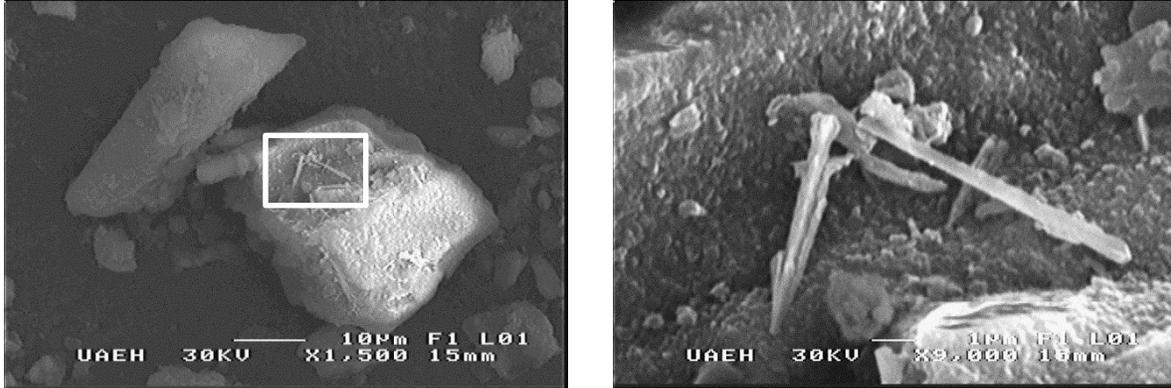


Figura 66. Mezcla M50 suelo – agua – 50% en peso de agregado reciclado pulverizado. En estas micrografías se observa la tobermorita neoformada con formas aciculares, en la micrografía a 1500x (izquierda) se marca con un recuadro la ubicación de las agujas que se presentan a 9000X en la foto derecha.

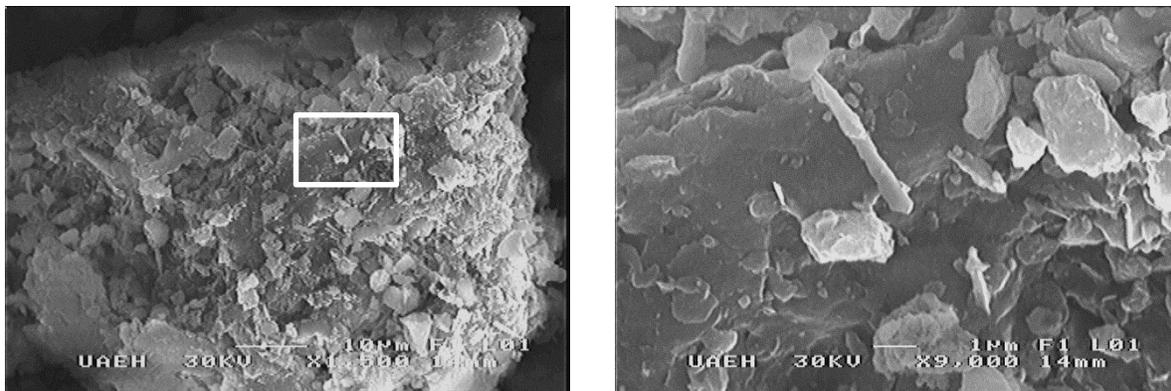


Figura 67. Tobermorita neoformada en forma de aguja en la mezcla M50 suelo – agua – 50% en peso de agregado reciclado pulverizado (grava planta).

Estos cristales aciculares con longitudes de tamaño micrométrico (entre 1 y 10 μ), propician de acuerdo al modelo de la figura 62, la trabazón o entrelazamiento con otras partículas, condición necesaria para generar resistencia. No debe perderse de vista que la formación/precipitación de estos cristales aciculares/fibrosos se da a expensas del ataque químico de los minerales de arcilla, es decir a medida que las arcillas se colapsan su estructura en capas se daña de tal manera que ya no es posible que alojen moléculas

de agua u otros iones en su intercapa, por lo tanto, ya no se expanden causando problemas de estabilidad volumétrica en el suelo.

Eisazadeh et al. [2012] determinaron que el ataque químico del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se da principalmente en la capa tetraédrica de silicio y no en la capa octaédrica de aluminio del mineral de arcilla, tal vez por esta razón no se detectaron aluminosilicatos de calcio hidratados (C-A-S-H) o aluminatos de calcio hidratados (C-A-H).

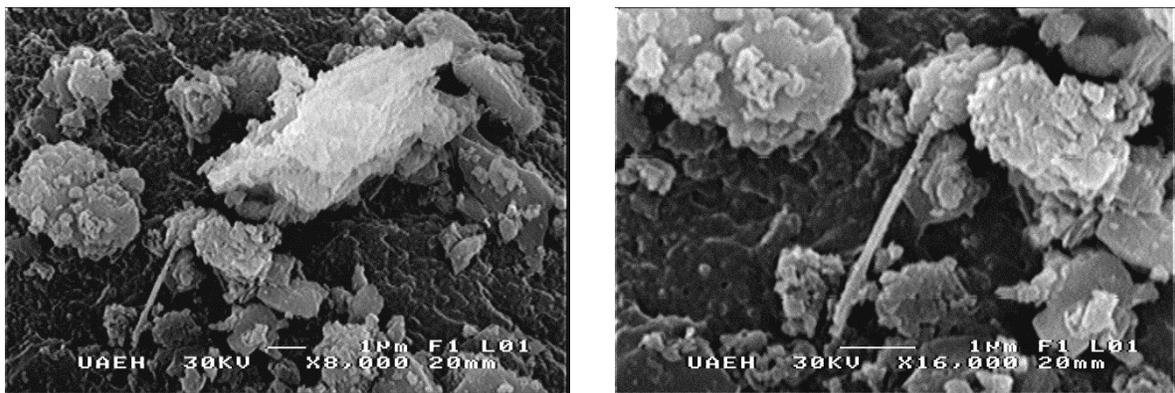


Figura 68. Mezcla suelo – agua – agregado reciclado pulverizado M50. Detalle del mineral neoformado en forma de fibra.

Tampoco hay que perder de vista que, en el proceso de estabilización, no se destruyen todos los minerales de arcilla contenidos en el suelo, pero si disminuye su porcentaje de tal manera que la expansión/contracción de estas, ya no interfiere con el comportamiento mecánico del suelo.

Considerando lo anterior, los agregados reciclados pulverizados usados en este experimento contienen una proporción de minerales inertes (principalmente feldespatos y calcita) que no reaccionan químicamente, pero si diluyen la cantidad relativa de las arcillas como si se tratara de una estabilización por combinación de suelos. Este tipo de estabilización (física) consiste en mezclar un suelo arcilloso con un

suelo controlado sin minerales de arcilla (tepetate), para mejorar sus propiedades físicas [Hernández Villares, 2009].

Tomando en cuenta que la estabilización de suelos es la sumatoria de fenómenos físicos y químicos, se piensa que para esta investigación la aparición de cristales aciculares/fibrosos de tobermorita neoformada en las mezclas suelo – agua – agregado reciclado pulverizado, es un resultado positivo que demuestra que un agregado reciclado pulverizado proveniente de residuos de la construcción y demolición, si tiene las propiedades alcalinas suficientes para estabilizar (mejorar) suelos arcillosos.

Finalmente, aunque el presente estudio solo se basó en la grava reciclada en una planta industrial, los resultados contribuyen al uso de agregados reciclados en diferentes aplicaciones de acuerdo con su composición química y mineralógica.

Nota. Se considera tepetate al material al material terroso de características inertes, es decir que no presenta alteraciones en su volumen por cambios de humedad [Rosales, 2011], generalmente materiales piroclásticos — tobas (arena y ceniza volcánica), [Sánchez et-al., 2005].

5. Conclusiones

En este trabajo se analizaron por distintas técnicas (DRX, MEB-EDS, XRF) 4 muestras de agregados reciclados provenientes de residuos de la construcción y demolición de la Cd. de México, 1 muestra de suelo arcilloso de la Ciudad de Pachuca y 3 mezclas suelo – agua - agregado reciclado pulverizado, con la finalidad de probar el desempeño de los agregados reciclados como estabilizadores de suelos arcillosos. A partir de estos resultados se presentan las siguientes conclusiones:

La caracterización mineralógica por DRX reveló que los minerales presentes en los agregados reciclados analizados fueron feldespatos, cristobalita y piroxeno (minerales ricos en silicio), que corresponden a los agregados pétreos originales, así como cantidades variables de calcita (CaCO_3), producto de la carbonatación de la pasta de cemento adherida a estos agregados, y en pequeña proporción hemicarboaluminato de calcio, rosenhahnita y tobermorita, fases que también componen la matriz aglutinante.

La caracterización química por EDS y XRF sugiere que solo el Ca varía significativamente en todas las muestras, de acuerdo a las cantidades variables de pasta de cemento adherida a los agregados. Por lo tanto, desde un punto de vista químico-mineralógico, se puede afirmar que los agregados reciclados poseen una composición inherente a su origen ígneo, que se ve enriquecida con calcio por la cantidad de mortero adherido.

Se determinó que la calidad (cantidad de cemento) del concreto original tiene una gran influencia en la granulometría y la composición químico-mineralógica de los agregados reciclados, ya que habrá diferentes cantidades y calidades de pasta de cemento adheridas a estos agregados dependiendo de su tamaño.

Por ejemplo, la proporción de calcio aumentó en la grava reciclada de la planta, ya que, a mayor resistencia de la pasta de cemento, se tendrán mayor cantidad de agregados enteramente formados por mortero (arena y pasta de cemento).

Los valores alcalinos de pH medido en agua (mayores a 10) de las muestras de agregados reciclados pulverizados, indican que existen suficientes especies solubles (portlandita no detectada por DRX y hemicarboaluminato de calcio), para mantener un pH alcalino.

Se determinó que el proceso de pulverización ($a < 75\mu$) al que son sometidos los agregados reciclados, libera las especies solubles como la portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y facilita la disolución de otras especies alcalinas como el hemicarboaluminato de calcio, por el aumento de área superficial que implica la molienda.

De acuerdo a la bibliografía, el pH muy alcalino (12.08) de la grava reciclada pulverizada de la planta Concreto Reciclados (que contiene mayor cantidad de pasta de cemento), la clasifica como un posible agente estabilizador de suelos arcillosos, por lo tanto, solo estos agregados se probaron en las mezclas suelo – agua – agregado reciclado pulverizado.

Por otro lado, los resultados del análisis mineralógico del suelo arcilloso de la Ciudad de Pachuca que se usó para probar el estabilizador, revelan que su composición está dominada por cuarzo y feldespatos triclinicos (anortita andesina y anortoclasa), así como en mediana proporción caolinita y una mezcla de arcillas con irregular interestratificación (clorita-vermiculita-montmorillonita).

La presencia de cuarzo y feldespatos, es porque en este suelo persiste la influencia de las rocas de las formaciones geológicas que suministraron el material (rocas félsicas predominantemente). Con respecto a los minerales de arcilla, la caolinita se sugiere puede provenir de la mineralogía de alteración detectada en los distritos mineros de

esta región, y por su parte la arcilla inter-estratificada, su presencia se atribuye a las condiciones de génesis tales como clima y altitud.

La conclusión más importante de la caracterización del suelo feozem háplico, es que contiene dos de las especies de arcilla con mayor potencial de expansión (montmorillonita y vermiculita), por lo tanto, se trata de un auténtico suelo arcilloso.

En cuanto al desempeño de la grava reciclada pulverizada como agente estabilizador de este suelo arcilloso (feozem háplico), los resultados de DRX de las mezclas suelo – agua – agregado reciclado pulverizado en proporciones en peso suelo/estabilizador de (100/25 y 100/50) y con un tiempo de curado de 12 meses, proporcionan evidencia de que la reacción puzolánica ha ocurrido entre los componentes alcalinos (Ca(OH)_2 y hemicarboaluminato de calcio) de los agregados reciclados y los minerales de arcilla (caolinita, montmorillonita y vermiculita) del suelo feozem háplico, ya que en los patrones de difracción se detectó la presencia de tobermorita neoformada (C-S-H) y también se dio la reducción de la intensidad de los picos de las arcillas.

En la caracterización microscópica por MEB, se observan minerales con formas aciculares y fibrosas a partir de la mezcla con una adición de 25% en peso de los polvos de grava reciclada planta, la precipitación de estos cristales de silicato de calcio hidratado o tobermorita neoformada con un tamaño de 1 a 10μ , confirma la estabilización del suelo, ya que el crecimiento de este tipo de cristales con un hábito acicular/fibroso produce la trabazón necesaria para el desarrollo de resistencia en un suelo tratado, al igual que en el endurecimiento del concreto.

Las observaciones macroscópicas son consistentes con los resultados de difracción de rayos X y microscopia electrónica de barrido, en primer lugar, por la aparición de productos de reacción en forma de pequeños círculos blanquecinos

dispersos a lo largo de todo el volumen de la probeta (mezcla) y, en segundo lugar, por la disminución de la contracción al secado y la ausencia del patrón de agrietamiento típico (encogimiento) de los suelos arcillosos.

Aunque el presente estudio solo se basó en la grava reciclada en una planta industrial, adicionada a un suelo con caolinita, montmorillonita y vermiculita, los resultados contribuyen al uso de agregados reciclados en diferentes aplicaciones de acuerdo con su composición química y mineralógica, en este caso se considera como una aplicación innovadora el uso químico de los residuos de la construcción y demolición (agregados reciclados pulverizados) en la estabilización de suelos arcillosos con un comportamiento geotécnico difícil.

Finalmente se propone que los agregados reciclados a partir de concreto demolido, deben considerarse como materiales alcalinos por la cantidad de minerales base calcio que contiene la pasta de cemento adherida a ellos.

Aportación científica y originalidad

La discusión de los resultados del desempeño de los agregados reciclados como estabilizadores de suelo ha sido escasa, debido a que durante la revisión del estado del arte no se encontró algo similar.

La información encontrada que más se acerca a esta investigación, son los trabajos de Engelsen et al. [2012], quienes estudiaron la liberación de elementos mayores y elementos traza de los agregados reciclados usados como sub-base en una carretera, determinando que el pH del agua de infiltración que pasaba a través de la su-base (lixiviado) disminuyó de 12.6 a menos de 10 en 2.5 años, esto revela que los agregados reciclados del concreto tienen una reserva alcalina que puede ser aprovechada.

Otro de los trabajos encontrados, son las investigaciones de Butera et al. [2014], quienes analizaron la composición y la lixiviación de residuos de la construcción y demolición molidos a $< 4\text{mm}$. Estos investigadores encontraron que el valor de pH de estos materiales era entre 11 y 13, y que la variación se debía a que algunas muestras de RCDs contenían cierta proporción de suelos y ladrillos, además determinaron que la liberación de calcio fluctuaba de 200 a 1600 mg/Kg de residuos.

Estos resultados resaltan la alcalinidad de los residuos de la construcción y demolición, la cual fue analizada en esta tesis mediante la evaluación de su desempeño como estabilizadores de suelos, por lo tanto, con este trabajo se explora por primera vez la posibilidad de usar los agregados reciclados o en general los RCDs en aplicaciones químicas y no solamente en aplicaciones geotécnicas como rellenos o en la elaboración de concreto.

La posibilidad de usar el concreto demolido (RCDs) en forma de agregados reciclados en una aplicación química como estabilizador de suelos arcillosos es precisamente la aportación científica de esta tesis de doctorado.

Una investigación está completa hasta que se publica, razón por la cual parte de los resultados de esta tesis fueron publicados en la revista internacional, Minerals de la editorial MDPI.

Se anexa la portada del artículo publicado con el título: Chemical and Mineralogical Characterization of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste from Mexico City. Minerals 8, no. 6, 237. EISSN: ISSN 2075-163X, DOI: 10.3390/min8060237, Factor de impacto: 1.835, Journal Citation Reports, © 2018 MDPI.

Article

Chemical and Mineralogical Characterization of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste from Mexico City

Emiliano Moreno-Pérez¹, Juan Hernández-Ávila^{1,*}, Yamile Rangel-Martínez²,
Eduardo Cerecedo-Sáenz¹, Alberto Arenas-Flores¹, Ma. Isabel Reyes-Valderrama¹ and
Eleazar Salinas-Rodríguez¹

¹ Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo km. 4.5, Mineral de la Reforma 42184, Hidalgo, México; emp10000@hotmail.com (E.M.-P.); mardenjazz@yahoo.com.mx (E.C.-S.); arenasa@uaeh.edu.mx (A.A.-F.); isareyv@hotmail.com (M.I.R.-V.); salinasr@uaeh.edu.mx (E.S.-R.)

² Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca—Tulancingo km. 4.5, Mineral de la Reforma 42184, Hidalgo, México; yamilerangelm@gmail.com

* Correspondence: herjuan@uaeh.edu.mx

Received: 21 March 2018; Accepted: 21 May 2018; Published: 31 May 2018



Abstract: In this study, four samples of recycled aggregates from the construction and demolition waste of Mexico City were characterized in order to find innovative uses for these types of materials. Gravel and sand from a recycling plant were analyzed, as well as aggregates produced in the laboratory from demolished concrete collected from landfills. The characterization was carried out by means of XRD (X-ray Diffraction), chemical microanalysis (EDS), X-ray fluorescence (XRF), pH measurement, and sieve analysis. The minerals present in the analyzed materials were feldspars, cristobalite and pyroxene, which corresponded to the natural aggregates, as well as variable amounts of calcite, a product of the carbonation of the cement paste adhered to these aggregates, and in a smaller proportion, calcium hemicarboaluminate, rosenhanite, and tobermorite. The quality (amount of cement) of the original concrete has a great influence on the granulometry and the chemical–mineralogical composition of the aggregates, since there will be different quantities and qualities of the cement paste adhered to the aggregates depending on their size. Finally, the pH values measured in all samples fluctuated between 10.15 and 12.08, suggesting that these materials can be used in soil stabilization or in agricultural applications.

Keywords: recycled aggregates; cement paste; carbonation; calcite; pH

1. Introduction

According to the Mexico City NADF-007-RNAT-2013 [1] environmental norm, the amount of construction and demolition waste (CDW) generated by the city is approximately 7000 tons/day; 25% of such waste consists of demolished concrete that is usually disposed in illegal landfills, despite the norm recommending that these materials have to be recycled through a process involving selection, crushing, sieving, and storage in order to reuse them in the construction cycle.

Numerous definitions have been suggested for these recycled materials. This study used the definition proposed by Zhao et al. [2] who defined recycled concrete aggregates as an intimate mix between original natural aggregates (gravel and sand) and hardened cement paste adhered to them.

The environmental benefits of the use of recycled aggregates can play a key role in reducing the need for landfill waste disposal, and limiting the exploitation of natural aggregates [3]. In Mexico City, Rivera-Mera [4] characterized recycled aggregates of the Concretos Recicladados S.A. plant from

Futuros trabajos

En esta investigación se ha comprobado tanto a nivel nanométrico, como a nivel micrométrico que la estabilización del suelo arcilloso feozem háplico ha ocurrido, ya que por medio de DRX y MEB se ha demostrado la presencia de minerales neoformados (tobermorita) en forma de agujas y fibras, que son compuestos puzolánicos resultado de las reacciones químicas que tienen lugar entre los compuestos alcalinos de los agregados reciclados pulverizados y los componentes de arcilla del suelo.

Tomando en cuenta lo anterior, los futuros trabajos acerca de este tema “Estabilización de suelos arcillosos con residuos de la construcción y demolición”, deben ser las pruebas físicas y mecánicas del suelo tratado, de acuerdo a la normatividad vigente para suelos y materiales para terracerías del Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

Se propone determinar, densidad, absorción, contenido de agua, límites de consistencia, índice plástico, variación volumétrica, etc., con la finalidad de comprobar si los agregados reciclados pulverizados mejoran las propiedades físicas y mecánicas de un suelo arcilloso dentro de los límites que marcan la normas.

Lo más importante para futuros trabajos, será cuantificar la plasticidad mediante la determinación de límites de consistencia, (límite líquido y límite plástico). La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia de su morfología laminar, tamaño de partícula y la alta capacidad de hinchamiento.

Recomendaciones para la práctica o la política

¿En qué medida los resultados de esta investigación se pueden transformar en aplicaciones o se transfieren a actores pertinentes para su implantación o explotación?

Actualmente los constructores en México prefieren sustituir los suelos arcillosos (expansivos) en lugar de estabilizarlos, es decir un suelo de comportamiento geotécnico difícil se desecha y se sustituye por un material natural seleccionado proveniente de un banco de materiales generalmente tepetate (figura 69).



Figura 69. Sustitución del suelo original por tepetate en el relleno de una excavación para drenaje al norte de Pachuca.

Otro problema asociado es que la demanda de materiales (tepetate) para sustituir suelos arcillosos, provoca la apertura de nuevos bancos de materiales y la extracción indiscriminada de materiales vírgenes con resultados negativos para el medio ambiente, tales como afectaciones a la vegetación, a la fauna y al uso de suelo, (fig. 70)



Figura 70. Foto del banco de tepetate “Las Palomas” ubicado en el Municipio de Mineral de la Reforma, en la imagen se puede ver el acantilado generado por la extracción de miles de toneladas de materiales.

En resumen, se trata de un círculo vicioso, en donde los efectos negativos al medio ambiente provocados por la gestión inadecuada de los residuos de la construcción y demolición son irreversibles y a largo plazo.

Una solución original a este problema es la que se propone en este estudio: **Utilizar agregados reciclados del concreto demolido (RCDs) como estabilizadores químicos de suelos arcillosos.**

Como ya se mencionó, los suelos arcillosos sin tratar (estabilizar), potencialmente también se convertirán en RCDs, cuando sean descartados y sustituidos durante los procesos constructivos por ser expansivos.

En palabras simples con esta propuesta, ni el concreto demolido, ni los suelos arcillosos (material de excavación) deberían terminar en un vertedero clandestino o una barranca, si les maneja adecuadamente.

En la siguiente figura (núm. 71) se ilustra la problemática antes mencionada y la propuesta de solución a la luz de los resultados obtenidos en esta investigación.

En esta gráfica se puede ver que un suelo arcilloso podría utilizarse como relleno en la misma obra si se le diera un adecuado tratamiento de estabilización. En este caso se podría lograr la estabilización de suelos expansivos con agregados reciclados pulverizados o no.

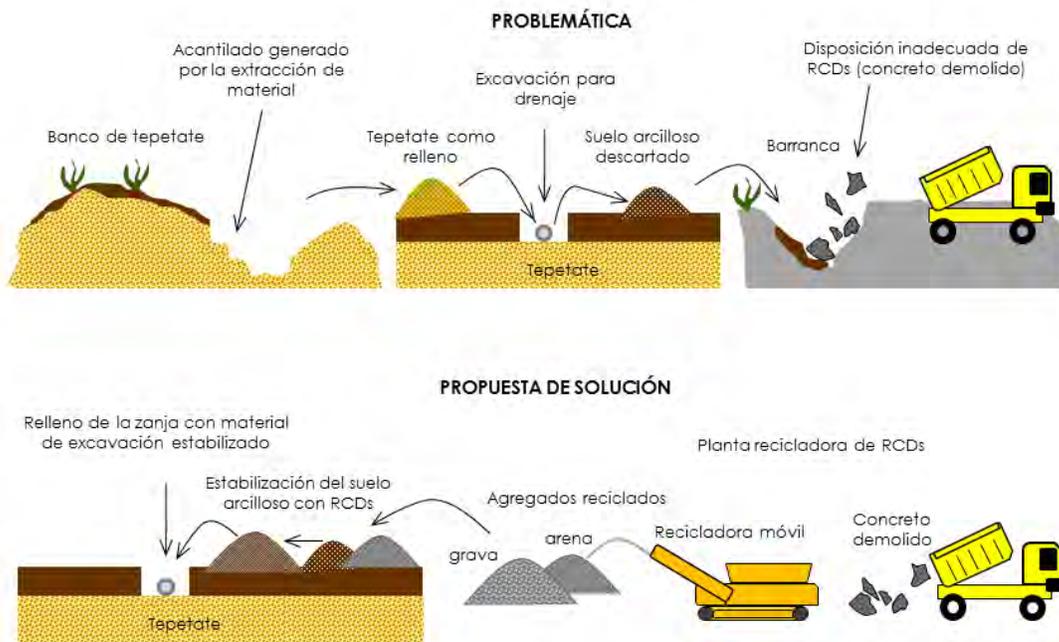


Figura 71. Ilustración de la problemática generada por una gestión inadecuada de los RCDs y la propuesta de solución.

No obstante, faltan muchas pruebas de laboratorio y de campo para que la presente propuesta pueda influir en la normatividad vigente, y el concreto demolido en forma de agregados reciclados pueda ser aprovechado como estabilizador químico al final de su vida útil.

A la fecha la norma ambiental que establece la clasificación y especificaciones de manejo para residuos de la construcción y demolición en la Cd. de México, NADF-007-RNAT-2013, establece que los agregados pétreos con cementante (material reciclado) podrá utilizarse en la elaboración suelo-cemento en rellenos especiales, sin embargo, aún no ha sido valorado seriamente el potencial alcalino de los agregados reciclados provenientes de residuos de la construcción y demolición.

Otras aportaciones

Derivado del proyecto de vinculación entre el Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Ayuntamiento del Municipio de Santiago de Anaya Hidalgo, en colaboración con el Área Académica de Ciencia de la Tierra y Materiales de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), se caracterizaron mineralógicamente 7 muestras de morteros de cal y tezontle, tomadas de diferentes partes de una Capilla Agustina de la localidad de Santa Mónica. Dicha construcción (figura 72) se encuentra actualmente abandonada y parcialmente derruida.

La caracterización de estos materiales constructivos permitirá conocer su composición mineralógica, para en el futuro realizar una restauración con materiales compatibles y con ello salvaguardar el patrimonio de la comunidad.

El muestreo de los morteros de cal y tezontle se hizo tomando en cuenta la hipótesis de los diferentes momentos de construcción y siguiendo los lineamientos del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) para tal fin. La metodología usada para esta caracterización mineralógica fue la misma que se utilizó en esta tesis. En la tabla 10 las muestras de mortero y el lugar donde se muestrearon.

En la rehabilitación de un edificio histórico, las intervenciones deben tomar en cuenta la compatibilidad de los nuevos materiales con los usados inicialmente para asegurar la durabilidad y evitar efectos negativos. Por lo tanto, este análisis mineralógico de morteros de cal se justifica y es necesario, si se considera como principio rector el principio de Van Hees para la compatibilidad de morteros **“el mortero nuevo debe ser tan durable como sea posible sin causar daños directos o indirectos al material original”** [Van Hess, 2000].



Figura 72. Vista interior de la capilla de Santa Mónica parcialmente derruida.

Tabla 10. Muestras de mortero que se analizaron y el lugar donde se muestrearon en la Capilla de Santa Mónica.

Muestra	Lugar de muestreo
Mortero plantilla contrafuerte exterior	Contrafuerte exterior, evangelio
Mortero argamasa campanario	Campanario
Mortero junta contrafuerte exterior	Contrafuerte exterior, evangelio
Mortero junta muro exterior	Muro testero exterior oriente
Mortero junta contrafuerte interior	Nave principal
Mortero aplanado muro interior	Muro ábside izquierdo
Mortero entortado bóveda	Sacristía, antes capilla abierta

Es necesario aclarar que, en este trabajo se usó el término *mortero*, para identificar al material constructivo usado en forma de mezcla para fijar o cubrir y que se preparó

usando cal como cementante, tezontle como agregado fino y agua. Los términos argamasa, aplanado, enjarre, revoque o repellido son válidos dependiendo de la aplicación.

Los resultados de difracción de rayos X de las muestras de morteros de cal y tezontle se muestran en la figura 73, en esta gráfica se puede ver que los patrones de difracción son muy similares entre sí, y en ellos se pueden observar picos anchos y traslape de reflexiones. Estos datos indican que los morteros de cal tezontle analizados están compuestos mayoritariamente de calcita CaCO_3 y feldespatos triclinicos. La calcita corresponde al cementante carbonatado y los feldespatos a los agregados (arena de tezontle).

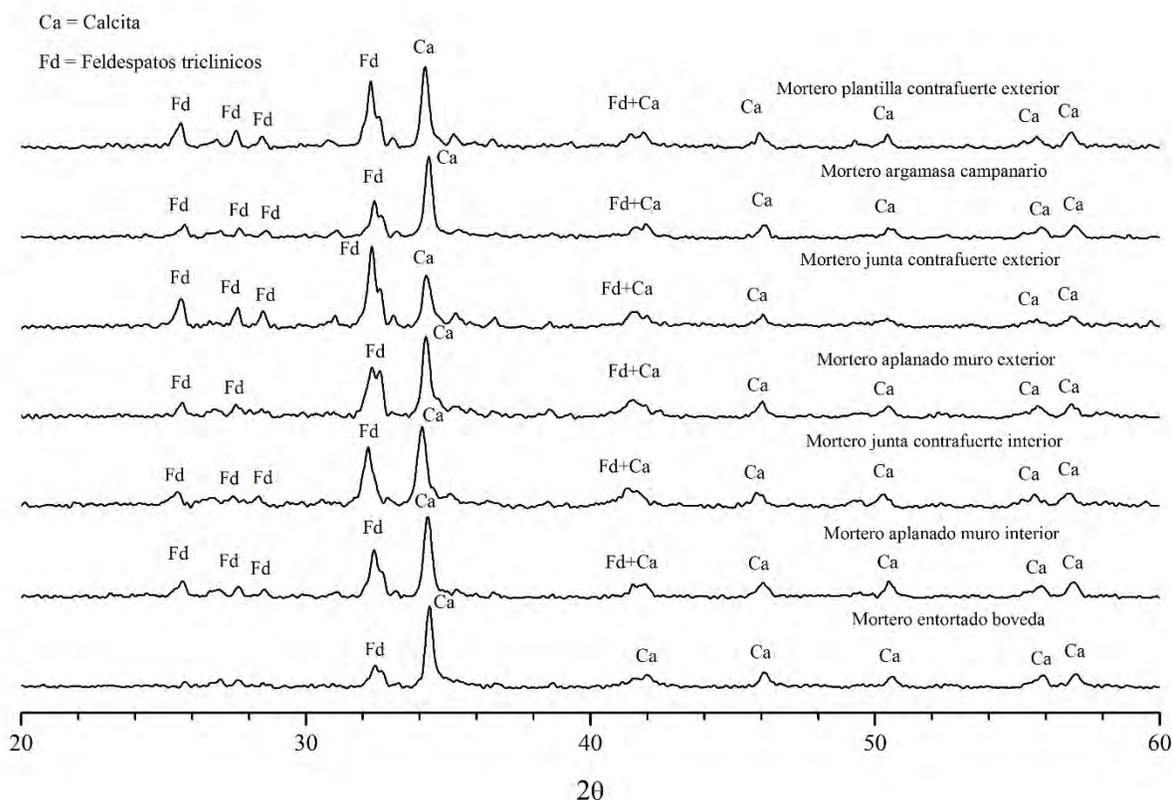
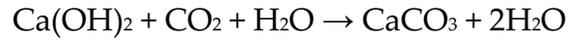


Figura 73. Patrones de difracción de las muestras de morteros de cal y tezontle tomadas de la capilla de Santa Mónica en Santiago de Anaya, Hgo.

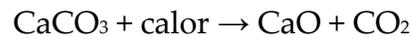
La cal que se usó para elaborar estos morteros está completamente carbonatada de acuerdo a la siguiente reacción:

Reacción de carbonatación

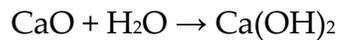


La cal hidratada de estos morteros proviene de la hidratación de la cal viva que se obtuvo calcinando roca caliza en antiguos hornos, de conformidad con las siguientes reacciones.

Reacción de calcinación



Reacción de hidratación



La reacción de carbonatación se da muy lentamente a través de años por la acción de la humedad del medio ambiente y el CO₂ del aire, provocando un cambio en la estructura cristalina del cementante y también un cambio de pH, que va de 12.5 de la cal hidratada (hidróxido de calcio) a 9 de la calcita (carbonato de calcio), otro cambio importante y quizás el más significativo es que el mortero ha regresado a su estado más estable termodinámicamente, de ahí la durabilidad de estos materiales a través de los siglos.

Retomando el análisis mineralógico, en todos los patrones de difracción se observan los picos irregulares y anchos de los feldespatos. Mediante el software Match se identificaron las siguientes plagioclasas: Albita, Andesina y Anortita (feldespatos de Na y Ca), además de Anortoclasa que también es un feldespato pero de Na y K, y que posee una estructura triclinica al igual que todas las plagioclasas, de ahí el

ensanchamiento de los picos, que corresponden a la misma reflexión pero con una celda unitaria con diferente cantidad de átomos de Na, K y Ca (composición química) que cambiará ligeramente la estructura cristalina del feldespato.

Una vez que se han identificado los picos del cementante (calcita) y los picos de los agregados (feldespatos), es posible de acuerdo a la altura del pico hacer una estimación de la cantidad de uno con respecto del otro, por lo tanto, se tiene que, para el mortero entortado bóveda hay mayor proporción de calcita con respecto a los feldespatos, lo que significa una alta relación cementante/agregados que es un indicio de un mortero de buena calidad y durabilidad... [Moreno, et al., 2017]

Como se puede ver, los hallazgos realizados en la caracterización mineralógica de los agregados reciclados sirvieron para la caracterización de estos morteros novohispanos, de hecho, se puede afirmar que su composición es muy parecida, por lo tanto, se considera que esta tesis no solo contribuye a la ingeniería civil, sino también a la Arqueometría.

Nota. La Arqueometría es un conjunto de métodos de análisis especializados, aplicados a la caracterización de materiales para efectuar diferentes estudios y cuya información permite obtener un mejor y más amplio conocimiento sobre las culturas antiguas. Un hecho también importante es que la información obtenida a través de la arqueometría ha permitido adoptar procedimientos más adecuados de conservación y restauración de materiales [Mendoza et al., 2006].

Comentarios finales

Hablando de procesos epistemológicos:

En esta tesis de doctorado se buscó la aproximación más que la solución, como dice el Dr. Jorge Ortiz Leroux, “Haciendo énfasis en lo cualitativo” [Leroux, 2014]

Además, se buscó encontrar la interpretación teórica y utilizar esta teoría para predecir (Dr. Juan Ignacio Cirac Sasturain) [Cirac-Sasturain, 2016]

Se usó una hipótesis ad hoc, es decir una hipótesis pensada para una situación concreta. “Si los agregados reciclados contienen portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$, en la pasta de cemento adherida, porque no liberarla y usarla para estabilizar suelos”.

Los resultados nos dicen que es muy poca la portlandita (hidróxido de calcio) que contienen estos materiales porque ya se ha carbonatado la mayoría, sin embargo, el hallazgo es que contienen hemicarboaluminato de calcio que junto con la poca portlandita remanente, son capaces de mantener el pH alcalino necesario para que ocurra la reacción puzolánica en las mezclas suelo – agua - agregado reciclado pulverizado.

En todo caso, gracias al enfoque de la Ciencia de los Materiales se logró anticipar el comportamiento químico de los agregados reciclados (RCDs) como estabilizadores de suelos arcillosos.

Referencias

Al-Rawas, A. A., Hago, A. W., & Al-Sarmi, H. (2005). Effect of lime cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. *Building and Environment*, 40, 681-687.

Angulo, S.C., Ulsen, C., John, V.M., Khan, H., & Cincotto, M.A. (2009). Chemical-mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from Sao Paulo, Brazil, *Waste Manag.* 29, 721-730

Ashby, M. & Johnson, K. (2015). *Materials and Design: The Art and Science of Materials Selection in Product Design*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, Elsevier.

Barrera, M. y Garnica, P. (2002). *Introducción a la mecánica de suelos no saturados en vías terrestres*. Publicación técnica No. 198, México: Instituto Mexicano del Transporte IMT.

Biagioni, C., Merlino, S., & Bonaccorsi, E. (2015). The tobermorite supergroup: a new nomenclature. *Mineralogical Magazine*, vol. 79 (2), 485-495.

Bianchini, G., Marrocchino, E., Tassinari, R., & Vaccaro C. (2005). Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical-mineralogical appraisal. *Waste Manag.*, 25, 149-159.

Bonavetti, V. L., Rahhal, V. F., & Irassar, E. F. (2001). Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements. *Cem. Concr. Res.*, 31, 853-859.

Buck, A. D., & Mather, K. (1979). *The 7.6-Angstrom reaction product in smectite clay – lime mixtures*. Final report prepared for Assistant Secretary of the Army, Department of Army, Washington, D.C. 20310.

Bustillo, M. (2010). *Manual de RCD y Áridos Reciclados*. Madrid, España: Fueyo Editores

Butera, S., Christensen, T. H., & Asrtrup, T. F. (2014). Composition and leaching of construction and demolition waste: Inorganic elements and organic compounds. *Journal of Hazardous Materials*, 276, 302-311.

Cardona Rivas, D., (2008). *Modelos de argumentación en ciencias: una aplicación a genética*. Universidad de Manizales y el CINDE, Colombia.

Cardoso, R., Vasco Silva, R., de Brito, J., & Dhir, R. (2016). Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. *Waste Manag.*, 49, 131–145.

Carvajal, J. (2017). Primera Escuela de FullProf México, Curso impartido en el marco del Simposio Iberoamericano de Ciencias e Ingenierías (SIMCI), Universidad Politécnica de Pachuca, México.

Catinaud, S., Beaudoin, J. J., & Marchand, J. (2000). Influence of limestone addition on calcium leaching mechanism in cement-based materials. *Cem. Concr. Res.*, 30, 1961–1968.

Chaunsali P., & Peethamparan S. (2011). Evolution of Strength, Microstructure and Mineralogical Composition of CRD-GGBFS Binder. *Cement and Concrete Research*. Vol. 41, 197-208.

Cirac-Sasturain, J. I. (noviembre 2016). Taller “Física cuántica en el siglo XXI”. Régimen de Seminarios Internacional, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, UAEH, México.

Croft, J. B., (1967). The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization. *Geotechnique*, vol. 17, London. England, 110-135.

Diamond, S. (1963). *Tobermorite and tobermorite-like calcium silicate hydrates: Their properties and relationships to clay minerals*. Final Report, Joint Highway Research Project, Purdue University, Lafayette, Indiana.

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.

Domínguez, J. M., Serrano, S. S., Acevedo, O. A., y Roman A. D. (2012). Estudio físico-químico y micromorfológico de suelos de Denganthza, valle del Mezquital, Hidalgo. *Multiciencias*, vol. 12, núm. 2, abril-junio, 146-155, Venezuela.

E14-2 (1997). Carta Geológica-Minera Ciudad de México. Esc.1: 250,000. Segunda Edición. Servicio Geológico Mexicano. www.sgm.gob.mx

Eades, J., & Grim, R. (1960). Reactions of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization. *Highway Research Board Bulletin 262*, 51-63, Washington.

Eisazadeh, A., Anuar, K., & Nur, H. (2012). Solid-state NMR and FTIR studies of lime stabilized montmorillonitic and lateritic clays, *Applied Clay Science*, 67-68, 5-10.

El-Mahllawy, M. S., & Kandeel, A. M. (2014). Engineering and mineralogical characteristics of stabilized unfired montmorillonitic clay bricks. Housing and Building National Research Center, *HBRC Journal*, 10, 82-91.

Engelsen, C. J., Wibetoe, G., Van der Sloot, H. A., Lund, W. & Petkovic, G. (2012). Field site leaching from recycled concrete aggregates applied as sub-base material in road construction. *Science of the Total Environment* 427-428, 86-97.

Evangelista, L., Guedes, M., De Brito, J., Ferro, A.C., & Pereira, M.F. (2015). Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste. *Constr. Build. Mater.*, 86, 178–188.

F14D81 (2003). Carta edafológica, 1: 50,000. Pachuca F14D81, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México. www.inegi.org.mx

F14-D81 (2007). Carta Geológica-Minera Pachuca de Soto. Esc. 1:50 000, Servicio Geológico Mexicano. www.sgm.gob.mx

Flemings, M.C. (1990). Materials Science and Engineering for the 1990's. *Advanced Materials*, 2, No. 4, Editorial Essay, pp. 165.

Gaucher, E.C., & Blanc, P. (2006). Cement/clay interaction—A review: Experiments, natural analogues, and modeling. *Waste Manag.*, 26, 776–788.

Glasser, F. P., & Matschei, T. (2007). *Interactions between portland cement and carbon dioxide*, In Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement-ICCC, Montreal, QC, Canada, 8–13.

Glenn, G. R., & Handy, R.L. (1963). *Lime-clay mineral reaction products*. Paper given at Forty-second Annual Meeting, Highway Research Board, Washington.

González Fonteboa, B. (2002). *Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante*. Tesis Doctoral, Departamento de Tecnología de la Construcción, Universidad Da Coruña, España.

Hernández Villares H. (2009). *Estudio del método de sustitución aplicado en arcillas expansivas de Querétaro*, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro.

Hilt, G. H., and Davidson, D. T. (1961). *Isolation and investigation of a lime-montmorillonite reaction products*. Ph.D. Thesis, Iowa State Univ. of Sci. and Tech.

<https://fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/04150/chapt14.cf>

IMT-MMP-1, (2003). Métodos de muestreo y prueba de materiales, Parte 1, Suelos y Materiales para terracerías. Normativa para la infraestructura del transporte., México: Instituto Mexicano del Transporte (IMT). www.normas.imt.mx

INEGI (2000). Información sobre perfiles de suelo, versión 1.1, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México. www.inegi.org.mx

INEGI (2001). Diccionario de datos edafológicos (alfanumérico), Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México. www.inegi.org.mx

INEGI (2009). Prontuario de información geográfica municipal, Pachuca de Soto, Hidalgo, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México. www.inegi.org.mx

Ingles, O. G., and Metcalf, J. B. (1972). *Soil Stabilization: Principles and Practice*. Sydney: Publisher Butterwork.

Jakobsen, U. H., De Weerdt, K., & Geiker, M. R. (2016). Elemental zonation in marine concrete. *Cement and Concrete Research*, 85, 12-27.

Krajci, L., & Janotka, I. (2000). Measurement techniques for rapid assessment of carbonation in concrete. *ACI Mater. J.*, 97, 168–171.

Lagerblad, B. (2005). *Carbon Dioxide Uptake during Concrete Life Cycle-State of Art*, Report 2:2005; Swedish Cement and Concrete Research Institute: Stockholm, Sweden.

Leroux, J., 2014. Taller Propedéutico del Posgrado en Diseño, Línea de Estudios Urbanos. Universidad Autónoma Metropolitana, UAM Azcapotzalco, junio de 2014.

Limbachiya, M. C., Marrocchino, E., & Kouluoris, A. (2007), Chemical-mineralogical characterization of coarse recycled concrete aggregate, *Waste Management*, 27, 201-208.

Liu, Q., Tong, T., Liu, S., Yang, D., & Yu, Q. (2014). Investigation of using hybrid recycled powder from demolished concrete solids and clay bricks as a pozzolanic supplement for cement. *Constr. Build. Mater.*, 73, 754–763.

LS-602, (2001). Method of Test for Sieve Analysis of Aggregates. Ministry of Transportation, Ontario, Laboratory Testing Manual. www.roadauthority.com

Manzano, H., González-Teresa, R., Dolado, J. S., y Ayuela, A. (2010). Espectros de rayos X y propiedades elásticas teóricas de los silicatos cálcicos hidratados cristalinos: comparación con los geles de cemento. *Mater. Constr.*, 299, 7–19.

Matschei, T., Lothenbach, B., & Glasser, F. P. (2007). The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cem. Concr. Res.*, 37, 551–558.

Mendoza, D., Arenas, J. A., Ruvalcaba, J. L. y Rodríguez V. (2006). La Ciencia de los Materiales y su Impacto en la Arqueología – Volumen III. Academia Mexicana de Ciencia de Materiales, México: innovación editorial lagares.

Meunier, A. (2003). *Clays*. University of Poitiers, France: Springer.

Moreno, E., Arcos, V. y Ávila, J., (2017). *Caracterización de los Materiales Constructivos de las Capillas Agustinas de Santiago de Anaya en el Valle del Mezquital*. Informe Interno, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Müller, C. J. (2005). *Pozzolanic activity of natural clay minerals with respect to environmental geotechnics*. Ph.D. Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.

Mymrin, V. A., Alekseev, K. P., Catai, R. E., Izzo, R. L. S., Rose, J. L., Nagalli, A., & Romano, C.A. (2015). Construction material from construction and demolition debris and lime production wastes. *Constr. Build. Mater.*, 79, 207–213.

NADF-007-RNAT-2013. Norma Ambiental que Establece la Clasificación y Especificaciones de Manejo Para Residuos de la Construcción y Demolición, en el Distrito Federal. Secretaria del Medio Ambiente del Distrito Federal, 26 de febrero de 2015.

NMX C-030-ONNCCE-2004. Norma Mexicana Industria de la Construcción, Agregados - Muestreo. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. www.onncce.org.mx

NMX C-077-ONNCCE-1997. Norma Mexicana Industria de la Construcción, Agregados Para Concreto, Análisis Granulométrico, Métodos de Prueba. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. www.onncce.org.mx

NMX C-111-ONNCCE-2014. Norma Mexicana Industria de la Construcción, Agregados Para Concreto Hidráulico, Especificaciones y Métodos de Prueba. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. www.onncce.org.mx

NMX C-170-ONNCCE-1997. Norma Mexicana Industria de la Construcción, Agregados-Reducción de las muestras de agregados obtenidos en el campo al tamaño requerido de las pruebas. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. www.onncce.org.mx

Non trivial problems. (2015) <https://nontrivialproblems.wordpress.com/2015/08/02/so-what-is-materials-science-and-engineering/>.

Omary, S., Ghorbel, E., & Wardeh. (2016). Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. *Constr. Build. Mater.*, 108, 163–174.

Rangel, Y., Prieto, F., Acevedo, O. A., Gordillo, A. J., y González, C. A. (2009). Procesos unitarios de recuperación de residuos de construcción, demolición y jales de minería: Desarrollo de agregados pétreos. Estudios ambientales realizados en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo 2004 – 2009. México: UAEH, pp. 197-205.

Reeves, G. M., Sims, I., and Cripps, J. C., (2006). *Clays Materials used in Construction*, London: The Geological Society. Engineering Geology Special Publication, 21.

Rivera, R., & Krayner, S. (1996). Ancient Structural Concrete in Mesoamerica, *Concrete International*, 18, 67-70.

Rodrigues, F., Carballo, M.T., Evangelista, L., & De Brito, J. (2013). Physical-chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants. *J. Clean. Prod.*, 52, 438–445.

Rosales Hurtado, D. (2011). *Caracterización de los tepetates usados como materiales de sustitución en la ciudad de Querétaro*, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro.

Roy, P. D., Morton-Bermea, O., Hernández-Álvarez E., Pi, T., & Lozano R. (2010). Rare earth element geochemistry of the Late Quaternary tephra and volcano-clastic sediments from the Pachuca sub-basin, north-eastern Basin of Mexico. *Geofísica Internacional*, 49 (1), 3-15.

Ruff, C. G. & Ho, C. (1965). *Time-temperature strength-reaction product relationships in lime-bentonite-water mixtures*. Progress report to Iowa State Highway Commission.

Runcevski, T., Dinnebier, R. E., Magdysyuk, O.V., & Pollmann, H. (2012). Crystal structures of calcium hemicarboaluminate and carbonated calcium hemicarboaluminate from synchrotron powder diffraction data. *Acta Crystallogr. Sect. B*, B68, 493–500.

Sánchez, L. E., Arredondo, J. A., y Cardoso, E. A. (2005). *Informe de la carta geológica-minera PACHUCA DE SOTO F14-D81, Esc. 1:50 000*. México: Servicio Geológico Mexicano. www.sgm.gob.mx

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): Análisis técnico de productos y maquinaria. Tesis de Licenciatura, Área Académica de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

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

- Sloane, R. L. (1964). Early reaction determination in two hydroxide-kaolinite systems by electron microscopy and diffraction. *Clays and Clay Minerals*, 13, 1, 331-340.
- Solanki, P., and Zaman, M. (2012). Microstructural and mineralogical characterization of clay stabilized using calcium based stabilizer. Chapter 38, for the book “*Scanning Electron Microscope*” In Tech Publisher, pp. 771-798.
- Takemoto, K. & Uchikawa, H. (1980). *Hydration of pozzolanic cement*, in *Proceedings of 7th International Congress on the Chemistry of Cement*, Paris, France, Editions Septima. 1-28
- Taylor, H. F. W. (1961). *The chemistry of cement hydration*. Progress in Ceramic Science, Vol. I, J.E. Burke, New York: Pergamon Press.
- Tzschichholz, F., Herrmann, H.J., & Zanni H. (1996). A reaction-diffusion model for the hydration/setting of cement, *Phys. Rev. E* 53, 2629, American Physical Society.
- UN (1992). *Earth Construction Technology*. United Nations Centre for Human Settlements, Nairobi.
- Van Hess, R. P. J. (2000). *Damage diagnosis and Compatible Repair Mortars*. Proceeding of the International Rilem Workshop, Historic Mortars: Characterisation and Test, pp.27-36, Paisley, Scotland.
- Varela, J. S. (2006). El Mercado de los Residuos de la Industria de la Construcción. *Revista de Ingeniería Civil* No. 448, México, pp. 13-18.
- Vargas, Y. M., Gómez, V., Vázquez, E., García, A., Aguilar, G., Murrieta, H., y Salmon, M. (2008). Caracterización espectroscópica, química, y morfológica y propiedades superficiales de una montmorillonita mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, V. 25, 1, 135-144.
- Vázquez, E. y Barra, M. (2002). *Reciclaje y Reutilización del Hormigón*. Monografía CIMNE No. 67: Desarrollo sostenible del cemento y del hormigón; Gettu, R., Ed.; International Center for Numerical Methods in Engineering: Barcelona, Spain, pp. 43–65.

Velde, B. and Meunier, A. (2008). *The Origin of Clay Minerals in Soils and Weathered Rocks*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag.

Wild, S., Arabi, M., & Leng W. (1986). Soil–lime reaction and microstructural development at elevated temperatures. *Clay Minerals* 21, 279-292.

Yong, R. N. & Ouhadi, V. R. (2007). Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils. *Applied Clay Science*, 35, 238-249.

Zhao Z., Remond, S., Damidot, D., & Xu W., (2015). Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 80, 179-186.