

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



Aplicación de nano y micro tecnología para el
mejoramiento de las propiedades mecánicas y térmicas
de materiales utilizados en la Ingeniería Civil

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional
presentado por Juan Andrés Pira López para optar al grado
académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala

2016

Aplicación de nano y micro tecnología para el
mejoramiento de las propiedades mecánicas y
térmicas de materiales utilizados en la
Ingeniería Civil

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA




Aplicación de nano y micro tecnología para el mejoramiento de las propiedades mecánicas y térmicas de materiales utilizados en la Ingeniería Civil

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional presentado por Juan Andrés Pira López para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala

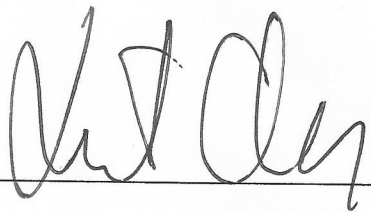
2016

Vo. Bo. :

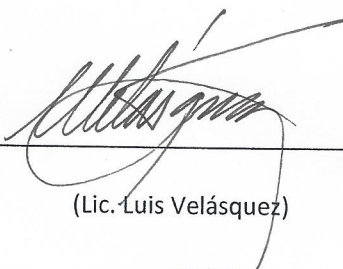
(f):  _____

(Ing. Rodrigo Rubio Haasler)

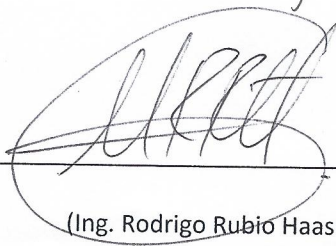
Tribunal Examinador:

(f):  _____

(Ing. Roberto Godo Levensen)

(f):  _____

(Lic. Luis Velásquez)

(f):  _____

(Ing. Rodrigo Rubio Haasler)

Fecha de aprobación: Guatemala, 8 de diciembre de 2016.

PREFACIO

El presente trabajo de graduación se desarrolló con el ánimo de comenzar una investigación en la rama de nanotecnología en la Ingeniería Civil en Guatemala. El tema de nanotecnología para la mejora de materiales utilizados en ingeniería civil se concibió inicialmente como un tema para un megaproyecto, sin embargo, se terminó abarcando en este trabajo de graduación como una fase inicial. Se ha considerado que la investigación continuará con otros trabajos de graduación individuales y más adelante se retomará como un tema de megaproyecto.

Por lo amplio del tema no se tuvo un enfoque claro desde el principio del desarrollo del proyecto. En un principio se consideró estudiar las mejoras en mezclas de concreto modificadas con nanotubos de carbono, pero las dificultades para conseguir el material y el equipo para hacer la experimentación orientaron la investigación en otro sentido. La experimentación final fue propuesta por los directivos del CETEC de Cementos Progreso, quienes nos asesoraron de acuerdo al equipo que tenían disponible.

Finalmente se estructuró el trabajo de graduación de modo que se estudiarán en forma general los nanomateriales y sus aplicaciones en la ingeniería, de la mano con una fase de experimentación. La experimentación propuesta fue la evaluación de la estabilización de una arcilla plástica utilizando micropartículas de cal. El proyecto se desarrolló de esta forma y se obtuvieron los resultados esperados.

También quiero aprovechar este espacio para agradecer a todos aquellos que permitieron la realización de este proyecto. Particularmente agradezco a mis padres, mi familia, mi novia y mis amigos por su apoyo constante. Agradezco a Rodrigo Rubio por su asesoría, a Andrés Herrera por su comprensión y a Roberto Godo por su apoyo. Agradezco especialmente a *Cementos Progreso* por el apoyo en la interpretación y elaboración de ensayos de laboratorio, al laboratorio de suelos *Serpin* por el apoyo con ensayos geotécnicos y a la Universidad del Valle por permitir la culminación del proyecto.

ÍNDICE

	Página
PREFACIO.....	v
LISTA DE ILUSTRACIONES	x
LISTA DE CUADROS.....	xv
RESUMEN	xvi
Capítulos	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN.....	2
III. OBJETIVOS	3
A. Objetivo general.....	3
B. Objetivos específicos.....	3
IV. MARCO TEÓRICO	4
A. Nanotecnología	4
1. Nanotecnología en el concreto.....	4
2. Nano tubos de carbono	5
3. Nanofibras de carbono.	7
4. Carbono amorfo.....	8
5. Nanotubos de Sílice.	9
6. Nano arcillas	10
7. Nanocelulosa	11
B. Arcillas	13
1. Composición mineralógica de una arcilla.	13

2. Propiedades geotécnicas.....	14
C. Hidróxido de calcio (Cal).....	15
1. Usos comunes de la cal.....	15
2. Métodos de producción.....	15
3. La cal como estabilizador de suelos.....	16
4. Nano partículas de cal.....	16
D. Técnicas de caracterización.....	17
1. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	17
2. Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM).....	19
3. Microscopías ópticas.....	19
4. Difracción de Rayos X (DRX).....	20
5. Reducción a Temperatura Programada(TPR).....	21
6. Análisis Termo Gravimétrico (TGA).....	22
V. METODOLOGÍA.....	23
A. Toma de muestras:.....	24
B. Ensayos preliminares de mecánica de suelos en <i>Laboratorio Concal</i>	24
C. Ensayos de mecánica de suelos realizados en <i>Laboratorio Serpin</i>	24
D. Tamizado de cal.....	25
E. Preparación de muestras para DRX, Microscopías y TGA.....	27
F. Preparación de muestras en Laboratorio Químico del CETEC.....	28
G. Realización de ensayos de Difracción de Rayos X (DRX) en laboratorios de <i>Cementos Progreso</i>	29
H. Realización de Análisis Termogravimétrico (TGA) en laboratorios de <i>Cementos Progreso</i>	31
I. Realización de microscopía ópticas en laboratorios de <i>Cementos Progreso</i>	32
J. Análisis de resultados.....	32

K.	Análisis de afinidad.....	33
L.	Técnicas de producción de cal	33
M.	Revisión de estudios de nanotecnología aplicada	33
VI.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
A.	Resultados de ensayos preliminares de mecánica de suelos realizados en el <i>Laboratorio de Suelos Concal</i>	34
B.	Discusión de resultados de ensayos preliminares de mecánica de suelos en <i>Laboratorio Concal</i> ..	36
1.	Resultados principales del informe.....	36
2.	Comentario sobre los resultados de ensayos preliminares de mecánica de suelos.....	36
C.	Resultados de ensayos de mecánica de suelos realizados en el <i>Laboratorio de Suelos Serpin</i>	37
1.	Resultados principales de los ensayos de mecánica de suelos.....	37
D.	Discusión de resultados de ensayos de mecánica de suelos realizados en el <i>Laboratorio Serpin</i> ...	41
1.	Discusión de resultados de análisis granulométrico.....	41
2.	Discusión de resultados de ensayos de Límites de Atterberg	42
E.	Resultados de ensayos de Difracción de Rayos X (DRX).....	44
F.	Discusión de resultados de ensayos de Difracción de Rayos X (DRX)	50
1.	Revisión de datos de las gráficas	50
2.	Descripción de las fases minerales identificadas	51
3.	Comentarios sobre las fases minerales	53
G.	Resultados de Análisis Termogravimétrico (TGA)	54
H.	Discusión de resultados de Análisis Termogravimétrico (TGA).....	75
1.	Revisión de datos de las gráficas	75
2.	Descripción de los fenómenos identificados	76
3.	Interpretación de los resultados.....	78

I.	Resultados de microscopías ópticas.....	79
J.	Resultados de microscopías ópticas.....	83
1.	Microscopías sobre muestras de arcilla sin modificar	83
2.	Microscopías en muestras de arcilla modificadas con cal	84
K.	Evaluación de afinidad de las muestras de arcilla con nano y micropartículas de cal	84
L.	Discusión de técnicas de producción de cal y posibles técnicas para producción de micro y nanopartículas de cal	86
M.	Estudios anteriores de nanotecnología aplicada en materiales de construcción de Ingeniería Civil.....	89
VII.	CONCLUSIONES.....	92
VIII.	RECOMENDACIONES	95
IX.	BIBLIOGRAFÍA CITADA	96
X.	GLOSARIO	99

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Página
Ilustración	
1. Formas básicas de los nanotubos de acuerdo a su ángulo quiral. Se presentan los incisos lo siguiente: (b) nanotubo tipo sillón, (c) nanotubo tipo zig-zag y (d) nanotubo tipo quiral.	6
2. Diagrama de clasificación de carbono amorfo.....	9
3. Imágenes TEM de mallas de silicio con red nanofibrosa formada a partir de la calcinación de LPEI en una atmósfera de nitrógeno, luego de la adsorción de una capa (A) y dos capas (B).	10
4. Imagen TEM de un cultivo de tres días de <i>Acetobacter xylinum</i> . Se puede apreciar la red de nano celulosa producida por las bacterias.	12
5. Representación del arreglo laminar de tetraedros del grupo de los filosilicatos.	14
6. Microscopía TEM de un grupo de nanopartículas de cal hexagonales y con lados de hasta 400nm.	17
7. Equipo de microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-7500F.	18
8. Difractómetro de Rayos X PANalytical de Empyrean.	21
9. Serie de tamices montados sobre la tamizadora electromagnética.	26
10. Balanza electrónica con embudo y recipiente para pesar la cal y evitar la pérdida de material tamizado.	26
11. Tamizado de muestras de arcilla con tamiz No. 200.....	27
12. Muestra de arcilla mezclándose luego de haberle agregado agua para que alcance su humedad óptima.....	27
13. Mezclado de muestra de arcilla con cal hidratada especial Horcalca en un 4%.	28
14. Medición de masa de una de las muestras de arcilla en una balanza analítica Ohaus Explorer Pro.	29

15. Muestra de arcilla montada en equipo Empyrean de PANalytical previo a su análisis.....	30
16. Equipo de DRX Empyrean de PANalytical. Puede observarse el goniómetro rotativo.	30
17. Equipo de TGA Mettler Toledo. Puede observarse el brazo blanco para montaje de la muestra.	31
18. Muestras en contenedores luego de haber sido calcinadas.	31
19. Informe de laboratorio de ensayos de granulometría y límites de Atterberg en fase preliminar del proyecto.	34
20. Informe de laboratorio de ensayos de Próctor Estándar y CBR en fase preliminar del proyecto.....	35
21. Curva granulométrica de la arcilla.	37
22. Límite líquido de las muestras de arcilla A.	38
23. Límite líquido de las muestras de arcilla A+C.....	38
24. Límite líquido de las muestras de arcilla A+200.....	39
25. Límite líquido de las muestras de arcilla A+325.....	39
26. Variación de los límites de consistencia en muestras de arcilla al aplicar cal con diferentes tamaños de grano.	40
27. Variación del Índice de plasticidad en muestras de arcilla al aplicar cal con diferentes tamaños de grano.	40
28. Informe de ensayo de difracción de Rayos X sobre muestra de arcilla A1 en Laboratorio Químico del CETEC.	44
29. Informe de ensayo de difracción de Rayos X sobre muestra de arcilla A2 en Laboratorio Químico del CETEC.	45
30. Informe de ensayo de difracción de Rayos X sobre muestra de arcilla A3 en Laboratorio Químico del CETEC.	46
31. Informe de ensayo de difracción de Rayos X sobre muestra de arcilla A4 en Laboratorio Químico del CETEC.	47

32. Informe de ensayo de difracción de Rayos X sobre muestra de arcilla A5 en Laboratorio Químico del CETEC.	48
33. Porcentaje de concentración de cada mineral en las muestras de arcilla.	49
34. Porcentaje de concentración de minerales por muestra de arcilla.	49
35. Informe de ensayo de análisis termogravimétrico sobre muestra de arcilla A1 en Laboratorio Químico del CETEC.	54
36. Informe de ensayo de análisis termogravimétrico sobre muestra de arcilla A2 en Laboratorio Químico del CETEC.	55
37. Informe de ensayo de análisis termogravimétrico sobre muestra de arcilla A3 en Laboratorio Químico del CETEC.	56
38. Informe de ensayo de análisis termogravimétrico sobre muestra de arcilla A4 en Laboratorio Químico del CETEC.	57
39. Informe de ensayo de análisis termogravimétrico sobre muestra de arcilla A5 en Laboratorio Químico del CETEC.	58
40. Informe de ensayo de análisis termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+C - 1 en Laboratorio Químico del CETEC.	59
41. Informe de ensayo de análisis termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+C - 2 en Laboratorio Químico del CETEC.	60
42. Informe de ensayo de análisis termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+C - 3 en Laboratorio Químico del CETEC.	61
43. Informe de ensayo de análisis termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+C - 4 en Laboratorio Químico del CETEC.	62
44. Informe de ensayo de análisis termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+C - 5 en Laboratorio Químico del CETEC.	63
45. Informe de ensayo de análisis termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+200 - 1 en Laboratorio Químico del CETEC.	64

46. Informe de ensayo de análisis termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+200 - 2 en Laboratorio Químico del CETEC.	65
47. Informe de ensayo de análisis termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+200 - 3 en Laboratorio Químico del CETEC.	66
48. Informe de ensayo de análisis termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+200 - 4 en Laboratorio Químico del CETEC.	67
49. Informe de ensayo de análisis termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+200 - 5 en Laboratorio Químico del CETEC.	68
50. Informe de ensayo de análisis termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+325 - 1 en Laboratorio Químico del CETEC.	69
51. Informe de ensayo de análisis termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+325 - 2 en Laboratorio Químico del CETEC.	70
52. Informe de ensayo de análisis termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+325 - 3 en Laboratorio Químico del CETEC.	71
53. Informe de ensayo de análisis termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+325 - 4 en Laboratorio Químico del CETEC.	72
54. Informe de ensayo de análisis termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+325 - 5 en Laboratorio Químico del CETEC.	73
55. Porcentaje de cambio de masa en cada fenómeno registrado.....	74
56. Temperatura promedio de ocurrencia de cada fenómeno registrado.	74
57. Porcentajes promedio de cal en las muestras de acuerdo al análisis termogravimétrico.....	75
58. Microscopía óptica de muestra de arcilla A1 con objetivo 20X.	79
59. Microscopía óptica de muestra de arcilla A2 con objetivo 20X.	80
60. Microscopía óptica de muestra de arcilla A3 con objetivo 20X.	80
61. IMicroscopía óptica de muestra de arcilla A4 con objetivo 20X.	81

62. Microscopía óptica de muestra de arcilla A5 con objetivo 20X.	81
63. Microscopía óptica de muestra de arcilla A+C1 con objetivo 20X.	82
64. Microscopía óptica de muestra de arcilla A+200 1 con objetivo 20X.	82
65. Microscopía óptica de muestra de arcilla A+C325 1 con objetivo 20X.	83

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro	
1. Datos del análisis por cribado realizado en el <i>Laboratorio de Suelos Serpin</i>	37
2. Límites de Atterberg de las muestras de arcilla A determinados en el <i>Laboratorio de Suelos Serpin</i>	38
3. Límites de Atterberg de las muestras de arcilla A+C determinados en el <i>Laboratorio de Suelos Serpin</i>	38
4. Límites de Atterberg de las muestras de arcilla A+200 determinados en el <i>Laboratorio de Suelos Serpin</i>	39
5. Límites de Atterberg de las muestras de arcilla A+325 determinados en el <i>Laboratorio de Suelos Serpin</i>	39
6. Resumen de los límites obtenidos y la reducción porcentual en el índice de plasticidad de la arcilla.	41
7. Resumen de estudios de nanotecnología aplicada citados y sus factores de impacto.....	91

RESUMEN

Entre las innumerables aplicaciones para las que se están utilizando los nanomateriales se encuentra la mejora de propiedades de materiales comunes. Dentro de la Ingeniería Civil, ésta es un área que ha tenido poco avance fuera de regulaciones y normas. Los materiales de construcción son esencialmente los mismos materiales que se usaban hace siglos, pero la nanotecnología comprende la posibilidad de mejorar sus prestaciones. La consideración de materiales para construcción mejorados podría cambiar por completo la metodología de diseño de estructuras, pavimentos o elementos geotécnicos, ya que deben considerarse mayores aportes en términos de propiedades mecánicas que influyen en la durabilidad o vida útil.

Dentro del proyecto investigó respecto a los nanomateriales más conocidos y utilizados en la actualidad. En esta parte se abarcan sus características físicas y químicas, su morfología, sus métodos de producción y sus principales aplicaciones. También se hizo una revisión de las técnicas de caracterización de nanomateriales. Debido al tamaño nanométrico de los materiales en mención, las técnicas utilizadas para caracterizarlos requieren de equipo avanzado y difícil de encontrar en el país. Entre las técnicas revisadas se encuentran: la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), la Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM), la Difracción de Rayos X (DRX), la Reducción Programada de Temperatura (TPR) y el Análisis Termogravimétrico (TGA). Dentro de la investigación se revisó la utilidad y ventajas de cada técnica.

Dentro del proyecto se evaluó el uso de micro partículas de cal para la mejora de propiedades de suelos arcillosos plásticos. La muestra de arcilla fue analizada por medio de la técnica de DRX, TGA y microscopías ópticas para determinar su composición mineral. Adicionalmente se realizaron ensayos de mecánica de suelos para determinar la mejora en las propiedades del suelo arcilloso al modificar las muestras de arcilla con cal hidratada tipo especial Horcalsa sin tamizar y pasada por los tamices No. 200 y No. 325. Se descubrió que el tamizado de la cal produce un aumento significativo en la mejora del índice de plasticidad de las arcillas respecto a la cal sin modificar. Por otro lado, no se determinó una diferencia significativa entre tamizar cal con un tamiz No. 200 y uno No. 325.

Utilizando estos resultados se revisó la afinidad con micro y nanopartículas de cal de acuerdo a un análisis a diferentes escalas. Esta revisión resultó favorable en cuanto a la afinidad de los materiales y se extrapoló para el caso de la aplicación de nanopartículas de cal. Posteriormente se revisaron las técnicas de producción de la cal con sus ventajas y desventajas, haciendo un énfasis especial en los métodos más rentables de síntesis. También se discutió el proceso de producción de micro y nanopartículas de cal.

I. INTRODUCCIÓN

Los materiales en la ingeniería civil han sido muy constantes a lo largo del tiempo y han visto poca innovación importante. El concreto sigue usando el cemento Portland desarrollado a inicios del siglo XIX y el acero estructural es esencialmente el mismo de finales del siglo XIX. Desde entonces se ha visto una mejora importante en la calidad de los materiales debido a una fabricación más cuidadosa, un control de calidad más estricto y la implementación de estándares internacionales, pero los materiales de construcción siguen siendo los mismos.

La nanotecnología es un desarrollo reciente que ha tenido un auge importante en la rama de la mejora de materiales. Actualmente se puede observar grandes mejoras en materiales como polímeros, productos médicos o superconductores eléctricos gracias a la implementación de la nanotecnología. En principio, la nanotecnología comprende la síntesis de materiales a escala nanométrica para reducir a un mínimo las imperfecciones en la estructura de los materiales y mejorar la pureza de los mismos, obteniendo así materiales de alta calidad y excelentes propiedades.

Actualmente se conducen varias investigaciones de mejora de materiales de construcción con nano materiales. La utilización de nano materiales como modificadores está teniendo resultados muy prometedores y ya se inicia con los primeros proyectos reales construidos con materiales de construcción mejorados con nano materiales. Posiblemente los materiales modificados más estudiados son el concreto y el asfalto, pero existen otros materiales de interés como la estabilización de suelos plásticos arcillosos.

Los suelos plásticos arcillosos han presentado un problema para la construcción siempre y se ha buscado la forma de estabilizarlos de diferentes maneras a lo largo del tiempo. En algunos casos se utilizan medios de drenaje, sustitución de terreno, inclusiones rígidas o estabilización con otros materiales como la cal. Para construcciones que causan un menor esfuerzo sobre la capa de terreno (como las carreteras) es muy común el uso de cal como material estabilizador. Sin embargo, no se tiene mucha información de cómo el tamaño de grano de la cal pueda afectar la modificación de las propiedades de un suelo plástico. Hoy en día se tiene la posibilidad de producir cal en granos nanométricos y resulta interesante la evaluación de su estabilización ya que este procedimiento es tan común en el área de la infraestructura vial.

II. JUSTIFICACIÓN

A medida que avanza el tiempo la sociedad va cambiando y con ella cambian la tecnología y las actividades de las personas. Es importante ver que, a medida que la sociedad avanza en el desarrollo de nueva tecnología también aparecen nuevas demandas y una de ellas es la demanda de mejores estructuras.

Hemos visto cómo los códigos de diseño han cambiado recientemente con eventos como el sismo de Northridge. Los cambios en las metodologías de diseño demuestran que la Ingeniería Civil no es un área en la que la investigación ya está agotada. Por el contrario, existen muchas formas en que se pueden mejorar las formas en que se construye en la actualidad. Si bien las metodologías de diseño y los códigos han tenido fuertes cambios recientemente, pareciera que los materiales de construcción son un área que se ha mantenido más estable.

Guatemala es un país con un alto índice de incidencia sísmica debido a su ubicación geográfica. Las estructuras que se diseñan en Guatemala suelen ser relativamente más costosas y pesadas en nuestra zona debido a la alta sismicidad.

Otra tendencia importante es el desarrollo de materiales amigables con el ambiente que puedan desarrollarse de forma sostenible. Cada vez se vuelve más importante justificar que se hacen esfuerzos por reducir la contaminación de las industrias. Sin embargo, la fabricación de cemento es un proceso delicado que suele tener impactos negativos en el ambiente.

Un cambio en los materiales de construcción podría permitir que se optimizaran los diseños de estructuras reduciendo su peso, sus dimensiones e incluso su costo de construcción. La adición de nano materiales a los materiales convencionales de construcción parece una idea innovadora que permitirá un cambio grande en la forma de construir. Además de esto, los nano materiales pueden sintetizarse con subproductos de otras industrias aprovechando los desechos y en algunos casos hasta pueden ser biodegradables. Los resultados de las investigaciones más recientes son alentadores y el desarrollo de métodos de producción a gran escala de nano materiales se va convirtiendo poco a poco en una realidad.

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Evaluar la influencia de los materiales a escala nano métrica sobre las propiedades mecánicas, geotécnicas y térmicas de los materiales de construcción convencionales y los suelos naturales.

B. Objetivos específicos

1. Estudiar materiales a nano escala que son aplicables a la Ingeniería Civil, con sus metodologías de producción o síntesis.
2. Discutir técnicas de caracterización para las propiedades morfológicas, químicas y térmicas de los materiales modificadores y materiales de construcción convencionales.
3. Proponer un método de producción adecuado para la fabricación de nano y micro partículas de cal.
4. Evaluar las características geotécnicas de una arcilla de mediano a alto índice de plasticidad.
5. Caracterizar una muestra de arcilla de mediano a alto índice de plasticidad por medio de las técnicas de Difracción de Rayos X (DRX), Análisis Termo Gravimétrico (TGA) y microscopías ópticas.
6. Proponer un material a escala micro o nano métrica, ideal para mejorar las características geotécnicas de arcillas con altos índices de plasticidad.
7. Evaluar las características geotécnicas de una arcilla modificada con el material propuesto.
8. Análisis bibliográfico de resultados de otros investigadores al modificar materiales de construcción con nanomateriales.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Nanotecnología

La idea de “nanotecnología” fue introducida formalmente al mundo de la ciencia por Richard Feynman en 1959, cuando el dio su famosa presentación: “There’s Plenty of Room at the Bottom”. Desde ese momento se comenzaron a desarrollar nuevos avances en el campo de la manipulación de la materia a una escala nano métrica por parte de físicos, químicos y biólogos. En poco tiempo se comprobó que las ideas revolucionarias de Feynman eran aplicables y abrían una gran área de desarrollo en distintas áreas de la ciencia. (Sanchez y Sobolev, 2010)

En la actualidad, el término “nanotecnología” se utiliza para referirse a casi cualquier cosa que suceda a una escala muy pequeña, sin embargo, una forma más adecuada de definir la nanotecnología sería: el entendimiento, control y reestructuración de la materia a una escala nano métrica, o sea dimensiones menores a 100nm. En general, se han desarrollado dos tendencias o metodologías de trabajo en el campo de la tecnología. La primera es conocida como “top-down” y se refiere a desarrollar objetos de dimensiones normales en la nano-escala. Un ejemplo de esto sería el desarrollo de componentes electrónicos en tamaños nano-métricos. El otro enfoque se conoce como “Bottom-up” y se trata de desarrollar materiales en escala nano-métrica y luego la utiliza en otro tipo de materiales. Este sería el caso, por ejemplo, de mejorar materiales de construcción con nanomateriales. (Sanchez y Sobolev, 2010)

1. Nanotecnología en el concreto. El concreto, el material de construcción más utilizado en el mundo, es un material nano-estructurado, multifásico y compuesto que envejece con el paso del tiempo. Este material está compuesto por una fase amorfa con cristales de tamaños nano-métricos y micro-métricos y otra fase que es agua ligada. La fase amorfa que se mencionó se conoce como silicato cálcico hidratado (CSH por sus siglas en inglés) y es la responsable de unir todas las partes del concreto. Podría decirse que el CSH es el adherente que mantiene unido el concreto y sus agregados, adicionalmente, el CSH es un nano-material. (Sanchez y Sobolev, 2010)

La nano-ciencia y la nano-ingeniería han abordado el tema del concreto desde dos enfoques principales. El enfoque de la nano-ciencia consiste en la medición y caracterización de estructuras a escala nano-métrica y micro-métrica dentro de los materiales cementicios para poder comprender como estas estructuras afectan las propiedades del concreto en una macro-escala. Para lograr esto se usan técnicas avanzadas de análisis y caracterización y modelado atomístico y molecular. Por otro lado, la nano-ingeniería trata de las técnicas de manipulación de las nano-estructuras para desarrollar compuestos cementicios multifuncionales, con mejor desempeño, durabilidad y posiblemente muchas otras propiedades tales como

auto-limpieza, auto-reparación y alta ductilidad, entre otras. El comportamiento del concreto es modificado adicionando bloques o componentes nano-métricos (como nano-partículas, nano-fibras o nano-tubos) que permiten controlar y agregar nuevas propiedades al material. Para que esto se desarrolle correctamente es necesario que los materiales tengan una electronegatividad afín, de modo que exista una interacción electrostática entre los materiales. Los componentes podrían agregarse en forma de un aditivo, o mezclado entre las partículas de cemento, o ligado a alguno de los agregados del concreto. (Sanchez y Sobolev, 2010)

La mayor debilidad que presenta el cemento se debe a su baja resistencia y rápida aparición de grietas cuando se somete a esfuerzos de tensión. El problema es muy conocido por todos los que utilizan el material, y como formas innovadoras de controlar esta debilidad se ha buscado la opción del concreto reforzado con fibras (FRC, por sus siglas en inglés). Las fibras con las que se han hecho ensayos han sido de acero, polipropileno y carbono generalmente. Ya se ha comprobado que el refuerzo con fibras puede mejorar la ductilidad del material, reducir la formación y expansión de agrietamiento, y mejorar el desempeño mecánico del concreto y otros materiales cementicios. El FRC continúa siendo un tema de actualidad que promete muchas oportunidades para la mejora de las propiedades del concreto. (Eftekhari y Mohammadi, 2015)

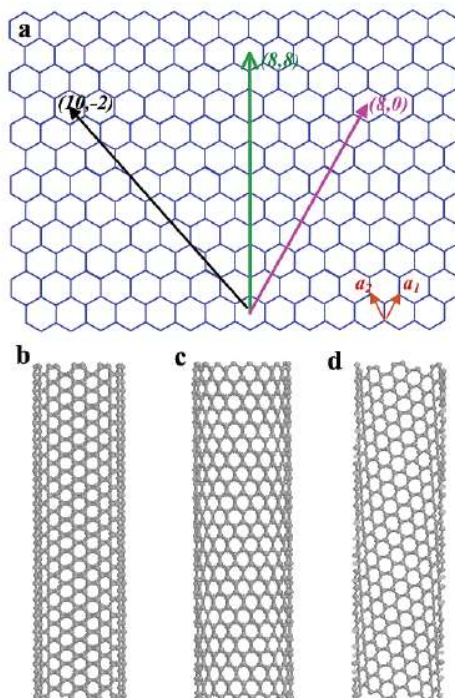
2. Nano tubos de carbono. Recientemente se descubrió lo increíblemente constantes que son los tamaños de los enlaces sp^2 de carbono. Esto hizo que surgiera un especial interés por las formaciones alótropos de carbono tales como el grafeno, los nano-tubos de carbono o el fullereno. En todas estas formaciones se cuenta con una distribución hexagonal, densa y uniforme de enlaces sp^2 de carbono, de modo que tienen propiedades similares. Los enlaces sp^2 se forman en algunos átomos que producen orbitales híbridos al enlazarse como el carbono. En este caso los orbitales “s” o “p” dejan de comportarse como tal y su forma cambia de modo que tienen carácter de orbital “s” y orbital “p” al mismo tiempo. Una característica típica de los orbitales tipo sp^2 es que permiten la formación de enlaces dobles y enlaces covalentes. (Eatemadi, *et al*, 2014)

Un nanotubo de carbono es esencialmente una hoja de grafeno enrollada, el cuál puede ser un nanotubo de carbono de pared simple (SWCNT, por sus siglas en inglés) o un nanotubo de carbono de pared múltiple (MWCNT, por sus siglas en inglés). (Eatemadi, *et al*, 2014) Los nanotubos de carbono son un excelente ejemplo de lo nobles que pueden ser los nano-materiales. Su composición química y sus enlaces atómicos son unos de los más simples, sin embargo tienen una gran riqueza en sus propiedades. Como se indicó antes, los nanotubos de carbono de pared simple son un cilindro formado por una hoja de grafeno, sin embargo el ángulo en que se “enrolla” la hoja de grafeno puede tener gran influencia en las propiedades del nanotubo. A esta propiedad se le conoce como quiralidad. El vector quiral indica el ángulo que hay entre el eje del nanotubo y la dirección de los hexágonos de carbono, y se determina por medio de los factores m y

n. Una de las propiedades más claramente afectadas por la quiralidad del nanotubo es la conducción eléctrica. (Dai, 2002)

Las tres formas básicas en que puede organizarse el nanotubo de pared simple, según su quiralidad, son el nanotubo zigzag, el nanotubo sillón y el nanotubo quiral. Estos se clasifican de acuerdo a un par de enteros (m y n) que representan un par de vectores unitarios que definen la dirección junto con el plano de grafeno. Cuando $m=0$, se considera un nanotubo zigzag; cuando $n=m$, se considera un nanotubo sillón; y todos los demás casos son considerados nanotubos quirales. Cuando $n-m$ es un múltiplo de 3, o $n=m$ el nanotubo se considera metálico, en el sentido en que tendrá una conductividad eléctrica extremadamente elevada. En los demás casos, el nanotubo puede considerarse un semiconductor, o semi-metálico y su conductividad eléctrica será unas 50 veces menor. Las propiedades eléctricas de los nanotubos los han hecho sujetos de mucha investigación en el campo de la electrónica, y ahora también se aplican en la construcción de transistores, componentes lógicos, módulos de memoria o sensores, y demás aplicaciones de la nano-electrónica. (Eatemadi, *et al*, 2014)

Ilustración 1. Formas básicas de los nanotubos de acuerdo a su ángulo quiral. Se presentan los incisos lo siguiente: (b) nanotubo tipo sillón, (c) nanotubo tipo zig-zag y (d) nanotubo tipo quiral.



(Dai, 2002).

Las estructuras de carbono enlazadas en distribuciones hexagonales tienen enlaces débiles fuera del plano, generalmente de tipo Van der Waals; y enlaces fuertes dentro del plano. Además de esto, las estructuras de nanotubos de carbono pueden ser de pared simple o de pared múltiple. Por medio de un

análisis de espacios reales se ha logrado determinar que la distancia entre cada pared de un nanotubo de pared múltiple está entre 0.34 y 0.39 nm. Dependiendo de la cantidad de paredes que tenga el nanotubo, su diámetro interno puede estar entre 0.4 nm y alrededor de 3 nm, por otro lado, el diámetro exterior puede variar mucho más, en el rango entre 2 nm y 20 nm. El largo de un nanotubo de pared múltiple puede alcanzar el rango de los micrómetros y suele ser mayor al largo de los nanotubos de pared simple, sin embargo, los nanotubos de pared simple tienen más probabilidades de enlazarse con otros nanotubos de pared simple y formar cuerdas, esto gracias a su estructura de tipo cristalino. (Eatemadi, *et al*, 2014)

Ambos extremos de cada nanotubo de carbono suelen tener topes en forma de domos, formados por la mitad de una molécula de fullereno de cada lado. Las moléculas de fullereno tienen algunos defectos pentagonales, de modo que forman esferas, o en este caso domos que cierran las puntas de los nanotubos. La formación de estos “topes” en los extremos de cada nanotubo produce una reducción en su capacidad de formar enlaces con otras estructuras. (Eatemadi, *et al*, 2014)

3. Nanofibras de carbono. Las nanofibras de carbono (CNF por sus siglas en inglés) son filamentos nanométricos con estructura grafitica. Generalmente están formados por láminas de grafeno enrolladas alrededor de un eje, y en algunos casos pueden ser un tubo hueco por dentro. Pueden clasificarse de acuerdo al ángulo que forman con su eje en tres tipos fundamentales: “platelet” cuando las láminas son perpendiculares al eje, “fishbone” cuando las láminas están inclinadas y “parallel” cuando las láminas se enrollan de forma paralela al eje del tubo. Además del caso de crecimiento unidireccional (al que pertenecen los tres tipos anteriores), algunos autores han identificado morfologías tipo “pulpo” cuando varias fibras crecen desde un mismo núcleo de catalizador y fibras tipo “espiral, cuando el eje de la fibra se desarrolla formando una hélice. (del Río, 2011)

Las nano fibras de carbono suelen confundirse con los nanotubos de carbono de pared múltiple en muchos casos. Esto sucede especialmente con las nano fibras de tipo “parallel” ya que ambas nano estructuras están compuestas por láminas de grafeno enrolladas de forma paralela a un eje. La diferencia principal radica en que las nano fibras vienen del crecimiento filamentario de enlaces sp^2 de carbono grafitico, lo cual da lugar a un cociente de aspecto muy alto y propiedades mecánicas inferiores a las de los nanotubos. Por otro lado, los diámetros de las nano fibras suelen ser mayores a los de los nanotubos de carbono. Esto significa que, en la mayoría de casos, si se encuentra un nanotubo de una longitud muy grande o un diámetro muy pequeño, es más probable que este sea en realidad una nanofibra de carbono. (Juanico, 2004)

Las dimensiones y formas que puede tener una nanofibra de carbono pueden presentar muchas variaciones. El diámetro promedio de una nanofibra de carbono está entre los 3 nm y los 300 nm, y el largo puede llegar hasta 100 micrómetros. Aunque sus dimensiones son muy variables, se puede observar que

su cociente de aspecto (razón longitud/diámetro) siempre es elevada. Su dimensión más constante es la distancia entre láminas de grafeno, la cual se mantiene alrededor de 0.34 nm. (Juanico, 2004)

En los últimos años, el interés en la investigación y desarrollo en el tema de las nano fibras de carbono ha tenido un gran aumento. Las nano fibras de carbono se han mostrado como un material con excelentes propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas de modo que se ve como un material con potencial para la ingeniería. (Merino, 2006)

Una de las áreas en las que se ha realizado mayor esfuerzo de investigación es en el desarrollo de materiales nano compuestos. Además, recientemente se ha logrado manipular mejor las características y propiedades de las nano fibras para adaptarlas a diferentes aplicaciones. Algunas de las áreas de desarrollo potencial para materiales nano compuestos son los sectores de la automoción, electricidad, aeronáutica, energía eólica, medio ambiente y materiales de construcción. (Borrell, 2010)

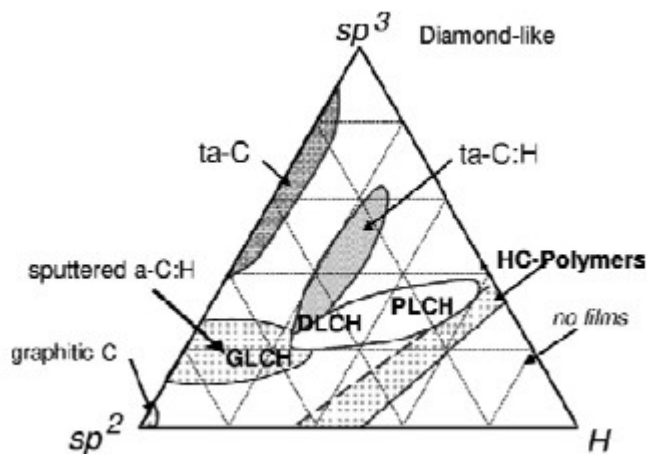
Las nano fibras y nanotubos de carbono se producen prácticamente de la misma forma. Sin embargo, las nano fibras de carbono han presentado mayor facilidad de síntesis, comercialización y producción en masa. Los principales problemas de los nanotubos de carbono son sus costos elevados y los pequeños volúmenes de producción, y las nano fibras resuelven ambos problemas. Aunque las propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas de las nano fibras de carbono suelen ser inferiores a las de los nanotubos, su precio es mucho menor y ya es posible fabricarlas a escala industrial. En España, el Grupo Antolín Ingeniería es la primera empresa en desarrollar tecnología para fabricar nano fibras de carbono a escala industrial utilizando la técnica de CVD con catalizador flotante introducido de manera continua. En 2006 Grupo Antolín pudo vender cada kilo de NFC a 55 dólares y desde entonces ha tenido el objetivo de rebajar el precio hasta 5 dólares por kilo. (Borrell, 2010)

4. Carbono amorfo. El carbono amorfo es un tipo de carbono que consiste de átomos unidos con enlaces sp^3 y sp^2 en forma desordenada y sin ningún patrón a largo plazo. Este tipo de carbono no es una estructura cristalina, pero puede considerarse que está compuesto por una gran cantidad de pequeños cristales dentro de los cuáles si se forman patrones a corto plazo. El carbono amorfo, no necesariamente es un mal material, por el contrario, este está siendo explotado en la industria para la fabricación de recubrimientos súper duros. Esto se logra cuando se forman láminas delgadas de átomos de carbono con hibridación sp^2 y sp^3 . Este tipo de láminas se conocen como “Carbono tipo diamante” (DLC por sus siglas en inglés). El DLC, como su nombre lo indica, es un material que comparte muchas de las propiedades mecánicas del diamante y se utiliza como recubrimiento debido a su dureza excepcional. (Pardo, 2013)

El carbono amorfo, suele hidrogenarse con gran facilidad debido al tipo de enlaces que forma. Por ello, la forma más común de clasificar los materiales de carbono amorfo es según su porcentaje de enlaces sp^2 ,

sp^3 e hidrógeno. Los cuatro tipos de carbono amorfo que se distinguen comúnmente son el “tipo polímero” (PLCH), “tipo grafito” (GLCH), “tipo diamante” (DLC) y tetrahédrico (ta-C). (Pardo, 2013)

Ilustración 2. Diagrama de clasificación de carbono amorfo.

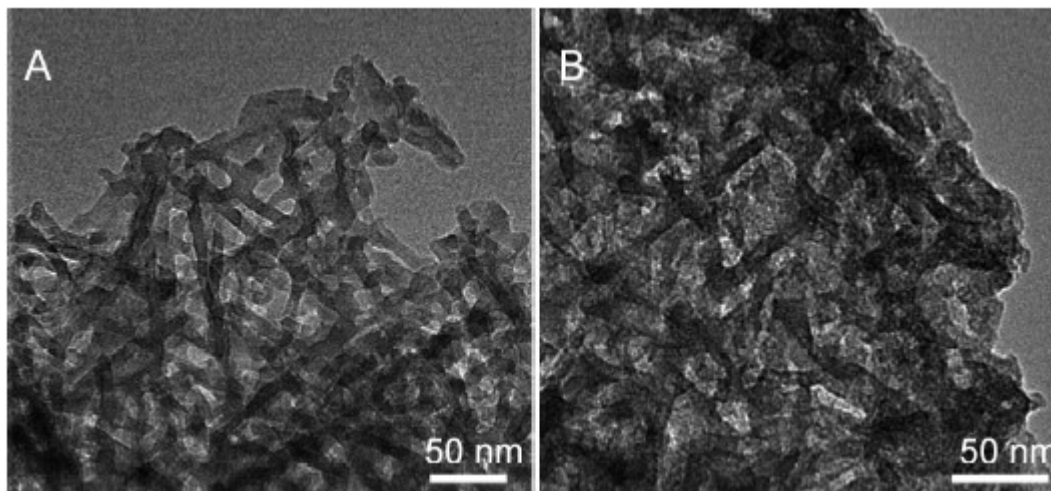


(Pardo, 2013)

5. Nanotubos de Sílice. Los nanotubos de silicio son nano materiales unidimensionales de silicio con estructuras tubulares. El diámetro de los nanotubos de silicio suele estar alrededor de los 10 nanómetros y su largo suele estar entre 1 y 2 micrómetros. Esta clase de nanotubos son particularmente estudiados por sus aplicaciones para almacenamiento de hidrógeno, aplicaciones médicas y aplicaciones de tecnología ambiental. A diferencia de los nano tubos de carbono, sus propiedades mecánicas no son su característica más aplicable. (Yuan, *et al*, 2013).

Los nanotubos de silicio pueden producirse con características muy uniformes por medio de plantillas orgánicas, inorgánicas o biológicas. Inicialmente se le prestó mucha atención a la utilización de plantillas orgánicas debido a la capacidad de producir gran cantidad de nanotubos de silicio controlando sus dimensiones y estructura. Sin embargo, se ha podido notar que estas reacciones requieren condiciones demasiado extremas de temperatura y pH, y tienen tiempos de reacción largos. Por otro lado, se encuentran las plantillas biológicas que utilizan procesos de silicificación como los que suceden naturalmente en las esponjas y las diatomeas. Estos procesos tienen la ventaja de que pueden darse bajo condiciones ambiente, pero tienen tiempos de reacción demasiado largos. Actualmente se ha logrado desarrollar un método de producción de nanotubos de silicio auto-ensamblados aprovechando la polietilamina lineal (LPEI por sus siglas en inglés) como plantilla para el proceso. Este permite obtener características uniformes a un costo bajo y tiempo de reacción y eficiencia aceptables, probablemente este sea el método más eficiente desarrollado a la fecha. (Yuan, *et al*, 2013)

Ilustración 3. Imágenes TEM de mallas de silicio con red nanofibrosa formada a partir de la calcinación de LPEI en una atmósfera de nitrógeno, luego de la adsorción de una capa (A) y dos capas (B).



(Yuan, *et al*, 2013)

6. Nano arcillas. Las arcillas son la clase de suelo con los granos más finos (menores a 0.004 mm) y han sido utilizadas para una gran variedad de aplicaciones desde la antigüedad. La estructura de las arcillas está formada por capas y estas capas le dan una gran área superficial. Por la misma razón, las arcillas suelen tener la capacidad de almacenar agua e hincharse como resultado de esto. Por otro lado, la tecnología de nanoarcillas es un desarrollo reciente. Las nanoarcillas han cobrado importancia debido a las ventajas que han demostrado al combinarse con polímeros, mejorando sus propiedades mecánicas y su estabilidad a altas temperaturas. De hecho, en 2005 el consumo de los materiales nanocompuestos de arcilla alcanzó el 24% del total de materiales nanocompuestos consumidos en el mundo. (Uddin, 2008)

El material esencial de las nanoarcillas es la montmorillonita, un tipo de arcilla llamada así porque se identificó en el poblado de Montmorillon, Francia en 1847. La montmorillonita es de origen orgánico pero para transformarla en un nanomaterial utilizable es necesario modificar su estructura de capas de arcilla aprovechando su capacidad de intercambio de cationes. En general, la montmorillonita se suele clasificar como montmorillonita de calcio o montmorillonita de sodio. (Uddin, 2008)

El proceso por medio del cual se obtienen las nanoarcillas se conoce como intercalación compatibilización. En este proceso se aprovecha la capacidad de intercambio de cationes de las arcillas para sustituir sus cationes naturales por cationes orgánicos. La nanoarcillas naturales son hidrofílicas, pero difíciles de mezclar en la mayoría de materiales y se les aplica este proceso para volverlas un material organofílico fácil de mezclar con otros materiales como polímeros. Su superficie es tratada con un químico orgánico o semi-orgánico llamado intercalante capaz de introducirse entre las capas de arcilla y modificar su superficie volviéndola organofílica. (Uddin, 2008)

Algunas de las características importantes de las nanoarcillas son su razón de aspecto y su gran área superficial. El largo de una partícula de nanoarcilla suele estar entre 1.5 y 0.1 micrómetros, pero su diámetro o espesor se encuentra alrededor de 1 nanómetro. Esto significa que su razón de forma es increíblemente alta. Por otro lado, las nanoarcillas suelen tener una gran área superficial de aproximadamente $750 \text{ m}^2/\text{g}$, la cual es responsable de sus excelentes características de absorción. (Uddin, 2008)

La principal aplicación de las montmorillonitas es como un agregado de polímeros para mejorar las propiedades mecánicas y estabilidad térmica de estos materiales, pero pueden ser utilizadas para muchas otras aplicaciones. La montmorillonita de sodio, por ejemplo, es conocida por su aplicación en lodos de perforación de pozos, arena de gatos, bloques de cemento, dinamita, concreto y agentes limpiadores como el cloro. Por otro lado, la montmorillonita de calcio tiene minerales que favorecen la producción de enzimas en organismos vivos. Esto mejora el crecimiento rápido de cultivos, y la resistencia a enfermedades de las plantas, así como la mejora en el crecimiento del ganado que consume plantas sembradas en terrenos ricos en montmorillonita. (Uddin, 2008)

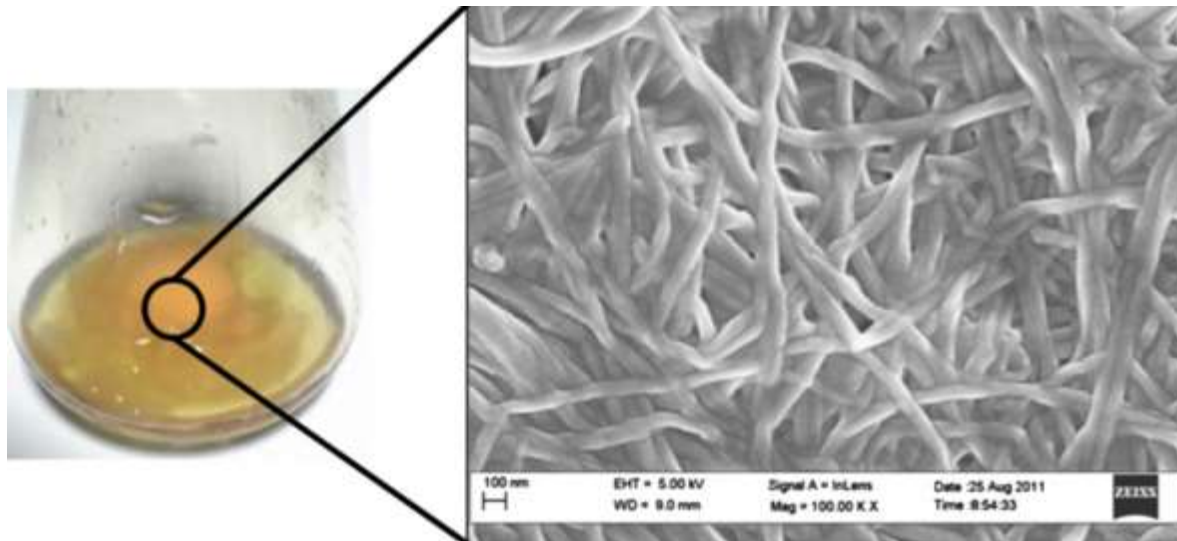
7. Nanocelulosa. La nanocelulosa se refiere a moléculas nano-estructuradas de celulosa. El desarrollo de este material viene desde hace unos cuarenta años cuando se comenzó a trabajar con ella en los laboratorios Rayonier de Nueva Jersey (Bhalerao, *et al*, 2015). Recientemente, este material comenzó a ganar popularidad debido a que los investigadores buscan desarrollar materiales sostenibles y renovables. El auge de los materiales amigables con el ambiente viene a impulsar la investigación de la utilización de la nanocelulosa como material de refuerzo en materiales de uso cotidiano como polímeros o el concreto. (Lee, *et al*, 2014)

- La palabra nano celulosa se usa para describir un grupo de materiales nano estructurados de celulosa, pero entre estos se pueden distinguir tres tipos diferentes: los nano cristales de celulosa (CNC por sus siglas en inglés), las nano fibras de celulosa (CNF por sus siglas en inglés) y la celulosa bacteriana (BC por sus siglas en inglés). (Bhalerao, *et al*, 2015)
- Los nano cristales de celulosa son biomateriales muy nobles y de amplio rango de aplicabilidad. Su diámetro suele estar alrededor de 10 nm y su largo entre 100 y 200 nm. Se ha comprobado que se pueden combinar con materiales de construcción inorgánicos mejorando las propiedades mecánicas y mejorando el costo y tiempo de vida de los proyectos en que se utilizan. (Bhalerao, *et al*, 2015)
- Las nano fibras de celulosa son fibrillas con diámetros entre 2 y 10 nm y un largo que puede alcanzar las decenas de micrómetros. La relación de aspecto de estas fibras es muy alta, por lo que se usan comúnmente como material de refuerzo para prevenir agrietamiento. En el concreto estas fibras ayudan a prevenir que aparezcan grietas desde los vacíos nanométricos que se forman dentro del concreto. (Bhalerao, *et al*, 2015)

La celulosa bacterial es un material superior a la celulosa de las plantas por su pureza y porque su estructura molecular le da propiedades físicas y químicas ausentes en la celulosa de las plantas. Entre estas propiedades se puede mencionar mejores propiedades mecánicas, mejor absorción de agua, alta cristalinidad, una red de fibras más finas y más puras, alta transparencia, sus fibras tienen la capacidad de unirse entre ellas, son adaptables a estructuras vivas y pueden moldearse durante su formación. Su diámetro es apreciablemente mayor, entre 25 y 86 nm y su largo puede ser de varias decenas de micrómetros. (Bhalerao, *et al*, 2015)

Existen dos formas principales para obtener la nanocelulosa. La primera se logra descomponiendo materiales ricos en celulosa que son principalmente madera, algodón, trigo, remolacha, papa y algas. Estas plantas se descomponen y convierten en una pulpa y la pulpa pasa por un proceso de electro-hilado en el que se producen las nano fibras de celulosa (CNF). Las fibras resultantes consisten de partes cristalinas y regiones amorfas. Si se desea se puede continuar con un proceso de hidrólisis ácida para remover las regiones amorfas de las nano fibras de celulosa dejando nano cristales de celulosa (CNC). La segunda forma de obtener nanocelulosa es por medio de la fermentación de azúcares usando bacterias como las *Acetobacter*. Durante la formación la bacteria produce fibras de celulosa en un tamaño nanométrico. (Bhalerao, *et al*, 2015)

Ilustración 4. Imagen TEM de un cultivo de tres días de *Acetobacter xylinum*. Se puede apreciar la red de nano celulosa producida por las bacterias.



(Bhalerao, *et al*, 2015)

De los métodos de producción de la nanocelulosa puede verse algo evidente. Aunque la celulosa bacterial tenga mejores propiedades en general, su forma de producción tiene más limitaciones ya que se depende por completo de la biosíntesis de celulosa por medio de las bacterias. Pueden pasar semanas en un laboratorio para poder conseguir cantidades trabajables de celulosa bacterial, aunque algunos

investigadores han desarrollado bioreactores en aerosol para acelerar este proceso. Por otro lado, la formación de nanocelulosa a partir de plantas es un proceso más fácil de industrializar. (Lee, *et al*, 2014)

La empresa CelluForce ya está produciendo nanocelulosa a gran escala. Su fábrica está produciendo una tonelada de nanocelulosa diaria y funciona aprovechando los desperdicios de una planta papelera vecina. (Bhalerao, *et al*, 2015)

Una de las aplicaciones más estudiadas de la nanocelulosa ha sido en el área de los polímeros. La nanocelulosa se utiliza como refuerzo para otros bio-polímeros con bajas prestaciones mecánicas como el PLA. Resultado de estas investigaciones se ha logrado demostrar que la nanocelulosa funciona mejor al combinarla con polímeros elastoméricos pero debe agregarse en proporciones tan grandes como el 30% del volumen. Además, se ha demostrado que las prestaciones mecánicas de polímeros reforzados con celulosa bacteriana es superior a las de polímeros reforzados con nano cristales de celulosa. (Lee, *et al*, 2014)

Por otro lado, se ha estudiado la posibilidad de reforzar concreto con nano fibras de celulosa. En este caso se han ensayado vigas de concreto para verificar si este refuerzo de nanocelulosa aumenta la energía necesaria para agrietarlo. Los resultados de las investigaciones son muy prometedores ya que se demuestra que la cantidad óptima de nano fibras de celulosa es solo el 3% del volumen y que esta aumenta la energía necesaria para agrietar la viga en un 53%. (Bhalerao, *et al*, 2015)

B. Arcillas

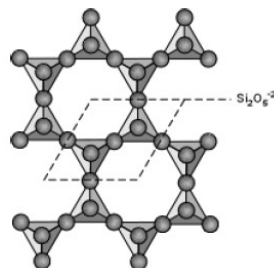
1. Composición mineralógica de una arcilla. Las fracciones arcillosas de un suelo generalmente están compuestas por minerales secundarios. La mayor parte de las arcillas están compuestas por silicatos, aunque pueden tener minerales no silicatos. La mayoría de los minerales en suelos arcillosos son filosilicatos como la caolinita, montmorillonita, illita, vermiculita y alofán. Las variaciones en las propiedades de las arcillas están estrechamente relacionadas a su composición mineral. Resulta importante conocer la composición mineralógica de una arcilla ya que la variación en sus propiedades puede ser muy grande. Algunas de las propiedades de las arcillas determinadas por su composición mineral son su plasticidad, cohesión, adhesión, y su capacidad de intercambio de cationes. (Rucks *et al*, 2004)

Dentro de los minerales no filosilicatos presentes en la arcilla se puede encontrar otras formas de sílice, óxidos e hidróxidos de hierro, óxidos e hidróxidos de aluminio y carbonato de calcio. Algunos ejemplos de estos minerales podrían ser el cuarzo, hematita, geotita o gibbsita. Es muy común encontrar que parte de las fases minerales demuestre su estructura cristalina y otra parte esté en estado amorfo. (Rucks *et al*, 2004)

Debido a la que la mayor parte de las arcillas está compuesta por minerales filosilicatos, estos suelos tienen un área superficial muy elevada debido a su estructura laminar. Esta área superficial es en realidad

una superficie activa a nivel molecular con enlaces no saturados que pueden interactuar con otras sustancias. La interacción puede suceder con el agua que es una sustancia polar, lo cual da lugar al comportamiento plástico de las muestras de agua y arcilla. (García y Suárez, s.f.)

Ilustración 5. Representación del arreglo laminar de tetraedros del grupo de los filosilicatos.



(Nelson, 2012)

Los silicatos suelen agruparse en grupos de SiO₄⁻⁴ los cuales están compuestos por un átomo de silicio al centro y cuatro átomos de oxígeno con carga neta -1 a su alrededor. El grupo SiO₄⁻⁴ suele acomodarse formando un tetraedro. En el caso de los filosilicatos, los minerales suelen estar hidratados con grupos OH. La adición del grupo OH a la estructura de los tetraedros produce que estos se acomoden en forma de octaedros. Por esto, las arcillas forman láminas entre capas de tetraedros y capas de octaedros dependiendo de sus fases minerales. (García y Suárez, s.f.)

2. Propiedades geotécnicas. Las arcillas son la fracción más fina de los suelos y existen una variedad de formas con diferentes propiedades. Uno de los suelos más estudiados son las arcillas expansivas debido a los daños y pérdidas que suelen ocasionar sobre estructuras ligeras como carreteras, pistas de aterrizaje, viviendas o edificios pequeños. Estas arcillas son muy susceptibles a hincharse o consolidarse con cambios en la humedad del suelo que podrían suceder por corte de árboles, riego excesivo, fugas de tuberías, o agua de lluvia. (Zamora, 2002)

En general las arcillas expansivas son más abundantes en zonas áridas o semiáridas y en zonas con climas tropicales y alternancia entre estaciones seca y lluviosa. El comportamiento macrofísico de estas arcillas se debe a la interacción entre las superficies de las partículas sólidas con el agua que se acumula en los vacíos entre los granos de suelo. Los compuestos iónicos presentes en el agua interactúan con las moléculas de la matriz arcillosa y se adhieren a ella. (Zamora, 2002)

El fenómeno de expansión de arcillas se produce fundamentalmente por la interacción con el agua. Se produce un fenómeno capilar en las arcillas debido al incremento en los esfuerzos efectivos que actúan sobre ella. Cuando un suelo arcilloso pierde agua por algún proceso como la evaporación, se produce una tensión capilar que causa la contracción del suelo. En modo contrario, cuando el suelo seco se coloca en presencia de agua, esta romperá la tensión capilar obteniendo un aumento en el volumen del suelo o expansión. (Assalia, 1990)

Las arcillas tienen una alta capacidad de retención de agua, lo cual se debe principalmente a su estructura y textura. Los dos medios principales por medio de los cuales una arcilla puede retener agua son por absorción y por adsorción. La absorción es la retención de agua por procesos físicos se da principalmente por las características de textura de la arcilla como su porosidad o superficie. La adsorción se produce cuando la arcilla tiene una interacción química con la sustancia adsorbida. (García y Suárez, s.f.)

Una de las características principales de la arcilla es su plasticidad. La plasticidad se produce porque el agua tiene un efecto lubricante sobre las láminas de material arcilloso. Por esto la presencia de agua facilita que las láminas se deslicen unas sobre otras en presencia de algún esfuerzo. Para cuantificar el nivel de plasticidad suelen utilizarse los límites de Atterberg, de los cuales se desprende el índice de plasticidad. En general, los suelos más finos y con estructura más imperfecta serán más plásticos. También es importante mencionar que la plasticidad de una arcilla puede variar de forma importante de acuerdo a los minerales que la componen. (García y Suárez, s.f.)

C. Hidróxido de calcio (Cal)

1. Usos comunes de la cal. La cal es un material de uso muy amplio en diferentes aplicaciones e industrias. En la industria de alimentos se utiliza en el procesado de bebidas carbonatadas, para el proceso de nixtamalización de harinas de maíz, como suplemento de calcio y facilitador de la digestión. También se utiliza para limpieza de drenajes, como regulador de acidez, mejorador de suelo para cultivos o estabilizados de material subbase en carreteras. (Jostchemical, s.f.)

2. Métodos de producción. Existen diferentes formas de obtener cal sin embargo la más común y utilizada comercialmente se describe a continuación. Se inicia con la extracción de roca caliza y posteriormente su molienda. Luego de haber molido la caliza esta se debe calcinar a temperaturas superiores a los 1800 °F para convertirla en óxido de calcio. El óxido de calcio se hidrata haciéndolo reaccionar con agua en una serie de hidratadores lo cual da como resultado la cal hidratada o hidróxido de calcio. (National Organic Standards Board, 2002)

La cal también puede producirse en un ambiente de laboratorio y a menor escala usando soluciones acuosas de hidróxido de sodio y cloruro de calcio. Finalmente, se puede encontrar de forma natural aunque es poco común. (National Organic Standards Board, 2002)

3. La cal como estabilizador de suelos. Uno de los usos comunes de la cal es la estabilización de suelos plásticos arcillosos. La modificación con cal de una arcilla puede ser más efectiva si el suelo es más plástico y si el grano de la arcilla es más fino. La reacción química que se produce entre el hidróxido de calcio y la arcilla tiene dos aspectos principales. El primer aspecto consiste en que la cal aglomera las partículas finas de arcilla en partículas más gruesas y desmenuzables por medio de un proceso conocido como intercambio de base. El segundo aspecto es que se produce una cementación o endurecimiento del suelo debido a las reacciones entre la cal y el silicio y alúminas presentes en el suelo formando silicatos de calcio y aluminatos. (Gracia, 1996)

La modificación con cal tendrá efectos sobre la arcilla como un incremento en su resistencia y una disminución en la sensibilidad a cambios volumétricos por cambios en el contenido de agua. También se formará una barrera estabilizadora de cal en la superficie tratada. Esta barrera limita el paso de la humedad evitando que las capas inferiores de suelo experimenten cambios rápidos en su contenido de agua. Se debe tener en cuenta que la modificación del suelo es de carácter permanente. (Gracia, 1996)

La efectividad de un tratamiento de suelo con cal depende en gran medida del tipo de suelo que se esté modificando. Para que las reacciones se den de forma más sencilla es recomendable que el suelo sea plástico y tenga un alto porcentaje de arcilla. En general se busca estabilizar suelos con índices de plasticidad superiores a 10 y con al menos un 15% de material que atraviese un tamiz No. 200. (Gracia, 1996)

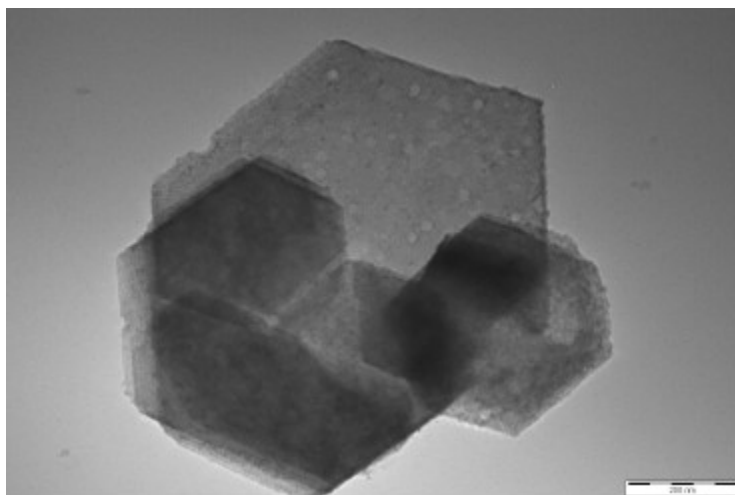
También, es importante considerar la cantidad requerida de cal hidratada para realizar una modificación. Para determinar el porcentaje ideal de modificación se puede utilizar el método de Eedes y Grimm el cual consiste en medir el pH del suelo con diferentes porcentajes de modificación. Una vez que el cambio en el pH se estabiliza se encuentra el porcentaje mínimo de cal necesario para la estabilización. En general se ha observado que los contenidos de cal óptimos para la estabilización de un suelo arcilloso oscilan entre 4% y 6%. (Muhmed y Wanatowski, 2013)

4. Nano partículas de cal. El uso de nanopartículas de cal ha cobrado importancia al descubrirse sus aplicaciones para consolidar estructuras antiguas. Las nanopartículas de cal tienen una alta reactividad con rocas como la dolomita o la caliza las cuales son ricas en carbonatos. Es posible utilizar estas

nanopartículas de cal para rellenar grietas y poros en estructuras antiguas para consolidarlas. Las nanopartículas reaccionan con la estructura y se recristalizan ocupando los espacios vacíos en el material. (Campbell *et al*, 2011)

Las nanopartículas de cal pueden obtenerse por medio de un proceso de precipitación a altas temperaturas usando soluciones de hidróxido de sodio y cloruro de calcio supersaturadas. Sin embargo, se ha probado que el proceso puede realizarse de una forma mucho más sencilla utilizando una resina de intercambio aniónico y un medio alcohólico con el cloruro de calcio e hidróxido de sodio. Este nuevo método permite producir las nanopartículas de hidróxido de calcio purificadas y a temperatura ambiente. De hecho ya existen nanopartículas de cal a la venta comercialmente y su uso principal es el de consolidación mantenimiento y reparación de estructuras antiguas. (Taglieri *et al*, 2015)

Ilustración 6. Microscopía TEM de un grupo de nanopartículas de cal hexagonales y con lados de hasta 400nm.



(Taglieri *et al*, 2015)

D. Técnicas de caracterización

1. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). La microscopía electrónica de barrido es una técnica de caracterización realizada por medio de un microscopio que dispara un haz de electrones sobre un espécimen para poder crear una imagen de él. Para mejorar la resolución de las microscopías ópticas se planteó la utilización de un rayo de electrones en lugar de luz, lo cual permite resoluciones de hasta 25 Angstroms. El uso de electrones no solo mejora la resolución de la microscopía sino interactúa con el espécimen observado produciendo una serie de señales que nos dan más información de su superficie. (Cheney, 2005)

Durante una inspección visual de SEM se utilizan principalmente dos tipos de señales, los electrones retrodispersados y electrones secundarios. Ambas señales se producen continuamente durante la interacción del rayo de electrones con el espécimen observado. Los electrones secundarios se producen por colisiones inelásticas entre los electrones del espécimen y los electrones incidentes. La señal de electrones secundarios permite revelar la estructura de la superficie del espécimen observado con una resolución de 10nm o mejor. Los electrones retrodispersados resultan de colisiones elásticas y dispersión producidas por la interacción de los electrones incidentes con los núcleos y electrones del espécimen. La señal de electrones retrodispersados permite resolver el contraste topográfico y contraste de número atómico con resoluciones de hasta 1 micrón. (Cheney, 2005)

Ilustración 7. Equipo de microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-7500F.



(Cheney, 2005)

El microscopio utilizado para realizar una microscopía electrónica de barrido (SEM) se compone de una columna, la cámara del espécimen, un sistema de vacío, una computadora, un monitor y un sistema de controles para operar el equipo. Para comprender el funcionamiento del microscopio es importante conocer los procesos que se llevan a cabo dentro de la columna del microscopio. (Hafner, 2007)

En parte superior de la columna del microscopio se encuentra la fuente, la cual consiste en un disparador de electrones. El rayo de electrones producido acelera hacia debajo de la columna hasta llegar al espécimen. Luego de esto, se encuentra una serie de lentes y un condensador los cuales funcionan para graduar el diámetro del haz de electrones y enfocarlo en el espécimen. Posteriormente se encuentra una serie de aperturas micrométricas sobre una película metálica la cuál es atravesada por el rayo y modifica sus propiedades. Luego se encuentran los controles para maniobrar el espécimen y por último se encuentra la zona de interacción entre el rayo de electrones y el espécimen. En esta zona de interacción se generan una

variedad de señales que son detectadas por el microscopio y se procesan para obtener un espectro de imagen. Todas las partes mencionadas de la columna operan en condiciones al vacío. (Cheney, 2005)

2. Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM). La microscopía electrónica de transmisión (TEM por sus siglas en inglés) es una técnica de visualización muy poderosa utilizado comúnmente para analizar materiales. La técnica funciona disparando un rayo de electrones sobre una muestra muy delgada. La interacción entre los electrones inducidos y los átomos de la muestra permite observar características como estructuras cristalinas, dislocaciones o fronteras de grano. La TEM opera bajo los mismos principios que una microscopía óptica con la diferencia que utiliza un rayo de electrones como fuente de iluminación. Debido a que la longitud de onda del rayo de electrones es mucho menor a la de la luz, se obtiene una resolución muchos órdenes de magnitud mayor. (Ma *et al*, 2006)

Dentro del microscopio, el rayo de electrones disparado debe pasar por una serie de lentes de condensador que enfocan el rayo de electrones a un solo punto. Una vez que el haz de electrones llega a la muestra este la atraviesa y los electrones inducidos interactúan con el espécimen observado. Parte de los electrones serán transmitidos atravesando la muestra delgada, estos electrones pasarán por un lente objetivo que los enfocará en una lámina de fósforo o una cámara CCD. El lente objetivo puede aumentar el contraste limitando el paso de electrones con alto ángulo de difracción. Luego de esto la imagen atraviesa un lente intermedio y un lente proyectos los cuales magnifican la imagen. Cuando la imagen atraviesa la lámina de fósforo se produce luz, permitiendo que el usuario observe la imagen. La imagen producida va de acuerdo a la transparencia electrónica que tenga la muestra, las zonas más oscuras son las que se oponen más al paso de los electrones y las zonas más claras son por las que se transmitieron más electrones. (Ma *et al*, 2006)

Las muestras que se utilizan en el proceso de TEM deben ser muy delgadas para permitir la transmisión de electrones a través de ella, por ello sus procesos de preparación suelen ser bastante más complejos y forman parte importante del análisis TEM. Las técnicas más comunes para preparar muestras de TEM son el corte con discos ultrasónicos, Dimpling o molido con iones. El Dimpling es una técnica por medio de la cual se adelgaza la parte central de la muestra y se deja un anillo de mayor espesor alrededor para manejarla de forma más sencilla. El molido con iones es un proceso en el que se utilizan iones de argón cargados acelerados sobre la superficie del espécimen aplicándoles alto voltaje. La instrucción de iones sobre la superficie del espécimen remueve material de la muestra como resultado de la transferencia de momentum. (Stadtländer, 2007)

3. Microscopías ópticas. Los microscopios ópticos son instrumentos capaces de magnificar una imagen haciéndola pasar por una serie de lentes. La mayoría de los microscopios utilizados actualmente

son microscopios compuestos, esto significa que la imagen del espécimen es magnificada por el lente objetivo y luego se vuelve a amplificar por el ocular. Los aumentos alcanzables con microscopios ópticos comunes suelen estar entre 40X y 1000X. Cada uno de estos lentes objetivo está compuesto por una serie de piezas de vidrio con diferentes curvaturas para corregir problemas de refracción de la luz, aberraciones espaciales y cromáticas. (Davidson y Abramowitz, 1999)

Una parte esencial de la microscopía óptica consiste en tener la iluminación adecuada para poder tener imágenes de buena calidad. No solo se necesita una fuente brillante de luz sino se necesita que la luz se aplique de forma uniforme sobre el espécimen. La mejor forma de lograr una buena iluminación es por medio de otro set de lentes conocido como condensador, el cual también permite regular el diámetro del haz de luz y la apertura, la cual afecta directamente la resolución y el contraste de la imagen. (Keller y Goldman, 2006)

4. Difracción de Rayos X (DRX). Cuando se disparan rayos X sobre un material cristalino estos producen un patrón de difracción. Se sabe que cada material cristalino tiene un patrón de difracción diferente, y cuando un material tiene diferentes fases cristalinas, cada una se refleja de forma independiente. Alrededor del 95% de todos los materiales sólidos se pueden describir como cristalinos, por ello el análisis DRX nos permite caracterizar las fases cristalinas presentes en una muestra. (Fultz y Howe, 2013)

De acuerdo con esto, cada sustancia tiene un patrón de difracción de rayos X específico, y el patrón de cada sustancia pura es algo parecido a una huella digital de la misma sustancia. Hasta el día de hoy se han identificado y almacenado en bases de datos los patrones de difracción para más de 50,000 fases cristalinas inorgánicas y 25,000 orgánicas. Una vez que se ha revisado el patrón de DRX de determinado material, se procede a revisar y comparar el patrón de la muestra con los patrones de sustancias puras para establecer las fases cristalinas presentes en la muestra. Adicionalmente, se puede determinar la cantidad de determinada fase cristalina de acuerdo al área bajo cada pico en un difractograma. (Birkholz, 2006)

Un electrón en un campo electromagnético oscila con la misma frecuencia que el campo en el que se encuentra. Cuando un haz de rayos X golpea un átomo, los electrones alrededor del átomo comienzan a oscilar con la misma frecuencia que los rayos X. En prácticamente todas las direcciones se presenta una interferencia destructiva, esto significa que las ondas combinadas están fuera de fase y no hay energía resultante saliendo de la muestra. Sin embargo, los átomos en una estructura cristalina están ordenados de forma repetitiva, por lo que producen una interferencia constructiva con los rayos X en algunas direcciones. Esto significa que las ondas estarán en fase y se varan salir rayos X de la muestra en algunas direcciones determinadas. De esta forma, un haz difractado se puede describir como una serie o conjunto de rayos X dispersando reforzándose mutuamente. (Birkholz, 2006)

Ilustración 8. Difractómetro de Rayos X PANalytical de Empryean.



(Birkholz, 2006)

Para que el análisis de DRX se pueda desarrollar de forma adecuada es importante preparar una muestra con una superficie completamente plana. Para lograr esto se prefiere trabajar con muestras pulverizadas con partículas de entre 0.002mm y 0.005mm de sección. La muestra idealmente debería ser completamente homogénea y tener sus cristales distribuidos de forma aleatoria. La técnica de DRX puede usarse para identificación de fases cristalinas, esfuerzos residuales, o análisis de texturas. (Fultz y Howe, 2013)

5. Reducción a Temperatura Programada (TPR). La reducción a temperatura programada (TPR por sus siglas en inglés) es una técnica termoanalítica que permite caracterizar las interacciones químicas entre reactivos gaseosos y sustancias sólidas. En una TPR un catalizador es sometido a un aumento de temperatura bajo el flujo de un gas reductor. En base a una medición continua y seguimiento del cambio en la composición del gas que pasa por el reactor, se puede obtener un porcentaje de reducción. (Kanervo, 2003)

La técnica funciona haciendo fluir un gas a través de la muestra. Generalmente se utiliza una mezcla de hidrógeno con un gas inerte como el argón empezando a temperatura ambiente. Mientras el gas continúa fluyendo, se incrementa la temperatura de la muestra linealmente mientras se monitorea el consumo de hidrógeno en la reacción de reducción. Ya que se puede determinar la concentración de hidrógeno antes y después de que el flujo de gas atraviesa la muestra, se puede identificar el consumo de hidrógeno. (Kanervo, 2003)

Los principales objetivos de esta técnica de caracterización de materiales sólidos son los siguientes: Identificar las condiciones óptimas de reducción, identificar las fases precursoras soportadas y sus interacciones con el soporte; y caracterizar materiales complejos como catalizadores dopados o bimetálicos.

La TPR es una técnica altamente sensible que permite estudiar el proceso de reducción de un sólido. (Fadoni y Lucarelli, 1997)

6. **Análisis Termo Gravimétrico (TGA).** El análisis termo gravimétrico (TGA por sus siglas en inglés) es una técnica de caracterización de materiales que funciona midiendo el cambio de masa de una sustancia a través del tiempo, mientras esta está sujeta a un programa de temperatura controlada. El análisis se realiza colocando una muestra en un pequeño recipiente y dejando esta sobre una balanza de alta precisión. Luego de esto, se inicia un programa de cambio de temperatura mientras se monitorea el cambio de masa de la muestra. Durante este tiempo también se controla la atmósfera de la muestra, se puede hacer pasar un gas ya sea inerte o reactivo sobre la masa durante el análisis. (Foldvari, 2011)

El TGA es una técnica de análisis térmico que facilita información complementaria y suplementaria para la caracterización de materiales. Con esta técnica se puede determinar la estabilidad térmica y oxidativa del material, así como las propiedades de su composición. Es particularmente útil en el estudio de materiales poliméricos como elastómeros, termoplásticos, fibras, láminas, pinturas o recubrimientos. La información provista por el TGA permite predecir el desempeño de ciertos productos y su calidad. (Sichina, 2007)

Esta técnica es muy utilizada en la caracterización de minerales ya que muchos presentan comportamientos marcados. y se tienen establecidos los rangos de temperatura a los que se producen las reacciones o fenómenos térmicos. La técnica no se debe utilizar por sí sola, sino se debe complementar con resultados de otros ensayos para poder aprovechar mejor sus resultados. Existen otras técnicas termoanalíticas que se pueden realizar muchas veces con el mismo equipo de TGA y que pueden complementar y enriquecer la información obtenida. Entre estas técnicas cabe mencionar el Análisis Térmico Diferencial (DTA) y el Análisis de Envoltante de Gas (EGA). (Foldvari, 2011)

V. METODOLOGÍA

Como fase experimental de este trabajo de graduación se decidió analizar la diferencia en la estabilización de suelos arcillosos plásticos con micro partículas de cal de diferentes tamaños de grano. Para esto se consideró el uso de muestras de suelo arcilloso de la Aldea El Llano, Zaragoza, Chimaltenango las cuales se modificaron con cal hidratada tipo especial Horcalsa. Se tomaron 5 muestras de suelo arcilloso en la misma área de la Aldea el Llano y para cada una de estas muestras se manejaron 4 niveles diferentes de modificación: sin modificación, modificada con cal, modificada con cal pasada por tamiz No. 200 y modificada con cal pasada por tamiz No. 325. En todos los casos la muestra se modificó en un 4% de su peso de acuerdo al porcentaje usual encontrado en la bibliografía. A estas muestras se les hicieron ensayos de límites de Atterberg, Granulometría por cribado, DRX, TGA y microscopías ópticas. Se decidió el uso de micro partículas de cal debido a que la síntesis de nano partículas de cal es muy complicada. Al final de la experimentación se revisaron los resultados para caracterizar la arcilla y evaluar la efectividad de la modificación con diferentes tamaños de partícula y la afinidad entre los materiales. Las muestras se nombraron de acuerdo al tipo de modificación y un correlativo de la muestra original de la siguiente forma:

Cuadro 1. Clave de muestras de arcilla utilizadas.

	Muestras de arcilla				
<i>Modificación</i>	A1	A2	A3	A4	A5
<i>Sin modificación</i>	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
<i>Cal convencional</i>	A+C-1	A+C-2	A+C-3	A+C-4	A+C-5
<i>Cal pasa No. 200 (75μm)</i>	A+200-1	A+200-2	A+200-3	A+200-4	A+200-5
<i>Cal pasa No. 325 (45μm)</i>	A+325-1	A+325-2	A+325-3	A+325-4	A+325-5

A continuación, se describe la metodología detallada que se siguió para la fase de experimentación y análisis de resultados del presente trabajo de graduación.

A. Toma de muestras:

1. Se tomaron muestras de suelo arcilloso de alta y media plasticidad en la Aldea El Llano, Zaragoza, Chimaltenango, Guatemala.
2. Se tomaron cinco muestras para cumplir con el mínimo número de muestras sugerido por AGIES Doc. 5 NSE 2.1 para la representatividad de la muestra en el área.
3. La profundidad mínima de toma de muestras fue de un metro.

B. Ensayos preliminares de mecánica de suelos en *Laboratorio Concal*.

1. Como fase inicial del estudio se envió una muestra de arcilla al *Laboratorio de Suelos Concal* en donde se realizaron ensayos de mecánica de suelos básicos para determinar si la arcilla cumplía con los requisitos del proyecto.
2. Se realizaron los siguientes ensayos:
 - a. Ensayo de límites de Atterberg de acuerdo a la norma ASTM D-4318.
 - b. Análisis granulométrico de acuerdo a la norma ASTM C-136.
 - c. Ensayo de Proctor Estándar de acuerdo a la norma ASTM D698.
 - d. Ensayo de CBR (California Bearing Ratio) de acuerdo a la norma ASTM D1883
3. Adicionalmente se clasificó el suelo de acuerdo al sistema AASHTO.
4. Luego de confirmar que la arcilla cumplía con los requisitos mínimos del estudio se comenzaron con los ensayos para evaluar la modificación.

C. Ensayos de mecánica de suelos realizados en *Laboratorio Serpin*

1. Las cinco muestras tomadas se transportaron al *Laboratorio de Suelos Serpin*.
2. Se realizaron un ensayo de límites de Atterberg para confirmar los límites de la arcilla. Para esto se utilizó el procedimiento descrito en la norma ASTM D-4318.
3. Primero se determinó el límite líquido de las muestras de suelo.
 - a. La muestra seca se llevó al laboratorio y se le agregó agua para poder manejarla mejor.
 - b. La muestra se mezcló con el agua hasta tener una buena consistencia que permitiera colocarla en la cuchara de Casagrande.
 - c. El suelo húmedo se colocó sobre la cuchara y se moldeó con una espátula.
 - d. Se hizo una muesca con las dimensiones estándar utilizando la herramienta estándar
 - e. Se golpeó la cuchara hasta que la muesca en el suelo se cerrara en una extensión de 13mm aproximadamente.

- f. Las muestras que se utilizaron en la cuchara se almacenaron para determinar su contenido de agua.
 - g. El procedimiento se repitió para cada una de las muestras tomadas.
4. A continuación, se determinó el límite plástico de las muestras de terreno.
- a. En este caso se tomó la muestra de suelo humedecida y se formaron tubos de suelo con la mano haciendo rodar el suelo sobre una plancha de vidrio.
 - b. Los tubos se adelgazan hasta alcanzar un espesor aproximado de 3.2mm, luego se vuelve a juntar la masa de suelo y hacer el tubo nuevamente.
 - c. El proceso se repite hasta que los tubos de suelo comienzan a fisurarse.
 - d. Cuando los tubos de suelo se fisuran la muestra de suelo se almacena en un contenedor para determinar su porcentaje de humedad.
 - e. El proceso se repitió con todas las muestras de terreno.
5. Luego se prosiguió a realizar un análisis granulométrico por tamizado de acuerdo a la norma ASTM C-136.
- a. Para comenzar se secó una muestra de suelo de 1169 g en un horno portátil.
 - b. Los tamices seleccionados para el análisis fueron el No. 4, No. 16, No. 40, No. 50, No, 100 y No. 200.
 - c. Los tamices se apilaron, se colocó un fondo para la torre, se colocó el material en el primer tamiz y se tapó con una tapa metálica.
 - d. La torre de tamices se colocó en un agitador mecánico durante 5 minutos.
 - e. Al terminar con la agitación del material, se tomó la masa del material retenido en cada tamiz para determinar los porcentajes de muestra que lo atravesaron en cada caso.

D. Tamizado de cal

1. Para la realización de este proyecto se utilizó cal hidratada refinada tipo especial Horcalca con tres diferentes tamaños de grano. Los tamaños de grano utilizados fueron: cal sin modificar, cal tamizada por tamiz No. 200 y cal tamizada por tamiz No. 325.
2. Para obtener la cal tamizada se utilizó una tamizadora electromagnética Matest Sieve-Tronic A059 en el laboratorio del CETEC. Este equipo tiene la capacidad de producir oscilaciones verticales, laterales y rotacionales.
3. La tamizadora se armó con tamices metálicos Humboldt No. 200 y No. 325.

Ilustración 9. Serie de tamices montados sobre la tamizadora electromagnética.



4. Se tamizó la cal en porciones de entre 15g y 20g para no saturar demasiado los tamices. Cada porción de cal se tamizó durante 15 min.

5. Luego de tamizar cada porción se limpiaron los tamices para despejar las aberturas de la malla que se pudieran tapar con los granos de cal.

6. El material tamizado se separó cuidadosamente, se pesó con una balanza analítica OHAUS y se guardó en bolsas plásticas identificadas.

Ilustración 10. Balanza electrónica con embudo y recipiente para pesar la cal y evitar la pérdida de material tamizado.



E. Preparación de muestras para DRX, Microscopías y TGA.

1. Las muestras para caracterización se prepararon en el *Laboratorio de Suelos Serpin*.
2. Las cinco muestras tomadas se secaron al sol durante un período de 5 días.
3. Luego se tamizaron con el tamiz No. 200, para asegurarse de examinar solo la porción más fina del terreno.

Ilustración 11. Tamizado de muestras de arcilla con tamiz No. 200.



4. Una vez que se habían tamizado las muestras de suelo se realizó un segundo secado en un horno portátil.
5. De cada muestra se tomaron 200g y cada una de estas muestras de 200g se dividieron en cuatro porciones de 50 g para modificarlas con cal de diferentes tamaños de grano.
6. Luego de que las muestras quedaran secas se les agregó agua para dejarlas en su punto de humedad óptima (25.5%)

Ilustración 12. Muestra de arcilla mezclándose luego de haberle agregado agua para que alcance su humedad óptima.



7. La primera porción de cada muestra se dejó inalterada.
8. La segunda porción se modificó con cal refinada tipo especial Horcalsa tal y como se vende comercialmente (sin tamizar) en un 4% de su masa.
9. La siguiente se modificó con cal hidratada refinada tipo especial Horcalsa cribada con el tamiz No. 200 en un 4% de su masa.
10. La última porción se modificó con cal hidratada refinada tipo especial Horcalsa cribada con el tamiz No. 325 en un 4% de su masa.

Ilustración 13. Mezclado de muestra de arcilla con cal hidratada especial Horcalsa en un 4%.



11. Cada una de las cuatro porciones de las cinco muestras se guardaron en recipientes plásticos herméticos y se rotularon poder identificarlos fácilmente.

F. Preparación de muestras en *Laboratorio Químico del CETEC*

1. Para facilitar los ensayos se comenzó tomando solo 20g de cada muestra.
2. Los 20g de arcilla húmeda se midieron en una balanza analítica Ohaus Explorer Pro.

Ilustración 14. Medición de masa de una de las muestras de arcilla en una balanza analítica Ohaus Explorer Pro.



3. Las muestras se colocaron sobre bandejas metálicas y se identificaron. Luego se colocaron las bandejas sobre una lámina de metal.
4. Las láminas metálicas con las muestras se llevaron a un horno donde se secó el suelo.
5. Una vez que el suelo estuvo seco se procedió con la molienda del material, ya que este había formado grumos.
6. La molienda se realizó con un mortero automático con un tiempo de 2 min para cada muestra.
7. Las muestras secas y molidas se colocaron en bolsas plásticas rotuladas y se guardaron para ser analizadas a continuación.

G. Realización de ensayos de Difracción de Rayos X (DRX) en laboratorios de *Cementos Progreso*.

1. Se realizó un análisis de DRX sobre cada muestra de arcilla sin modificar para poder caracterizarla.
2. Para realizar el análisis se comenzó preparando la pastilla de arcilla en un muestreador.
3. Para que el análisis de DRX fuera óptimo se compactó la muestra de arcilla y se alisó la superficie de la muestra sobre el molde muestreador.
4. La muestra de arcilla se colocó en un equipo de DRX Empyrean de PANalytical.

Ilustración 15. Muestra de arcilla montada en equipo Empyrean de PANalytical previo a su análisis.



5. Las fases cristalinas se identificaron por medio de un barrido del goniómetro del equipo entre los ángulos $5^{\circ} \leq 2\theta \leq 90^{\circ}$ y con duración de 4 minutos por barrido.
6. Las muestras analizadas se devolvieron a las bolsas plásticas en las que se encontraban.
7. El proceso se repitió para cada una de las muestras analizadas.
8. Cada difractograma se analizó por separado y se asoció a diferentes fases cristalinas utilizando una base de datos de difractogramas.

Ilustración 16. Equipo de DRX Empyrean de PANalytical. Puede observarse el goniómetro rotativo.



H. Realización de Análisis Termogravimétrico (TGA) en laboratorios de *Cementos Progreso*.

1. El TGA se realizó sobre una pequeña muestra de cada arcilla (incluyendo las arcillas modificadas).
2. La muestra de arcilla se colocó en un contenedor y luego se colocó el contenedor sobre un brazo que permite montar la muestra.

Ilustración 17. Equipo de TGA Mettler Toledo. Puede observarse el brazo blanco para montaje de la muestra.



3. La muestra se analizó sobre una micro balanza de alta precisión incorporada en el equipo.
4. El TGA se realizó con un equipo Módulo TGA SF/1100/265 de Mettler Toledo.
5. El análisis se condujo en entre 25°C y 1,000°C con una razón de aumento de temperatura de 10°C/min.
6. El análisis se realizó en una atmósfera inerte de N₂ con un flujo de 20 ml/min.
7. Al terminar cada ensayo se descartó la muestra de arcilla calcinada.

Ilustración 18. Muestras en contenedores luego de haber sido calcinadas.



8. Se obtuvo la curva de cambio de masa respecto al tiempo y su primera derivada.
9. Luego se ubicaron los fenómenos de cambio de masa en un rango de temperatura y porcentaje de cambio de masa.
10. Cada fenómeno se asoció con algún proceso químico relacionado al material que se estaba analizando.
11. El proceso se repitió con cada muestra de arcilla y sus variantes de modificaciones con cal.

I. Realización de microscopía ópticas en laboratorios de *Cementos Progreso*.

1. Para comenzar las microscopías se colocó una pizca de arcilla sobre un vidrio portaobjetos.
2. Se agregó una gota de aceite de inmersión sobre la muestra de arcilla y se colocó un cubreobjetos sobre la muestra.
3. Luego de haber preparado la placa, esta se colocó en la platina del microscopio.
4. El equipo utilizado fue un microscopio petrográfico Olympus BX 51 con filtro de luz polarizada.
5. La muestra se enfocó con el objetivo de menor aumento y se ajustó la luz para lograr un buen contraste.
6. Luego se pasó al siguiente objetivo y se volvió a ajustar el enfoque y los niveles de luz.
7. Finalmente se utilizó el objetivo 20X y se ajustó el microscopio para lograr un buen contraste y buen enfoque.
8. Se tomó una fotografía de la imagen capturada por el microscopio utilizando el software de análisis de imágenes PAX-it.
9. Se registraron los datos específicos de cada toma y se guardó la imagen de la microscopía.
10. El proceso se repitió con las cinco muestras de arcilla sin modificar y con las muestras modificadas de la arcilla A1.

J. Análisis de resultados.

1. Los informes realizados se revisaron a fondo para poder interpretar su información.
2. Como medio auxiliar para proceso de datos y presentación de resultados se utilizó el software Origin Pro.
3. El análisis de los resultados se discute luego de su presentación en el cuerpo del trabajo.

K. Análisis de afinidad

1. Se realizó una evaluación bibliográfica de afinidad a diferentes escalas, de la muestra de arcilla y diferentes nanomateriales. A nanoescala se revisó la afinidad de los átomos y las moléculas de los materiales de acuerdo a su electronegatividad. A microescala se analizó la morfología y las matrices de los materiales en cuestión. A macroescala se revisó los cambios en las propiedades de los materiales modificados. La metodología de evaluación se realizó de acuerdo a lo propuesto por James Newell en su libro "Ciencia de Materiales. Aplicaciones en Ingeniería".

L. Técnicas de producción de cal

1. Se revisaron las técnicas actuales de producción de cal y se realizó una comparación entre ellas considerando los recursos consumidos, el material producido, la aplicabilidad y la posibilidad del aprovechamiento de subproductos de la industria.

M. Revisión de estudios de nanotecnología aplicada

1. Se analizaron las posibles aplicaciones de los nanomateriales en el campo de la Ingeniería Civil. Principalmente se revisaron estudios de nanotecnología aplicada en el campo de materiales de construcción y las áreas de estructuras y geotecnia. Se realizó un comentario de las posibles ventajas de la utilización de nanomateriales en estas aplicaciones.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Resultados de ensayos preliminares de mecánica de suelos realizados en el *Laboratorio de Suelos Concal*

Ilustración 19. Informe de laboratorio de ensayos de granulometría y límites de Atterberg en fase preliminar del proyecto.



INFORME DE LABORATORIO

INTERESADO: Tesis Andrés Pira

FECHA: Oct. 2015

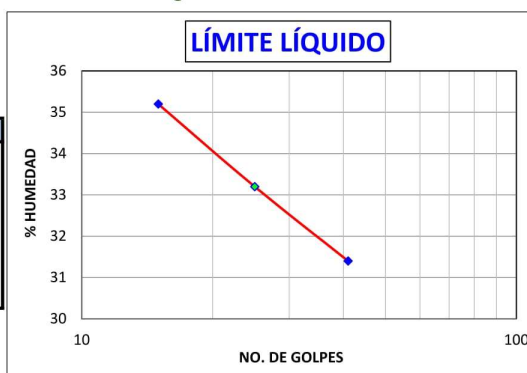
PROYECTO: Aldea El Llano Zaragoza, Chimaltenango. Guatemala.

TIPO DEL MATERIAL: Arcilla limoarenosa café con fragmentos consolidados deleznales

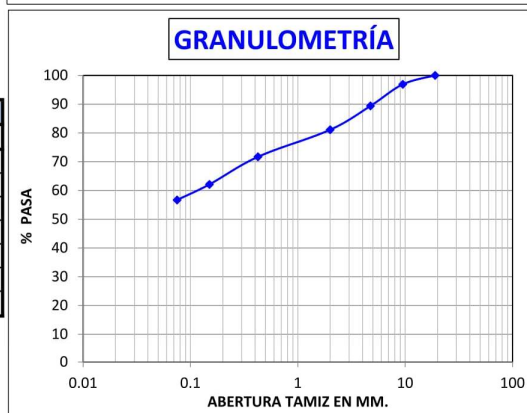
CLASIFICACIÓN: A - 6 (5)

MUESTRA # 1

LÍMITES DE CONSISTENCIA	
LÍMITE LIQUIDO:	33.2 %
LÍMITE PLÁSTICO:	21.1 %
ÍNDICE DE PLASTICIDAD:	12.1



GRANULOMETRÍA	
TAMIZ	% PASA
3/4"	100.0
3/8"	96.9
No. 4	89.4
No. 10	81.1
No. 40	71.7
No. 100	62.1
No. 200	56.7



OBSERVACIONES:

Ilustración 20. Informe de laboratorio de ensayos de Próctor Estándar y CBR en fase preliminar del proyecto.



INFORME DE LABORATORIO

INTERESADO: Tesis Andrés Pira

FECHA: Oct. 2015

PROYECTO: Aldea El Llano Zaragoza, Chimaltenango, Guatemala.

TIPO DEL MATERIAL: Arcilla limoarenosa café con fragmentos consolidados deleznales

CLASIFICACIÓN: A - 6 (5)

MUESTRA # 1

PESO UNITARIO SECO MÁXIMO

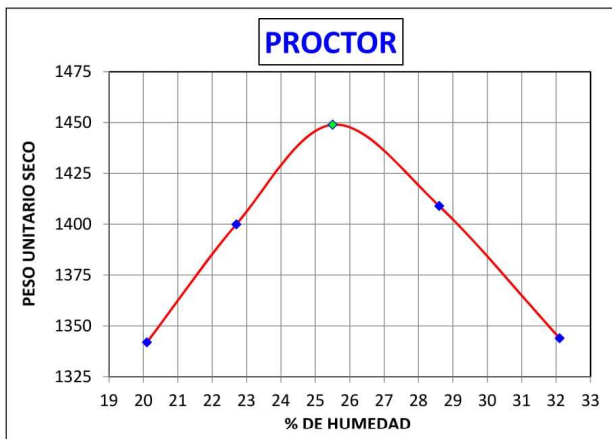
DENSIDAD MÁXIMA

90.4 lbs/p³

1449 kg/m³

HUMEDAD ÓPTIMA

25.5 %



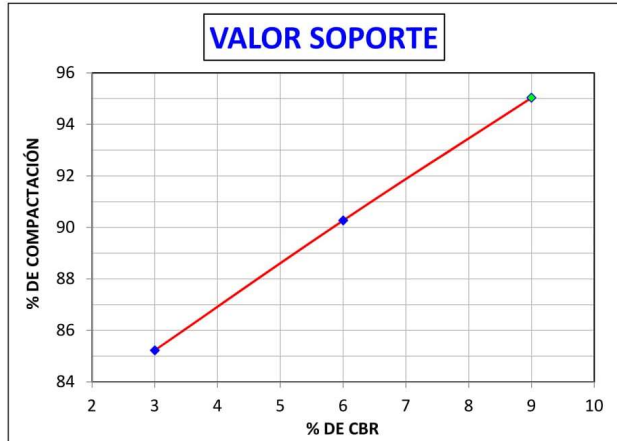
VALOR SOPORTE

CBR AL 95% DE COMPACTACIÓN

9.0

% HINCHAMIENTO MÁXIMO

1.1



OBSERVACIONES:

B. Discusión de resultados de ensayos preliminares de mecánica de suelos en *Laboratorio Concal*

1. Resultados principales del informe

- a. La muestra de suelo arcilloso se clasificó como un suelo A-6 (5) de acuerdo a la clasificación de AASHTO.
- b. Los límites de Atterberg de la muestra de arcilla fueron LL=33.2% y LP=21.1%. El índice de plasticidad fue de 12.1.
- c. En el ensayo cabe resaltar que el 100% de la muestra pasó por el tamiz $\frac{3}{4}$ " y el 56.7% de la muestra pasó por el tamiz No. 200.
- d. En el ensayo de Proctor Estándar se obtuvo la humedad óptima de 25.5% y el peso unitario máximo de 1449 kg/m³.
- e. El ensayo de CBR tuvo como resultado un valor soporte de 9% y un hinchamiento máximo de 1.1.

2. Comentario sobre los resultados de ensayos preliminares de mecánica de suelos.

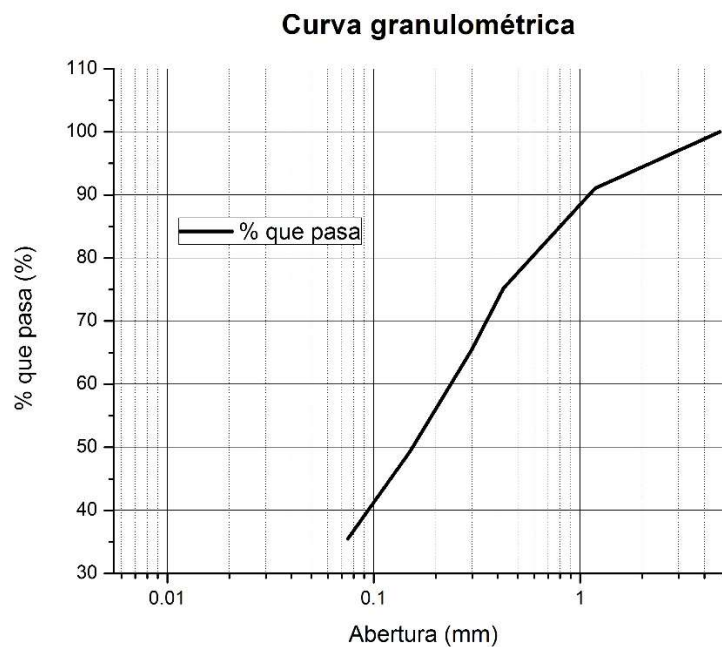
- a. La clasificación de A-6 clasifica a la muestra como un suelo arcilloso que puede funcionar como una subrasante regular o mala. Esta es la primera muestra de que el suelo tomado cumple con los requisitos mínimos para utilizarse en el proyecto. Podría haber sido más interesante utilizar un suelo A-7 debido a sus propiedades más complicadas, pero no se encontró una muestra de suelo de este tipo.
- b. Los límites de Atterberg obtenidos son relativamente altos. El índice de plasticidad es superior a diez por lo que podemos decir que el suelo tiene un comportamiento plástico. Ya que es una arcilla plástica se puede aprovechar como suelo para el estudio.
- c. La granulometría también indica que el suelo es arcilloso. Más de la mitad de la muestra tamizada atravesó el tamiz No. 200. La curva granulométrica parece indicar que el suelo está mal graduado.
- d. La humedad óptima del suelo de 25.5% se presenta relativamente alta ya que este puede absorber una gran cantidad de agua. Su peso unitario máximo por otro lado es bastante reducido.
- e. El valor soporte reportado es bajo, tal como se espera en una arcilla de este tipo.

C. Resultados de ensayos de mecánica de suelos realizados en el *Laboratorio de Suelos Serpin*

1. Resultados principales de los ensayos de mecánica de suelos

a. Granulometría

Ilustración 21. Curva granulométrica de la arcilla.

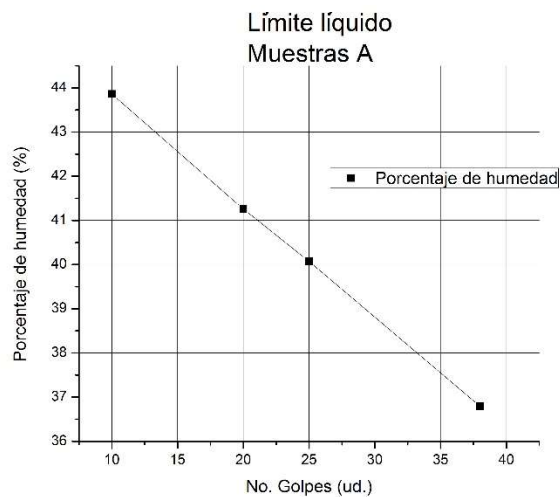


Cuadro 1. Datos del análisis por cribado realizado en el *Laboratorio de Suelos Serpin*.

Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
No. 4	4.750	100.00
No. 16	1.180	91.02
No. 40	0.425	75.19
No. 50	0.300	65.61
No. 100	0.150	49.36
No. 200	0.075	35.50
Fondo		0.00

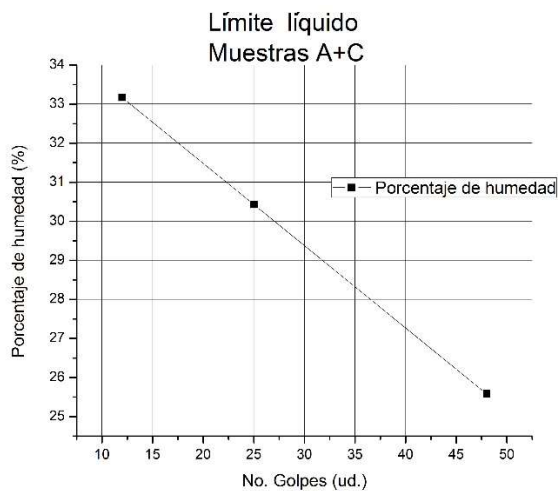
b. Límites de Atterberg

Ilustración 22. Límite líquido de las muestras de arcilla A.

Cuadro 2. Límites de Atterberg de las muestras de arcilla A determinados en el *Laboratorio de Suelos Serpin*.

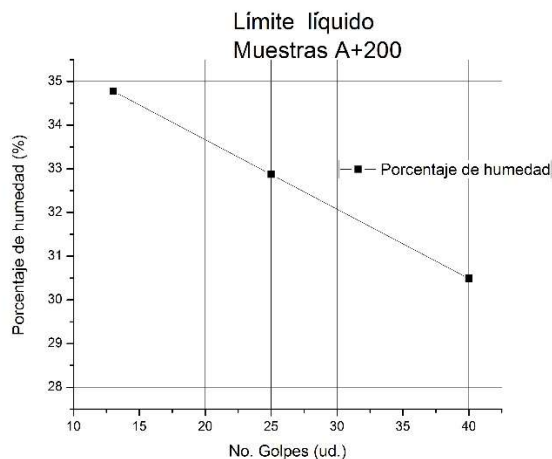
Límites de Atterberg Muestras A	
Límite líquido	40.07%
Límite plástico	31.48%
Índice de plasticidad	8.59

Ilustración 23. Límite líquido de las muestras de arcilla A+C.

Cuadro 3. Límites de Atterberg de las muestras de arcilla A+C determinados en el *Laboratorio de Suelos Serpin*.

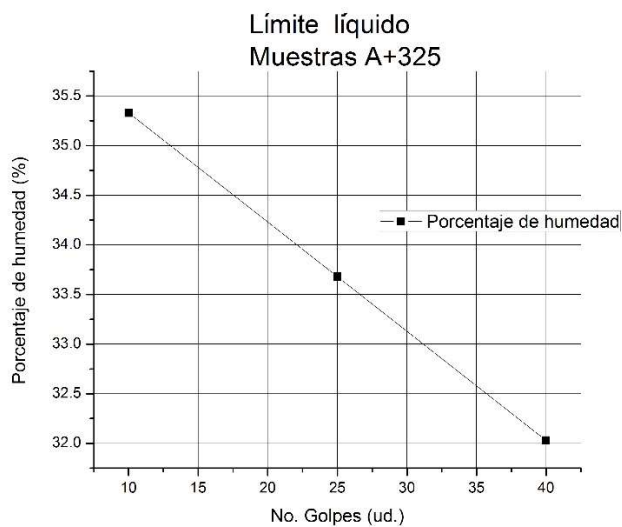
Límites de Atterberg Muestras A+C	
Límite líquido	30.43%
Límite plástico	25.40%
Índice de plasticidad	5.02

Ilustración 24. Límite líquido de las muestras de arcilla A+200.

Cuadro 4. Límites de Atterberg de las muestras de arcilla A+200 determinados en el *Laboratorio de Suelos Serpin*.

Límites de Atterberg Muestras A+200	
Límite líquido	30.43%
Límite plástico	30.86%
Índice de plasticidad	2.02

Ilustración 25. Límite líquido de las muestras de arcilla A+325.

Cuadro 5. Límites de Atterberg de las muestras de arcilla A+325 determinados en el *Laboratorio de Suelos Serpin*.

Límites de Atterberg Muestras A+325	
Límite líquido	33.68%
Límite plástico	31.75%
Índice de plasticidad	1.93

Ilustración 26. Variación de los límites de consistencia en muestras de arcilla al aplicar cal con diferentes tamaños de grano.

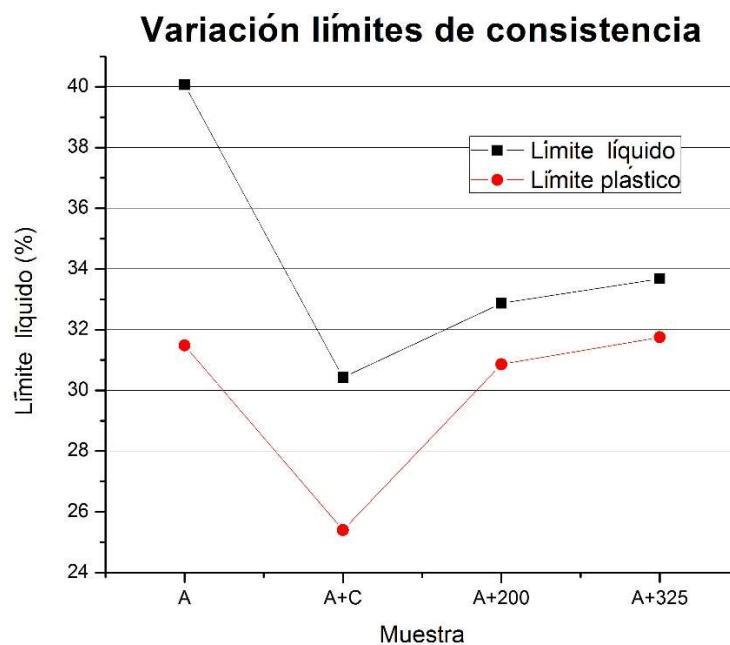
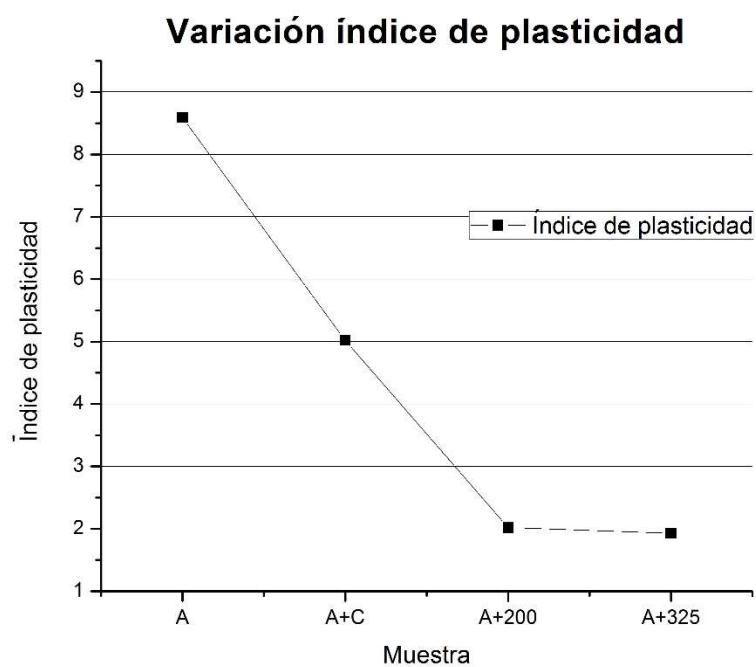


Ilustración 27. Variación del Índice de plasticidad en muestras de arcilla al aplicar cal con diferentes tamaños de grano.



Cuadro 6. Resumen de los límites obtenidos y la reducción porcentual en el índice de plasticidad de la arcilla.

Resumen Límites de Atterberg				
Muestras	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad (IP)	Reducción de IP
A	40.07%	31.48%	8.59	0%
A+C	30.43%	25.40%	5.02	42%
A+200	32.87%	30.86%	2.02	76%
A+325	33.68%	31.75%	1.93	78%

D. Discusión de resultados de ensayos de mecánica de suelos realizados en el Laboratorio Serpin

1. Discusión de resultados de análisis granulométrico

a. El análisis por cribado para determinar la granulometría de la arcilla resultó tener algunas diferencias respecto al análisis preliminar. Es importante notar que se utilizó una serie de tamices diferentes y que las muestras de suelo son diferentes, aunque se tomaron prácticamente en el mismo lugar y a la misma profundidad. Es de particular importancia la porción de finos que pasa por el tamiz No. 200 ya que en el análisis preliminar un 56.7% de la muestra atravesó el tamiz y en el siguiente ensayo solo lo atravesó un 35.50%. De cualquier manera, es posible afirmar que las muestras de suelo tienen un alto contenido de finos.

2. Discusión de resultados de ensayos de Límites de Atterberg

a. Los límites de Atterberg de las muestras de arcilla sin modificar determinados en esta fase contrastan con los resultados previos ya que los límites líquido y plástico son bastante más altos a los determinados en la fase preliminar. Los límites son aproximadamente 10 puntos porcentuales mayores a los que se vieron en la fase preliminar. De nuevo se debe resaltar que es una muestra diferente, aunque se tomó en el mismo lugar. Por otra parte, el índice de plasticidad de la arcilla es ligeramente menor al de la fase preliminar. Un índice de plasticidad de 8.59 continúa siendo relativamente alto, aunque se puede considerar que no es un caso de plasticidad demasiado crítico.

b. La modificación con cal de las muestras de suelo resultó tener un impacto fuerte en los límites de consistencia. En cuanto a los límites líquido y plástico, es evidente que hay diferencias entre las modificaciones con cal que se realizaron. La modificación con cal sin tamizar tiene un gran impacto sobre el límite líquido y límite plástico, los cuales se reducen considerablemente, junto con una reducción del 42% del límite plástico sin modificar.

c. Se puede ver que las modificaciones del límite líquido de todas las muestras, con diferentes tamaños de grano tuvieron resultados muy similares. La modificación que alcanza un límite líquido menor es la que usa cal sin tamizar, sin embargo, todas reducen considerablemente este límite de consistencia. Al parecer, la porción gruesa de la cal puede estar relacionada con la reducción del límite líquido.

d. Se puede notar que los cambios en el límite plástico en los resultados de modificación con cal tamizada y cal sin tamizar fueron drásticamente diferentes. La modificación del suelo con cal sin tamizar reduce el límite plástico considerablemente, pero al tamizar la cal la modificación deja el límite plástico casi igual al de la muestra sin modificar. En este caso parece correcto decir que la porción gruesa de la cal es la causante de la modificación en el límite plástico de una arcilla.

e. Los valores del índice de plasticidad presentan una tendencia a disminuir al aplicar cal de menor tamaño de grano. El resultado de modificar la arcilla con cal sin tamizar es de por sí excelente ya que en este caso el índice de plasticidad se redujo en un 42%. Al tamizar la cal con un tamiz No. 200 se vuelve a ver una reducción importante del índice de plasticidad en un 76% de su valor original. Sin embargo, el resultado de tamizar la arcilla con un tamiz No. 325 parece tener poco efecto sobre el índice de plasticidad. De hecho, se puede decir que no hay una diferencia significativa entre el índice de plasticidad de la arcilla modificada con micropartículas de cal pasadas por tamiz No. 200 y el de la arcilla modificada con micropartículas de cal pasadas por el tamiz No. 325. Se debe mencionar que la abertura de un tamiz No. 325 (45 μm) es aproximadamente un 40% menor a la de un tamiz No. 200 (75 μm). Aunque las aberturas de los tamices están en el mismo orden de magnitud, la diferencia de las aberturas es importante y se esperaba ver una diferencia mayor en la reducción del índice de plasticidad de las arcillas modificadas con cal tamizada.

f. En general, se puede resumir que la modificación con cal fue efectiva en la reducción del índice de plasticidad de las muestras de arcilla. Los límites de consistencia de las arcillas ven cambios importantes entre la arcilla sin modifica, la arcilla modificada con cal sin tamizar y las arcillas modificadas con cal tamizada. Las diferencias en los límites de consistencia entre las arcillas modificadas con cal pasa tamiz No. 200 y las arcillas modificadas con cal pasa tamiz No. 325 no fueron significativas.

g. El comportamiento de los límites de consistencia al modificar una arcilla con cal se observa de la siguiente forma. La modificación con cal sin tamizar produce una disminución importante tanto en el límite líquido como en el límite plástico, aunque la reducción en el límite plástico es menor, lo cual acerca ambos porcentajes de humedad se acercan y se reduce el índice de plasticidad. Cuando la modificación se realiza con cal tamizada por tamices No. 200 o No. 325 se continúa observando una reducción brusca en el límite líquido poco menor a la de la cal sin tamizar, pero el límite plástico se queda casi en el mismo porcentaje que tenía la arcilla original. Esto produce que el índice de plasticidad vea una reducción mayor que en la modificación con cal sin tamizar ya que se conserva el límite plástico.

h. Se sabe que la cal sin tamizar es un material fino y que su mayor parte puede atravesar un tamiz No. 200, por lo que la remoción de la porción gruesa de la cal podría ser beneficiosa para sus usos de modificación y no traería mayor incomodidad para los usuarios del material. Por otro lado, el tamizado por tamiz No. 325 parece no ser justificable en base a los resultados anteriores.

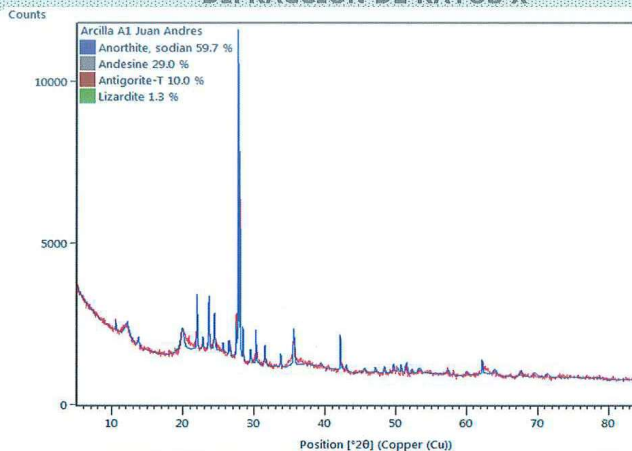
E. Resultados de ensayos de Difracción de Rayos X (DRX)

Ilustración 28. Informe de ensayo de Difracción de Rayos X sobre muestra de arcilla A1 en *Laboratorio Químico del CETEC*.

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com		OT	28320
			FECHA	2016-07-12
			PÁGINA	1 DE 5
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE CHD/CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE	
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A1	
Contacto	LUIS VELASQUEZ	Analista(s)	ELVIS GARCÍA	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	12/07/2016	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

DIFRACCIÓN DE RAYOS X

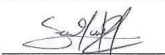


Fase Mineral	Fórmula	Concentración en % p/p
Anortita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	59.70%
Andesita	(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈	29.00%
Antigorita	Mg ₃ Si ₂ O ₇ (OH) ₂	10.00%
Lizardita	Mg ₃ Si ₂ O ₇ (OH) ₂	1.30%

La cuantificación de las fases minerales se realizó mediante la técnica analítica Difracción de rayos X con afinamiento Rietveld en un equipo Empeyan de PANalytical, la identificación de las fases cristalinas presentes en las muestras se realizó mediante un barrido del goniómetro del equipo comprendido entre los ángulos de 5° ≤ 2θ ≤ 90°, con una duración de 4 minutos por barrido.

Observaciones: Las fases minerales cuantificadas mediante la técnica analítica Difracción de Rayos X son las que se encuentran disponibles en ICSD (Inorganic Crystal Structure Database)

ANALISTA:



AUTORIZADO POR:


 Jefe de laboratorio / Coordinador

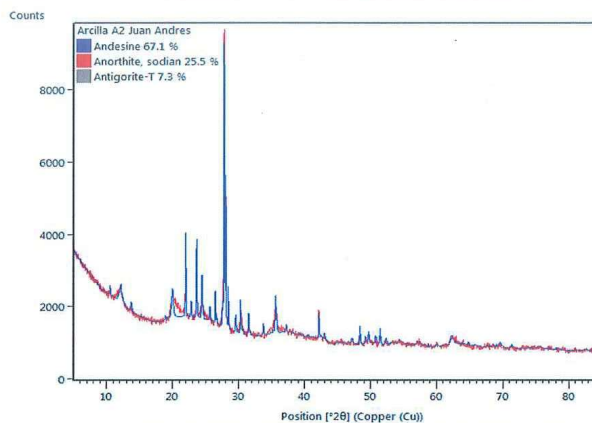
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 29. Informe de ensayo de Difracción de Rayos X sobre muestra de arcilla A2 en *Laboratorio Químico del CETEC*.

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com		OT	28320
			FECHA	2016-07-12
			PÁGINA	2 DE 5
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE CHD/CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE	
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A2	
Contacto	LUIS VELASQUEZ	Analista(s)	ELVIS GARCÍA	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	12/07/2016	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

DIFRACCIÓN DE RAYOS X




Fase Mineral	Fórmula	Concentración en % p/p
Anortita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	25.50%
Andesita	(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈	67.10%
Antigorita	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	7.30%

La cuantificación de las fases minerales se realizó mediante la técnica analítica Difracción de rayos X con afinamiento Rietveld en un equipo Emprayan de PANalytical, la identificación de las fases cristalinas presentes en las muestras se realizó mediante un barrido del goniómetro del equipo comprendido entre los ángulos de $5^\circ \leq 2\theta \leq 90^\circ$, con una duración de 4 minutos por barrido.

Observaciones: Las fases minerales cuantificadas mediante la técnica analítica Difracción de Rayos X son las que se encuentran disponibles en CSD (Inorganic Crystal Structure Database)

ANALISTA: 

AUTORIZADO POR: 
Jefe de laboratorio / Coordinador

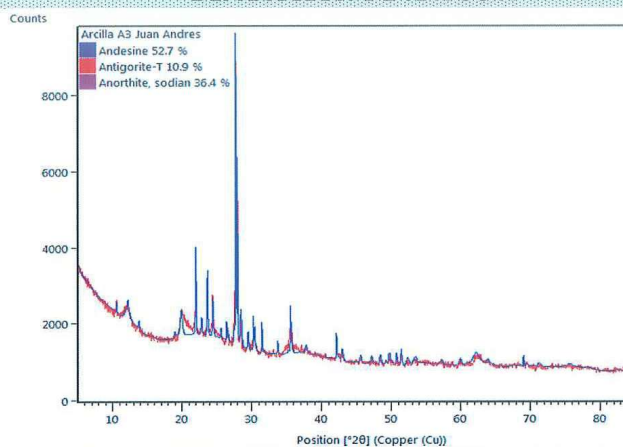
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 30. Informe de ensayo de Difracción de Rayos X sobre muestra de arcilla A3 en *Laboratorio Químico del CETEC*.

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com		OT	28320
			FECHA	2016-07-12
			PÁGINA	3 DE 5
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE CH/DI/CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE	
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A3	
Contacto	LUIS VELASQUEZ	Analista(s)	ELVIS GARCÍA	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	12/07/2016	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

DIFRACCIÓN DE RAYOS X



Fase Mineral	Fórmula	Concentración en % p/p
Anortita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	36.40%
Andesita	(Na,Ca)(Si,Al) ₃ O ₈	52.70%
Antigorita	Mg ₃ Si ₂ O ₇ (OH) ₂	52.70%

La cuantificación de las fases minerales se realizó mediante la técnica analítica Difracción de rayos X con afinamiento Rietveld en un equipo Empeyan de PANalytical, la identificación de las fases cristalinas presentes en las muestras se realizó mediante un barrido del goniómetro del equipo comprendido entre los ángulos de 5° ≤ 2θ ≤ 90°, con una duración de 4 minutos por barrido.

Observaciones: Las fases minerales cuantificadas mediante la técnica analítica Difracción de Rayos X son las que se encuentran disponibles en ICSD (Inorganic Crystal Structure Database)

ANALISTA:



AUTORIZADO POR:


 Jefe de laboratorio / Coordinador

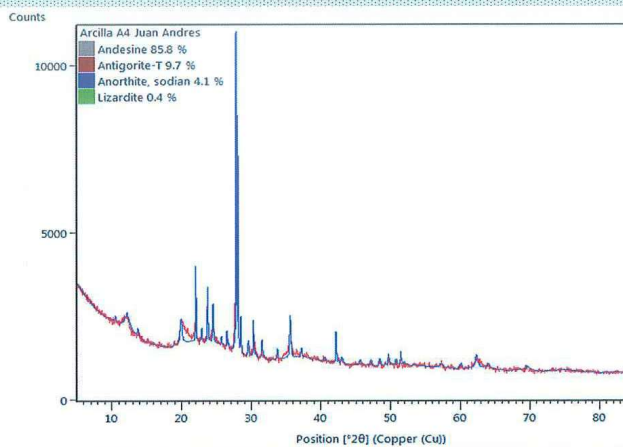
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 31. Informe de ensayo de Difracción de Rayos X sobre muestra de arcilla A4 en *Laboratorio Químico del CETEC*.

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com		OT	28320
			FECHA	2016-07-12
			PÁGINA	4 DE 5
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE CH/D/CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE	
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A4	
Contacto	LUIS VELASQUEZ	Analista(s)	ELVIS GARCÍA	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	12/07/2016	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

DIFRACCIÓN DE RAYOS X




Fase Mineral	Fórmula	Concentración en % p/p
Anortita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	4.10%
Andesita	(Na,Ca)(Si,Al) ₄ O ₈	85.80%
Antigorita	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	9.70%
Lizardita	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	0.40%

La cuantificación de las fases minerales se realizó mediante la técnica analítica Difracción de rayos X con afinamiento Rietveld en un equipo Empeyan de PANalytical, la identificación de las fases cristalinas presentes en las muestras se realizó mediante un barrido del goniómetro del equipo comprendido entre los ángulos de $5^\circ \leq 2\theta \leq 90^\circ$, con una duración de 4 minutos por barrido.

Observaciones: Las fases minerales cuantificadas mediante la técnica analítica Difracción de Rayos X son las que se encuentran disponibles en ICSD (Inorganic Crystal Structure Database)

ANALISTA: 

AUTORIZADO POR: 
Jefe de laboratorio / Coordinador

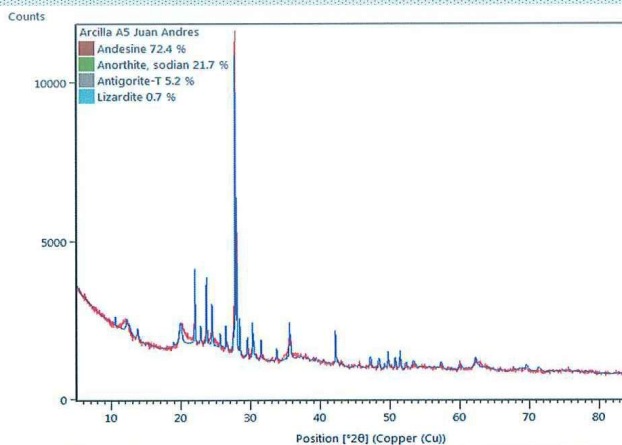
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 32. Informe de ensayo de Difracción de Rayos X sobre muestra de arcilla A5 en *Laboratorio Químico del CETEC*.

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com		OT	28320
			FECHA	2016-07-12
			PÁGINA	5 DE 5
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE C+D/CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE	
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A5	
Contacto	LUIS VELASQUEZ	Analista(s)	ELVIS GARCÍA	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	12/07/2016	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

DIFRACCIÓN DE RAYOS X

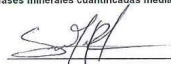


Fase Mineral	Fórmula	Concentración en % p/p
Anortita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	21.70%
Andesita	(Na,Ca)(Si,Al) ₄ O ₈	72.40%
Antigorita	Mg ₃ Si ₂ O ₇ (OH) ₂	5.20%
Lizardita	Mg ₃ Si ₂ O ₇ (OH) ₂	0.70%

La cuantificación de las fases minerales se realizó mediante la técnica analítica Difracción de rayos X con afinamiento Rietveld en un equipo Empeyan de PANalytical, la identificación de las fases cristalinas presentes en las muestras se realizó mediante un barrido del goniómetro del equipo comprendido entre los ángulos de $5^\circ \leq 2\theta \leq 90^\circ$, con una duración de 4 minutos por barrido.

Observaciones: Las fases minerales cuantificadas mediante la técnica analítica Difracción de Rayos X son las que se encuentran disponibles en ICSD (Inorganic Crystal Structure Database)

ANALISTA:



AUTORIZADO POR:



Jefe de laboratorio / Coordinador

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 33.1. Porcentaje de concentración de cada mineral en las muestras de arcilla.

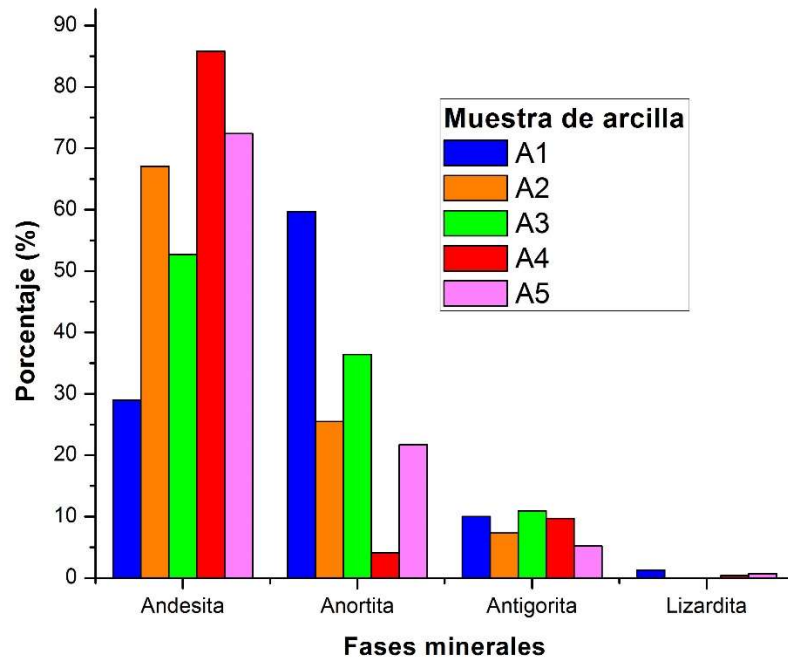
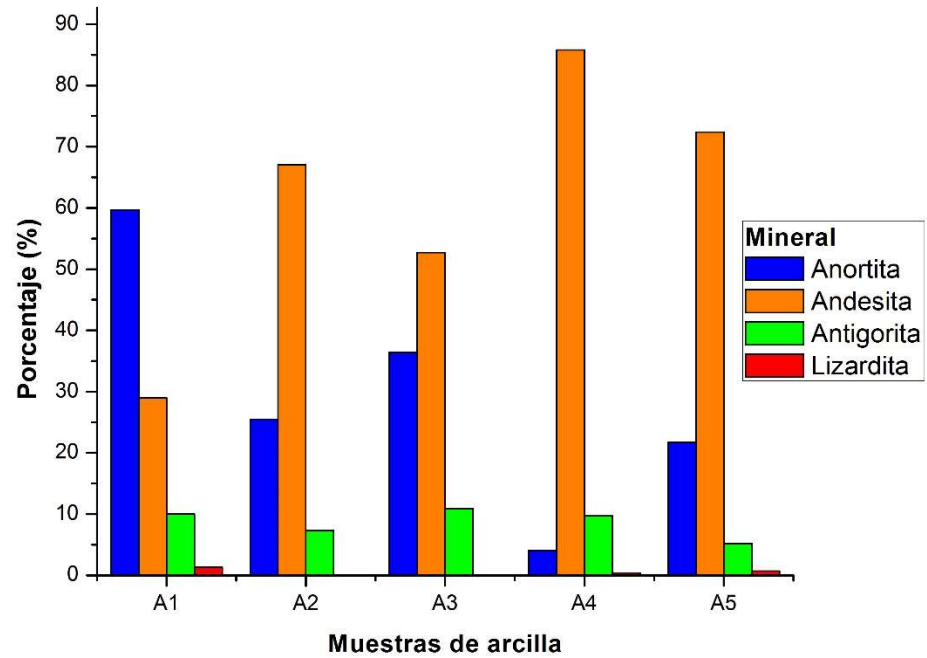


Ilustración 34. Porcentaje de concentración de minerales por muestra de arcilla.



F. Discusión de resultados de ensayos de Difracción de Rayos X (DRX)

1. Revisión de datos de las gráficas

a. Como resultado de los ensayos de DRX se obtuvo una serie de difractogramas que nos permiten asociar un espectro de difracción de la muestra con los de otras formaciones minerales registradas previamente en una base de datos.

b. Al procesar la información del difractograma se obtiene las fases minerales predominantes en la muestra de arcilla. En nuestro caso se obtienen cuatro fases minerales principales, la Andesita, Anortita, Antigorita y Lizardita.

c. En general, la fase mineral más abundante fue la andesita $(\text{Na,Ca})(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$ con un promedio de 61.4% en porcentajes de peso entre todas las muestras.

d. La andesita fue la fase mineral más abundante en todas las muestras de arcilla exceptuando la A1.

e. La siguiente fase mineral con mayor presencia fue la anortita, con un promedio de 29.48% en porcentaje de peso entre todas las muestras.

f. Fue la fase mineral más abundante en la muestra A1 y la segunda más abundante en las muestras A2, A3 y A5.

g. En la muestra A4 tuvo un tercer lugar de importancia con un porcentaje de peso de 4.10%, menor al de todas las otras muestras.

h. El tercer componente más abundante en la muestra de arcilla fue la antigorita. Este mineral tuvo un porcentaje de peso promedio de 8.62% entre todas las muestras de arcilla analizadas.

i. La antigorita fue el tercer mineral más abundante en todas las muestras de arcilla exceptuando la A4, en la que fue el segundo mineral más abundante.

j. Se detectó un porcentaje importante de Lizardita en las muestras de arcilla A1, A4 y A5 convirtiéndolo en el cuarto mineral más abundante en las muestras. Su porcentaje de peso promedio entre las 5 muestras fue de 0.8%.

k. Los resultados obtenidos tuvieron una variabilidad relativamente amplia. Esto puede deberse a que las mezclas secas son más difíciles de homogenizar y el análisis de DRX se hace en un punto específico de la muestra. Se realiza un análisis local de la muestra en lugar de analizar la muestra en su totalidad.

2. Descripción de las fases minerales identificadas

a. Silicatos. Todos los minerales identificados en los ensayos de DRX son silicatos, lo cual era de esperarse ya que los silicatos están compuestos por oxígeno y silicio que son los dos elementos más abundantes en la corteza terrestre. De hecho, los silicatos componen casi el 95% del volumen y el 74% de la masa de la corteza terrestre. (Nelson, 2012)

La estructura básica de todos los silicatos consiste en un ion Si^{+4} y cuatro iones O^{2-} que se enlazan formando una estructura de tetraedro. Para compensar la carga +4 del catión de silicio, cada ion de oxígeno aporta una carga negativa, de modo que cada ion de oxígeno queda con una carga neta de -1. Finalmente se obtiene un grupo SiO_4^{4-} en un arreglo en forma de tetraedro el cual es la base de todos los silicatos. Ya que cada ion de oxígeno queda con una carga neta de -1, los tetraedros pueden unirse con otros iones por sus esquinas y formar una gran variedad de arreglos dando lugar a los diferentes tipos de silicatos. Los silicatos se pueden clasificar de acuerdo a la estructura en la que se enlazan los tetraedros o de acuerdo a la cantidad de iones de oxígeno enlazados con otros iones. (Nelson, 2012)

b. Además de ser silicatos, dos de los minerales identificados con los ensayos de DRX, la andesina y la anortita, son del grupo de los tectosilicatos y a su vez pertenecen a los feldespatos y la serie de las plagioclasas. Ambos minerales se encuentran muy relacionados, pero se ubican en diferentes posiciones de la serie de las plagioclasas. La andesina es un miembro intermedio que tiene calcio y sodio y por otro lado la anortita está en el extremo de la serie y no contiene sodio.

c. Tectosilicatos. Los tectosilicatos son la subclase de los silicatos en la que todas las esquinas de los tetraedros de SiO_4^{4-} se unen con otros tetraedros formando una malla tridimensional compleja. En este caso, el grupo estructural básico se convierte en SiO_2 . Dentro de los silicatos también es común que se encuentren tetraedros en los que se reemplaza el ion Si^{+4} con un ion Al^{+3} , lo cual produce un desbalance de cargas que permite aún más arreglos diferentes en la estructura tridimensional de estos silicatos. (Nelson, 2012)

d. Feldespatos. Los feldespatos son un grupo de minerales aluminosilicatos consistentes en una red tridimensional de iones SiO_2 y AlO_4 . Los feldespatos son muy abundantes y constituyen alrededor del 60% de la corteza terrestre. La composición mineralógica de los feldespatos se puede expresar como un sistema ternario cuyos tres extremos son los minerales albita $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, anortita $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ y ortoclasa KAlSi_3O_8 . A la serie de feldespatos que van entre la albita y la ortoclasa se les conoce como feldespatos alcalinos y a los feldespatos entre la albita y la anortita se les conoce como la serie de las plagioclasas. Cuando los feldespatos se desgastan se descomponen y forman caolinita, material típico de las arcillas. (Shah, 2003)

e. Andesita. La andesita fue la fase mineral predominante en todas las muestras de arcilla analizadas exceptuando una. La andesita $(\text{Na,Ca})(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$ es una roca ígnea de origen volcánico

compuesta principalmente por andesina, un mineral del grupo de los feldespatos y la serie de los plagioclasas. Es un mineral intermedio de la serie entre la albita y la anortita. La andesina es un mineral intermedio que se encuentra entre la albita, que contiene sodio, pero no calcio; y la anortita que contiene calcio, pero no sodio. Por su parte, la andesina contiene átomos de sodio y calcio y por ello a veces se le clasifica como una albita rica en calcio. Los cristales de la andesina son triclinicos y poco comunes. Cuando se presentan, sus cristales son de gran tamaño y se forman en grupos. Algunas autoridades en cuanto a minerales no consideran la andesina como un mineral individualmente sino una variedad de albita. (Mineral data Publishing, 2001)

f. Anortita. La anortita fue en general la segunda fase mineral más predominante en las muestras de arcilla. La anortita $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ es otro mineral del grupo de los feldespatos y serie de las plagioclasas. Este mineral forma cristales triclinicos y cortos. Es un mineral común que puede encontrarse en rocas máficas y volcánicas y tiene una distribución amplia en todo el planeta. (Mineral data Publishing, 2001)

g. Las dos fases minerales restantes y con menor presencia que los feldespatos plagioclasas, resultan estar muy relacionadas entre sí igualmente. La antigorita y la lizardita son silicatos de la subclase de los filosilicatos y del grupo de las serpentinas caolinitas. Ambos minerales tienen una composición química prácticamente igual, pero se cristalizan de forma diferente de modo que son polimorfos.

h. Filosilicatos. Los filosilicatos son una subclase de los minerales silicatos que los grupos de tetraedros de SiO_4 comparten tres iones de oxígeno cada uno formando una sábana infinita de tetraedros. En los filosilicatos, el grupo estructural base es el Si_2O_5 . Es muy común que los filosilicatos se encuentren hidratados con iones hidroxilo, y por la adición de este grupo los tetraedros se acomodan en una forma tal que parecieran formar octaedros. (Nelson, 2012)

i. Serpentinias. Son minerales formados por la hidratación de rocas en el lecho oceánico. Su estructura se denomina como trioctaédrica. Pueden dividirse en crisotilo, lizardita y antigorita, y su fórmula química general es $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ aunque se pueden encontrar otros elementos en la posición del magnesio o del silicio. En general, la composición química de todo el subgrupo de las serpentinas es muy similar y se les considera polimorfos. (Faust y Fahey, 1962)

j. La antigorita fue la tercera fase mineral con mayor presencia en las muestras de arcilla analizadas. La antigorita $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ es un mineral del grupo de las serpentinas caolinitas. Este mineral forma cristales monoclinicos en forma de láminas fibrosas que pueden alcanzar un gran tamaño. La antigorita tiene una dispersión amplia en todo el planeta y es bastante común. (RRUFF o Mineral data Publishing, 2001) La antigorita, así como todo el grupo de las serpentinas se encuentra hidratada con iones hidroxilos. (Trittschack, 2013)

k. El cuarto mineral con mayor presencia en las muestras de arcilla fue la lizardita, aunque se presenta en un porcentaje muy bajo y solo tres de las cinco muestras analizadas, (A1, A4 y A5). La lizardita $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ es un mineral del grupo de las serpentinas caolinitas, y el más común dentro del

grupo. Los cristales de la lizardita son hexagonales, puede presentar cristales de hasta 2mm generalmente en forma de láminas o pirámides. Sus cristales tienen un grano muy fino. Su estructura está hidratada con iones hidroxilos. Es polimorfo con la antigorita y el crisotilo. (Mineral data Publishing, 2001)

3. Comentarios sobre las fases minerales

a. Como se comentó anteriormente, se encontraron cuatro fases minerales que pueden dividirse en dos grupos. La andesina y la anortita fueron las fases minerales con mayor concentración y pertenecen al grupo de los feldespatos plagioclasas, subclase de los tectosilicatos. Adicionalmente, se encontró presencia de antigorita y lizardita, las cuales son fases minerales del grupo de las serpentinas caolinitas y subclase de los filosilicatos.

b. Los filosilicatos son materiales comúnmente encontrados en arcillas, sin embargo fueron una minoría en las muestras de arcilla analizadas. Los feldespatos plagioclasas, que componen la mayor parte de las muestras de arcilla, no son minerales típicos de la arcilla. Posiblemente la mayor concentración de feldespatos se debe a que estos son silicatos más comunes y con mayor presencia en la corteza terrestre. También es importante señalar que aunque los feldespatos no son minerales típicos de las arcillas si se descomponen al desgastarse y forman caolinitas (mineral típico en arcillas). Posiblemente la formación de arcilla de la Aldea El Llano es relativamente joven y aún tiene un alto contenido de feldespatos que no se han desgastado para formar minerales de arcilla.

c. Los minerales del grupo de las serpentinas suelen formarse en condiciones similares a las del lecho oceánico. En Guatemala hay varios yacimientos de roca serpentizada en zonas muy lejanas a las costas del país. Esto se debe a que el territorio centroamericano formó parte del lecho oceánico previo a la formación del Istmo de Panamá alrededor de 10 millones de años atrás.

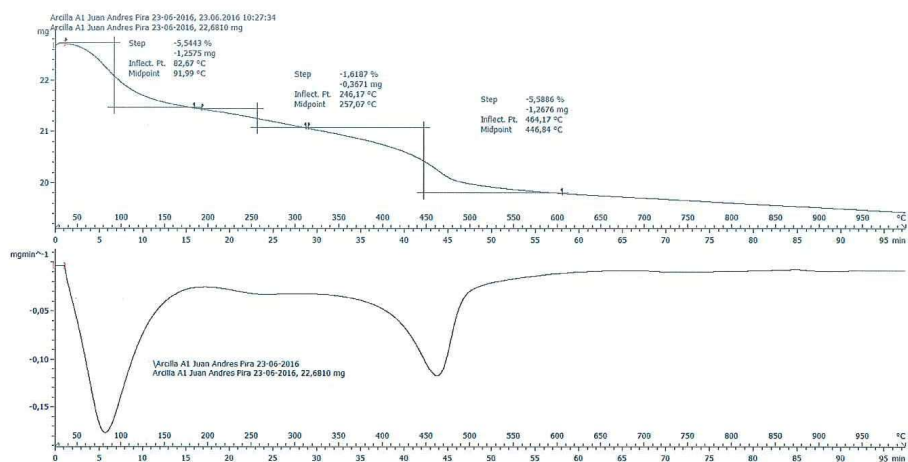
d. Las fases serpentinas encontradas contienen iones hidroxilos dentro de su composición. Pueden almacenar cantidades relativamente altas de agua y cumplen funciones de transporte de agua en la interfaz entre la corteza y el manto de la tierra.

G. Resultados de Análisis Termogravimétrico (TGA)

Ilustración 35. Informe de ensayo de Análisis Termogravimétrico sobre muestra de arcilla A1 en Laboratorio Químico del CETEC.

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Av. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@compro.com		OT	28320
			FECHA	2016-07-12
			PÁGINA	1 DE 20
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE I + D / CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A1	
Contacto	LUIS VELÁSQUEZ	Analista(s)	SHILONEN CAMPOSECO	
Teléfono	2288-4100	Fecha de Ensayo	2016-06-2016	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



Paso	Rango de Temperatura teórica (°C)	Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%)	Fenómeno
1	60-100	82.67	5.54	Deshidratación
2	150-300	246.17	1.68	Pérdida de agua de constitución
3	400-500	464.17	5.59	Deshidroxilación

Observaciones: La identificación de los fenómenos de descomposición térmica fue realizada por termogravimetría en un módulo TGA 1 SF/1100/265 de Mettler Toledo, de 25°C a 1000°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmósfera inerte de N₂ con flujo de 20 ml/min.


Analista


Jefe de laboratorio / Coordinador

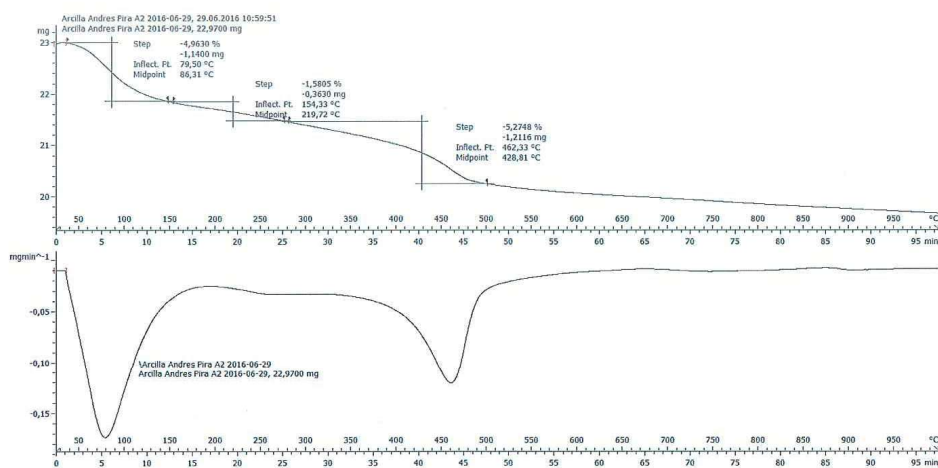
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 36. Informe de ensayo de Análisis Termogravimétrico sobre muestra de arcilla A2 en Laboratorio Químico del CETEC.

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cenpro.com		OT	28320
			FECHA	2016-07-12
			PÁGINA	2 DE 20
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE I + D / CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A2	
Contacto	LUIS VELÁSQUEZ	Analista(s)	SHILONEN CAMPOSECO	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	28/05/2016	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



Paso	Rango de Temperatura teórica (°C)	Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%)	Fenómeno
1	60-100	79.65	4.96	Deshidratación
2	150-300	154.33	1.58	Pérdida de agua de constitución
3	400-500	462.33	5.27	Deshidroxilación

Observaciones: La identificación de los fenómenos de descomposición térmica fue realizada por termogravimetría en un módulo TGA 1 SF/1100/265 de Mettler Toledo, de 25°C a 1000°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmósfera inerte de N₂ con flujo de 20 ml/min.


 Analista


 Jefe de laboratorio / Coordinador

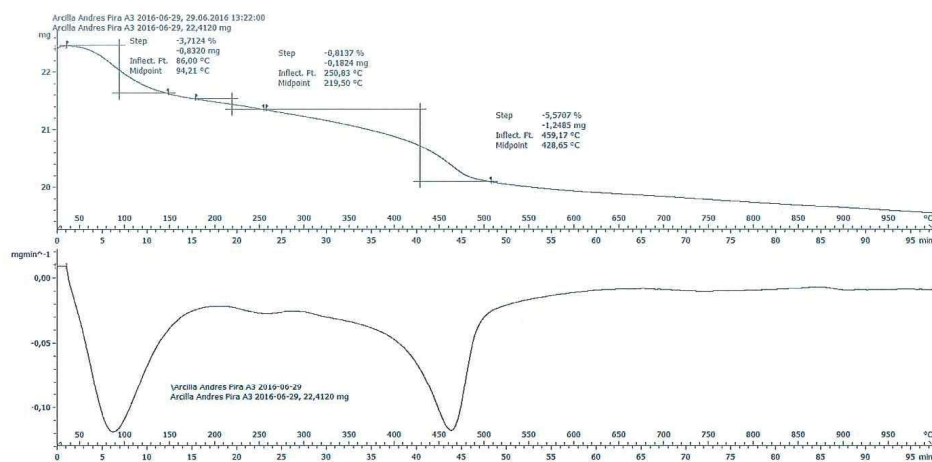
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 37. Informe de ensayo de Análisis Termogravimétrico sobre muestra de arcilla A3 en Laboratorio Químico del CETEC.

		CEMENTOS PROGRESO S. A.	
		CENTRO TECNOLÓGICO	
		15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera	
		Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com	
		OT	28320
		FECHA	2016-07-12
		PÁGINA	3 DE 20
		ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE I + D / CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A3
Contacto	LUIS VELÁSQUEZ	Analista(s)	SHILONEN CAMPOSECO
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	29/06/2016


INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



Paso	Rango de Temperatura teórica (°C)	Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%)	Fenómeno
1	60-100	86.00	3.71	Deshidratación
2	150-300	250.83	0.81	Pérdida de agua de constitución
3	400-500	459.17	5.57	Deshidroxilación

Observaciones: La identificación de los fenómenos de descomposición térmica fue realizada por termogravimetría en un módulo TGA 1 SF/1100/265 de Mettler Toledo, de 25°C a 1000°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmósfera inerte de N₂ con flujo de 20 ml/min.


Analista


Jefe de laboratorio / Coordinador

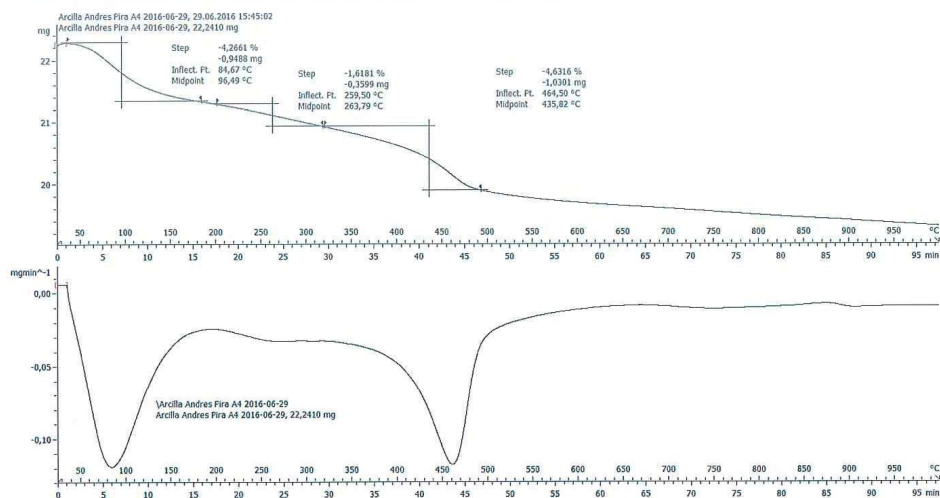
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 38. Informe de ensayo de Análisis Termogravimétrico sobre muestra de arcilla A4 en Laboratorio Químico del CETEC.

		CEMENTOS PROGRESO S. A.	
		CENTRO TECNOLÓGICO	
		15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera	
		Tel: 22864178 Fax: 22864181 cotec@cempro.com	
		OT	28320
		FECHA	2016-07-12
		PÁGINA	4 DE 20
		ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE I + D / CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A4
Contacto	LUIS VELÁSQUEZ	Analista(s)	SHILONEN CAMPOSECO
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	29/06/2016

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



Paso	Rango de Temperatura teórica (°C)	Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%)	Fenómeno
1	60-100	84.57	4.27	Deshidratación
2	150-300	259.50	1.62	Pérdida de agua de constitución
3	400-500	464.50	4.63	Deshidroxilación

Observaciones: La identificación de los fenómenos de descomposición térmica fue realizada por termogravimetría en un módulo TGA 1 SF/1100/265 de Mettler Toledo, de 25°C a 1000°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmosfera inerte de N2 con flujo de 20 ml/min.


Analista


Jefe de laboratorio / Coordinador

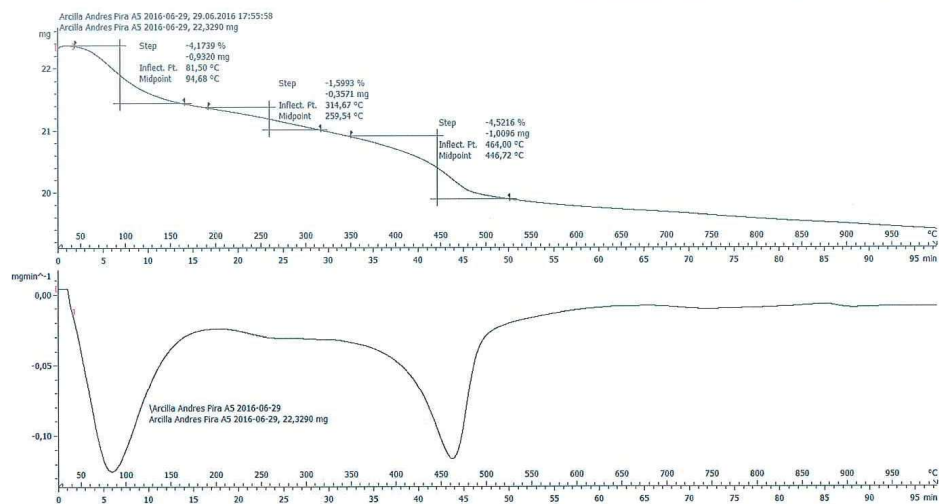
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 39. Informe de ensayo de Análisis Termogravimétrico sobre muestra de arcilla A5 en *Laboratorio Químico del CETEC.*

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com		OT	28320
			FECHA	2016-07-12
			PÁGINA	5 DE 20
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE I + D / CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A5	
Contacto	LUIS VELÁSQUEZ	Analista(s)	SHILONEN CAMPOSECO	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	29/08/2016	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



Paso	Rango de Temperatura teórica (°C)	Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%)	Fenómeno
1	60-100	81.50	4.17	Deshidratación
2	150-300	314.17	1.60	Pérdida de agua de constitución
3	400-500	464.00	4.52	Deshidroxilación

Observaciones: La identificación de los fenómenos de descomposición térmica fue realizada por termogravimetría en un módulo TGA 1 SF/1100/285 de Mettler Toledo, de 25°C a 1000°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmosfera inerte de N2 con flujo de 20 ml/min.


 Analista


 Jefe de laboratorio / Coordinador

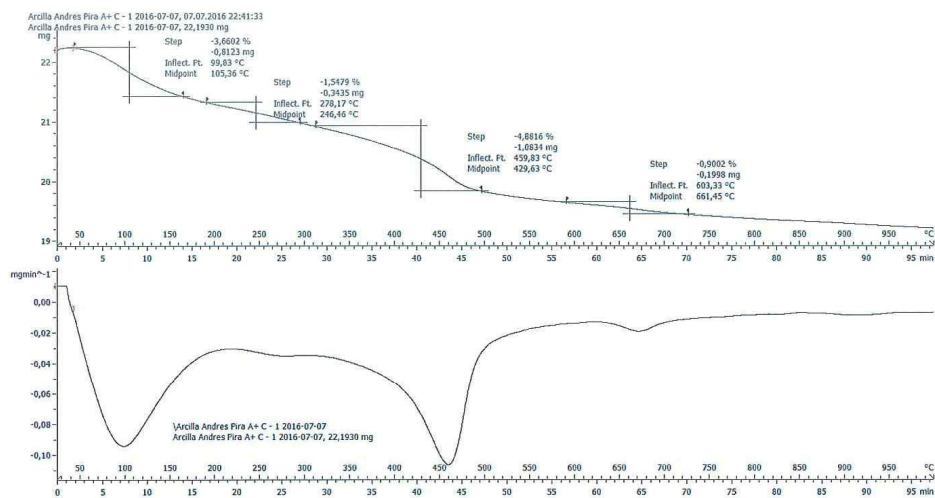
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 40. Informe de ensayo de Análisis Termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+C - 1 en Laboratorio Químico del CETEC.

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com		OT	28320
			FECHA	2016-07-12
			PÁGINA	6 DE 20
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE I + D / CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A + C - 1	
Contacto	LUIS VELÁSQUEZ	Analista(s)	SHILONEN CAMPOSECO	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	07/07/2016	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



Paso	Rango de Temperatura teórica (°C)	Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%)	Fenómeno
1	60-100	99.83	3.66	Deshidratación
2	150-300	278.17	1.55	Pérdida de agua de constitución
3	400-500	459.83	4.88	Deshidroxilación
4	480-690	603.33	0.90	Deshidroxilación de portlandita

Observaciones: La identificación de los fenómenos de descomposición térmica fue realizada por termogravimetría en un módulo TGA 1 SF/1100/265 de Mettler Toledo, de 25°C a 1000°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmosfera inerte de N2 con flujo de 20 ml/min.


 Analista


 Jefe de laboratorio / Coordinador

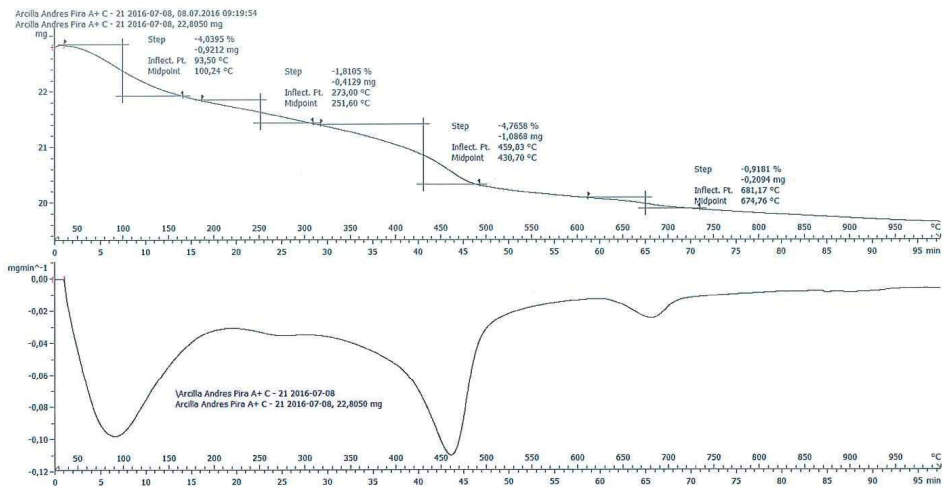
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 41. Informe de ensayo de Análisis Termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+C - 2 en Laboratorio Químico del CETEC.

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com		OT	28320
			FECHA	2016-07-12
			PÁGINA	7 DE 20
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE I + D / CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A + C - 2	
Contacto	LUIS VELÁSQUEZ	Analista(s)	SHILONEN CAMPOSECO	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	08/07/2016	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



Paso	Rango de Temperatura teórica (°C)	Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%)	Fenómeno
1	60-100	93.50	4.04	Deshidratación
2	150-300	273.00	1.81	Pérdida de agua de constitución
3	400-500	459.83	4.77	Deshidroxilación
4	480-690	681.17	0.92	Deshidroxilación de portlandita

Observaciones: La identificación de los fenómenos de descomposición térmica fue realizada por termogravimetría en un módulo TGA 1 SF/1100/265 de Mettler Toledo, de 25°C a 1000°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmósfera inerte de N₂ con flujo de 20 ml/min.


 Analista

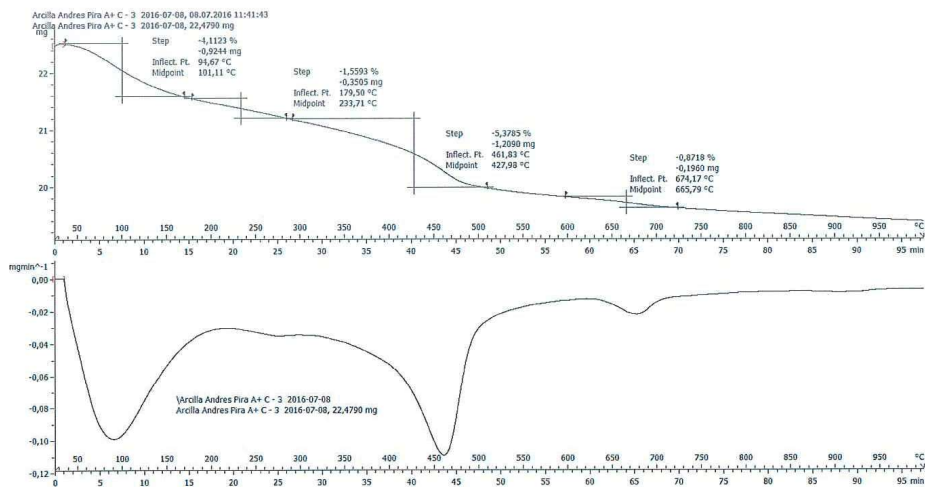

 Jefe de laboratorio / Coordinador

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 42. Informe de ensayo de Análisis Termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+C - 3 en Laboratorio Químico del CETEC.

 <p style="text-align: center;">CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com</p>		OT	28320
		FECHA	2016-07-12
		PÁGINA	8 DE 20
		ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE I + D / CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A + C - 3
Contacto	LUIS VELÁSQUEZ	Analista(s)	SHILONEN CAMPOSECO
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	08/07/2016

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



Paso	Rango de Temperatura teórica (°C)	Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%)	Fenómeno
1	60-100	94.67	4.11	Deshidratación
2	150-300	179.50	1.56	Pérdida de agua de constitución
3	400-500	461.83	5.38	Deshidroxilación
4	480-690	674.17	0.87	Deshidroxilación de portlandita

Observaciones: La identificación de los fenómenos de descomposición térmica fue realizada por termogravimetría en un módulo TGA 1 SF/1100/265 de Mettler Toledo, de 25°C a 1000°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmosfera inerte de N2 con flujo de 20 ml/min.


 Analista


 Jefe de laboratorio / Coordinador

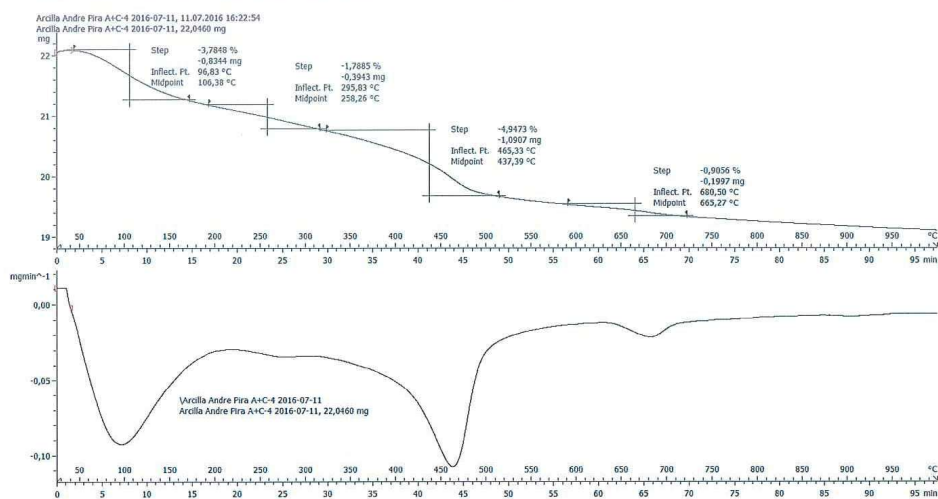
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 43. Informe de ensayo de Análisis Termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+C - 4 en Laboratorio Químico del CETEC.

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com		OT	28320
			FECHA	2016-07-12
			PÁGINA	9 DE 20
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE I + D / CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A + C - 4	
Contacto	LUIS VELÁSQUEZ	Analista(s)	SHILONEN CAMPOSECO	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	11/07/2016	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



Paso	Rango de Temperatura teórica (°C)	Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%)	Fenómeno
1	60-100	96.83	3.78	Deshidratación
2	150-300	295.83	1.79	Pérdida de agua de constitución
3	400-500	465.33	4.95	Deshidroxilación
4	480-690	680.50	0.91	Deshidroxilación de portlandita

Observaciones: La identificación de los fenómenos de descomposición térmica fue realizada por termogravimetría en un módulo TGA 1 SF/1100/265 de Mettler Toledo, de 25°C a 1000°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmosfera inerte de N2 con flujo de 20 ml/min.


 Analista


 Jefe de laboratorio /Coordinador

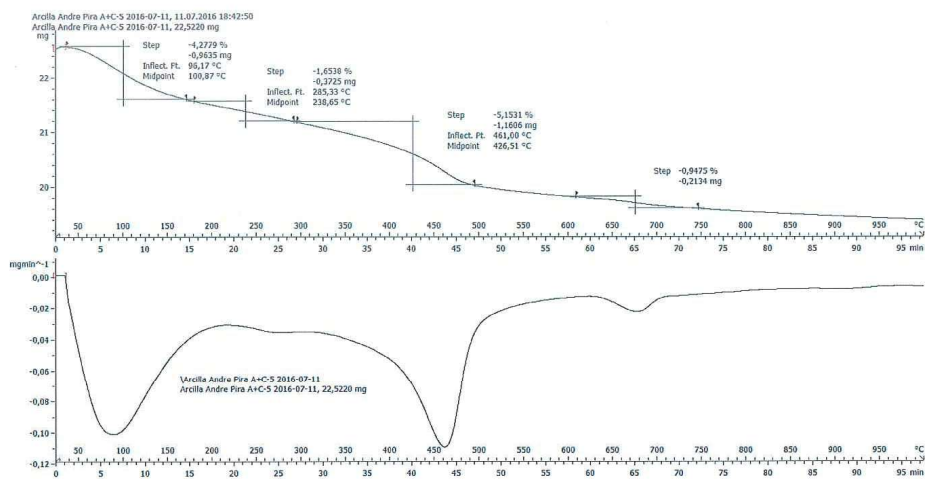
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 44. Informe de ensayo de Análisis Termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+C - 5 en Laboratorio Químico del CETEC.

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com		OT	28320
			FECHA	2016-07-12
			PÁGINA	10 DE 20
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE I + D / CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A + C - 5	
Contacto	LUIS VELÁSQUEZ	Analista(s)	SHILONEN CAMPOSECO	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	11/07/2016	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



Paso	Rango de Temperatura teórica (°C)	Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%)	Fenómeno
1	60-100	96.17	4.28	Deshidratación
2	150-300	285.33	1.65	Pérdida de agua de constitución
3	400-500	461.00	5.15	Deshidroxilación
4	480-690	680.00	0.86	Deshidroxilación de portlandita

Observaciones: La identificación de los fenómenos de descomposición térmica fue realizada por termogravimetría en un módulo TGA 1 SF/1100/265 de Mettler Toledo, de 25°C a 1000°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmosfera inerte de N₂ con flujo de 20 ml/min.


 Analista


 Jefe de laboratorio / Coordinador

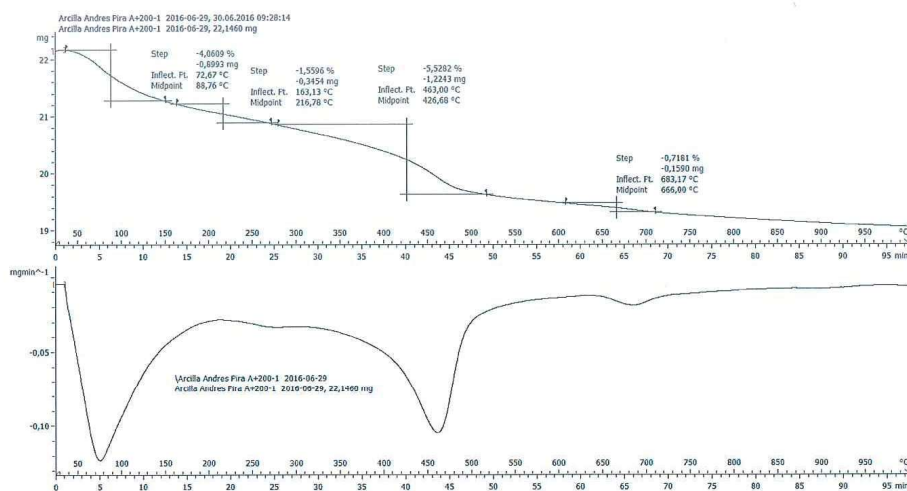
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 45. Informe de ensayo de Análisis Termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+200 - 1 en Laboratorio Químico del CETEC.

	CEMENTOS PROGRESO S. A.		OT	28320
	CENTRO TECNOLÓGICO		FECHA	2016-07-12
	15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera		PÁGINA	11 DE 20
	Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetecc@cempro.com		ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE I + D / CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A + 200 - 1	
Contacto	LUIS VELÁSQUEZ	Analista(s)	SHILONEN CAMPOSECO	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	29/08/2016	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



Paso	Rango de Temperatura teórica (°C)	Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%)	Fenómeno
1	60-100	72.67	4.06	Deshidratación
2	150-300	163.13	1.56	Pérdida de agua de constitución
3	400-500	463.00	5.53	Deshidroxilación
4	480-690	683.17	0.72	Deshidroxilación de portlandita

Observaciones: La identificación de los fenómenos de descomposición térmica fue realizada por termogravimetría en un módulo TGA 1 SF/1100/265 de Mettler Toledo, de 25°C a 1000°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmosfera inerte de N2 con flujo de 20 ml/min.


 Analista


 Jefe de laboratorio / Coordinador

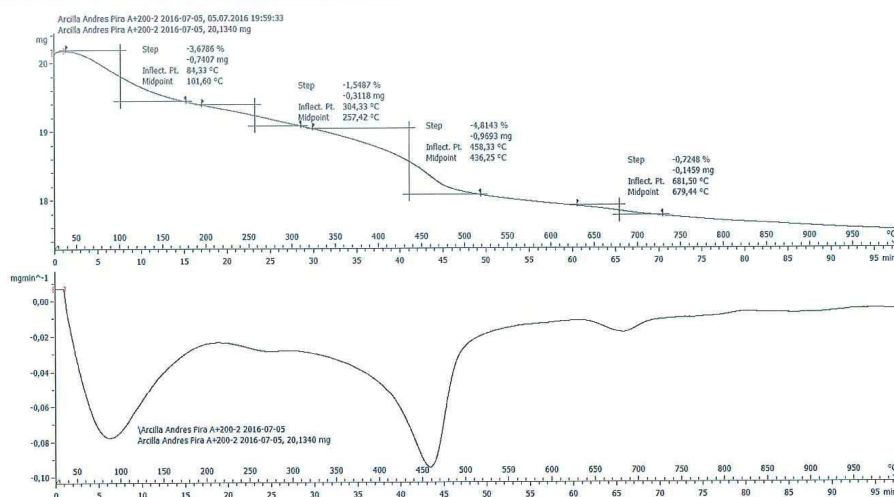
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 46. Informe de ensayo de Análisis Termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+200 - 2 en Laboratorio Químico del CETEC.

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com		OT	28320
			FECHA	2016-07-12
			PÁGINA	12 DE 20
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE I + D / CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A + 200 - 2	
Contacto	LUIS VELÁSQUEZ	Analista(s)	SHILONEN CAMPOSECO	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	05/07/2016	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



Paso	Rango de Temperatura teórica (°C)	Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%)	Fenómeno
1	60-100	84.33	3.68	Deshidratación
2	150-300	304.33	1.55	Pérdida de agua de constitución
3	400-500	458.33	4.81	Deshidroxilación
4	480-690	681.50	0.72	Deshidroxilación de portlandita

Observaciones: La identificación de los fenómenos de descomposición térmica fue realizada por termogravimetría en un módulo TGA 1 SF/1100/265 de Mettler Toledo, de 25°C a 1000°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmosfera inerte de N2 con flujo de 20 ml/min.


 Analista


 Jefe de laboratorio / Coordinador

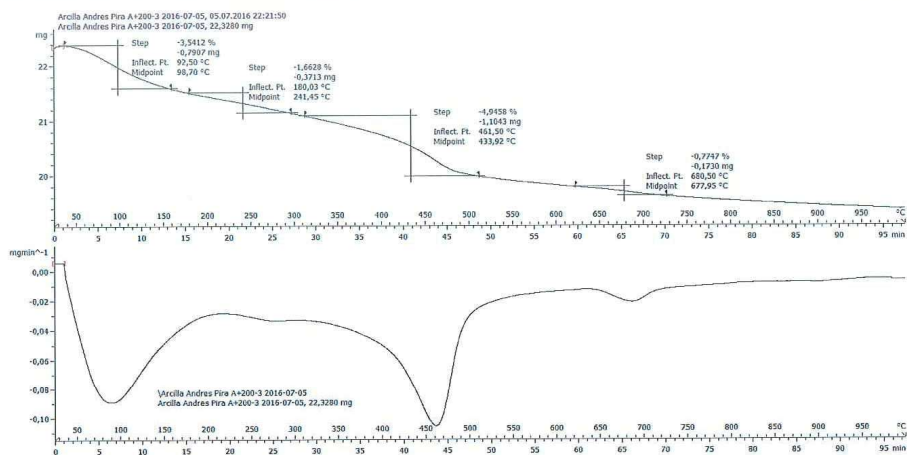
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 47. Informe de ensayo de Análisis Termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+200 - 3 en Laboratorio Químico del CETEC.

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com		OT	28320
			FECHA	2016-07-12
			PÁGINA	13 DE 20
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE I + D / CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A + 200 - 3	
Contacto	LUIS VELÁSQUEZ	Analista(s)	SHILONEN CAMPOSECO	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	05/07/2016	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



Paso	Rango de Temperatura teórica (°C)	Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%)	Fenómeno
1	60-100	92.50	3.54	Deshidratación
2	150-300	180.03	1.66	Pérdida de agua de constitución
3	400-500	461.50	4.95	Deshidroxilación
4	480-690	680.50	0.77	Deshidroxilación de portlandita

Observaciones: La identificación de los fenómenos de descomposición térmica fue realizada por termogravimetría en un módulo TGA 1 SF/1100/265 de Mettler Toledo, de 25°C a 1000°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmosfera inerte de N₂ con flujo de 20 ml/min.



 Analista



 Jefe de laboratorio / Coordinador

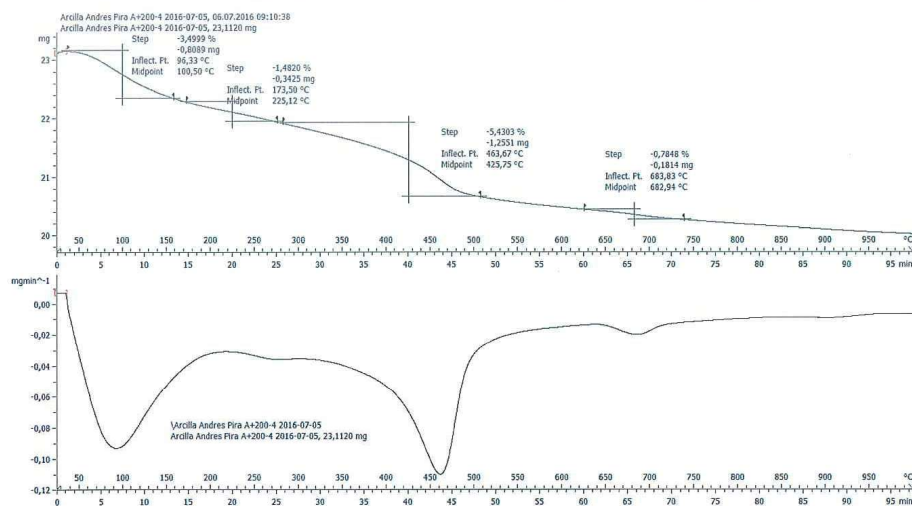
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse este informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 48. Informe de ensayo de Análisis Termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+200 - 4 en Laboratorio Químico del CETEC.

	CEMENTOS PROGRESO S. A.		OT	28320
	CENTRO TECNOLÓGICO		FECHA	2016-07-12
	15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera		PÁGINA	14 DE 20
	Tel: 22864178 Fax: 22864181 cotec@cempro.com		ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE I + D / CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A + 200 - 4	
Contacto	LUIS VELÁSQUEZ	Analista(s)	SHILONEN CAMPOSECO	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	05/07/2016	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



Paso	Rango de Temperatura teórica (°C)	Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%)	Fenómeno
1	60-100	96.33	3.50	Deshidratación
2	150-300	173.50	1.48	Pérdida de agua de constitución
3	400-500	463.17	5.43	Deshidroxilación
4	480-690	683.94	0.78	Deshidroxilación de portlandita

Observaciones: La identificación de los fenómenos de descomposición térmica fue realizada por termogravimetría en un módulo TGA 1 SF/1100/265 de Mettler Toledo, de 25°C a 1000°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmósfera inerte de N₂ con flujo de 20 ml/min.


 Analista


 Jefe de laboratorio / Coordinador

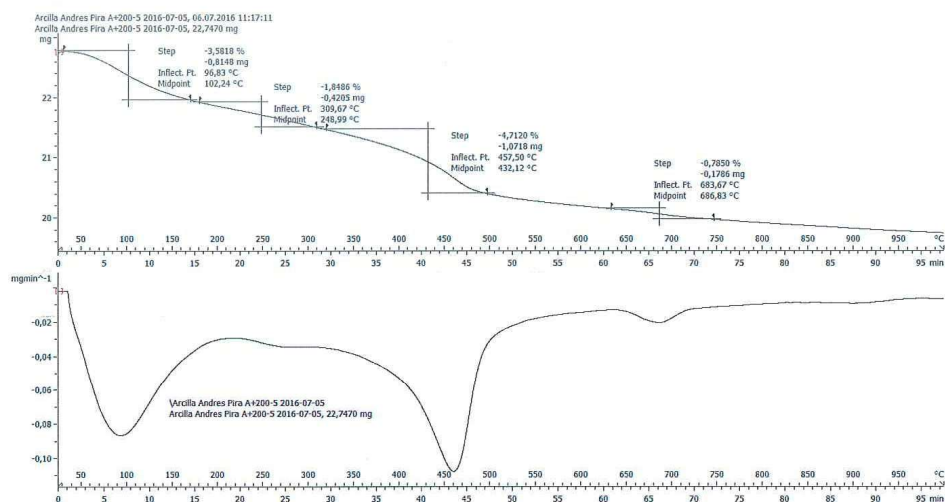
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 49. Informe de ensayo de Análisis Termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+200 - 5 en Laboratorio Químico del CETEC.

		CEMENTOS PROGRESO S. A.	
		CENTRO TECNOLÓGICO	
		15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera	
		Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cmpro.com	
		OT	28320
		FECHA	2016-07-12
		PÁGINA	15 DE 20
		ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE I + D / CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A + 200 - 5
Contacto	LUIS VELÁSQUEZ	Analista(s)	SHILONEN CAMPOSECO
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	05/07/2016

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



Paso	Rango de Temperatura teórica (°C)	Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%)	Fenómeno
1	60-100	96.83	3.58	Deshidratación
2	150-300	309.67	1.85	Pérdida de agua de constitución
3	400-500	457.50	4.71	Deshidroxilación
4	480-690	683.67	0.79	Deshidroxilación de portlandita

Observaciones: La identificación de los fenómenos de descomposición térmica fue realizada por termogravimetría en un módulo TGA 1 SF/1100/265 de Mettler Toledo, de 25°C a 1000°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmosfera inerte de N2 con flujo de 20 ml/min.


Analista


Jefe de laboratorio / Coordinador

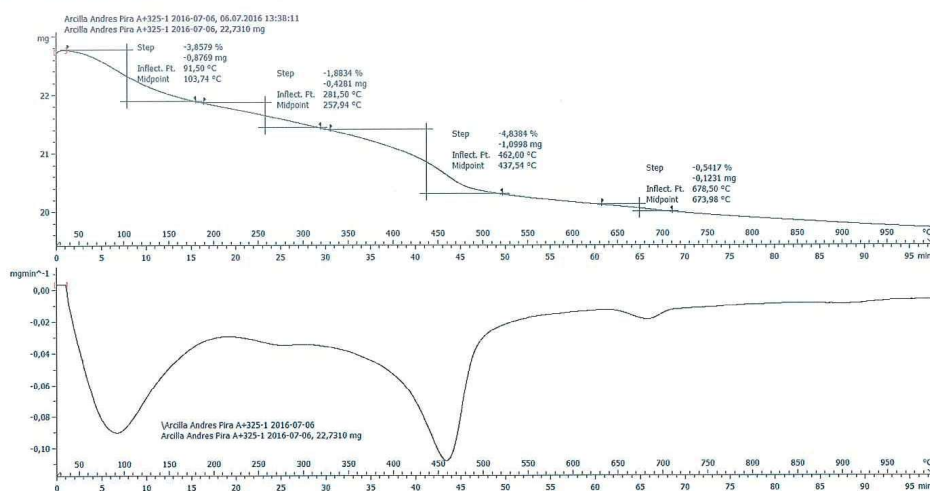
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 50. Informe de ensayo de Análisis Termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+325 - 1 en Laboratorio Químico del CETEC.

	CEMENTOS PROGRESO S. A.		OT	28320
	CENTRO TECNOLÓGICO		FECHA	2016-07-12
	15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera		PÁGINA	16 DE 20
	Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cmpro.com		ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE I + D / CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A + 325 - 1	
Contacto	LUIS VELÁSQUEZ	Analista(s)	SHILONEN CAMPOSECO	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	06/07/2016	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



Paso	Rango de Temperatura teórica (°C)	Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%)	Fenómeno
1	60-100	91.50	3.86	Deshidratación
2	150-300	281.50	1.88	Pérdida de agua de constitución
3	400-500	462.00	4.84	Deshidroxilación
4	480-690	678.50	0.54	Deshidroxilación de portlandita

Observaciones: La identificación de los fenómenos de descomposición térmica fue realizada por termogravimetría en un módulo TGA 1 SF/1100/265 de Mettler Toledo, de 25°C a 1000°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmosfera inerte de N2 con flujo de 20 ml/min.


 Analista


 Jefe de laboratorio / Coordinador

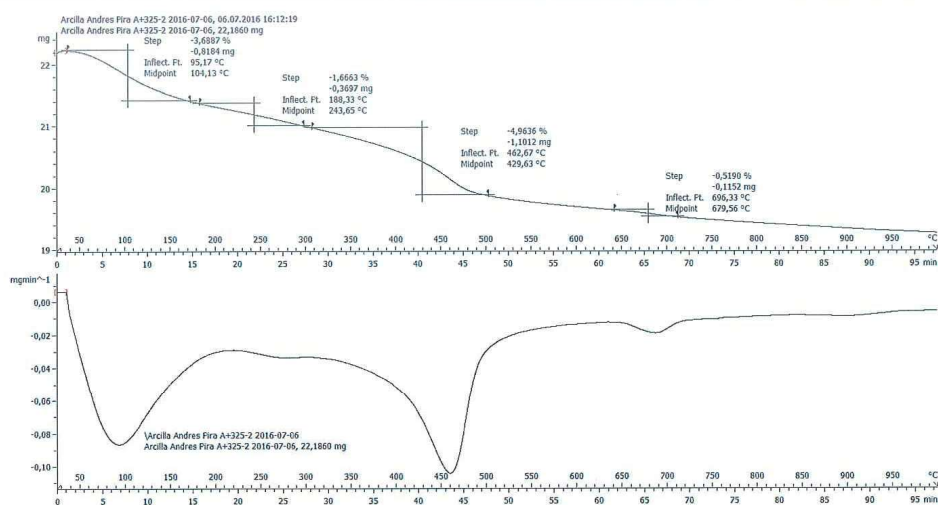
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 51. Informe de ensayo de Análisis Termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+325 - 2 en Laboratorio Químico del CETEC.

	CEMENTOS PROGRESO S. A.		OT	28320
	CENTRO TECNOLÓGICO		FECHA	2016-07-12
	15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera		PÁGINA	17 DE 20
	Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com		ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE I + D / CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A + 325 - 2	
Contacto	LUIS VELÁSQUEZ	Analista(s)	SHILONEN CAMPOSECO	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	05/07/2016	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



Paso	Rango de Temperatura teórica (°C)	Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%)	Fenómeno
1	60-100	95.17	3.69	Deshidratación
2	150-300	188.33	1.67	Pérdida de agua de constitución
3	400-500	462.67	4.96	Deshidroxilación
4	480-690	696.33	0.52	Deshidroxilación de portlandita

Observaciones: La identificación de los fenómenos de descomposición térmica fue realizada por termogravimetría en un módulo TGA 1 SF/1100/265 de Mettler Toledo, de 25°C a 1000°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmosfera inerte de N₂ con flujo de 20 ml/min.


Analista


Jefe de laboratorio / Coordinador

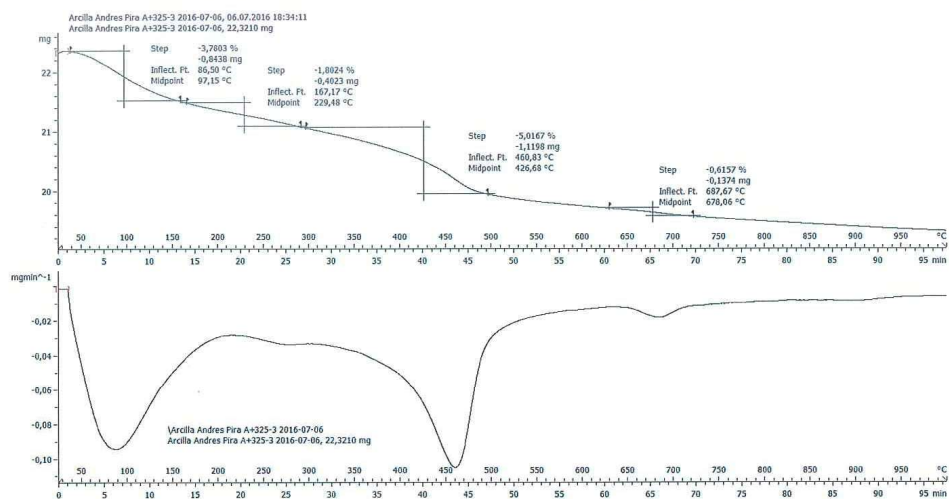
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 52. Informe de ensayo de Análisis Termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+325 - 3 en Laboratorio Químico del CETEC.

		CEMENTOS PROGRESO S. A.	
		CENTRO TECNOLÓGICO	
		15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera	
		Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com	
		OT	28320
		FECHA	2016-07-12
		PÁGINA	18 DE 20
		ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE I + D / CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A + 325 - 3
Contacto	LUIS VELÁSQUEZ	Analista(s)	SHILONEN CAMPOSECO
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



Paso	Rango de Temperatura teórica (°C)	Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%)	Fenómeno
1	60-100	86.50	3.78	Deshidratación
2	150-300	167.17	1.80	Pérdida de agua de constitución
3	400-500	460.83	5.02	Deshidroxilación
4	480-690	687.57	0.62	Deshidroxilación de portlandita

Observaciones: La identificación de los fenómenos de descomposición térmica fue realizada por termogravimetría en un módulo TGA 1 SF/1100/265 de Mettler Toledo, de 25°C a 1000°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmosfera inerte de N2 con flujo de 20 ml/min.


Analista


Jefe de laboratorio / Coordinador

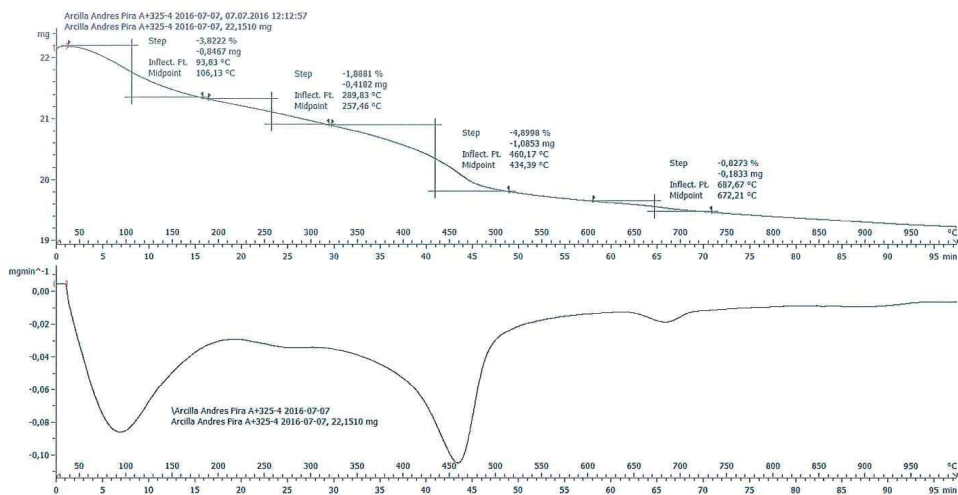
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 53. Informe de ensayo de Análisis Termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+325 - 4 en Laboratorio Químico del CETEC.

		CEMENTOS PROGRESO S. A.	
		CENTRO TECNOLÓGICO	
		15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera	
		Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com	
		OT	28320
		FECHA	2016-07-12
		PÁGINA	19 DE 20
		ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE I + D / CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A + 325 - 4
Contacto	LUIS VELÁSQUEZ	Analista(s)	SHILONEN CAMPOSECO
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	07/07/2016

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



Paso	Rango de Temperatura teórica (°C)	Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%)	Fenómeno
1	60-100	96.83	3.82	Deshidratación
2	150-300	289.83	1.89	Pérdida de agua de constitución
3	400-500	460.17	4.90	Deshidroxilación
4	480-690	687.67	0.83	Deshidroxilación de portlandita

Observaciones: La identificación de los fenómenos de descomposición térmica fue realizada por termogravimetría en un módulo TGA 1 SF/1100/285 de Mettler Toledo, de 25°C a 1000°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmosfera inerte de N2 con flujo de 20 ml/min.


Analista


Jefe de laboratorio / Coordinador

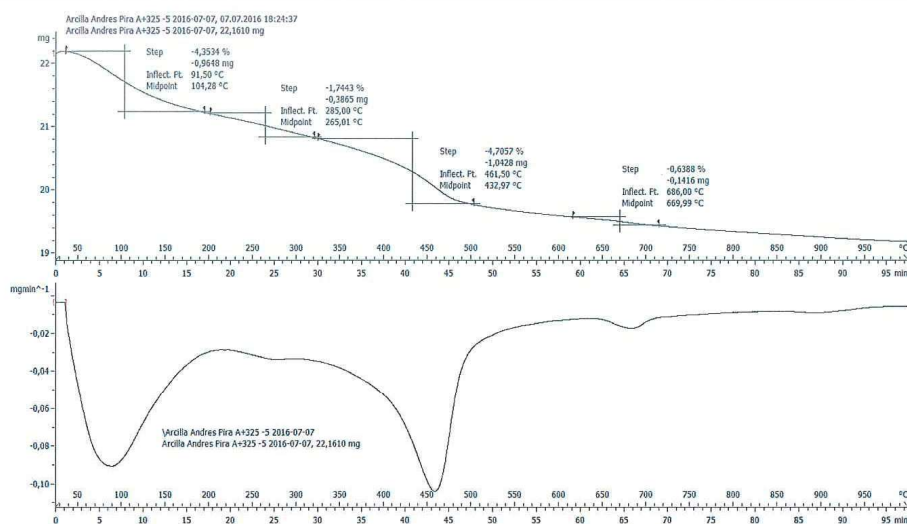
Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 54. Informe de ensayo de Análisis Termogravimétrico sobre muestra de arcilla modificada A+325 - 5 en Laboratorio Químico del CETEC.

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cenpro.com		OT	28320
			FECHA	2016-07-12
			PÁGINA	20 DE 20
			ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE I + D / CETEC	Procedencia	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	
Dirección	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra	A + 325 - 5	
Contacto	LUIS VELÁSQUEZ	Analista(s)	SHILONEN CAMPOSECO	
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	07/07/2016	

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



Paso	Rango de Temperatura teórica (°C)	Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%)	Fenómeno
1	60-100	91.50	4.35	Deshidratación
2	150-300	285.00	1.74	Pérdida de agua de constitución
3	400-500	461.50	4.71	Deshidroxilación
4	480-690	686.00	0.64	Deshidroxilación de portlandita

Observaciones: La identificación de los fenómenos de descomposición térmica fue realizada por termogravimetría en un módulo TGA 1 SF/1100/285 de Mettler Toledo, de 25°C a 1000°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmosfera inerte de N2 con flujo de 20 ml/min.


 Analista


 Jefe de laboratorio / Coordinador

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente y con la aprobación del CETEC.

Ilustración 55. Porcentaje de cambio de masa en cada fenómeno registrado.

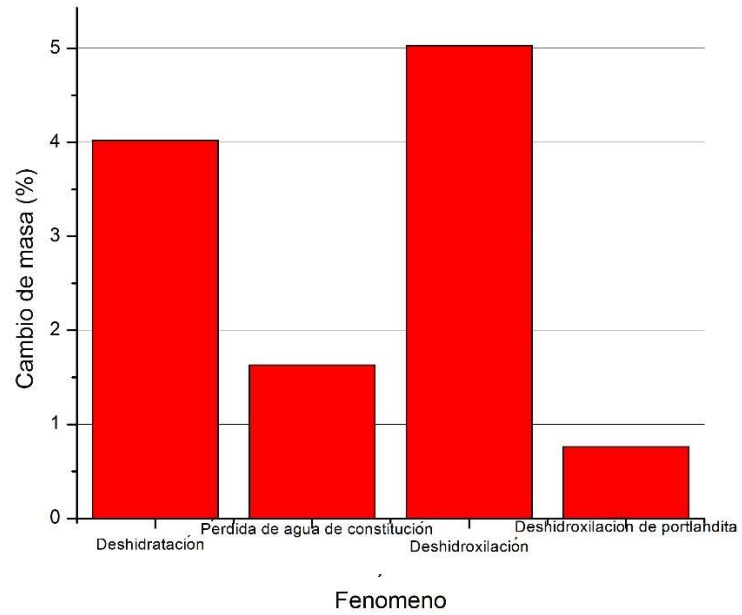


Ilustración 56. Temperatura promedio de ocurrencia de cada fenómeno registrado.

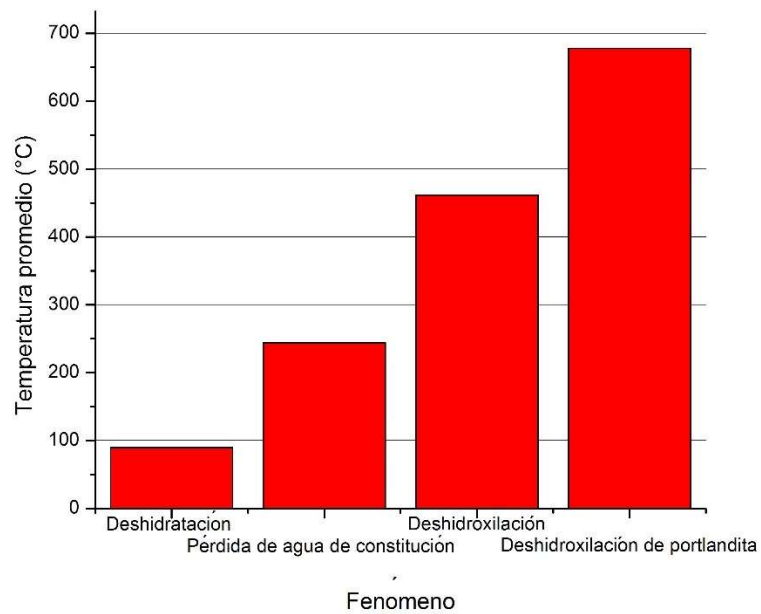
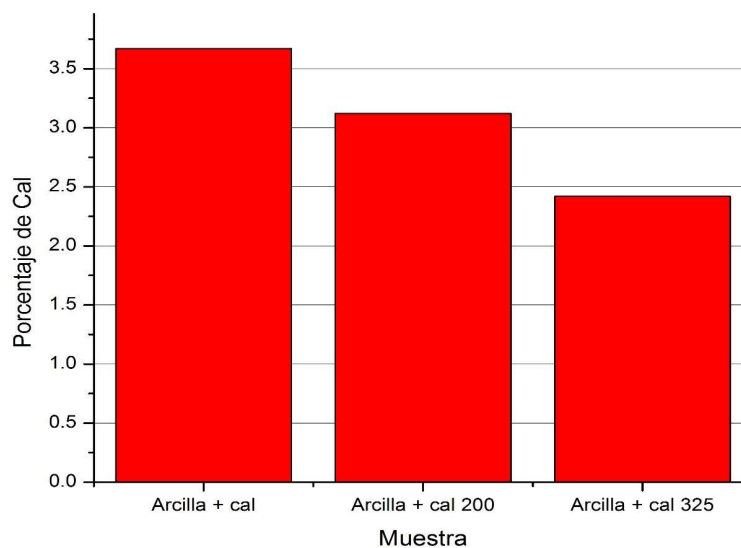


Ilustración 57. Porcentajes promedio de cal en las muestras de acuerdo al análisis termogravimétrico.



H. Discusión de resultados de Análisis Termogravimétrico (TGA)

1. Revisión de datos de las gráficas

a. Como resultado de los ensayos de TGA se obtuvieron los termogramas en los que se despliega una curva de pérdida de masa contra tiempo. Adicionalmente, el informe incluye una curva para observar la razón o velocidad de cambio de masa, la cual permite identificar más fácilmente los procesos que acontecen.

b. En los termogramas se pueden diferenciar cuatro procesos de pérdida de masa diferentes: deshidratación, pérdida de agua de constitución, deshidroxilación y deshidroxilación de portlandita. Los primeros tres procesos se identificaron en todas las muestras y la deshidroxilación de portlandita solo se presentó en las muestras de arcilla con cal.

c. El proceso en que se perdió un mayor porcentaje de masa promedio fue durante la deshidroxilación de las arcillas. En este proceso se perdió en promedio un 5.03% de la masa de la muestra. Este proceso sucedió a una temperatura promedio de 461.7°C

d. El segundo proceso que causó mayor pérdida de masa fue la deshidratación inicial con una pérdida de aproximadamente un 4.02% de la masa de la muestra. Este proceso se produjo a una temperatura promedio de 90.0°C

e. La pérdida de agua de constitución se presentó en todas las muestras a una temperatura promedio de 244.0°C. En general este proceso fue causante de una pérdida promedio de masa del 1.63%.

f. El último proceso de pérdida de masa fue una deshidroxilación de las partículas de portlandita, la cual tuvo una pérdida de masa promedio de 0.76%. este proceso solo se produjo en las muestras de arcilla mezclada con cal a una temperatura promedio de 677.9°C.

g. De acuerdo a la pérdida de masa durante la deshidroxilación de la portlandita se puede determinar los porcentajes experimentales de cal en las muestras. En promedio las muestras modificadas con cal tenían un porcentaje de portlandita de 3.67%. las muestras modificadas con cal que pasaba el tamiz No. 200 tenían un 3.12% de portlandita y las muestras modificadas con cal tamizada en el tamiz No. 325 presentaron un 2.42% de portlandita.

h. De acuerdo a los informes de laboratorio, todas las reacciones se encuentran dentro del rango teórico esperado.

2. Descripción de los fenómenos identificados

a. La deshidratación corresponde a la pérdida del agua debido al aumento de temperatura en la muestra. En este caso estamos hablando principalmente de agua adsorbida en las capas superficiales de la muestra de arcilla, por lo que la deshidratación ocurre a temperaturas relativamente bajas. También podría haberse presentado una pérdida de agua absorbida por capilaridad, aunque es más probable que esta hubiera sido eliminada por el secado en horno. Se esperaba que se tuviera una menor pérdida de masa por deshidratación ya que la muestra de arcilla se había secado previamente en el horno. Es posible que por la naturaleza hidrofílica de la arcilla y la portlandita se haya adsorbido agua del ambiente durante el proceso de pesado y empaquetado de muestras.

b. La deshidratación como pérdida del agua adsorbida es esencialmente la desorción del agua que se haya podido adherir a las capas externas de las moléculas de arcilla. Generalmente el agua adsorbida se encuentra enlazada por fuerzas de Van der Waals las cuales se rompen al elevar la temperatura entre 40°C y 100°C. (Foldvari, 2011)

c. La adsorción del agua se da principalmente en las arcillas compuestas por minerales filosilicatos debido a que sus minerales se organizan en láminas superpuestas. Las láminas de filosilicatos dejan una capa superficial con enlaces no saturados los cuales son altamente reactivos con otros materiales como las moléculas polares del agua. Adicionalmente la estructura laminar provee a estas arcillas con un área superficial elevada lo que permite un mayor almacenamiento de agua adsorbida. (García y Suárez, s.f.)

d. El agua absorbida en la arcilla se incluye dentro del suelo por medio de procesos puramente físicos relacionados con la capilaridad, la porosidad del suelo o su textura. El agua absorbida es más fácil de eliminar con el alza de temperatura, de hecho, una buena parte se puede eliminar secando una arcilla al sol. (García y Suárez, s.f.)

e. La pérdida de agua de constitución corresponde a la pérdida del agua zeolítica de la arcilla. Esta agua está dentro de canales que se forman en la estructura de una arcilla, particularmente entre moléculas de SiO_4 y AlO_4 . El diámetro de estos canales es variable y puede o no permitir el movimiento libre del agua. La temperatura de escape de este tipo de agua es más alta que la del agua molecular, generalmente entre 200°C y 250°C . El agua queda adsorbida en muchas ocasiones en forma de iones OH . (Foldvari, 2011)

f. La primera fase de deshidroxilación corresponde a la pérdida de iones hidroxilo (OH) en las formaciones minerales de la arcilla. Esta reacción de deshidroxilación es común de todas las arcillas del grupo de los filosilicatos debido a que generalmente se encuentran hidratadas con grupos OH dentro de su estructura. En el caso de los minerales del grupo de las serpentinas se tiene una reacción brusca de deshidroxilación en la que se pierden todos los iones OH a altas temperaturas. La temperatura promedio esperada está entre los 600°C y 750°C . (Faust y Fahey, 1962)

g. La deshidroxilación de la portlandita corresponde a una reacción de deshidroxilación en la que la portlandita se convierte en óxido de calcio y libera agua debido al aumento de temperatura. La reacción que se produce es: $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ y generalmente sucede entre los 480°C y 620°C . (Foldvari, 2011)

3. Interpretación de los resultados.

a. La deshidratación inicial de la muestra parece ser demasiado alta para una muestra que fue secada en horno. Esto puede deberse a un mal secado, a un mal manejo de la muestra o a una capacidad de absorción y adsorción de agua muy alta por parte de la arcilla analizada. Es importante mencionar que las muestras secas se almacenaron en bolsas plásticas cerradas (pero no herméticamente). Los ensayos no se desarrollaron inmediatamente después del secado sino durante la semana, esto pudo permitir que las muestras se humedecieran.

b. La pérdida de agua de constitución puede estar relacionada a la pérdida del agua captada en estructuras zeolíticas comunes en algunos minerales tectosilicatos. La mayor parte de las muestras de arcilla están compuestas por tectosilicatos, aunque los feldespatos no son los minerales con mayor presencia de estas estructuras si pueden presentarlos. Adicionalmente se debe notar que la temperatura pico de la reacción se encuentra un poco por encima del rango de temperaturas propuesto por Foldvari, aunque el informe continúa calificándolo como dentro del rango teórico que ellos utilizan.

c. El proceso de deshidroxilación es el que presenta el máximo cambio de temperatura durante el análisis. Este resultado llama la atención ya que la mayor parte de las muestras de arcilla son feldespatos que no presentan hidroxilos en su composición. Sin embargo, la porción de minerales del grupo de las serpentinas tiene una cantidad alta de iones OH (4 por molécula). La lizardita y la antigorita en estado puro presentan una reacción violenta de deshidroxilación similar a la que se observa en el TGA. Sin embargo, se debe aclarar que la mayoría de literatura sugiere temperaturas más altas para que se produzca esta reacción, Faust y Fahey proponen un rango entre 600°C y 750°C. La temperatura promedio registrada es bastante inferior al rango indicado en ese estudio, sin embargo, el laboratorio nos proporciona otro rango teórico dentro del cual queda comprendida esta reacción.

d. La deshidroxilación de la cal puede ser una de las reacciones más claras dentro del grupo. Ya que se realizó TGA en muestras sin cal se puede hacer una comparación y observar que la reacción solo se da en muestras con portlandita. La temperatura promedio del pico de esta reacción es un poco superior al límite del rango propuesto por Foldvari, sin embargo, está en un punto muy cercano. Nuevamente, la temperatura de la reacción si se encuentra comprendida en el rango teórico indicado por el laboratorio.

e. De acuerdo a los porcentajes de portlandita se observa que en ningún caso se alcanzó el 4% que se había adicionado a la muestra. Además, es interesante notar que a medida que la cal es más fina el porcentaje de modificación parece disminuir. Este fenómeno podría haberse dado por fuentes de error en el proceso de mezclado de la cal. Se debe recordar que la muestra se hizo en húmedo y que las partículas de arcilla y de cal tenían un tamaño de partícula tan pequeño que pudieron levantarse en algún momento.

f. Lo más probable es que la gran mayoría de la reacción de deshidroxilación de arcillas identificada se de en la porción de filosilicatos de las muestras de arcilla. Los minerales feldespatos no suelen estar hidratados con hidroxilos y por ello no es lógico que tomen parte en esta reacción.

I. Resultados de microscopías ópticas

Ilustración 58. Microscopía óptica de muestra de arcilla A1 con objetivo 20X.

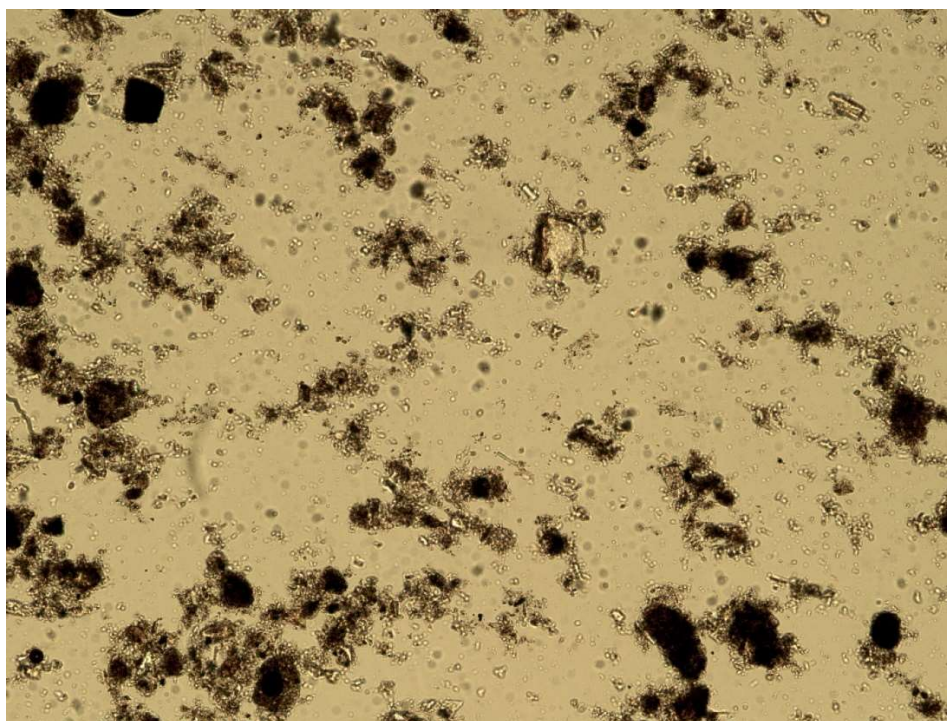


Ilustración 59. Microscopía óptica de muestra de arcilla A2 con objetivo 20X.

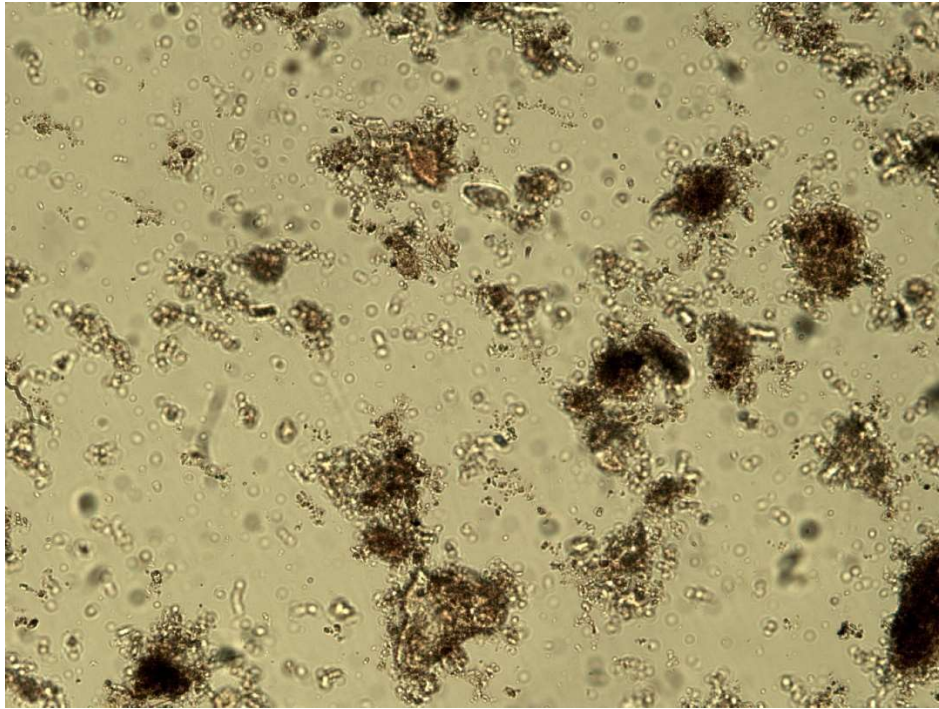


Ilustración 60. Microscopía óptica de muestra de arcilla A3 con objetivo 20X.

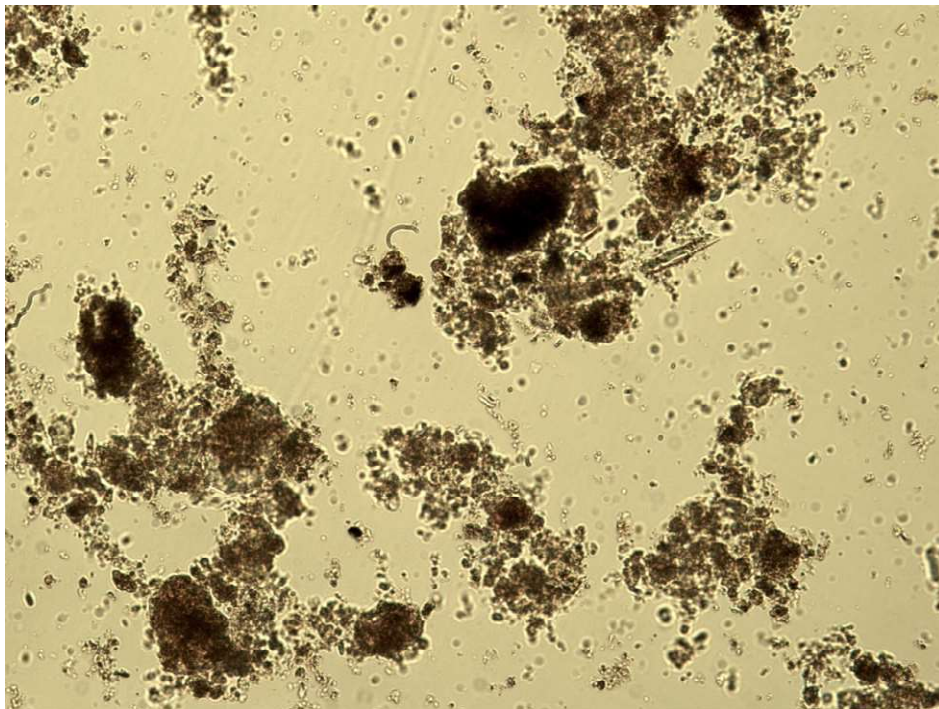


Ilustración 61. Microscopía óptica de muestra de arcilla A4 con objetivo 20X.

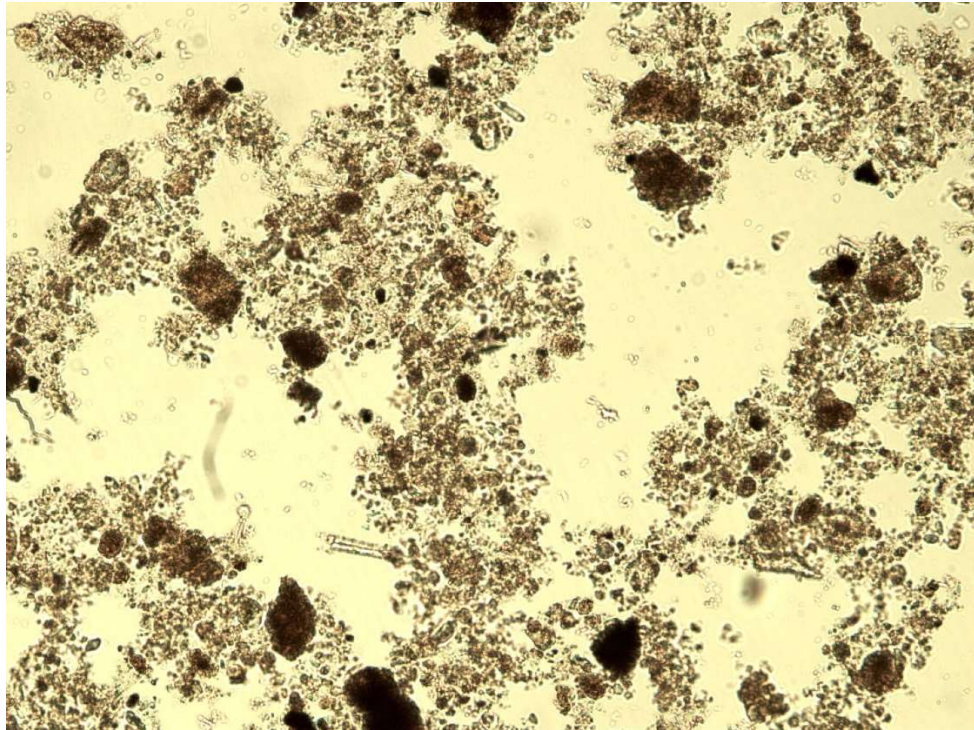


Ilustración 62. Microscopía óptica de muestra de arcilla A5 con objetivo 20X.

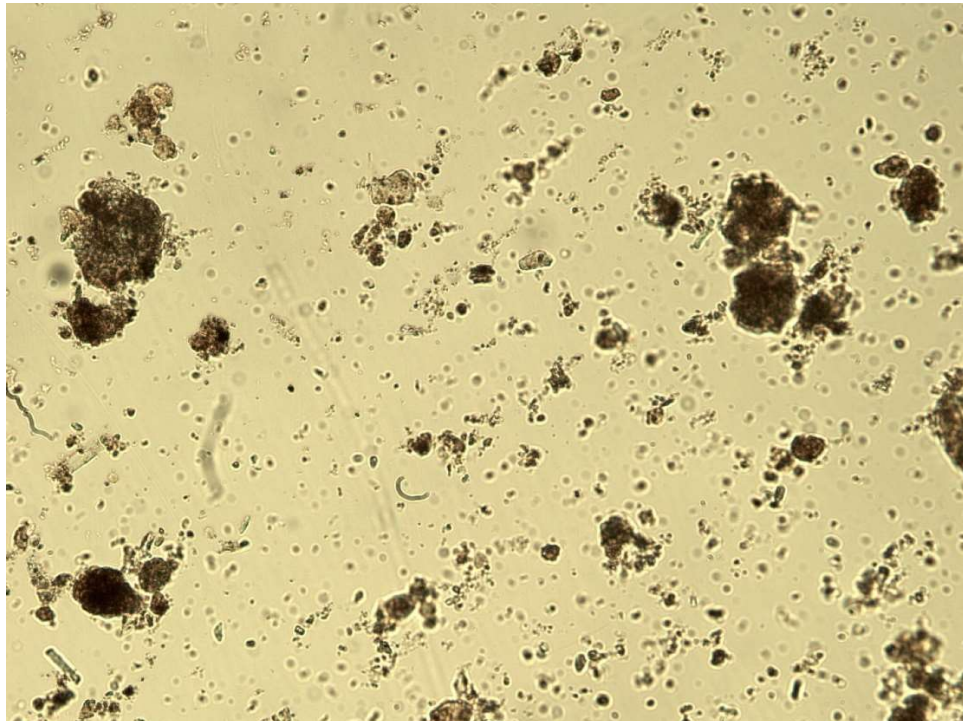


Ilustración 63. Microscopía óptica de muestra de arcilla A+C1 con objetivo 20X.

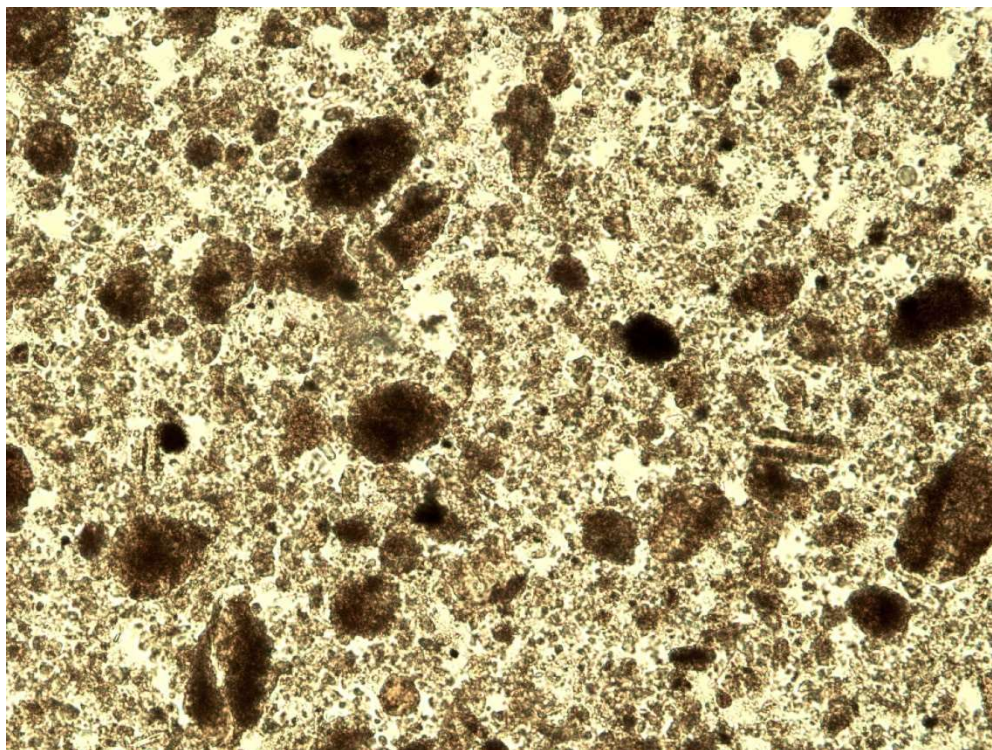


Ilustración 64. Microscopía óptica de muestra de arcilla A+200 1 con objetivo 20X.

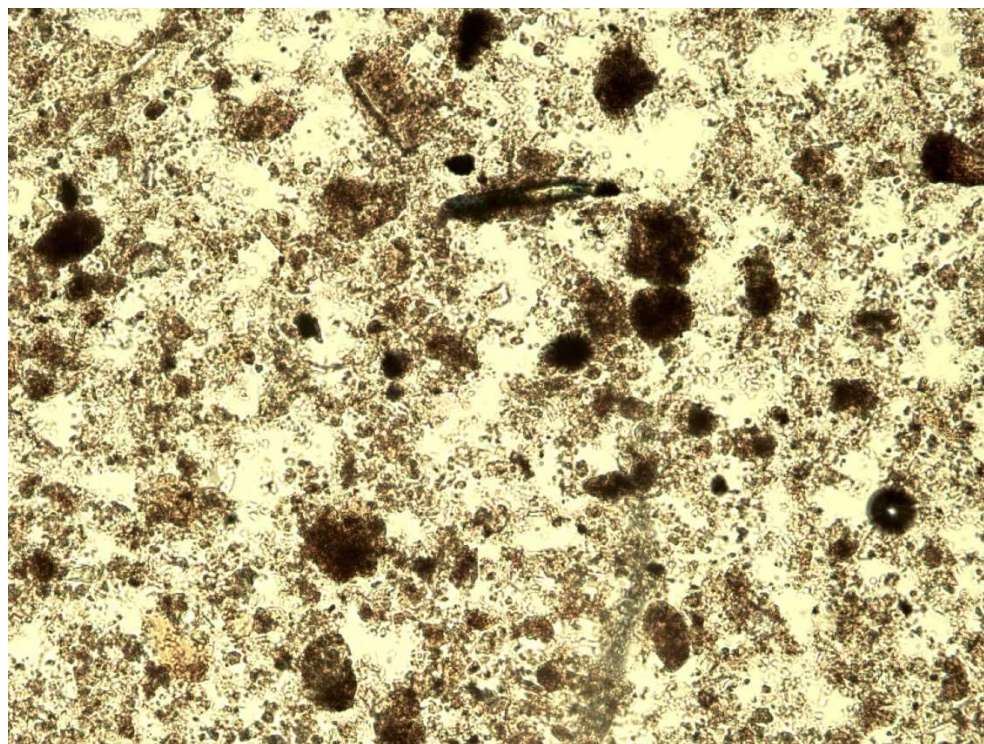
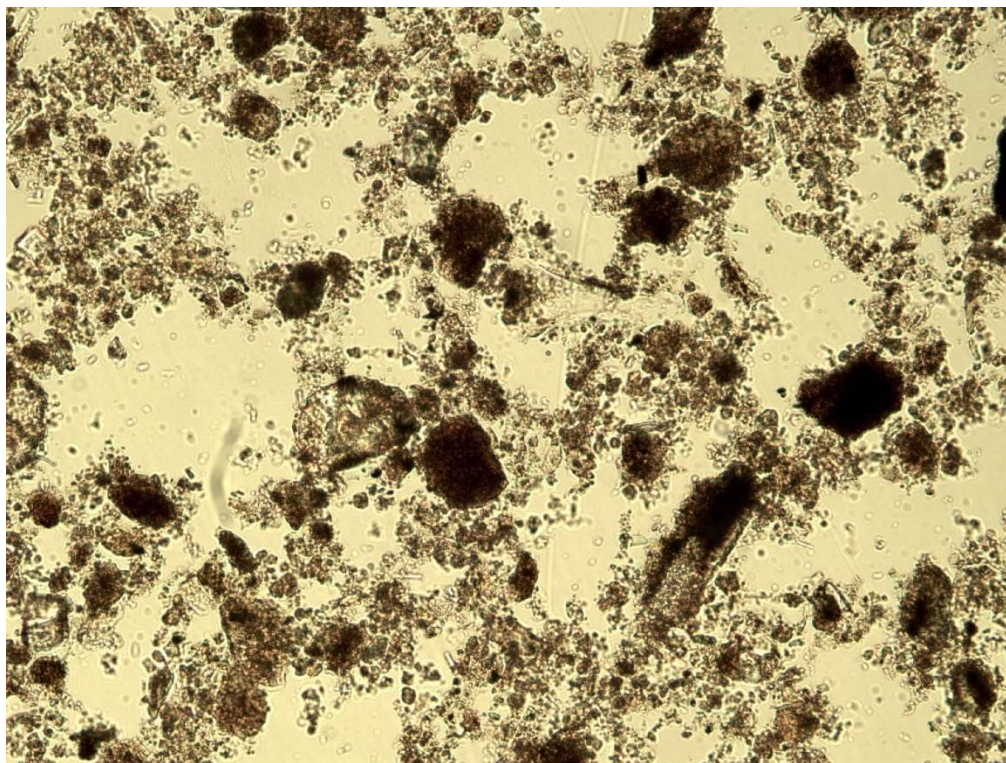


Ilustración 65. Microscopía óptica de muestra de arcilla A+C325 1 con objetivo 20X.



J. Resultados de microscopías ópticas

1. Microscopías sobre muestras de arcilla sin modificar

a. En las primeras cinco microscopías se puede observar las cinco muestras de arcilla sin ninguna modificación. Las arcillas presentan algunos granos principales y una dispersión de granos menores alrededor. Algunos de los granos pequeños parecen ser cristales, probablemente de los minerales feldespatos (Anortita y Andesina) que se encontraron en las muestras. Los feldespatos de la serie de las plagioclasas tienen aspectos turbios porque suelen estar alterados (Velilla, 1996), y en nuestras muestras se puede observar la turbiedad en los granos grandes.

b. En el caso de los minerales del grupo de las serpentinas, la lizardita siempre se observa formando láminas y la antigorita puede formar fibras o láminas (Velilla, 1996). En las microscopías de las muestras de arcilla se puede observar materiales fibrosos en una pequeña proporción, esto podría ser el porcentaje de serpentinas presentes en la muestra.

2. Microscopías en muestras de arcilla modificadas con cal

a. Las muestras de arcilla modificadas con cal tienen un aspecto diferente a las muestras de arcilla pura. Se ve una muestra mucho más poblada y con mayor cantidad de materiales finos. Además de esto, se puede observar una mayor aglomeración de material y formación de partículas más gruesas. Este fenómeno de agrupación de partículas para formar granos más grandes se conoce como intercambio de base y es uno de los mecanismos de estabilización que provee la cal. (Gracia, 1996)

K. Evaluación de afinidad de las muestras de arcilla con nano y micropartículas de cal

La afinidad entre las muestras de arcilla caracterizadas y las nano y micropartículas de cal se debe evaluar a diferentes escalas para tener un panorama amplio. Como se vio anteriormente, la experimentación del proyecto se realizó utilizando micropartículas de cal; sin embargo, en el análisis bibliográfico se analiza también la posible afinidad de las muestras de arcilla con nanopartículas de cal. Los materiales interactúan a diferentes escalas y estas interacciones se manifiestan de formas diferentes. Por esto se propone hacer un análisis revisando lo que sucede a nano, micro y macroescala tomando como referencia el libro “Ciencia de Materiales. Aplicaciones en Ingeniería” de James Newell.

A nanoescala se puede evaluar las interacciones que se dan entre las moléculas de ambos materiales. Las arcillas como se mencionó antes, están compuestas por silicatos. En el caso específico de las arcillas analizadas en el proyecto, estas están compuestas por una parte de tectosilicatos del grupo de los feldspatos y otra parte de filosilicatos del grupo de las serpentinas. La unidad básica de todos los silicatos son los iones SiO_4^{-4} que se componen por un átomo de silicio rodeado por cuatro átomos de oxígeno formando un arreglo en forma de tetraedro. Cada ion de oxígeno compartía una de sus cargas con el ion de silicio de modo que cada oxígeno quedaba con una carga neta de -1. (García y Suárez, s.f.)

En el caso de los filosilicatos los tetraedros se agrupan en láminas superpuestas. La superposición de láminas deja espacios entre capas que son en donde se acomodan los iones (OH) de los filosilicatos y se enlazan con los tetraedros formando algunos octaedros. Ahora la sucesión de capas combina tetraedros y octaedros. La unidad básica de los filosilicatos es entonces, $\text{Si}_2\text{O}_5^{-2}$. También es importante mencionar que es muy común que los iones de silicio se sustituyan por iones aluminio en el tetraedro típico. (Nelson, 2012)

Al tener esta estructura, los minerales filosilicatos como las serpentinas presentes en nuestra muestra, tienen una gran área superficial y una serie de enlaces no saturados en su superficie. Estos enlaces no

saturados hacen que los filosilicatos sean altamente reactivos con otros materiales que puedan enlazarse. A estos enlaces no saturados en la superficie se les conoce como la capa activa. (García y Suárez, s.f.)

Los tectosilicatos tienen otra configuración en la que los tetraedros básicos de los silicatos forman arreglos tridimensionales enlazando todos sus oxígenos entre ellos. El hecho de enlazar todos sus oxígenos provoca que su unidad estructural básica sea el SiO_2 . Lo anterior podría sugerir que estos materiales no tendrán una reactividad alta ya que sus iones se encuentran en equilibrio, sin embargo, es muy común que iones Al^{+3} sustituyan el espacio de algunos iones Si^{+4} provocando un desbalance de cargas y permitiendo que los tectosilicatos se puedan agrupar formando una serie de diferentes estructuras. (Nelson, 2012) De hecho, los feldspatos, como los minerales encontrados en las muestras de arcilla estudiadas, son considerados aluminosilicatos.

La cal hidratada es polvo de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2). Este material también es altamente reactivo y por ello tiene una gran cantidad de usos industriales. Perteneció a la fase mineral de la portlandita, que es un mineral óxido. Cuando la cal hidratada se mezcla con agua, esta se ioniza fácilmente para formar OH^{-1} y Ca^{+2} . (National Organic Standards Board, 2002) Esta es la razón por la que tiene tan buen funcionamiento para la neutralización de ácidos, pero también lo vuelve un material que reacciona más fácilmente.

Al mezclarse el hidróxido de calcio en un suelo arcilloso se tendrá un aporte masivo de iones de Ca^{+2} y $(\text{OH})^{-1}$. Los cationes de calcio se podrán unir a la superficie activa del material arcilloso por medio de un intercambio catiónico. Este proceso también causará que se generen fuerzas eléctricas suficientes para formar puentes entre diferentes partículas de arcilla. Los puentes agrupan las partículas de arcilla en granos más gruesos y consistentes. Estos procesos se producen en forma inmediata y son la primera muestra de la afinidad entre ambos materiales. (Gracia, 1996) En el caso de utilizar nanopartículas de cal, el menor tamaño de grano le permitirá penetrar mejor en la estructura laminar de la arcilla y posiblemente tendrá un efecto de estabilización más fuerte que el de las micropartículas de cal.

Además del fenómeno anterior, la combinación del hidróxido de calcio con una matriz de arcilla demuestra su afinidad produciendo otra reacción a un plazo más largo. La reacción que se produce es una degradación relativamente acelerada del material arcilloso para formar nuevas fases minerales. Esta acción puzolánica es la responsable del incremento en la resistencia a la compresión inconfiada que se ha reportado en diferentes estudios. (Gracia, 1996)

Analizando las interacciones a microescala es importante hablar de las partículas individuales de cal y de arcilla. Como se sabe, la mayoría de las partículas de cal y de arcilla son micrométricas, dato que puede

probarse fácilmente considerando que la mayor parte de ambos materiales puede pasar por un tamiz No. 200. Los granos de arcilla se organizan en láminas las cuales se superponen, de acuerdo a su estructura mineralógica. Estas láminas son propensas a deslizarse entre ellas, lo cual provoca que las arcillas no tengan muy buena resistencia a los esfuerzos de compresión.

Las matrices de ambos materiales se mezclan fácilmente, sin embargo, por ser una mezcla de dos sólidos es difícil lograr un mezclado verdaderamente homogéneo. El mezclado podría ser mejor en caso que se utilizaran nanopartículas de cal ya que estas podrían penetrar y dispersarse mejor en la matriz de arcilla. De cualquier forma, el mezclado es suficiente para permitir que la cal reaccione con las partículas de arcilla en los dos mecanismos descritos a nanoescala. Los resultados son los mismos cuando se ven a una escala más amplia. Primero se observa que las partículas de suelo se agrupan en partículas ligeramente más grandes por acción de la cal. Con el paso de un poco de tiempo, el suelo arcilloso adquiere una mejor consistencia debido a la cementación entre los granos.

A macro escala, se ve un depósito de material arcilloso muy susceptible a la humedad y de comportamiento plástico. Este se combina con cal de forma fácil y aparenta lograr mezclarse de manera homogénea. Luego de la aplicación de las partículas de cal el suelo comienza a tener una mejor consistencia y menos plasticidad. Al cabo de algunos días el material también comenzará a adquirir resistencia y podrá ser utilizado, por ejemplo, como un material subbase para una carretera. Adicionalmente, la capa de terreno tratada con partículas de cal formará una capa protectora que evita el paso de la humedad. El agua que se encuentre por encima de ella no podrá afectar al estrato sin tratar en la parte inferior, y el agua que se encuentre en el suelo tampoco podrá afectar el material por encima del estrato tratado con cal (Gracia, 1996). Muy posiblemente, al aplicar nanopartículas de cal en lugar de micropartículas de cal, la reacción se producirá de forma más violenta debido a la mejor penetración de la cal en la matriz de arcilla y mayor área superficial.

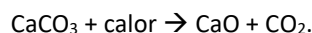
L. Discusión de técnicas de producción de cal y posibles técnicas para producción de micro y nanopartículas de cal

En la actualidad el método principal para producción de cal a gran escala consiste en la calcinación de piedra caliza para conseguir óxido de calcio (cal viva) y luego la hidratación del óxido de calcio para obtener hidróxido de calcio (cal hidratada). Aunque parece sencillo, el proceso debe cumplir con varios estándares de calidad para asegurar que su producto cumpla con las exigencias solicitadas. El control de calidad se lleva a cabo en todas las etapas y permite que en la actualidad se vendan una gran variedad de productos de cal.

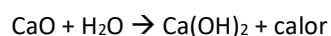
La producción de la cal comienza con la extracción de la materia prima. La materia prima es generalmente roca caliza de tipo calcítica o dolomítica en caso que se quiera producir cal dolomítica. Este material se extrae en canteras generalmente a cielo abierto, aunque también existe extracción de caliza subterránea. La explotación se realiza con maquinaria pesada y se carga en camiones que transportan la materia prima a la planta en la que se realiza la calcinación. La roca caliza suele estar compuesta en más de un 95% de carbonato de calcio (CaCO_3) y en el caso de ser una roca dolomítica también tendrá un alto contenido de carbonato de magnesio (MgCO_3). (Gracia, 1996)

Luego de ser extraída, la piedra caliza se lleva a una planta donde se tritura y se tamiza la roca para asegurar que tengan el diámetro adecuado para ser calcinadas en los hornos. El tamizado y trituración de la caliza producen un problema ambiental que requiere atención especial. En muchos casos también se lava la roca para remover las impurezas que pueda tener. La roca se clasifica de acuerdo a su calidad y pureza para destinarla a la fabricación de diferentes tipos de cal. (National Organic Standards Board, 2002)

La calcinación de la caliza se realiza en hornos a altas temperaturas. Generalmente, la descarbonatación de la caliza se da entre los 880°C y los 900°C . y es una reacción que libera dióxido de carbono y deja como producto rocas de óxido de calcio (CaO) también conocidas como cal viva. Esta puede utilizarse como rocas o puede que pase por otro proceso de trituración y tamizado para venderse en polvo dependiendo del uso que se le vaya a dar. El proceso de calcinación se realiza en hornos vertical u hornos rotativos y es un proceso de alto consumo energético. (Gracia, 1996) La reacción que se produce en el horno es:



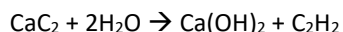
Luego de obtener la cal viva es necesario hidratarla para convertirla en hidróxido de calcio. La cal viva se hidrata haciéndola reaccionar con agua en una serie de hidratadores continuos. En este proceso se agrega agua poco a poco sobre la cal viva molida. Esto se logra en cámaras de mezclado que agitan el agua y la cal viva a niveles definidos. La reacción es exotérmica y produce la evaporación de buena parte del agua utilizada en el proceso, por ello se suele adicionar agua en porcentajes de entre 50% y 65% del peso del material, aunque solo debería ser necesario un 24.5% de agua. (National Organic Standards Board, 2002) La reacción que se produce durante la hidratación de la cal viva es la siguiente:



Una vez que se consigue la cal hidratada o hidróxido de calcio, esta suele pasar por un último proceso de tamizado en el que se retiran las fracciones gruesas y se deja secar el polvo de hidróxido de calcio. Una vez que el material está seco se empaca (generalmente en bolsas de papel) y se distribuye. (National Organic Standards Board, 2002)

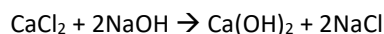
El proceso para la producción de micropartículas de cal debe ser esencialmente el mismo descrito anteriormente. La cal producida por este medio ya tiene un grano de alta fineza, de modo que solo queda pendiente remover una parte gruesa que continúa dentro del material. Como se comprobó durante el tamizado del material, la mayor parte de la cal atraviesa un tamiz No. 200 fácilmente, sin embargo, el tamizado demostró tener efectos importantes en la mejora de suelos arcillosos. Por ello resulta importante remover la porción gruesa restante. Para esto podría afinarse el material en un proceso de molienda o de tamizado al final de la producción solo previo al empaqueo del material. Se debe controlar la dispersión del polvo ya que puede ser irritante y se podría apoyar el tamizado con un flujo de aire para que las partículas lo atravesasen más fácilmente. Probablemente este último proceso de tamizado o molienda afecte el costo de producción de la cal, sin embargo, esta podría venderse solo para uso especializado y localizado de mejora de suelos arcillosos.

Existe otro medio para obtener cal que puede ser llamativo ya que en este proceso la cal se obtiene como un desperdicio. El proceso de producción de gas acetileno funciona haciendo reaccionar carburo de calcio (CaC_2) con agua de modo que se libere acetileno y un desperdicio de hidróxido de calcio. El acetileno es un gas altamente inflamable utilizado para realizar soldadura y en otras aplicaciones de la industria de la química. Dicho gas se produce haciendo reaccionar carburo de calcio con agua (Ciraiz, 2005). La reacción química que se produce dentro del generador de acetileno es la siguiente:



El carburo de calcio no es el único material que se puede usar como materia prima para la producción de acetileno, ya que en algunos casos se utilizan otros hidrocarburos para producirlo. La materia prima más utilizada en América para la producción de acetileno es efectivamente el carburo de calcio (CaC_2), de modo que la mayoría de plantas de acetileno producen hidróxido de calcio como desperdicio. En Guatemala existen plantas de producción de acetileno y se producen aproximadamente 800,000 lb de este gas anualmente (Ciraiz, 2005). Los residuos aprovechables se suelen poner a la venta, sin embargo, sería conveniente caracterizar e investigar la cal producida en este proceso para ver si se puede tener un mejor aprovechamiento de los desechos de hidróxido de calcio.

También existe otro método para producir cal. Este se utiliza en laboratorio para producir nanopartículas de cal en pequeñas cantidades. En este caso se produce el hidróxido de calcio por medio de precipitación en condiciones supersaturadas mezclando gota por gota soluciones acuosas de hidróxido de sodio y cloruro de calcio. El proceso se realiza a una temperatura constante de 90°C. La temperatura, las condiciones supersaturadas y el mezclado lento propician que se precipiten poco a poco nanopartículas de hidróxido de calcio. (Taglieri *et al*, 2015) La reacción de precipitación que se produce es:



Este método tenía la desventaja de ser un proceso lento y que para purificar las nanopartículas de cal era necesario lavar la solución, lo que causaba una disolución de algunas nanopartículas. Para evitar las complicaciones de este método se desarrolló una variación la cual funciona utilizando resinas de intercambio de aniones. Este método permite producir nanopartículas de cal puras y en un tiempo mucho menor. En este caso la precipitación se da entre la resina de intercambio de aniones y una solución acuosa de CaCl_2 a temperatura ambiente y bajo un mezclado suave. Adicionalmente, se tiene la ventaja de que la resina se puede utilizar para continuar con el proceso. (Taglieri *et al*, 2015)

M. Estudios anteriores de nanotecnología aplicada en materiales de construcción de Ingeniería Civil

La nanotecnología es un tema que se ha venido estudiando en diferentes ramas desde hace varios años. La Ingeniería Civil también ha sido una de las áreas de estudio, principalmente en cuanto a mejora de materiales de construcción. A continuación, se discute brevemente algunos estudios de nanotecnología aplicada. También se presentan las revistas en las que se han publicado los estudios con sus factores de impacto para dar una idea de la importancia que tienen los estudios en el tema de nanotecnología en la actualidad.

Uno de los materiales más estudiados (por ser también uno de los materiales de construcción más comunes) es el concreto. En su estudio "Multiscale dynamic fracture behavior of the carbon nanotube reinforced concrete under impact loading" Eftekhari y Mohammadi investigan el comportamiento del concreto reforzado con nanotubos de carbono ante cargas de impacto. En el estudio publicado en "International Journal of Impact Engineering" se realiza una serie de modelos y simulaciones a diferentes escalas para evaluar el comportamiento del concreto modificado. Como resultado se obtuvo que el concreto modificado sufre daños menores al concreto convencional. Además de esto, el concreto reforzado con nanotubos de carbono tiene mayor resistencia, mayor capacidad de absorción de energía y los proyectiles penetran distancias menores dentro de él. (Eftekhari y Mohammadi, 2015)

Otro estudio relacionado con el concreto, pero con un enfoque diferente es “Toward Green revolution in concrete industry: The role of nanotechnology (A review)” realizado por Hosseini *et al.* En este artículo los autores explican la importancia que tiene el desarrollo sostenible de los materiales de construcción y evalúan el papel que juega la nanotecnología en este tema. Se desarrolla un modelo funcional de concreto modificado con nanomateriales y se propone el uso de nano celulosas para lograr un material más amigable con el ambiente. (Hosseini *et al*, 2011)

Un tema relacionado a las nanopartículas de cal es expuesto por López *et al* en el artículo “Influence of porosity and relative humidity of dolostone with calcium hydroxide nanoparticles: Effectiveness assessment with non destructive techniques”. En este artículo se evalúa la efectividad del uso de nanopartículas de hidróxido de calcio para consolidar estructuras antiguas de roca dolomítica. En el estudio se evalúa el efecto de diferentes humedades relativas durante la consolidación y se utilizan técnicas no destructivas para verificar la efectividad del tratamiento. (López *et al*, 2010)

Además del concreto, se han hecho varios estudios sobre mezclas de asfalto modificadas. El artículo de Yao *et al*, “Rheological properties and chemical analysis of nanoclay and carbon microfiber modified asphalt with Fourier transform infrared spectroscopy” compara una mezcla de asfalto modificada con nanoarcillas y micro fibras de carbono. La investigación comprende la revisión de diferentes parámetros como la medición del módulo de corte complejo G, el agrietamiento por fatiga, efectos de oxidación y envejecimiento. En general se encontró que la muestra de asfalto modificada tuvo mejores resultados que la muestra de control en todos los casos. (Yao *et al*, 2013)

Otro estudio de asfalto fue conducido por Shirakawa, Tada y Okazaki titulado “Development of functional carbon nanotubes – Asphalt Composites”. En esta investigación se prepararon tres muestras de asfalto modificadas con nanotubos de carbono y se revisaron la penetración y absorción de microondas. En todos los casos, las tres muestras de asfalto modificadas con nanotubos obtuvieron mejores desempeños que la muestra sin modificar. (Shirakawa *et al*, 2012)

Para terminar, se menciona otro estudio acerca del concreto titulado “Cement Based Foam Concrete Reinforced by Carbon Nanotubes” realizado por Yakovlev *et al.* En este caso se analizó la mejora que se le puede dar a una mezcla de concreto reforzándola con una dispersión de nanotubos de carbono. El estudio concluyó que se redujo la conductividad térmica del material y que aumentó su resistencia a la compresión en un 70%. (Yakovlev *et al*, 2006)

Cuadro 7. Resumen de estudios de nanotecnología aplicada citados y sus factores de impacto

<i>Estudios de nanotecnología aplicada</i>			
<i>Autores</i>	<i>Título del estudio</i>	<i>Revista científica</i>	<i>Factor de impacto</i>
Eftekhari y Mohammadi	“Multiscale dynamic fracture behavior of the carbon nanotube reinforced concrete under impact loading”	<i>International Journal of Impact Engineering</i>	2.646
Hosseini <i>et al</i>	“Toward Green revolution in concrete industry: The role of nanotechnology (A review)”	<i>Australian Journal of Basic and Applied Sciences</i>	0.448
López <i>et al</i>	“Influence of porosity and relative humidity of dolostone with calcium hydroxide nanoparticles: Effectiveness assessment with non destructive techniques”	<i>Materials Characterization</i>	2.383
Yao <i>et al</i>	“Rheological properties and chemical analysis of nanoclay and carbon microfiber modified asphalt with Fourier transform infrared spectroscopy”	<i>Construction and Building Materials</i>	2.421
Shirakawa <i>et al</i>	“Development of functional carbon nanotubes – Asphalt Composites”	<i>International Journal of GEOMATE</i>	0.270
Yakovlev <i>et al</i>	“Cement Based Foam Concrete Reinforced by Carbon Nanotubes”	<i>Materials Science</i>	0.143

VII. CONCLUSIONES

Conclusiones de ensayos de mecánica de suelos

- En la fase inicial la arcilla se clasificó como una A-6 según AASHTO, de modo que es una arcilla plástica que se considera como un suelo regular o malo.
- En la fase preliminar se obtuvo un índice de plasticidad de 12.1 para las muestras de arcilla, de modo que puede considerarse una arcilla plástica.
- La granulometría en la fase inicial varió respecto al análisis granulométrico realizado posteriormente. De cualquier forma, en ambos casos se muestra que el suelo tiene un alto porcentaje de finos.
- Al continuar con los ensayos se obtuvo un índice de plasticidad de 8.59, el cual es menor al detectado en la fase inicial, sin embargo, continúa siendo un material de plasticidad relativamente elevada.
- El uso de cal sin tamizar como estabilizador de la arcilla provocó una reducción de los límites líquido y plástico y una disminución del 42% en el índice de plasticidad.
- El uso de micropartículas de cal pasadas por tamiz No. 200 como estabilizador del suelo provocó una reducción brusca en el límite líquido y un cambio más leve en el límite plástico obteniendo una reducción del 76% del índice de plasticidad.
- El uso de micropartículas de cal pasadas por tamiz No. 325 como estabilizador del suelo provocó una reducción brusca en el límite líquido y un cambio más leve en el límite plástico obteniendo una reducción del 78% del índice de plasticidad.
- Se considera que la diferencia entre el uso de micropartículas de cal pasadas por tamiz No. 200 y No. 325 no es significativa y no se justifica el uso del tamiz No. 325.
- La remoción de la parte gruesa de la cal retenida en el tamiz No. 200 si se justifica ya que implica una diferencia seria en la efectividad de la estabilización.
- Se determinó que la humedad óptima para las muestras de arcilla estaba en un 25.5%.
- El peso unitario máximo obtenido con el ensayo de Proctor Estándar fue de 1449 kg/m³, el cual es relativamente bajo para tratarse de un suelo arcilloso.
- El valor soporte determinado con el ensayo de CBR a un 95% de la compactación de Proctor Estándar fue de 9.0, lo cual es normal para una arcilla de este tipo.

Conclusiones de ensayos de DRX

- Por medio de la técnica de DRX se determinó que las arcillas utilizadas para el estudio estaban compuestas por minerales silicatos del grupo de los filosilicatos subgrupo de las serpentinas y minerales del grupo de los tectosilicatos subgrupo de los feldespatos y serie de las plagioclasas.
- Las fases minerales identificadas en las muestras de arcilla con la técnica de DRX fueron: andesina (61.40% en promedio), anortita (29.48% en promedio), antigorita (8.62% en promedio) y lizardita (0.80% en promedio).
- Las muestras de arcilla analizadas estaban compuestas mayormente por tectosilicatos en lugar de filosilicatos que sería lo usual en suelos arcillosos.
- Se tuvo una variabilidad relativamente alta en los porcentajes de fases minerales determinados con DRX, probablemente debido a que las mezclas de sólidos son más difíciles de homogenizar y la técnica de DRX analiza solo un punto de la muestra.

Conclusiones de ensayos de TGA

- Por medio de la técnica de TGA se detectaron cuatro fenómenos que ocurren en las muestras de arcilla pura y muestras de arcilla modificadas entre 25°C y 1000°C. Estos procesos fueron la deshidratación, pérdida de agua de constitución, deshidroxilación de la arcilla y deshidroxilación de la portlandita (el última solo se presenta en las muestras modificadas).
- El proceso de deshidratación se produjo a una temperatura promedio de 89.98°C y causó un cambio de masa promedio del 4.02%.
- El proceso de pérdida de agua de constitución se produjo a una temperatura promedio de 243.97°C y causó un cambio de masa promedio del 1.63%.
- El proceso de deshidroxilación de las arcillas se produjo a una temperatura promedio de 461.66°C y causó un cambio de masa promedio del 5.03%.
- El proceso de deshidroxilación de la portlandita se produjo a una temperatura promedio de 677.87°C y causó un cambio de masa promedio del 0.76%. Este solo se produjo en las muestras modificadas con cal.
- Por medio del TGA se determinó un porcentaje experimental de cal, que fue menor al aplicado en el laboratorio. Esto se puede deber a errores de pesaje o la humedad absorbida por los materiales.
- La deshidroxilación de las arcillas se produce principalmente en el porcentaje de filosilicatos de las muestras de arcilla, ya que estos minerales están hidratados.
- Se esperaba un menor porcentaje de pérdida de masa por deshidratación ya que las muestras se habían secado previamente. Esto se puede deber al almacenamiento de las muestras en bolsas plásticas.

Conclusiones de microscopías ópticas

- En las microscopías ópticas se puede observar que las micropartículas de cal tienen una buena dispersión dentro de la matriz de arcilla.
- En las microscopías ópticas se observa el proceso de aglomeración en granos más grandes producido por la cal.

Conclusiones de métodos de producción

- La producción de micropartículas de cal podría adaptarse al método de producción convencional de la cal agregando un proceso final de molienda o tamizado que asegure la remoción de la porción gruesa.
- El tamizado o molienda para producir micropartículas de cal solo se realizaría para un producto especializado en estabilización de suelos para no afectar la economía y el tiempo de fabricación de la cal.
- Las nanopartículas de cal pueden sintetizarse por medio de precipitación química logrando altas purezas usando hidróxido de sodio y cloruro de calcio.
- El hidróxido de calcio puede obtenerse como subproducto en la industria de la producción de acetileno.

Conclusiones de revisión de afinidad

- Se puede decir que las micropartículas de cal Horcalsa tipo especial tamizadas en este estudio fueron afines a las arcillas plásticas recolectadas en Aldea El Llano, Zaragoza, Chimaltenango a nano, micro y macroescala.

Conclusiones de revisión de otros estudios de nanomateriales para la Ingeniería Civil

- La mayoría de investigaciones referentes a la mejora en propiedades mecánicas de materiales de construcción con nanotecnología utilizan mezclas de concreto y mezclas de bitumen.
- La mayoría de nanomateriales utilizados como refuerzo integral en materiales de construcción son materiales en forma de tubos o fibras como los nanotubos de carbono o las nanofibras de carbono o sílice.
- Las nanopartículas de cal son aplicables para la consolidación de estructuras antiguas de caliza.
- La nanocelulosa es un material que ya se produce de forma industrial y tiene posibles aplicaciones en la construcción.

VIII. RECOMENDACIONES

Recomendaciones para futuros estudios de nanotecnología

- Se recomienda continuar con la investigación de nanotecnología en el área de Ingeniería Civil, ya que Guatemala ha desarrollado poca información al respecto.

Recomendaciones para experimentaciones similares

- Realizar ensayos de compresión confinada en suelos arcillosos para poder definir los efectos de la cementación producida por la cal en las arcillas.
- Se recomienda realizar microscopías electrónicas de barrido (SEM) o microscopías electrónicas de transmisión (TEM) para poder caracterizar mejor las interacciones de la cal y los granos de arcilla a micro y nano escala.
- Revisar el efecto de las modificaciones con cal en otros tipos de suelos arcillosos ya que la literatura menciona que se tienen mejores resultados en suelos como las arcillas de montmorillonita o caolinita y en suelos con índices de plasticidad más altos.
- Se recomienda continuar con este tipo de investigación para revisar los efectos de estabilización al tamizar la cal por tamices de aberturas mayores. Se debería buscar un tamiz óptimo que permita la remoción de la parte gruesa de la cal.
- Estudiar el efecto de estabilización en suelos que se produce al agregar nanopartículas de cal a un suelo arcilloso.
- Estudiar la aplicabilidad de otros nanomateriales para la mejora de suelos plásticos y expansivos.
- Se recomienda determinar el porcentaje ideal de cal para una arcilla con el método de Eedes y Grimm midiendo los cambios en el pH del suelo.
- Revisar el efecto del secado en horno de las arcillas a diferentes temperaturas y las influencias que esto pudo tener en los resultados.
- Llevar a cabo los ensayos en un mismo laboratorio para reducir la variabilidad de los resultados.
- Realizar ensayos en campo para verificar la mejora del terreno en un proyecto real.

Recomendaciones para la producción nano y micropartículas de cal

- Evaluar si es posible precipitar nanopartículas de cal en un proceso industrial masivo.
- Analizar la cal producida como subproducto de la síntesis de acetileno para verificar su pureza y aplicabilidad para mejora de suelos.
- Evaluar si la mejor forma de producir micropartículas de cal en forma industrial es por medio de tamizado o molienda del material

IX. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Andesine*. 2001. Mineral data Publishing. 2 págs.
- Anorthite*. 2001. Mineral data Publishing. 2 págs.
- Antigorite*. 2001. Mineral data Publishing. 2 págs.
- Assalia. 1990. *Cimentación en Arcillas Expansivas*. Tesis de Universidad de Sonora. Sonora. 105 págs.
- Birkholz, M. 2006. Principles of X-ray diffraction. Weinheim. 42 págs.
- Borrell, María. 2010. *Nuevos materiales ultrafuncionales cerámica/nanofibras de carbono*. Tesis Universidad de Oviedo. Oviedo. 288 págs.
- Bhalerao, Namrata. 2015. <<Carbon Nanotubes: Synthesis, Integration and Properties>>. *International Journal of Civil and Structural Engineering Research*. 3(1): 251-254
- Calcium Hydroxide*. 2002. National Organic Standards Board. Estados Unidos. 15 págs.
- Campbell, Alanna; *et al.* 2011. <<Calcium hydroxide nanoparticles for limestone conservation>>. *Adhesives and Consolidants for Conservation*.
- Cheney, Brandon. 2005. *Introduction to scanning electron microscopy*. Universidad Estatal de San José. 13 págs.
- Ciraiz, Axel. 2005. *Manual de operación de una planta de acetileno*. Tesis de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. 140 págs.
- Diccionario de la lengua española*. 2014. Real Academia Española de la Lengua. 23ª ed. Madrid, Espasa. 2 vols.
- Dai, Hongjie. 2002. <<A Review on Effect of Nano Cellulose on Concrete>>. *Accounts of Chemical Research*. 35(12), 1035-1044
- Davidson, Michael; M. Abramowitz. 1999. *Optical Microscopy*. The Florida State University. 41 págs.
- Del Río, David. 2011. *Estructura y propiedades de las nanofibras de carbono. Aplicación como soporte de electrocatalizadores*. Tesis de la Universidad de Zaragoza. Zaragoza. 460 págs.
- Eatemadi, Ali; *et al.* 2014. <<Carbon nanotubes: properties, synthesis, purification, and medical applications>>. *Nanoscale Research Letters*. 9(393), 1-13
- Eftekhari, Mehdi; S. Mohammadi. 2015. <<Multiscale dynamic fracture behavior of the carbon nanotube reinforced concrete under impact loading>>. *International Journal of Impact Engineering*. xxx(2015), 1-10

- Fadoni, M; L. Lucarelli. 1997. *Temperature programmed desorption, reduction, oxidation and flow chemisorption of heterogeneous catalysts. Theoretical aspects, instrumentation and applications*. State University of Milan. 45 págs.
- Faust, George; J, Fahey. 1962. *The serpentine-group minerals*. Geological survey professional paper 384-A.
- Foldvari, Maria. 2011. *Handbook of Thermogravimetric System Minerals and its use in Geological practice*. 1 ed. Budapest. Geological Institute of Hungary. 179 págs.
- Fultz, B; J. Howe. 2013. *Diffraction and the X-ray powder diffractometer*. Berlin. 58 págs.
- García, Emilia; M. Suárez. S.f. *Las Arcillas: Propiedades y Usos*. Universidad Complutense de Madrid. Madrid. 25 págs.
- Gracia. 1996. *Empleo de la cal en el mejoramiento de suelos arcillosos*. Tesis de la Universidad de Sonora. Sonora. 76 págs.
- Hafner, Bob. 2007. *Scanning Electron Microscopy Primer*. Universidad de Minnesota. 29 págs.
- High Purity Calcium Hydroxide*. S.f. Jost Chemical Co. Estados Unidos. 2 págs.
- Hosseini, P; et al. 2011. <<Toward Green revolution in concrete industry: the role of nanotechnology (A review)>>. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 5(12) 2768-2782
- Juanico, José. 2004. *Síntesis y Caracterización de Nanofibras de Carbono para su Aplicación en la Adsorción de Gases Tóxicos*. Tesis de Universidad Autónoma Metropolitana. Ciudad de México. 127 págs.
- Kanervo, Jaana. 2003. *Kinetic analysis of temperature programmed reactions*. Teknillisen kemian julkaisusarja. 78 págs.
- Keller, Ernst; R. Goldman. 2006. *Light Microscopy*. Northwestern University. Chicago. 16 págs.
- Lizardite*. 2001. Mineral data Publishing. 2 págs.
- Lee, Koon-Yang; et al. 2014. << On the use of nanocellulose as reinforcement in polymer matrix composites>>. *Composites Science and Technology*. 105(2014), 15-27
- López, P, et al. 2010. <<Influence of porosity and relative humidity on consolidation of dolostone with calcium hydroxide nanoparticles: effectiveness assessment with non-destructive techniques.>>. *Group of applied petrology to heritage conservation*.
- Ma, Hongbao; et al. 2006. <<Study of transmission electron microscopy (TEM) and scanning electron microscopy (SEM)>>. *Nature and Science*. 4(3) 2006
- Muhmed, Asma; D. Wanatowski. 2013. <<Effect of lime stabilization on the strength and microstructure of clay.>>. *Journal of mechanical and Civil Engineering*. 6(3), 87-94
- Nelson, Stephen. 2012. *Silicate structures, structural formula*. Tulane University. 13 págs.
- Newell, James. 2011. *Ciencia de Materiales – Aplicaciones en Ingeniería*. 1 ed. México D.F., Alfaomega. 368 págs.
- Pardo, Ainhoa. 2010. *Incorporación de Metal en Capas de Carbono Amorfo Hidrogenado mediante Deposición Química en Fase Vapor Asistida por Plasma de Resonancia Ciclotrónica de Electrones*. Tesis de la Universidad Autónoma de Madrid. Madrid. 174 págs.

- Sanchez, Florence; K. Sobolev. 2010. << Nanotechnology in Concrete – A Review>>. *Construction and Building Materials*. 24(2010), 2060-2071.
- Shah, Kamar. 2003. *Feldspathic Minerals*. Mineral Preindustrian. 16 págs.
- Shirakawa, Tatsuo, *et al.* 2012. <<Development of functional carbon nanotubes – Asphalt composites.>>. *International Journal of GEOMATE*. 2(1) 161-165
- Sichina, W. 2007. Characterization of polymers using TGA. Estados Unidos. Perkin Elmer Instruments. 5 págs.
- Stadtlander, C. 2007. <<Scanning electron microscopy and transmission electron microscopy of mollicutes: challenges and opportunities>>. *Modern research and Educational Topics in Microscopy*. Formatex.
- Taglieri, Giuliana; *et al.* 2015.<< A new and original method to produce CaOH₂ nanoparticles by using an anion exchange resin>>. *Scientific Research Publishing*. (4) 17-24
- Trittschack, Roy. 2013. *Dehydroxilation kinetics of the serpentine group minerals*. Université de Fribourg. Suiza. 135 págs.
- Uddin, Faheem. 2008. << Clays, Nanoclays an Montmorillonite Minerals>>. *Metallurgical and Materils Transactions A*. 39A(2008), 2802-2814
- Velilla, Nicolás. 1996. *Atlas de minerales constituyentes de rocas*. Universidad de Granada. Granada. 116 págs.
- Yakovlev, Grigorij; *et al.* 2006. <<Cement based foam concrete reinforced by carbon nanotubes>>. *Materials Science*. 12(2) 2006
- Yao, Hui; *et al.* 2013. <<Rheological properties of chemical analysis of nanoclay and carbon microfiber modified asphalt with Fourier transform infrared spectroscopy>>. *Construction and Building Materials*. 38 (2013) 327-337
- Yuan, Jian-Jun; *et al.* 2013. << Controlled synthesis and tunable properties of ultrathin silica nanotubes through spontaneous polycondensation on polyamine fibrils>>. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 4(2013), 793-804
- Zamora, F. s.f. *Corregimiento de arcillas expansivas*. Tesis de Universidad de Sonora. Sonora. 98 págs.

X. GLOSARIO

1. Nanómetro (nm): medida de longitud que equivale a la milmillonésima parte de un metro. (Real Academia Española, 2014)
2. Nanociencia: rama de la ciencia que estudia los fenómenos observados en sistemas y estructuras nanométricos. (Sanchez y Sobolev, 2010)
3. Nanoingeniería: rama de la ingeniería enfocada en el diseño, desarrollo e implementación de productos y sistemas a escala nanométrica. (Sanchez y Sobolev, 2010)
4. Nanoestructuras: estructuras con dimensiones medibles en la escala de los nanómetros. (Real Academia Española, 2014)
5. Alotropía: propiedad de los elementos químicos que les permite presentarse con estructuras moleculares diferentes o características físicas diversas. (Real Academia Española, 2014)
6. SWCNT (“Single Wall Carbon Nanotube”): nanotubo de carbono con una sola pared. (Dai, 2002)
7. MWCNT (“Multiwall Carbon Nanotubes”): nanotubo de carbono con más de una pared concéntrica sobre su eje. (Dai, 2002)
8. Quiralidad: característica de una estructura que es superponible con su imagen especular. (Real Academia Española, 2014)
9. CVD (“Chemical Vapor Deposition”): la deposición química de vapor es un proceso de síntesis por medio del cual un gas fluye a altas temperaturas en un contenedor en el que se coloca un catalizador que reacciona y produce materiales sólidos por medio de deposición. (Borrell, 2010)
10. Polietilamina lineal: polímero obtenido de una sucesión de monómeros de etilamina. Solo tiene grupos amino secundarios, es sólido a temperatura ambiente y soluble en agua. (Yuan, *et al*, 2013)
11. Montmorillonita: mineral del grupo de los silicatos y subgrupo de los filosilicatos, comúnmente encontrado en las arcillas. (Uddin, 2008)
12. Hidrofílico: cualidad de una sustancia que le permite adsorber el agua con gran facilidad. (Real Academia Española, 2014)
13. Organofílico: cualidad de un material (generalmente arcillas) que le permite adsorber moléculas orgánicas. (Uddin, 2008)
14. Área superficial (m²/g): una medición de área superficial para materiales granulares que mide el área superficial en un gramo de sustancia. (Uddin, 2008)
15. Nanocelulosa: material compuesto por cadenas tubulares de celulosa o nanofibras de celulosa. (Lee, *et al*, 2014)

16. Filosilicatos: subgrupo de minerales del grupo de los silicatos. Comprende la mayor parte de las arcillas. (García y Suárez, s.f.)
17. Angstroms: unidad de longitud equivalente a la diezmilmillonésima parte de un metro. (Real Academia Española, 2014)