



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

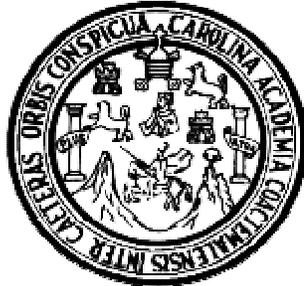
**ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE LAS TÉCNICAS MÁS UTILIZADAS PARA LA
CARACTERIZACIÓN DE ARCILLAS Y SU APLICACIÓN INDUSTRIAL EN LA
FABRICACIÓN DE LADRILLOS.**

ALEJANDRA MARGARITA CHUPINA DE LEÓN

Asesorada por Ing. Qco. Oscar Rosal Higueros
Co-asesorada por Ing. Civil-Geólogo Julio R. Luna Aroche

Guatemala, enero de 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE LAS TÉCNICAS MÁS UTILIZADAS PARA LA
CARACTERIZACIÓN DE ARCILLAS Y SU APLICACIÓN INDUSTRIAL EN LA
FABRICACIÓN DE LADRILLOS.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

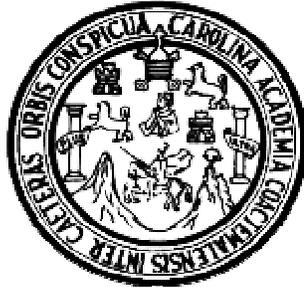
ALEJANDRA MARGARITA CHUPINA DE LEÓN

Asesorada por Ing. Qco. Oscar Rosal Higueros
Co-asesorada por Ing. Civil-Geólogo Julio R. Luna Aroche

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA

Guatemala, enero de 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

Decano: Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos

Vocal I:

Vocal II: Lic. Amahán Sánchez Álvarez

Vocal III: Ing. Julio David Galicia Celada

Vocal IV: Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz

Vocal V: Br. Elisa Yazminda Vides Leiva

Secretaria: Ing. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRÁCTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

Decano: Ing. Sydney Alexander Samuels Milson

Examinador: Ing. Rodolfo Francisco Espinosa Smith

Examinador: Ing. Víctor Herberth De León

Examinador: Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía

Secretario: Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado

ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE LAS TÉCNICAS MÁS UTILIZADAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE ARCILLAS Y SU APLICACIÓN INDUSTRIAL EN LA FABRICACIÓN DE LADRILLOS,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química con fecha 19 de Noviembre de 2004.

Alejandra Margarita Chupina de León

AGRADECIMIENTOS

Ing. Julio Luna: por su invaluable apoyo en la realización de este trabajo de graduación y al Ing. Oscar Rosal por su asesoría incondicional.

Ing. Luis Velásquez: por realizar el análisis de fluorescencia de rayos X en las instalaciones del Laboratorio Técnico de Cementos Progreso S.A., Planta San Miguel.

Ings. Carlos Morales y Floridalma García: por su colaboración con el análisis térmico diferencial en el Laboratorio de Control de Calidad de Incesa Standard, S.A.

José Carlos Quezada

DEDICO ESTE TRABAJO DE GRADUACIÓN A:

Dios y a la Virgen María

Mi madre

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IV
OBJETIVOS	VI
RESUMEN.....	VII
INTRODUCCIÓN.....	X
1. ARCILLAS.....	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Naturaleza química de las arcillas	2
1.3 Propiedades físicas, químicas y mecánicas de las arcillas.....	4
1.4 Usos más comunes e importantes de la arcilla en Guatemala.....	8
1.5 Propiedades de las arcillas como materia prima para ladrillos.....	9
1.5.1 Plasticidad y capacidad aglomerante	9
1.5.2 Capacidad de la arcilla de endurecer al secarla.....	10
1.5.3 Contracción de la arcilla	10
1.5.4 Transición durante la cocción al estado pétreo	11
1.5.5 Poder aglutinante de la arcilla	12
1.5.6 Capacidad refractaria de la arcilla	12
2. LADRILLOS	13
2.1 Datos generales	13
2.1.1 Tipos y usos más comunes del ladrillo en Guatemala.....	14
2.1.1.1 Adobe	16
2.1.1.2 Bloques de talpetate	16
2.1.1.3 Ladrillo y tabique de barro común.....	17
2.1.1.4 Tabiques de barro comprimido	17
2.1.1.5 Ladrillos huecos de barro comprimido	18

2.1.1.6	Tabiques y bloques huecos de barro comprimido.....	18
2.1.2	Características y propiedades del ladrillo	21
2.2	Criterios para la selección de arcillas para la elaboración de ladrillos.	24
2.3	Proceso de fabricación de ladrillos.....	24
3.	METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN DE ARCILLAS.....	29
3.1	Espectrofotometría de absorción atómica (AA)	31
3.1.1	Descripción del método	31
3.2	Fluorescencia de rayos X (XRF).....	40
3.2.1	Descripción del método	40
3.3	Vía húmeda -Método gravimétrico-	42
3.3.1	Descripción del método	43
Silicio	43	
Aluminio.....	44	
Hierro.....	45	
Calcio.....	45	
Magnesio	45	
3.4	Método de acoplamiento inductivo de plasma (ICP)	46
3.4.1	Descripción del método	46
3.5	Análisis térmico diferencial (DTA).....	49
3.5.1	Descripción del método	49
3.6	Análisis Químico.....	54
3.6.1	Determinación de pH.....	54
3.6.2	Colorimetría	55
3.7	Análisis físico.....	57
3.7.1	Contenido de humedad	57
3.7.2	Densidad relativa -gravedad específica-.....	58
3.7.3	Determinación de la plasticidad.....	60

3.7.4	Análisis granulométrico, método del hidrómetro.....	65
4.	RESULTADOS	71
4.1	Análisis químico cuantitativo.....	73
4.2	Análisis químico cualitativo.....	76
4.2.1	Colorimetría	76
4.2.2	Análisis térmico diferencial (DTA).....	78
4.2.3	Determinación de pH.....	84
4.3	Análisis físico.....	85
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	89
	CONCLUSIONES	94
	RECOMENDACIONES.....	96
	REFERENCIAS	97
	BIBLIOGRAFÍA.....	98
	Anexo 1	100
	Anexo 2.....	104

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Diagrama de proceso para la fabricación de ladrillos	28
2. Diagrama de operación de un espectrofotómetro de absorción atómica	37
3. Sistema del quemador de premezcla para el análisis por espectrofotometría de absorción atómica.....	38
4. Diagrama de un espectrómetro de fluorescencia atómica	41
5. Partes del aparato térmico diferencial.....	51
6. Esquema de un instrumento típico para el Análisis Térmico Diferencial.....	52
7. Termograma ideal.....	53
8. Hidrómetro 152H.....	68
9. Comparación entre las técnicas utilizadas en función del elemento analizado	74
10. Comparación entre técnicas mostrando la exactitud obtenida en base al porcentaje ideal de contenido en la muestra de arcilla	75
11. Curva colorimétrica para la muestra de arcilla analizada.....	77
12. Curva típica para una arcilla obtenida en un analizador térmico diferencial	79
13. Curva obtenida del analizador térmico diferencial con una amplitud de 10mV	80
14. Curva obtenida del analizador térmico diferencial con 20% de aumento en la amplitud.	81
15. Curva obtenida del analizador térmico diferencial con 15% de aumento en la amplitud.	82
16. Curva obtenida del analizador térmico diferencial con 5% de disminución en la amplitud.	83
17. Curva granulométrica de la muestra de arcilla en estudio	87

18. Vista del sitio de extracción de muestras	101
19. Vista trasera del sitio de extracción de muestras	102
20. Vista del sitio de extracción de muestras	103

TABLAS

I. Algunas características básicas de los ladrillos	15
II. Tipos y usos más comunes de los ladrillos comerciales.....	19
III. Otros tipos de ladrillos y sus características.	20
IV. Resultados obtenidos en el análisis químico cuantitativo realizado a la muestra de arcilla en estudio	73
V. Porcentaje de absorbancia obtenida para la muestra de arcilla en estudio..	76
VI. pH de la arcilla en estudio.	84
VII. Resultados de los ensayos de plasticidad, contenido de humedad y contenido de humedad realizados en la muestra de arcilla.....	85
VIII. Resultados del ensayo de granulometría por sedimentación.	86

OBJETIVOS

General

Evaluar la metodología más apropiada para la determinación de elementos de forma porcentual en arcillas.

Específicos

1. Comparar el rendimiento entre las técnicas de análisis aplicadas.
2. Describir la función, objetivo y procedimiento de cada técnica a analizar, evaluando sus ventajas y desventajas.
3. Investigar la disponibilidad de medios y recursos existentes en el país para la realización de análisis químico-mineralógicos.
4. Comparar las metodologías más utilizadas en la determinación de las propiedades físicas y químicas de las arcillas para determinar la relación entre estas y el contenido mineralógico de las arcillas.
5. Estudiar el uso y criterios de elección de arcillas en la fabricación de ladrillos.

RESUMEN

Este trabajo de graduación consistió en evaluar la metodología más apropiada para la determinación de elementos característicos de forma porcentual en arcillas. Para ello, se obtuvieron muestras de arcilla, en roca, provenientes de un banco de material ubicado en el Kilómetro 32 de la carretera al atlántico, el cual, normalmente, es utilizado en la industria cerámica, específicamente de piso y azulejo cerámico.

Luego de obtener el material, se trituroó, pulverizó y tamizó con la malla No. 100. El material que atravesó esta malla fue la que se utilizó para realizar los diferentes análisis.

Cantidades representativas de, aproximadamente, media libra de muestra fueron llevadas a distintos laboratorios para efectuar los análisis. Se buscaba encontrar la cantidad de silicio, aluminio, hierro, calcio y magnesio presente en la muestra, se escogieron estos cinco elementos por ser los de mayor concentración en las arcillas. En el Laboratorio Técnico del Ministerio de Energía y Minas se efectuaron los análisis de espectrofotometría de absorción atómica para silicio, aluminio, hierro, calcio y magnesio y vía húmeda para silicio.

El Laboratorio Técnico de Cementos Progreso, fue el encargado de realizar la fluorescencia de rayos X en la muestra.

Inspectorate America Corporation en Estados Unidos realizó el análisis por el método de plasma de acoplamiento inductivo, ICP y en el Laboratorio de Química Industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala se realizó el análisis por el método de vía húmeda. Es importante mencionar que los métodos de fluorescencia e ICP determinan además de los elementos arriba mencionados, titanio, fósforo, sodio, potasio, manganeso y cromo, en el Anexo 1 pueden encontrarse los certificados con los resultados de todos los laboratorios.

Se encontró, después de realizar los análisis con los diferentes métodos, que la muestra posee en promedio 26.20% Si, 6.20% Al, 4.18% Fe, 5.99% Ca y 0.99% Mg. En la sección de Resultados se encuentran los resultados por método y puede observarse que entre ellos existe una gran correlación.

Según lo obtenido en este estudio comparativo, se determinó que todas las técnicas son adecuadas para la caracterización química de las arcillas, pero, debe tenerse en cuenta el uso que se le dará al material para escoger cuál método es el que mejor se ajusta para realizar un análisis.

Parte de este trabajo era investigar la disponibilidad de medios y recursos que existían en el país para realizar este tipo de análisis y se encontró que es limitada la existencia de establecimientos comerciales con la capacidad técnica para ello. Existe una gran cantidad de laboratorios químicos dedicados a realizar análisis de calidad de agua y suelos que no tienen los recursos para analizar muestras con los métodos aquí presentados.

Los únicos laboratorios que prestan servicio al público son el Laboratorio de Química Industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería y el Laboratorio Técnico del Ministerio de Energía y Minas. Los otros laboratorios utilizados para realizar los análisis de este trabajo funcionan, únicamente, a nivel interno.

Los análisis fueron realizados en los meses de marzo, abril y mayo de 2005.

INTRODUCCIÓN

La investigación completa de la composición química de un mineral o roca incluye, primero, la identificación de los elementos presentes por análisis cualitativo, y, segundo, la determinación de las cantidades relativas de cada uno por análisis cuantitativo, del que, por último, se puede calcular la fórmula. Ambos procesos, para llevarse a cabo en forma completa, requieren el equipo de un laboratorio químico. Un análisis cualitativo aproximado, sin embargo, puede, en muchos casos, hacerse rápida y, sencillamente con unos cuantos accesorios.

No es la finalidad de esta investigación deducir la fórmula, pero si determinar la presencia de los diferentes elementos que conforman las arcillas, partiendo de que se conoce el contenido de estos en el material, haciendo uso de técnicas ya establecidos para la determinación cuantitativa del porcentaje de los elementos contenidos y realizar una comparación entre ellos para determinar cuál es el más eficiente.

Entre la amplia variedad de técnicas que se utilizan a nivel global para este tipo de estudio, se han escogido, por ser los más comunes en nuestro medio, los siguientes,

- I. Fluorescencia de rayos X (XRF)
- II. Método de Acoplamiento inductivo de plasma (ICP)

- III. Espectrofotometría de absorción atómica (AA)
- IV. Análisis gravimétrico -Vía húmeda-
- V. Análisis físicos cuantitativos para la determinación de sus principales propiedades.

Todo lo anterior, se aplica al uso específico de las arcillas en la fabricación de ladrillos en algunas de sus diversas utilidades, ya que, juegan un papel importante en la industria de la cerámica y en particular, de la construcción y en el procedimiento utilizado para su elaboración.

En la industria de la construcción esta materia prima juega un papel importante, pues con esta se elaboran los distintos tipos de ladrillos y estos, a su vez, cumplen con especificaciones de acuerdo a su uso. Como ejemplo tenemos ladrillos de alta resistencia, tanto mecánica como térmica, ladrillos refractarios, -ácidos, básicos y neutros-.

En Guatemala, la actividad minera viene produciendo ingresos y empleos desde hace muchos años, principalmente en la explotación de minerales no metálicos y materiales de construcción y, también, en menor cantidad se presentan minerales metálicos.

Estas actividades se encuentran, principalmente, en las regiones nor-occidente y nor-oriental -Huehuetenango, Alta y Baja Verapaz, Chiquimula, Izabal- en donde es posible encontrar oro, plata, antimonio, manganeso, magnesio, calcio, hierro, plomo, etc., no en su estado natural sino mayormente como compuestos químicos definidos -óxidos, sulfuros, etc.-

Generalmente, la composición de las rocas y los minerales es conocida, por lo que, a partir de ésta y dependiendo del objetivo de los trabajos de la mina, así es el método que se utiliza para su refinación. No existe un modelo o guía que indique que método es el más eficiente para determinar la presencia porcentual del metal en la roca o mineral extraído.

A raíz de ello, surge la idea de evaluar distintos métodos, fluorescencia de rayos X, espectrofotometría de absorción atómica, acoplamiento inductivo de plasma y análisis químicos cuantitativos específicos como el análisis por vía húmeda, los cuales son, entre la amplia variedad de técnicas, los más comunes, para determinar la eficiencia de estos en función a los porcentajes de rendimiento en la identificación cuantitativa de un elemento.

Se ha escogido como muestra para el estudio las arcillas, las que, comúnmente, están integradas en grandes cantidades por silicio, aluminio, hierro, magnesio, oxígeno e hidrógeno y, dependiendo del grupo al que pertenezcan, también por calcio y sodio.

Actualmente, las arcillas son explotadas en grandes cantidades para la industria cerámica. Las muestras fueron extraídas de un afloramiento ubicado en el kilómetro 32 de la carretera CA-9, en el departamento de El Progreso, debido a la cercanía del lugar y la facilidad para llevar a cabo la extracción.

La razón de elaborar este trabajo, tiene su fundamento en establecer procedimientos para la determinación de elementos, poniendo de ejemplo los contenidos en las arcillas, para futuros proyectos similares, pues, debido a la amplia gama de minerales y materiales de construcción que se explotan a nivel nacional, a gran escala, estudios de este tipo, representarían menores pérdidas económicas en el procesamiento de minerales.

1. ARCILLAS

1.1 Generalidades

Las arcillas son unas de las sustancias minerales más extensas y tempranamente utilizadas por el hombre. Estas llevan los registros de razas antiguas inscritas sobre tabletas, en edificaciones de ladrillo, monumentos, alfarería, etc., productos que retratan la historia del desarrollo humano a través de los tiempos.

El término arcilla se usa habitualmente con diferentes significados.

- Desde el punto de vista mineralógico, engloba a un grupo de minerales, minerales de la arcilla, filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano.
- Desde el punto de vista petrológico, la arcilla conforma rocas sedimentarias, en la mayor parte de los casos de origen detrítico, con características bien definidas. Arcilla también es un término granulométrico, que abarca los sedimentos con un tamaño de grano inferior a 1/16 mm.

- Para un ceramista, una arcilla es un material natural que cuando se mezcla con agua en la cantidad adecuada se convierte en una pasta plástica y que al calcinar se solidifica formando ladrillo, tabletas o vasijas.
- Desde el punto de vista económico, las arcillas son un grupo de minerales industriales con diferentes características mineralógicas y genéticas y con distintas propiedades tecnológicas y aplicaciones.

Por tanto, el término arcilla no sólo tiene connotaciones mineralógicas, sino también de tamaño de partícula, en este sentido se consideran arcillas todas las fracciones con un tamaño de grano inferior a 1/16 (0.0625) mm.

Generalmente, se define a las arcillas como rocas sedimentarias compuestas de uno o varios minerales, ricas en silicatos hidratados de aluminio, hierro o magnesio, alúmina hidratada u óxido férrico, con predominio de partículas de tamaño coloidal o casi coloidal, dotada comúnmente de plasticidad cuando está suficientemente pulverizada y humedecida, rígida cuando está seca y vítreo cuando se calcina a suficiente temperatura.

1.2 Naturaleza química de las arcillas

El estudio mineralógico de las arcillas mediante las técnicas de rayos X y de petrografía muestra que están constituidas principalmente por minerales cristalinos claros y diversas cantidades de material no cristalino.

Los principales elementos químicos constituyentes de las arcillas son átomos de silicio, aluminio, hierro, magnesio, hidrógeno y oxígeno. El análisis químico de las arcillas indica que los principales compuestos que contienen SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , y H_2O y cantidades variables de otros óxidos como: TiO_2 , CaO , MgO , MnO , K_2O , Na_2O y P_2O_5 , más los grupos hidroxilos.

Los patrones de construcción de los diferentes minerales de arcilla son unidades de forma como el tetraedro y el octaedro.

Los estudios mineralógicos han clasificado las arcillas en base a datos de estructura y composición en cinco grupos.

A. Cristalino

1. Grupo del caolín
2. Grupo de la montmorillonita
3. Grupo de la illita o hidromica
4. Grupo de la attapulgita-sepiolita

B. Amorfo

1. Grupo de la alófana

La estructura del material se estudia en tres niveles, la macroestructura del mismo, o sea, la composición que se ve a simple vista; su microestructura, es decir, la composición que se ve en un microscopio óptico y, la estructura interna de las sustancias que componen el material a nivel iónico-molecular, estudiada recurriendo a los métodos del análisis por rayos X, microscopía electrónica, etc.

La composición química de las arcillas permite tener una idea acerca de una serie de propiedades tales como la resistencia al fuego, estabilidad biológica, las características mecánicas y otras características técnicas. Esta composición resulta cómodo expresarla mediante la cantidad de óxidos, en %, que estos contienen. Los óxidos básicos y ácidos están vinculados químicamente entre si y forman minerales que son los que definen muchas de las propiedades del material.

1.3 Propiedades físicas, químicas y mecánicas de las arcillas

Las arcillas se emplean como materiales de ingeniería debido a su resistencia mecánica, dureza, resistencia al calor y a la corrosión elevada, así como a sus propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas deseables.

El conocimiento de la estructura de un material de construcción, como es el caso de la arcilla, es indispensable para comprender sus propiedades y, en definitiva, para resolver el problema práctico de dónde y cómo utilizarlo a fin de lograr el mayor efecto técnico-económico.

Una gran ventaja de las arcillas es que con frecuencia son resistentes al ataque químico por gases, líquidos e incluso materiales fundidos a elevada temperatura. Ello, combinado con su extraordinaria resistencia a la alta temperatura, las hace adecuadas para aplicaciones como recubrimientos resistentes a la temperatura para hornos (refractarios), aislantes e incluso como componentes mecánicos como discos y álabes de turbinas, así como componentes diversos para máquinas de combustión interna.

Las importantes aplicaciones industriales de este grupo de minerales radican en sus propiedades físico-químicas. Dichas propiedades derivan, principalmente, de su extremadamente pequeño tamaño de partícula y las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Como consecuencia de estos factores, presentan, por una parte, un valor elevado del área superficial y, a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados.

Por ello pueden interaccionar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hinchar, con el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas.

Por otra parte, la existencia de carga en las láminas se compensa, como ya se ha citado, con la entrada en el espacio interlaminar de cationes débilmente ligados y con estado variable de hidratación, que pueden ser intercambiados fácilmente mediante la puesta en contacto de la arcilla con una solución saturada en otros cationes, a esta propiedad se la conoce como capacidad de intercambio catiónico y es también la base de multitud de aplicaciones industriales.

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar -esmectitas- o en los canales estructurales -sepiolita y paligorskita-.

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales como superficie específica y porosidad y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción, cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad, y adsorción, cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato.

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envoltura sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño o elevada área superficial y alta capacidad de hinchamiento.

La tixotropía se define como el fenómeno consistente en la pérdida de resistencia de un coloide, al amasarlo, y su posterior recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas cuando son amasadas se convierten en un verdadero líquido. Si, a continuación, se las deja en reposo recuperan la cohesión, así como el comportamiento sólido. Para que una arcilla tixotrópica muestre este especial comportamiento deberá poseer un contenido en agua próximo a su límite líquido. Por el contrario, en torno a su límite plástico no existe posibilidad de comportamiento tixotrópico.

Las propiedades básicas y especiales de los materiales de las arcillas pueden dividirse en los siguientes grupos, considerando aquellos efectos sobre estos debidos a la manera de explotarse.

- Los parámetros del estado y características estructurales que definen las propiedades técnicas son la composición química, mineral y de fase; características específicas de la masa, densidad y masa volumétrica, y su porosidad, así como la dispersidad de los materiales pulverulentos.
- Las arcillas cuentan con propiedades físicas, químicas y mecánicas, las cuales se estiman recurriendo a índices numéricos establecidos mediante ensayos de acuerdo a los estándares. En Guatemala, se siguen las normas de la American Society for Testing and Materials, ASTM.
- Propiedades físicas: propiedades reológicas de la arcilla ya que posee plasticidad y viscosidad; propiedades hidrofísicas, físico-térmicas, acústicas, eléctricas que determinan la actitud del material respecto a diferentes procesos físicos; estabilidad contra la corrosión física, resistencia al frío, a la radiación, al agua.
- Propiedades mecánicas: que se refieren al comportamiento del material al someterlo a la acción destructiva y deformativa de cargas mecánicas - resistencia mecánica, dureza, elasticidad, plasticidad, fragilidad-.
- Propiedades químicas: capacidad para las transformaciones químicas, estabilidad contra la corrosión química.
- Durabilidad y seguridad, fiabilidad.

1.4 Usos más comunes e importantes de la arcilla en Guatemala

Desde el punto de vista industrial, la mayor parte de las aplicaciones no requieren especificaciones estrictas en cuanto a composición química o sea, en cuanto a la composición de las capas tetraédrica y octaédrica.

El principal uso de las arcillas comunes se da en el campo de la cerámica de construcción -tejas, ladrillos, tubos, baldosas, etc.-, alfarería tradicional, lozas y azulejos. Uso al que se destinan desde los comienzos de la humanidad. Prácticamente todas las arcillas son aptas para estos usos, primando las consideraciones económicas.

Así mismo son utilizadas en la manufactura de cementos, como fuente de alúmina y sílice, y en la producción de áridos ligeros (arcillas expandidas).

Dependiendo de su contenido mineralógico, también se utilizan en la fabricación de papel, fabricación de materiales cerámicos como porcelana, gres, loza sanitaria o de mesa, electrocerámica, y de refractarios, aislantes térmicos y cementos, carga de abonos, pesticidas y alimentos para animales. La industria química consume cantidades importantes en la fabricación de sulfato, fosfato y cloruro de Aluminio, así como para la fabricación de zeolitas sintéticas. También se utiliza para la obtención de catalizadores y fibras de vidrio. La industria farmacéutica utiliza caolín como elemento inerte en cosméticos y como elemento activo en absorbentes estomacales.

1.5 Propiedades de las arcillas como materia prima para ladrillos

1.5.1 Plasticidad y capacidad aglomerante

La arcilla, amasada con cierta cantidad de agua, forma la pasta arcillosa que posee coherencia y plasticidad. Al mojar la arcilla seca, se percibe un olor característico de tierra mojada y el desprendimiento de calor. Las moléculas de agua (dipolos) se adentran entre las partículas lenticulares de caolinita y la acuñan provocando el hinchamiento de la arcilla. Las capas finas de agua entre las partículas estratiformes de minerales arcillosos condicionan las características de la pasta arcillosa.

Plasticidad de la arcilla a su propiedad, en estado húmedo, de tomar bajo el efecto de una acción exterior la forma deseable sin que aparezcan interrupciones ni grietas, y conservar la forma adquirida durante los siguientes secado y cocción .

La capacidad aglomerante de la arcilla se manifiesta en la posibilidad de cohesión de los granos materiales no plásticos (arenas) al igual que en la formación después del secado de un artículo bruto con bastante resistencia mecánica.

1.5.2 Capacidad de la arcilla de endurecer al secarla

Una particularidad de la pasta de arcilla es su capacidad de endurecer al secarla al aire. La resistencia mecánica de la arcilla secada viene condicionada por la acción de las fuerzas de Van del Waals y la cementación de los granos de minerales por los iones de impurezas. Las fuerzas de presión capilar atraen a las partículas de arcilla impidiendo su corrosión, a consecuencia de lo que tiene lugar la contracción aérea.

Durante la saturación de agua desaparecen los meniscos, cesa la acción de las fuerzas capilares, las fuerzas se desplazan libremente en el exceso de agua y la arcilla se empapa.

1.5.3 Contracción de la arcilla

La contracción consiste en que se reducen las dimensiones lineales y el volumen de la materia bruta de arcilla durante su secado -contracción térmica-. La contracción se expresa en por ciento del tamaño inicial del artículo.

La contracción aérea transcurre en el proceso de evaporación del agua a partir de la materia bruta, como consecuencia de la disminución del espesor de las capas acuosas alrededor de las partículas de arcilla, aparición en los poros de la materia bruta de meniscos y fuerzas de presión capilar, tendientes a acercar las partículas.

La contracción térmica sucede a causa de que en el proceso de cocción los componentes fusibles de la arcilla se funden y las partículas de esta se aproximan en los lugares de su contacto.

Esta contracción puede constituir un 2 a 8%, en dependencia del tipo de arcilla.

La contracción total, igual a la suma algebraica de las retracciones aérea y térmica, oscila entre 5 y 18%. Respectivamente se recurre a aumentar el tamaño de los moldes para obtener un artículo acabado con las dimensiones requeridas.

1.5.4 Transición durante la cocción al estado pétreo

En el proceso de cocción a temperaturas altas la arcilla experimenta profundos cambios físico-químicos. Primero se evapora el agua libre, luego se quemán las materias orgánicas.

A temperaturas de 700 – 800 °C tiene lugar la descomposición de la metacaolinita anhidra $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, que se había formado anteriormente (a 450 – 600 °C) a consecuencia de la deshidratación de la caolinita. Al seguir aumentando la temperatura (900 °C y más), el dióxido amorfo de silicio y el óxido de aluminio se unen de nuevo formando un mineral artificial llamado mullita $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. La mullita le proporciona al artículo cerámico cocido las necesarias resistencias al agua, mecánica y térmica. Al formarse la mullita, la arcilla pasa irreversiblemente al estado pétreo. Junto con la formación de la misma se funden los componentes de fácil fusión de la arcilla, cementando y reforzando el material.

1.5.5 Poder aglutinante de la arcilla

Se le llama así a la propiedad de las arcillas de compactarse durante la cocción y formar un casco pétreo. Con el crecimiento de la temperatura de cocción aumenta el grado de aglutinación y disminuye la higroscopía, puesto que a la temperatura inicial aparecen indicios de una cocción excesiva: la fusión parcial o el hinchamiento del material. El intervalo de aglutinación es igual a $t_c - t_A$, siendo t_A la temperatura del inicio de aglutinación. Las arcillas fusibles para fabricación de ladrillo tienen un intervalo de aglutinación de 50 – 100 °C.

1.5.6 Capacidad refractaria de la arcilla

La capacidad refractaria de la arcilla es la propiedad de la arcilla de soportar altas temperaturas sin fundirse.

2. LADRILLOS

2.1 Datos generales

Los ladrillos son considerados como materiales aglomerados. Son piedras artificiales obtenidas mezclando diversos productos con un aglomerante los que amasados convenientemente se les da la forma y textura deseada utilizando moldes y prensas. Adquieren el estado sólido por las reacciones fisicoquímicas del fraguado. Según la naturaleza del aglomerante se pueden clasificar en

- a. aglomerados de arcilla
- b. aglomerados cal-magnésicos
- c. aglomerados de cemento

Los ladrillos de barro cocido son prismas que pueden manejarse con una sola mano. Es uno de los productos más usados en la construcción de muros de carga o simples tabiques.

Los ladrillos obtenidos poseen diversidad de formas, siendo los más comunes

- a. Ladrillo perforado: ladrillos con agujeros que ocupan del 5 al 33% del área total.
- b. Ladrillo hueco: ladrillo con agujeros que exceden el 33% del área total.
- c. Ladrillo macizo (tayuyo): ladrillo sin agujeros (sólido).

d. Bloques de barro cocido, viguetas, etc.

La materia prima para la fabricación del ladrillo es la arcilla con ciertas propiedades tales como, plasticidad, absorción de agua, capacidad de aglutinamiento, poca contracción al secado y buen comportamiento al proceso de cocción.

2.1.1 Tipos y usos más comunes del ladrillo en Guatemala

El ladrillo ordinario de arcilla (macizo o tayuyo) tiene una forma de paralelepípedo rectangular con dimensiones de 250 x 120 x 65 mm, con bordes rectos, caras bien definidas y superficies faciales regulares. La encorvadura de los bordes y caras del ladrillo no exceden los 3 mm. El ladrillo de módulo tiene las dimensiones de 250 x 120 x 88 mm y se fabrica con huecos redondos o rasurados, para que el ladrillo no pese más de 4 Kg. Las desviaciones del tamaño no deben superar ciertos valores establecidos.

El ladrillo no deberá tener defectos mecánicos ni fisuras pasantes. Se admite que algunos ladrillos tengan huecos en los bordes y rincones, pero no mayores de 15 mm a lo largo del borde y cuya cantidad sea no mayor de 2 en una pieza.

También puede admitirse en una pequeña cantidad de ladrillos una fisura pasante no mayor de 30 mm a lo largo del espesor del ladrillo.

Este debe estar cocido a su punto justo, recibiendo el nombre de recocho. Todo ladrillo de cocción insuficiente o demasiada se considera defectuoso.

Después de la cocción el ladrillo debe tener el color del patrón correspondiente al recocido. No se admiten inclusiones calcáreas –ampollas– que provocan la destrucción del ladrillo.

Tabla I. Algunas características básicas de los ladrillos

DENOMINACIÓN	LADRILLO DE ARCILLA ORDINARIO	LADRILLO DE ARCILLA HUECO DE PENSADO PLÁSTICO	LADRILLO DE CONSTRUCCIÓN ALIGERADO
Dimensiones principales	250 x 120 x 65	250 x 120 x 65	250 x 120 x 65
Límite de resistencia, MPa <i>Compresión</i> <i>Flexión</i>	7.5 – 30 1.4 – 4.4	7.5 – 25 1.4 - 3	7.5 – 20 1.4 – 3.4
Higroscopía, % no menos de: <i>Para las marcas superiores a 150</i> <i>Para las demás</i>	6 8	6 8	8 8
Resistencia al frío, número de ciclos	15 – 50	15 - 50	15 – 35
Masa volumétrica, Kg/m ³	1600 – 1900	1200 – 1450	700 – 1450
Masa de cada unidad del artículo, kg	3.5 – 3.6	2 -3	1.5 – 3
Oquedad, %	--	13 - 33	--
Cantidad de agujeros	--	18 - 60	--
Dimensión de los huecos	--	53 - 12	16 – 12
Espesor de las paredes, mm	--	12	15
Conductibilidad térmica, W/(m °C)	0.7 – 0.82	0.7	0.175 – 0.465

2.1.1.1 Adobe

El adobe es el más humilde de los materiales hechos con arcilla y el más elemental en lo que a su fabricación respecta.

Se hace con arcillas plásticas a las cuales se les agrega paja o zacate cortado a un tamaño no mayor de las dimensiones del adobe. La mezcla así preparada es batida y vaciada en moldes denominados goberas que se colocan sobre el terreno mismo que sirve de fondo para el cajón formado por este marco.

En el es comprimido o apisonado perfectamente a mano, retirando luego el molde a los 5 o 10 minutos, tiempo en que la masa ha obtenido ya una determinada consistencia.

2.1.1.2 Bloques de talpetate

El talpetate es una roca de construcción muy empleada en el país a causa de su ligereza y bajo precio. No obstante cuando es aplicado en bloques para la construcción de muros, presenta inconvenientes muy serios que lo hacen un material inadecuado para su uso en muros de carga.

La cohesión del talpetate es mínima, lo que hace que sea imposible labrarlo con aristas vivas, presentando el enorme defecto que pierde fácilmente su agua de cantera, volviéndose terroso en exceso y pulverizándose, perdiendo, por lo tanto, todas sus propiedades como piedra de construcción.

Sus defectos son la causa de las cuarteadoras que aparecen en las construcciones en la que se ha usado este material; por lo tanto su uso debe limitarse únicamente a cercados o bardas así como muros divisorios.

2.1.1.3 Ladrillo y tabique de barro común

Este material ha sido empleado desde época inmemorial, y su uso ha sido constante a través de los siglos. Los ladrillos comunes se hacen con arcillas que contienen una pequeña proporción de arena, no debiéndose usar únicamente arcillas plásticas en su fabricación, pues los ladrillos sufren una gran contracción y deformación al pasar por el proceso de cocimiento. A la pasta debe mezclarse arena o margas calcáreas en proporción no mayor de una quinta parte del total, y sólo cuando falte plasticidad a las arcillas se le podrán mezclar arcillas plásticas o, en su defecto, margas o calizas.

La arcilla más conveniente para la fabricación es aquella que contiene 45 a 80 partes de sílice, 15 a 40 de alúmina y menos de 18% de agua.

2.1.1.4 Tabiques de barro comprimido

La aplicación de estos tabiques es muy variada, siendo actualmente muy usados en pisos, muros, recubrimiento de muros, en repisones de ventanas y, en general, en todos aquellos lugares en que se quiera tener un material aparente de barro de buena calidad que anule, por decirlo así, los gastos de conservación del mismo.

2.1.1.5 Ladrillos huecos de barro comprimido

Actualmente se fabrica una serie muy grande de este tipo de piezas, por lo que siempre debe tenerse un especial cuidado en seleccionar la correcta, dependiendo del uso a que vaya a estar destinado el material. Las características más sobresalientes de estos productos son la resistencia, adherencia y absorción.

Los tipos estructurales con perforación vertical permiten la facilidad de colocar castillos armados sin necesidad de cimbras, y tanto estos como las formas huecas de perforación horizontal, ofrecen la facilidad de colocar dentro del muro líneas de introducción de agua y de instalaciones eléctricas y de gas. Todas estas formas presentan la ventaja de hacer a los muros aislantes térmicos y acústicos.

2.1.1.6 Tabiques y bloques huecos de barro comprimido

Las características fundamentales de la arcilla con que se produce el barro que se emplea en la fabricación de estos materiales, por su contenido de arcilla pura, más del 33%, resulta un barro sumamente plástico, dando como resultado un acabado terso en las caras expuestas de estos productos y uniformidad en sus medidas.

Por ser arcilla quemada a 850°C, el coeficiente de absorción elimina fisuras posteriores por contracción en los elementos de las construcciones fabricadas con estos productos. La absorción, 15%, nos garantiza una adherencia perfecta con los morteros y no varía la relación agua-cemento del concreto cuando se emplea en la estructuración integral de muros construidos con estos materiales.

Característica importante resulta el peso de los mismos, pues se logra una economía considerable en las construcciones por la reducción de secciones en la cimentación y estructura.

Tabla II. Tipos y usos más comunes de los ladrillos comerciales.

TIPO	DIMENSIONES (cm)	USO
Adobe	9 x 42 x 56 9 x 28 x 42	Muros
Ladrillos de talpetate	21 x 28 x 42 21 x 28 x 46	Barreras, bardas y muros divisorios
Ladrillo de barro común	7 x 14 x 28 2 x 14 x 28	Muros de carga
Ladrillo de barro comprimido	5.8 x 10 x 20 (block rojo y perforado)	Pisos, muros, recubrimiento de muros, repisones de ventanas
Ladrillo tayuyo	6 x 10 x 20	Forro de calderas, chimeneas, repisones de ventanas
Blocks de barro comprimido	15 x 10 x 30 10 x 10 x 20 10 x 10 x 30 6 x 14 x 0 (block rojo perforado vertical)	Muros divisorios, muros de carga, instalaciones eléctricas, sanitarias, gas y teléfono, aislamiento térmico y acústico.

Tabla III. Otros tipos de ladrillos y sus características.

TIPO	DIMENSIONES (cm)	PESO POR PIEZA (kg)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/cm²)	USO
Tabique hueco vertical	6 x 10 x 20	1.100	150	Muros aparentes, ductos para instalaciones eléctricas
	6 x 12 x 24	1.700		
Block Hueco Vertical	10 x 10 x 24	2.000	150	
	12 x 12 x 24	3.400		
Block hueco horizontal	10x 12 x 24	2.400	55	En aquellas construcciones donde se requieran cualidades acústicas (cines, hospitales, condominios, etc.)
Cintilla	2 x 6 x 24	0.500	--	Recubrimiento de muros, trabes, castillos. Es complemento del tabique hueco vertical de 6 x 12 x 24
Tabique hueco horizontal	6 x 12 x 24	1.800	70	Viguetas en puertas y ventanas, muros aparentes y ductos
Ladrillo	2 x 12 x 24	1.000	170	Pisos de patios, garages, terrazas, recubrimientos
Baldosa	2.5 x 24 x 24	2.400	170	Pisos de patios, garages, terrazas, jardines y en interiores
	2.5 x 30 x 30	3.700		

2.1.2 Características y propiedades del ladrillo

Los ladrillos son hechos de materiales naturales, regularmente mezclas proporcionadas de arcillas y barros, se extruyen al vacío y se queman a altas temperaturas. Estos materiales y el proceso de fabricación hacen al ladrillo un material de construcción con excelentes propiedades estructurales, acústicas y térmicas. No es sorprendente que el ladrillo sea uno de los materiales de construcción más noble del mundo.

Como el más simple y antiguo material de construcción, el ladrillo ha obtenido una gran popularidad a lo largo de los años, dando a conocer sus incomparables propiedades de durabilidad y resistencia, sin omitir la importancia que tiene como elemento decorativo. Bajo todas las condiciones un buen ladrillo de barro puede durar indefinidamente.

La utilización en grandes proporciones de este elemento es por las propiedades de este material y gracias, además, a una geometría específicamente estudiada, se obtiene un producto que reúne una serie de características singulares, entre ellas, alta resistencia mecánica y alto grado de aislamiento térmico y acústico.

Propiedades térmicas

Por la composición del ladrillo, también actúa como un buen aislante térmico, manteniendo la temperatura interior de una construcción más agradable.

En climas cálidos frena el ingreso del calor y en climas fríos la pérdida de calor al exterior. Esta propiedad evita las incómodas oscilaciones de temperatura originadas por las diferencias térmicas entre el día y la noche.

La capacidad de acumulación térmica que tiene el ladrillo, es un requisito fundamental para alcanzar un adecuado nivel de confort dentro de la vivienda.

La conductividad térmica del ladrillo es grande: $1.16 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Los poros de aire y los huecos, reducen la masa volumétrica y disminuyen considerablemente la conductividad.

Resistencia

Una de las características más importantes que tiene el ladrillo es el valor de resistencia a la compresión que éste maneja, lográndole dar así al constructor un mayor rendimiento estructural.

La resistencia mecánica depende de su composición de fase y la porosidad.

La marca de resistencia de un ladrillo significa el límite de resistencia a la compresión, la cual alcanza valores medios equivalentes a 90 Kg/cm^2 (Ver Tabla III), a diferencia de un bloque pómez que tiene 35 Kg/cm^2 , pero al elegir la marca del ladrillo, junto con dicho parámetro se toma en consideración el índice de resistencia a la flexión, ya que el ladrillo en la mampostería se somete a esta acción.

La marca de resistencia al frío significa el número de ciclos de congelación y descongelación alternadas que soporta un ladrillo sin indicios de deterioros visibles como estratificación, descamación, figuración o desmoronamiento.

El ladrillo común es resistente al frío siendo la característica estructural mayor o igual al 9% y si es un ladrillo perforado, mayor al 6%.

Propiedades acústicas

El aislamiento acústico de un elemento de construcción es la característica por la que se reduce la transmisión de sonido a través de él. El ladrillo ofrece por su composición y fabricación, un excelente aislante acústico. Una construcción con nuestro ladrillo no recibirá ni transmitirá el ruido tan fácilmente, como puede pasar con cualquier otro material de construcción. Los muros levantados con ladrillo mejoran entre 2 y 3 decibeles (dB) su comportamiento con respecto a otros tipos constructivos.

2.2 Criterios para la selección de arcillas para la elaboración de ladrillos

Las arcillas industriales, destinadas a la fabricación de ladrillos, se constituyen principalmente de 47% de sílice, 39% de alúmina y 14% de agua y sus principales propiedades físicas a observar y controlar son la plasticidad, capacidad de absorción y cesión de agua, capacidad aglutinante, contracción en el secado y cocido y su comportamiento al calor.

2.3 Proceso de fabricación de ladrillos

El proceso de la manufactura del ladrillo comprende desde la extracción de la arcilla hasta obtener el producto cocido y enfriado, listo para su venta. Las etapas son las siguientes:

- 1. Extracción:** Originalmente se utilizaba como materia prima la arcilla que se encontraba en el lugar propio de la ladrillera, pero con el tiempo estas fuentes de suministro se han ido agotando. La necesidad de obtener la materia prima para la elaboración del ladrillo ha provocado que algunos encuentren yacimientos de esta materia, en los lugares privilegiados con arcillas de buena calidad. El método para la excavación puede variar dependiendo del volumen de material a extraer, puede ser a través de maquinaria pesada o herramientas comunes de trabajo (palas, picos y piochas).
- 2. Tratamiento:** La preparación tiene por objeto transformar la arcilla en bruto de manera que se le proporcionen todas las características deseadas y exigidas para proseguir con el proceso de fabricación, o sea que la preparación que se le tenga que dar, depende del tipo de ésta.

Las arcillas salidas de las minas, se someten a selección y clasificación y, en caso de haber llegado muy húmedas, se procede a su secado natural, después de lo cual se hace la mezcla. Efectuadas la proporción y la mezcla, se lleva la pasta a un molino, donde se pulverizan todos los ingredientes de tal modo que puedan trabajarse en las prensas. El grado de la molienda y, por lo tanto, el tamaño de las partículas que salgan del molino, influyen definitivamente en las características del material. Por eso es necesario clasificar las partículas del material y separar aquellas que sean de un tamaño mayor al que se desee.

- 3. Tamizado:** La clasificación mencionada se hace por medio de mallas o tamices vibratorios, por los cuales se pasa el material que sale de los molinos y que tiene el tamaño deseado. Este material es el que se utilizará para la formación de la pasta. El material que no pase por los tamices regresa de nuevo a los molinos para una pulverización más fina.

- 4. Preparación de la pasta:** El producto que ha pasado por los tamices se lleva a una mezcladora, donde se le agrega el agua necesaria hasta obtener una pasta moldeable. Esta se pasa a una prensa de gusano o hélice. Allí el material es forzado, por medio de un gusano helicoidal, a pasar a través de una boquilla que tiene la forma del ladrillo, en sus dimensiones de largo y ancho, siendo su sección rectangular. Previo cálculo se toma la contracción que va a sufrir la pieza en crudo al irse secando y también la que sufrirá por efecto del quemado en los hornos. La prensa que se utiliza efectúa al mismo tiempo la extracción del aire que acompaña a la pasta, para lo cual lleva un sistema de vacío.

5. Prensado: En esta etapa del proceso es en donde se determina el tamaño y forma de los ladrillos, dependiendo del tipo de éstos últimos.

De la prensa sale una columna de sección transversal de igual forma a la boquilla que se está originando. Esta columna avanza hasta llegar a una máquina cortadora, que puede ser de alambres, discos o cuchillas; pero que tiene por objeto, en todos los casos, dividir la columna en secciones equivalentes al espesor de las piezas, que reciben así su tercera dimensión. Los ladrillos, al salir de la cortadora, se colocan en carritos o plataformas y se transportan al lugar de secado.

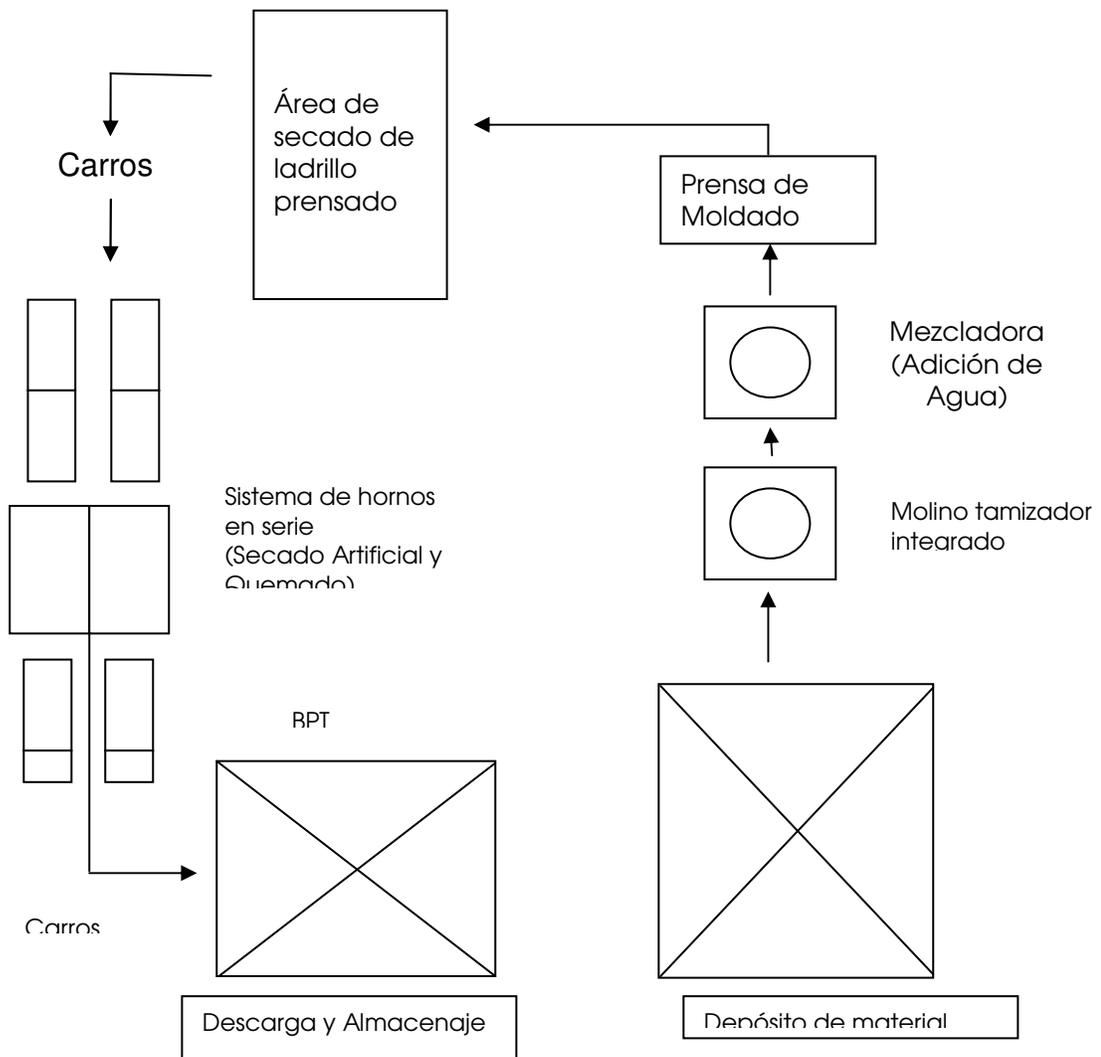
6. Secado: El secado se efectúa en dos fases: natural y artificial. En la primera se dejan madurar las piezas al contacto con el aire, libres de corrientes bruscas y al abrigo del sol. Con esto se procura un secado lento, pero constante, pues si se acelera el secado en esta fase, las piezas quedarían debilitadas por las grietas o cuarteadoras. Cuando el material ha madurado lo suficiente en la fase natural, se pasa a los secaderos artificiales, Este secado artificial también es conocido como cocción. Los ladrillos se cuecen para su estabilización y fortalecimiento en su estructura interna. Esta última fase del proceso es realizada en hornos cuya estructura puede variar dependiendo de las necesidades del fabricante. Aquí, el material pierde los restos de humedad y queda perfectamente seco de modo que se eviten las roturas y los problemas que pudieran producirse al ser quemado.

- 7. Quemado:** El quemado puede efectuarse en hornos-túneles de tipo continuo, en hornos redondos de tipo periódico y, en general, en cualquier tipo de horno que pueda quemar lenta y gradualmente y alcance grandes temperaturas. En el primer caso, los ladrillos son acomodados sobre los carros, los cuales entran al horno-túnel por un extremo para salir por el otro, y, en su trayecto precalentarse, quemarse y enfriarse.

- 8. Descarga y selección:** Una vez terminado el ciclo de fabricación, se procede a descargar el material, pasándolo al aire libre (patio) para su selección y clasificación en primeras y segundas, según su acabado.

En general, sin importar la naturaleza y tipo de ladrillo a fabricar, el proceso es el mismo, el cual se puede resumir de la siguiente manera:

Figura 1. Diagrama de proceso para la fabricación de ladrillos



3. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN DE ARCILLAS

La química analítica puede definirse como la ciencia que desarrolla y mejora métodos e instrumentos para obtener información sobre la composición y naturaleza química de la materia. Dentro de la química analítica se incluye el análisis químico que es la parte práctica que aplica los métodos de análisis para resolver problemas relativos a la composición y naturaleza química de la materia. Los ámbitos de aplicación del análisis químicos son muy variados, en la industria destaca el control de calidad de materias primas y productos acabados; en el comercio los laboratorios certificados de análisis aseguran las especificaciones de calidad de las mercancías; en el campo médico los análisis clínicos facilitan el diagnóstico de enfermedades.

Es interesante realizar una definición de términos ligados al análisis.

- Muestra: Parte representativa de la materia objeto del análisis.
- Analito: Especie química que se analiza.
- Técnica: Medio de obtener información sobre el analito.
- Método: Conjunto de operaciones y técnicas aplicadas al análisis de una muestra.
- Análisis: Estudio de una muestra para determinar sus composición o naturaleza química.

Dentro de la química analítica también pueden diferenciarse diversas áreas según la información que se desea obtener.

Así, la química analítica cualitativa se centra en identificar la presencia o ausencia de un analito, mientras que la química analítica cuantitativa desarrolla métodos para determinar su concentración.

Métodos de análisis

- Métodos clásicos, que se basan en propiedades químicas del analito. Se incluyen las gravimetrías, las volumetrías y los métodos de análisis cualitativo clásico.
- Métodos instrumentales, basados en propiedades químico-físicas. La clasificación de los métodos instrumentales se realiza en base a la propiedad que se mide, espectroscópicos, electro-analíticos, térmicos y otros.
- Métodos de separación. Se incluyen en este grupo los métodos cuya finalidad es la separación de compuestos para eliminar las interferencias y facilitar las medidas

Características de calidad de los métodos analíticos

- Exactitud: Grado de concordancia entre el resultado y un valor de referencia certificado. En ausencia de exactitud se tiene error sistemático.
- Precisión: Grado de concordancia entre los datos obtenidos de una serie. Refleja el efecto de los errores aleatorios producidos durante el proceso analítico.
- Sensibilidad: Capacidad para discriminar entre pequeñas diferencias de concentración del analito. Se evalúa mediante la sensibilidad de calibración, que es la pendiente de la curva de calibración a la concentración de interés.

- Límite de detección: Concentración correspondiente a una señal de magnitud igual al blanco más tres veces la desviación estándar del blanco.
- Intervalo dinámico: Intervalo de concentraciones entre el límite de cuantificación (LOQ) y el límite de linealidad (LOL).
- Selectividad: Cuantifica el grado de ausencia de interferencias debidas a otras especies contenidas en la matriz.
- Seguridad: Amplitud de condiciones experimentales en las que puede realizarse un análisis.

3.1 Espectrofotometría de absorción atómica (AA)

3.1.1 Descripción del método

Muchos análisis han sido difíciles de realizar y requieren de mucho tiempo para efectuar los mismos, debido a esto la absorción atómica es a menudo el método esencial en el análisis elemental, especialmente a bajas concentraciones.

Entre las ventajas sobre otras técnicas que tiene la espectrofotometría de absorción atómica están:

1. Aplicable a diferentes elementos
2. Sensibilidad favorable para poder determinar contenidos bajos en concentraciones
3. Método bastante rápido especialmente para muestras geoquímicas
4. Aplicación en contenidos en partes por millón (ppm)
5. Análisis cuantitativo de precisión en muestras de mineral

6. Costo de instrumentación bajo, además de tener diversos campos de aplicación, aguas, hidrocarburos, etc.

También, como cualquier método tiene sus desventajas,

1. Interferencias en algunos análisis por elementos acompañantes
2. Se deben tomar en algunos casos muestras de referencia
3. Interferencias por matriz
4. No es muy preciso en concentraciones muy altas

En esta técnica es necesario tener conocimiento del átomo y de los procesos atómicos involucrados en ella. La configuración más estable y de más bajo contenido energético, es conocida como estado fundamental y es la configuración orbital normal para el átomo. Si a un átomo se le aplica energía, ésta será absorbida por él e inducirá que el electrón exterior sea promovido a un orbital menos estable o estado excitado. El electrón retornará a su orbital inicial ya que la fase inestable es espontánea y emitirá energía radiante equivalente a la cantidad de energía inicialmente absorbida en el proceso de excitación. Por esta razón ya sea la energía absorbida en el proceso de excitación o la emitida en el proceso de decaimiento, puede ser medida y usada para propósitos analíticos.

Si luz de una determinada longitud de onda incide sobre un átomo libre en estado fundamental, el átomo puede absorber energía y pasa al estado excitado, en un proceso conocido como absorción atómica.

La característica de interés en las medidas por absorción atómica, es el monto de luz, a la longitud de onda resonante, que es absorbida, cuando la luz pasa a través de una nube atómica.

Conforme al número de átomos se incrementa en el paso de la luz, la cantidad que de ésta será absorbida se incrementará en una forma predecible. Se puede determinar cuantitativamente el analito presente, midiendo la cantidad de luz absorbida.

El uso de fuentes especiales de luz y la selección cuidadosa de la longitud de onda, permite la determinación cuantitativa específica de elementos individuales en la presencia de otros. La nube de átomos requerida para las mediciones en absorción atómica, es producida por la adición de suficiente energía térmica a la muestra para disociar los compuestos químicos en átomos libres. La absorción atómica es uno de los métodos más populares para la determinación de metales.

La longitud de onda de resonancia, de intensidad inicial I_0 es enfocada sobre la llama, que contiene átomos al estado fundamental. La intensidad inicial de la luz es disminuida en una cantidad determinada por la concentración de los átomos en la llama. Luego la luz es dirigida sobre el detector donde se mide la intensidad disminuida, I . La cantidad de la luz absorbida se determina por comparar I a I_0 .

La transmitancia es definida como la razón de la intensidad final a la intensidad inicial y es una indicación de la fracción de luz inicial que pasa a través de la llama para incidir en el detector.

El porcentaje de absorción A , es el complemento del porcentaje de transmitancia y define el porcentaje de luz inicial que es absorbida en la llama.

La ecuación

$$A = abc$$

Simplemente establece que la absorbancia es directamente proporcional a la concentración c de las especies absorbantes para las condiciones instrumentales dadas (a y b , constantes). Esta proporcionalidad directa entre absorbancia y concentración, es la observada en absorción atómica.

Fuente de luz

Un átomo absorbe luz de longitudes de onda muy discretas. Para poder medir esta absorción de bandas tan angostas con la máxima sensibilidad, es necesario usar una fuente que emita longitudes de onda muy específicas que puedan ser absorbidas por el átomo. Fuentes de líneas muy estrechas no sólo producen alta sensibilidad, sino que también hacen que la absorción atómica sea una técnica analítica muy específica con pocas interferencias espectrales.

La fuente del equipo utilizado para este estudio, es una lámpara de cátodo hueco, el cual es una excelente y brillante fuente de energía discreta para la mayoría de los elementos determinables por absorción atómica. El cátodo de la lámpara es un cilindro hueco, cuyo espectro debe producirse. El ánodo y el cátodo se encuentran en un cilindro de vidrio sellado y lleno de argón. Al extremo del cilindro se ha fundido una ventana transparente a la radiación emitida.

Cuando se aplica un potencial eléctrico entre el ánodo y el cátodo, algunos de los átomos del gas de relleno se ionizan.

Los iones cargados positivamente se aceleran a través del campo eléctrico y colisionan con el cátodo cargado negativamente, desalojando átomos metálicos individuales del mismo; los átomos de metal desalojados o son entonces excitados para la emisión, por los impactos subsecuentes que tienen con más iones del gas de relleno.

Monocromador

La función del monocromador es la de aislar una línea de resonancia atómica del espectro de línea emitida por la lámpara. Se debe tener especial cuidado en el área del monocromador del sistema óptico para evitar excesiva pérdida de luz. La dispersión de las longitudes de onda se logra por medio de una red o superficie reflectiva rayada por muchas líneas paralelas muy cercanas unas de otras. La reflexión en esta superficie rayada genera un fenómeno de interferencia conocido como difracción, en el cual diferentes longitudes de onda divergen de la red con diferentes ángulos.

La luz de la fuente entra en el monocromador por la apertura espectral de entrada y es dirigida hacia la red de difracción en donde tiene lugar la dispersión. Las longitudes de onda divergentes son dirigidas hacia la apertura espectral de salida.

Ajustando el ángulo de la red, se permite que una línea de emisión preseleccionada de la fuente pase a través de la apertura de salida e incida sobre el detector. Todas las otras líneas son bloqueadas en la salida.

El ángulo de la dispersión en la red de difracción se puede controlar por la densidad de rayado de las líneas de la rejilla. Alta dispersión va a resultar de una densidad alta de línea.

Esta es importante para obtener una buena eficiencia de energía del monocromador. Por consiguiente, mucha de la energía luminosa disponible es impedida de entrar en el monocromador. En contraste, para una red de alta dispersión, la gran separación de las líneas permite el empleo de rendijas más amplias, lo cual permite a su vez, el uso de mayor luz disponible sin sacrificar la resolución.

Sistema del quemador

El atomizador de un espectrofotómetro de absorción atómica debe generar átomos en estado fundamental en el paso óptico del fotómetro. Se han utilizados algunos recursos para este propósito cada uno con su ventaja especial. La técnica más ampliamente usada relacionada con el desarrollo rutinario de la absorción atómica y usada en el este estudio, es la aspiración directa en la llama de la solución de la muestra.

En este sistema de premezcla (Figura 2), la solución de la muestra es aspirada a través de un nebulizador que genera un aerosol, fino, dentro de una cámara de mezcla. Aquí el aerosol de la muestra se mezcla con los gases combustibles y oxidantes y luego es llevado al cabezal del quemador en donde ocurre la combustión y la atomización de la muestra. El gas combustible es introducido a la cámara de mezcla a través del brazo lateral del nebulizador.

El aerosol de la muestra tiene gotitas de varios tamaños cuando es introducido en la cámara de premezcla. Al entrar en la llama se vaporiza el agua de esas gotitas.

El material sólido remanente debe, de igual forma, ser vaporizado y se deben romper los enlaces químicos, para obtener átomos libres en su estado fundamental.

Cuando el tamaño inicial de las gotas es grande, la vaporización de las muestras y el proceso de atomización se completan con más dificultad en el corto tiempo en el cual la muestra está expuesta al ambiente de la llama, antes de pasar a través del rayo de luz. Una incompleta atomización de la muestra incrementará la susceptibilidad a las interferencias químicas. Por esto se coloca una espiral reflectora de flujo en el interior de la cámara de premezcla, directamente enfrente del nebulizador. Las gotas de solución más grandes y que no sean llevadas por el flujo del gas alrededor del espiral chocan contra éste y caen al fondo de la cámara, de donde son removidas del sistema a través del drenaje, el cual utiliza una trampa líquida para prevenir que los gases de combustión escapen a través de la línea del mismo.

Figura 2. Diagrama de operación de un espectrofotómetro de absorción atómica

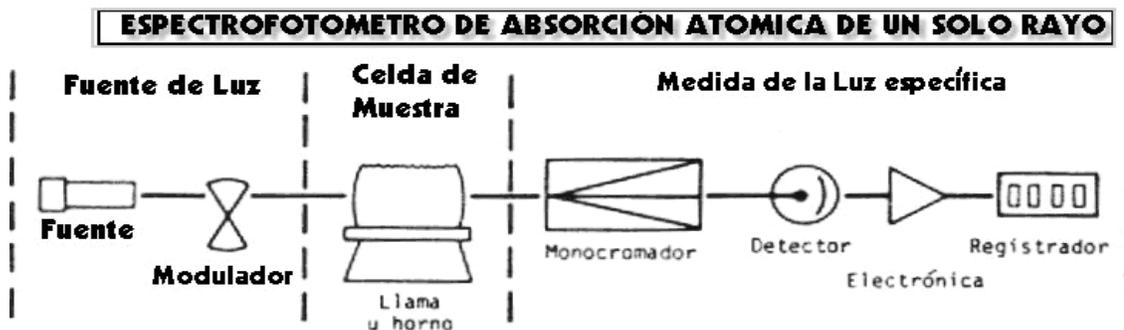
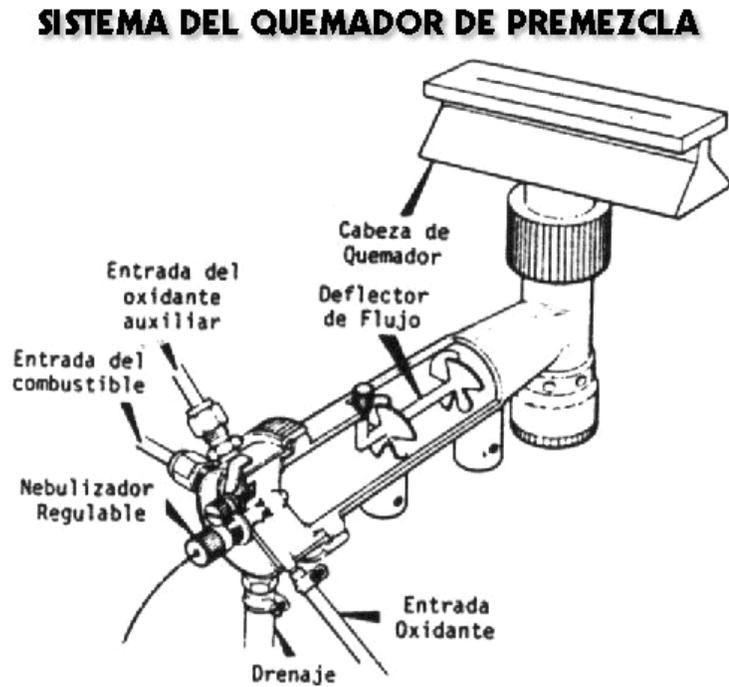


Figura 3. Sistema del quemador de premezcla para el análisis por espectrofotometría de absorción atómica



Preparación de la muestra y análisis:

Tomada la muestra como roca, ésta se debe triturar y obtener muestras representativas y de un tamaño de partícula llegando a un polvo fino (malla No. 100); posteriormente se somete a la metodología de preparación para su posterior análisis.

Metodología:

Reactivos:

Ácido clorhídrico concentrado

Solución de lantano, 5% (w/v).

Metaborato de litio, LiBO_2 . No es necesario alta pureza, este se puede preparar fácilmente desde Li_2CO_3 y H_3BO_3 .

Solución estándar:

Las soluciones estándar fueron preparadas por disolución de las soluciones existentes descritas en las condiciones estándar en la sección de cada elemento, y debe contener concentraciones de HCl, LiBO_2 , similares a la solución de la muestra. Se preparó un reactivo en blanco.

Preparación de la muestra:

1. Poner 0.1g de la muestra en un crisol de platino y agregar cerca de 0.6g de LiBO_2 .
2. Mezclar vigorosamente la muestra y el LiBO_2 con un pequeño agitador y fusionar la mezcla a 1800 °F (1000 °C) en una estufa por 15 min. Cuando termine la fusión, dejar enfriar el crisol, en agua destilada.
3. Colocar el crisol dentro de un vaso de precipitado de 100ml cubierto con una pequeña barra agitadora de teflón y adicionar 20ml de agua caliente y 5ml de ácido clorhídrico concentrado.
4. Revolver por pocos minutos con una presión de operación constante, con un agitador magnético dentro del vaso vacío de los contenidos.
5. Adicionar agua caliente y ácido. Mezclar hasta que la solución es completa. Transferir la solución cuantitativamente a un matraz volumétrico de 200 ml y diluir al volumen después de enfriarse.

Para las muestras de carbonato la solución debe de diluirse 10 veces. Esta solución se hace al 1 % de lantano para remover todas las interferencias sobre la determinación del calcio.

Análisis:

1. Analizar la concentración de los elementos de interés comparando con los apropiados estándares y blancos.
2. Posteriormente se procede a colocar la muestra en la celda del equipo haciéndole pasar el haz de luz para obtener una lectura de absorbancia en el registrador.

Una vez que obtuvimos nuestra curva patrón a diferentes concentraciones podemos saber la concentración en nuestra muestra

$$C = A / b a$$

De la curva patrón obtenemos el coeficiente de absortividad a.

3.2 Fluorescencia de rayos X (XRF)

3.2.1 Descripción del método

La espectroscopia de fluorescencia atómica es la más moderna de las técnicas con que se determinan los metales. En absorción atómica se mide la absorción de la radiación de una lámpara de cátodo hueco, mientras que en la fluorescencia atómica se observa la emisión de la especie atómica que ha sido excitada por una longitud de onda adecuada.

En la Figura 4 se observa el diagrama de un espectrofotómetro de fluorescencia atómica.

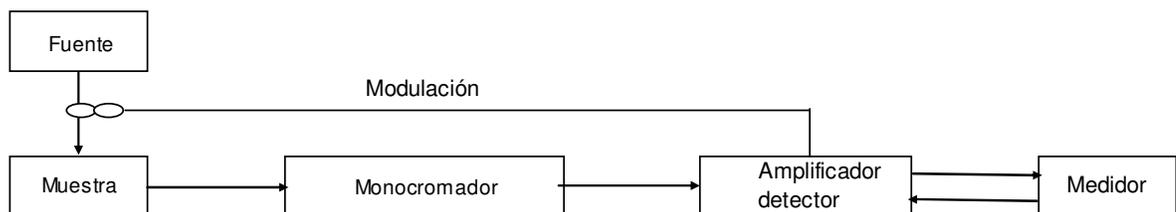
Hay que notar que la fuente está situada perpendicularmente el eje óptico del sistema y que la radiación está modulada para detectar solamente la radiación de resonancia de la muestra, causada por la fuente.

La mejor fuente de fluorescencia atómica es la lámpara de descarga eléctrica. La lámpara son tubos de cuarzo cerrados que contienen argón y el metal de interés.

Estos tubos se estimulan mediante un generador de microondas para vaporizar y excitar el metal y producir intensas líneas atómicas, generalmente de larga duración. Para la estabilización es preciso un tiempo de calentamiento.

Los principios en los que se basa ésta técnica son los mismos que en la técnica de absorción atómica.

Figura 4. Diagrama de un espectrómetro de fluorescencia atómica



La preparación de la muestra se lleva a cabo a partir de una fusión, la cual es una técnica de preparación para la XRF actualmente muy popular. La muestra se pulveriza y se funde a 1100 °C con perlas de metaborato de litio (relación 1:5) en un crisol de platino-oro (5% Au), durante 7 minutos, comparando contra una curva estándar hecha con materiales de referencia, obteniéndose una gran homogeneidad.

(El procedimiento de preparación es el mismo que para la absorción atómica)

3.3 Vía húmeda -Método gravimétrico-

El análisis gravimétrico está basado en la *Ley de las proporciones definidas*, que establece que, en cualquier compuesto puro, las proporciones en peso de los elementos constituyentes siempre son las mismas, y en la *Ley de consistencia de la composición*, que establece que las masas de los elementos que toman parte en un cambio químico muestran una relación definida e invariable entre sí.

El análisis gravimétrico consiste en determinar la cantidad proporcionada de un elemento, radical o compuesto presente en una muestra, eliminando todas las sustancias que interfieren y convirtiendo el constituyente o componente deseado en un compuesto de composición definida, que sea susceptible de pesarse.

Los cálculos se realizan con base en los pesos atómicos y moleculares, y se fundamentan en una constancia en la composición de sustancias puras y en las relaciones ponderales (estequiometría) de las reacciones químicas.

3.3.1 Descripción del método

Silicio

1. La muestra pulverizada se tamizó entre las mallas 50 y 100, descartando el material que pasó la malla 100. El retenido se pulverizó nuevamente y se lavó en el tamiz #100, 100 gramos cada vez. Luego se dejó secar entre 100 – 105°C durante 24 horas. Finalizado este periodo se tamizó nuevamente y con el retenido se procedió con la metodología.
2. Pesar 3 muestras de 25 ± 0.05 g.
3. Colocar cada una en un recipiente de reacción.
4. Agregar 25ml de NaOH 1.000N a cada una incluyendo un cuarto recipiente, agitar y sellar.
5. Colocar en baño maría durante una 24 ± 0.25 horas a 80 ± 1 °C.
6. Enfriarlos con un chorro de agua fría por debajo de 30°C, durante 15 ± 2 minutos.
7. Filtrar la solución utilizando crisol de Gooch con kitasato y anotar la cantidad de tiempo.
8. Filtrar el testigo (recipiente #4) igual que en 6.
9. Agitar el filtrado y tomar una alícuota de 10ml y diluir a 200ml. Esta es la solución que se utiliza para determinar el contenido de SiO₂.
10. Transferir 100ml con pipeta de la solución anterior a una cápsula de evaporación (platino).
11. Adicionar 5 – 10ml de HC (d.e. 1.19).
12. Cubrir el crisol y dejar en digestión 10 minutos en baño de maría.
13. Diluir la solución en igual volumen de agua.
14. Filtrar y lavar la sílice separada fuertemente con agua caliente y guardar el residuo.
15. Hornear el residuo en una estufa a 105 – 110°C durante 1 hora.

16. Quitar el residuo con 10 – 15ml de HCl y calentar.
17. Diluir con igual cantidad de agua caliente y lavar en otro papel filtro.
18. Transferir el residuo (13 y 15) a un crisol de platino. Resecar y quemar los papeles hasta consumirlos, y luego de 1100 – 1200°C hasta que el peso quede constante.
19. Pesar el crisol vacío.
20. Tratar la sílice obtenida, en el crisol con algunas gotas de agua, 10ml de HF y una gota de H₂SO₄. Evaporar a sequedad con precaución.
21. Calentar el pequeño residuo de 1050 – 1100°C de 1 a 2 minutos, enfriar y pesar.
22. La cantidad de sílice es la diferencia entre los numerales 20 y 17.

Para la determinación de aluminio, hierro, calcio y magnesio se preparó la muestra disolviendo 1 gramo de material en 40ml de HCl y 30ml de HNO₃, calentando a evaporación y filtrando el residuo. Este residuo se diluyó a 500ml y de esta solución se tomaron 10ml para realizar cada uno de los análisis.

Aluminio

1. Hervir 10ml de muestra con 50ml de EDTA 0.1M y 2ml de HCl normal, durante 10 minutos en baño maría.
2. Después de enfriar ajustar con acetato de sodio a un pH aproximado de 5 – 6.
3. Agregar 45mg de indicador naranja de xilenol.
4. Valorar con solución 0.1M de sulfato de zinc, hasta el viraje de amarillo a rojo.
5. Repetir el procedimiento con blancos.

Hierro

1. Diluir 10ml de la solución con agua hasta 100ml.
2. Ajustar el pH a 2.5 con ácido sulfosalicílico (éste también es el indicador).
3. Valorar con solución de EDTA 0.1M hasta que desaparezca la coloración roja.

Calcio

1. A 10ml de la solución añadir 10ml de agua.
2. Ajustar el pH a 12 utilizando hidróxido de potasio.
3. Valorar con EDTA 0.1M hasta el viraje de rojo vinoso a azul limpio.

Magnesio

1. A 10ml de la solución añadir 10ml de agua.
2. Añadir 1ml de solución amoniacal (NH_3).
3. Valorar con EDTA 0.1M hasta el viraje de rojo a verde.

3.4 Método de acoplamiento inductivo de plasma (ICP)

3.4.1 Descripción del método

La espectroscopia de emisión, que utiliza acoplamiento inductivo de plasma (AIP por sus siglas en español, ICP por sus siglas en inglés), se desarrolló a mediados de los años sesenta como un método rápido, sensible y conveniente para la determinación de metales en muestras. Los metales disueltos se determinan en muestras filtradas y aciduladas.

Los metales totales se determinan tras una apropiada digestión, eliminando las interferencias potenciales, especialmente cuando los sólidos disueltos sobrepasan los 1500mg/L.

Una fuente de AIP consiste en una corriente de flujo de gas ionizado por aplicación de un campo de radiofrecuencias típicamente oscilantes a 27.1MHz. Este campo está acoplado inductivamente al gas ionizado por una bobina refrigerada con agua que rodea a una lámpara de cuarzo que soporta y confina el plasma.

En un apropiado nebulizador y cámara de pulverización se genera un aerosol de la muestra que lleva al plasma a través de un tubo inyector colocado dentro de la lámpara. El aerosol de la muestra se inyecta directamente en el AIP, que somete a los átomos que lo componen a temperaturas de aproximadamente 6000 a 8000 grados Kelvin. Debido a ello, tiene lugar una disociación de moléculas casi completa, consiguiéndose una reducción significativa de interferencias químicas.

La elevada temperatura del plasma excita eficazmente la emisión atómica. La ionización de un elevado porcentaje de átomos produce un espectro de emisión iónica. El AIP proporciona una fuente óptimamente delgada, que no está sujeta a auto-absorción, excepto a concentraciones muy altas. De esta forma, se observan, para muchos elementos, recorridos dinámicos lineales de orden de magnitud cuatro a seis.

La excitación eficaz proporcionada por AIP da lugar a bajos límites de detección para muchos elementos. Esto, unido al extenso recorrido dinámico, permite una determinación multielemental eficaz de metales.

Reactivos y Patrones:

1. Ácido clorhídrico (HCl) concentrado.
2. Ácido nítrico (HNO₃) concentrado.
3. Ácido nítrico (HNO₃) 1:1. 500ml de HNO₃ concentrado + 400ml de agua diluyendo a 1L.
4. Soluciones patrón de reserva.
5. Patrones de calibración:
 - 5.1 Preparar patrones mixtos de calibración con las concentraciones adecuadas, combinando volúmenes apropiados de las soluciones de reserva en matraces volumétricos de 100ml. Añadir 2 ml de HNO₃ 1:1 y 10ml de HCl 1:1 y diluir con agua a 100ml.
6. Blanco de calibración: Diluir 2ml de HNO₃ 1+1 y 10ml de HCl 1+1 hasta 100ml empleando agua.
7. Patrón para control del instrumento: Combinar elementos compatibles a una concentración de 2mg/L.
8. Argón: Utilizar cantidad técnica o de soldador. Si hay problemas, utilizar prepurificado.

Instrumental:

1. Fuente de AIP
2. Espectrómetro

Procedimiento:

1. Se preparó la muestra reduciéndola para que pasara la malla No. 100 y luego se añadieron 3ml de ácido nítrico concentrado. Se evaporó teniendo cuidado que la muestra no se resecara.

Al enfriarse, se le añadieron 5ml más de ácido nítrico concentrado y se repitió la operación, se le fue añadiendo cantidades iguales de ácido hasta que el color de la muestra era pálido. Finalmente, al enfriarse de nuevo se le agregó 10ml de ácido clorhídrico concentrado y 15ml de agua. Esta solución se calentó para disolver cualquier posible precipitado o residuo. Luego, se dejó enfriar y se filtró.

2. Se introdujo la muestra al equipo y se hicieron las lecturas.

Los límites de detección para este método son 0.01% para los óxidos de aluminio, silicio, sodio, magnesio, hierro, calcio, titanio, manganeso y cromo; 0.03% para el óxido de fósforo y 0.05% para el óxido de potasio. Tiene una pérdida por ignición del 0.01% del total de la muestra.

3.5 Análisis térmico diferencial (DTA)

3.5.1 Descripción del método

Es un método cualitativo que mide la diferencia de temperaturas entre una sustancia y un material de referencia. El calentamiento de la muestra y del material debe ser de tal manera que la temperatura aumente linealmente con el tiempo, controlando la diferencia de temperaturas entre la temperatura de la muestra y la temperatura de referencia, esto representado nos dará un termograma diferencial.

El DTA depende de la detección del calor liberado o absorbido cuando un cambio de fase ocurre en una sustancia, la cual está siendo calentada.

En la práctica el aparato usado consisten un portador de especímenes dividido en dos compartimientos, el material bajo prueba en forma de polvo fino es situado en uno de ellos, al lado de este, en el compartimiento adjunto es colocado un material que no está sujeto a cambios de fase, el cual actúa como un material de referencia (comúnmente es alúmina).

El portador de especímenes está provisto de una serie de termocoplas para la medición de la temperatura del material inerte y también la temperatura diferencial entre el espécimen de referencia y la muestra a analizar.

Para lograr uniformidad de temperatura, el portador de especímenes se sitúa dentro de un bloque refractario cilíndrico, el cual se pone ajustado a un horno de tubo calentado eléctricamente.

El horno es controlado de tal manera que su temperatura se eleva uniformemente, de la temperatura ambiente al máximo deseado (usualmente 1000 – 1200 °C) a un rango constante de 10, 11 o 12 °C/min. Las temperaturas pueden ser registradas automáticamente sobre un registro gráfico.

Mientras la reacción no esté ocurriendo, la temperatura del material inerte será la misma que la del material a analizar, pero cuando una reacción que involucra un cambio de color, la temperatura del material analizado se desviará de la temperatura de la muestra inerte, de acuerdo a que sea una reacción exotérmica o endotérmica. Las termocoplas están arregladas de tal forma que miden la diferencia de temperatura. Si por lo tanto, la diferencia de temperatura es ploteada contra la elevación de temperatura, una inflexión ocurrirá siempre que un cambio de fase ocurra. La línea cero sobre la gráfica es la llamada línea de base y por supuesto la temperatura del material analizado tiende a regresar a esta línea después de un cambio de calor, debido a la disipación del calor en el ambiente.

De la gráfica es posible determinar claramente el signo del cambio del calor, la temperatura aproximada a que comienza el cambio, la magnitud de la inflexión o pico y la proporción aproximada del material reactivo.

La curva resultante es característica para cada material y constituye uno de los métodos analíticos más útiles, para la identificación de materiales cerámicos.

Instrumentación

Generalmente las cámaras de la muestra y de la diferencia en un aparato térmico diferencial están diseñadas para permitir que circule un gas inerte, tal como nitrógeno o un gas reactivo, tal como el oxígeno o aire (Ver

Figura 5).

Figura 5. Partes del aparato térmico diferencial

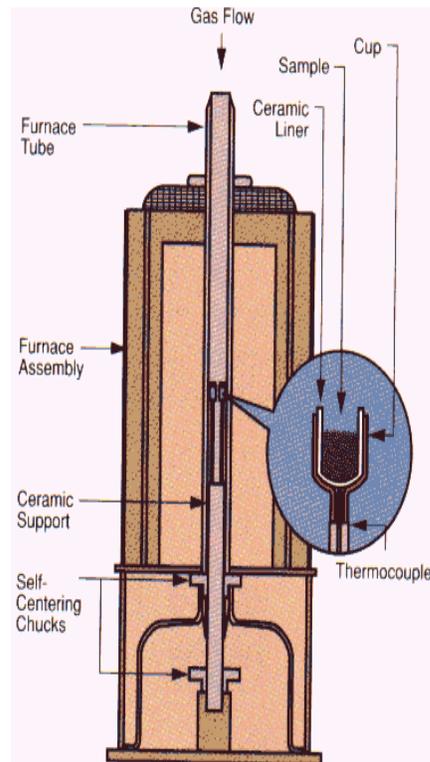


Figura 6. Esquema de un instrumento típico para el Análisis Térmico Diferencial

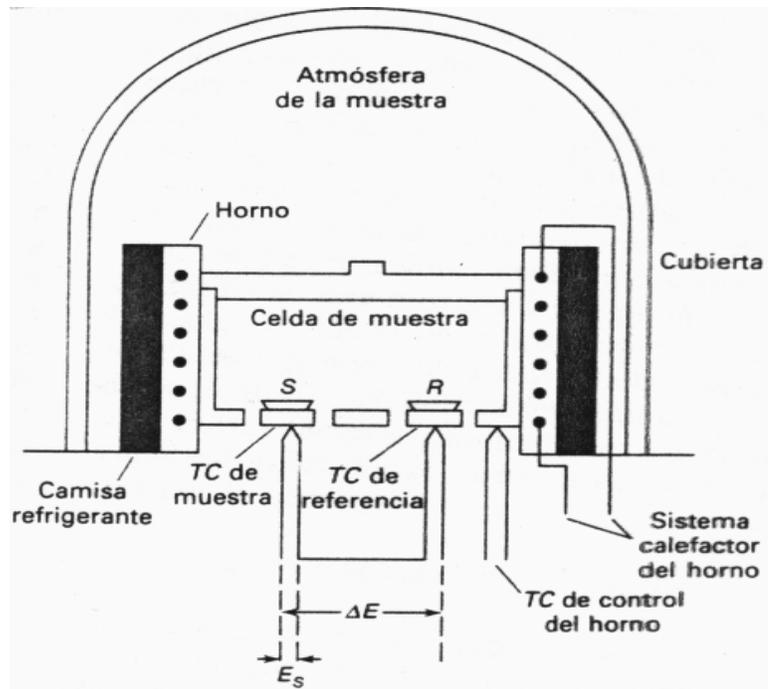


FIGURA 23-8. Esquema de un instrumento típico para análisis térmico diferencial (TC = temperatura).

PRINCIPIOS GENERALES

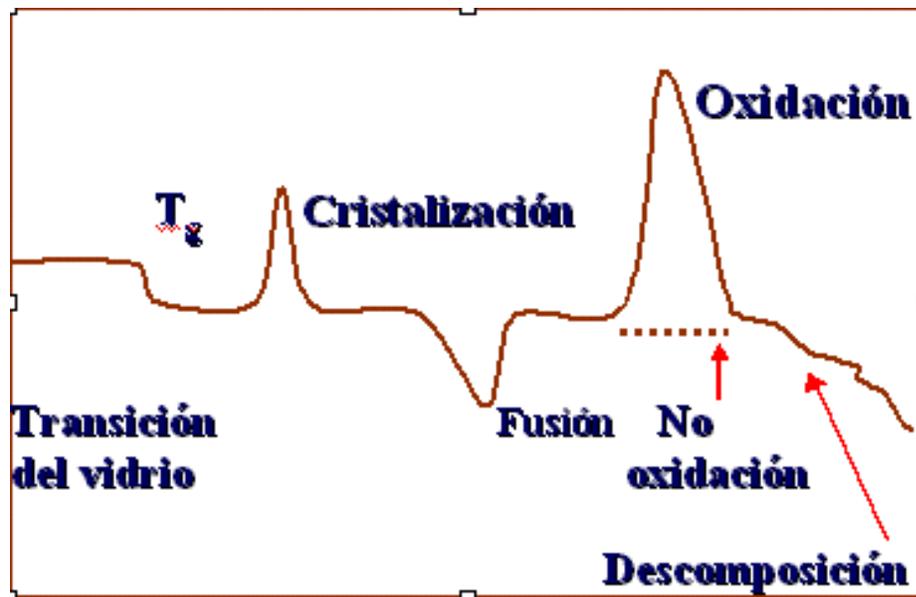
La Figura 7 muestra un termograma diferente ideal obtenido por el calentamiento de una sustancia en un intervalo de temperaturas para provocar su total descomposición. Observando la transición dependiendo de la temperatura cambiando las características de la sustancia. Donde los picos de análisis térmico diferencial resultan tanto de cambios físicos como de reacciones químicas inducidas por cambios de temperatura en la muestra.

Entre los procesos físicos que son endotérmicos se incluyen la fusión, la vaporización, la sublimación, la absorción y la desorción.

La absorción y la cristalización son generalmente exotérmicas. Las reacciones químicas pueden ser endotérmicas o exotérmicas.

Entre las reacciones químicas endotérmicas se encuentra la deshidratación, la reducción en una atmósfera inerte y la descomposición.

Figura 7. Termograma ideal



APLICACIONES

El análisis térmico diferencial encuentra amplia utilización en la determinación del comportamiento térmico y de la composición de productos naturales y manufacturados.

El número de aplicaciones es impresionante, el análisis térmico diferencial es una herramienta poderosa y ampliamente utilizada para el estudio y la caracterización de polímeros. También las medidas térmicas diferenciales han sido utilizadas en el estudio sobre el comportamiento térmico de compuestos inorgánicos puros al igual que de sustancias inorgánicas, tales como silicatos, ferritas, arcillas, óxidos, cerámicas, catalizadores y vidrios. La información la proporcionan procesos como la desolvatación por fusión, la deshidratación, la oxidación, la reducción, la adsorción y las reacciones en estado sólido.

Una de las utilidades más importantes del análisis térmico diferencial es la obtención de diagramas de fase y el estudio de transición entre fases y el estudio de transición entre fases.

El análisis térmico diferencial proporciona una manera más simple y exacta para determinar el punto de fusión, ebullición y descomposición de productos orgánicos, Generalmente los resultados son más consistentes y más reproducibles que los obtenidos con una placa caliente o con un tubo capilar.

3.6 Análisis Químico

3.6.1 Determinación de pH

Los cambios de pH ejercen una marcada influencia en la plasticidad. Muchas arcillas naturales rojas para ladrillos, arcillas grasas, y otras arcillas plásticas presentan acidez y muchos caolines de alfarería presentan alcalinidad.

Por adición de carbonatos sólidos a las arcillas ácidas y de ácido acético a las alcalinas su pH puede ajustarse a un valor óptimo en el cual la moldeabilidad es máxima.

El valor óptimo para las arcillas ácidas cae en el intervalo de pH de 6.0 a 6.5 en cuanto a las arcillas alcalinas esta comprendido el pH entre 7.3 y 10.5. El valor real debe determinarse independientemente para las arcillas individuales puesto que la moldeabilidad óptima se obtiene solo dentro de un pequeño intervalo de pH.

El pH óptimo para una arcilla dada se encuentra ensayando la arcilla original, y añadiéndose después gradualmente ácido o álcali, para llevar con esto la arcilla a la neutralidad.

Comprobando en cada caso la moldeabilidad a intervalos regulares pequeños. Debe mantenerse una comprobación constante del pH de una pasta establecida, dado que el pH del agua corriente puede variar de un día para otro.

Para la determinación de pH debe prepararse una disolución al 0.1 % de arcilla en agua y agitarla durante media hora con el propósito de disolver la mayor cantidad de componentes de este. Luego medir el pH.

3.6.2 Colorimetría

Al hacer pasar radiación con una intensidad I_0 por la capa L de una solución, una parte se refleja (I_r), otra se absorbe (I_a) y la tercera es transmitida (I_t).

$$I_o = I_r + I_a + I_t$$

Debido a que las celdas utilizadas para examinar la solución por determinar y la de comparación son iguales, la magnitud I_r se puede despreciar y por consiguiente I_a se puede determinar como diferencia.

$$I_a = I_o - I_t$$

Generalmente I_a se evalúa restando la magnitud I_t del flujo que ha pasado por la solución estudiada, de la magnitud I_o del flujo que ha pasado por la solución de comparación, cuya absorción se toma convencionalmente igual a cero. Como la solución de comparación con mayor frecuencia se utiliza un disolvente o una solución que contiene todos los reactivos a excepción del componente que se determina.

Las regiones del espectro electromagnético tienen diferentes energías que se asocian a transiciones distintas. En general, la absorción de luz visible o ultravioleta (UV) se asocia a transiciones electrónicas en una molécula, mientras que la absorción de luz infrarroja (IR) se asocia a cambios vibracionales y rotacionales. Cuando una especie absorbe radiación electromagnética la intensidad del rayo incidente se reduce al pasar a través de la muestra. Para una solución, en un largo de onda de luz incidente dado, la integral óptica o absorbancia, A , varía de acuerdo con la ley de Lambert-Beer:

$$-\log T = \log I_o / I_t = eLc = A$$

Donde,

I, I_0 = Intensidades de luz transmitidas por el disolvente puro y la solución con la sustancia que absorbe de concentración c , respectivamente.

L = largo del paso óptico de luz incidente sobre la muestra

e = Coeficiente de absortividad (coeficiente de extinción molar ϵ) de la especie que absorbe. Es una constante de proporcionalidad característica de cada sustancia.

El valor de e depende del largo de longitud de onda de la radiación utilizada para irradiar la muestra y es característica de cada especie química. Por lo tanto, la función de absortividad identifica la sustancia que absorbe.

Entonces, si la concentración de la sustancia absorbente se expresa en moles por litro y el espesor de la celda en centímetros, la magnitud del coeficiente de proporcionalidad se denomina coeficiente de extinción molar. El coeficiente de extinción molar es la característica principal de la absorción del sistema dado para una longitud de onda dada. Por tanto, para diferentes longitudes de onda, la absorción también es diferente ya que el coeficiente cambia.

3.7 Análisis físico

3.7.1 Contenido de humedad

Es importante conocer el contenido de humedad de las materias primas, no sólo para hacer las pertinentes correcciones en la pesada sino también, en el caso de las arcillas empleadas lo más aproximadamente posible en su condición natural, a fin de hacer el ajuste necesario para darles el contenido óptimo de agua.

Es también muy importante controlar el contenido de humedad en los materiales cerámicos preparados para moldeo, especialmente de los prácticamente secos.

Las muestras deben pesarse, secarse a 110°C, enfriarse en un desecador y pesarse de nuevo. Es más conveniente expresar el contenido de humedad como porcentaje del peso sobre la muestra seca, pero como no siempre se hace así debe indicarse el método adoptado.

$$\%H = [(Peso\ húmedo - Peso\ seco)/Peso\ seco] \times 100$$

Un control de rutina adecuada puede requerir frecuentemente toma y ensayo de muestras, quizás hasta con frecuencia de cada diez minutos.

3.7.2 Densidad relativa -gravedad específica-

La densidad relativa, definida por la relación de la densidad del material a la del agua a 4°C, es un número abstracto y no requiere conversión de unidades a otras. Es numéricamente igual a la densidad cuando se expresa en gramos por centímetro cúbico (g/cm³).

La densidad relativa, tanto de polvos como de sólidos en trozo grueso, pueden determinarse por métodos físicos normales. Los polvos muy finos tienden a ocluir aire y es preciso someterlos al vacío antes de introducir el agua. La densidad relativa es también una medida de cocción a muerte de la magnesita sinterizada y se usa como comprobación. Las medidas de la densidad relativa se emplean más extensamente para el control de los productos cocidos.

El valor de la gravedad específica es necesario para calcular la relación de vacíos de un suelo, y se define como el peso unitario del material dividido por el peso unitario del agua destilada a 4 °C.

El recipiente de volumen conocido es el frasco volumétrico el cual mide un volumen patrón de agua destilada a 20 °C. A temperaturas mayores, el volumen será ligeramente mayor y a temperaturas menores, menor.

Como el cambio sufrido en el volumen es pequeño para desviaciones de temperaturas pequeñas en el fluido, y además es relativamente fácil mantener la temperatura de ensayo cercana a los 20 °C, es posible aplicar una corrección aproximada de temperatura para desviaciones pequeñas de estas en los cálculos del ensayo, que permita una aproximación satisfactoria sin necesidad de recurrir a determinar experimentalmente el cambio en el contenido volumétrico del frasco con la temperatura.

Como el método de trabajo del laboratorio utiliza un matraz volumétrico, es un método indirecto.

Procedimiento

- a. Pesar un matraz volumétrico de 250ml, limpio y seco.
- b. Colocar dentro del matraz 120g de la muestra, tamizada por la malla 100 y pesarlo.
- c. Aforado con agua destilada a temperatura conocida, pesar el matraz.
- d. Mezclar los 120g de muestra con agua y aforar el matraz. Pesarlo nuevamente.

3.7.3 Determinación de la plasticidad

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una cubierta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento.

Generalmente, esta plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg, Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Contracción. Estos límites marcan una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso (Jiménez Salas, et al., 1975). El límite plástico es el contenido de humedad por debajo del cual la muestra pasa de un estado semisólido a un estado plástico y el límite líquido es el contenido de humedad expresado en por ciento con respecto al peso seco de la muestra, con el cual la muestra cambia de líquido a plástico. A este nivel de contenido de humedad la muestra está en el vértice de cambiar su comportamiento al de un fluido viscoso.

La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla.

Existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla, e incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión de cambio. En gran parte, esta variación se debe a la diferencia en el tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal.

En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.

Los ensayos de límites de Atterberg deben hacerse sobre suelos tamizados a través de la malla No. 40. Para determinar el límite líquido se utiliza un aparato denominado *copa de Casagrande*, en el cual se coloca una cantidad de pasta de arcilla y se le hace una ranura, luego se golpea la copa con la finalidad de contar el número de golpes necesarios para que la ranura hecha se cierre. El límite plástico se ha definido arbitrariamente como el contenido de humedad del suelo al cual un cilindro se rompe o se resquebraja, cuando se enrolla a un diámetro de 3mm. Esta prueba es bastante subjetiva pues la definición de la ruptura está sujeta a la interpretación de quien realice el ensayo.

El límite superior de plasticidad o límite líquido es el contenido de humedad en el cual un suelo comienza a fluir bajo la acción de una fuerza aplicada. En la medida que el contenido de humedad en el suelo aumenta (rango húmedo), la tensión superficial por unidad de área disminuye, de manera tal que no se compensa el incremento en área de contacto entre partículas y se ocasiona un decrecimiento en la consistencia del suelo.

Al estar el suelo saturado la tensión superficial deja de existir y el suelo fluye. Estas relaciones sólo se dan en suelos que tienen contenido de arcilla suficientes para hacer que la atracción molecular sea efectiva. La atracción molecular del limo y la arena es insignificante.

A. Límite líquido

Equipos y materiales

Tamiz de 2 mm

Cuchillo

Aparejo mecánico "Casa Grande"

Ranurador

Cápsula de metal

Balanza

Estufa

Vaso de precipitado

Procedimiento

- a. Tamizar 150-200 g de suelo y colocarlos en un vaso de precipitación, agregar agua hasta obtener una masa fácilmente moldeable, removiendo constantemente la mezcla con un cuchillo.
- b. Colocar en el fondo de la copa del aparejo "Casa Grande" una porción de la pasta de suelo, hasta que alcance un espesor de aproximadamente 1 cm, al mismo tiempo que se va alisando con el cuchillo la superficie de la muestra.
- c. Con el ranurador y en sentido longitudinal se corta en dos partes iguales la pasta de suelo, de tal manera que queden separadas aproximadamente 2 mm en el fondo de la copa.
- d. Activar el mecanismo del aparejo a una velocidad aproximada de dos revoluciones por segundo (golpes), hasta lograr que las dos porciones se unan.

Si esto se logra después de un número de golpes (12-38), se procede a recoger el suelo y colocarlo en el recipiente metálico, se pesa y se traslada a una estufa (110 °C) hasta obtener el porcentaje de humedad del suelo.

- e. Repetir el proceso hasta tener al menos uno o dos valores por encima o por debajo de 25 golpes. Si la muestra se une antes de los 12 golpes, se toma y se coloca nuevamente en el vaso de precipitado agregándole suelo. Si se une después de los 31 golpes se agrega agua.

Cálculos

$$\text{LSP} = (\text{PSH25} - \text{PSS25})/\text{PSS25}$$

Donde:

LSP: límite superior de plasticidad (%).

PSH25: peso del suelo húmedo (g) a 25 golpes.

PSS25: peso del suelo seco (g) a 25 golpes.

Se expresa como porcentaje del contenido de humedad, de forma gravimétrica en el suelo.

B. Límite líquido

El límite inferior de plasticidad marca la transición entre la consistencia plástica y la friable y es el contenido máximo de humedad, en el cual el suelo puede manejarse sin deteriorar sus propiedades físicas. También se define como el momento cuando el contenido de humedad en el suelo permite que éste se deje amasar en cilindros de 3 a 4 mm de diámetro y de 5 a 6 cm de longitud, sin desmenuzarse.

Cuando se toma una capa continua de moléculas de agua de hidratación de los cationes absorbidos entre las láminas de arcilla, facilita el desplazamiento de unas sobre otras, sin permitir su separación

Equipos y materiales

Lámina de vidrio

Balanza

Estufa

Cápsula de metal

Tamiz de 2 mm

Procedimiento

1. Tamizar 15-20 g de suelo por 2 mm de abertura.
2. Amasar y formar cilindros de 3 mm de diámetro, aproximadamente. Deslizar con la mano sobre un vidrio el cilindro de suelo. En el momento que se produzca su resquebrajamiento, determine la humedad del suelo. Este valor representa el límite inferior de plasticidad.

Cálculos

$$\text{LIP} = (\text{PSH} - \text{PSS}) / \text{PSS} \times 100$$

Donde:

LIP: límite inferior de plasticidad (%)

PSH: peso del suelo húmedo (g)

PSS: peso del suelo seco (g)

Se expresa como porcentaje del contenido de humedad, de forma gravimétrica. El suelo adquiere la capacidad de ser moldeado y mantiene su forma después que la presión deformable ha cesado, o representa el contenido de humedad máximo en el cual un suelo puede manejarse sin deteriorarse su estructura.

3.7.4 Análisis granulométrico, método del hidrómetro

El análisis del hidrómetro es un método ampliamente utilizado para obtener un estimado de la distribución granulométrica de suelos y materiales cuyas partículas se encuentran desde el tamiz No. 200 (0.075mm) hasta alrededor de 0.001mm.

Los datos se presentan en un gráfico semilogarítmico de porcentaje de material más fino contra diámetro de los granos y puede combinarse con los datos obtenidos en el análisis mecánico del material retenido, o sea mayor que el tamiz No. 200.

El principal objetivo del análisis del hidrómetro es obtener el porcentaje de arcilla (porcentaje más fino que 0.002mm) ya que la curva de distribución granulométrica cuando más del 12% del material pasa a través del tamiz No. 200 no es utilizada como criterio dentro de ningún sistema de clasificación de suelos y no existe ningún tipo de conducta particular del material que dependa intrínsecamente de la forma de dicha curva. La conducta de la fracción de suelo cohesivo del suelo dado depende principalmente del tipo y porcentaje de arcilla de suelo presente, de su historia geológica y del contenido de humedad más que de la distribución misma de los tamaños de partícula.

El análisis del hidrómetro utiliza la relación entre la velocidad de caída de esferas en un fluido, el diámetro de la esfera, el peso específico tanto de la esfera como del fluido, y la viscosidad del fluido.

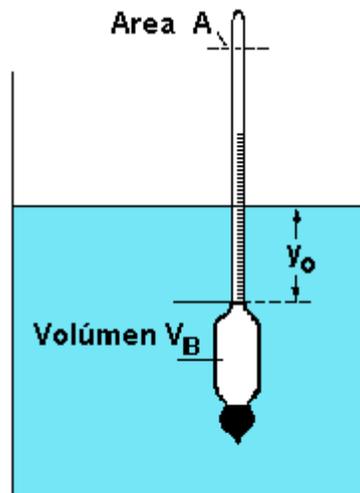
Para obtener la velocidad de caída de las partículas se utiliza el hidrómetro. Este aparato se diseñó para medir la gravedad específica de una solución, pero alterando su escala se puede utilizar para leer otros valores.

Al mezclar una cantidad de material con agua y un pequeño contenido de un agente dispersante para formar una solución de 1000cm^3 , se obtiene una solución con una gravedad específica ligeramente mayor que 1.000. El agente dispersante, defloculante, se añade a la solución para neutralizar las cargas sobre las partículas más pequeñas de suelo, que a menudo tienen carga negativa. Con orientación adecuada, estos granos cargados eléctricamente se atraen entre sí con fuerza suficiente para permanecer unidos, creando así unidades mayores que funcionan como partículas. De acuerdo con la ley de Stokes, estas partículas mayores sedimentarán más rápidamente a través del fluido que las partículas aisladas. El hexametáfosfato de sodio, también llamado metafosfato (NaPO_3), y el silicato de sodio o vidrio líquido (Na_3SiO_3), son dos materiales usados muy a menudo como agentes dispersores para neutralizar la carga eléctrica de las partículas de suelo. Una cantidad de 125cm^3 de solución al 4% de hexametáfosfato de sodio en los 1000cm^3 de suspensión de agua-suelo se consideran adecuados. Si la suspensión se aclara en un tiempo muy corto, 2 o 3 horas, la cantidad de agentes dispersantes debería ser mayor o utilizarse un tipo diferente, pues un suelo con cantidad apreciable de partículas de tamaño de arcillas permanecería muy turbio por varios días.

El hidrómetro (Figura 8) usado más comúnmente es el tipo 152H y está calibrado para leer G del suelo de un valor de gravedad específica de 2.65 en 1000cm^3 de suspensión siempre que no haya más de 60g de suelo en la solución. La lectura por consiguiente está relacionada directamente con la gravedad específica de la solución.

Este aparato determina la gravedad específica de la suspensión agua-suelo en el centro del bulbo. Todas las partículas de mayor tamaño que aquellas que se encuentren aún en suspensión en la zona mostrada como L (la distancia entre el centro de volumen del bulbo y la superficie del agua) habrán caído por debajo de la profundidad del centro de volumen del hidrómetro. Además es obvio que como el hidrómetro tiene un peso constante a medida que disminuye la gravedad específica de la suspensión, el hidrómetro se hundirá más dentro de la suspensión, aumentando así la distancia L . Es preciso recordar también, que la gravedad específica del agua decrece a medida que la temperatura aumenta de 4°C . Esto ocasiona adicionalmente un hundimiento mayor del hidrómetro dentro de la suspensión.

Figura 8. Hidrómetro 152H



Equipo

Balanza digital.

Cronómetro

Horno

Batidor mecánico

Hidrómetro

Probeta de 1000 cm³

Termómetro

Procedimiento

1. Se toma una porción de material de 500 gr aproximadamente y se somete a un proceso de lavado con agua por la malla # 200, el material retenido (arena) se mete al horno por 24 horas y posteriormente obtener su granulometría.
2. El material que pasa la malla #200 (finos) se deja reposando en el recipiente donde se realiza el lavado con agua durante 24 horas, para después sacarle el agua y dejarlo en el horno durante 48 horas.
3. Se toman 50gr de finos y se dejan saturar en un frasco con 20 ml. de hexametáfosfato de sodio al 4% durante 1 hora. (40gr de metafosfato en 1 litro de agua).
4. Se calibra el hidrómetro a utilizar en la prueba.
5. En un mezclador mecánico se revuelve la suspensión formada anteriormente.
6. Se vierte la suspensión en una probeta y se agrega agua destilada hasta la marca de 1000cm³.
7. Con la mano se obtura la boca de la probeta y se agita vigorosamente durante un minuto, haciéndola girar 180 o en un plano vertical.
8. Se coloca cuidadosa, pero rápidamente la probeta en una mesa firme, se pone en marcha el cronómetro y poco a poco se sumerge el hidrómetro hasta que comience a flotar. Se toman lecturas en el hidrómetro a los 2, 5, 10, 15, 30 y 60 minutos, al igual que la lectura del termómetro.
9. Repetir el paso 8 hasta obtener dos juegos de datos concordantes.
10. Una vez se haya logrado concordancia en los datos, tomar medidas adicionales a las 3, 18 y 19 horas.

El hidrómetro y el termómetro deben retirarse de la suspensión después de cada lectura para que no tenga influencia en el proceso de decantación de las partículas y el hidrómetro debe permanecer en una probeta de agua limpia que se coloca junto a la de sedimentación, de manera que el hidrómetro se encuentre a la misma temperatura. El vástago del hidrómetro deberá limpiarse con papel absorbente antes de cada lectura.

4. RESULTADOS

El lugar de la extracción de muestras (Figuras 18 – 20, Anexo 1) está ubicado en el kilómetro 32 de la carretera CA-9, en el departamento de El Progreso. Las muestras fueron extraídas de la unidad denominada capas rojas, la cual a su vez está constituida por rocas sedimentarias clásticas de color rojo, principalmente, lutitas y limonitas fósiles, con finas vetas de calcita.

Estas capas rojas afloran en pequeñas cantidades en el suroeste del Departamento El Progreso, en la provincia Serranías del Sur.

En la actualidad las rocas de esta unidad son utilizadas en la fabricación de pisos cerámicos, ladrillos y otras aplicaciones del mismo tipo.

En la muestra de arcilla en estudio, se determinó la presencia en porcentaje de silicio (Si), aluminio (Al), hierro (Fe), calcio (Ca) y magnesio (Mg), a través de distintos métodos de análisis químico cuantitativo. Los análisis realizados a la muestra de arcilla fueron,

- Espectrofotometría de absorción atómica (AA)
- Fluorescencia de rayos X (XRF)
- Método de acoplamiento inductivo de plasma (ICP)
- Vía húmeda (VH)
- Determinación de pH

Así mismo, se realizaron las pruebas químicas cualitativas,

- Análisis térmico diferencial (DTA)
- Colorimetría

Se realizaron ensayos para determinar las siguientes características físicas de la muestra de arcilla:

- Contenido de humedad
- Densidad relativa
- Determinación de la plasticidad
- Granulometría

Los resultados se presentan a continuación:

4.1 Análisis químico cuantitativo

Tabla IV. Resultados obtenidos en el análisis químico cuantitativo realizado a la muestra de arcilla en estudio

Método	Cación				
	Silicio	Aluminio	Hierro	Calcio	Magnesio
	% peso				
AA	24.33	8.19	4.74	4.22	1.22
XRF	26.58	8.19	4.60	5.67	0.86
ICP	26.52	7.36	3.79	5.95	0.78
VH	27.34	1.04	3.57	8.13	1.12

En el anexo 2, se encuentran los datos originales de cada análisis.

La determinación por espectrofotometría de absorción atómica, fue realizada en el Laboratorio Técnico del Ministerio de Energía y Minas, la fluorescencia de rayos X, en el Laboratorio Técnico de Cementos Progreso, Planta San Miguel. En BSI Inspectorate America Corporation, se realizó el análisis por ICP y en el Centro de Investigaciones del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se llevó a cabo la determinación por vía húmeda.

Figura 9. Comparación entre las técnicas utilizadas en función del elemento analizado.

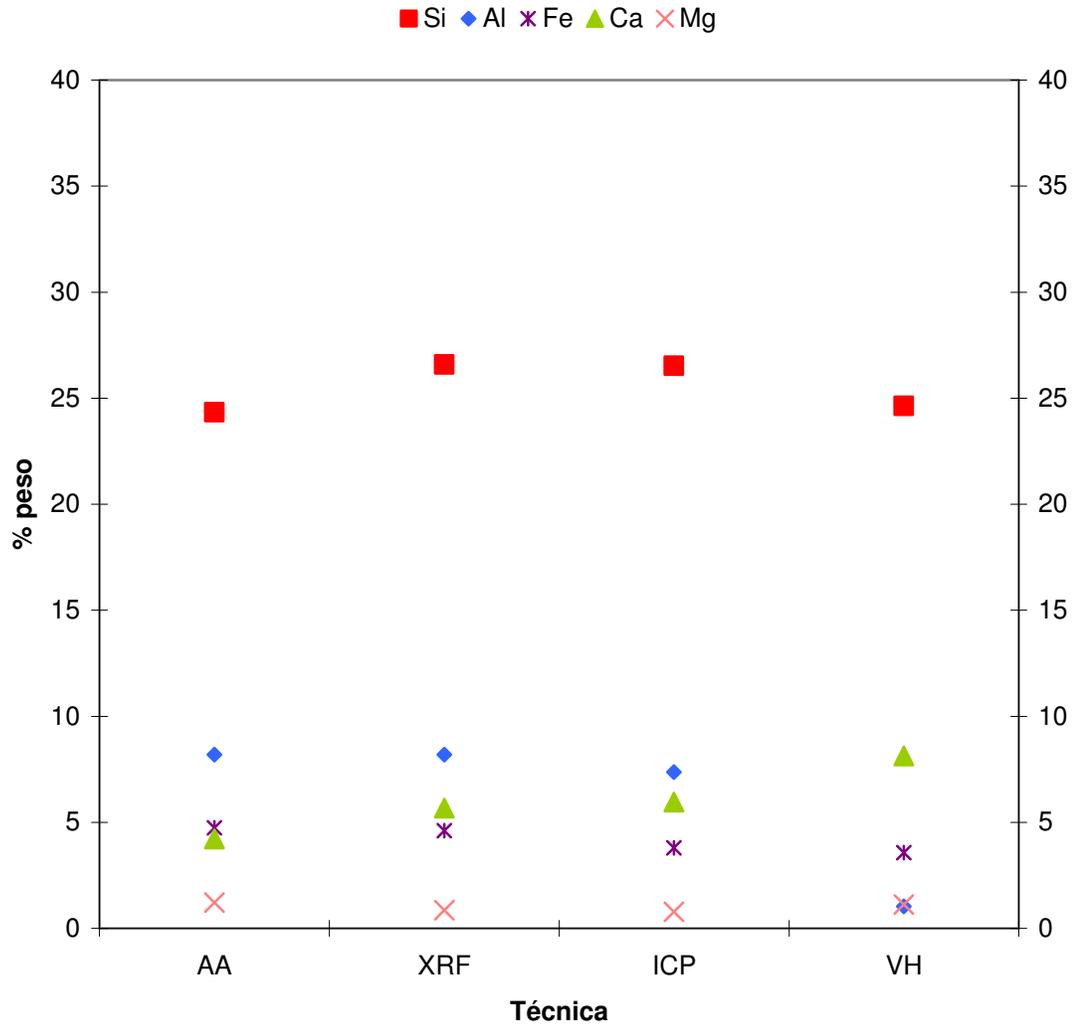
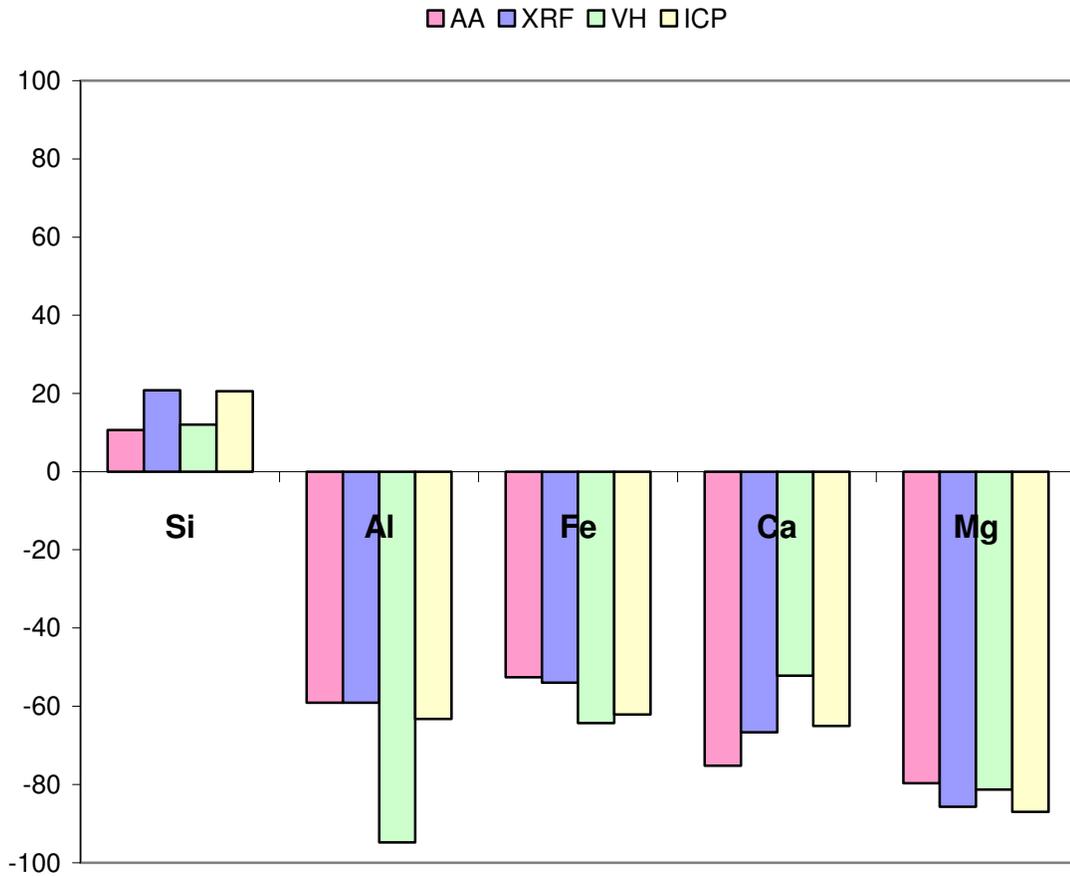


Figura 10. Comparación entre técnicas mostrando la exactitud obtenida en base al porcentaje ideal de contenido en la muestra de arcilla.



4.2 Análisis químico cualitativo

4.2.1 Colorimetría

Lugar donde se realizó el ensayo: Laboratorio de Fisicoquímica, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de San Carlos de Guatemala

Fecha de realización: 15 de abril de 2005

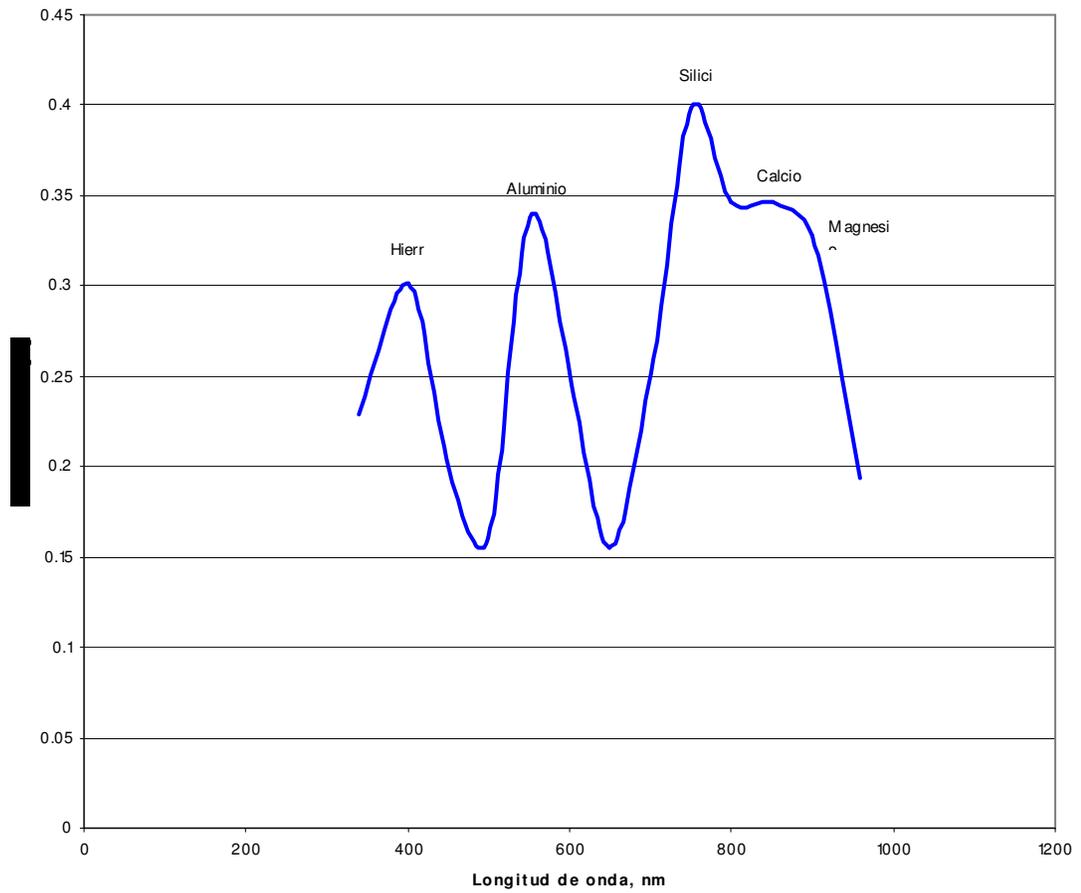
Equipo utilizado: Espectrofotómetro Spectronic 20 de Bausch & Lomb.

Se preparó una solución de con la muestra de arcilla al 0.1% en peso en 250ml de agua. Para hacer el análisis se tomaron 9ml de la misma.

Tabla V. Porcentaje de absorbancia obtenida para la muestra de arcilla en estudio

Longitud de onda (λ)	% Absorbancia	Longitud de onda (λ)	% Absorbancia
340	0.22914	700	0.25181
400	0.30103	750	0.39794
450	0.20066	800	0.34679
500	0.16115	850	0.34679
550	0.33724	900	0.32790
600	0.25181	960	0.19382
650	0.15490		

Figura 11. Curva colorimétrica para la muestra de arcilla analizada.



4.2.2 Análisis térmico diferencial (DTA)

Este ensayo, tenía previsto ser realizado en el Laboratorio de Control de Calidad de Incesa Estándar, S.A. el 28 de Mayo de 2005. El analizador térmico diferencial que se encuentra en este laboratorio es el único en Guatemala y es a nivel privado.

La aplicación de la técnica es muy sencilla, como se describió en la sección 3.5. En el ensayo realizado, la curva resultante muestra luego de los 400 °C una depresión lo cual se interpreta como la formación de la metacaolinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) como consecuencia de la deshidratación del material. Luego de los 600 °C, se esperaría que la curva mostrara la descomposición de la metacaolinita y de los 900 °C en adelante la formación la mullita, $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. La curva obtenida no muestra el comportamiento típico de una arcilla (Figura No. 9), esto debido a que el equipo se mantuvo fuera de uso durante un tiempo muy prolongado, sin mantenimiento, teniendo que los resultados de este método no fueron concluyentes, reflejando las gráficas obtenidas (Ver Figuras 10-12) fallas en el equipo.

Estas curvas deberían mostrar una línea recta de 0 a 400 °C aproximadamente, lo que reflejaría la deshidratación de la muestra.

A partir de los 350 °C hasta 600 °C se observa un decaimiento en la curva lo cual puede interpretarse como una falla en el calentador y termocopla, pues, una reacción exotérmica que se refleja igualmente, no puede darse a esta temperatura pues es a partir de los 450 °C, cuando una arcilla típica con alto contenido de sílice, recién comienza a reaccionar.

A los 600°C, la curva refleja un enfriamiento y un posterior calentamiento que normalmente no debería suceder si el equipo funcionara adecuadamente, observando el mismo comportamiento antes de los 800°C.

El procedimiento se realizó tres veces haciendo ajustes de frecuencia y voltaje, obteniendo el mismo resultado.

Figura 12. Curva típica para una arcilla obtenida en un analizador térmico diferencial

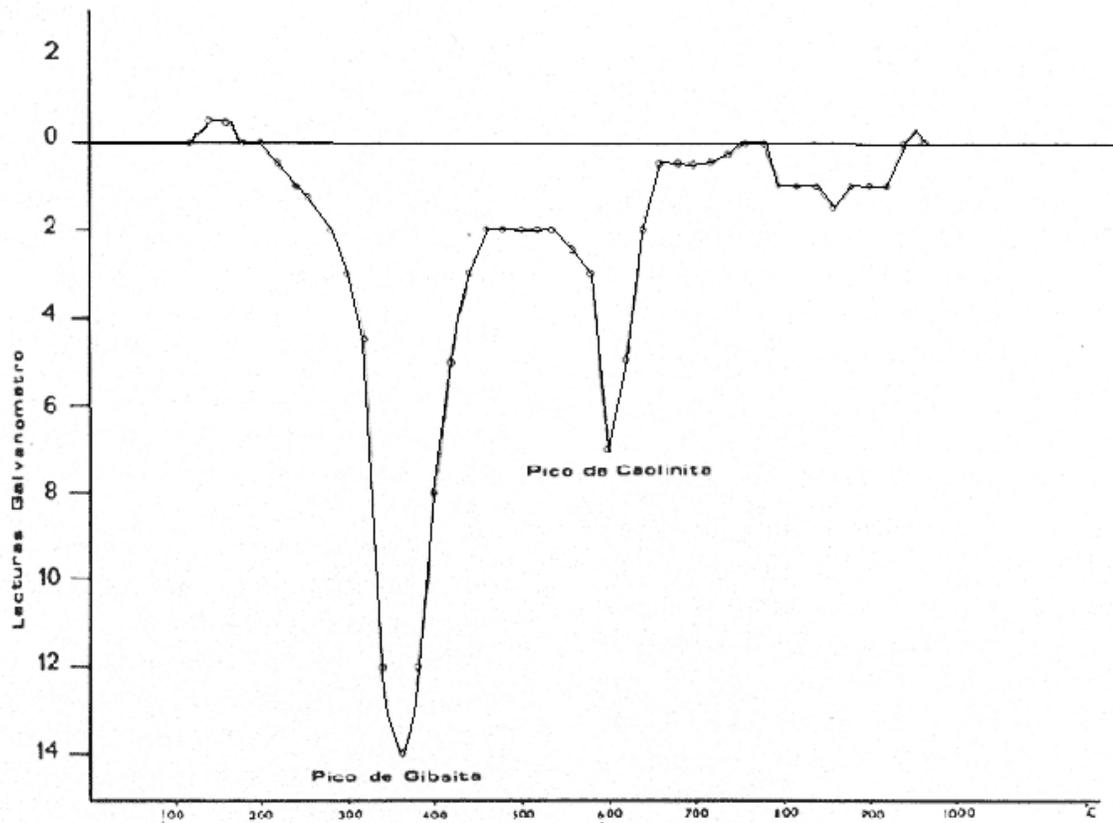


Figura 13. Curva obtenida del analizador térmico diferencial con una amplitud de 10mV

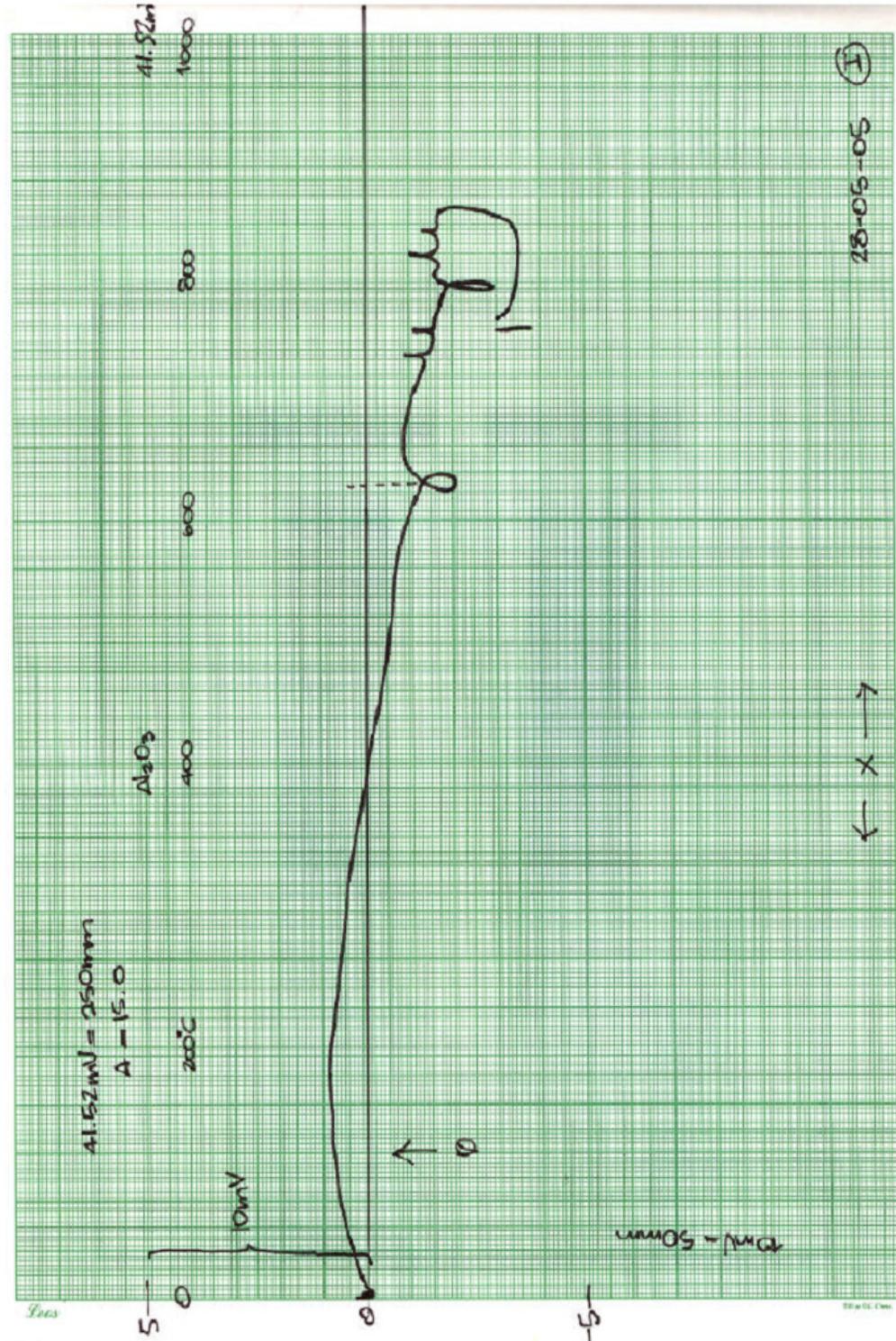


Figura 14. Curva obtenida del analizador térmico diferencial con 20% de aumento en la amplitud.

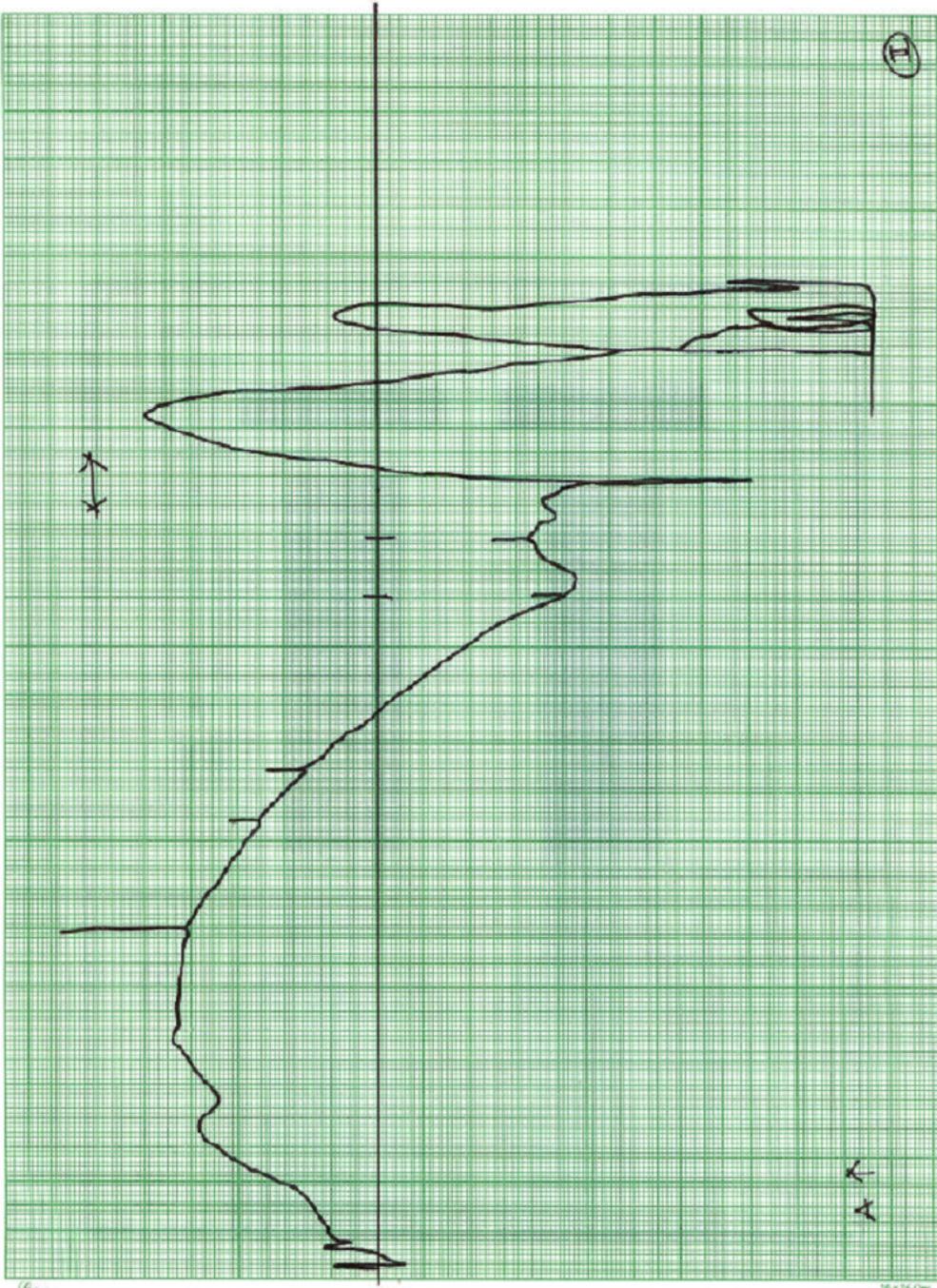


Figura 15. Curva obtenida del analizador térmico diferencial con 15% de aumento en la amplitud.

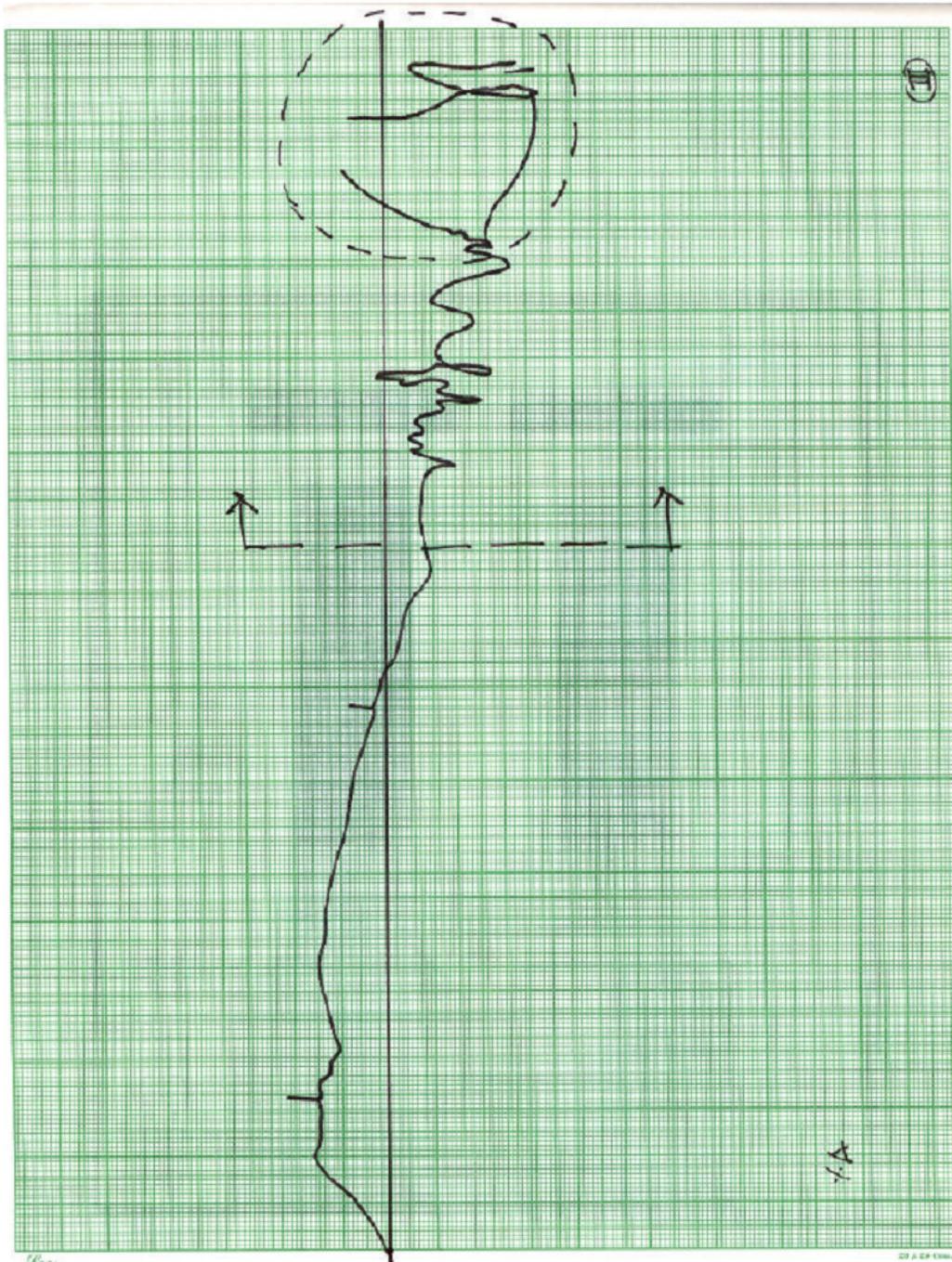
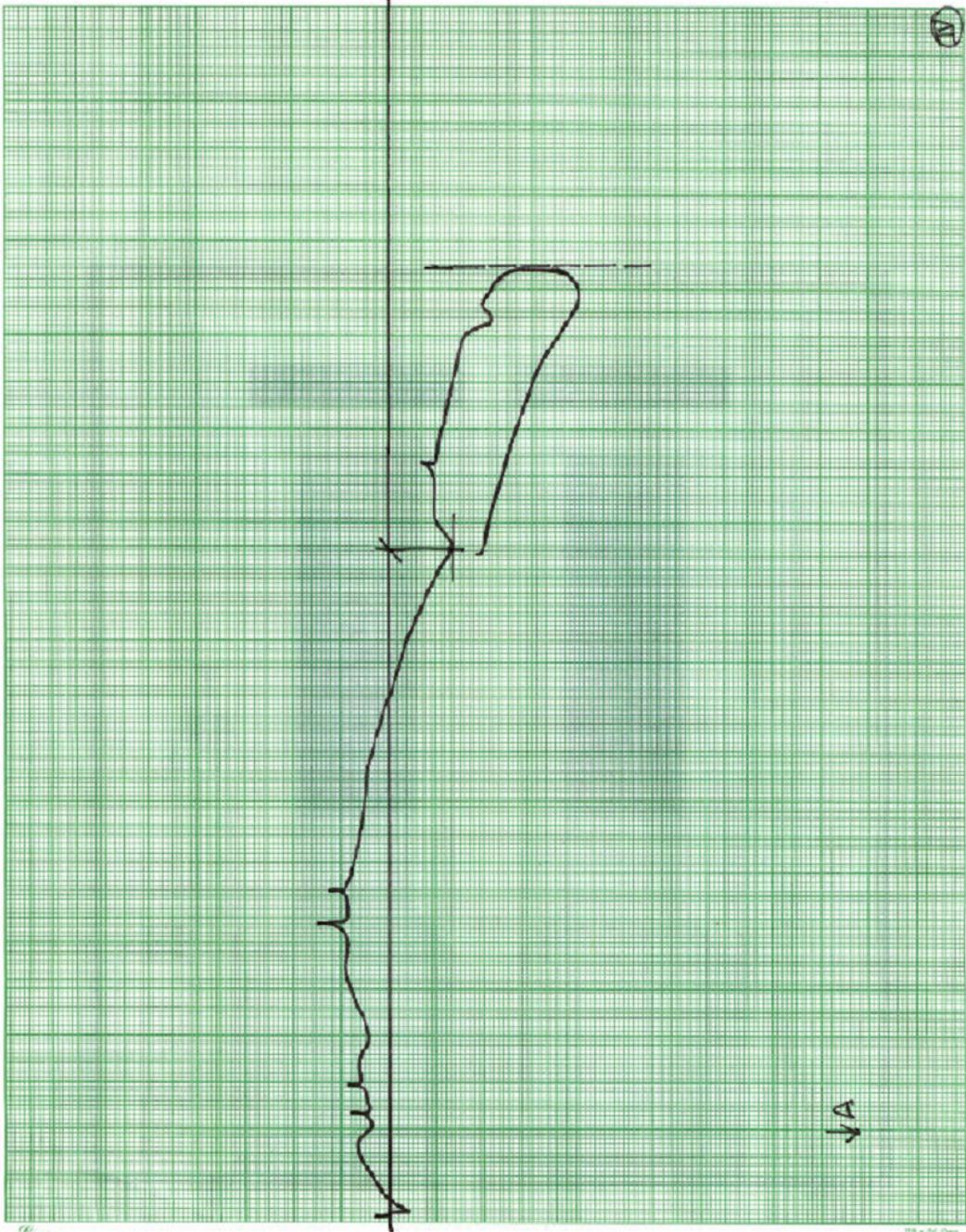


Figura 16. Curva obtenida del analizador térmico diferencial con 5% de disminución en la amplitud.



4.2.3 Determinación de pH

Lugar donde se realizó el ensayo: Laboratorio de Fisicoquímica, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de San Carlos de Guatemala

Fecha de realización: 15 de abril de 2005

Se agitó la solución de arcilla durante tres horas, tomando el pH de la misma a intervalos de media hora.

Tabla VI. pH de la arcilla en estudio.

Tiempo (min)	pH
30	8.9
60	8.9
90	8.9
120	8.9
180	8.9

4.3 Análisis físico

Lugar donde se realizaron los ensayos: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala

Fecha de realización: 1 al 4 de marzo de 2005

Los ensayos para determinar la plasticidad se realizaron según las normas AASTHO T-89 y T-90. Gravedad específica según la AASTHO T100-70 y para la determinación de la granulometría por sedimentación se siguió la norma ASTM D421-58 y D422-63.

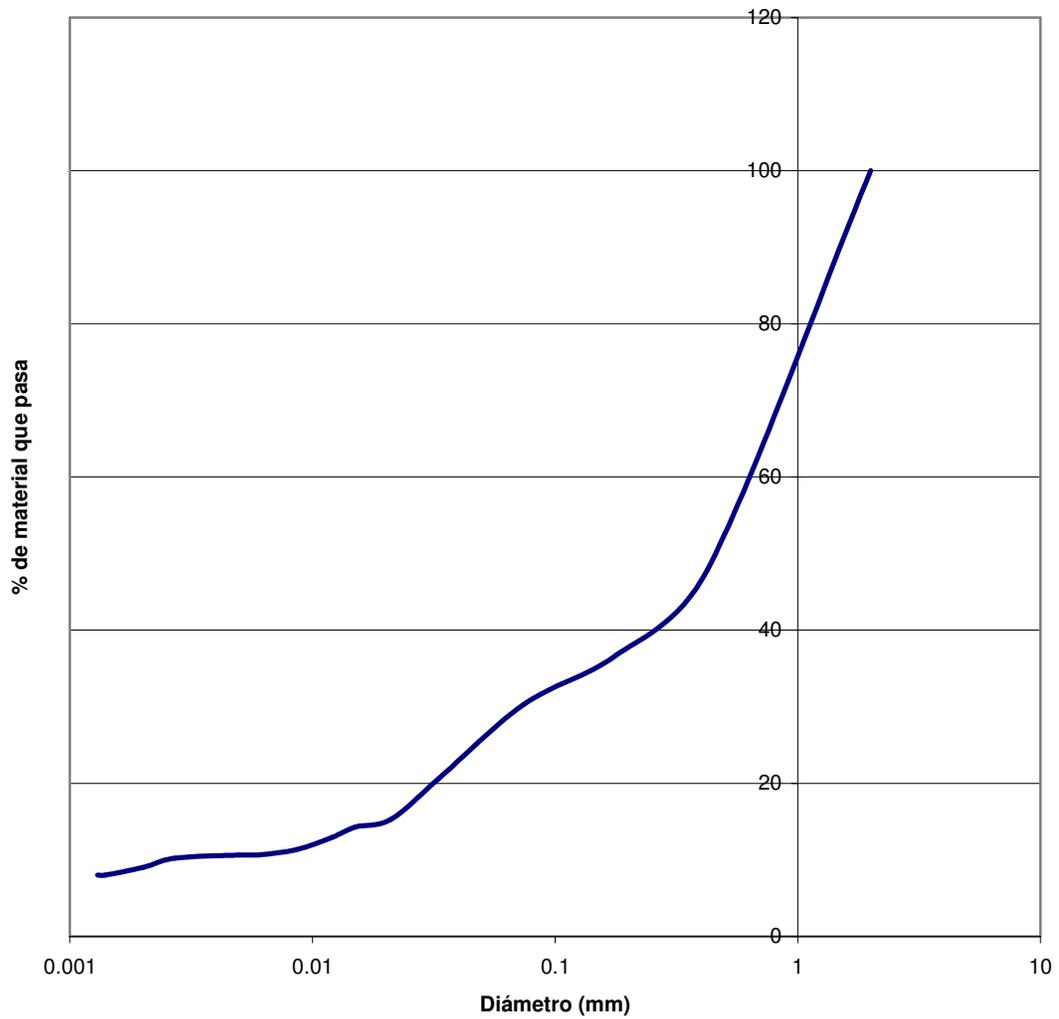
Tabla VII. Resultados de los ensayos de plasticidad, contenido de humedad y contenido de humedad realizados en la muestra de arcilla.

Plasticidad	Límite líquido (LL)	24.96 %
	Límite Plástico (LP)	17.45 %
	Índice de plasticidad(IP)	7.51 %
Gravedad Específica	2.9973	
Contenido de Humedad	4.4%	

Tabla VIII. Resultados del ensayo de granulometría por sedimentación.

Diámetro (mm)	% que pasa a través de la malla No. 200
2	100
0.4242	47.88
0.1778	36.71
0.074	30.29
0.033	20.55
0.021	15.28
0.015	14.28
0.012	12.94
0.0086	11.34
0.0061	10.67
0.005	10.65
0.0027	10.21
0.002	9.03
0.0014	8.01
0.013	8.01

Figura 17. Curva granulométrica de la muestra de arcilla en estudio.



5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La arcilla es roca sedimentaria descompuesta que se ha formado bajo el calor y la presión y tiene su origen en rocas feldespáticas. La acción del sol, viento, lluvia, aire y el agua, rompen esas rocas en partículas cada vez más pequeñas que son transportadas por inundaciones y depositadas en lagos, campos, pantanos y lagunas. Los cambios de la corteza terrestre, en el transcurso de los años, exponen depósitos de estas arcillas que se encuentran con frecuencia en las márgenes empinadas de los ríos y en las laderas de las montañas.

La arcilla recolectada para este estudio corresponde a un tipo de *arcilla sedimentaria*, que es de aquellas que han sido transportadas de su lugar de origen por el agua y se han mezclado en el proceso con otros ingredientes. Con frecuencia esta clase de arcillas son más plásticas que las *residuales*, que son las que se encuentran en el sitio o cerca del sitio de la roca madre, debido a sus impurezas y granos más finos. Las arcillas residuales, como no ha sido llevada lejos de su lugar de origen, contiene menos impurezas.

Esta arcilla es un compuesto de los elementos silicio, Si y aluminio, Al, con agua químicamente combinada.

Puesto que el silicio y el aluminio se encuentran generalmente en combinación con el oxígeno, como óxidos, se les llama sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3).

La arcilla es conocida en química como un silicato hidratado de alúmina. La arcilla pura es una combinación de una molécula de alúmina, dos moléculas de sílice y dos de agua: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Esta agua no es la que se añade para hacer plástico el material. La arcilla totalmente seca ha perdido el agua que le da plasticidad pero tiene aun su agua química. Por lo general la arcilla pura no se usa para la manufactura de utensilios. Se le combina con otros materiales cerámicos para darles las cualidades necesarias para ciertos productos pero manteniendo un estándar ideal de contenido mineralógico primario.

También, forma parte de la arcilla que más abunda en el mundo, es la que aparece en la superficie o muy cerca de ella. En su estado natural puede ser roja, café, amarilla, verde, azul o negra. Después de la cocción estas arcillas son rojas o café-rojizas. Mientras más elevado el fuego más oscuro será el color, típicamente es muy plástica, de hecho con frecuencia puede resultar demasiado plástica para usarla sin tener que añadirle arena, lodo o arcillas gruesas. Las arcillas superficiales se endurecen a una temperatura aproximada de 1350 a 1650°F, o sea el punto más alto que el fuego puede alcanzar. Estas arcillas fueron las que usaron los primeros alfareros y todavía se usan para hacer ollas de cocina, macetas, estufas, hornos, tabiques, ladrillos, azulejos y alfarería artística.

Algunas de las técnicas conocidas incluyen numerosas aplicaciones de la fluorescencia y difracción de rayos X, espectrofotometría, microscopía óptica y otras y, de esta gran variedad, que a la fecha existe de técnicas, métodos y aplicaciones para la caracterización química de materiales, se seleccionaron cinco, por ser las únicas en nuestro medio posibles de realizar.

Las metodologías utilizadas para la caracterización de arcillas escogidas para este estudio comparativo fueron, espectrofotometría de absorción atómica (AA), fluorescencia de rayos X (XRF), acoplamiento inductivo de plasma (ICP) y vía húmeda o gravimétrico (VH).

En el caso del método ICP, en el presente estudio se llevó a cabo el análisis de roca completa (whole rock análisis), el cual analiza la muestra exclusivamente para la obtención de los óxidos de silicio, aluminio, hierro, magnesio, calcio, sodio, potasio, titanio, fósforo, manganeso y cromo. Estas aplicaciones mostraron resultados muy similares.

El Gráfico 1 muestra la comparación en las técnicas utilizadas en función del elemento analizado y se observa una relación muy cercana entre los resultados obtenidos. Existe un porcentaje ideal en cuanto al contenido mineralógico de una arcilla en la fabricación de ladrillos y corresponde¹, en elementos, a 22% silicio, 20% aluminio, 10% hierro, 17% calcio y 6% magnesio.

Tomando como base este contenido básico ideal, en el Gráfico 2 es posible observar que dependiendo del elemento a analizar el rendimiento varía de técnica a técnica, aún así es posible decir que la espectrofotometría de absorción atómica es el que tiene menor desviación para todos los elementos analizados, por lo tanto mayor rendimiento. Esto no quiere decir que esta técnica es la que deba ser aplicada cada vez, debido a que cada técnica tiene sus límites de detección y parámetros de medición definidos y los elementos a analizar pueden causar interferencias en los equipos y/o mediciones, cuando estos se encuentran mezclados en una muestra original.

¹ Estos corresponden a un 86% del total elemental en la arcilla. El 14% restante corresponde a otros elementos tales como fósforo, titanio, potasio, sodio, azufre, cromo y manganeso

Es importante mencionar que para alcanzar este ideal, muchas veces es necesario agregar y quitar material para obtener la mezcla apropiada para el tipo de ladrillo a fabricar.

Los resultados obtenidos en cuanto al contenido químico y a las propiedades físicas de la muestra, reflejan que esta arcilla no es apta para aquellas actividades que requieren prensado y/o extruídos, por su índice de plasticidad bajo y alto contenido de arena, ya que abajo del 30% del total del material es arcilla pura, lo cual implicaría un aumento en costos al tener que agregarle al material, arenas y otros materiales; siendo apta para cualquier otro tipo de producto cerámico, como pisos, azulejos, etc.

A partir de una búsqueda comercial de laboratorios capaces de realizar este tipo de caracterizaciones, los únicos tres establecimientos que tienen la capacidad técnica, tanto instrumental como personal, para llevarlas a cabo, son el Laboratorio Técnico del Ministerio de Energía y Minas, Soluciones Analíticas y el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. No obstante, es importante mencionar que solamente en el Ministerio de Energía y Minas es posible escoger entre dos métodos distintos, absorción atómica y vía húmeda. Aunque Soluciones Analíticas cuenta con equipo para realizar determinaciones por la técnica de plasma de acoplamiento inductivo, esta no es aplicable para materiales sólidos como las arcillas, razón por la cual, para tener los resultados provenientes de ésta técnica fue necesario enviarlas al Laboratorio Inspectorate America Corporation en Estados Unidos a través de sus representantes en Guatemala, Centrans, S.A. El Laboratorio de Química Industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería tiene capacidad únicamente para realizar determinaciones por la técnica de vía húmeda, lo cual limita aún más las posibilidades comerciales para determinaciones más precisas.

El análisis térmico diferencial, es una técnica de determinación cualitativa de amplio uso en muchos países. En Guatemala únicamente en el laboratorio de control de calidad de Incesa Standard existe el equipo y este sólo funciona a nivel interno, no comercial.

Se decidió incluir la técnica en todos sus aspectos, por considerarla importante en la caracterización química de arcillas, aunque los resultados de esta no hayan sido concluyentes debido a fallas en el equipo.

No existe en nuestro país laboratorio comercial que cuente con el equipo de fluorescencia de rayos X, el análisis a la muestra de arcilla en estudio fue realizado en el Laboratorio de Cementos Progreso, el cual, al igual que Incesa Standard, tiene su equipo para uso interno y no comercial.

CONCLUSIONES

1. Aunque existen los medios y recursos en nuestro país para caracterizar arcillas, estos son limitados y no pueden llegar a representar los resultados, confiablemente, dependiendo del tipo de muestra que se desee analizar.
2. Para escoger una metodología de análisis para una caracterización de arcillas, debe basarse en la finalidad para el cual el material será utilizado.
3. La muestra posee un alto valor en sílice y alúmina como es de esperarse en este tipo de arcillas.
4. La muestra de arcilla analizada tiene en promedio 26.20% de silicio, 6.20% de aluminio, 4.18% de hierro, 5.99% de calcio y 0.99% de magnesio.
5. Por el contenido mineralógico encontrado, esta arcilla no puede ser utilizada para la fabricación de ladrillos de alta calidad, por encontrarse debajo de los límites requeridos para la actividad.
6. Todas las metodologías evaluadas son apropiadas para la caracterización química de arcillas.

7. La técnica de espectrofotometría de absorción atómica presentó el mayor rendimiento comparado con el porcentaje base de contenido mineralógico requerido en la arcilla para la elaboración de ladrillos.

8. La arcilla en cuestión es plástica, no tixotrópica y cuenta con las propiedades físicas necesarias para ser utilizadas en la fabricación de productos cerámicos menores.

RECOMENDACIONES

1. Para escoger el método más adecuado para la obtención del contenido químico de una arcilla, lo más importante es saber cuál es el uso que se le dará al material, de esa forma se conocen los contenidos básicos ideales que debe tener y basándose en los límites de detección de los equipos utilizados en cada técnica, es posible escoger la más adecuada para el tipo de material que se desee analizar.
2. En función del costo y disponibilidad de técnicas, se recomienda buscar la absorción atómica y la vía húmeda, por ser estos los que, comercialmente, se encuentran y son aplicados con facilidad.

REFERENCIAS

1. Barbará Z., Fernando. **Materiales y procedimientos de construcción**. 8ª edición (corregida y aumentada), Editorial Herrero S.A., México, 1982.
2. Gorchakev, G.I. **Materiales de construcción**. 1ª edición en español traducida del ruso por el Ingeniero Mirchevski B.A., Editorial MIR-Moscú, Rusia, 1984.
3. Luna Aroche, Julio Roberto. **Estudio geológico-minero en el Departamento de El Progreso, Guatemala, Centro América**. Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, México, Agosto, 2001.
4. Molina Higueros, Marco Antonio. **Materiales de construcción en ingeniería civil**. Tesis de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Noviembre, 1996.
5. **Métodos complejométricos de valoración con Titriplex**. Tercera Edición, E. Merck, Darmstadt.
6. Pérez Bol, Edgar Rolando y Nefi de Jesús Toledo Sosa. **Estudio sobre las arcillas de Panimaquito, Purulhá, Baja Verapaz**. Informe final EPS, CUNOR-USAC, Alta Verapaz, Noviembre, 1987.

BIBLIOGRAFÍA

1. Dana, Edward S. y William E. Ford. **Tratado de mineralogía**. 13ª reimpresión traducida de la 4ª en español, México, Compañía Editorial Continental S.A. de C.V., 1986.
2. Grimaldi Herrera, Lina Ethel. **Desarrollo y Experimentación en la técnica cerámica en Guatemala**. Tesis Ingeniería Química, Universidad de San Carlos de Guatemala, Octubre, 1988.
3. Muñoz Meza, Ana Elizabeth. **Análisis geoquímico para metales básicos en la exploración minera del área de Canaán**. Tesis Ingeniería Química, Universidad de San Carlos de Guatemala, Febrero, 1985.
4. José Estuardo Palencia Samayoa. **Ensayo del azul de metileno para determinar la influencia de los finos arcillosos en las arenas de trituración**. Tesis Ingeniería Civil, Universidad de San Carlos de Guatemala, Abril, 1999.
5. Pietrzyk, Donald J. Clyde W. Frank. **Química analítica**. 1ª edición en español traducida de la 2ª en inglés, México, Nueva Editorial Interamericana, 1983.
6. Rosales Amado, Byron Alberto y Leslie Armín Reyes Chinchilla. **Mejoramiento del diseño de un horno para ladrillo tayuyo**. Tesis Ingeniería Mecánica Industrial, Universidad de San Carlos de Guatemala, Julio, 1981.
7. Vásquez Cobón, Edgar Teófilo. **Evaluación del sistema de horneado de productos de arcilla utilizando gas licuado de petróleo**. Tesis Ingeniería Mecánica Industrial, Universidad de San Carlos de Guatemala, Octubre, 2000.

Bibliografía Electrónica

Principios básicos para la caracterización de arcillas. 15-3-2005.

<http://tenoch.pquim.unam.mx/academico/qa/arcillas.htm>

Las arcillas: propiedades y usos. 1-4-2005.

<http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/Arcillas.htm#Arclnd>

Técnica de preparación de muestras arcillosas para su estudio mediante difracción de Rayos X. 2-4-2005.

http://www.ucm.es/info/crismine/preparacion_muestras_Rayos_X.htm

ANEXO 1

1. Fotografías del sitio de extracción

Figura 18. Vista del sitio de extracción de muestras.



Figura 19. Vista trasera del sitio de extracción de muestras.



Figura 20. Vista del sitio de extracción de muestras.



ANEXO 2

Certificados originales de resultados