



**Instituto de Investigaciones Metalúrgicas
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**

**INCREMENTO EN LA TRABAJABILIDAD DEL
CONCRETO HIDRÁULICO ELABORADO CON
AGREGADOS PÉTREOS LOCALES Y FLUIDIFICADO CON
CENIZA**

Tesis

Que para obtener el grado de:

**MAESTRO EN METALURGIA Y CIENCIA DE LOS
MATERIALES**

Presenta:

Hugo Luis Chávez García

Director de tesis:

Dr. Mikhail Ostroumov Fink

Co-asesora:

Dra. Elia Mercedes Alonso guzmán

Morelia, Michoacán.

Septiembre 2005

ÍNDICE

RESUMEN	1
JUSTIFICACIÓN	2
I. OBJETIVO	3
II. INTRODUCCIÓN	4
III. GENERALIDADES	5
III.1 TRABAJABILIDAD “WORKABILITY”	5
III.2 ANTECEDENTES DEL CONCRETO HIDRÁULICO	8
III.3 FUNDAMENTOS SOBRE EL CONCRETO	8
III.4 DESCRIPCIÓN DE LAS PRINCIPALES PROPIEDADES DEL CONCRETO HIDRÁULICO.	13
III.5 OTROS MATERIALES EMPLEADOS EN LA ELABORACIÓN DEL CONCRETO HIDRÁULICO	17
III.6 DISEÑO DEL CONCRETO HIDRÁULICO	30
III.7 PRUEBAS FÍSICAS EMPLEADAS Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES	37
IV. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.	59
IV.1 GEOLOGÍA REGIONAL.	59
IV.2 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.	61
V. DESARROLLO EXPERIMENTAL.	65
V.1 OBTENCIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS.	65
V.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	67
V.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS AGREGADOS PÉTREOS.	67
V.3.1 PESO VOLUMÉTRICO SECO Y SUELTO.	67
V.3.2 PESO VOLUMÉTRICO SECO Y VARILLADO.	68
V.3.3 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN ARENAS.	68
V.3.4 ABSORCIÓN EN ARENAS.	68

V.3.5 DENSIDAD EN ARENAS.	68
V.3.6 ABSORCIÓN EN GRAVAS.	69
V.3.7 DENSIDAD EN GRAVAS.	69
V.3.8 GRANULOMETRÍA EN GRAVAS.	69
V.4 TÉCNICAS ANALÍTICAS APLICADAS A LOS AGREGA PÉTREOS	69
V.4.1 MICROSCOPIA ÓPTICA	70
V.4.2 FLUORESCENCIA DE RAYOS "X"	70
V.4.3 DIFRACCIÓN DE RAYOS "X"	70
V.4.4 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	70
V.5 DISEÑO DEL CONCRETO HIDRÁULICO	71
V.6 ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES.	76
V.7 PRUEBAS MECÁNICAS REALIZADAS AL CONCRETO.	78
V.7.1 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DE CILINDROS DE CONCRETO.	78
V.7.2 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA DE CILINDROS DE CONCRETO	78
VI. RESULTADOS OBTENIDOS	80
VI.1 PRUEBAS FÍSICAS DE LOS AGREGADOS PÉTREOS.	80
VI.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y TENSIÓN.	89
VI.3 MICROSCOPIA ÓPTICA.	93
VI.4 FLUORESCENCIA DE RAYOS X.	96
VI.5 DIFRACCIÓN DE RAYOS X	98
VI.6 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	104
VII. DISCUSIONES	109
VIII. CONCLUSIONES	113

AGRADECIMIENTOS

A LA UMNSH, A LA FIC Y AL IIM.

Por permitir realizar mis estudios y brindarme el espacio ocupado durante la investigación.

A MI ASESOR DR. MIKHAIL OSTROUMOV.

Por su orientación apoyo y ayuda brindadas para llegar a la realización y conclusión de este trabajo.

A MI CO-ASESOR DRA. ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN

Por su amistad, orientación, ayuda y apoyo para llevar a cabo la realización de esta investigación.

AL M.A. WILFRIDO MARTÍNEZ MOLINA

Por el apoyo brindado durante la realización de este trabajo, solventando dudas satisfactoriamente gracias a su experiencia.

A MI ESPOSA DRA. ROXANA ROJAS MOLINA

Por su apoyo en todo momento, comprensión y ayuda durante la realización de la presente investigación.

A LOS INGENIEROS LUIS Y ARMANDO SILVA BOLAÑOS (De la oficina de proyectos y construcción de la U.M.S.N.H.).

Por el material facilitado para la elaboración de los especímenes analizados y estudiados en este trabajo.

AL C. JESÚS ZAUNO ZAMUDIO

Por su amistad y comprensión brindadas durante la realización de la investigación.

A LOS COMPAÑEROS DEL LABORATORIO

Noe Carmona Leal, Carmen Navarro Sánchez, Jaime Gpe. Chora Calderón, Rubén Hernández Guzmán, Jorge Héctor García Yépez, a los compañeros del servicio social, por su ayuda en la realización de este trabajo.

DEDICATORIAS

A DIOS

Por permitirme vivir y poder realizar esta tarea.

A MI MAMÁ

Por su amor, apoyo y comprensión que me dió durante el tiempo que vivió con nosotros.

A MI PAPÁ

Por su apoyo y comprensión durante toda mi vida, por darme los valores requeridos para ser una persona de bien.

A MIS HERMANOS LUPE, POL, ALDO, Y PONCHO

Por estar conmigo y ser parte de mi vida.

A MIS PARIENTES

Por su gran apoyo durante los momentos más difíciles.

A MIS AMIGOS

Por su gran amistad y por pasar esos momentos tan alegres juntos.

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

FIGURAS

- Figura 1. Efecto del tiempo en tiempo en la trabajabilidad.
- Figura 2.- Principales partes de un microscopio óptico de luz polarizada transmitida.
- Figura 3.- Diagrama ilustrativo del proceso realizado en Fluorescencia de RX.
- Figura 4.- Nomenclatura de la serie de las plagioclasas y de los feldespatos alcalinos de alta temperatura.
- Figura 5.- Mapa geológico del Estado de Michoacán.
- Figura 6.- Mapa geológico del Estado de Guanajuato.
- Figura 7.- Estrategia a seguir en el presente trabajo.
- Figura 8.- Extracción de los agregados pétreos en el banco de Joyitas.
- Figura 9.- Muestras preparadas para el microscopio electrónico de barrido.
- Figura 10.- Determinación del revenimiento de las mezclas del concreto hidráulico.
- Figura 11.- Curva granulométrica de las mezclas arena-ceniza volcánica.
- Figura 12.- Curva granulométrica descrita por la ceniza volcánica.
- Figura 13.- Curva granulométrica descrita por la grava de Joyitas.
- Figura 14.- Curva granulométrica descrita por la grava de Tribasa.
- Figura 15.- Curva de revenimientos para las diferentes mezclas arena- ceniza volcánica elaboradas.
- Figura 16.- Resultados de la resistencia a la compresión de los especímenes elaborados, banco Joyitas.
- Figura 17.- Resultados de resistencia a compresión de especímenes elaborados con agregados gruesos de Tribasa.
- Figura 18.- Curvas descritas como resultado de resistencia a la tensión de especímenes elaborados con agregados de Joyitas.
- Figura 19.- Curvas descritas como resultado de resistencia a la tensión de especímenes elaborados con agregados de Tribasa.
- Figura 20.- Microfotografía correspondiente a la muestra No AJ-101.
- Figura 21.- La microfotografía de la muestra No GJ-120.
- Figura 22.- Microfotografía de a la muestra No CV-30.
- Figura 23.- Difractograma de la arena de Joyitas, muestra AJ-101.
- Figura 24.- Difractograma de grava de Joyita, muestra GJ-101.
- Figura 25.- Difractograma de la grava de Joyitas, muestra GJ-120.
- Figura 26.- Difractograma de la grava de Joyitas, muestra GJ-130.
- Figura 27.- Difractograma de la grava de Tribasa, muestra GT-10.
- Figura 28.- Difractograma de la ceniza volcánica, muestra CV-30.
- Figura 29.- Micrografía de la muestra M5-G.
- Figura 30.- Micrografía de la muestra M5-A.
- Figura 31.- Microanálisis de la muestra M5-A.
- Figura 32.- Micrografía de la muestra M1-A.
- Figura 33.- Microanálisis de la muestra M1-A.
- Figura 34.- Micrografía de la muestra M1-1.
- Figura 35.- Micrografía de la muestra M1-P.
- Figura 36.- Micrografía de la muestra M4-A.

Figura 37.- Microanálisis de la muestra M4-A.

TABLAS

- Tabla 1.- Comportamiento de la trabajabilidad con la compactación y vibración.
Tabla 2.- Características de los agregados pétreos.
Tabla 3.- Pruebas para evaluar la reactividad de los agregados con los álcalis.
Tabla 4.- Normas para evaluar la reacción con los álcalis.
Tabla 5.- Influencia de los agregados en el concreto fresco.
Tabla 6.- Influencia de los agregados en el concreto endurecido.
Tabla 7.- Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción.
Tabla 8.- Contenido de agua para un tamaño máximo nominal del agregado pétreo.
Tabla 9^a.- Relación A/C (Agua/Cemento) en peso.
Tabla 9b.- Correspondencia entre la relación A/C y la resistencia a la compresión del concreto.
Tabla 10.- Volumen del agregado grueso varillado en seco por unidad de volumen de concreto.
Tabla 11.- Diseño de la mezcla 100%-0%.
Tabla 12.- Diseño de la mezcla 50%-50%.
Tabla 13.- Diseño de la mezcla 60%-40%.
Tabla 14.- Diseño de la mezcla 70%-30%.
Tabla 15.- Diseño de la mezcla 80%-20%.
Tabla 16.- Pesos volumétricos de agregados empleados.
Tabla 17.- Granulometría de la proporción 100%-0%.
Tabla 18.- Granulometría de la proporción 80%-20%.
Tabla 19.- Granulometría de la proporción 70%-30%.
Tabla 20.- Granulometría de la proporción 60%-40%.
Tabla 21.- Granulometría de la proporción 50%-50%.
Tabla 22.- Granulometría de la ceniza volcánica.
Tabla 23.- Absorción y densidad del agregado fino y de la ceniza volcánica.
Tabla 24.- Absorción y densidad del agregado grueso.
Tabla 25.- Granulometría de la grava de Joyitas.
Tabla 26.- Granulometría de la grava de Tribasa.
Tabla 27.- Fluorescencia de RX para los agregados de los bancos estudiados.
Tabla 28.- Elementos traza para los agregados de los bancos estudiados.

NOMENCLATURA DE LAS MUESTRAS TOMADAS

Muestra No	Descripción
AJ-101	Arena de Joyitas
GJ-101	Grava de Joyitas (color gris)
GJ-120	Grava de Joyitas (color rojizo)
GJ-130	Grava de Joyitas (color negro)
GT-10	Grava de Tribasa
CV-30	Ceniza Volcánica
M5-G	Concreto hidráulico de 160 días de edad, prop. 100-0
M5-A	Concreto hidráulico de 200 días de edad, prop. 70-30
M1-A	Concreto hidráulico de 63 días de edad, prop. 100-0
M1-1	Concreto hidráulico de 63 días de edad, prop. 70-30
M1-P	Concreto hidráulico de 63 días de edad, prop. 50-50
M4-A	Concreto hidráulico de 107 días de edad, Tribasa.

RESUMEN

La investigación presente aborda la trabajabilidad del concreto hidráulico adicionado con cenizas.

El concreto se diseñó por el método del American Concrete Institute (A.C.I.), [2] debido a que éste generalmente permite mayores relaciones de agua/cemento reflejándose en mezclas manejables y con menores consumos de cemento que el método de las curvas de Abrams [1].

El concreto proyectado fue de un $f'c = 250 \text{ Kg/cm}^2$. Para evitar que los valores resultantes estuvieran por debajo del valor promedio, se calculó el siguiente valor de diseño de mezcla, $Fcr = 285 \text{ kg/cm}^2$, según el artículo 308 del Reglamento de Construcciones para el Estado de Michoacán, como un factor de seguridad.

Así las mezclas fueron diseñadas para una resistencia promedio de 285 Kg/cm^2 .

En la investigación se empleo Cemento Pórtland CPP 30R, relación agua/cemento en peso de 0.56 y un revenimiento de proyecto de 10 cm.

Para la elaboración del concreto se trabajó con agregados pétreos provenientes de tres bancos locales, los cuales reciben el nombre de Joyitas Mpio. de Morelia, Tribasa Mpio. de Tarimbaro, Ejido San Isidro, Mpio. de Acámbaro, Gto.

La caracterización mineralógica de los agregados pétreos se realizó con microscopía óptica (MO), fluorescencia de rayos X (FRX), difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB).

Se elaboraron dos mezclas de concreto hidráulico, con el cemento mencionado y se analizaron los pétreos de Joyitas y Tribasa, además de estos agregado se empleó una ceniza volcánica, proveniente del banco del Ejido San Isidro de Acámbaro, Gto., mezclada con la arena en cinco diferentes proporciones para aumentar el revenimiento del concreto.

Con el concreto se elaboraron especímenes de prueba los cuales llevaron un proceso de curado para posteriormente ser sometidos a las pruebas mecánicas de compresión y tensión, cabe mencionar que uno de los parámetros para medir la trabajabilidad es el revenimiento, el cual se determinó para cada mezcla y a continuación se resumen los resultados. Con el concreto elaborado empleando arena de Joyitas, grava de Joyitas y ceniza volcánica en diferentes proporciones el mejor resultado en cuanto a trabajabilidad lo proporciona la proporción 50%-50%, es decir, 50% en peso de arena y 50% en peso de ceniza volcánica, además de la grava. De igual manera, para el concreto elaborado con arena de Joyitas, ceniza volcánica y grava de Tribasa, la proporción 50%-50% fue la mejor. Todo lo anterior según los estándares vigentes de la ASTM.

De los especímenes de prueba endurecidos se extrajeron muestras o esquirlas de concreto para analizarlas por medio del método de microscopia electrónica de barrido.

JUSTIFICACIÓN

El concreto hidráulico que se produce en la actualidad es muy diferente al concreto que se producía a principios del siglo pasado, es decir, se ha venido dando un desarrollo en lo referente a la producción del cemento y del concreto. Hoy en día el concreto hidráulico es uno de los materiales más producidos a nivel mundial, se emplea en la construcción de obras hidráulicas como presas, de igual forma es empleado en las vías de comunicación como son carreteras, puentes y túneles, además es empleado para la construcción de casas habitación y edificios de varios niveles, todo esto es debido a que el concreto hidráulico es un material muy versátil con gran durabilidad y buenas propiedades mecánicas.

Anteriormente se producían diferentes tipos de cemento y con cada uno de estos se producía un tipo de concreto de características especiales, esto ha tenido que cambiar debido a que las modificaciones que se realizaban para producir un tipo de concreto se hacían desde la producción del cemento resultando demasiado costoso este procedimiento.

Todas las modificaciones que se le hacen al concreto hoy en día, se logran mediante el empleo de aditivos o empleando en su caso alguna mezcla de arena con cenizas volcánicas o escorias de alto horno (adiciones), esto en ocasiones se tiene que realizar con la finalidad de mejorar las características del concreto y resolver los problemas que se presentan en la actualidad y por consiguiente cada vez existe una mayor necesidad de mejorar los materiales para que obtengamos mayores rendimientos y vida útil, así como bajos costos aunados a mantenimientos disminuidos [10].

Prácticamente no existen trabajos (estudios) donde se caractericen, por ejemplo, estos materiales pétreos, desde el punto de vista de su composición mineralógica y posteriormente se llegue a relacionar las diferentes propiedades de los agregados pétreos con el comportamiento del concreto hidráulico sometido a las diferentes solicitaciones en que trabaja.

Además es muy común la necesidad de bombear concreto a diferentes niveles o distancias considerables, pero se presenta un problema, que consiste en la trabazón del concreto en las tuberías de bombeo, limitando su traslado y haciéndolo más costoso. Al aumentar la fluidez del concreto se aumenta su trabajabilidad, de tal forma que podemos manipular de modo más fácil al concreto.

No debemos perder de vista las propiedades mecánicas del concreto, es decir, afectar de la menor manera posible la resistencia mecánica del concreto y hacerlo más trabajable.

El concreto hidráulico es un material tan versátil que todas las personas involucradas en su proceso de fabricación dan por hecho que conocen adecuadamente los elementos básicos, las propiedades y el comportamiento del concreto. Esto ha ocasionado que se dé poca atención a sus propiedades a mediano y largo plazo, y es quizá uno de los más graves problemas [14].

Existe el registro de que en algunos países el concreto hidráulico está sufriendo o sufrió deterioro prematuro como carbonatación, y de aquí la importancia de estudiar de manera más detallada al concreto y a sus constituyentes.

I. OBJETIVO

El objetivo de la investigación es lograr un aumento en la fluidez del concreto hidráulico mediante la adición de ceniza volcánica, y en caso de que se presente el aumento de la fluidez tendrá que ser compatible con las características mecánicas y físicas del concreto, ya que es sabido que la fluidez depende también de la cantidad de agua empleada para la elaboración del concreto pero no debe incrementarse la fluidez de la mezcla adicionando agua por que se corre el riesgo de disminuir la resistencia del concreto debido a un exceso de agua, al aumentar la relación A/C en peso.

Relacionar la composición mineralógica, las propiedades físicas y químicas de los agregados pétreos con las propiedades mecánicas del concreto hidráulico. Las propiedades de los agregados pétreos se determinaran mediante una caracterización física, geológica, mineralógica y geoquímica.

II. INTRODUCCIÓN

Se ha hecho una caracterización geológica, mineralógica y geoquímica de los agregados pétreos, con la finalidad de llegar a obtener una relación entre las características de los agregados pétreos y las propiedades mecánicas del concreto hidráulico.

Para la caracterización de los agregados se emplearon técnicas analíticas de investigación como son microscopía óptica, difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X y microscopía electrónica de barrido. El empleo de cada una de estas técnicas es de gran importancia en nuestra caracterización, ya que en algunas de ellas se trata de análisis tanto cuantitativos como cualitativos, en otras, se trata de técnicas que nos permiten conocer las fases que tenemos presentes en nuestros minerales y otras nos permiten conocer la morfología y composición del concreto hidráulico.

Conjuntamente a la caracterización de los agregados pétreos, los cuales provienen de los bancos de materiales denominados Joyitas, Tribasa y Ejido San Isidro, hemos realizado las pruebas de calidad necesarias para conocer las condiciones de dichos agregados pétreos y con estos materiales se elaboraron los especímenes de concreto hidráulico para posteriormente ser sometidos a las pruebas mecánicas de compresión y tensión.

Todas las pruebas físicas están estandarizadas.

III. GENERALIDADES.

III.1 TRABAJABILIDAD “WORKABILITY”.

Es la propiedad de algunos materiales que consiste en la facilidad que estos presentan para transportarse, colocarse y acabarse con relativa facilidad y sin segregación. La trabajabilidad en las mezclas se mide con alturas de revenimientos (cm), altura que se entiende de la siguiente manera: en un molde de forma tronco-cónica se vacía la mezcla cuya altura de revenimiento se desea conocer, se llena siguiendo un procedimiento que se describirá en el apartado de elaboración de los especímenes, se extrae el molde cuidadosamente por la parte superior; al quitar el molde la mezcla, a falta de apoyo, tratará de deformarse y por consiguiente bajará su altura más o menos según sea su fluidez. La diferencia entre la altura del molde y la final de la altura de la mezcla fresca se denomina “altura de revenimiento” y se expresará en centímetros.

Entonces se dice que cuando estas características se cumplen el concreto es trabajable. Un concreto de bajo revenimiento tiene una consistencia dura. En la práctica de la construcción, los elementos delgados de concreto y los elementos del concreto fuertemente reforzados requieren de mezclas trabajables, pero jamás de mezclas similares a una sopa, para tener facilidad en su colocación. Se necesita una mezcla plástica para tener resistencia y para mantener su homogeneidad durante el manejo y la colocación [16].

De igual manera, podemos decir, que la trabajabilidad es la facilidad de colocar, consolidar y acabar al concreto recién mezclado.

El concreto debe ser trabajable pero no se debe segregar excesivamente. El sangrado es la migración del agua hacia la superficie superior del concreto recién mezclado provocada por el asentamiento de los materiales Sólidos, cemento, arena y piedra dentro de la masa. El asentamiento es consecuencia del efecto combinado de la vibración y de la gravedad.

Un sangrado excesivo aumenta la relación Agua-Cemento cerca de la superficie superior, pudiendo dar como resultado una capa superior débil de baja durabilidad, particularmente si se lleva acabo las operaciones de acabado mientras está presente el agua de sangrado. Debido a la tendencia del concreto recién mezclado a segregarse y sangrar, es importante transportar y colocar cada carga lo más cerca posible de su posición final. El aire incluido mejora la trabajabilidad y reduce la tendencia del concreto fresco de segregarse y sangrar.

Es importante señalar que la trabajabilidad es una propiedad de definición algo compleja, pues abarca propiedades de la mezcla fresca que califican la "facilidad de colocación" y "la resistencia a la segregación" como la consistencia y la cohesión respectivamente, medidas con técnicas de laboratorio, y además es una propiedad relativa al tipo y condiciones de obra, dado que una determinada mezcla puede ser trabajable para ciertas condiciones y otras no.

La determinación de la consistencia de la mezcla no mide directamente la trabajabilidad pero es de gran ayuda en obra. Mediante los ensayos correspondientes permite calificar la facilidad con que el hormigón fresco puede fluir y clasificarlo entre rangos de consistencia muy definidos.

La medida de la consistencia del hormigón se hace normalmente con el ensayo que utiliza el Cono de Abrams, descrito anteriormente, se denomina revenimiento. Para hormigones fluidos se realiza el "Ensayo de Extendido en la Mesa de Graf" que nos indica la consistencia y su tendencia a la segregación, midiendo el extendido de una masa de hormigón, desmoldado de un cono similar al de Abrams pero más pequeño, sobre una mesa especial, y sometido a sacudidas normalizadas. Este ensayo es adecuado para hormigones con asentamiento mayor de 15 cm que no pueden ser estimados con precisión con el método del Cono de Abrams [16].

Factores que afectan la trabajabilidad

Luego del análisis de los conceptos anteriores podemos concluir que para cada tipo o tarea de obra existe una trabajabilidad adecuada y que esta dependerá de la correcta valoración del tamaño-forma de los encofrados, disposición-cantidad de armadura, método de colocación-compactación y de las relativas a la mezcla consistencia-cohesión.

En la tabla 1 buscamos relacionar la trabajabilidad, los rangos consistencia y discrepancia durante la entrega, denominaciones para los asentamientos típicos del hormigón fresco con métodos de compactación y vibrado.

Tabla 1. Comportamiento de la trabajabilidad con la compactación y vibración.

TRABAJABILIDAD	RANGO DE CONSISTENCIA	ASENTAMIENTO [cm]	DISCREPANCIA [cm]	COMPACTACIÓN	VIBRACIÓN
MUY BAJA	SECA	$A \leq 2$ (semiseco)	$\pm 1,5$	COMPACTADO A RODILLO PARA USO VIAL (H.C.R.V.)	
BAJA	SEMISECA	$2 < A \leq 5$ (duro)		APISONADO ENÉRGICO	INTENSO DE SUPERFICIE O INMERSIÓN
MEDIA	PLÁSTICA	$5 < A \leq 10$ (plástico)	$\pm 2,5$	VARILLADO O APISONADO NORMAL	NORMAL DE INMERSIÓN
ALTA	FLUIDA	$10 < A \leq 15$ (blando)	$\pm 3,0$	VARILLADO	LEVE DE INMERSIÓN
	MUY FLUIDA	$15 \leq A$ (fluido)	$\pm 3,5$	VARILLADO	NO DEBEN VIBRARSE

Los factores que influyen en la trabajabilidad del concreto son: (1) el método y duración de transporte; (2) calidad y características de los materiales cementantes; (3) la consistencia del concreto; (4) calidad de los agregados pétreos; (5) el porcentaje aire contenido; (6) contenido de agua; (7) condiciones ambientales; (8) el mezclado [25, 27].

Importancia de la Trabajabilidad

Una buena trabajabilidad facilita el transporte y el uso del hormigón, o sea la colocación en la cimbra y la compactación. Además, ésta influye favorablemente en el costo de estas operaciones.

En cuanto al hormigón endurecido, su resistencia y sobre todo su durabilidad, dependen directamente de una buena preparación, de un descimbrado perfecto y de una compactación adecuada, éstas operaciones que pueden llevarse a cabo de modo correcto sólo si la trabajabilidad es adecuada [12].

La trabajabilidad disminuye con el tiempo

Es inevitable que la mezcla se vaya rigidizando luego de terminada la fase de mezclado, éste hecho se traduce en el empeoramiento de la trabajabilidad, lo cual se aprecia en la figura 1. Nótese al respecto que el valor nominal utilizado puede referirse al de finalización del mezclado o también al momento de abastecimiento en obra. Este efecto se nota sobre todo en presencia de condiciones atmosféricas particularmente calurosas, como así también operando con cemento de fraguado rápido [12].

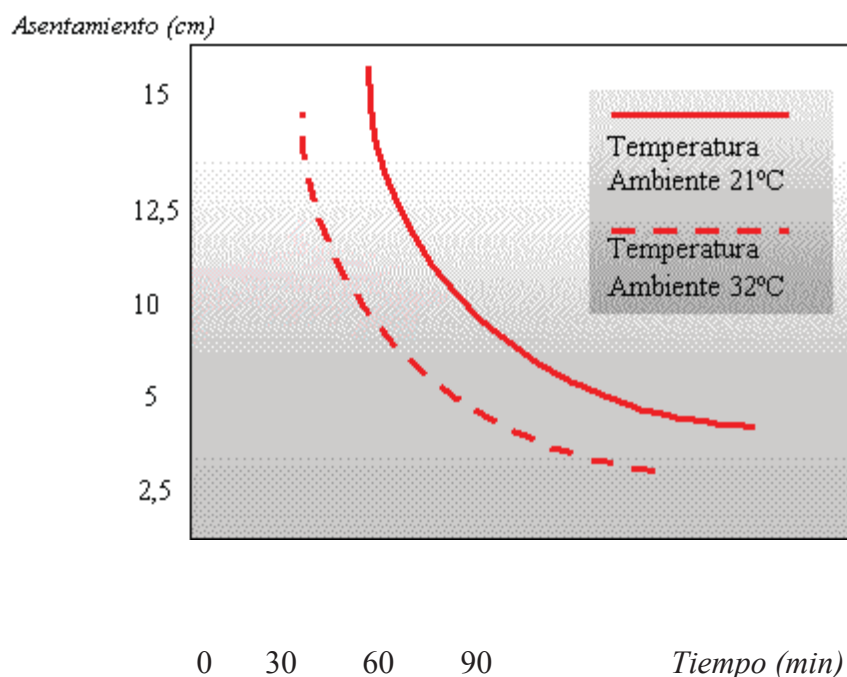


Figura 1. Efecto del tiempo en la trabajabilidad.

En la figura 1 se compara la trabajabilidad para concreto hidráulico elaborado a 21° C y a 32° C, donde se nota que para el concreto elaborado a una temperatura de 32° C tiende a perder trabajabilidad a un menor tiempo en comparación con el concreto elaborado a una temperatura ambiente de 21° C.

III.2 ANTECEDENTES HISTORICOS DEL CONCRETO

La historia del cemento es la historia misma del hombre en la búsqueda de un espacio para vivir con la mayor comodidad, seguridad y protección posible. Desde que el ser humano supero la época de las cavernas, a aplicado sus mayores esfuerzos a delimitar su espacio vital, satisfaciendo primero sus necesidades de vivienda y después levantando construcciones con requerimientos específicos.

Templos, palacios, museos son el resultado del esfuerzo que constituye las bases para el progreso de la humanidad. El pueblo egipcio ya utilizaba un mortero, mezcla de arena con materia cementosa, para unir bloques y lozas de piedra al elegir sus asombrosas construcciones. Los constructores griegos y romanos descubrieron que ciertos depósitos volcánicos, mezclados con caliza y arena producían un mortero de gran fuerza, capaz de resistir la acción del agua, dulce o salada [11].

Investigaciones y descubrimientos a lo largo de miles de años, nos conducen a principios del IXX, cuando en Inglaterra fue patentada una mezcla de caliza dura, molida y calcinada con arcilla, al agregársele agua, producía una pasta que de nuevo se calcinaba, se molía y batía hasta producir un polvo fino que es el antecedente directo del cemento de nuestro tiempo.

El nombre del cemento Pórtland le fue dado por la similitud que éste tenía con la piedra de la isla de Pórtland del canal ingles. La aparición de este cemento y de su producto resultante, el concreto, ha sido un factor determinante para que el mundo adquiriera una fisionomía diferente.

En 1824 James Parker, Joseph Aspdin patentan al Cemento Pórtland, materia que obtuvieron de la calcinación de alta temperatura de una Caliza Arcillosa.

En 1845 Isaac Johnson obtiene el prototipo del cemento moderno quemado, alta temperatura, una mezcla de caliza y arcilla hasta la formación del "Clínker".

En 1868 se realiza el primer embarque de cemento Pórtland de Inglaterra a los Estados Unidos.

En 1871 la compañía Coplay Cement produce el primer cemento Pórtland en los Estados Unidos.

En 1904 la American Standard For Testing Materials (ASTM), publica por primera vez sus estándares de calidad para el cemento Pórtland.

En 1906 en C.D. Hidalgo Nuevo León se instala la primera fabrica para la producción de cemento en México, con una capacidad de 20,000 toneladas por año [14, 18].

III.3 FUNDAMENTOS SOBRE EL CONCRETO

El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregado y pasta. La pasta, compuesta de Cemento Pórtland y agua, une a los agregados (arena y grava o piedra

triturada) para formar una masa semejante a una roca pues la pasta endurece debido a la reacción química entre el cemento y el agua.

Los agregados generalmente se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que pueden llegar hasta 10mm; los agregados gruesos son aquellos cuyas partículas se retienen en la malla No. 16 y pueden variar hasta 152 mm [10].

La pasta esta compuesta de Cemento Pórtland, agua y aire atrapado o aire incluido intencionalmente. Ordinariamente, la pasta constituye del 25 al 40 % del volumen total del concreto.

Como los agregados constituyen aproximadamente el 60 al 75 % del volumen total del concreto, su selección es importante. Los agregados deben consistir en partículas con resistencia adecuada, así como resistencias a condiciones de exposición a la intemperie y no deben contener materiales que pudieran causar deterioro del concreto. Para tener un uso eficiente de la pasta de cemento y agua, es deseable contar con una granulometría continua de tamaños de partículas [14].

La calidad del concreto depende en gran medida de la calidad de la pasta. En un concreto elaborado adecuadamente, cada partícula de agregado esta completamente cubierta con pasta y también todos los espacios entre partículas de agregado.

Para cualquier conjunto específico de materiales y de condiciones de curado, la cantidad de concreto endurecido esta determinada por la cantidad de agua utilizada en la relación con la cantidad de Cemento. A continuación se presentan algunas ventajas que se obtienen al reducir el contenido de agua:

- Se incrementa la resistencia a la compresión y a la flexión.
- Se tiene menor permeabilidad, y por ende mayor hermeticidad y menor absorción.
- Se incrementa la resistencia al intemperismo.
- Se logra una mejor unión entre capas sucesivas y entre el concreto.
- Se reducen las tendencias de agrietamientos por contracción.

Las propiedades del concreto en estado fresco (plástico) y endurecido, se pueden modificar agregando aditivos al concreto, usualmente en forma líquida, durante su dosificación. Los aditivos se usan comúnmente para (1) ajustar el tiempo de fraguado o endurecimiento, (2) reducir la demanda de agua, (3) aumentar la trabajabilidad, (4) incluir intencionalmente aire, y (5) ajustar otras propiedades del concreto [7, 18].

Después de un proporcionamiento adecuado, así como, dosificación, mezclado, colocación, consolidación, acabado, y curado, el concreto endurecido se transforma en un material de construcción resistente, no combustible, durable, resistente al desgaste y prácticamente impermeable, que requiere poco o nulo mantenimiento. El concreto también puede moldearse en una gran variedad de formas, colores y texturizados para ser usado en un número ilimitado de aplicaciones [16].

CONCRETO RECIEN MEZCLADO

El concreto recién mezclado debe ser plástico o semifluido y capaz de ser moldeado a mano. Una mezcla muy húmeda de concreto se puede moldear en el sentido de que puede colocarse en una cimbra, pero esto no entra en la definición de "plástico" aquel material que es plegable y capaz de ser moldeado o formado como un terrón de arcilla para moldar.

En una mezcla de concreto plástico los ingredientes no están predispuestos a segregarse durante el transporte; y cuando el concreto endurece, se transforma en una mezcla homogénea de todos los componentes. El concreto de consistencia plástica no se desmorona si no que fluye como líquido viscoso sin segregarse [16].

MEZCLADO

La secuencia de carga de los ingredientes en la mezcladora representa un papel importante en la uniformidad del producto terminado. Sin embargo, se puede variar esa secuencia y aun así producir concreto de calidad. Las diferentes secuencias requieren ajustes en el tiempo de adicionamiento de agua, en el número total de revoluciones del tambor de la mezcladora, y en la velocidad de revolución.

Otros factores importantes en el mezclado son el tamaño de la revoltura en la relación al tamaño del tambor de la mezcladora, el tiempo transcurrido entre la dosificación y el mezclado, el diseño, la configuración y el estado del tambor mezclador y las paletas. Las mezcladoras aprobadas, con operación y mantenimiento correcto, aseguran un intercambio de materiales de extremo a extremo por medio de una acción de rolado, plegado y amasado de la revoltura sobre si misma a medida que se mezcla el concreto [14, 18].

CONSOLIDACIÓN

La vibración pone en movimiento a las partículas en el concreto recién mezclado, reduciendo la fricción entre ellas y dándole a la mezcla las cualidades móviles de un fluido denso. La acción vibratoria permite el uso de la mezcla dura que contenga una mayor proporción de agregado grueso y una menor proporción de agregado fino. Empleando un agregado bien graduado, entre mayor sea el tamaño máximo del agregado en el concreto, habrá que llenar pasta en un menor volumen y existirá una menor área superficial de agregado por cubrir con pasta, teniendo como consecuencia que una cantidad menor de agua y de cemento es necesaria. Con una consolidación adecuada de las mezclas más duras y ásperas pueden ser empleadas, lo que tiene como resultado una mayor calidad y economía.

Si una mezcla de concreto es lo suficientemente trabajable para ser consolidada de manera adecuada por varillado manual, puede que no exista ninguna ventaja en vibrarla. De hecho, tales mezclas se pueden segregar al vibrarlas. Solo al emplear mezclas más duras y ásperas se adquieren todos los beneficios del vibrado.

El vibrado mecánico tiene muchas ventajas. Los vibradores de alta frecuencia posibilitan la colocación económica de mezclas que no son fáciles de consolidar a mano bajo ciertas condiciones [10].

HIDRATACIÓN, TIEMPO DE FRAGUADO, ENDURECIMIENTO

La propiedad de liga de las pastas de cemento Portland se debe a la reacción química entre el cemento y el agua llamada hidratación.

El cemento Portland no es un compuesto químico simple, sino que es una mezcla de muchos compuestos. Cuatro de ellos conforman el 90% o más del peso del cemento Portland y son: el silicato tricálcico, el silicato dicálcico, el aluminato tricálcico y el aluminio ferrito tetracálcico. Además de estos componentes principales, algunos otros desempeñan papeles importantes en el proceso de hidratación. Los tipos de cemento Portland contienen los mismos cuatro compuestos principales, pero en proporciones diferentes.

Cuando el Clínter (el producto del horno que se muele para fabricar el cemento Portland) se examina al microscopio, la mayoría de los compuestos individuales del cemento se pueden identificar y se puede determinar sus cantidades. Sin embargo, los granos más pequeños evaden la detección visual. El diámetro promedio de una partícula de cemento típica es de aproximadamente 10 micras, o una centésima de milímetro. Si todas las partículas de cemento fueran las promedio, el cemento Portland contendría aproximadamente 298,000 millones de granos por kilogramo, pero de hecho existen unos 15 billones de partículas debido al alto rango de tamaños de partícula. Las partículas en un kilogramo de cemento Portland tienen una área superficial aproximada de 400 metros cuadrados.

Los dos silicatos de calcio, los cuales constituyen cerca del 75% del peso del cemento Portland, reaccionan con el agua para formar dos nuevos compuestos: el hidróxido de calcio y el hidrato de silicato de calcio. Este último es con mucho el componente cementante más importante en el concreto. Las propiedades ingenieriles del concreto, fraguado y endurecimiento, resistencia y estabilidad dimensional - principalmente depende del gel del hidrato de silicato de calcio. Es la medula del concreto.

La composición química del silicato de calcio hidratado es en cierto modo variable, pero contiene Cal (CaO) y Sílice (SiO₂), en una proporción sobre el orden de 3 a 2. El área superficial del hidrato de silicato de calcio es de unos 3000 metros cuadrados por gramo. Las partículas son tan diminutas que solamente pueden ser vistas en microscopio electrónico. En la pasta de cemento ya endurecida, estas partículas forman uniones enlazadas entre las otras fases cristalinas y los granos sobrantes de cemento sin hidratar; también se adhieren a los granos de arena y a piezas de agregado grueso, cementando todo el conjunto. La formación de esta estructura es la acción cementante de la pasta y es responsable del fraguado, del endurecimiento y del desarrollo de resistencia.

Cuando el concreto fragua, su volumen bruto permanece casi inalterado, pero el concreto endurecido contiene poros llenos de agua y aire, mismos que no tienen resistencia alguna. La resistencia esta en la parte sólida de la pasta, en su mayoría en el hidrato de silicato de calcio y en las fases cristalinas.

Entre menos porosa sea la pasta de cemento, mucho más resistente es el concreto. Por lo tanto, cuando se mezcle el concreto no se debe usar una cantidad mayor de agua que la absolutamente necesaria para fabricar un concreto plástico y trabajable. A un entonces, el agua empleada es usualmente mayor que la que se requiere para la completa hidratación del cemento. La relación mínima Agua-Cemento (en peso) para la hidratación total es aproximadamente de 0.22 a 0.25.

El conocimiento de la cantidad de calor liberado a medida de que el cemento se hidrata puede ser útil para planear la construcción. En invierno, el calor de hidratación ayudara a proteger el concreto contra el daño provocado por temperaturas de congelación.

Es importante conocer la velocidad de reacción entre el cemento y el agua porque la velocidad determina el tiempo de fraguado y de endurecimiento. La reacción inicial debe ser suficientemente lenta para que conceda tiempo al transporte y colocación del concreto. Sin embargo, una vez que el concreto ha sido colocado y terminado, es deseable tener un endurecimiento rápido. El yeso, que es adicionado en el molino de cemento durante la molienda del Clínter, actúa como regulador de la velocidad inicial de hidratación del cemento Pórtland. Otros factores que influyen en la velocidad de hidratación incluyen la finura de molienda, los aditivos, la cantidad de agua adicionada y la temperatura de los materiales en el momento del mezclado [14].

CONCRETO ENDURECIDO

CURADO HUMEDO

El aumento de resistencia continuará con la edad mientras este presente algo de cemento sin hidratar, a condición de que el concreto permanezca húmedo o tenga una humedad relativa superior a aproximadamente el 80% y permanezca favorable la temperatura del concreto. Cuando la humedad relativa dentro del concreto cae aproximadamente al 80% o la temperatura del concreto desciende por debajo del punto de congelación, la hidratación y el aumento de resistencia virtualmente se detiene.

Si se vuelve a saturar el concreto luego de un periodo de secado, la hidratación se reanuda y la resistencia vuelve a aumentar. Sin embargo lo mejor es aplicar el curado húmedo al concreto de manera continua desde el momento en que se ha colocado hasta cuando haya alcanzado la calidad deseada debido a que el concreto es difícil de resaturar [16].

VELOCIDAD DE SECADO DEL CONCRETO

El concreto ni endurece ni se cura con el secado. El concreto (o de manera precisa, el cemento en el contenido) requiere de humedad para hidratarse y endurecer. El secado del concreto únicamente esta relacionado con la hidratación y el endurecimiento de manera indirecta. Al secarse el concreto, deja de ganar resistencia; el hecho de que este seco, no es indicación de que haya experimentado la suficiente hidratación para lograr las propiedades físicas deseadas [14, 18].

El conocimiento de la velocidad de secado es útil para comprender las propiedades o la condición física del concreto. Por ejemplo, tal como se mencionó, el concreto debe seguir reteniendo suficiente humedad durante todo el período de curado para que el cemento pueda hidratarse. El concreto recién colado tiene agua abundante, pero a medida de que el secado progresa desde la superficie hacia el interior, el aumento de resistencia continuará hacia la profundidad únicamente mientras la humedad relativa en ese punto se mantenga por encima del 80%.

La superficie de un piso de concreto que no a tenido suficiente curado húmedo es una muestra común. Debido a que se seca rápidamente, el concreto de la superficie es débil y se produce descascaramiento en partículas finas provocado por el tránsito. Asimismo, el concreto se contrae al, secarse, del mismo modo que lo hacen la madera, papel y la arcilla (aunque no tanto). La contracción por secado es una causa fundamental de agrietamiento, y el ancho de las grietas es función del grado del secado.

En tanto que la superficie del concreto se seca rápidamente, al concreto en el interior le lleva mucho mas tiempo secarse.

Muchas otras propiedades del concreto endurecido se ven también afectadas por su contenido de humedad; en ellas incluye la elasticidad, flujo plástico, valor de aislamiento, resistencia al fuego, resistencia al desgaste, conductividad eléctrica, durabilidad [16].

III.4 DESCRIPCIÓN DE LAS PRINCIPALES PROPIEDADES DEL CONCRETO HIDRÁULICO

Dentro de la industria de la construcción el concreto hidráulico es uno de los materiales más importantes debido a que es empleado y elaborado con relativa facilidad. Además el concreto hidráulico presenta muchísimas propiedades que favorecen su comportamiento bajo las demandas a que se ve sometido en la obra. Dentro de estas propiedades podemos mencionar: la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión, versatilidad, durabilidad, trabajabilidad, etc.

Las propiedades de mayor interés para la ingeniería de la construcción, de este compuesto, son su resistencia a la compresión y su resistencia a la flexión. Estas

propiedades dependen en gran medida de la calidad de los materiales que lo componen así como su proporción en la que se encuentran dentro del concreto.

Los agregados pétreos son de gran importancia en la ingeniería de la construcción, debido a que las propiedades físico-mecánicas, petrográficas y químicas, depende en gran parte la buena adherencia del agregado con la pasta agua-cemento y por ende la resistencia del concreto, así como la estabilidad volumétrica.

En la actualidad se realizan investigaciones del concreto hidráulico tratando de emplear nuevos materiales en su elaboración y verificando que las propiedades del concreto no se vean afectadas sino que se mejoren [14].

En este trabajo se ha empleado una ceniza volcánica llamada en la región “Tierra de Acámbaro”, el empleo de este material es con la finalidad de aumentar la fluidez del concreto hidráulico y mediante esto mejorar su trabajabilidad, así como su bombeo en caso de ser requerido.

PESO VOLUMÉTRICO

El peso volumétrico del concreto es elevado en comparación con el de otros materiales de construcción y como los elementos estructurales de concreto son generalmente voluminosos, el peso es una característica que debe tomarse en cuenta. Su valor oscila entre 1.9 y 2.5 tn/m³, dependiendo principalmente de los agregados pétreos que se empleen [18].

RESISTENCIA

Es la propiedad índice del concreto para evaluar su comportamiento y de manera general, la resistencia es la capacidad que tienen los materiales para soportar diversas solicitaciones de carga a que pueden ser sometidos: Compresión, tensión, flexión, etc. [18].

COMPRESIÓN

No existe una convención aceptada universalmente sobre que tipo de espécimen es el mejor para realizar ensayos en compresión. Por lo común se usan especímenes de tres tipos: cilindros, cubos y prismas.

En nuestro medio y en numerosos países de América Latina, se usan cilindros [ASTM] con una relación de esbeltez igual a dos. En estructuras de concreto reforzado el espécimen usual es el cilindro de 15 X 30cm. En estructuras construidas con concreto en masa, donde se emplean agregados de gran tamaño (10 a 15 cm), se usan cilindros de 30 X 60 cm o de 60 X 120 cm. Generalmente, las resistencias se determinan a los 28 días de edad del concreto o a la edad en que el concreto vaya a recibir la carga de servicio.

En muchos países de Europa [7] se usan cubos para obtener un índice de resistencia del concreto a la compresión. Las dimensiones de los cubos varían entre 10 y 30 cm de arista, según los países.

Los cilindros se fabrican por lo general en moldes de acero apoyados en una placa en su cara inferior y libres en su parte superior, donde es necesario dar un acabado manualmente. Este queda con frecuencia demasiado rugoso para que pueda apoyarse directamente la cabeza de la máquina de ensaye. Salvo en casos en que se ha tenido mucho cuidado y se ha alisado el extremo del concreto fresco con una placa de acero, o bien se ha pulido la superficie rugosa, es necesario dar una preparación a los extremos del cilindro para poder asegurar que la presión queda uniformemente distribuida y que la dirección de carga es paralela al eje del cilindro. Esta operación, llamada cabeceado y que consiste en aplicar un cierto material, generalmente azufre o pasta de cemento, a los extremos del cilindro para producir una superficie lisa de apoyo, prolonga el tiempo necesario para la preparación del ensaye e introduce una variable adicional en los resultados: El material y la forma del cabeceado [9, 16, 18].

MÓDULO DE ELASTICIDAD

Es una medida de la rigidez de los materiales. Específicamente en el caso del concreto, se determina mediante la relación que existe entre el esfuerzo a la compresión y la correspondiente deformación unitaria [24].

En el concreto se puede establecer un Módulo de Elasticidad mediante la siguiente relación; esto es para el concreto hidráulico elaborado con agregados de la región y según investigaciones realizadas en el laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la F.I.C., se propone la siguiente fórmula [3].

$$ME = 17000\sqrt{f'c}$$

donde:

ME = Módulo de elasticidad.

f'c = Resistencia del concreto a la compresión.

TENSIÓN INDIRECTA

Es difícil encontrar una manera sencilla y reproducible de determinar la resistencia a tensión uniaxial. Siendo el concreto, bajo esta condición, un material frágil, es necesario que la sección transversal del espécimen varíe gradualmente, para evitar fallas prematuras debidas a concentraciones de esfuerzos.

La resistencia a la tensión del concreto se mide mediante un método indirecto ideado por Fernando Carneiro, de ahí proviene la denominación común que se le da al

método como “Prueba Brasileña”. Su valor oscila entre el 8% y el 12% del $f'c$, o según A.C.I. $f_t = 1.78\sqrt{f'c}$ [11, 16].

CURADO

La protección que se le da al concreto para evitar la pérdida de agua o reponer la que se pierda, recibe el nombre de curado; esta operación es sumamente importante, pues de un buen curado depende la resistencia que finalmente alcanzará el concreto.

La forma para efectuar el curado del concreto puede ser variada, pero la más generalizada consiste en cubrir la superficie con una película impermeable a base de asfalto, alquitrán, silicato de sodio, etc., este procedimiento tiene como finalidad, conservar el agua que se usó en la preparación de la revoltura, o sencillamente, mojando con agua la superficie colada, logrando con esto conservar húmedas las partes coladas ya que el cemento tomará el agua que necesita para su adecuada hidratación [20].

FRAGUADO

Una vez que el cemento y el agua entran en contacto, se inicia una reacción química exotérmica y se forma un gradiente de temperatura del medio del espécimen hacia la superficie expuesta a la temperatura ambiental, determinando así el paulatino endurecimiento de la mezcla; mientras exista agua en contacto con el cemento, progresa el endurecimiento del concreto.

Antes de su total endurecimiento, la mezcla experimenta dos etapas dentro de su proceso general que son: el fraguado inicial y el fraguado final.

El primero corresponde cuando la mezcla pierde su plasticidad volviéndose difícilmente trabajable.

Conforme la mezcla continua endureciendo, ésta llegará a su segunda etapa alcanzado una dureza apreciable, su fraguado final.

El tiempo de fraguado inicial oscila entre 50 y 60 min. dependiendo del tipo de cemento. El fraguado final se estima en unas 9 o 10 hrs [16].

III.5 OTROS MATERIALES EMPLEADOS EN LA ELABORACIÓN DEL CONCRETO HIDRÁULICO

CONCRETOS BOMBEABLES

Por definición, un concreto bombeable, es aquel que puede transportarse a través de una tubería, independientemente del tipo de bomba empleada.

Para cumplir esto, se requiere que el concreto que se desee bombear esté constituido de tal forma que la fricción que se genera al pasar sobre la pared interior de la tubería no se eleve en forma considerable, y que el concreto no se autobloquee al pasar por la misma. Cumplidas estas condiciones, el concreto debe ser capaz de transitar a lo largo de la tubería y deformarse en los cambios de dirección (codos) que se tengan en ella [11].

Características del concreto bombeable

Mortero Fino

Uno de los principales aspectos a cumplir para tener un concreto que pueda deslizarse por una tubería, es disminuir su fricción al transitar por ella. Esto se logra con la presencia de un agente fluidificante representado por el mortero fino, es decir la mezcla de finos (cemento y arena) y agua.

El contenido de finos recomendado - de acuerdo con las Normas- para el concreto armado es suficiente para lograr un concreto bombeable, siempre que la superficie total de los agregados esté totalmente cubierta por una película de lubricación. Esta los mantiene totalmente separados, además de existir suficiente agente fluidificante para ocupar el espacio poroso entre ellos y mantener una lubricación permanente sobre las paredes de la tubería [11].

Forma, Redondez y Superficie textural

Las características identificadas de los agregados como forma, redondez y superficie textural, que tienen influencia sobre la trabajabilidad del concreto, influyen en forma importante sobre su capacidad para ser bombeado. Las condiciones indeseables en cada una de estas características son:

Forma: Formas planas y alargadas

Redondez: Agregados con aristas vivas (angulosos)

Superficie textural: Agregados ásperos, rugosos y/o porosos

Si alguna de estas propiedades están presentes en el concreto a bombear, es necesario incrementar la cantidad de finos en el concreto. Los materiales que pueden ayudar para este fin son las cenizas y el polvo de roca o "filler" [11].

CENIZAS VOLCÁNICAS Y CENIZAS DE FONDO DE CALDERA

Se han desarrollado hormigones livianos de bajo costo utilizando residuos de las centrales térmicas. La combustión del carbón finamente molido deja como residuo cenizas volantes (CV), las cuales son atrapadas en trampas electroestáticas, y cenizas de fondo de caldera (CF), que se recogen en una parrilla en el fondo de la caldera.

Las CV son un material puzolánico, esto es, que reacciona con la cal en presencia de agua a temperatura ordinaria para formar compuestos cementíceos.

Las CF son básicamente una escoria enfriada con agua y que se utiliza como agregado inerte.

Se decidió utilizar estos materiales, (CV y CF), dado que, además de las propiedades físico-químicas propias de las cenizas, éstas constituyen un residuo económica y ecológicamente problemático que deben eliminar las centrales eléctricas [17].

Las materias primas utilizadas son cemento, CV, CF, agua y un agente activante (aluminio). Las principales características del hormigón obtenido son:

- Baja densidad (800 a 1200 kg/m³)
- Baja conductibilidad térmica.
- Aceptable resistencia mecánica, apta para aplicaciones no estructurales (15 a 60 kg/cm² a 28 días)

ADITIVOS MINERALES FINAMENTE DIVIDIDOS

Los aditivos finamente divididos son materiales pulverizados que se agregan al concreto antes del mezclado o durante este para mejorar o transformar algunas de las propiedades del concreto de cemento Pórtland en estado plástico o endurecido. Estos aditivos son generalmente materiales naturales o subproductos [17].

MATERIALES CEMENTANTES

Los materiales cementantes son sustancias que por si solas tienen propiedades hidráulicas cementantes (fraguan y endurecen en presencia de agua).

Los materiales cementantes incluyen a la escoria granulada de alto horno molida, al cemento natural, a la cal hidráulica hidratada, y a las combinaciones de estos y de otros materiales.

La escoria granulada de alto horno molida fabricada a partir de escoria de alto horno de hierro, es un producto no metálico que consiste principalmente de silicatos y aluminosilicatos de calcio y de otras bases que se desarrollan en la fundición simultáneamente con el hierro en los altos hornos. La escoria fundida a una temperatura de aproximadamente 1500° C, queda templada rápidamente al enfriarse por inmersión en agua y forma un material granular vítreo parecido a la arena. El material granular es molido y esta escoria molida áspera y angulosa al entrar en contacto con el agua y con un activador, NaOH o CaOH, ambos facilitados por el cemento Pórtland, se hidratan y fragua de manera similar al cemento Pórtland. La escoria enfriada al aire no tiene las propiedades hidráulicas que tiene la escoria enfriada por agua. La especificación ASTM C 989 clasifica a la escoria según su reactividad con los grados 80, 100 o 120.

El cemento natural se forma al calcinar calizas arcillosas justo debajo del punto de fusión; luego se muele el material hasta obtener un polvo muy fino [12].

MATERIALES PUZOLANICOS

Una puzolana es un material silíceo o aluminosilíceo que por si mismo posee poco o ningún valor cementante pero que, en forma finamente molida y en presencia de agua, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento Pórtland para formar compuestos que poseen propiedades cementantes.

Las puzolanas también incluyen a la ceniza volante y al humo de sílice. El aditivo mineral más ampliamente utilizado en el concreto, la ceniza volante, es un residuo finamente dividido (polvo que se asemeja al cemento) que resulta de la combustión del carbón mineral pulverizado en las plantas generadoras de electricidad. Con la ignición en el horno, la mayor parte de la materia volátil y de carbono existentes en el carbón mineral se calcina. Durante la combustión, las impurezas del carbón mineral (como la arcilla, el feldespato, cuarzo y la pizarra) se funden en suspensión, y son retiradas de la cámara de combustión por el gas de escape. Mientras transcurre el proceso, el material fundido se enfría y se solidifica formando partículas esféricas llamadas cenizas volantes [12].

Materiales puzolánicos y cementantes

Algunas escorias granuladas de alto horno molidas y también algunas cenizas volantes, exhiben propiedades tanto puzolánicas como cementantes. Las cenizas volantes ASTM C 618 Clase C con un contenido de óxido de calcio de aproximadamente 15 a 30% en peso son las predominantes dentro de esta clasificación. Al exponerse al agua, muchas de estas cenizas se hidratan y endurecen en menos de 45 minutos.

La práctica de utilizar ceniza volante y escoria granulada de alto horno molida en las mezclas de concreto de cemento Pórtland, ha ido aumentando en los últimos años en los Estados Unidos. Una de las principales razones de este incremento es el interés en la conservación de la energía así como la reducción en el costo del concreto que se obtiene al emplear cenizas o escorias para reemplazar parcialmente al cemento.

La ceniza volante consiste principalmente de silicatos vítreos que contienen sílice, alúmina, hierro, y calcio. Otros componentes menores son el magnesio, el azufre, el sodio, el potasio, y el carbono. También se encuentra presente una pequeña cantidad de compuestos cristalinos. La densidad de la ceniza volante generalmente se encuentra dentro del rango de 2.2 a 2.8 y su color es gris o beige.

El humo de sílice, al que también se le conoce como microsílice o humo de sílice condensado, es otro material que se emplea como aditivo pusolánico. Este producto en forma de polvo de color gris claro a oscuro o en ocasiones gris azulado verdoso, es resultado de la reducción de cuarzo muy puro con carbón mineral en un horno de arco eléctrico durante la manufactura del silicio o de aleaciones de ferrosilicio. El humo de sílice asciende como vapor oxidado de los hornos a 2,000 °C. Se enfría, se condensa y se recolecta en enormes bolsas de tela. Entonces se le procesa para retirarle las impurezas y para controlar su tamaño de partícula.

El humo de sílice condensado esencialmente consiste en dióxido de sílice (más de 90 %) en forma no cristalina. Puesto que es un material susceptible de ser conducido por el aire como la ceniza volante, tiene forma esférica. Es extremadamente fino, con partículas con diámetros menores de una micra y con un diámetro promedio de aproximadamente 0.1 micra, casi 100 veces menor que las partículas promedio de cemento [17].

Materiales nominalmente inertes

Los materiales inertes frecuentemente se emplean como adición al cemento y como una sustitución parcial de la arena en el concreto para mejorar las trabajabilidades pobres causadas frecuentemente por la falta de finos en la arena. A veces se agrega a los concretos caliza pulverizada para reducir la reactividad álcali-sílice.

Los materiales nominalmente inertes tienen pocas o nulas propiedades cementantes. Algunos de los materiales nominalmente inertes son el cuarzo en bruto finamente dividido, las dolomitas, muchas calizas, el mármol, el granito, y otros materiales.

El humo de sílice se vende en forma de polvo, es más fácil conseguirlo como líquido. Actualmente la ASTM está trabajando en una especificación para el humo de sílice [17].

EFFECTOS SOBRE EL CONCRETO FRESCO

Requerimientos de agua. Las mezclas de concreto que contienen cenizas volantes o escorias granuladas de alto horno molidas, casi siempre requieren menos agua (aproximadamente de

1 a 10 %) para obtener un cierto revenimiento que los concretos que solo contienen cemento Pórtland.

Los concretos con humo de sílice requieren de más agua para obtener un revenimiento dado, a menos que se emplee un reductor de agua o un superplastificante. Algunas mezclas pobres no experimentan aumentos en la demanda de agua cuando se tiene presente solamente una pequeña cantidad de humo de sílice.

Las inclusiones de escoria molida, ceniza volante, y humo de sílice en concretos sin aire incluido generalmente reducen la cantidad de aire atrapado. La ceniza volante y el humo de sílice normalmente muestran un mayor efecto en esta reducción que la escoria molida [17].

Trabajabilidad

La ceniza volante, la escoria molida, y muchos materiales inertes generalmente mejoran la trabajabilidad de los concretos de igual resistencia y revenimiento. El humo de sílice podría reducir la trabajabilidad; por eso normalmente se agregan reductores de agua de alto rango a los concretos con humo de sílice para mantener la trabajabilidad [27].

Segregación y sangrado

Los concretos en los que se emplea ceniza volante o humo de sílice por lo general muestran menos segregación y sangrado que los concretos simples. Este efecto hace a la ceniza volante particularmente valiosa en los concretos fabricados con agregados que presentan deficiencias en su contenido de finos. Los concretos que utilizan ciertas escorias granulares de alto horno molidas, tienden a presentar sangrados ligeramente mayores que los concretos sin aditivo. Las escorias no tienen efectos adversos en lo referente a la segregación [17].

Calor de hidratación

El uso de cenizas volantes y de escorias molidas reducen la cantidad de calor que se forma en una estructura de concreto debido a su menor calor de hidratación. Algunas puzolanas tienen un calor de hidratación del orden del 40% del presentado por el cemento. Esta reducción en el aumento de la temperatura resulta especialmente benéfico en los concretos usados en estructuras masivas [17].

Tiempo de fraguado

El uso de cenizas volantes, puzolanas naturales y escorias granuladas de alto horno molidas generalmente provoca retardos en el tiempo de fraguado del concreto. Por ejemplo, en un estudio, la ceniza volante provocó que el fraguado inicial se retardara de 10 a 55 min. y que el fraguado final se retardara de 50 a 130 minutos; la mezcla contenía 230 kg de cemento

tipo 1 y 76 kg de ceniza volante, en tanto que la mezcla testigo contenía 306 kg de cemento por metro cúbico y nada de ceniza volante. El grado de retardo en el fraguado depende de los factores tales como la cantidad de cemento Pórtland, el requisito de agua, el tipo del material finamente dividido, y la temperatura del concreto. El tiempo de fraguado aumenta con las cenizas volantes que hacen aumentar los requisitos de agua [17].

Proporcionamiento

Los aditivos minerales finamente divididos se agregan al concreto como una adición o para sustituir parcialmente al cemento en el concreto o bien como una combinación de adición y sustitución. El empleo de estos aditivos como sustitutos de cemento puede reducir sustancialmente las resistencias del concreto a edad temprana y a 28 días si se proporcionan rígidamente como un reemplazo del cemento más que como una combinación.

La ceniza volante, cuando se emplea, consiste generalmente del 15 al 20% del peso del cemento más puzolana.

La escoria de alto horno granulada molida, cuando se emplea en concretos, normalmente constituye un promedio de aproximadamente 40% del material cementante en la mezcla.

El humo de sílice, ha sido empleado como reemplazo parcial del cemento o como adición al cemento en cantidades que varían entre el 5 y 10% y hasta llegar al 30% en peso del material cementante total [17].

EFFECTOS EN EL CONCRETO ENDURECIDO

Resistencia

La ceniza volante, la escoria granulada de alto horno molida, el humo de sílice y otros aditivos minerales finamente divididos, contribuyen a la adquisición de resistencia del concreto. Sin embargo, la velocidad en la adquisición de resistencia de un concreto que contenga estos aditivos, variará con frecuencia respecto a la de un concreto que emplee exclusivamente cemento Pórtland como material cementante. La resistencia a la tensión, a la flexión y a la torsión se ve afectada de igual manera que la resistencia a la compresión. Debido a la menor velocidad de hidratación cuando se emplean algunos de estos aditivos, la adquisición de resistencia a edades tempranas puede ser menor que la de un concreto comparable sin el aditivo, especialmente si las temperaturas de curado son bajas.

Debido a la lenta reacción puzolánica de algunos aditivos minerales, puede llegar a ser necesario un período de curado húmedo continuo con temperaturas de curado favorables mayor del que normalmente se requiere. El humo de sílice contribuye al desarrollo de resistencia especialmente entre los 3 y los 28 días, tiempo durante el cual un concreto con humo de sílice rebasa la resistencia del testigo. El humo de sílice también contribuye a la adquisición de resistencia a edad temprana de los concretos con ceniza volante [27].

Los aditivos minerales son a menudo esenciales para producir concretos de alta resistencia. Se han utilizado cenizas volantes especialmente en la producción de concreto de alta resistencia de entre 400 y 1000 kg/cm². Con el humo de sílice, los productores de concreto premezclado tienen la capacidad de producir concretos con resistencia de 1400 kg/cm² o más si se hace uso de agregados adecuados y de un aditivo reductor de agua de alto rango [11].

Permeabilidad y absorción

Si se cuenta con un curado adecuado, las cenizas volantes y las escorias de alto horno generalmente reducen la permeabilidad del concreto aun cuando el contenido de cemento sea relativamente bajo; a este respecto, el humo de sílice es especialmente efectivo. Las pruebas indican que la permeabilidad del concreto disminuye conforme aumenta la cantidad de material cementante hidratado y disminuye la relación agua-cemento. La absorción de un concreto con ceniza volante casi es la misma de un concreto sin ceniza, aunque algunas cenizas pueden reducir la absorción en un 20 % o más [11].

Color del concreto

Algunos materiales finamente divididos pueden colorear ligeramente al concreto endurecido. Estos efectos se relacionan con el color y la cantidad de aditivo empleado en el concreto. Muchos aditivos minerales se parecen al cemento y por lo tanto tienen poco efecto en el color. Algunos humos de sílice pueden dar al concreto un tinte ligeramente azulado o gris oscuro, y la ceniza volante oscura puede impartir un color oscuro al concreto cuando se utiliza en grandes cantidades [11].

AGREGADOS PARA CONCRETO

La grava y la arena concentran en las entrañas de su estructura pétreo minerales sedimentarios, metamórficos e ígneos. Los primeros son los que han acumulado residuos de fondos marinos de diversas especies desde hace millones de años; los metamórficos originalmente fueron sedimentarios para luego solidificarse y endurecerse transformándose en calizas y mármoles, mientras que los ígneos o volcánicos surgen de la erupción de volcanes cuyo material, al enfriarse, se transforma en roca.

Estos últimos son los más utilizados como agregados para concreto, ya que pueden llegar a tener mayor resistencia y peso específico, brindando así más calidad. Entre los principales tipos de rocas que comparten este origen están las andesitas que no son propiamente producto de lava sino material piroclástico, una especie de polvo combinado con rocas de grandes dimensiones expulsadas por la erupción volcánica. Otro tipo usual para la fabricación de agregados es el basalto, particularmente cuando se construyen pisos y pavimentos que deben ser resistentes a la abrasión. Independientemente de su origen y tipo, las rocas pueden ser densas o ligeras, y se consideran mejores elementos las más pesadas.

La composición física original en la arena y la grava es prácticamente la misma, y sólo se distinguen por el tamaño de sus partículas, siendo la arena el agregado fino y la grava el agregado grueso; así mismo, en cada una de ellas existen diferentes medidas, ya que una mezcla adecuada debe contener tanto partes finas, como grava de distintos tamaños, para que el material de menores dimensiones se acomode entre los gruesos, rellenando todos los espacios [27].

La importancia de utilizar el tipo y la calidad de los agregados, no debe ser subestimada, pues los agregados finos y gruesos ocupan comúnmente del 60% a 75% del volumen del concreto (70% a 85% en peso).

Los agregados deben cumplir ciertas reglas para darles un uso ingenieril óptimo: deben consistir en partículas durables, limpias duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubiertos de arcilla y de otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento.

Los agregados para concreto pueden ser de peso normal, ligero o pesado. Los tres tipos pueden ser utilizados para la producción de concreto estructural. En adición, los agregados ligeros se utilizan cuando se desean propiedades de aislamiento térmico o acústico en un concreto de baja densidad. Las propiedades de los agregados generalmente pueden ser divididas en dos grandes grupos. El primero se refiere a las propiedades naturales que dependen del tipo de material y no cambian después de su clasificación. El otro grupo se refiere a las propiedades que son características según los métodos de explotación y/o proceso de trituración.

Para la gran mayoría de los concretos la selección de los agregados se limita a los tipos disponibles localmente.

Tal vez uno de los problemas más triviales pero más difundidos en relación con los agregados para concreto, es la terminología que se utiliza para su identificación. Esto se debe a que en forma indiscriminada se generan diferentes definiciones y clasificaciones para hablar de ellos.

A esta diversidad de definiciones, se deben agregar las diferentes formas de clasificar que son empleadas en el caso de los agregados para concretos [25].

CLASIFICACIONES

A continuación se mencionan las clasificaciones más comunes que se emplean para este tipo de materiales:

CLASIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS

Los agregados pueden clasificarse de acuerdo a diferentes características (modo de fragmentación, tamaño de partícula, origen, composición, forma de partícula y color).

Agregado Fino (arena)

- 1) Agregado que pasa la malla 3/8" (9.5 mm) y casi totalmente pasa la malla No. 4 (4.75 mm) y es predominantemente retenido en la malla No. 200 (0.075 mm).
- 2) Es la porción de un agregado que pasa la malla No. 4 (4.75 mm) y es retenido en la malla No. 200 (0.075 mm).

Agregado Grueso (grava)

- 1) Agregado predominantemente retenido en la malla No. 4 (4.75 mm).
- 2) Es la porción de un agregado retenido en la malla No. 4 (4.75 mm).

La eliminación de las otras clasificaciones (origen, composición, forma de partícula y color) se debe a que presentan los siguientes inconvenientes [11]:

- Clasificaciones creadas con un objetivo diferente a la identificación de agregados para concreto (ejemplo: la división de rocas en ígneas, sedimentarias y metamórficas se realizó de acuerdo con las condiciones naturales de formación de las rocas y no calificando sus características físicas particulares asociables al uso en concreto).
- Conceptos ambiguos (ejemplo: desde el punto de vista de la composición química, basalto y tezontle son lo mismo, aunque es reconocido que pueden tener una diferencia significativa en color y peso volumétrico).
- No califican ninguna característica física de las que se evalúan en los agregados para concreto (ejemplo: origen).
- Miembros de familias diferentes o iguales pueden tener características físicas distintas o similares, generando confusión en las propiedades del material (ejemplo: hay calizas de muy diversa calidad física, desde buena hasta pésima).
- Clasificaciones simplistas que inducen a interpretaciones erróneas (ejemplo: el color).

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS

Las características de los agregados que es conveniente evaluar antes de ser empleados en la fabricación de concreto son, tabla 2, [11]:

Tabla 2. Características de los agregados pétreos.

Característica	Pruebas aplicables
	ASTM
Granulometría	C 33
Limpieza	C 33
Finos indeseables	D 2419
Materia orgánica	C 40
Partículas inconvenientes	C117 / C142 / C88 / 123
Densidad	C 127 / C 128
Sanidad	C 88
Absorción y Porosidad	C 127 / C 128
Forma de Partícula	C 295 / C 128
Textura Superficial	C 295
Reactividad con los álcalis	
Examen petrográfico	C 295
Método químico	C 289 / C 586
Barras de mortero	C 227 / C 1105

En la tabla 2 tenemos una serie de pruebas que es necesario conocer para calificar a los agregados pétreos la cuales son establecidas por la ASTM, indicando el número de prueba correspondiente para cada caso.

GRANULOMETRÍA

Agregado Fino (arena)

Constituido nominalmente por partículas cuyo tamaño está entre 0.075 y 4.75 mm, en donde es deseable que exista continuidad granulométrica, es decir que exista presencia de todos los tamaños representantes de las diferentes fracciones que están establecidas.

Es importante comentar que si bien es útil que el agregado fino cumpla con la continuidad granulométrica, resulta poco prudente el especificar la arena con base a esta característica, ya que un adecuado diseño de mezclas o bien el uso de aditivos en el concreto, permite disminuir los posibles efectos no deseados por una deficiencia de esta característica del agregado [11].

Agregado Grueso

Es el que queda en el intervalo nominal comprendido desde 4.75 mm hasta la dimensión máxima que contenga el concreto, magnitud que define el tamaño máximo en cada caso. Al igual que en el agregado fino, es deseable que exista una continuidad granulométrica de la fracción. Por lo anterior, es claro que el límite superior del agregado grueso es el que rige la curva granulométrica a especificar para cada tipo de concreto, de acuerdo con sus necesidades constructivas.

De igual forma que en el agregado fino, los efectos por una deficiente composición granulométrica pueden ser disminuidos, vía la aplicación adecuada de la tecnología de concreto.

Debido a la costumbre, a veces hay confusión sobre lo que se quiere decir con el tamaño máximo del agregado. La norma ASTM C125 y el ACI 116 definen a este término y lo diferencian del tamaño máximo nominal del agregado. El tamaño máximo de un agregado, es el menor tamaño de malla por el cual todo agregado debe pasar. El tamaño máximo nominal de un agregado, es el menor tamaño de malla por el cual debe pasar la mayor parte del agregado.

El tamaño máximo del agregado que puede ser empleado depende generalmente del tamaño y forma del elemento de concreto y la cantidad y distribución del acero de refuerzo. Por lo común en el colado de elementos de concreto, el tamaño máximo de las partículas de agregado no debe sobrepasar:

1. Un quinto de la dimensión más pequeña del miembro de concreto.
2. Tres cuartos del espacio libre entre barras de refuerzo.
3. Un tercio del peralte de las losas.

Estos requisitos se pueden rebasar si, en opinión del ingeniero, la mezcla tiene la Trabajabilidad suficiente para colar el concreto sin que se formen vacíos [11].

Densidad

No hay una especificación sobre los límites de aceptación para esta característica, principalmente porque no tiene correlación con el grado de sanidad de los materiales que se analizan. Además, depende del peso unitario del concreto que se va a producir, dividiéndose para ello en ligero, normal y pesado [11].

Absorción y Porosidad

No hay una especificación sobre el límite de aceptación de esta característica, dado que esta depende de muy diversos factores, tales como: contenido de finos, forma y textura superficial de las partículas, porosidad de la roca y distribución granulométrica. Se

reconoce como información válida, sin embargo, que cuando se tienen rocas de buena calidad física y los agregados cumplen las otras especificaciones que se le solicitan, el agregado grueso no rebasa el 3% de la absorción, así como el agregado fino no supera el 5% máximo [11].

Forma de Partícula

En términos generales, no existe una especificación estricta para esta característica que evalúe la redondez y esfericidad de los agregados, ya que es demostrable que en condiciones idénticas, son más adecuados los agregados de formas redondeadas para la producción de concretos con resistencias que no excedan los valores de 250 kg/cm^2 . Asimismo, es recomendable que para concretos que requieran desarrollar mayores resistencias a las de referencia, se haga uso de partículas de formas más angulosas. En el caso de la esfericidad evaluada por la presencia de partículas planas y alargadas, es recomendable que éstas no superen el 20% máximo de acuerdo con el comité ACI 207 [11].

Textura Superficial

Al igual que para la forma, no existe una especificación rigurosa para la textura superficial, ya que los diferentes tipos que existen producen efectos diversos en la fabricación de concreto [11].

Reactividad con los Álcalis

Existen tres pruebas que evalúan esta característica de los agregados, tabla 3, independientemente de si la reacción es álcali-sílice o álcali-carbonato. Las tres son importantes por los elementos de juicio que aportan sobre el posible comportamiento del material al ser utilizado en la fabricación de concreto [11]:

Tabla 3. Pruebas para evaluar la reactividad de los agregados con los álcalis.

Método de prueba	Carácter del resultado	Evaluación
Estudio petrográfico*	Definitivo, sólo material inocuo	Inocuo/Deletéreo
Método químico	Definitivo, sólo material inocuo	Inocuo/Deletéreo
Barras de mortero	Definitivo, estimación potencial	Inocuo/Deletéreo

* Es importante ya que califica cuál es el tipo de reacción que puede presentar el agregado, al identificar y cuantificar los materiales potencialmente reaccionantes.

Valor de la expansión en relación con el tipo de reacción y su clasificación.

En la tabla 3 tenemos las tres pruebas que se realizan para conocer la existencia o no de reactividad álcali-agregado, y en el caso de las normas para evaluar dicho fenómeno

tenemos la tabla 4 en la cual se nos indica la norma para la reacción álcali-sílice y álcali-carbonato.

Tabla 4. Normas para evaluar la reacción con los álcalis.

	Álcali-Sílice (NMX C-180)	Álcali- Carbonato (ASTM C 1105)
Inocuo	< 0.05% a tres meses	< 0.015% a tres meses
Moderadamente reactivo	> 0.05%, < 0.10%	> 0.015%, < 0.025%
Deletéreo	> 0.10 a seis meses	> 0.025% a seis meses

INFLUENCIA DE LOS AGREGADOS EN CONCRETO

En Estado Fresco. En el caso de las características de los agregados pétreos que tiene influencia en el concreto fresco tenemos la tabla 5, la cual nos indica la propiedad que se ve afectada por una característica en especial de los agregados pétreos empleados en la elaboración de dicho concreto hidráulico.

Tabla 5. Influencia de los agregados en el concreto fresco.

Propiedad del concreto	Característica de los agregados que la influye
Peso unitario	Densidad Tamaño máximo/granulometría
Manejabilidad	Granulometría Forma de partícula
Contracción plástica	Limpieza Partículas friables
Requerimiento de agua	Tamaño máximo/granulometría Sanidad Limpieza
Sangrado	Granulometría Forma de partícula
Pérdida de revenimiento	Absorción
Segregación	Tamaño máximo/granulometría

En Estado Endurecido. Para el concreto ya endurecido se tiene de igual manera la propiedad que se ve afectada por alguna de las características del concreto hidráulico, tabla 6. En la tabla 6 se nos explica cada una de estas influencias que tiene el agregado pétreo en el concreto hidráulico ya endurecido.

Tabla 6. Influencia de los agregados en el concreto endurecido.

Propiedad del concreto	Característica de los agregados que la influye
Durabilidad	Textura superficial Sanidad Absorción Porosidad Reactividad con los álcalis
Resistencia a compresión	Limpieza Tamaño máximo/granulometría Forma de partícula Resistencia mecánica Partículas friables Textura superficial
Cambios volumétricos	Tamaño máximo/granulometría Forma de partícula Limpieza Presencia de arcilla Módulo de elasticidad
Costo	Tamaño máximo/granulometría Forma de partícula Textura superficial Limpieza
Sangrado	Granulometría Forma de partícula
Resistencia a la abrasión	Resistencia a la abrasión
Peso unitario	Densidad
Permeabilidad	Porosidad
Partículas friables/terrones de arcilla	Irregularidades superficiales

III.6 DISEÑO DEL CONCRETO HIDRÁULICO

Método de American Concrete Institute (A. C. I.), [2]

El procedimiento para la dosificación de mezclas de concreto por este método es aplicable al concreto de peso normal. Este método se funda en el hecho de que para un tamaño máximo de agregado grueso, el contenido de agua en kilogramos por metro cúbico determina el grado de trabajabilidad de la mezcla, independientemente de las proporciones de la mezcla.

Independientemente de que las características del concreto estén prescritas en las especificaciones o de que se deje la dosificación de la persona que la va a hacer, la

determinación de los pesos de las mezclas por metro cúbico de concreto se lleva a cabo más satisfactoriamente de acuerdo con la siguiente secuencia:

Primer Paso.- Elección del revenimiento. Cuando no especifica el revenimiento, puede seleccionarse un valor apropiado para la obra de los que aparecen en la Tabla 7. Las variaciones de revenimiento que se muestran son aplicables cuando se emplea el vibrador para compactar concreto. Deben emplearse mezclas de consistencia más densa, que pueden colocarse con buen rendimiento

TABLA 7

REVENIMIENTOS RECOMENDADOS PARA DIVERSOS TIPOS DE CONSTRUCCIÓN		
TIPOS DE CONSTRUCCIÓN	Revenimientos en Centímetros	
	Máximo	Mínimo
Muros de cimentación y zapatas	8	2.5
Zapatas cajones de cimentación y muros de su estructura sencillos.	8	2.5
Vigas y muros reforzados.	10	2.5
Columnas para edificios.	10	2.5
Pavimentos y losas.	8	2.5

El revenimiento se puede incrementar cuando se emplean aditivos químicos, se debe de tener en cuenta que el concreto tratado con aditivo tiene una relación Agua/ Cemento o Agua /Materiales cementantes igual o menor sin que potencialmente tengan segregación o sangrado excesivo se puede incrementar en 2.5 cm. Cuando los métodos de compactación no sean mediante vibrado.

Segundo paso.- Elección del tamaño máximo del agregado. Por lo general, el tamaño máximo del agregado debe ser el mayor disponible económicamente y guardar las relaciones con las dimensiones de la estructura. En ningún caso el tamaño máximo debe exceder de 1/5 de la menor dimensión entre los costados de las cimbras, 1/3 del espesor de las lozas, ni $\frac{3}{4}$ del espacio mínimo entre varillas de refuerzo individuales, paquetes de varillas, o torones de pretensado. A veces estas limitaciones se pasan por alto si la trabajabilidad y los métodos de compactación permiten que el concreto sea colado sin cavidades o huecos cuando se requiere concreto de alta resistencia, se pueden obtener mejores resultados con agregados de tamaño máximo reducido, ya que estos producen resistencias superiores con una relación Agua/Cemento determinada.

Tercer paso.- Cálculo del agua de mezclado y el contenido del aire. La cantidad de agua por volumen unitario de concreto requerida para producir determinado revenimiento, depende del tamaño máximo, de la forma de la partícula y granulometría de los agregados, así como de la cantidad de aire incluido. En la Tabla 8 aparecen valores estimados del agua de mezclado requerida para concretos hechos con diversos tamaños máximos de agregado, con o sin aire incluido, sin aire incluido implica que sólo contendrá el % de aire atrapado de

manera accidental. Según sea la textura y forma del agregado, los requerimientos de agua de mezclado pueden estar por encima o por debajo de los valores tabulados, pero son suficientemente precisos para el primer cálculo. Estas diferencias en el requerimiento de agua no se reflejan necesariamente en la resistencia, ya que pueden estar implicados otros factores de compresión.

En la parte superior de la Tabla 8, se indica la cantidad aproximada de aire atrapado que puede esperarse en concretos sin inclusión del aire, y en la parte inferior, el promedio de contenido de aire recomendado para concretos con inclusión de aire. Para el caso de que sea necesario o deseable incluir aire, se señalan tres niveles de contenido de aire para cada tamaño de agregado, los que dependen del propósito de la inclusión de aire y de la severidad de la exposición, si la inclusión del aire está en función de la durabilidad.

TABLA 8.

AGUA KG/M ³ DE CONCRETO	TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DEL AGREGADO, EN mm.							
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
	10 [*]	12.5 [*]	20 [*]	25 [*]	40 [*]	50 ^{x*}	70 ^{x++}	150 ^{x++}
Revenimiento en centímetros								
2.5 a 5	205	200	185	180	160	155	145	125
7.5 a 10	225	215	200	195	175	170	160	140
15 a 18	240	230	210	205	185	180	170	-----
Porcentaje de aire atrapado en concreto sin inclusión de aire	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido								
2.5 a 5	180	175	165	160	145	140	135	120
7.5 a 10	200	190	180	175	160	155	150	135
15 a 18	215	205	190	185	170	165	160	-----
Promedio recomendado del contenido total de aire, porcentaje de acuerdo con el nivel de exposición **								
Exposición ligera	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5 ^{***xx}	1.0 ^{***xx}
Exposición moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5 ^{***xx}	3.0 ^{***xx}
Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5 ^{***xx}	4.0 ^{***xx}

*Estas cantidades de agua de mezclado se emplean para calcular factores de cemento en mezclas de prueba. Son cantidades máximas de agregados angulares, razonablemente bien formados y con granulometría dentro de los límites de especificaciones aceptadas.

* Los valores de revenimiento para concreto con agregado mayor de 40 mm. Están basados en pruebas de revenimiento después de la remoción de partículas mayores de 40 mm mediante tamizado húmedo.

*Estas cantidades de agua de mezclado se emplean para calcular factores de cemento para mezclas de prueba, cuando se utilizan agregados de tamaño máximo nominal de 60 ó 150 mm son promedios para agregados gruesos razonablemente bien formados con buena granulometría de agregado fino.

** En varios documentos del A.C.I. aparecen recomendaciones con respecto al contenido de aire y a las tolerancias necesarias del contenido de aire para el control en el campo. Entre los documentos están: A.C.I. 201, 345, 301, y 302. la norma ASTM C 94 para concretos premezclados también proporciona los límites del contenido de aire. Los requerimientos que aparecen en otros documentos no siempre pueden concordar exactamente, por lo que al proporcionar concreto debe prestarse atención a la selección de un contenido de aire que se ajuste a las necesidades de obra, así como a las especificaciones aplicables.

*** Para concretos que contienen agregados que serán utilizados en humedad a través de una malla de 1 ½" antes de someterse a la prueba de contenido de aire, el contenido de aire esperado en el material de un tamaño inferior a 40 mm sin embargo, los cálculos iniciales de proporción deben incluir el contenido de aire como un porcentaje del total.

xx Cuando se emplea agregado grande en el concreto con bajo factor de cemento, la inclusión de aire no debe de ir en detrimento de la resistencia. En la mayoría de los casos este requerimiento de agua de mezclado se reduce lo suficiente para mejorar la relación Agua/Cemento y, de esta manera, compensar el efecto reductor de resistencia del concreto con reducción de aire. Generalmente, sin embargo para dichos tamaños máximos grandes de agregado los contenidos de aire recomendados en caso de exposición severa, deben tomarse en consideración aunque pueda haber poca o ninguna exposición a la humedad o al congelamiento.

++ Estos valores se basan en el criterio de que es necesario un 9 % de aire en la fase de mortero del concreto. Si el volumen de mortero va a ser substancialmente diferente del determinado en esta obra, puede ser conveniente calcular el contenido de aire necesario tomando un 9 % del volumen real del mortero.

Exposición ligera.- Cuando se desee la inclusión de aire por otros efectos benéficos que no sean la durabilidad, por ejemplo, para la cohesión o trabajabilidad, o para aumentar la resistencia del concreto con bajo factor de cemento, pueden emplearse contenidos de aire inferiores a los necesarios para la durabilidad.

Esta exposición incluye servicio interior o exterior en climas en los que el concreto no estará expuesto a agentes de congelación y deshielo.

Exposición moderada.- Implica el Servicio en climas en donde es probable la congelación, pero en los que el concreto no estará expuesto continuamente a la humedad o al agua corriente durante largos períodos antes de la congelación, ni agentes descongelantes u otros productos químicos agresivos.

Exposición severa.- El concreto expuesto a productos químicos descongelantes u otros agentes agresivos, o bien, cuando el concreto pueda resultar altamente saturado por el contacto continuo con humedad o agua corriente antes de la congelación.

Ejemplos de lo anterior son: pavimentos, pisos de puentes, guarniciones, desagües, aceras, revestimiento de canales, tanques exteriores para agua o resumideros.

Cuarto paso.- Selección de la relación Agua/Cemento. La relación agua/cemento requerida se determina no solo por los requisitos de resistencia, sino también por otros factores como la durabilidad y las propiedades de acabado.

Puesto que diferentes agregados y cementos producen, generalmente, distintas resistencias empleando la misma relación agua/cemento, es muy deseable establecer una relación entre la resistencia y la relación agua/cemento para los materiales que de hecho van emplearse. En ausencia de estos datos, pueden tomarse de la tabla 9a valores aproximados y relativamente conservadores para concretos que contengan cemento Pórtland Tipo I. Con materiales comunes, las relaciones tabuladas de agua/cemento deben producir las resistencias indicadas, con base en pruebas a los 28 días de muestras curadas en condiciones normales de laboratorio.

La resistencia promedio seleccionada debe, por supuesto, exceder de la resistencia especificada por un margen suficiente para mantener dentro de los límites especificados las pruebas con bajos valores.

TABLA 9a.

Resistencia a la compresión a los 28 días (kg/cm ²)*	Relación A/C en peso	
	Sin aire incluido	Con aire incluido
420	0.41	-----
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

*Los valores son resistencias promedio estimadas para concretos que no contienen más del porcentaje de aire que se indica en la Tabla 8, para una relación A/C constante se reduce la resistencia del concreto conforme se incrementa el contenido de aire.

La resistencia se basa en cilindros de 15 x 30 cm, curados con humedad a los 28 días, a 23 ± 1.7 °C, de acuerdo con la norma ASTM C 31.

La relación supone un tamaño máximo de agregado de $\frac{3}{4}$ a 1", para un banco dado, la resistencia producida por una relación A/C dada se incrementará conforme se reduce el tamaño máximo del agregado.

NOTA: Para resistencias no especificadas es válida la interpolación

Para condiciones de exposición severas la relación agua/cemento debe mantenerse baja, aún cuando los requerimientos de resistencia puedan cumplirse con valores mayores.

En la Tabla 9.b aparecen los valores límite:

TABLA 9.b.

CORRESPONDENCIA ENTRE LA RELACIÓN A/C Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO		
Tipo de estructura	Relación A/C por peso.	
	Estructura continua o frecuentemente mojada y expuesta a congelación y deshielo*	Estructura expuesta al agua de mar o a sulfatos
Secciones esbeltas (barandales, guarniciones, umbrales, ménsulas, trabajos ornamentales) y secciones con menos de 3 cm de recubrimiento sobre el acero de refuerzo ^x .	0.45	0.40 ⁺⁺
Todas las demás estructuras	0.50	0.45 ⁺⁺

* Basado en el informe del comité ACI 201, “Durability of Concrete in Service”.

x El concreto también debe de tener aire incluido.

++ Si se emplea cemento resistente a los sulfatos, la relación A/C permisible puede incrementarse en 0.05

Quinto paso.- Cálculo del contenido de cemento. La cantidad de cemento por volumen unitario de concreto rige por las determinaciones expuestas en el tercero y cuarto pasos anteriores. El cemento requerido es igual al contenido estimado de agua de mezclado, dividido entre la relación A/C. Si, no obstante, la especificación incluye un límite mínimo separado sobre el cemento, además de los requerimientos de resistencia y durabilidad, la mezcla debe basarse en el criterio que produzca a una cantidad mayor de cemento.

Sexto paso.- Estimación del contenido de agregado grueso. Los agregados con tamaño máximo y granulometría esencialmente iguales producen concretos de trabajabilidad satisfactoria cuando se emplea un volumen dado de agregado grueso por volumen unitario de concreto, con base en varillado seco. En la Tabla 10 se muestra el volumen de agregado, en metros cúbicos, con base en varillado seco, para un metro cúbico de concreto. Este volumen se convierte a peso seco del agregado grueso requerido en un metro cúbico de concreto, multiplicándolo por el peso unitario de varillado en seco por metro cúbico de agregado grueso.

TABLA 10.

Tamaño Máximo Nominal		Volumen agregado grueso* varillado en seco por unidad de volumen de concreto para módulos de finura de arena indicados.			
Plg.	mm.	2.4	2.6	2.8	3.0
3/8	10	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2	13	0.59	0.57	0.55	0.53
1/4	19	0.66	0.64	0.62	0.60
1	25	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2	38	0.76	0.74	0.72	0.70
2	51	0.78	0.76	0.74	0.72

* Los volúmenes están basados en agregados en condiciones de varillado en seco, como se describe en la norma ASTM C 29. Estos volúmenes se han seleccionado a partir de relaciones empíricas para producir concretos con un grado de trabajabilidad adecuado a la construcción reforzada común. Para concretos menos trabajables, como los requeridos en la construcción de pavimentos de concreto, pueden incrementarse en un 10 % aproximado

Séptimo paso.- Estimación del contenido del agregado fino. Al término del sexto paso se han estimado todos los componentes del concreto, excepto el agregado fino, cuya cantidad se determina por diferencia. Utilizaremos el método del volumen absoluto, el cual implica el empleo de volúmenes desplazados por los componentes conocidos -agua, aire, cemento y agregado grueso- se restan del volumen unitario de concreto para obtener el volumen requerido de agregado fino. El volumen ocupado por cualquier componente en el concreto es igual a su peso dividido entre la densidad de ese material -siendo ésta el producto del peso unitario del agua por el peso específico del material-.

$$\text{Contenido de arena} = 1 \text{ m}^3 - (\text{Sv}-a)$$

Octavo paso.- Ajustes por humedad del agregado. Las cantidades de agregado que realmente deben pesarse para el concreto deben considerar la humedad del agregado. Los agregados están generalmente húmedos, y sus pesos secos deben incrementarse con el porcentaje de agua, tanto absorbida como superficial, que contienen. El agua de mezclado que se añade al lote debe de reducirse en cantidad igual a la humedad total menos la absorción.

Noveno paso.- Ajustes en las mezclas de prueba. Las proporciones calculadas de la mezcla deben verificarse mediante mezclas de prueba, preparadas y probadas de acuerdo con la ASTM C 129 “Making and Curing Concrete Compresión and Flexure Test Specimens in the Laboratory”, o por medio de mezcla reales en el campo, sólo debe usarse el agua suficiente para producir el revenimiento requerido, independientemente de la cantidad supuesta al dosificar los componentes de la prueba. Deben verificarse el peso unitario y la fluencia (ASTM C 138), así como el contenido del aire (ASTM C 138, C 173, C 231) del concreto. También debe tenerse cuidado de lograr la trabajabilidad apropiada, ausencia de segregación, así como las propiedades de acabado. Deben de efectuarse los ajustes necesarios en las proporciones de las mezclas subsecuentes, de acuerdo con los siguientes procedimientos:

- La cantidad estimada de agua de mezclado para producir el mismo revenimiento que el de la mezcla de prueba, sería igual a la cantidad neta de agua de mezclado empleada, dividida por la fluencia de la mezcla de prueba en metros cúbicos. Si el revenimiento de la mezcla de prueba no es el correcto, increméntese o redúzcase el contenido nuevamente estimado de agua a 2 kg por metro cúbico de concreto para cada centímetro de incremento o reducción del revenimiento.
- Si no se obtiene el contenido de aire deseado (para concreto de aire incluido), debe estimarse de nuevo el contenido requerido de aditivo para lograr el contenido apropiado de aire, y reducirse o incrementarse el contenido de agua de mezclado que se indica en el párrafo anterior, en 3 kg por cada 1 % en que se debe reducirse o incrementarse el contenido de aire respecto al de la mezcla de prueba previa.
- El peso unitario de concreto fresco estimado nuevamente para el ajuste de las proporciones de la mezcla de prueba, es igual al peso unitario en kg/m^3 medido en la mezcla de prueba, reducido o incrementado por el porcentaje de incremento o reducción del contenido de aire en la mezcla ajustada respecto a la primera mezcla de prueba.
- Deben calcularse nuevos pesos de mezcla, comenzando con el cuarto paso; si es necesario, se modificará el volumen de agregado grueso de la Tabla 10, para obtener una trabajabilidad adecuada.

Las muestras para el laboratorio con las que se realizarían los especímenes de prueba se diseñaron bajo las siguientes condiciones:

El concreto para las cinco proporciones analizadas de agregados de Joyitas como para agregados triturados, se diseñó con el método del American Concrete Institute (A.C.I.), debido a que este permite mayores relaciones de agua/cemento reflejándose en mezclas muy manejables y con menores consumos de cemento que el método de las Curvas de Abrams.

III.7 PRUEBAS FÍSICAS EMPLEADAS Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES

A continuación se describen brevemente las pruebas de calidad realizadas a los materiales pétreos empleados en el presente trabajo y las técnicas experimentales que se hicieron.

PESO VOLUMÉTRICO SECO Y SUELTO (ASTM C 29-97, agregado fino, C 29-97, agregado grueso)

Esta prueba consiste en determinar el peso por unidad de volumen de una arena cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre o natural, por simple gravedad.

La realización de esta prueba es como se menciona enseguida:

Se seca y tamiza el material, se vacía dentro del recipiente dejándose caer a una altura medida a partir de la arista superior del recipiente de aproximadamente 5 centímetros, llenando completamente el recipiente hasta colmarlo formando un cono.

Enseguida se enrasa el recipiente con la varilla y se limpia de las partículas adheridas en las paredes exteriores procediendo a pesarlo, para finalmente obtener la relación que hay entre el peso y el volumen del material.

PESO VOLUMÉTRICO SECO Y VARILLADO (ASTM C 29-97, agregado fino, C 29-97, agregado grueso)

Esta prueba consiste en obtener el peso por unidad de volumen de un material, cuando el material tiene una determinada compactación.

La forma de realizar la prueba se describe en seguida:

Se seca y tamiza el material, se procede a llenar el recipiente con material a volteo dejándolo caer a una altura aproximada de 5 centímetros, el llenado del recipiente debe de hacerse en tres capas dando a cada capa de material 25 golpes con la varilla punta de bala distribuyéndolos en toda la superficie del material.

Debe cuidarse que la varilla no penetre en la capa anterior al dar los golpes.

Se enrasa el recipiente con la varilla punta de bala y se limpian todas las partículas que hayan quedado adheridas a las paredes exteriores y finalmente se determina la relación que existe entre el peso y el volumen del material.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN ARENAS (ASTM C 136-96a)

Este análisis consiste en pasar por una serie de mallas o tamices la muestra representativa de arena, para conocer la distribución de los diámetros de las partículas y el módulo de finura (MF).

Se realiza el siguiente procedimiento:

1. Se toma una muestra representativa de arena de aproximadamente 600 gramos.
2. Se seca la muestra hasta peso constante, a una temperatura no mayor de $105 \pm 5^\circ \text{C}$.
3. Cuando el material este seco y frío, se tornan 500 gramos, pesados al décimo de gramo.
4. Se colocan las mallas en orden decreciente (4, 8, 16, 30, 50, 100 charola), se coloca la muestra de 500 gramos y se tapa.

5. Se agita el juego de mallas durante un tiempo de 10 minutos como mínimo, el agitado puede ser a mano o mecánicamente (Rof-tap).
6. En una superficie horizontal y limpia se colocan siete hojas de papel y sobre ellas se coloca el material retenido en cada una de las mallas, para lo cual se invertirá la malla con todo cuidado limpiando, con cepillo de alambre las mallas 4, 8, 16 y 30 para desalojar el material que se encuentra entre los espacios de la malla. Las mallas 50 y 100 se limpiarán con cepillo de cerdas.
7. Se procede a pesar cada uno de los materiales retenidos en las mallas hasta el décimo de gramo anotando los pesos en el registro correspondiente. Y se determina el módulo de finura, que será utilizado en el diseño del concreto, con la siguiente fórmula:

$$MF = \frac{\text{suma del porciento acumulativo de todas las mallas sin incluir la charola}}{100}$$

ABSORCIÓN EN ARENAS (ASTM C 128-97)

Esta prueba es para determinar la capacidad máxima de absorción que tienen una arena.

Pasos a seguir:

1. Se toma una muestra de 2 kg, se pone a saturar en agua durante 24 horas a 22° C aproximadamente, como mínimo.
2. Al término de este tiempo se seca superficialmente la arena, por medio del molde troncocónico como se describe a continuación:
 - Se coloca la arena en la charola y se coloca en la parrilla eléctrica para realizar la eliminación de agua que tiene en exceso, esto es, hacer el secado de la arena en forma superficial.
 - Para saber cuando la arena está seca superficialmente se coloca el molde troncocónico dentro de la charola con el diámetro mayor hacia abajo, se llena el molde con la arena en tres capas distribuyendo 25 golpes dados con el pizón, dando 12 a la primera, 8 a la segunda y 5 a la tercera. Inmediatamente se retira el cono y si la arena trata de disgregarse quiere decir, que ya esta seca superficialmente y si la arena mantiene la forma del cono significa que todavía tiene agua en exceso por lo tanto hay que seguir secando el material hasta que se obtenga el secado superficial. Conforme vaya perdiendo la humedad la muestra hay que realizar más continuamente el procedimiento con el cono para evitar que se seque en exceso.
3. Cuando la arena está seca superficialmente hay que pesar una muestra de 300 gramos, registrando este peso como peso saturado y superficialmente seco (Ph).

4. La muestra de 300 gramos, se coloca en una charola para secarla hasta peso constante, o sea, hasta eliminar completamente el agua.
5. Para saber cuando el material está seco, se coloca el cristal sobre el material, si no lo empaña retiramos el material y lo dejamos enfriar un poco, procediendo a pesarlo y registrar el peso como peso seco del material (P_s), si todavía se empaña el cristal hay que seguir secando el material para secarlo completamente. La fórmula para determinar el % de humedad de absorción se describe enseguida:

$$\% \text{ Humedad de absorción} = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

DENSIDAD DE LA ARENA (ASTM C 128-97)

Esta prueba tiene como finalidad obtener el volumen de las partículas de arena, es decir, el volumen efectivo excluyendo los vacíos que se forman entre las partículas de arena cuando se acomodan una sobre la otra.

Se siguen los pasos siguientes:

1. Se pone a saturar la arena en una charola durante 24 horas al término de este tiempo se seca superficialmente.
2. Se llena el picnómetro con agua hasta el nivel del orificio de salida
3. Enseguida se pesa una muestra de arena superficialmente seca anotando este valor como peso de la arena (P_a) que aproximadamente sea entre 200 y 300 gramos.
4. Posteriormente se coloca la arena dentro del picnómetro, procurando que no salpique agua por que esto nos ocasionaría un error en la prueba, esta operación va a provocar un aumento en el volumen de agua en el picnómetro el cual se derramará por el orificio y este volumen caerá en la probeta de manera que tendremos el volumen de la arena V .

La densidad de la arena se calcula de la siguiente manera:

$$DA = \frac{P_a}{V}$$

ABSORCIÓN EN GRAVAS (ASTM C 127-93)

El objetivo de esta prueba consiste en determinar la capacidad máxima de absorción de una grava expresándola en porcentaje respecto a su peso seco.

Pasos a realizar:

1. De la muestra que se trae de campo se criba a través de las mallas 3/4 y 3/8 , del material que pasa la malla 3/4 y se el que se retiene en la malla 3/8 se pone a saturar en una charola una muestra de 0.5 a 1.0 kilogramo durante 24 horas.
2. Enseguida con una franela se seca la muestra superficialmente de la grava de aproximadamente 300 gramos, anotando este valor como (Ph) peso saturado y superficialmente seco.
3. Se procede a colocar este material en una charola para secarlo en la parrilla eléctrica, para saber cuando se ha eliminado completamente la humedad se coloca el vidrio sobre el material y si no se empaña o se forman gotas de agua, se retira, se deja enfriar un poco y se procede a pesarlo registrando este peso como Ps peso seco del material.

La fórmula empleada es la siguiente:

$$\% \text{ de Humedad de absorción} = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100$$

DENSIDAD EN GRAVAS (ASTM C 127-93)

El objetivo de esta prueba es el de determinar el volumen absoluto de las partículas de grava en peso por unidad de volumen.

Pasos a seguir:

1. Se toma una muestra de grava saturada y superficialmente seca de 300 gramos, para obtenerlo se deja saturando la grava retenida en la malla 3/8 y que pasa la 3/4 durante 24 horas, secándola superficialmente con una franela, este peso se registra como el peso de la muestra (P).
2. Se llena el picnómetro hasta el nivel del orificio con agua, se coloca en una superficie plana y se procede a colocar la muestra de grava dentro, recibiendo el agua desalojada con una probeta graduada. Cuando se haya terminado de colocar la grava dentro del picnómetro esperamos a que escurra el agua desalojada y tendremos en la probeta el volumen del agua que corresponde al volumen (V) de la partículas de grava.

Fórmula a emplear:

$$D = \frac{P}{V}$$

GRANULOMETRÍA EN GRAVAS (ASTM C 136-96a)

Lo primordial de esta prueba es obtener la distribución de los tamaños de las partículas de la grava, así como el tamaño máximo (TM) de la grava, valor que se utiliza para el cálculo del proporcionamiento.

Pasos a seguir:

1. Se seca previamente la muestra de grava, enseguida se llena el recipiente de 10 litros, previamente destarado, la grava que se utilizó para llenar el recipiente se pesa y este peso se registra como peso de la muestra a realizarse el cribado o granulometría (PM).
2. Enseguida se pasa la grava a través de las mallas colocándolas de la mayor a la menor, agitándolas con la mano para que las partículas de menor tamaño pasen a la malla siguiente, cuando se haya terminado con la muestra de grava, al realizarle este procedimiento se elabora una tabla, registrando los pesos retenidos en cada una de las mallas correspondientes para llenar el formato correspondiente.

ELABORACIÓN DE LOS ESPECIMENES (ASTM C 192/ C192M-98)

Se elaboran los especímenes lo más cerca posible al lugar en donde deben ser almacenados durante las siguientes 24 horas. Si no es posible su elaboración en el mismo lugar de almacenaje, se deben transportar cuidadosamente los moldes con los especímenes a dicho lugar inmediatamente después de su enrasado. Se colocan en una superficie rígida y horizontal, que no esté sujeta a vibraciones u otras perturbaciones. Se deben evitar los movimientos bruscos, los golpes y las inclinaciones o rayados de la superficie de los especímenes.

Se coloca el concreto en los moldes usando un cucharón. Es necesario el remezclado del concreto en la charola, o con cucharón, para evitar la segregación durante el moldeo de los especímenes. Se toma el concreto del recipiente de mezclado en tal forma que sea representativo de la revoltura. Se mueve el cucharón alrededor del borde superior del molde al descargar el concreto, para asegurar una distribución uniforme y recibir la segregación del agregado grueso.

PRUEBAS MECÁNICAS REALIZADAS AL CONCRETO

Los métodos para verificar la calidad del concreto son las pruebas que a continuación se mencionan y que buscan la obtención de las propiedades mecánicas del concreto.

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DE CILINDROS DE CONCRETO (ASTM C 39/C 39M - 99)

La compresión se puede definir como el índice de resistencia a compresión a la ruptura del concreto hidráulico, compresión medida en un espécimen de concreto (de 15 x 30 cm en nuestro país), generalmente se expresa en (kg/cm^2) a una edad de 28 días, para cemento Pórtland Tipo I y se designa con el símbolo ($f'c$).

Las pruebas a la compresión de los especímenes deben ser realizadas tan pronto como sea posible después de retirarlos del curado, ninguno de los dos extremos de los especímenes de prueba a compresión se deben apartar de la perpendicular al eje en más de 0.5° (equivale a 3 mm. en 300) las bases de los especímenes de prueba a compresión que no estén en un plano dentro de 0.25 mm deben ser cabeceadas.

El espécimen se coloca en la placa inferior de carga con su cara endurecida hacia arriba, sobre la mesa de la máquina de prueba directamente debajo del bloque de apoyo, se deben limpiar las superficies de las placas superior e inferior y los del espécimen de prueba, se coloca el cilindro sobre la placa inferior alineando su eje cuidadosamente con el centro del bloque de carga superior mientras éste se aproxima hacia el espécimen para obtener un contacto uniforme.

Se calcula la resistencia a la ruptura por compresión dividiendo la carga máxima soportada durante la prueba, entre el área promedio de la sección transversal del espécimen

$$f'c = P/A.$$

Donde:

$f'c$ = Esfuerzo de ruptura por compresión del cilindro de concreto.

P = Carga máxima en kg obtenida en la máquina de prueba.

A = Área de la sección transversal del cilindro de concreto.

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA DE CILINDROS DE CONCRETO (ASTM C 496-96)

El valor de la resistencia a la tensión del concreto es aproximadamente de 8% a 12% de su resistencia a la compresión y a menudo se estima como 1.33 a 1.99 veces la raíz cuadrada del $f'c$.

PRUEBA BRASILEÑA

La máquina de ensaye, estará de acuerdo con lo requerido en el método de ensaye, para la resistencia a la compresión de cilindros.

Para cada espécimen, se usarán dos tiras de contacto de triplay de un ancho nominal de 32 mm (1/8") o de cuero.

Se realizan los siguientes pasos para la preparación de los especímenes:

Marcado. Se marcarán líneas diametrales en cada extremo de los especímenes usando un medio adecuado que asegure que estén en el mismo plano axial.

Medidas. Determinése el diámetro del espécimen de ensaye con una aproximación de 0.025 cm. (0.01") promediando 3 diámetros medidos cerca de los extremos y a la mitad del espécimen, que queden en el plano que contienen las líneas marcadas en los dos extremos. Determinése la longitud del espécimen con una aproximación de 0.025 cm. (0.01") promediando por lo menos 2 medidas longitudinales tomadas en un plano que contenga las líneas marcadas en los dos extremos.

Centrado. Céntrese una de las tiras de triplay, a lo largo del centro de la placa de acero inferior. Colóquese el espécimen sobre la tira de triplay, y alíniese de tal modo que las líneas marcadas en el extremo del espécimen sean verticales y queden centradas sobre la tira de triplay. Colóquese la segunda tira de triplay longitudinalmente sobre el cilindro, centrada sobre las líneas marcadas en los extremos del mismo. Colóquese el conjunto de tal manera que se aseguren las siguientes condiciones:

- La proyección del plano que contiene las dos líneas marcadas en los extremos del espécimen intersecta el centro de la placa superior de apoyo.
- La placa o barra suplementaria, en caso de utilizarse, y el centro del espécimen están directamente por debajo del centro de carga de la placa de apoyo.

Velocidad de carga. Se deberá aplicar la carga continuamente y sin impacto a una velocidad constante dentro del intervalo de 7 a 14 kg/cm²/min (100 a 200 psi/min) de esfuerzo de tensión, hasta la falla del espécimen. Anotándose la carga máxima aplicada indicada por la máquina de ensaye a la falla. El tipo de falla y la apariencia del concreto deberán también anotarse.

El esfuerzo de tensión del espécimen se calculará como sigue:

$$f_t \text{ ó } T = 2P / L d \pi$$

Donde:

f_t , T = Esfuerzo de tensión, en kg/cm².

P = Carga máxima aplicada indicada por la máquina de ensaye, kg.

L = longitud, cm.

d = Diámetro, cm.

TÉCNICAS ANALÍTICAS APLICADAS A LOS AGREGADOS PÉTREOS

Prácticamente todos los métodos de la física y de la química del cuerpo sólido se utilizan actualmente en la mineralogía. Estos métodos permiten determinar y caracterizar cuantitativamente las particularidades de la constitución y de las propiedades de los minerales.

Entre las propiedades de los minerales para el estudio detallado las más importantes son las siguientes: físico-químicas (solubilidad, reacciones, propiedades electroquímicas), gravitacionales (densidad, peso volumétrico), térmicas (conductividad, termomagnéticas y termoeléctricas, cambios en diferentes condiciones), eléctricas (conductividad, poro-y piezoeléctricos, fotoeléctricos), magnéticas (permeabilidad, susceptibilidad, efectos magnetotérmicos), ópticas (reflexión, transmisión, color, refracción, polarización, luminiscencia), electrónicas (resonancia paramagnética electrónica, resonancia nuclear magnética, resonancia gamma nuclear, láser).

Para caracterizar minerales se utilizan más ampliamente datos sobre: Composición química (análisis químico y espectral), estructura cristalina (difractogramas, parámetros de la celda elemental), propiedades ópticas (índice de refracción, capacidad de reflexión). Ésto está relacionado con el alto índice de información de estas características, así como con el equipo relativamente simple y el conocimiento total de los métodos correspondientes [17].

MICROSCOPÍA ÓPTICA (Láminas delgadas)

Esta técnica nos permite identificar rápidamente la mayoría de las especies minerales que contienen las rocas, con la ventaja de que nos muestra la porosidad, grietas y la distribución de los minerales.

Sin embargo, esta técnica presenta algunas limitantes, como son las siguientes:

- Cuando el material de investigación es de grano muy grueso y de composición mineralógica variable.
- Cuando los minerales constituyentes de la muestra son muy poco corrientes, y requieran la identificación de sus índices de refracción como ayuda para su identificación.
- Cuando la muestra de estudio, presenta un porcentaje muy bajo de elementos traza de importancia, las cuales por su pequeña proporción aparecerían tan sólo algunos granos en la lámina.

El microscopio óptico funciona a base de luz, es decir, debe haber una fuente de alimentación para su funcionamiento, cuenta con lentes de vidrio convexas las cuales tienen

como función conducir la luz y dirigirla hacia el espécimen. Una vez que el haz de luz llega a la muestra, interactúa con la misma generando señales las cuales son colectadas para identificar las características del sólido [23].

Los componentes de un microscopio se pueden observar en la figura 2:

MICROSCOPIA ÓPTICA DE LUZ POLARIZADA TRANSMITIDA

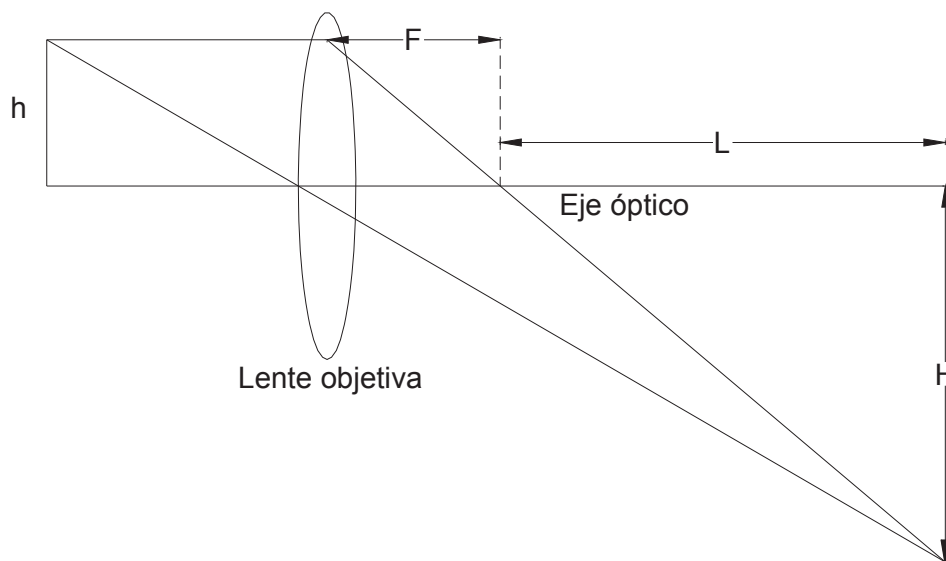


Figura 2. Principales partes de un microscopio óptico de luz.

Donde:

h = Plano objeto

F = Distancia focal

L = Distancia del plano focal al plano objeto

H = Plano imagen

Entre más convexa sea la lente, el plano focal se puede acercar más a la lente y como podemos observar la lente provoca que el haz de luz se desvíe e intercepte al eje óptico. A la relación que existe entre L y F se le denomina Magnificación “ M ”, la cual se expresa como:

$$M = L / F$$

El plano objeto puede tener dos modificaciones y así generar dos tipos de microscopios de luz los cuales son: el microscopio de luz transmitida y el microscopio de luz reflejada. Además un microscopio de luz puede contener dos lentes o tres y se dice que es de dos etapas o de tres etapas.

Una de las razones por las que no podemos tener resoluciones mayores a 150 nm son las aberraciones o defectos de las lentes las cuales son:

- Aberración esférica, es decir, que la curvatura de la lente no es perfecta. Esto nos produce que se formen varios focos los cuales dan origen a un círculo llamado círculo de mínima confusión.
- Aberración cromática. En este caso la luz blanca se descompone en sus colores constituyentes al pasar por la lente, formando de nuevo un círculo de mínima confusión.

Además de los defectos de las lentes tenemos otros factores que nos limitan la resolución los cuales son:

- La variación de la longitud de onda de la luz no es muy amplia, varía de 400 a 800 nm.
- El ángulo de divergencia o ángulo sólido “ α ” es constante y afecta a la profundidad de campo.
- El índice de refracción del medio es constante “ μ ”
- Las aperturas de resolución generan la difracción de Fresnel.

Las propiedades ópticas de los cristales están en correspondencia con las leyes de la óptica geométrica. Están vinculadas con la variación de la velocidad de la luz, que atraviesa los cristales transparentes, y se describe a base de las nociones de la naturaleza electromagnética de la luz. De acuerdo con estas nociones, la luz se caracteriza por la longitud de onda y la amplitud de las oscilaciones armónicas de las componentes eléctrica y magnética del campo electromagnético en las direcciones perpendiculares entre sí y al rayo luminoso. En la luz corriente, las oscilaciones suceden perpendicularmente al rayo luminoso en todas las direcciones radiales, mientras que en la luz planamente polarizada éstas se efectúan sólo en el plano de polarización [22].

Respecto a las propiedades ópticas todos los cristales se dividen en tres grupos:

a) Ópticamente isótropos (sistema cúbico)

En estos cristales la luz monocromática pasa a la misma velocidad sin tener en cuenta su dirección de vibración. En estos cristales la dirección de vibración de un rayo de luz, es siempre perpendicular a la dirección de la luz. En los cristales del sistema cúbico, un rayo de luz se propaga en todas las direcciones con la misma velocidad.

b) Ópticamente anisótropos uniaxiales (sistemas: trigonal, tetragonal, hexagonal)

- c) Ópticamente anisótropos biaxiales (sistemas: rómbico, monoclinico, triclinico).

Los cristales anisótropos, originan dos ondas luminosas polarizadas en dos planos mutuamente perpendiculares. A cada onda la caracteriza una superficie especial de propagación; una esfera o elipsoide para los cristales uniaxiales, y superficies de orden superior, para los biaxiales.

Las superficies de ambas ondas pueden tocarse en dos puntos (cristales uniaxiales), o cortarse en cuatro puntos (cristales biaxiales). Estos puntos determinan los ejes ópticos, es decir, las direcciones en que sin birrefringencia, se propaga la luz en el cristal [23].

Los métodos ópticos de la investigación de los minerales y rocas permiten determinar las características exactas de sus propiedades cristalo-ópticas. Estas características (constantes) importantes son:

- Forma y tamaño de los granos.
- Exfoliación y ángulo entre las grietas de la exfoliación.
- Color
- Índice de refracción
- Isotropía y anisotropía
- Birrefringencia y colores de interferencia
- Extinción.

FLUORESCENCIA DE RAYOS “X”

Técnica empleada para determinar los elementos componentes de una muestra a través de un análisis cuantitativo de sus elementos.

La muestra se coloca en la cámara de vacío del aparato de fluorescencia de rayos X y posteriormente se somete a un bombardeo de electrones mediante un haz electrónico de alta energía, ante la influencia de este haz, aparece la radiación de rayos X secundarios cuyo espectro es característico para cada elemento y la intensidad de las rayas espectrales de los elementos es registrada y cuantificada.

La figura 3 nos muestra el proceso seguido por esta técnica:

FLUORESCENCIA DE RAYOS "X"

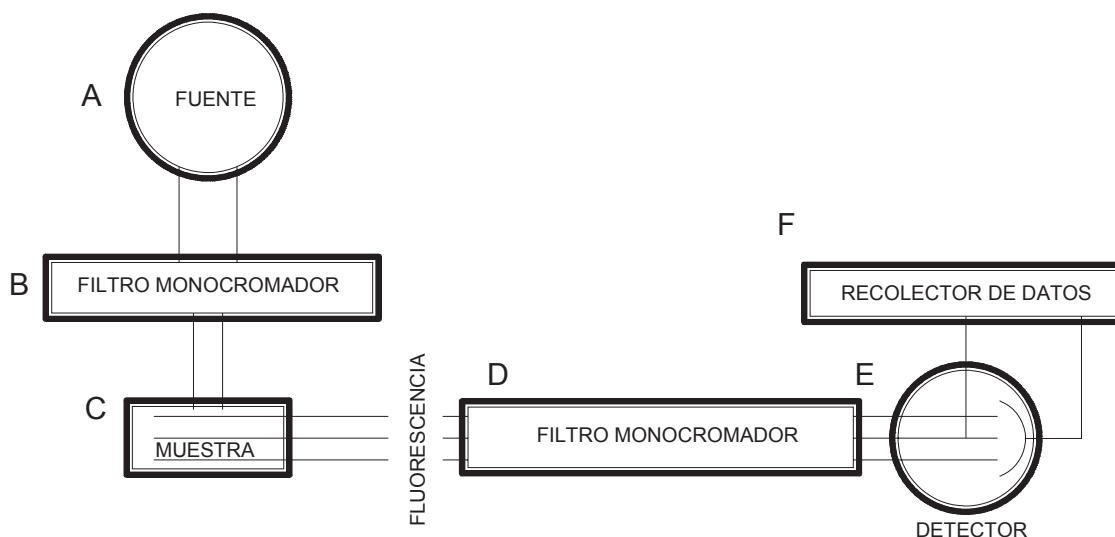


Figura 3. Diagrama ilustrativo del proceso realizado en la Fluorescencia de Rayos x.

- A. La fuente produce los rayos X.
- B. El filtro monocromador selecciona las radiaciones de longitud de onda específica producidas por la fuente y este haz de energía es dirigido hacia la muestra.
- C. El haz interacciona con los elementos de la muestra y se produce la fluorescencia.
- D. La fluorescencia resultante es polarizada por un filtro secundario o monocromador de emisión y dirigida hacia un fotodetector.
- E. El detector, divide la emisión de fluorescencia. Se utiliza una superficie frontal o una de visión de ángulo corto (37°) para muestras de alta absorbencia, sólidos [23].

DIFRACCIÓN DE RAYOS "X"

El análisis de materiales naturales y artificiales por difracción de rayos X se utiliza ampliamente en diferentes campos de la ciencia y la técnica moderna. Las probabilidades de estudio de la constitución estructural y de la composición elemental y de fase de las sustancias naturales y sintéticas, permiten que el método de análisis por difracción de rayos X constituya uno de los métodos de investigación más importantes en las ciencias fundamentales de la Tierra: Cristalografía, Mineralogía, Petrología [23].

El objeto de estudio pueden ser sustancias mono- o policristalinas. Las sustancias monocristalinas garantizan una información más completa sobre la estructura cristalina de las sustancias naturales y sintéticas. Las sustancias policristalinas no siempre permiten valorar de una sola forma la simetría de la celda elemental y generalmente se utilizan en el análisis de la composición química, las transformaciones estructurales y polimórficas.

El análisis se basa en las propiedades de los rayos X de penetrar en el interior de la sustancia y refractarse con determinada ley (ley de Wulf – Bragg) desde los planos atómicos de la red cristalina. La ecuación de Wulf – Bragg tiene la siguiente forma: $2d \cdot \sin(\theta) = n \cdot \lambda$, donde θ , es el ángulo de reflexión de los rayos X del sistema determinado por los planos atómicos (hkl), d es la distancia entre los planos atómicos (distancia interplanar), donde ocurre la reflexión, n es un número entero (orden de reflexión), λ es la longitud de onda de la radiación.

Para las sustancias monocristalinas se utiliza el método de Laue, donde se obtiene un diagrama de difracción (Lauegrama) de una muestra monocristalina inmóvil en el espectro continuo de rayos X, es decir, en los rayos X con diferentes longitudes de onda. El Lauegrama permite determinar la calidad del monocristal, la perfección de su estructura cristalina y la simetría del cristal en la dirección del haz de rayos X. El método se utiliza para la orientación del cristal en una dirección dada; esto es importante en el análisis de la estructura de minerales que tienen las aristas naturales no perfectas y con los cuales su orientación goniométrica es difícil. En el método de Laue se utiliza el espectro continuo de rayos X, por eso es difícil determinar las dimensiones de la celda elemental. Para esto se utiliza el método de giro y balanceo del monocristal alrededor de determinada dirección cristalográfica, con lo cual se determina el período de repetición. En este método se utiliza la radiación monocromática.

En los últimos años en lugar de los métodos goniométricos, es decir, el registro del cuadro de difracción sobre una fotoplaqueta, se utiliza la difracción como el método más productivo y más exacto para calcular la intensidad de los reflejos. El difractómetro permite automatizar el proceso de medición de las intensidades, lo que amplía las posibilidades del análisis estructural en el estudio de sustancias complejas con muchas moléculas.

El método que se utiliza en el análisis de sustancias policristalinas es el método del polvo o método de Debye - Scherrer, el cual permite resolver diferentes problemas mineralógicos y geológicos. Los policristales contienen gran número de cristallitos orientados desordenadamente. Como consecuencia de esto, se crean las condiciones, en las que gran número de cristales simultáneamente se encuentran en la posición reflejada y con relación a ellos se cumple la ley de difracción de rayos X (condiciones de Wulf – Bragg) dando lugar a un cuadro de difracción llamado difractograma o diagrama de polvo, el cual puede registrarse por medios fotográficos o difractométricos [23].

Los problemas concretos que se pueden resolver con la ayuda de la difracción de rayos X son los siguientes:

- Diagnóstico de las sustancias minerales (especies, variedades, fases dispersas y criptocristalinas, soluciones sólidas, etc.).

- Estudio de las series isomorfas.
- Estudio de las estructuras cristalinas para establecer los índices específicos.
- Evaluación del grado de dispersión y tamaños de los cristales.
- Estudio de estabilidad estructural de los minerales.
- Análisis de las fases de las rocas, menas y productos de sus tratamientos tecnológicos tanto cualitativo como cuantitativo.
- Estudio de las fases amorfas.

A continuación se describen las propiedades ópticas, físicas y cristalográficas para cada mineral encontrado con la técnica de DRx [6].

ELEMENTO:	Anortita
FÓRMULA QUÍMICA:	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
CLASE:	Silicatos
SUBCLASE:	Tectosilicatos
GRUPO:	Feldespatos
SUBGRUPO:	Plagioclasas

PROPIEDADES CRISTALOGRÁFICAS

SISTEMA Y CLASE:	Triclinico
GRUPO ESPACIAL:	I1 o P1
CLASE DE SIMETRÍA:	Pinacolidal
PARÁMETROS DE LA CELDA UNITARIA:	

a =	8.18 Å
b =	12.88 Å
c =	14.16 Å
α =	93° 10'
β =	115° 51'
γ =	91° 13'

PROPIEDADES FÍSICAS:

	Incoloro, blanco, gris, más raramente verdoso, amarillento y rojo
COLOR:	carne
RAYA:	Incolora
BRILLO:	Reluciente
DUREZA:	6 a 6.5
DENSIDAD:	2.76 g/cm ³
EXFOLIACIÓN:	Perfecta
HÁBITO:	Cristales tabulares o prismáticos.

PROPIEDADES ÓPTICAS:

CARÁCTER:	Anisótropico
FIGURA DE INTERFERENCIA:	Biáxica
SIGNO ÓPTICO:	Negativo
2V	75 - 78°
ÍNDICES DE REFRACCIÓN:	
n1	1.573-1.577

n2	1.580-1.585
n3	1.580-1.585

ELEMENTO:	Augita
FÓRMULA QUÍMICA:	$(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$
CLASE:	Silicatos

PROPIEDADES CRISTALOGRÁFICAS

SISTEMA Y CLASE:	Monoclínico
GRUPO ESPACIAL:	C2/c
CLASE DE SIMETRÍA:	Prismática
PARÁMETROSA DE LA CELDA UNITARIA:	

a =	9.80 Å
b =	9.00 Å
c =	5.25 Å
α =	
β =	105°
γ =	

PROPIEDADES FÍSICAS:

COLOR:	Rara vez incolora. Verde puerro a negro verdoso. Por alteración toma color rojizo. Las variedades con Ti son de color rojo violeta
RAYA:	Blanca grisácea con matiz verdoso
BRILLO:	Vítreo a resinoso
DUREZA:	5.5 - 6.0
DENSIDAD:	3.23 - 3.53
EXFOLIACIÓN:	Perfecta a buena
HÁBITO:	Los cristales son prismáticos y tabulares, cortos y gruesos con bordes irregulares maclas. Masas granulares o compactas. Pueden aparecer impregnaciones.

PROPIEDADES ÓPTICAS:

CARÁCTER:	Anisótropo
FIGURA DE INTERFERENCIA:	Biáxica
SIGNO ÓPTICO:	Positivo
2V	25 - 60°. Generalmente próximo a 46°.
ÍNDICES DE REFRACCIÓN:	
n1	1.68 - 1.74 (ferrosas 1.699 - 1.712)
n2	1.68 - 1.77 (ferrosas 1.706 - 1.718)
n3	1.68 - 1.77 (ferrosas 1.06 - 1.718)

ELEMENTO: Cristobalita
FÓRMULA QUÍMICA: SiO_2
CLASE: Óxidos e hidróxidos

PROPIEDADES CRISTALOGRÁFICAS

SISTEMA Y CLASE: Tetragonal
GRUPO ESPACIAL: $P4_12_12$

PARÁMETROS DE LA CELDA UNITARIA:

a = 4.97 Å
 b = Å
 c = 6.93 Å
 $\alpha =$
 $\beta =$
 $\gamma =$

PROPIEDADES FÍSICAS:

COLOR: Blanco lechoso a incoloro
RAYA: Blanca
BRILLO: Vítreo
DUREZA: 6.5 - 7.5
DENSIDAD: 2.32 g/cm^3
EXFOLIACIÓN: No presenta
HÁBITO: Cristales octaédricos milimétricos, a veces maclados. Agregados esféricos.
 Masas de aspecto lechoso.

PROPIEDADES ÓPTICAS:

CARÁCTER: Anisótropo
FIGURA DE INTERFERENCIA: Uniaxial
SIGNO ÓPTICO: Negativo

ÍNDICES DE REFRACCIÓN:

n1 1.487
 n2 1.484

ELEMENTO: Enstatita
FÓRMULA QUÍMICA: $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$
CLASE: Silicatos

PROPIEDADES CRISTALOGRÁFICAS

SISTEMA Y CLASE: Rómbico
 GRUPO ESPACIAL: Pbca
 CLASE DE SIMETRÍA: Bipiramidal rómbica
 PARÁMETROSA DE LA CELDA UNITARIA:

$$a = 18.228 - 18.340 \text{ \AA}$$

$$b = 8.805 - 8.940 \text{ \AA}$$

$$c = 5.185 - 5.235 \text{ \AA}$$

$$\alpha =$$

$$\beta =$$

$$\gamma =$$

PROPIEDADES FÍSICAS:

COLOR: Incolora, gris, verde, amarilla, marrón o negra
 RAYA: Blanca a gris
 BRILLO: Vítreo. Nacarado en las caras de exfoliación
 DUREZA: 5.0 - 6.0
 DENSIDAD: 3.18 - 3.90 (enstatita pura 3.194). La densidad es mayor cuanto más Fe contenga
 EXFOLIACIÓN: Buena o imperfecta
 HÁBITO: Son raros los cristales prismáticos o tabulares más o menos aplanados.
 Agregados radiales, fibrosos u hojosos. Masas esferulíticas, compactas o granulares.

PROPIEDADES ÓPTICAS:

CARÁCTER: Anisótropo
 FIGURA DE INTERFERENCIA: Biáxica
 SIGNO ÓPTICO: Positivo (enstatita). Negativo (brocinta e hiperstena).
 2V 55 - 90g (enstatita) 63 - 90g (broncita) 54 - 63° (hiperstena).
 ÍNDICES DE REFRACCIÓN:

$$n_1 \quad 1.650 - 1.662 \text{ (enstatita)} \quad 1.677 - 1.680 \text{ (broncita)} \quad 1.693 - 1.705 \text{ (hiperstena)}$$

$$n_2 \quad 1.653 - 1.671 \text{ (enstatita)} \quad 1.683 - 1.694 \text{ (broncita)} \quad 1.704 - 1.710 \text{ (hiperstena)}$$

$$n_3 \quad 1.658 - 1.680 \text{ (enstatita)} \quad 1.691 - 1.699 \text{ (broncita)} \quad 1.709 - 1.717 \text{ (hiperstena)}$$

ELEMENTO: Nontronita

FÓRMULA QUÍMICA: $\text{Na}_{0.3}\text{Fe}_2(\text{OH})_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}\text{nH}_2\text{O}$

CLASE: Silicatos

PROPIEDADES CRISTALOGRÁFICAS

SISTEMA Y CLASE: Monoclínico
 GRUPO ESPACIAL: C2/m
 CLASE DE SIMETRÍA: Prismática
 PARÁMETROSA DE LA CELDA UNITARIA:

$$a = 5.23 \text{ \AA}$$

$$b = 9.02 - 9.10 \text{ \AA}$$

$$c = 15.00 - 15.50 \text{ \AA}$$

$$\alpha =$$

$$\beta =$$

$$\gamma =$$

PROPIEDADES FÍSICAS:

COLOR: Amarillo pálido, verde oliva, parda con tonos verdes

RAYA: Blanca

BRILLO: Céreo a mate

DUREZA: 1.0 - 2.0

DENSIDAD: 2.0 - 3.0 g/cm³

EXFOLIACIÓN: Perfecta

HÁBITO: Agregados escamosos. Masas terrosas o compactas con aspecto opalino.
Al microscopio se observa textura micácea o esferulítica.

PROPIEDADES ÓPTICAS:

CARÁCTER: Anisótropo

FIGURA DE

INTERFERENCIA: Biáxica

SIGNO ÓPTICO: Negativo

2V 25 – 70°

ÍNDICES DE REFRACCIÓN:

n1 1.560 - 1.610

n2 1.570 - 1.640

n3 1.575 - 1.645

El intervalo de composiciones de los feldespatos puede representarse por el diagrama ternario de la figura 4.

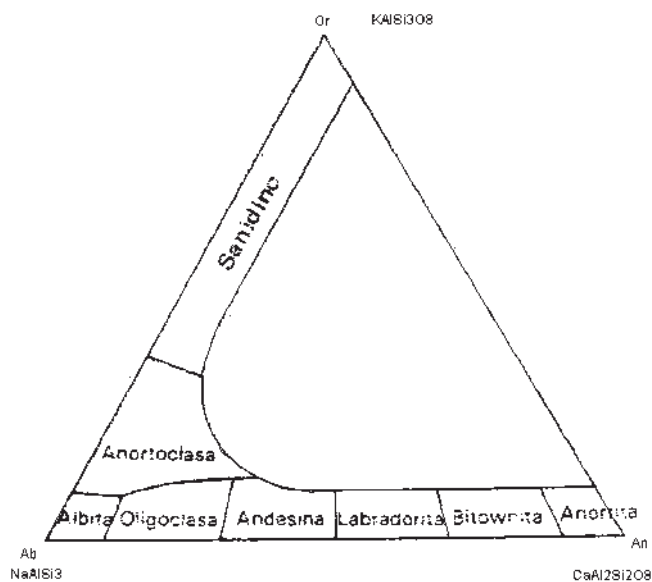


Figura 4. Nomenclatura de la serie de las plagioclasas y de los feldespatos alcalinos de alta temperatura.

Los miembros de las series entre los extremos ortoclase, KAlSi_3O_8 , y albita, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, se conocen como los feldespatos alcalinos, y aquellos entre albita y anortita, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, se denominan feldespatos plagioclasas [22].

La figura 4 muestra que los feldespatos alcalinos generalmente pueden contener menos del 10% del componente anortita, mientras que la serie de las plagioclasas puede contener menos del 10% del componente ortoclase.

CONDICIONES DEL ANÁLISIS DE RAYOS “X”

Este método se basa en el fenómeno de difracción de los rayos X, cuya longitud es conmensurable con las distancias interatómicas. En mineralogía se utiliza el método de polvos que se basa en la ley de Bragg-Wulf universalmente usada. Los cristales se representan contruidos por familias de planos que actúan como espejos semitransparentes donde al incidir un haz monocromático de rayos X, ocurre el proceso de difracción que se representa por uno de reflexión. La representación es similar a la reflexión de la luz en un espejo, aunque con algunas diferencias, entre otras, los rayos X penetran bajo la superficie del cristal y los rayos reflejados de la familia de planos atómicos sucesivos, pueden o no estar en fase. La condición para lograr un máximo de intensidad reflejada es que la contribución de los planos sucesivos debe estar en fase. Además se deben tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- Los tamaños óptimos de las partículas para el análisis de rayos X son 20-40 μm (micrones).
- La masa normal de una muestra para este análisis es de 0.5 – 1.0 gramo. Ella debe representar la composición y ser homogénea en los tamaños de las partículas (no más que 70 μm). Luego la muestra se tritura en un molino mecánico o a mano en un mortero de jaspe o ágata hasta un tamaño de menos de 40 micrones.
- Para obtener un cuadro de difracción bien definido hay que elegir las condiciones óptimas de registro de una sustancia dada. Ante todo, es necesario elegir la radiación utilizada (Cu, Co, Fe) dependiendo de la composición química de las sustancias analizadas, de la cual depende a su vez el grado de absorción de los rayos X.
- Para el registro del difractograma hay que determinar las condiciones experimentales entre las cuales las principales son las siguientes: el tipo de difractómetro y de tubo, la sustancia del ánodo y el filtro, el voltaje (en kilovoltios) y la corriente (en miliamperios), la escala de la velocidad de registro de los impulsos (en segundos), la constante de tiempo (en segundos), la velocidad del movimiento del contador (en grados por minuto) y de la cinta de diagrama (en mm por minutos).

Actualmente todos los equipos de rayos X son completamente computarizados lo que permite realizar automáticamente todas las operaciones de registro y evaluación de los

difractogramas obtenidos. El intervalo angular del registro depende de una tarea concreta. Si no se sabe nada sobre la muestra entonces se registra el difractograma completo (de $5 - 7^\circ$ a $72 - 75^\circ$, 2θ).

En la actualidad se han diversificado mucho las técnicas por difracción de rayos X, pero en general, se emplean con dos objetivos principales:

- a) Estructuralmente, para conocer la constitución de compuestos puros tales como minerales, compuestos químicos inorgánicos y orgánicos, organometálicos, etc.;
- b) Analíticamente, para la identificación y determinación tanto cualitativa como cuantitativa de las fases presentes en las mezclas analizadas.

Con esta técnica lo que pretendemos determinar son las fases cristalinas de las sustancias minerales. Cada fase cristalina da un cuadro de difracción individual que se caracteriza por las posiciones e intensidades determinadas de los máximos o líneas reflejadas. Por eso el conjunto registrado de los rayos X reflejados por diferentes ángulos θ de alguna sustancia cristalina es la constante de esta sustancia independientemente de la composición de la mezcla mineral y de la morfología de los individuos minerales [23].

DIFRACTÓMETRO DE RAYOS “X”.

Está constituido por un goniómetro para medir los ángulos de difracción, el cual está acoplado a un sistema de conteo y circuitos electrónicos para determinar la intensidad de difracción en cualquier ángulo. Se utiliza un portamuestras plano situado tangencialmente en el circuito de enfoque que contiene la fuente de rayos X monocromáticos y el contador.

La radiación difractada recibida en el contador se transforma a pulsos electrónicos los cuales son amplificados y alimentados a diversos circuitos para su medición generalmente en una gráfica de intensidad vs ángulo de difracción a la que se le llama difractograma.

Al difractómetro controlado por computadora y al conjunto de programas computacionales relacionados con el sistema de control y el análisis de resultados se le conoce como “difractómetro de polvos automático”. Esto confiere una gran velocidad, una fácil selección de determinada región 2θ del difractograma para su registro o amplificación, ya que la consulta del archivo de patrones JCPDS es inmediata [23].

MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB).

La microscopía electrónica permite estudiar las particularidades superfina de morfología de partículas pequeñas (formas y tamaños reales) de minerales, la superficie de las caras, interfase y fracturas, la variación en las propiedades de diferentes muestras, así como la estructura interior de los minerales. Es posible estudiar la estructura de los agregados

minerales finamente dispersos, criptocristalinos y amorfos (minerales arcillosos, hidróxidos de hierro, etc.) [4, 26].

Un microscopio electrónico de barrido está constituido por los siguientes elementos:

- Una unidad óptico-electrónica que genera el haz que incide y se desplaza sobre la muestra.
- Un portamuestras con grados de movimiento.
- Una unidad de dirección de las señales que se originan en la muestra.
- Un sistema de amplificación de la señal.
- Un sistema de visualización de imágenes (tubo de rayos catódicos).

Al interaccionar el haz electrónico con la muestra se producen varios fenómenos: hay electrones que son reflejados en la superficie (electrones secundarios), electrones que son reflejados pero a una mayor profundidad de la superficie (electrones retrodispersados). Algunos electrones son absorbidos por la muestra y otros pueden pasar a través de ella (electrones transmitidos).

Como los electrones pueden golpear los electrones de los átomos de la muestra, éstos últimos son expulsados de sus niveles de energía alrededor del núcleo y dejan al átomo en un estado excitado. Para desexcitarse, el átomo genera un Rx, el cual es característico del átomo que lo produjo, por lo tanto también se producen Rx.

Cada una de estas señales pueden ser utilizadas para tener información de la muestra. Los electrones secundarios y retrodispersados dan información de la superficie de la muestra (su morfología), los electrones absorbidos pueden ser utilizados en medidas de conducción eléctrica de la muestra, mientras que los rayos X característicos dan información de la composición química.

El Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) utiliza los electrones secundarios y retrodispersados; así como también los Rx característicos. Esto lo hace un instrumento muy útil en el análisis de las superficies y determinación de composiciones químicas [4, 6].

IV. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Este capítulo inicia con una descripción geológica de la región del estudio y después el muestreo de los bancos de materiales pétreos los cuales sirvieron para determinar las particularidades mineralógico-geoquímicas de esta materia prima, incluyendo la revisión bibliográfica.

IV. 1 GEOLOGÍA REGIONAL

Toda la geología del Estado de Michoacán ha quedado involucrada, desde su origen (Triásico) al denominado Sistema Cordillerano, el cual involucra toda la margen activa del Pacífico, donde se han venido generando los procesos de subducción de la Placa Pacífica. Los procesos de esta margen activa han ocasionado que los factores de tectonismo, magmatismo e intemperismo sean los principales procesos que han diseñado todas las particularidades geológicas del Estado de Michoacán.

El Estado de Michoacán se encuentra localizado dentro de dos provincias tectónicas importantes: a) el basamento configurado en rocas del Mesozoico que forman parte del terreno Guerrero; cubriendo a estos paquetes encontramos a vulcanitas o cuerpos plutónicos del Terciario inferior que se interdigitan, hacia el este, con rocas terrígenas depositadas en cuencas endorreicas; b) todos estos paquetes anteriores son coronados por las secuencias volcánicas o lacustres del Cinturón Volcánico Mexicano de edad Plio-Cuaternario [15].

El Estado de Michoacán es una de las regiones más espectaculares debido a que los volcanes y lagos generados por este ambiente tectónico han logrado otorgar a Michoacán el nombre de “tierra de lagos y volcanes”. El vulcanismo en Michoacán en los límites del Cinturón Volcánico Mexicano se separa en dos regiones: el del Corredor Tarasco donde sólo existe vulcanismo de tipo monogenético, y el del oriente del Estado que es tratado como de carácter más ácido, ello debido a que existen centros como Los Azufres, los domos Zitácuaro-Ciudad Hidalgo, todos de tipo dacítico. Dentro del Estado de Michoacán el vulcanismo reciente del Cinturón Volcánico Mexicano, ha sido separado en regiones, una de las cuales es el Corredor Tarasco. El vulcanismo del Corredor Tarasco es de tipo monogenético de composición química calciocalina. En su sector suroeste y sur se edificaron los pequeños conos monogenéticos de El Jorullo (1759) y el Parícutín (1942), los cuales han sido producto de una tectónica activa y han dado lugar a los Lagos de Pátzcuaro y de Zirahuén [15].

La zona de estudio es eminentemente volcánica y de Conos Cineríticos, de material piroclástico. Estos conos probablemente originados de ser Conos Adventicios o “Conos Satélite” de un volcán principal o bien a la desintegración de un volcán principal con el consecuente desplome de la caldera hacia arriba en el interior formando Conos Cineríticos, y la posterior desintegración mediante erosión de los restos del volcán principal. Los frentes de explotación se encuentran ubicados muy cerca entre sí y están en la misma formación volcánica [28].

Se tienen zonas de diferentes unidades geológicas presentadas por conos de lavas y pequeños volcanes escudos con las formaciones de cenizas volcánicas, conos de escorias y varios flujos piroclásticos (Pleistoceno medio-Holoceno 1.3-0.55 Ma). Los bancos de los materiales pétreos estudiados se localizan principalmente en estos últimos tipos de rocas volcánicas [15].

Los conos de escorias se caracterizan por su diversa composición, principalmente andesítica, con texturas porfíricas y microlíticas fluidales. La composición mineralógica de estas formaciones, que son recientes desde el punto de vista geológico, es la siguiente: feldespatos calcico-sódicos (serie albita-anortita con predominio de las plagioclasas básicas del tipo andesina-labradorita), clino y ortopiroxenos, anfíboles (hornblenda), micas (biotita). A menudo se encuentra la asociación plagioclasa + cristobalita para las unidades básicas. La composición mineralógica de los flujos piroclásticos todavía no está bien estudiada. De acuerdo con algunos datos bibliográficos [13], en términos muy generales los flujos piroclásticos del Cinturón Volcánico Mexicano de la misma composición andesítica se caracterizan por los cristales de plagioclasas básicas y piroxenos a veces con cristales de hornblenda y olivino, vidrio volcánico intersticial y minerales opacos (magnetita y óxidos de hierro) [15].

La ceniza volcánica se extrae de un banco denominado Ejido “San Isidro” el cual esta en Acámbaro, Gto. Las rocas más antiguas reconocidas en el estado de Guanajuato son de edad mesozoica y se dividen en dos grandes secuencias: una volcanosedimentaria, distribuida en la parte centro del norte de la entidad y otra como una secuencia sedimentaria de plataforma en el extremo nororiental del Estado.

Las rocas mesozoicas están cubiertas en discordancia angular por rocas volcánicas y volcanoclásticas del terciario, principalmente del Oligoceno y la cima de la columna geológica está constituida por rocas sedimentarias continentales y derrames basálticos del cuaternario.

El intrusivo mayor es de constitución granítica, ocupa la parte central de la Sierra de León-Guanajuato y su edad data del paleoceno.

Las rocas mesozoicas que se conocen en el estado de Guanajuato pertenecen a dos dominios: del Pacífico y del Golfo. En la mayor parte del Estado predominan las rocas volcanosedimentarias del dominio pacífico y en el extremo nororiental se presentan rocas sedimentarias del dominio del Golfo.

Dentro del período Cenozoico el estado de Guanajuato sufrió una actividad volcánica que originó nuevas prominencias topográficas, que dieron lugar a la formación de sierras y valles, como son: la Sierra de León-Guanajuato, Agustinos Puruagua y la Mesa del Centro. Posteriormente hubo depositación de sedimentos en un medio ambiente continental.

Los yacimientos de minerales no metálicos existentes en el estado de Guanajuato son por orden de importancia y de acuerdo con el volumen y la calidad: fluorita, sílice, y feldespato, caolín, caliza, talco, diatomita, alunita, perlita, pumicita, ópalo así como materiales pétreos para la construcción. En la porción sureste del Estado de Guanajuato, en

los municipios de Tarandacuao y Acámbaro, en los límites con el estado de Michoacán, se presentan suelos residuales provenientes de la degradación de riolitas ricas en sílice, formando yacimientos de arena sílica de alta pureza.

Dentro del estado de Guanajuato se encuentran numerosos bancos para extraer materiales para la construcción: rocas terciarias riolíticas para canteras, en Guanajuato; basaltos recientes como pedreras, en Escobedo, Acámbaro, Irapuato, San Francisco del Rincón y León; gravas y arenas en los principales ríos, tales como el de Guanajuato, Santa Ana y Silao, entre otros [8].

IV.2 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Los sitios seleccionados para este estudio fueron: el banco Joyitas, el banco Tribasa y el banco San Isidro.

Una de las zonas del estudio se localiza aproximadamente a 15 km al noroeste de la ciudad de Morelia en las coordenadas siguientes: 101° 23' 55'' de longitud y 19° 44' 15'' (Banco Joyitas);

Banco Joyitas. Banco productor de arena y grava volcánica, ubicado sobre la carretera Morelia – Quiroga, llegando sobre la carretera hasta una distancia de 15 + 450 km de la ciudad de Morelia y de ahí se encuentra una brecha que tiene una longitud aproximada de 10 km. El acceso a este banco se describe de la siguiente manera: la distancia efectuada sobre la carretera es rápida y fluida, existiendo carpeta asfáltica y señalamientos adecuados, esta distancia se recorre en un tiempo aproximado de catorce a quince minutos de la salida a Quiroga, a una velocidad de moderada a rápida, es decir, de 60 a 70 km/hr [28].

La otra zona se encuentra ubicada en la región norte de la ciudad de Morelia en las coordenadas: 101° 10' 16'' de longitud y 19° 46' 07'' de latitud (Banco de Triturados “Tribasa”) [23].

Banco Tribasa. Se encuentra ubicado en la región norte de la ciudad de Morelia en las coordenadas: 101° 10' 16'' de longitud y 19° 46' 07'' de latitud. Banco productor de grava triturada, ubicado sobre la carretera Morelia Salamanca en el km 4 + 500 y a una distancia de 8 km del centro de la ciudad de Morelia. La descripción geológica corresponde a depósitos de lavas y de tobas de composición andesítica, de origen volcánico. Las lavas presentan color gris claro y están lajeadas [28].

En la figura 5 se presentan los bancos denominados Joyitas y Tribasa.

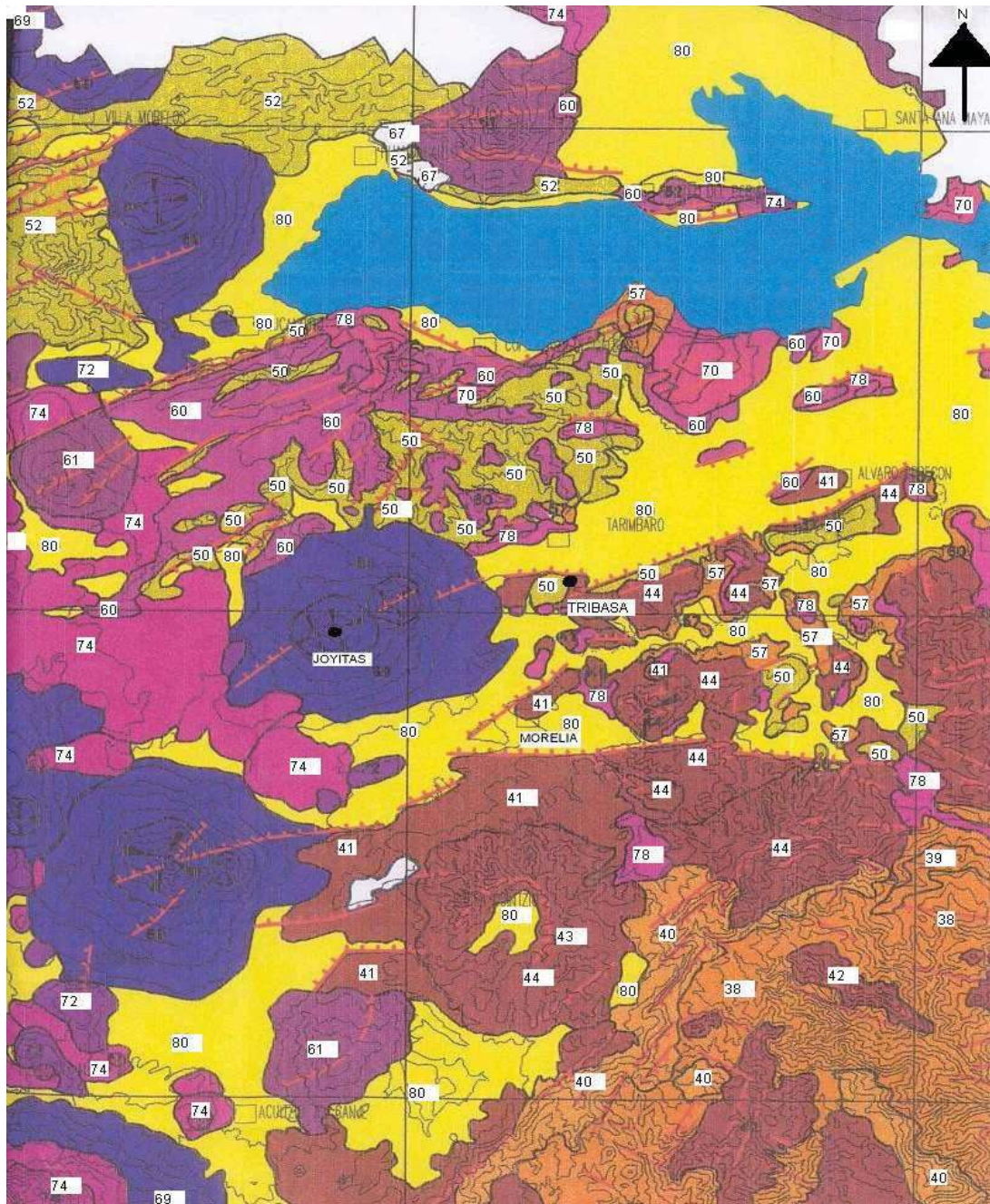


Figura 5. Recorte del mapa geológico del Estado de Michoacán que muestra las unidades geológicas presentes en la zona del estudio [15].

Unidades geológicas presentes en la zona de estudio.

- 50 – Andesitas y basaltos de Tarimbaro. Mioceno Superior, 7.8 Ma.
- 52 – Lavas andesíticas y basálticas e ignimbríticas de Villa Morelos (Mioceno Superior, 6 Ma).
- 57 – Secuencia fluvio-lacustre Cuitzio-Charo-Morelia (Mioceno superior).
- 59 – Depósitos de flujos piroclásticos de Tlalpujahua(Plioceno superior, 3.8 Ma).

- 60 – Depósitos de flujos piroclásticos del Lago de Cuitzeo (Plioceno Superior, 2.8 Ma).
- 69 – Conos de lavas y pequeños volcanes (Pleistoceno inferior y medio, 1.3-0.83 Ma).
- 70 – Lavas riolíticas y dacíticas del lago de Cuitzeo.
- 74 – Conos de escorias y flujos piroclásticos (Holoceno, 0.5 Ma).
- 78 – Depósitos de caída piroclásticos de diferentes posiciones estratigráficas.
- 80 – Depósitos superficiales (aluviones y lacustres recientes).

Banco Ejido San Isidro. En el caso de la ceniza volcánica, el banco de material esta ubicado en el estado de Guanajuato, en las afueras de la ciudad de Acámbaro, a 15 min. de Acámbaro hacia el noreste. El banco de material esta ubicado en un Ejido, recibiendo el nombre de Ejido San Isidro. Llegando, a dicho banco, sobre la carretera Acámbaro-Zinapécuaro a una distancia de 10 + 300 km de la ciudad de Acámbaro y de ahí se encuentra una brecha, a la izquierda, que tiene una longitud aproximada de 8 km. La cual se recorre en un tiempo aproximado de 10 minutos, debido al transito pesado y constante de los camiones provenientes del banco de material. Esta ubicado en las coordenadas 100° 45' 22" de longitud y 19° 16' 09" de latitud. Es un banco productor de arena, grava, balastre, sello y derivados. En la figura 6 podemos ver la ubicación exacta del banco Ejido San Isidro.

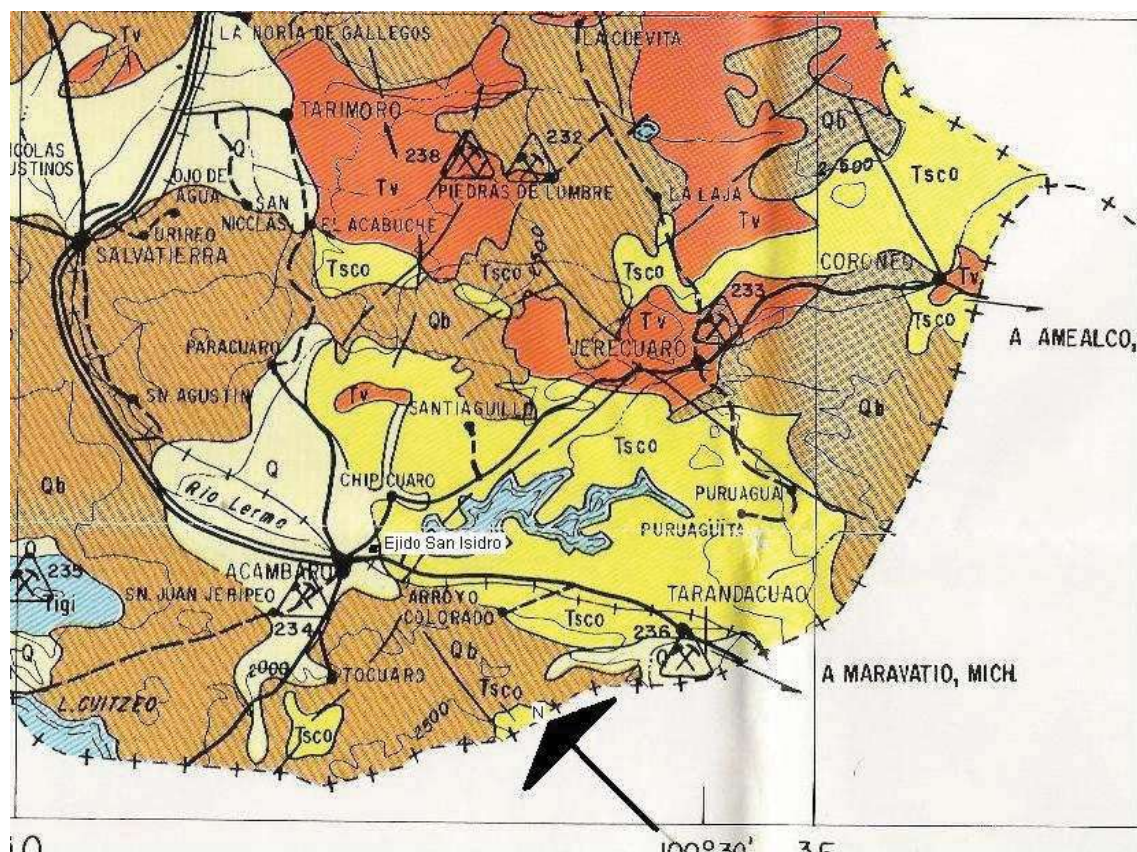


Figura 6. Recorte del mapa geológico del Estado de Guanajuato que muestra las unidades geológicas presentes en la zona del estudio [8].

A continuación se describen las unidades que se observaron en la zona de estudio:

- Q – Aluviones, conglomerados, arenas y arcillas.
- Qb – Lavas y escorias de composición basáltica.
- Tsco – Areniscas, conglomerados y depósitos aluviales.
- Tv – Lavas, tobas y rocas volcanoclásticas.
- Tigo – Granito, granodiorita, cuarzomonzonita y diorita.

V. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El desarrollo experimental comprende la elaboración de los especímenes de concreto, pero además de esto el proceso para preparar las muestras que serán sometidas a cada una de las técnicas de análisis que también se explicarán más adelante, previo al análisis y caracterización de los componentes sólidos del concreto hidráulico.

En la figura 7 se muestra de manera esquemática el seguimiento realizado durante la elaboración del presente trabajo, posteriormente se prosigue a detallar cada apartado mostrado en el esquema.

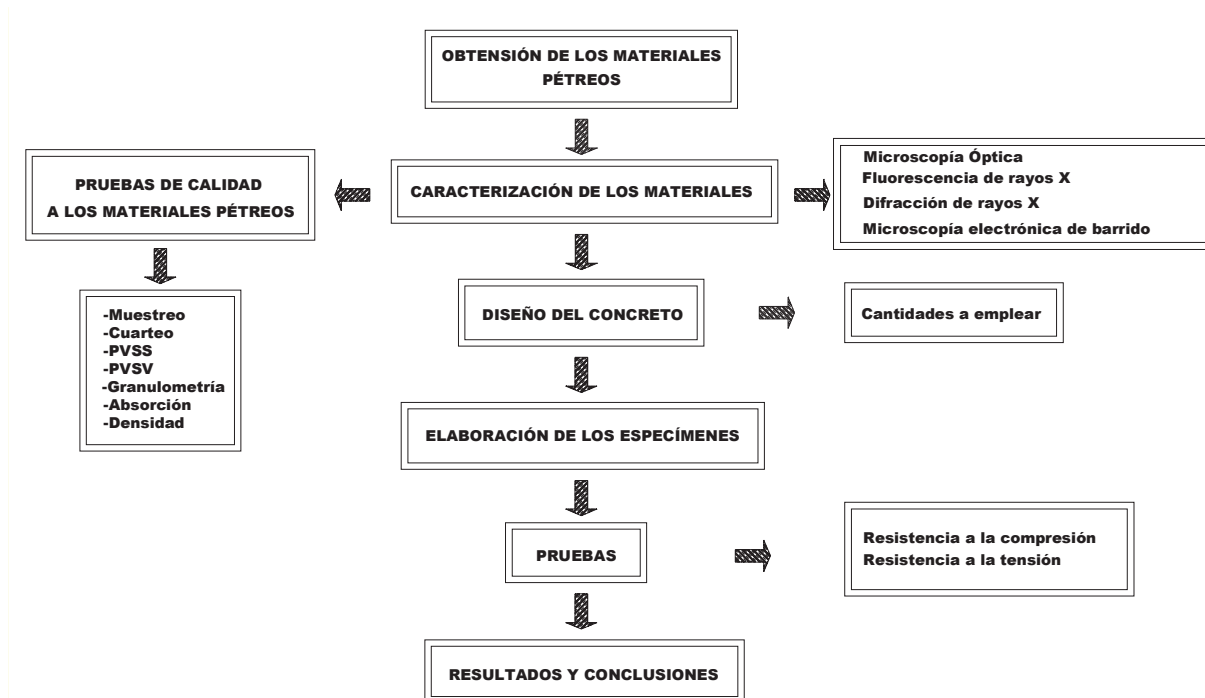


Figura 7. Estrategia a seguir en este trabajo.

V.1 OBTENCIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS (MUESTREO ASTM D 75)

Para obtener los agregados pétreos con los que se elaboró el concreto hidráulico y los cuales se sometieron a los diferentes análisis fue necesario trasladarse a los bancos de material con la finalidad de traer una muestra representativa de dicho material [19].

En el caso del agregado volcánico, específicamente en el banco “Joyitas”, figura 8, tanto la grava como la arena, son tomadas directamente del sitio por una draga, esta draga deposita el material en un camión para ser trasladado a un depósito. El material una vez

colocado en el depósito es clasificado por sus tamaños, ya que dicho depósito cuenta con varias salidas, las cuales conducen al material a tamices de diferentes aberturas y así clasificar al material de acuerdo a su tamaño. Posteriormente el material se acumula y es de aquí donde se realiza el muestreo.



Figura 8. Extracción de los agregados pétreos utilizados en la elaboración del concreto hidráulico, Banco de Materiales Joyitas.

En las muestras que se obtuvieron de este banco se aprecian distintos colores entre los que destacan el color rojizo y el color gris. Además estos materiales tienen forma semi-redondeada y en una menor proporción formas angulosas; el tamaño máximo de este material es de 1", para el caso de la grava, en el caso de la arena se tiene que el tamaño es inferior a la abertura correspondiente a la malla No 4, con un (Módulo de finura) MF = 3.2503.

Para el caso de los triturados, el material es tomado por una draga del banco, transportado por camiones hacia los molinos donde es triturado y una vez triturado se va conduciendo por una banda la cual transporta al material hasta el lugar donde se almacena para posteriormente venderlo y transportarlo. El muestreo se realizó en los depósitos donde el material se expende.

Los materiales de este banco muestran un color uniforme, el cual es gris, en comparación con el otro banco, donde el material presenta en su mayoría formas angulosas y se puede apreciar que se trata de un material muy sólido, típico de los basaltos.

En el caso de la ceniza volcánica se extrae con un cargador frontal, este cargador llena los camiones volteo que llevan al material hasta las mallas de cribado, posteriormente el material es transportado por camiones volteo y se almacena para su venta. El banco Ejido

San Isidro es productor de arena, balastre, grava y sello, cabe señalar que el material presenta un color café claro.

Las cantidades de material empleadas de cada banco se tienen en V.5, diseño del concreto hidráulico, así como también las cantidades de cemento y agua empleadas para cada proporción.

V.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Con la finalidad de conocer la calidad de los agregados pétreos a emplear es necesario realizar algunas pruebas marcadas por las normas ASTM y en base a los resultados se podrá realizar un correcto diseño del concreto hidráulico.

V.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS AGREGADOS PÉTREOS

El concreto hidráulico se fabricó con dos tipos de agregados, el primero elaborado con: arena, grava, cemento y agua, estos agregados pétreos empleados son del banco de materiales llamado Joyitas, además a la arena se le adicionó ceniza volcánica en distintas proporciones. Se elaboraron cinco diferentes proporciones las cuales fueron 100%-0%, 80%-20%, 70%-30%, 60%-40%, y 50%-50%; el primer porcentaje corresponde al de la arena y el segundo al de la ceniza volcánica, estos porcentajes son en peso. Las cantidades de la grava se tienen el apartado V.5, para cada proporción. En segundo caso tenemos concreto hidráulico elaborado con agregados pétreos triturados, en este caso se empleó arena de Joyitas mezclada con la ceniza volcánica únicamente en una proporción la cual fue 50%-50%, además de la grava triturada, el cemento y el agua.

Para elaborar el concreto en todos los casos se empleo cemento CPP 30R, según ONNCCE 1999. [21]

El procedimiento seguido el las pruebas se describe brevemente a continuación, (todas las pruebas se realizaron por triplicado).

V.3.1 PESO VOLUMÉTRICO SECO Y SUELTO

El procedimiento en esta prueba fue el siguiente: se secó y tamizó el material, se vacía dentro del recipiente dejándose caer a una altura medida a partir de la arista superior del recipiente de aproximadamente 5 centímetros, se enrasó y se limpio el recipiente de las partículas adheridas en las paredes exteriores procediendo a pesarlo, finalmente se dividió el peso obtenido entre el volumen del recipiente.

V.3.2 PESO VOLUMÉTRICO SECO Y VARILLADO

La diferencia con la prueba anterior es que el recipiente se llenó en tres partes dando 25 golpes a cada tercio con una varilla punta de bala, para finalmente obtener la relación que hay entre el peso y el volumen del material.

V.3.3 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN ARENAS

Esta prueba se realizó de la siguiente manera:

Ya con la muestra representativa de material se procedió a secarla y se pesaron aproximadamente 300 gr. Este material se coloca en una serie de mallas colocadas en forma decreciente y se taparon. Posteriormente se dejaron 10 min. en el Rof-tap para que se cribara completamente el material y obtener los materiales retenidos en cada una de las mallas. Posteriormente se determinó el Módulo de Finura para cada mezcla realizada mediante la fórmula correspondiente. En este caso se realizaron 15 granulometrías, del banco Joyitas puesto que teníamos 5 mezclas diferentes y se realizaron 3 granulometrías a cada mezcla de arena-ceniza volcánica. El Módulo de Finura se usó como dato para realizar el diseño del concreto.

V.3.4 ABSORCIÓN EN ARENAS

La absorción en arenas se realizó de la siguiente manera:

Se tomaron aproximadamente 300 gr. de material ya cuarteado, se saturó en agua durante 24 hrs a 24 °C aproximadamente. Posteriormente se seco superficialmente, se peso dicha arena seca superficialmente obteniendo así el peso saturado (Ph). Esta muestra se secó completamente para determinar el peso seco (Ps). Este procedimiento se realizó depositando el material en una charola y luego se coloca la charola en una parilla para secar dicho material, lo que resto fue aplicar la fórmula con los datos obtenidos y determinar así la capacidad que tiene la arena de absorber el agua.

V.3.5 DENSIDAD DE LA ARENA

Para realizar esta prueba, primeramente se saturó el material durante 24 hrs. Y luego se secó superficialmente. Se empleó un picnómetro en el cual se depósito el material previamente pesado (Pa). El material desalojó un volumen de agua, que se registró con la ayuda de una probeta. Finalmente se obtuvo la relación que existe entre el peso del material y el volumen desalojado.

V.3.6 ABSORCIÓN EN GRAVAS

Con la muestra que se trae de campo se cuarteo y se cribó por las mallas $\frac{3}{4}$ y $\frac{3}{8}$. Del material retenido en la malla $\frac{3}{8}$ se saturó aproximadamente 0.5 kg durante 24 hrs. Enseguida se secó superficialmente con la ayuda de una franela, se envolvió el material en la franela y se agitó hasta que perdió el brillo que presentaba la grava por el agua en exceso, este material secado superficialmente se secó determinando de esta manera el peso saturado (Ph). Posteriormente se secó completamente y se obtuvo el peso seco (Ps). Finalmente se aplicó la fórmula correspondiente y se obtuvo la absorción de la grava.

V.3.7 DENSIDAD EN GRAVAS

Se tomó una muestra de aproximadamente 300 grs. superficialmente seca, esta grava también fue la retenida en la malla $\frac{3}{8}$ y paso la $\frac{3}{4}$, este peso corresponde al peso de la muestra (P) y al igual que con la arena, la grava se depositó en el picnómetro lleno de agua para determinar el volumen desalojado. Posteriormente se determinó la relación que hay entre el peso y el volumen de la muestra.

V.3.8 GRANULOMETRÍA EN GRAVAS

Para esta prueba fue necesario secar la muestra extendiendo el material y dejándolo extendido. Posteriormente se pesó la muestra y se cribó de forma manual para determinar los retenidos en cada una de las mallas. Con estos datos se llenó el formato correspondiente para graficar dicha granulometría y verificar si el material está dentro de los límites establecidos por las normas de la ASTM.

V.4 TÉCNICAS ANALÍTICAS APLICADAS A LOS AGREGADOS PÉTREOS

Además de las pruebas físicas, se realizaron pruebas con técnicas analíticas, y así obtener la información completa sobre las características de interés de dichos minerales. Con estas técnicas podemos realizar estudios de gran importancia como: el estudio de su composición química, las propiedades físicas, las particularidades cristaloquímicas, los defectos, y otras heterogeneidades necesarias para resolver diferentes problemas teóricos, genéticos y aplicados, pero únicamente se tocarán los aspectos de interés para el trabajo de esta investigación [23].

V.4.1 MICROSCOPIA ÓPTICA (Láminas delgadas)

La preparación de las laminas delgadas se realizó mediante el procedimiento típico en el cual primeramente se cortó la muestra con un disco hasta un espesor de unos cuantos milímetros posteriormente se pulió hasta un espesor de tres centésimas de milímetro, para este pulido se emplearon abrasivos de diferente tamaño que se reducían conforme se disminuía el espesor de la muestra, esto fue para el caso de la grava. En el caso de la arena y ceniza volcánica la muestra se montó en resina para posteriormente disminuir su espesor hasta llegar al deseado.

V.4.2 FLUORESCENCIA DE RAYOS “X”

En este caso las muestras se separaron de acuerdo a su color, para el caso de la grava de Joyitas, en el caso de la grava triturada el material era homogéneo, por lo tanto se tomo una muestra representativa y se molió. Como la grava era en un principio demasiado dura se partió para poder molerse poco a poco. En el caso de la arena la muestra representativa se molió en su totalidad, al igual que con la ceniza volcánica. La molienda fue en un mortero de ágata. En este caso las pruebas también se realizaron por triplicado y una vez molido el material se cribó por la malla No 325 ASTM. El material que pasó se sometió al análisis de fluorescencia de rayos X.

V.4.3 DIFRACCIÓN DE RAYOS “X”

La preparación de las muestras para este análisis consistió en realizar una molienda a cada una de las variedades en sus diferentes tonalidades de color, es decir, que como para el banco Joyitas se tenían tres diferentes tonalidades del color se molieron nueve muestras en el caso de la grava y para la arena la molienda se realizó a una sola muestra representativa de la misma. En el caso del banco Tribasa, el material presentaba una sola tonalidad, se obtuvieron tres muestra moliendo dicho material. La ceniza volcánica se molió y se prepararon tres muestras para analizarlas en el difractómetro de rayos X. Posteriormente a la molienda, se hacía pasar el material por el tamiz número 325 ASTM. Y finalmente el material que pasaba por esta malla se llevó a analizar al difractómetro para posteriormente obtener los difractogramas correspondientes para cada una de las muestras.

Se empleó el Difractómetro del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la UMSNH, marca Siemens 5000 con radiación monocromática de $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$), 30 kV 25 mA, constante de tiempo 0.6-1.0 segundos y constante de paso angular 0.02 grados para 2θ .

V.4.4 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

En nuestro caso las muestras se prepararon de dos formas:

- Se obtuvieron esquirlas de los especímenes de concreto, las cuales fueron metalizadas con carbón y posteriormente fueron montadas en una lámina de cobre para poder colocarlas en el portamuestras del microscopio figura 9.
- De los especímenes cilíndricos de concreto se extrajeron muestras con un disco de manera que se tuviera un espesor constante, las otras dimensiones no fueron regulares. Estas muestras fueron pulidas a espejo y posteriormente se colocaron en una solución de alcohol (50% alcohol etílico-50% agua) con la finalidad de deshidratar al concreto, después fueron metalizadas con carbón y montadas en el portamuestras para ser observadas figura 9.



Figura 9. Muestras preparadas para el microscopio electrónico de barrido.

El Microscopio Electrónico de Barrido empleado es un MEB modelo JSM 6400, marca JEOL, con microanálisis EDS, WDS, con un alcance de 300,000 magnificaciones, Spot Size de 10-2 a 10-5 Ampér y con resolución a 35 kV. Resolución 3.5 nanómetros a una distancia de trabajo de 8 mm y voltaje de 30 kV. Las muestras se metalizaron con carbón para conocer su composición química, en la evaporadora marca JEOL J-EE 400 de 127 v de corriente eléctrica.

V.5 DISEÑO DEL CONCRETO HIDRÁULICO

En el diseño del concreto se emplearon todos los datos obtenidos de las pruebas de calidad, como son la absorción, la densidad, la granulometría y los pesos volumétricos secos sueltos y varillados, y en la tabla 11 se muestran las cantidades que se obtuvieron como resultado del diseño.

Tabla 11. Diseño de la mezcla 100-0

MATERIAL	PVSS KG/M ³	PVSV KG/M ³	DENSIDAD GR/CM ³	ABSORCIÓN %	MF	T.MÁX (in)
ARENA	1310	1340	2.6	2.52	3.25	
GRAVA	1130	1203	2.02	7.95		1
CEMENTO	1490		3.1			

$$F'c = 285 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{REV.} = 10 \text{ cm}$$

1. Cantidad de agua

$$\text{Agua} = 195 \text{ lts/m}^3$$

$$\text{Aire} = 1.5$$

2. Relación agua cemento "A/C" (sin aire incluido)

$$A/C = 0.56 \text{ (peso)}$$

$$\text{Cemento peso} = 348 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Cemento Volumen} = 112 \text{ lts/m}^3$$

$$\text{Cantidad de aire} = 15 \text{ lts}$$

3. Porcentaje de agregados gruesos por m³

$$\% \text{ de agregado grueso/m}^3 = 0.63$$

$$\text{PVSV Grava} = 758 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Volumen Grava} = 375 \text{ lts/m}^3$$

4. Suma de volúmenes

Material	Vol. (lts/m ³)
Cemento	112
Agua	195
Aire	15
Grava	375

$$\text{Suma} = 698$$

5. Arena

$$\text{Arena vol} = 302 \text{ lts/m}^3$$

6. Arena peso

$$\text{Arena} = 786 \text{ kg/m}^3$$

RESUMEN

MATERIAL	Volumen Lts/m ³	Peso kg/m ³
CEMENTO	112	348
AGUA	195	195
AIRE	15	
GRAVA	375	758
ARENA	302	786
Sumas =	1000	2088

7. -

	2	1	3	4	5	6
MATERIAL	Peso/Saco (kg)	Relación en peso	Vol/saco. (lts)	Relación en volumen	Volumen Absoluto	Peso Total (kg/m ³)
Cemento	50.00	1	33.6	1	16.13	348
Arena	112.93	2.26	86.2	2.57	43.43	786
Grava	108.83	2.18	96.3	2.87	53.87	758
Agua	28.00	0.56	28.0		28.00	195
Sumas	299.75		244.1		141.44	2088

8.-

DATOS DEL CILINDRO

D = 0.15 mts.

h = 0.3 mts.

Área = 0.0177 m²Volumen = 0.0053 m³

Cilindros = 28

Vol. Tot. = 0.1484 m³

MATERIAL	Peso total kg/m ³	Cantidades sin corrección	Corrección por absorción	Cantidades a pesar
Cemento	348	51.689		51.689 kg
Arena	786	116.741	2.942	113.799 kg
Grava	758	112.502	8.944	103.558 kg
Agua	195	28.946		40.832 lts
Sumas		309.877		309.877

Tabla 12. Diseño de la mezcla 50-50

MATERIAL	PVSS KG/M ³	PVSV KG/M ³	DENSIDAD GR/CM ³	ABSORCIÓN %	MF	T.MÁX (in)
ARENA	1256	1320	2.4	4.92	3.21	
GRAVA	1130	1203	2.02	7.95		1
CEMENTO	1490		3.1			

F'c = 285 kg/cm²

REV. = 10 cm

1. Cantidad de agua

Agua = 195 lts/m³
 Aire = 1.5

2. Relación agua cemento "A/C" (sin aire incluido)

A/C = 0.56 (peso)
 Cemento peso = 348 kg/m³
 Cemento Volumen = 112 lts/m³
 Cantidad de aire = 15 lts

3. Porcentaje de agregados gruesos por m3

% de agregado grueso/m³ = 0.63
 PVSV Grava = 758 kg/m³
 Volumen Grava = 375 lts/m³

4. Suma de volúmenes

Material	Vol. (lts/m ³)
Cemento	112
Agua	195
Aire	15
Grava	375
Sumas	698

5. Arena

Arena vol = 302 lts/m³

6. Arena peso

Arena = 726 kg/m³

RESUMEN

MATERIAL	VOLUMEN	PESO
	Lts/m ³	kg/m ³
CEMENTO	112	348
AGUA	195	195
AIRE	15	
GRAVA	375	758
ARENA	302	726
Sumas =	1000	2027

7.-

	2	1	3	4	5	6
MATERIAL	Peso/Saco (kg)	Relación en peso	Vol/saco. (lts)	Relación en volumen	Volumen Absoluto	Peso Total (kg/m ³)
Cemento	50.00	1	33.6	1	16.13	348
Arena	104.24	2.08	83.0	2.47	43.43	726
Grava	108.83	2.18	96.3	2.87	53.87	758
Agua	28.00	0.56	28.0		28.00	195
Suamas	291.06		240.9		141.44	2027

8.-

DATOS DEL CILINDRO

D = 0.15 mts

h = 0.3 mts

Área = 0.0176715 m²Volumen = 0.00530145 m³

Cilindros = 28

Vol. Tot. = 0.1484406 m³

MATERIAL	PESO TOT kg/m ³	Cantidades Sin corregir	Corrección por absorción	Cantidades a emplear.
Cemento	348	51.689		51.689 kg
Arena	726	107.761	5.301824396	102.459 kg
Grava	758	112.502	8.943880884	103.558 kg
Agua	195	28.946		43.192 lts
Sumas		300.897		300.897

Las cantidades a emplear se aumentaron en un 5% como desperdicio. El diseño para todas las mezclas fue similar y a continuación se resumen las cantidades de las mezclas faltantes:

Tabla 13. Mezcla 60%-40%

MATERIAL	Cantidades a emplear.
Cemento	51.689 kg
Arena	112.254 kg
Grava	103.558 kg
Agua	43.723 lts
Sumas	311.224

Tabla 14. Mezcla 70%-30%

MATERIAL	Cantidades a emplear.
Cemento	51.689 kg
Arena	106.073 kg
Grava	103.558 kg
Agua	41.374 lts
Sumas	302.693

Tabla 15. Mezcla 80%-20%

MATERIAL	Cantidades a emplear.
Cemento	51.689 kg
Arena	101.263 kg
Grava	103.558 kg
Agua	43.040 lts
Sumas	299.550

V.6 ELABORACIÓN DE LOS ESPECIMENES

Se realizó el mezclado del concreto de una forma mecánica, posteriormente realizamos el revenimiento y llenado de los moldes.

El objetivo de realizar la prueba de revenimiento es para conocer la fluidez del mismo. Esta prueba no es aplicable en mezclas muy fluidas.

El equipo que se usó fue:

- Cono de revenimiento.
- Charola.
- Cucharón.
- Varilla punta de bala de 5/8" de diámetro.
- Pala.
- Cinta métrica.

Una vez que el concreto ya está en la charola, se humedece el molde del revenimiento colocándose en una superficie firme y se sujeta con los pies, por medio de unas orejas especiales para ello.

Posteriormente se mezcló el concreto y se lleno el molde usando el cucharón, se llena aproximadamente una tercera parte del molde, se le dan 25 golpes con la varilla punta de bala, la mitad se hizo en forma inclinada (esto por la forma del molde) por la periferia del molde, los demás en forma vertical.

Se llenó la segunda tercera parte del molde, dando de la misma manera 25 golpes, pero con el cuidado de no pasar a la primera capa, esto es por que la primera capa tendría más de 25 golpes lo que daría un mayor acomodo y como resultado un mayor revenimiento.

A continuación se llenó el molde calculando que quede sobrado, es decir, que sobrepase un nivel para que al varillar 25 veces la tercer capa el nivel sobre pase ligeramente el nivel de enrase del mismo. Si quedará por debajo del nivel se le agrega más concreto hasta llegar al nivel de enrase del molde.

Enseguida se enrasó el molde rodando la varilla sobre la superficie superior del mismo.

Se giró un poco el molde y se retiró verticalmente, debido a la fluidez del concreto éste se derrumbo quedando extendido sobre la superficie horizontal.

Se midió con un flexómetro ese derrumbe, figura 10, colocando el molde usado en la prueba cerca de la mezcla, colocando la varilla sobre el molde, se midió el nivel de enrase del molde y la altura promedio del cono que formó la mezcla al soltarla.



Figura 10. Determinación del revenimiento de las mezclas de concreto hidráulico.

Con el concreto en la charola se realiza la prueba de revenimiento, la mezcla usada para el revenimiento se desecha y entonces se prosigue a llenar los cilindros.

El llenado se realizó con el uso de cilindros metálicos para que no se adhiera y no expanda el concreto, se colocó en forma vertical y en un lugar sin vibraciones. Con el cucharón se lleno el cilindro en tres capas de 10 centímetros y compactadas con varilla punta de bala cuidando:

Llenar cada capa un poco más del nivel fijado para que la varilla penetre y al dar los 25 golpes a la capa su nivel quede un poco arriba del tercio del molde, o de los 2 o 3 tercios del molde, y al final poder enrasar.

Cada capa se debe compactar solo en su espesor sin sobre pasar a las capas inferiores. Al terminar la última capa se golpeó el molde ligeramente de manera de sacar

todas las burbujas de aire atrapado y se enrasó pasando la varilla punta de bala por los bordes superiores del cilindro.

Una vez enrasado el molde se colocó la etiqueta de identificación a cada cilindro.

Cuando ya se tuvieron los moldes llenos se prosiguió con el descimbrado y curado de los especímenes de concreto.

V.7 PRUEBAS MECÁNICAS REALIZADAS AL CONCRETO

Los métodos para verificar la calidad del concreto son las pruebas que a continuación se mencionan y que buscan la obtención de las propiedades mecánicas del concreto, dichas pruebas se explicaron en el apartado III.7.

V.7.1 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DE CILINDROS DE CONCRETO

Los cilindros se mantuvieron sumergidos en agua, curado del concreto, hasta el día anterior en que se sometieron a prueba, tanto de compresión como de tensión.

Para realizar esta prueba fue necesario realizar un cabeceo a los cilindros. El cabeceo se realizó con azufre y tiene la finalidad de proporcionar a la carga una superficie horizontal y esta se pueda distribuir de manera uniforme.

Posterior al cabeceo se tomaron las medidas del cilindro, tanto el diámetro como la altura. Con estos datos se montó el cilindro en la máquina universal de pruebas, centrando el espécimen en dicha máquina, posteriormente se comenzó a aplicar carga a una velocidad promedio de $10 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$, esta velocidad se mantuvo durante toda la prueba hasta la falla del cilindro registrando la carga de falla para posteriormente realizar los cálculos correspondientes y conocer el esfuerzo del cilindro.

Se realizaron 28 cilindros por proporción, es decir, que se elaboraron 140 cilindros con agregados pétreos del banco Joyotas. Se probaron cilindros a las edades de 3 días, 7 días, 14 días, y 28 días. Además se probaron tres cilindros a compresión y 3 cilindros a tensión, y se guardó uno para edades mayores, para cada proporción.

Para el banco Tribasa se elaboraron 30 cilindros, probando a las mismas edades mencionadas en el párrafo anterior, y se probaron 3 cilindros a compresión y 3 cilindros a tensión guardando un cilindro para edades mayores.

V.7.2 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA DE CILINDROS DE CONCRETO

Al igual que en la prueba de compresión los cilindros se mantuvieron sumergidos en agua hasta un día anterior al de la prueba.

En este caso el cilindro se comprime de manera horizontal, ya que esta prueba nos da la resistencia a la tensión indirecta, Prueba brasileña. Previo al montado del cilindro en

la máquina horizontal el cilindro se marca de manera diametral con la finalidad de centrarlo adecuadamente en dicha máquina, en lugar de tiras de triplay se colocaron tiras de cuero a lo largo del cilindro ya acostado, de manera que el contacto no fuera directo entre el cilindro y las placas de la máquina universal. Posteriormente se comenzó a aplicar carga a una velocidad promedio de $10 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$.

VI. RESULTADOS OBTENIDOS

De las muestras analizadas y de los resultados obtenidos se presentan los de mayor relevancia, con la finalidad de lograr el objetivo de esta investigación. Primeramente se presentan los resultados de las pruebas físicas y posteriormente tenemos los resultados de las técnicas analíticas empleadas en el presente trabajo.

VI.5 RESULTADO DE LAS PRUEBAS FÍSICAS DE LOS AGREGADOS PÉTREOS

Los resultados de las pruebas realizadas para determinar la calidad de los agregados pétreos empleados en la elaboración del concreto hidráulico se resumen a continuación.

Para los pesos volumétricos seco suelto y varillado tenemos como resultado de tres cuantificaciones los siguientes datos, tabla 5:

Tabla 16. Pesos volumétricos de agregados empleados.

Proporción (% en peso)	PVSS (Kg/m³)	PVSV (Kg/m³)
	ASTM C 29-97	ASTM C 29-97
100-0 (Arena de Joyitas y Ceniza Volcánica)	1310	1340
80-20 (Arena de Joyitas y Ceniza Volcánica)	1256	1319
70-30 (Arena de Joyitas y Ceniza Volcánica)	1265	1367
50-50 (Arena de Joyitas y Ceniza Volcánica)	1256	1320
60-40 (Arena de Joyitas y Ceniza Volcánica)	1271	1341
Ceniza Volcánica	1141	1320
Grava de Joyitas	1130	1203
Grava Triturada	1470	1530

Es de esperar que el material triturado tenga un mayor peso, esto debido a que presenta una menor porosidad.

El peso volumétrico seco o varillado es la relación que existe entre el peso y el volumen del material analizado, es decir, que esta prueba nos dice que tan pesado o ligero

es el material. Es de suponer que un concreto más pesado por unidad de volumen es de mejor calidad por el hecho de que presenta menos huecos, los cuales no favorecen al concreto en cuanto a su resistencia. Entonces el concreto con agregados triturados será el que presente mayor resistencia a las pruebas mecánicas.

Para las granulometrías en arenas tenemos (ASTM C 136-96a):

Las siguientes, tablas 17, 18, 19, 20 y 21, proporciones fueron hechas con arena del banco Joyitas y ceniza volcánica, corresponden a un promedio de tres análisis realizado a cada proporción.

Tabla 17. Granulometría de la proporción 100%-0%.

Malla #	Peso Ret. (gr)	% Retenido	%Ret. Acum.	% Que pasa
8	48.0500	13.0847	13.0847	86.9153
16	126.4500	34.4373	47.5220	52.4780
30	116.2000	31.6455	79.1675	20.8325
50	41.2500	11.2329	90.4004	9.5996
100	16.3500	4.4516	94.8519	5.1481
200	8.4000	2.2881	97.1400	2.8600
P-200	10.5000	2.8600	100.0000	0.0000
Suma	367.2000		MF = 3.2503	

Para fines de calidad se recomienda que el módulo de finura este entre 2.5 y 3.0, pero es aceptable entre 2.3 y 3.1 [19].

La granulometría, tanto para las gravas como para las arenas, es deseable que exista una heterogeneidad en todos los tamaños de manera que los huecos dejados por el agregado grueso sean llenados por el agregado fino.

Podemos ver que, en la columna del % que pasa, de la malla 30 a la 50, tabla 17, existe un salto considerable en cuanto a los tamaños, es decir que existe una discontinuidad entre esas mallas, esta es la razón por la que el módulo de finura que da un poco fuera de las especificaciones.

Tabla 18. Granulometría de la proporción 80%-20%.

Malla #	Peso Ret. (gr)	% Retenido	%Ret. Acum.	% Que pasa
8	49.0500	12.0216	12.0216	87.9784
16	131.6000	32.1646	44.1863	55.8137
30	132.6000	32.3756	76.5618	23.4382
50	48.1000	11.7548	88.3166	11.6834
100	25.0000	6.1416	94.4582	5.5418
200	9.4000	2.2983	96.7565	3.2435
P-200	13.2500	3.2435	100.0000	0.0000
Suma	409.0000		MF = 3.1554	

Es ente caso, tabla 18, tenemos que existe la misma discontinuidad para las mallas indicadas en la mezcla 100%-0%, pero en esta mezcla tenemos más finos y esto se aprecia en los datos de las mallas 100 en adelante.

Tabla 19. Granulometría de la proporción 70%-30%.

Malla #	Peso Ret. (gr)	% Retenido	%Ret. Acum.	% Que pasa
8	29.5000	12.9235	12.9235	87.0765
16	75.1500	31.9180	44.8415	55.1585
30	76.0000	31.9948	76.8363	23.1637
50	28.8000	12.1004	88.9368	11.0632
100	12.7500	5.4552	94.3919	5.6081
200	5.6000	2.3072	96.6992	3.3008
P-200	7.8500	3.3008	100.0000	0.0000
Suma	235.6500		MF = 3.1793	

En este caso, tabla 19, se presenta discontinuidad en las mallas 30 y 50, al igual que en las tablas 17 y 18, obteniendo un valor del modulo de finura igual a 3.17, un valor menor que 2.0 indica una arena fina; 2.5 una arena de finura media y más de 3.0 una arena gruesa, lo cual nos indica que se trata de arena gruesa.

Tabla 20. Granulometría de la proporción 60%-40%.

Malla #	Peso Ret. (gr)	% Retenido	%Ret. Acum.	% Que pasa
8	50.5500	14.3915	14.3915	85.6085
16	107.6500	30.8597	45.2512	54.7488
30	104.5500	29.6156	74.8668	25.1332
50	43.7500	12.2506	87.1174	12.8826
100	23.5000	6.3975	93.5149	6.4851
200	11.5500	3.1925	96.7074	3.2926
P-200	11.8000	3.2926	100.0000	0.0000
Suma	353.3500		MF = 3.1514	

En esta proporción, tabla 20, tenemos una arena gruesa ya que tenemos modulo de finura de 3.15, en esta proporción tenemos la concentración de los tamaños de la arena en las mallas 16 y 30, presentando discontinuidad de los tamaños de las partículas en las mallas 30 y 50.

Tabla 21. Granulometría de la proporción 50%-50%.

Malla #	Peso Ret. (gr)	% Retenido	%Ret. Acum.	% Que pasa
8	46.9500	16.6062	16.6062	83.3938
16	87.2500	30.5469	47.1531	52.8469
30	82.3000	28.7104	75.8635	24.1365
50	33.7000	11.7792	87.6427	12.3573
100	17.8500	6.3216	93.9643	6.0357
200	8.2500	2.9059	96.8702	3.1298
P-200	8.9500	3.1298	100.0000	0.0000
Suma	285.2500		MF = 3.2123	

En esta proporción, tabla 21, tenemos arena gruesa lo cual lo podemos observar en las columnas de % retenidos en las primeras tres mallas las cuales corresponden a los tamaños más grandes.

Para las proporciones mencionadas anteriormente tenemos la curva granulométrica que se muestra en la figura 11.

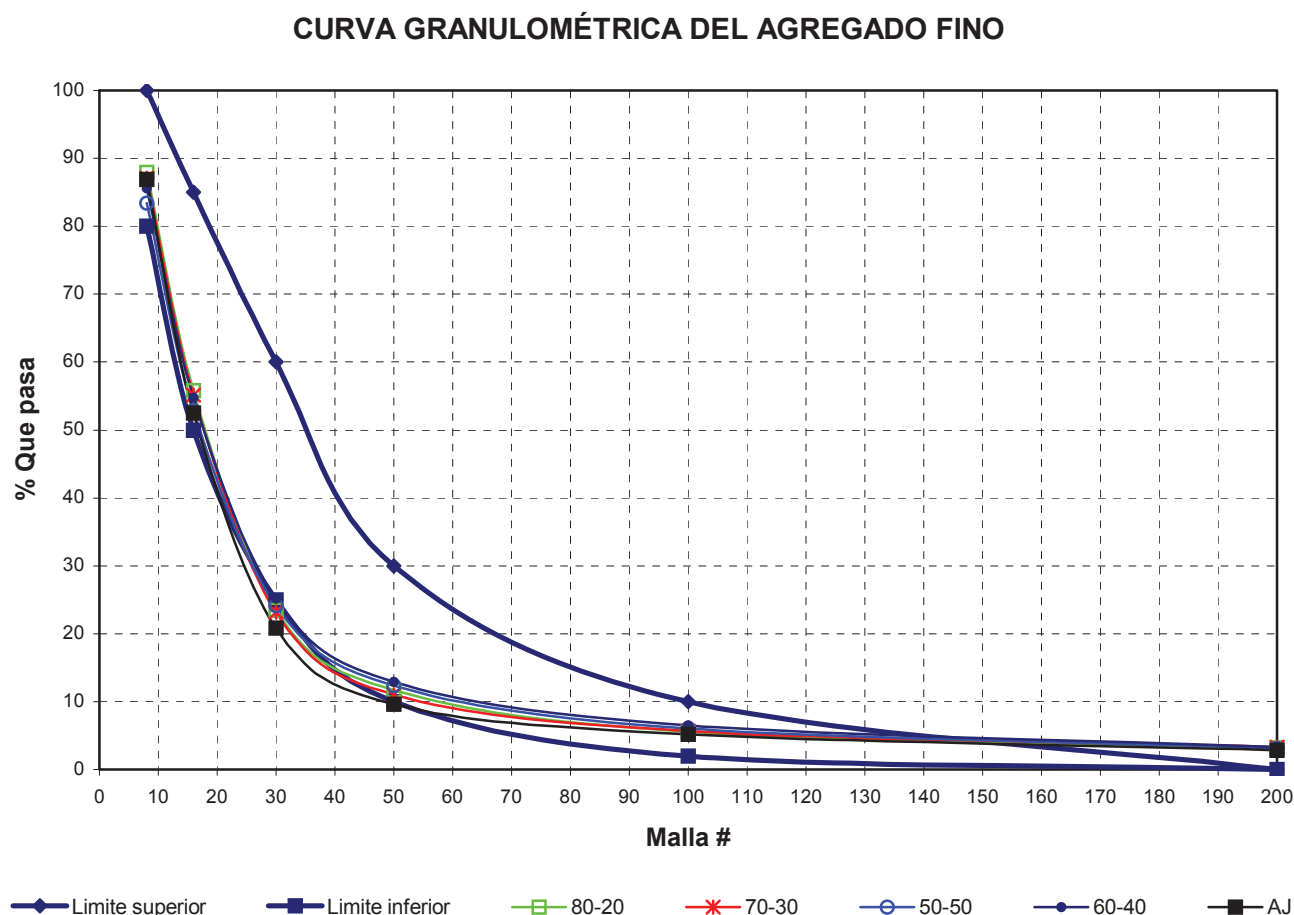


Figura 11. Curva granulométrica de las mezclas arena-ceniza volcánica.

Dentro de los análisis de granulometría realizados a los agregados pétreos finos empleados en construcción es común que la curva descrita por los diferentes tamaños de las partículas este dentro de los límites establecidos por las normas, existe la posibilidad de que una parte de la curva quede fuera de los límites, pero aún así puede usarse, claro esto encarecería al concreto ya que al tener más finos existe más área superficial que cubrir por el cemento.

En nuestro caso la mayor parte de las curvas descritas por las diferentes proporciones empleadas caen dentro de los límites establecidos por las normas, es decir esta entre el límite inferior y el límite superior de la figura 11, lo cual nos indica que nuestro material no esta falto ni en exceso de finos o gruesos. Existe un pequeño rango de la arena de Joyitas que esta fuera de los limites los cuales van de la malla No 20 a la malla No 50,

en lo que respecta a las demás proporciones empleadas caen dentro de los límites establecidos

Ceniza Volcánica

Para la ceniza volcánica tenemos en promedio la siguiente granulometría y su correspondiente curva, figura 12:

Tabla 22. Granulometría de la ceniza volcánica.

Malla #	Peso Ret. (gr)	% Retenido	%Ret. Acum.	% Que pasa
8	83.0500	17.7385	17.7385	82.2615
16	110.4500	22.9936	40.7322	59.2678
30	123.4500	25.3904	66.1225	33.8775
50	66.8500	13.8201	79.9426	20.0574
100	58.0000	11.9214	91.8640	8.1360
200	21.3500	4.4532	96.3173	3.6827
P-200	17.0500	3.6827	100.0000	0.0000
Suma	480.2000		MF = 2.9640	

En la granulometría de la ceniza volcánica es posible apreciar una continuidad en los porcentajes tanto retenidos como acumulados y en los porcentajes que pasan, esto quiere decir que tiene una amplia gama de tamaños por lo que al mezclar dicha ceniza volcánica con la arena de Joyitas nos da como resultado una buena curva granulométrica sin exceso ni falta de tamaños de partículas.

CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA CENIZA VOLCÁNICA

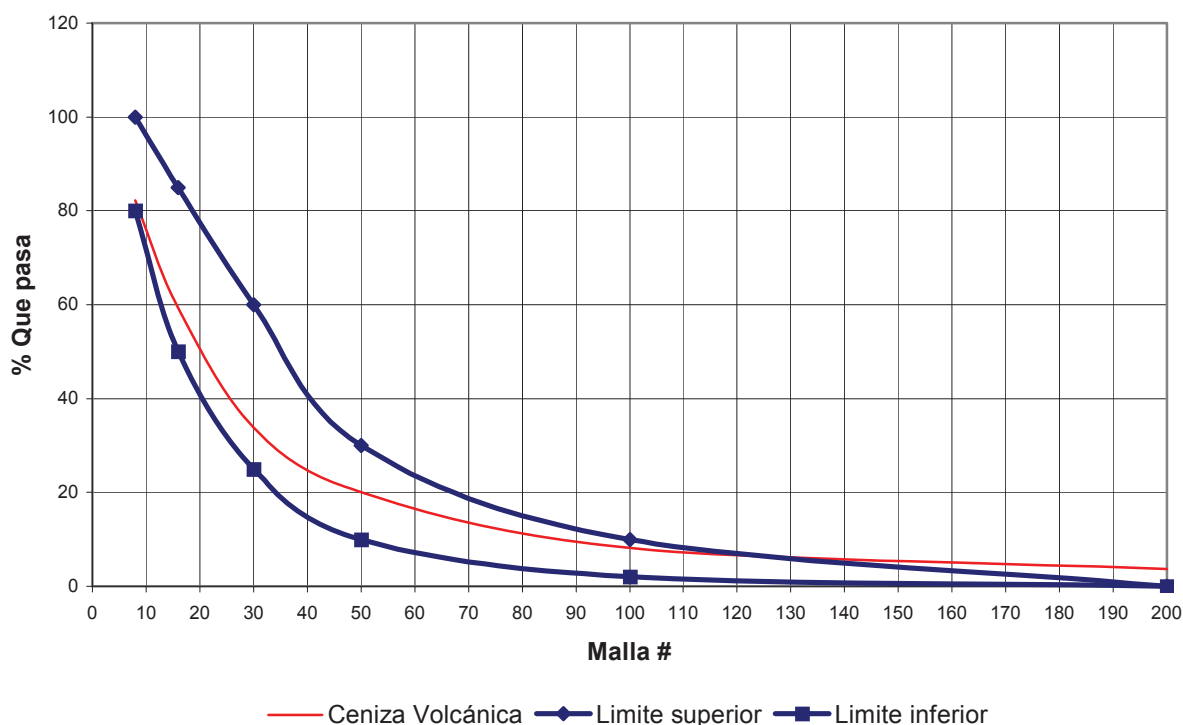


Figura 12. Curva granulométrica descrita por la ceniza volcánica.

En general, la curva granulométrica descrita anteriormente por la ceniza volcánica, figura 12, está dentro de los límites establecidos.

En el caso de la absorción y densidad, pruebas descritas en el apartado III.7, para el agregado fino se obtuvieron los siguientes valores, tabla 23:

Tabla 23. Absorción y densidad del agregado fino y de la ceniza volcánica.

Proporción (% en peso)	Absorción (%) ASTM C 128-97	Especificaciones	Densidad(gr/cm^3) ASTM C 128-97	Especificaciones
100-0 (AJ)	2.5177	4 % máx.	2.6048	2.0 mín.
80-20	4.8345	4 % máx.	2.3675	2.0 mín.
70-30	3.1939	4 % máx.	2.4383	2.0 mín.
60-40	4.9365	4 % máx.	2.6254	2.0 mín.
50-50	4.9166	4 % máx.	2.3974	2.0 mín.
Ceniza volcánica	5.5412	4 % máx.	2.5063	2.0 mín.

En las diferentes mezclas tenemos las especificaciones marcadas por las normas, las cuales nos indican para el caso de la absorción un máximo de 4%, se puede notar que la arena de Joyitas pura (proporción 100% - 0%) tiene muy poca absorción, en cambio la ceniza volcánica pasa lo especificado, entonces al realizar cada una de las mezclas las absorciones resultan en un rango de 3.219 % a 4.91 %. Algunas de las mezclas pasan el máximo especificado, en este caso lo que se hace es una corrección por absorción para evitar un exceso de agua y esto afecte la resistencia del concreto.

En el caso de la densidad tenemos un mínimo de 2.0 (gr/cm³), para nuestras mezclas tenemos densidades de 2.36 (gr/cm³) como mínimo y 2.60 (gr/cm³) como máximo, es decir, que tenemos materiales óptimos para el concreto hidráulico.

En el caso del agregado grueso se tienen los resultados de la tabla 24.

Tabla 24. Absorción y densidad del agregado grueso.

Banco	Absorción (%) ASTM C 127-93	Especificaciones	Densidad (gr/cm³) ASTM C 127-93	Especificaciones
Grava de Joyitas	7.95	4 %, máx.	2.02	2.0 mín.
Grava de Tribasa	2.59	4 %, máx.	2.7	2.0 mín.

La grava de Joyitas presenta una absorción mucho mayor que la máxima lo cual nos indica que se trata de un material poroso ya que al tener una cantidad de poros considerable tiende a absorber más agua, esto lo podemos corroborar con la densidad de dicho material, teniendo una densidad inferior a la del agregado triturado. Esto es relevante para la resistencia a la compresión del concreto ya que los huecos no le proporcionan ninguna resistencia al concreto, al contrario le restan [10].

En lo que respecta al agregado triturado es mucho más compacto que el agregado de Joyitas, por lo tanto también presenta mayor densidad que el de Joyitas, es de esperar que el concreto hidráulico elaborado con agregado de Tribasa presente mayor resistencia a compresión que el concreto elaborado con agregado de Joyitas.

Las granulometrías que se muestran a continuación y las curvas, figuras 13 y 14, corresponden a un promedio de tres análisis realizados al agregado grueso empleado en nuestro estudio:

Tabla 25. Granulometría de la grava de Joyitas.

Malla #	Peso Ret. (gr)	% Retenido	%Ret. Acum.	% Que pasa
2"	0.0000	0.0000	0.0000	100.0000
1 1/2"	55.0000	0.4596	0.4596	99.5404
1"	1519.5000	12.2659	12.7255	87.2745
3/4"	2687.0000	21.6499	34.3754	65.6246
1/2"	3021.0000	24.3211	58.6965	41.3035
3/8"	2064.5000	16.5908	75.2873	24.7127
No 4	2311.0000	18.5098	93.7972	6.2028
P- No 4	782.5000	6.2028	100.0000	0.0000
Suma	12440.5000		TM = 1"	

En la granulometría de la grava de Joyitas, tabla 25, se aprecia que existe una amplia gama de tamaños, es decir, tenemos varios tamaños los cuales van desde 3.81 cm (1 1/2") hasta 4.74 mm (malla No 4). Determinamos un Tamaño Máximo de 1" el cual se uso en el diseño del concreto.

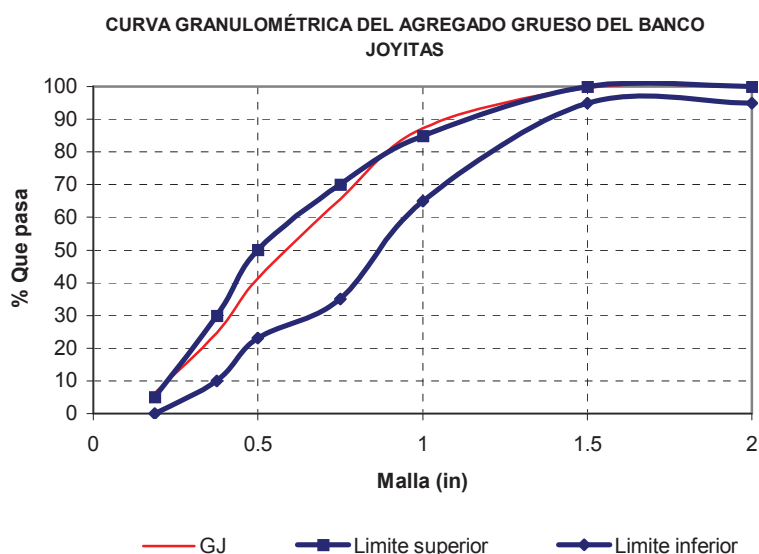


Figura 13. Curva granulométrica descrita por la grava de Joyitas.

La curva de la figura 13 nos indica que la grava de Joyitas empleada es apta para la elaboración del concreto hidráulico, ya que se sale un mínimo de los rangos especificados.

Se tiene en promedio la siguiente granulometría y curva granulométrica:

Tabla 26. Granulometría de la grava de Tribasa

Malla #	Peso Ret. (gr)	% Retenido	%Ret. Acum.	% Que pasa
2"	0.0000	0.0000	0.0000	100.0000
1 1/2"	0.0000	0.0000	0.0000	100.0000
1"	65.0000	0.4167	0.4167	99.5833
3/4"	3260.0000	20.8974	21.3141	78.6859
1/2"	3123.0000	20.0192	41.3333	58.6667
3/8"	2330.0000	14.9359	56.2692	43.7308
No 4	4722.0000	30.2692	86.5385	13.4615
P- No 4	2100.0000	13.4615	100.0000	0.0000
Suma	15600.0000	100.0000	TM = 1"	

En este caso, tabla 26, se trata de tamaños de agregado que van desde 2.54 cm (1") hasta 4.75 mm (malla No 4). De igual forma se determinó el TM de 1" que se empleó en el diseño del concreto y obtener las proporciones a emplear para elaborar el concreto hidráulico.

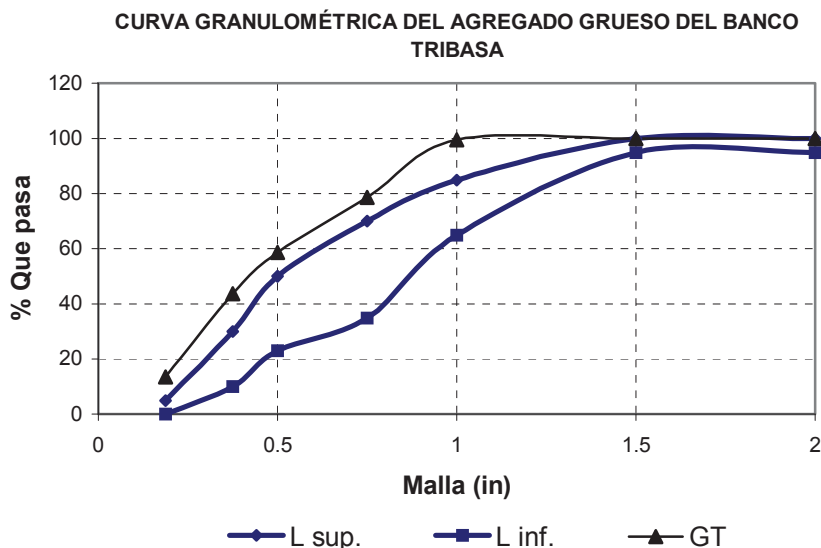


Figura 14. Curva granulométrica descrita por la grava de Tribasa.

En este caso la curva granulométrica que se obtuvo por la grava de Tribasa presenta en sus tamaños de 0 a 1.5 in, un porcentaje mayor, al marcado por las normas, es decir, tenemos grava en los tamaños de 0 a 3.81 cm (1.5") en una mayor cantidad que la que se indica en las normas. No podemos desechar a un material que presenta un exceso o un faltante de tamaños ya que resultaría más caro en la obra civil desperdiciar este material que conseguir uno bueno de otra región, lo que se procede a hacer en estos casos es mezclar el material con otro de mejores características y de esta manera corregir el error. En este caso se trata de una investigación, por lo tanto tomaremos en cuenta estos datos en los resultados mecánicos del concreto hidráulico.

VI.2 RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE Y TENSIÓN INDIRECTA DEL CONCRETO HIDRÁULICO

La figura 15 nos presenta los resultados de revenimientos obtenidos al realizar las mezclas de concreto hidráulico en el laboratorio. En ella apreciamos que la mezcla 50%-50% es la que tiene un revenimiento mayor, 12 cm, anterior a esta tenemos a la proporción 80%-20% con un revenimiento de 11.5 cm, la proporción 60%-40% presenta un revenimiento de 10 cm, la proporción 70%-30% tiene un revenimiento de 9.5 cm y la proporción 100%-0% tiene un revenimiento de 9.5 cm también.

Para el caso del concreto hidráulico hecho con grava triturada solamente se realizó la proporción 50%-50% (arena de Joyitas-ceniza volcánica), presentando un revenimiento de 11 cm.

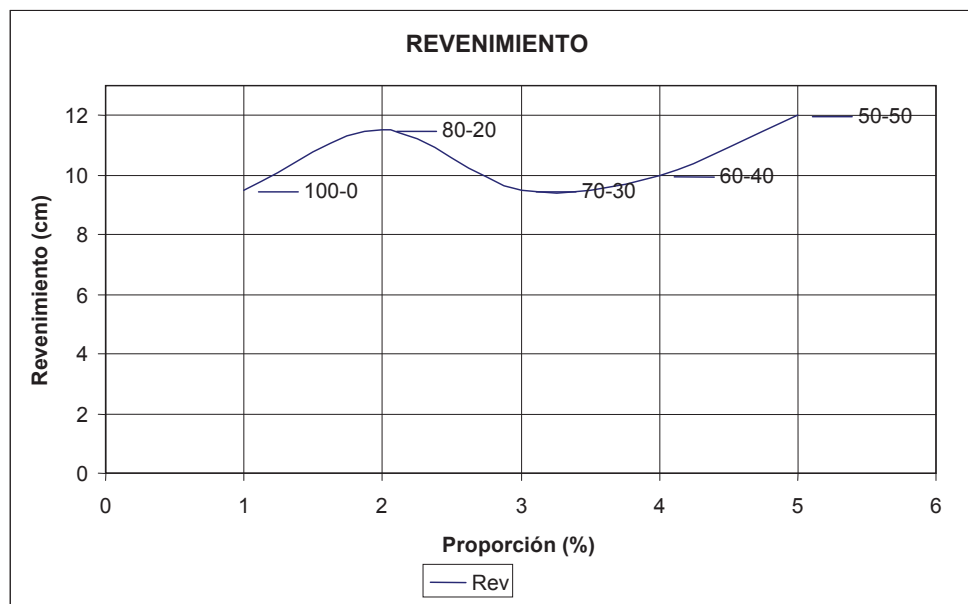


Figura 15. Curva de revenimientos para las diferentes mezclas arena- ceniza volcánica elaboradas.

A continuación se presentan las gráficas obtenidas con los resultados de resistencia a la compresión y tensión para cada uno de los materiales empleados, figuras 16 y 17.

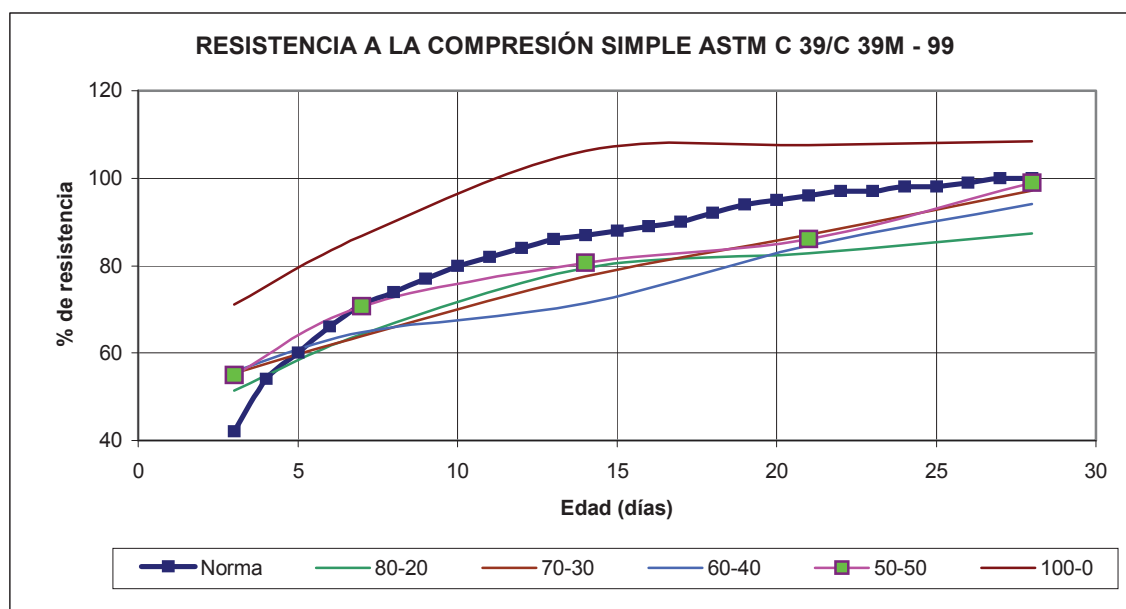


Figura 16. Resultados de la resistencia a la compresión de los especímenes elaborados, banco Joyitas.

La gráfica 16 es el resultado de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto elaborados con arena y grava de Joyitas y con las proporciones, en peso, de ceniza volcánica indicadas en la misma. En la cual podemos ver que la proporción 50%-50% está por encima de las demás proporciones, pero por debajo de la norma. La proporción 100%-0% está por encima de la norma, es decir, es la mezcla más resistente pero es la que presenta un revenimiento menor (9.5) o sea, es la mezcla menos trabajable. En este trabajo se busca un aumento en el revenimiento por lo tanto la proporción que menos sacrifica resistencia y tiene un mayor revenimiento es la proporción 50%-50%.

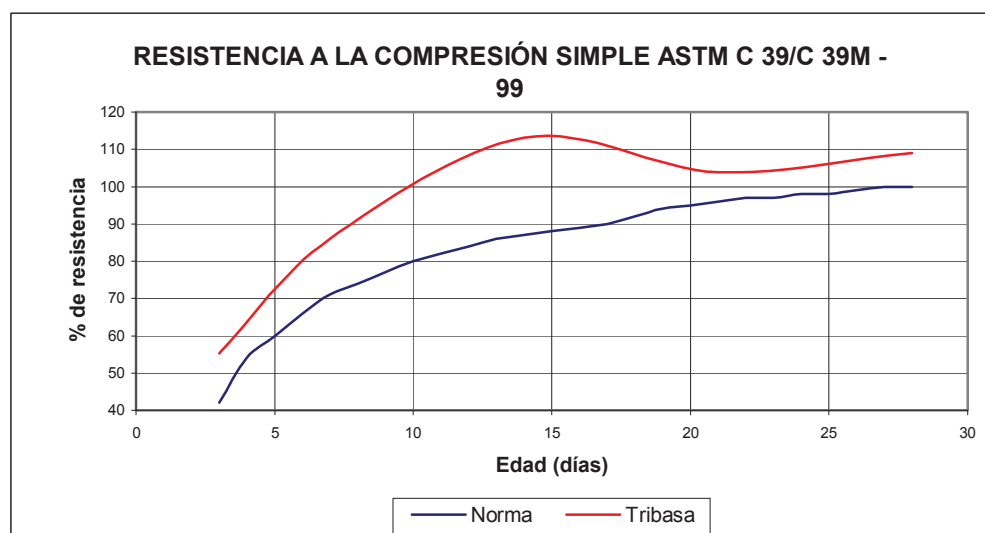


Figura 17. Resultados de resistencia a compresión de especímenes elaborados con arena de Joyitas y agregados gruesos de Tribasa.

La gráfica 17 nos muestra los resultados de la resistencia a la compresión de cilindros elaborados con arena de Joyitas y grava de Tribasa, con ceniza volcánica únicamente en la proporción 50%-50%, es decir, 50 % en peso de arena de Joyitas y 50% en peso de ceniza volcánica. En este caso tenemos solamente una proporción, y en dicha grafica tenemos dos curvas, la curva descrita por los datos obtenidos de las normas y la de concreto elaborado con grava triturada, además de ceniza volcánica en la proporción indicada, siendo notable que esta proporción tiene un revenimiento de 11 cm y esta por encima de las especificaciones. Según los resultados de compresión es preferible trabajar con material grueso triturado y agregado fino de Joyitas, además de ceniza volcánica en una proporción en peso con la arena de 50%-50%.

En las graficas 18 y 19, tenemos los resultados de la prueba de resistencia a la tensión tanto para los materiales del banco Joyitas como para los materiales del banco Tribasa, la prueba esta explicada en el apartado III.7.

Resultados a la tensión de concreto hecho con materiales de Joyitas (Arena y grava).

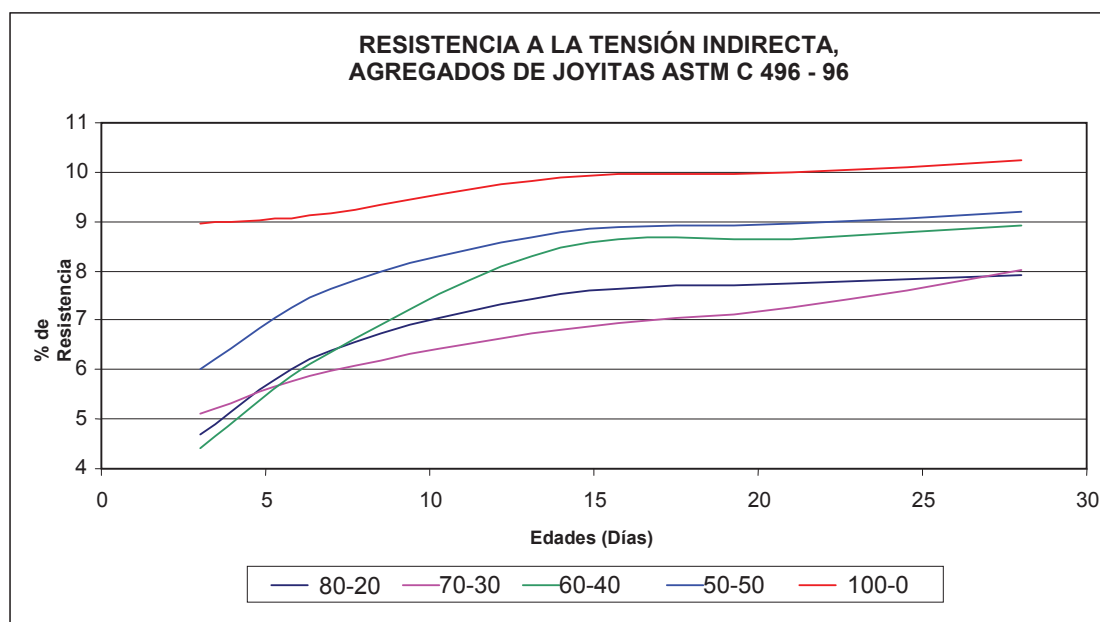


Figura 18. Curvas descritas como resultado de resistencia a la tensión de especímenes elaborados con agregados de Joyitas.

En este caso no existe una norma que nos marque los límites para el concreto hidráulico, en lo que corresponde a tensión, debido a que el concreto no trabaja a tensión en las estructuras de concreto, solamente trabaja a compresión. En las estructuras en las que se requiera resistencia a tensión se diseñan con acero de refuerzo, aparte del acero por temperatura, y como se menciono en la bibliografía el esfuerzo a tensión del concreto es de aproximadamente del 10 % del esfuerzo la compresión. Los resultados de tensión corresponden al porcentaje indicado.

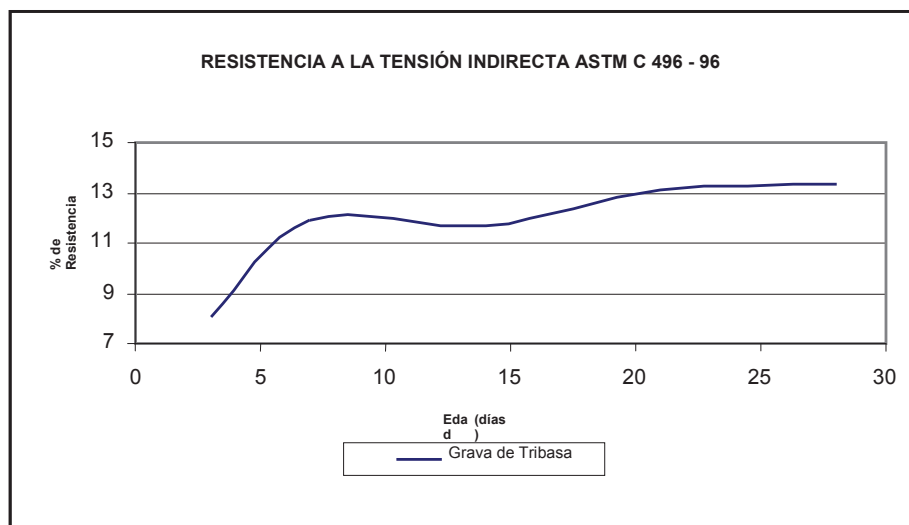


Figura 19. Curvas descritas como resultado de resistencia a la tensión de especímenes elaborados con agregados de Tribasa.

La gráfica 19 corresponde a los resultados de resistencia a la tensión del concreto hecho con agregados pétreos provenientes del banco Tribasa, grava, y agregado fino de Joyitas. La cual en comparación con la gráfica descrita por concreto elaborado con agregados de Joyitas, grava y arena de Joyitas demás de la ceniza volcánica, para la proporción 50%-50%, es de menor resistencia.

VI.3 RESULTADOS DE MICROSCOPIA ÓPTICA

Los análisis para la prueba de microscopia óptica se hicieron según lo descrito en el desarrollo experimental, capítulo V.4.

Arena de Joyitas

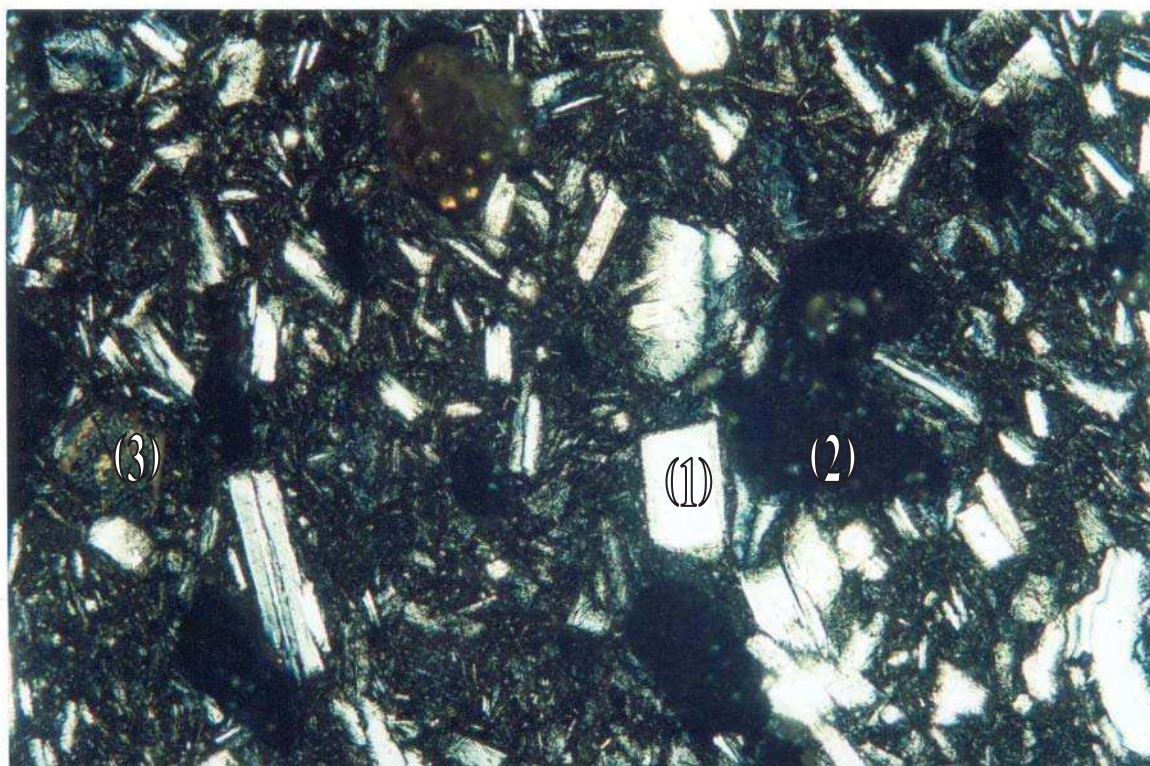


Figura 20. Microfotografía correspondiente a la muestra No AJ-101

En la presente microfotografía, figura 20, sin nicols y a 10x, es posible apreciar los fenocristales de plagioclasa (1) con vidrio volcánico (2). Se presenta una textura hialopilitica, en algunas zonas tenemos una textura en la cual los microlitos aciculares del feldespato están en una pasta vítrea, pero también dicha textura es pilotáxica la cual consiste en microlitos de feldespato laminares o aciculares en disposición semiparalela con piroxenos (Augita) (3) intersticiales.

Grava de Joyitas

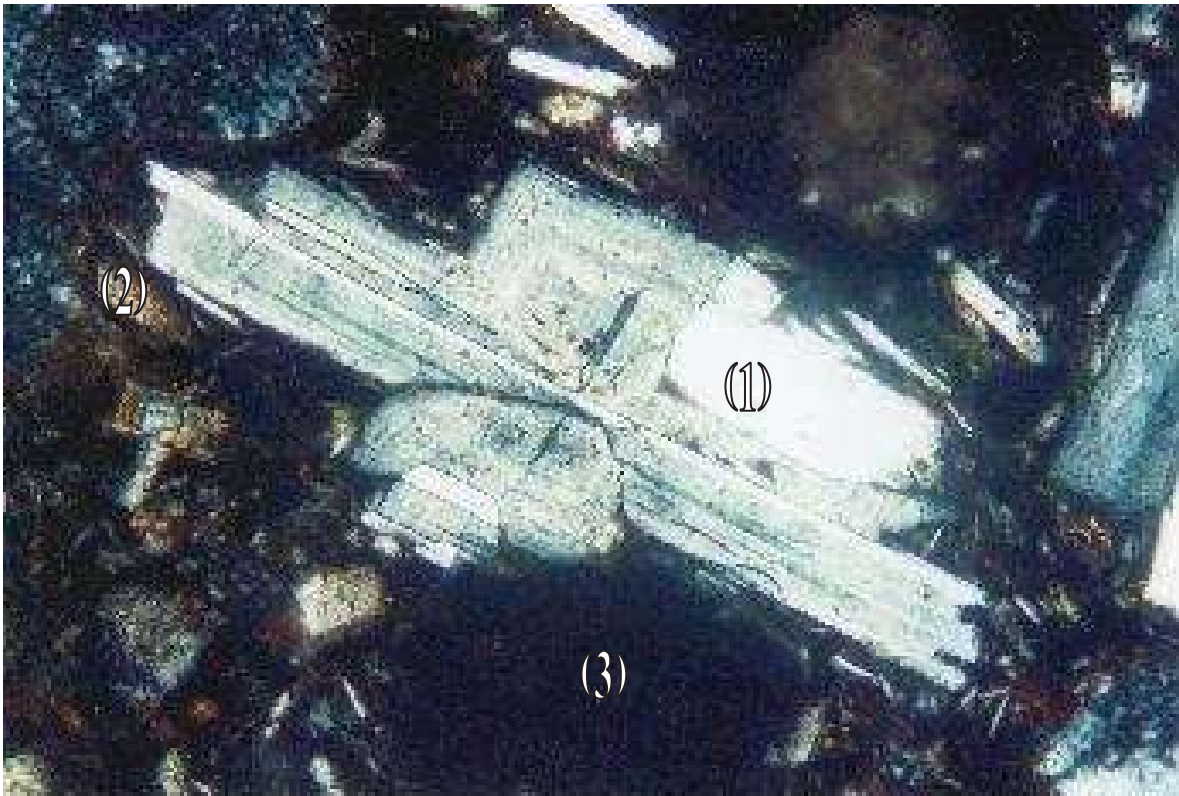


Figura 21. Microfotografía de la muestra No GJ-120.

En la microfotografía, figura 21, sin nicoles y a 20x, se observan fenocristales de plagioclase (1) y augita (2), rodeados por el vidrio volcánico (3), presentando una textura muy parecida a la descrita en la microfotografía anterior.

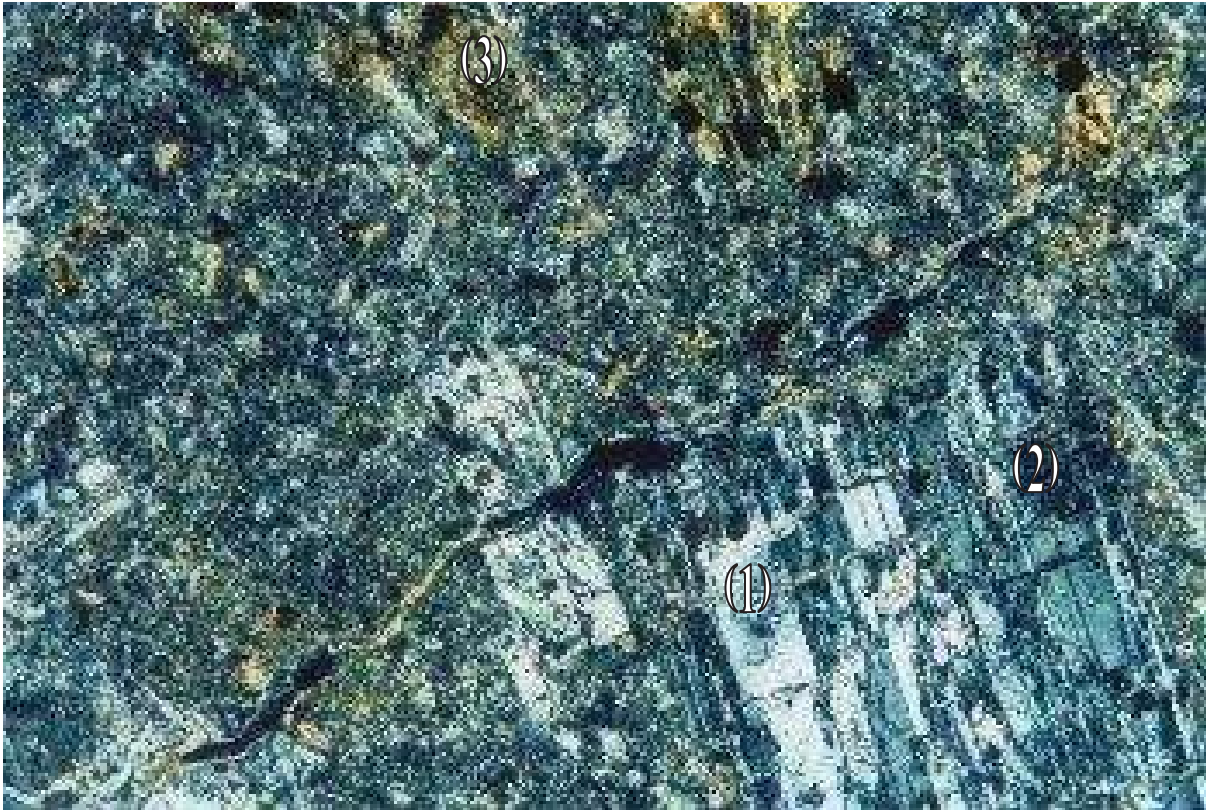
Ceniza volcánica

Figura 22. Microfotografía de la muestra No CV-30.

En esta microfotografía, figura 22, sin nicoles y a 10x, se logran apreciar los fenocristales de plagioclasa (1) con vidrio volcánico (2), presentando una textura hialopilitica y pilotaxica, ya descritas anteriormente. Además se observa un cierto grado de alteración (3).

VI.4 RESULTADOS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

La preparación de los materiales para realizar la prueba de fluorescencia de rayos “X” se realizó según lo descrito en el apartado V.4 de desarrollo experimental.

Fluorescencia de rayos X, tabla 27, en porcentaje, para los agregados de los bancos indicados.

Tabla 27. Fluorescencia de rayos X de los agregados pétreos empleados.

Banco	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PXC	Σ (%)
Tribasa Grava	57.00	0.872	18.138	6.732	0.105	3.506	7.414	3.443	1.492	0.182	1.38	100.26
Joyitas Grava	60.28	0.829	17.294	5.848	0.105	3.241	6.183	3.559	1.786	0.226	0.59	99.94
Joyitas Arena	60.19	0.834	17.213	5.907	0.103	3.501	6.098	3.485	1.780	0.218	0.90	100.23
C.V.	70.96	0.360	13.500	2.560	0.046	0.805	1.900	2.960	4.270	0.081	2.93	100.37

En la serie de análisis, se obtuvo la identificación de algunos de los elementos presentes en los agregados pétreos estudiados. En ellas se identificaron a los elementos característicos como son el sílice, elemento constituyente de los silicatos, feldespato sódico-cálcico (plagioclasa) y vidrio volcánico.

Algunos de los elementos encontrados se presentan como impurezas en los feldespatos y piroxenos con que trabajamos como pueden ser la Anortita, la Augita, la Cristobalita, la Enstatita, y la Nontronita; en el caso de el Hierro (Fe) lo podemos relacionar con la Anortita; el Manganeseo (Mn) se presenta en la Anortita; Aluminio (Al) se presenta en la Augita, Cristobalita y en la Enstatita, en el caso de la Augita, parte del Si puede estar sustituido por Al; calcio (Ca) se presenta en la Cristobalita y en la Enstatita, en esta última el contenido de Ca es tanto mayor cuanto mayor sea la temperatura de formación; el Sodio (Na) se presenta en la Augita; el Potasio (K) se presenta en la Nontronita.

El Titanio muchas veces se encuentra en las pegmatitas alcalinas junto con la Esfena, los Feldespatos, la Biotita y otros minerales, así como en las Kimberlitas y Carbonatitas. Es estable en la zona de meteorización y se acumula en placeres. En general se presenta como mineral accesorio en las rocas plutónicas, como segregación a elevada temperatura; presente también en cienitas nefelínicas, así como en arenas marinas. Es estable también en ambientes metamórficos de gneises y esquistos cloríticos [6].

El dióxido de titanio, TiO_2 , se encuentra comúnmente en una forma negra o de color castaño conocida como rutilo. Las formas naturales que se encuentran menos en la naturaleza son la anatasita y la brooquita. Tanto el rutilo como la anatasita puros son de color blanco. En lo referente a los materiales pétreos estudiados el Ti esta relacionado con la presencia de estas impurezas, comúnmente se presenta como impureza en la Augita, la Anortita y la Enstatita, que no son todos los minerales en los que se presenta pero estos son los que se tienen en nuestros agregados pétreos. [6].

Al magnesio se le puede encontrar como segregación o elemento integrante, especialmente en rocas de metamorfismo regional, y muchas veces como producto de alteración de silicatos de magnesio o transformación metasomática de calizas y dolomías. Se encuentra como producto de alteración de la serpentina a causa del ataque del agua cargada de CO_2 . El magnesio se encuentra comúnmente como impureza en la anortita, encontrado en nuestros materiales como se podrá ver en la técnica de DRx. También puede tener origen metamórfico [6].

También encontramos elementos presentes en menores proporciones, tabla 28.

Tabla 28. Elementos traza en partes por millón, para los agregados de los bancos indicados.

Banco	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Th	Pb
Tribasa Grava	38	828	441	17	169	4	165	86	20	92	29	77	<4	12
Joyitas Grava	36	791	712	18	237	8	127	77	16	92	25	87	<4	17
Joyitas Arena	37	779	686	18	235	9	140	98	20	94	31	89	<4	42
C.V.	129	164	232	33	155	17	30	13	23	7	11	47	13	17

De estos elementos podemos decir, que algunos están más relacionados con los feldespatos y otros con los piroxenos; los primeros cuatro elementos de la tabla 9 y el Pb se encuentran relacionados de mayor forma con los feldespatos; a los elementos como Nb, V, Cr, Co, Ni, Cu Zn se presentan en los piroxenos como impurezas amorfas.

El Zr se presenta como una fase aparte en forma de pequeños cristales.

Finalmente encontramos elementos que nos indican un probable grado de alteración de los materiales pétreos como son el K, por ejemplo.

VI.5 RESULTADOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Arena de Joyitas (AJ 101)

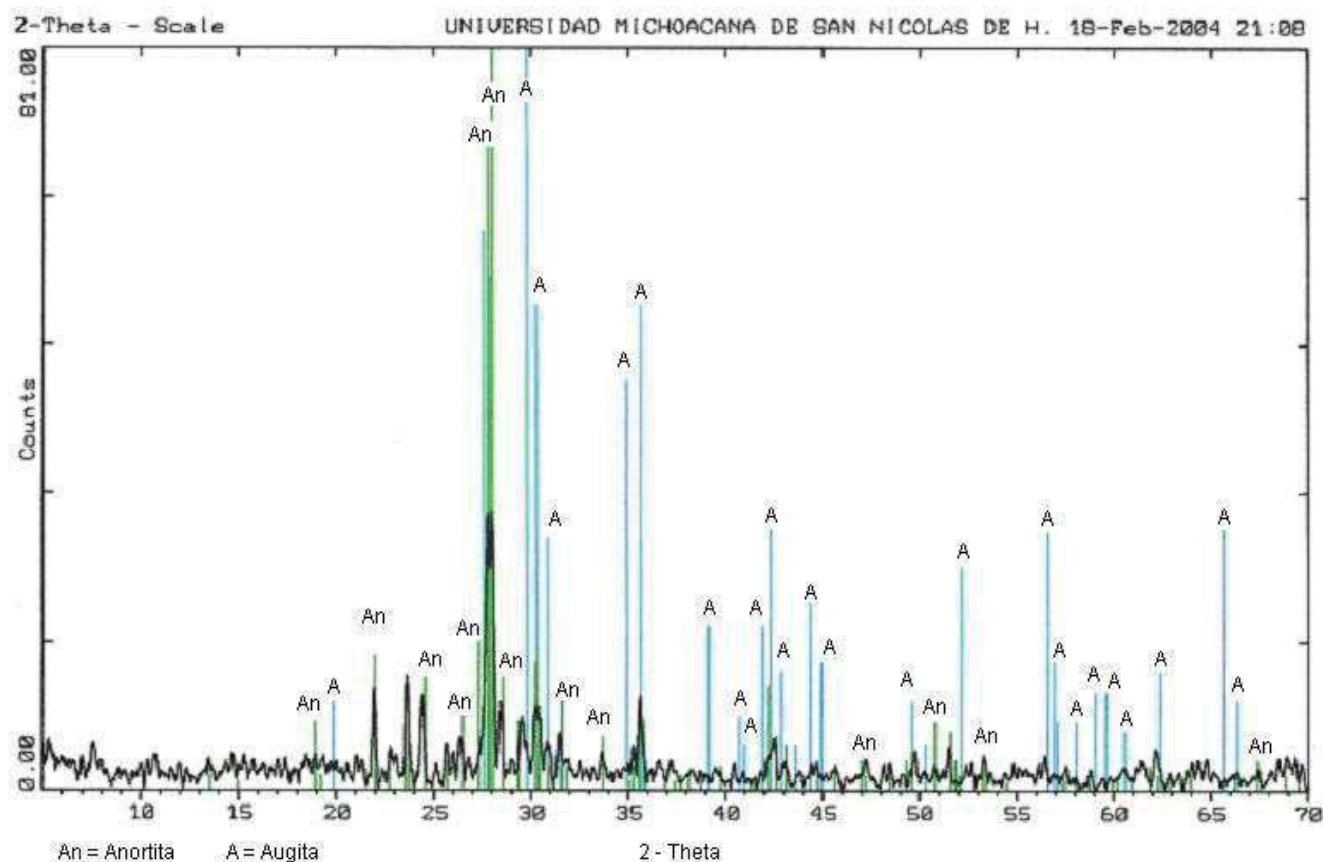


Figura 23. Difractograma de la arena de Joyitas, muestra AJ-101.

El difractograma, figura 23, presenta los resultados del análisis de DRx de la arena de Joyitas, en el cual se ha realizado una interpretación de los picos coincidiendo con los minerales que se presentan en el mismo, como son la Augita y Anortita, en este caso, se trata de piroxenos (Augita, $\text{Ca}(\text{Mg},\text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$) y feldespatos (Anortita, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$).

Los piroxenos son un grupo importante de silicatos que se caracterizan por presentar estructura de cadena simple [6]. La augita es un mineral importante que constituye ciertas rocas eruptivas.

La augita es mucho más compleja que otro piroxeno. Casi siempre se registra exceso de MgO , FeO y, lo que es muy importante, gran cantidad de Al_2O_3 (hasta el 4 – 9%) y Fe_2O_3 , así como Na_2O . Parte de MgO es sustituido por FeO y MnO .

La Anortita esta dentro de las plagioclasas, o subgrupo calcio-sódico, las cuales corresponden a un subgrupo de los feldespatos. Los minerales de este subgrupo constituyen

una serie binaria, cuyos miembros terminales se denominan Albíta- Na $[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ y Anortita - Ca $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$, [6].

Los feldespatos son el grupo más importante de minerales formadores de rocas y se usan en la clasificación de rocas ígneas [22].

Grava de Joyitas muestra GJ 101.

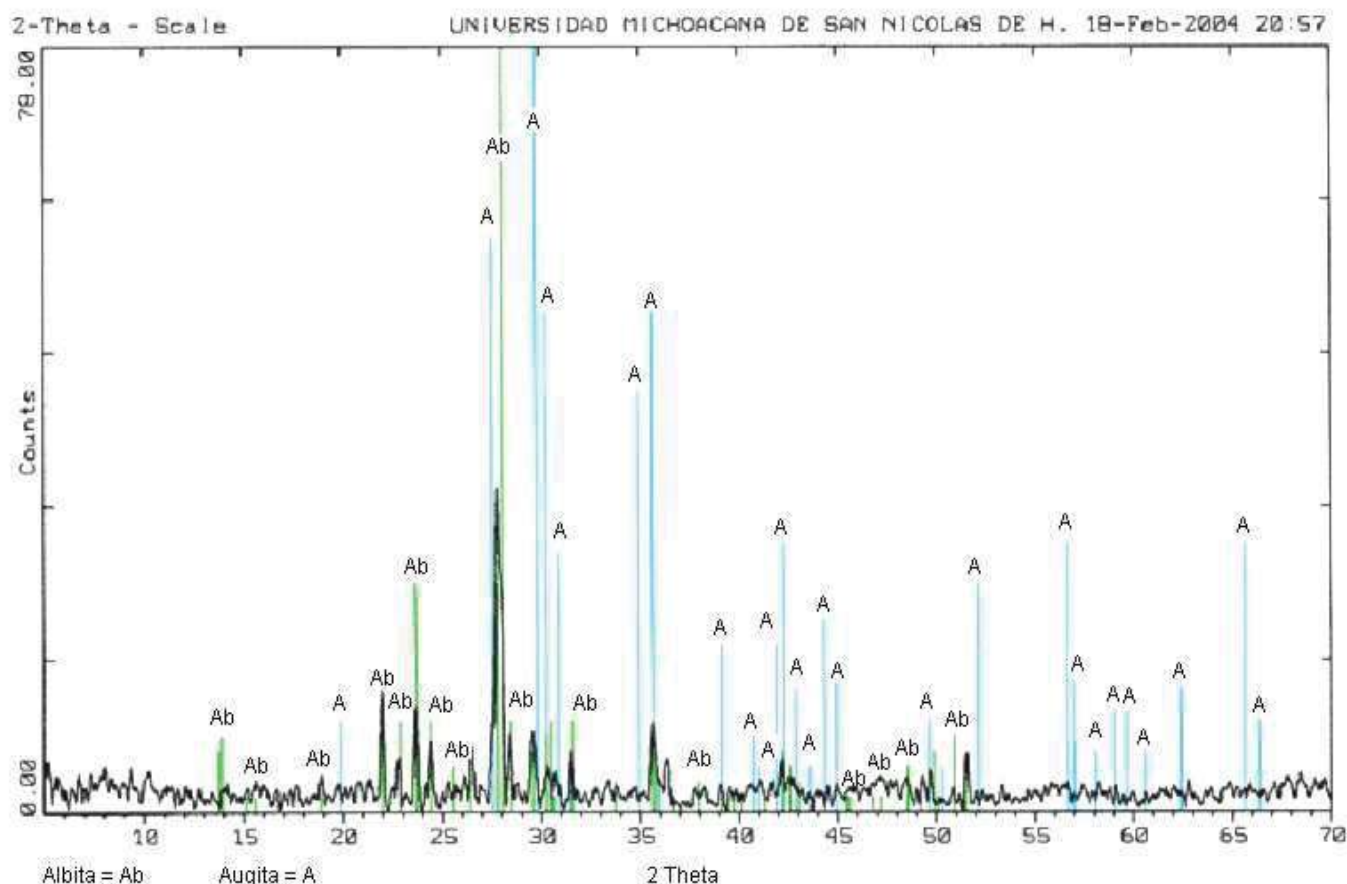


Figura 24. Difractograma de grava de Joyita, muestra GJ-101

En el caso de la grava de Joyitas, presentó el difractograma anterior, figura 24, tiene como principales minerales a la Albíta y a la Augita, para la grava de Joyitas, las muestras presentaron tres tonos de color, se separaron por su semejanza y posteriormente se analizaron. Esta muestra corresponde a grava de color gris.

En este caso podemos apreciar que tenemos piroxenos (Augita) y feldespatos plagioclasa (Albíta).

La albíta es uno de los miembros extremos de la serie de feldespatos plagioclasa y su composición es $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$.

Grava de Joyitas GJ 120

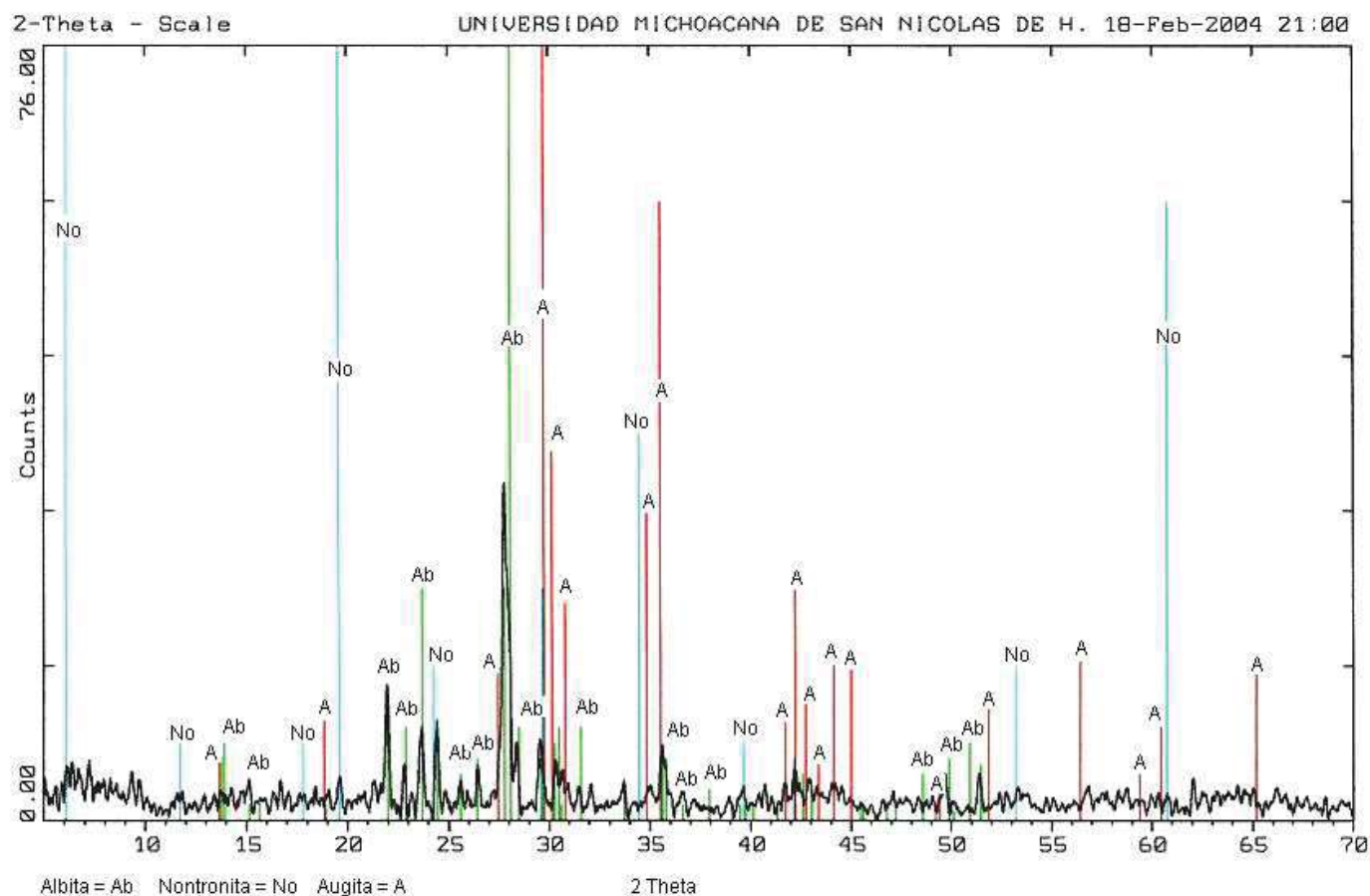


Figura 25. Difractograma de la grava de Joyitas, muestra GJ-120.

En este caso, figura 25, el difractograma corresponde a grava de Joyitas con una coloración rojiza. Tenemos Augita, Albite y Nontronita. La Nontronita en raros casos corresponde a la especie mineral puramente ferrosa de fórmula: $\text{Fe}_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Suele contener en cantidades sensibles Al_2O_3 (hasta el 14 %) y MgO (hasta el 8%). Contiene así mismo CaO (hasta el 2%), pequeñas cantidades de K_2O , Na_2O , a veces NiO , Cr_2O_3 .

La Nontronita, por lo común, se encuentre en agregados terrosos criptocristalinos, de vez en cuando en masas compactas opaliformes.

Grava de Joyitas muestra GJ 130

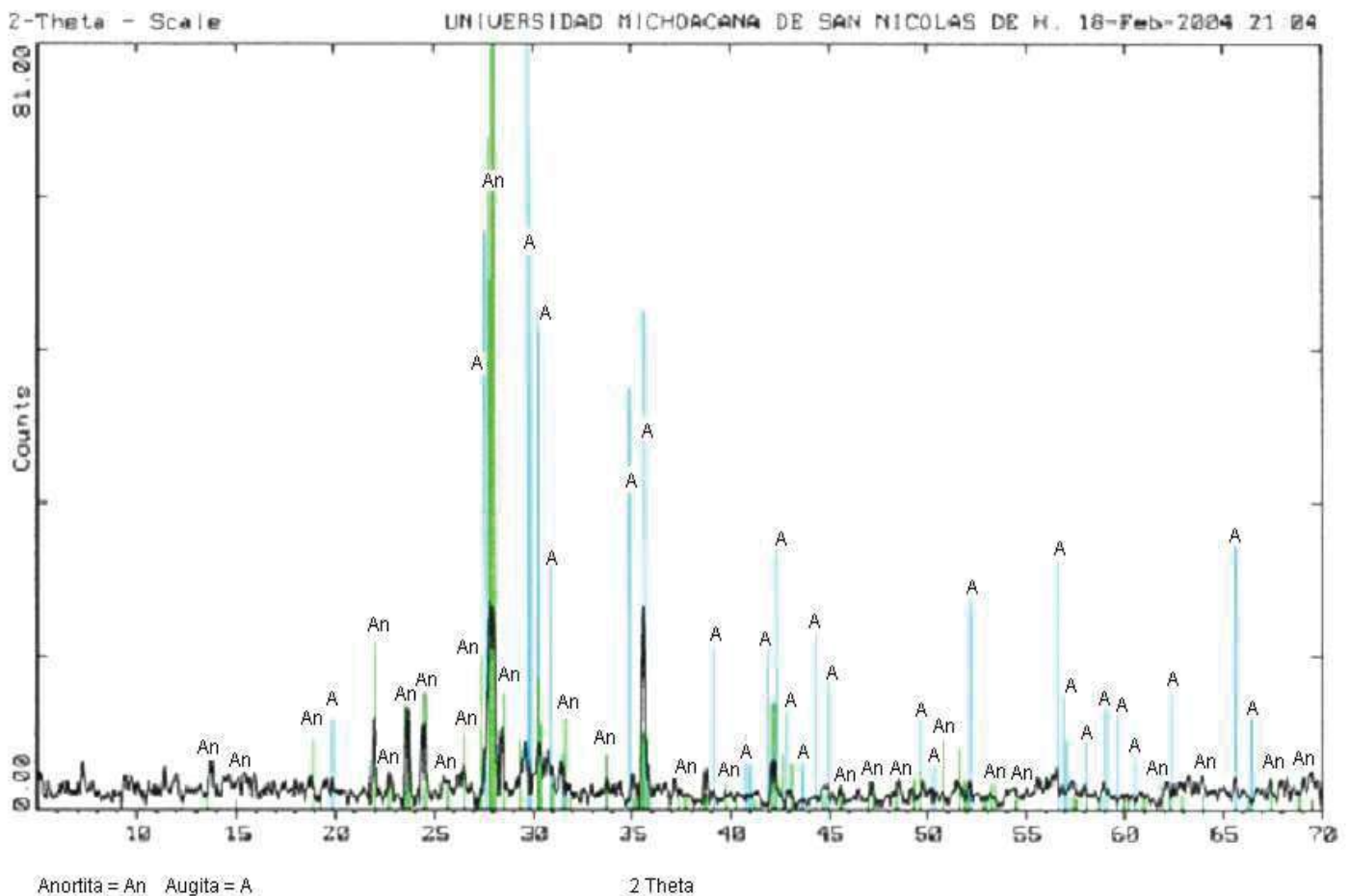


Figura 26. Difractograma de la grava de Joyitas, muestra GJ-130.

Este difractograma, figura 26, es el resultado del análisis de DRx aplicado a grava de Joyitas que presentó un color negro. Tenemos piroxenos (Augita) y feldespatos (Anortita).

Para los agregados del banco de Joyitas tenemos la presencia de Augita (piroxenos), Anortita (feldespatos plagioclasa), Albita (feldespatos plagioclasa) y Nontronita. Es decir, que la composición de la arena y la grava de Joyitas de piroxenos y feldespatos plagioclasa, teniendo prácticamente los mismos minerales tanto la grava como la arena de Joyitas.

Grava de Tribasa GT 10

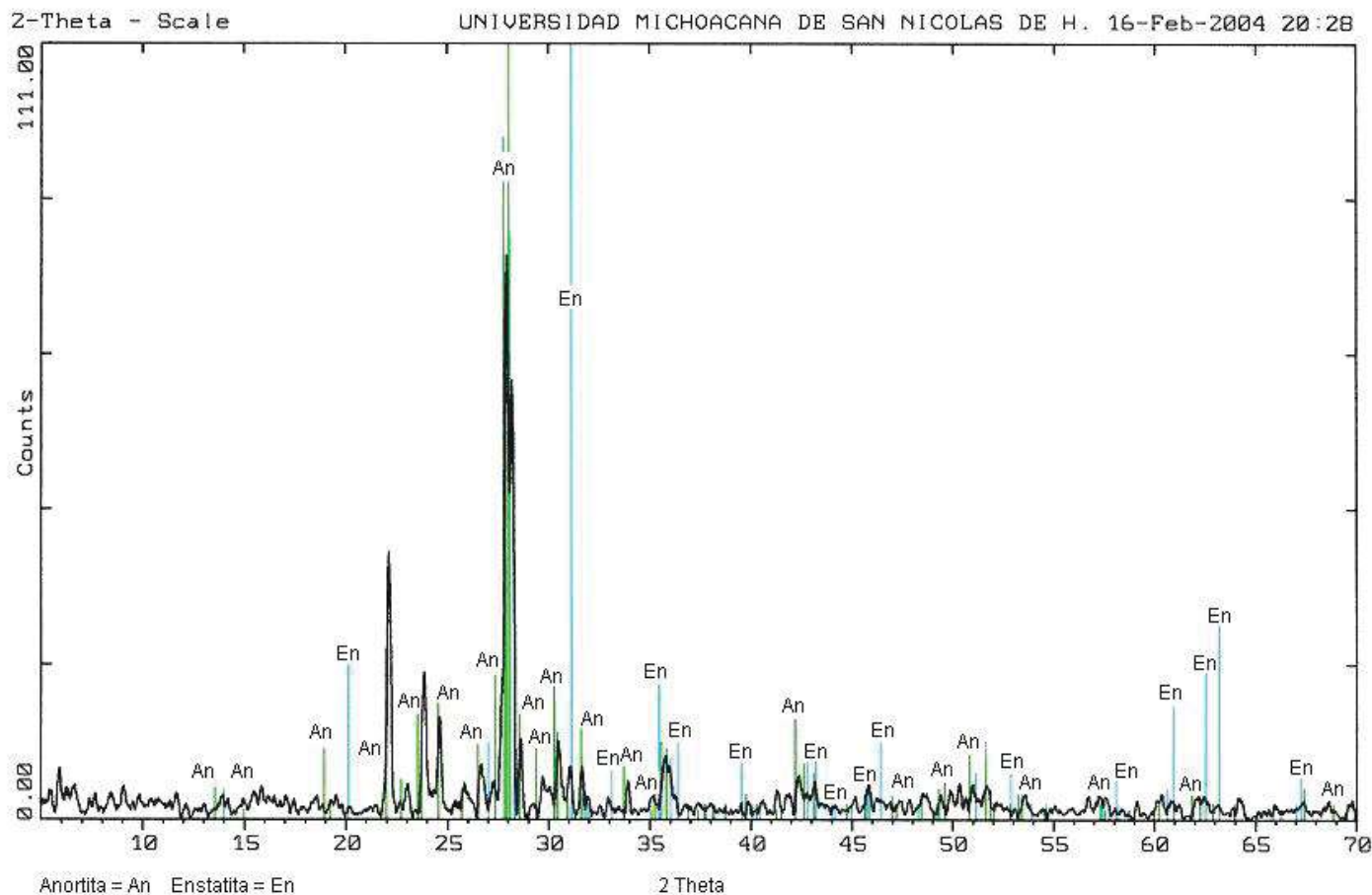


Figura 27. Difractograma de la grava de Tribasa, muestra GT-10.

En el caso de la grava de Tribasa la muestra era completamente homogénea, preparándose varias muestras pero todas presentaron los mismos resultados en cuanto a su composición. La grava de Tribasa presentó un color gris homogéneo, y esta constituida principalmente por Anortita (feldespatos plagioclasa) y Enstatita (piroxenas rómbicas), figura 27, la cual es un importante mineral constitutivo de las rocas magnesianas eruptivas, además es típico de muchas rocas magmáticas ricas en magnesita.

Al realizar la mezcla de arena de Joyitas y grava de Tribasa tenemos piroxenos y feldespatos de tal manera que no existe prácticamente ninguna diferencia al mezclar un material con otro, sin producirse ninguna reacción de rechazo entre los agregados pétreos.

Ceniza Volcánica CV 30

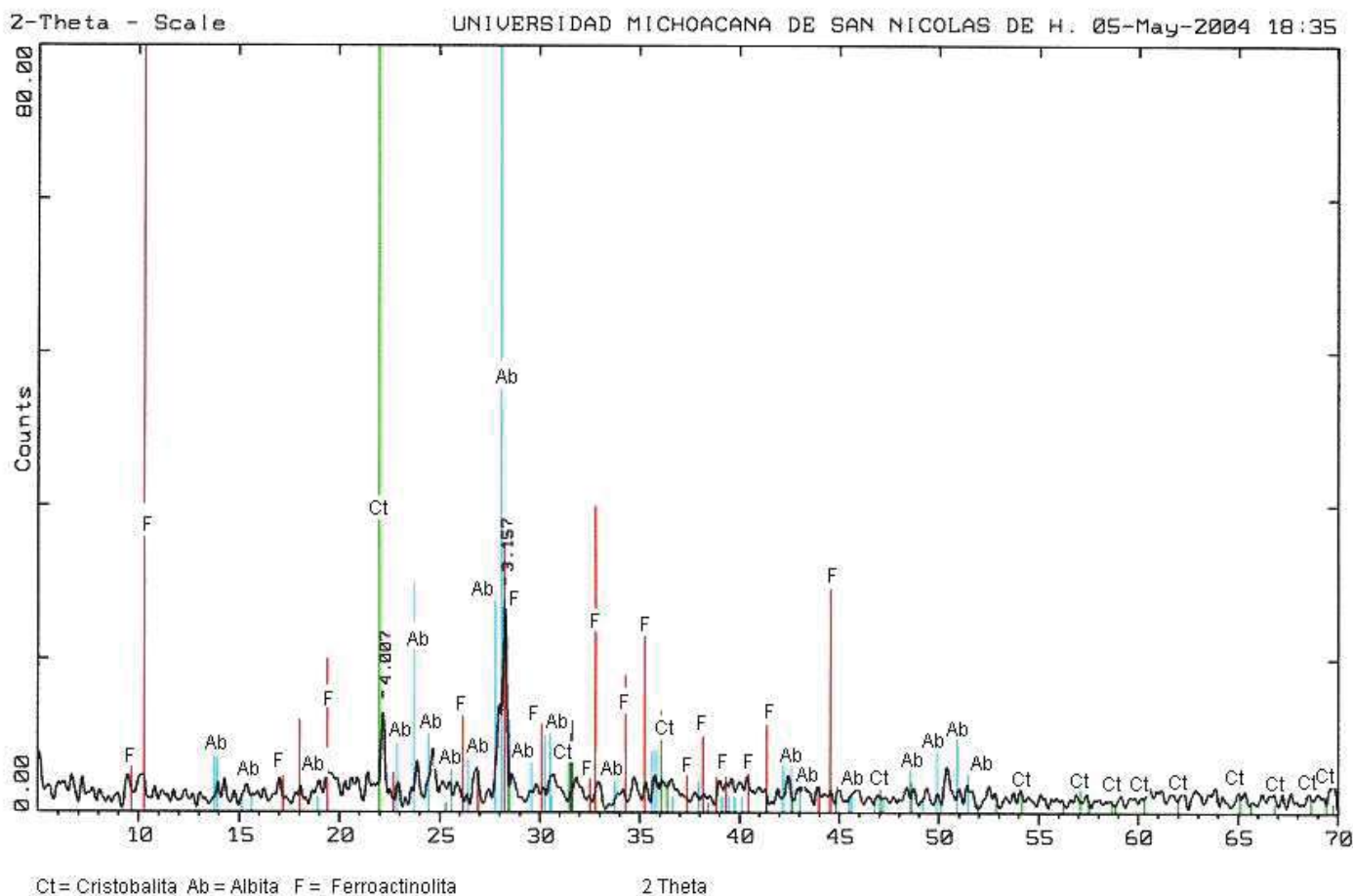


Figura 28. Difractograma de la ceniza volcánica, muestra CV-30.

La ceniza volcánica tubo una preparación de forma similar que la arena, para aplicarle la técnica de DRx, dándonos como resultado este difractograma. La ceniza volcánica presentó un color café y esta constituida principalmente por Cristobalita (Cuarzo), Albita (feldespato plagioclasa) y Ferroactinolita, figura 28.

De las modificaciones polimorfas del SiO_2 pertenecientes a ese grupo, tres formas principales tienen denominaciones propias, a saber: Cuarzo, Tridimita y Cristobalita.

Las modificaciones polimorfas de temperaturas más altas, β -cristobalita, cristaliza en el sistema cúbico y la α -cristobalita, de temperaturas más bajas. Esta ultima pertenece al sistema tetragonal.

La principal diferencia entre los minerales de los agregados de los bancos de Joyitas y Tribasa con la ceniza volcánica es la presencia de la Ferroactinolita y la Cristobalita.

VI.6 RESULTADOS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

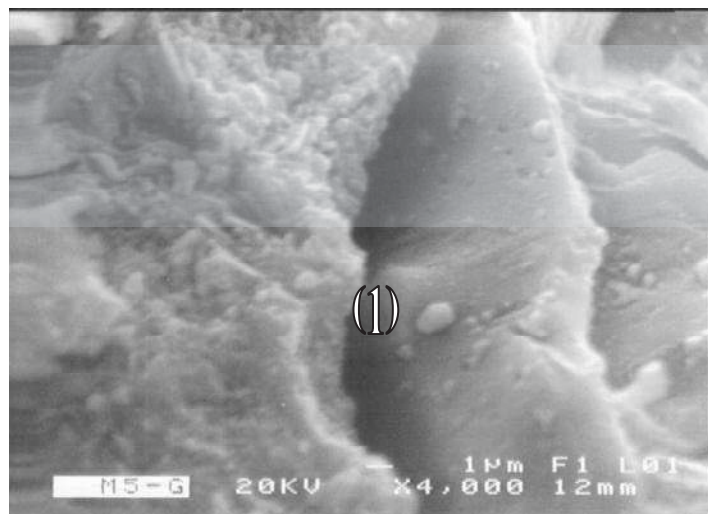


Figura 29. Micrografía de la muestra M5-G

La micrografía, figura 29, corresponde a la muestra No M5-G en la cual se analizó concreto hidráulico con una edad de 160 días. La existencia de una separación (1) entre el material pétreo y la lechada agua cemento se presenta con mucha claridad, por lo tanto existe una mala adherencia entre ambos materiales.

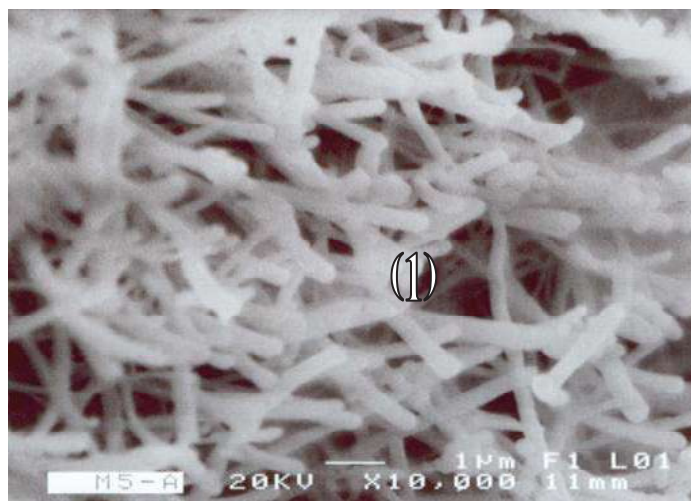
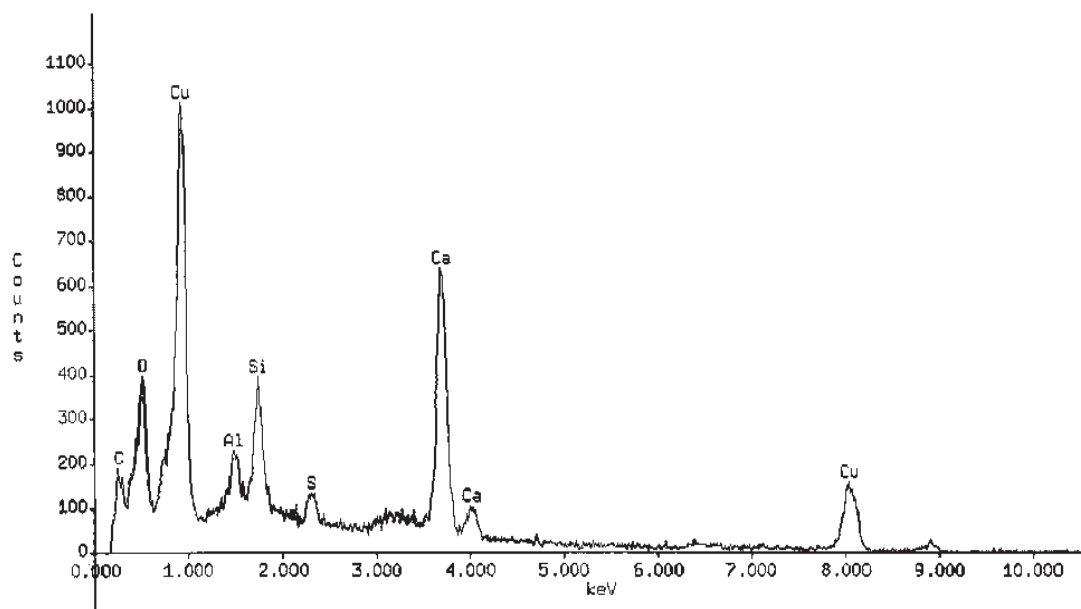


Figura 30. Micrografía de la muestra M5-A

La micrografía, figura 30, corresponde a la muestra No M5-A y en ella se analizó concreto hidráulico con una edad de 200 días, es posible apreciar una gran cantidad de cristales con forma de aguja (1) y un tamaño aproximado de 4 o 5µm.



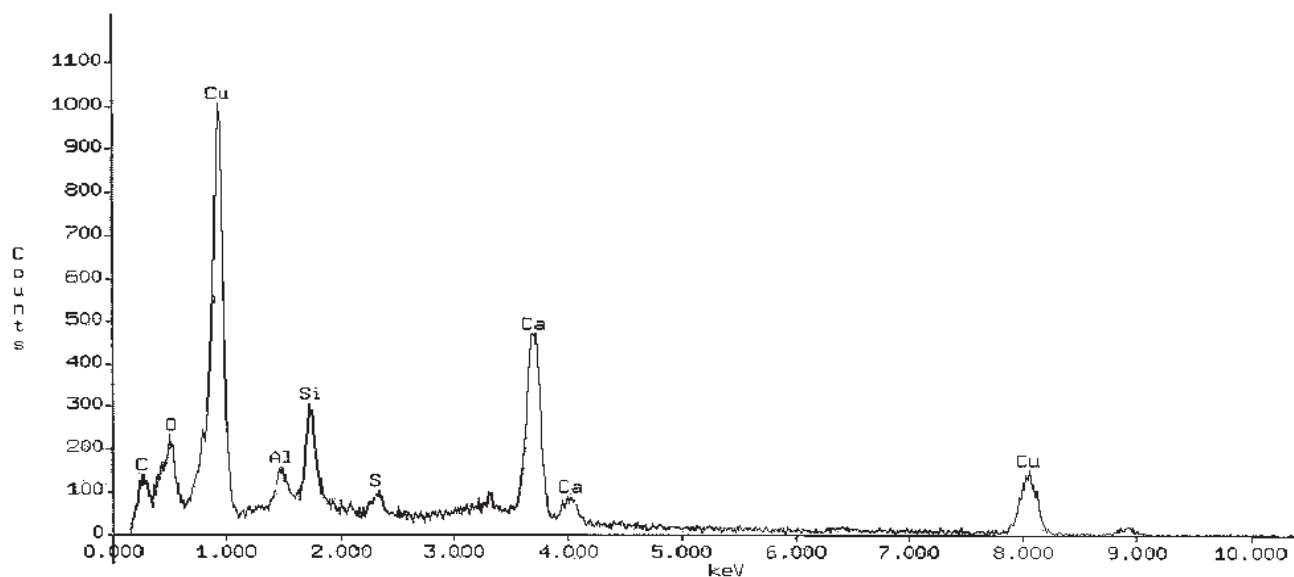
M5-A

Figura 31. Microanálisis de la muestra M5-A

Este microanálisis, figura 31, corresponde a la muestra M5-A indicándonos gran cantidad de calcio (Ca) y sílicio (Si), una cantidad media de Aluminio (Al) y en menor proporción se encuentra el azufre (S). Cabe señalar que la presencia del cobre (Cu) es debido a que las muestras se montaron en una plaquita de cobre para poder ser estudiadas en el MEB.

*Figura 32. Micrografía de la muestra M1-A.*

La micrografía M1-A, figura 32, se analizó a concreto hidráulico con una edad de 63 días en donde se observa la existencia de cristales en forma de aguja (1) pero con tamaños más pequeños que en la figura 30.



M1-A

Figura 33. Microanálisis de la muestra M1-A.

Este microanálisis, figura 33, se obtuvo de la muestra M1-A en el cual se determinaron los elementos componentes de nuestro material. El microanálisis es prácticamente el mismo que en el caso de la muestra M5-A ya que nos presenta con mayor proporción al calcio (Ca) y silicio (Si) y en menor proporción al aluminio (Al) y azufre (S).

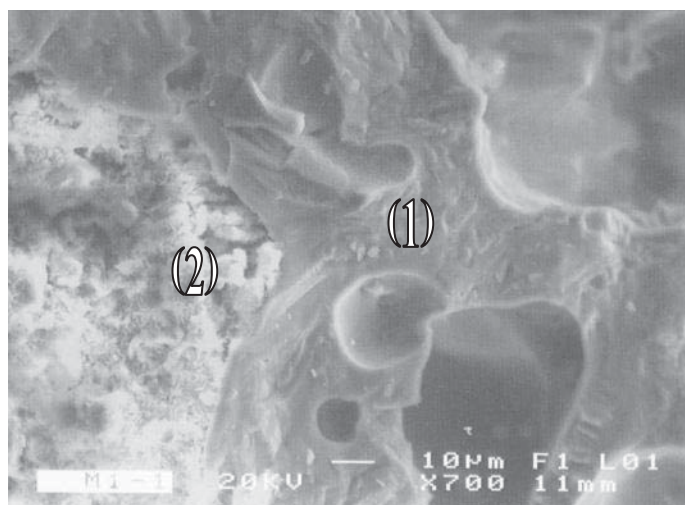


Figura 34. Micrografía de la muestra M1-1

De manera general fue determinada la micrografía de la figura 34, que corresponde a la muestra No M1-1, se tomó de manera general con la finalidad de apreciar parte del agregado pétreo (1) y parte de la lechada agua-cemento (2).

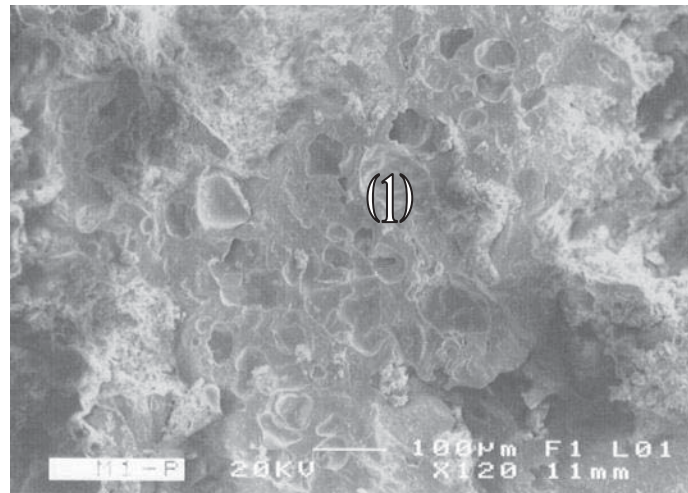


Figura 35. Micrografía de la muestra M1-P

El concreto analizado en la figura 35, tiene una edad de 63 días aproximadamente, en ella podemos apreciar material pétreo (1), además, la existencia de porosidad en el agregado pétreo es notable, tiene una tamaño aproximado de 50 μm .

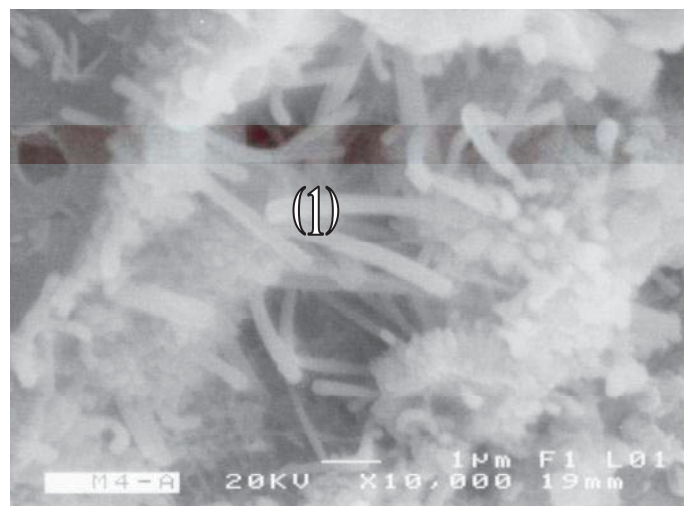
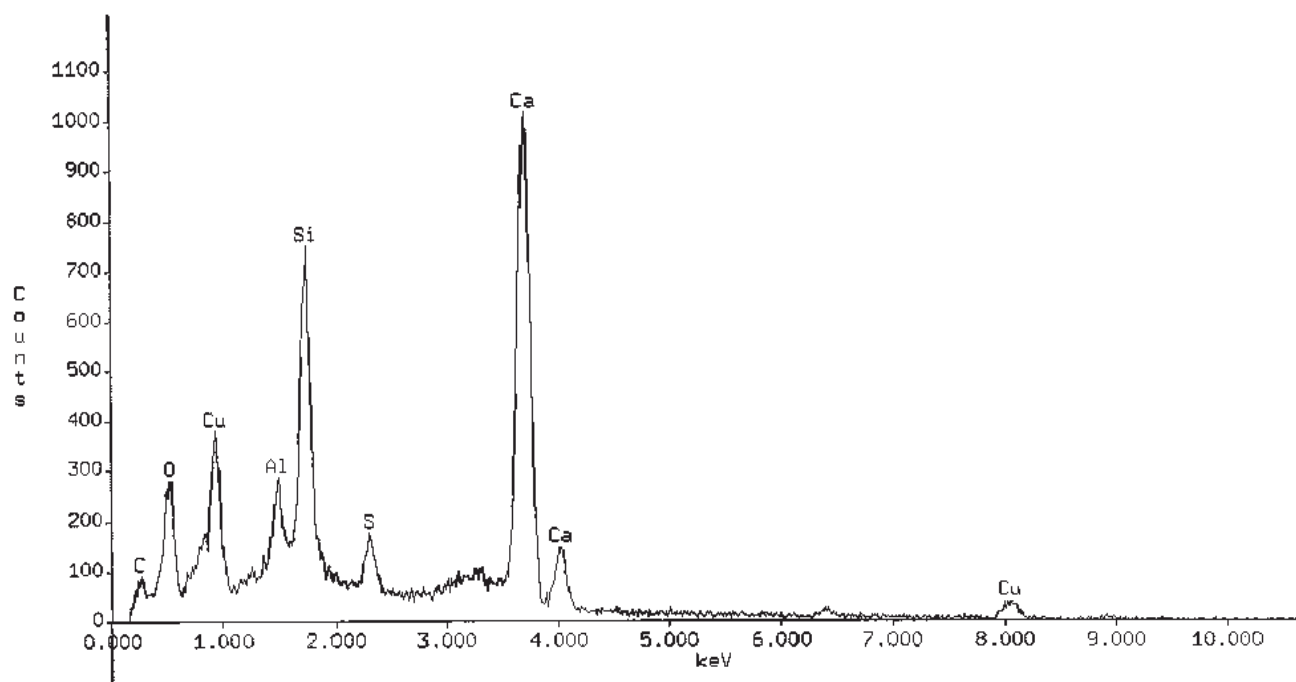


Figura 36. Micrografía de la muestra M4-A

En la figura 36 tenemos concreto hidráulico de 107 días de edad, en ella es posible ver pequeños y grandes cuerpos de forma alargada y redonda, (1), (agujas) teniendo tamaños aproximados de 1 μm . hasta 5 o 6 μm .



M4-A

Figura 37. Microanálisis de la muestra M4-A

En el microanálisis realizado a la muestra M4-A se obtuvo que la existencia del silicio (Si) y aluminio (Al) se tiene en mayor medida, el azufre (S) y el calcio (Ca) se encuentran en una menor cantidad.

VII. DISCUSIONES

Los bancos de material con los que se trabajó son los de mayor demanda en la región, aunque no se sabe a ciencia cierta con que cantidad de recursos cuentan actualmente. El banco denominado Joyitas es productor de grava y arena, este material es de origen volcánico, cabe mencionar que estos materiales no sufren o no son sometidos a ningún proceso de trituración o eliminación de tamaño, solamente son clasificados según sus tamaños haciéndolos pasar por mallas o tamices, con aberturas de 4.75 mm, 9.52 mm, 25.4 mm y 50.0 mm.

En el caso del banco Tribasa, el material es de origen volcánico intrusivo y este sí se tritura, aunque posteriormente también se pasa por mallas, como en el caso del banco Joyitas. En lo referente a la producción de cada banco, Tribasa lleva un mayor costo debido a que es necesario emplear un proceso de trituración para obtener el tamaño deseado, y en el banco de Joyitas la producción lleva un menor costo ya que solamente se extrae el material de los estratos con una draga sin presentar mayor dificultad en su extracción, por sí solo el material se va derrumbando.

Uno de los objetivos del estudio realizado, es obtener una mejora en cuanto a las propiedades mecánicas del concreto hidráulico, es decir, mantener o aumentar su resistencia a la compresión aumentando la trabajabilidad, ya que se ha adicionado una ceniza volcánica en los agregados pétreos con la finalidad de aumentar la trabajabilidad del concreto hidráulico. En la industria de la construcción en muchas ocasiones es necesario colar elementos constructivos que se encuentran a varios niveles de altura, o se encuentran en lugares inaccesibles para un camión trompo, entonces es necesario bombear el concreto hidráulico distancias considerables. El problema que se presenta en estos casos es cuando el concreto no es muy fluido, dificultándose mucho su bombeo, debido a que entre menos fluidez tenga dicho concreto mayor será la trabazón que opongan los agregados del concreto a las paredes de la tubería de bombeo. Existen aditivos que logran aumentar la fluidez del concreto, pero en muchas ocasiones se ha observado que para mayores edades del concreto hidráulico este presenta corrosión en el acero de refuerzo por efectos de ciertos aditivos.

Mediante el empleo de esta ceniza volcánica se afectaron las propiedades mecánicas del concreto hidráulico, es decir, hemos aumentado la fluidez del concreto hidráulico con la ceniza volcánica pero se modificó su resistencia a la compresión y su resistencia a la tensión, estando dentro de un rango tolerable de desviación, es decir, que para el concreto elaborado con agregados gruesos y finos de Joyitas y usando ceniza volcánica en una proporción 50%-50% con relación al peso de la arena, nos da como resultado de compresión simple para una edad de 3 días un 55% de resistencia y a los 28 días nos dio un 93% de resistencia y el concreto testigo para 3 días de edad dio un 70% de resistencia y a los 28 días de edad dio 108%, lo que nos indica que el concreto con ceniza volcánica y arena y grava de Joyitas está por debajo de la resistencia esperada para este tipo de concreto según su diseño; el concreto elaborado con arena de Joyitas, con ceniza volcánica, en una proporción 50%-50% en peso, y grava de Tribasa marcó un 55% de resistencia también

para una edad de 3 días, pero para 28 días nos dió un 109% de resistencia, indicando que este concreto es mejor que el concreto elaborado con grava y arena de Joyitas y además cumple con la norma, ésto es, para concretos jóvenes. Se tomó la precaución de guardar especímenes de concreto con las características ya mencionadas en este trabajo, con la finalidad de seguir monitoreando u observando el comportamiento del concreto hidráulico, es decir, para mayores edades del concreto las propiedades del mismo van aumentando o disminuyendo o se mantienen constantes y esto es de gran importancia debido a que muchas de las veces en los estudios o investigaciones que realizamos no se cuenta con mucho tiempo y damos resultados en ocasiones positivos, pero estos pueden cambiar al transcurrir el tiempo.

En cuanto a la fluidez de las mezclas elaboradas obtuvimos los mejores revenimientos para las proporciones 50%-50%, tanto para el concreto elaborado con arena y grava de Joyitas como para el concreto elaborado con arena de Joyitas y grava de Tribasa, en el caso del concreto elaborado con arena y grava de Joyitas se obtuvo un revenimiento de 12 cm para la proporción 50%-50%, muy cerca de esta proporción esta la proporción 80%-20%, que presento un revenimiento de 11.5 cm pero su resistencia a la compresión y a la tensión es inferior a la resistencia de la proporción 50%-50%. En el caso del concreto elaborado con arena de Joyitas y grava de Tribasa, además de la ceniza volcánica, dio un revenimiento de 11 cm, pero las curvas descritas por este concreto tanto de resistencia a la compresión como de resistencia a la tensión indican porcentajes de resistencia superiores a los descritos por el concreto elaborado solamente con agregados de Joyitas y ceniza volcánica, es decir, aumentamos un 10% de revenimiento en el caso del concreto elaborado con arena de Joyitas y grava de Tribasa, ya que el concreto se diseñó para un revenimiento de 10 cm, y nos mantenemos con buena resistencia a la compresión y tensión al escoger como mejor concreto al concreto elaborado con arena de Joyitas y grava de Tribasa además de la ceniza volcánica.

Se ha tenido la oportunidad de caracterizar de manera objetiva a la ceniza volcánica, ya que se le realizaron estudios cuantitativos y cualitativos para conocer de que está compuesta y como pudiera o puede afectar al comportamiento mecánico del concreto hidráulico.

Fue necesario realizar de manera conjunta una serie de pruebas físicas a los agregados pétreos empleados en la elaboración de nuestro concreto hidráulico y afortunadamente todos los resultados quedaron dentro de los rangos aceptables de las especificaciones, incluso las mezclas de arena – ceniza volcánica cumplen con las especificaciones. Cabe destacar que en comparación de los agregados triturados y los agregados de Joyitas, existe una gran diferencia en cuanto a la densidad y absorción, presentando una mayor densidad los agregados de Tribasa y una menor absorción que los agregados de Joyitas, según los resultados obtenidos en las pruebas físicas hechas a los agregados pétreos.

En lo referente al diseño del concreto hidráulico, se empleó el método del American Concrete Institute, ya que este permite el empleo de relaciones agua/cemento mayores, dando como resultado concretos con una mayor fluidez y de esta manera y junto con la ceniza volcánica mejorar la trabajabilidad y el bombeo del concreto[2, 27].

Definitivamente las propiedades mecánicas del concreto hidráulico se modifican con la ceniza volcánica, algunas de sus propiedades bajan pero estas quedan dentro de un rango aceptable de desviación, disminuyendo un 10% en las resistencias de compresión y tensión.

Con los resultados obtenidos podemos decir que la proporción más adecuada o la que resulta más fluida fue la 50%-50% de arena-ceniza volcánica ya que en dicha proporción se presentó el mayor revenimiento registrado con respecto a las demás, esto es tanto para el caso de los agregados pétreos provenientes de Joyitas como para los agregados pétreos provenientes de Tribasa. Con esta proporción no logramos igualar las propiedades del concreto hidráulico fabricado sin la adición de ceniza volcánica, pero esta proporción nos dió los resultados más altos, en cuanto a trabajabilidad, de todas las proporciones empleadas.

Al elaborar este concreto se siguió un determinado procedimiento el cual puede emplearse en la elaboración de un concreto que demande ser más fluido. Esto nos permite tener ya referencias del empleo de este tipo de materiales y poder realizar posteriormente más estudios respecto de esto, para ir perfeccionando el empleo de estos materiales en la construcción, logrando de esta manera el aprovechamiento de nuevas materias primas.

En el empleo de las técnicas analíticas se ha notado que primeramente se conocen los minerales constituyentes de nuestros agregados pétreos de manera general, como es en el caso de la Microscopía Óptica y Fluorescencia de rayos X, con la cual nos encontramos que se trataba de Feldespatos plagioclasa.

Al emplear la difracción de rayos X fue posible conocer de manera más precisa la composición de nuestros agregados, el cual consta de Anortita, Augita, Albita y Nontronita, para el caso de los agregados de Joyitas; para Tribasa tenemos que se trata de Anortita y Enstatita; y para la ceniza volcánica tenemos que está compuesta por Cristobalita, Albita y Ferroactinolita, debido al alto contenido de Cristobalita (70.96 %), la ceniza volcánica es ácida.

Mediante el empleo de la Microscopía Electrónica de Barrido se lograron obtener imágenes de agujas de Etringita para diferentes edades del concreto hidráulico, estas agujas se presentaban más grandes para edades mayores del concreto hidráulico y viceversa, es decir, que las agujas crecen con el agua del concreto hidráulico.

Con la serie de resultados obtenidos estamos en posibilidades de mencionar que la fluidez del concreto hidráulico aumentó debido a varios factores: la ceniza volcánica está constituida por los mismos feldespatos que la grava y la arena de Joyitas. En el caso de los materiales pétreos triturados tenemos la presencia también de un feldespato, como lo es la Anortita. Cabe mencionar que la diferencia entre los agregados pétreos y la ceniza volcánica es la presencia de Cristobalita.

Uno de los factores que favorece en gran medida a la fluidez es la textura pilotáxica que se observó en las micrografías del concreto, tanto de los agregados volcánicos como de

los agregados triturados. Debido a que los microlitos de feldespatos laminares aciculares se presentan en una disposición semiparalela con los piroxenos, se presenta un deslizamiento entre los mismos, disminuyendo así la trabazón entre los agregados. La ceniza volcánica funciona como un lubricante entre los agregados pétreos que presentan una superficie rugosa y áspera, disminuyendo la fricción entre ellos, y entre el concreto y las tuberías, para bombeo. La aportación de la ceniza volcánica en el concreto es únicamente en el aspecto físico de los materiales, es decir, que no existe ningún tipo de reacción entre la ceniza volcánica y los demás agregados pétreos o con el cemento.

VIII. CONCLUSIONES

- El concreto hidráulico elaborado con la mezcla, arena-ceniza volcánica, arena de Joyitas, presentó una mayor fluidez fue la 50%-50%, con un revenimiento de 12 cm, es decir, se incrementó la trabajabilidad en un 20%. La ceniza volcánica, con un MF = 2.96, incrementó la reología pero al incrementar el área superficial, provocó resistencia límite. El esfuerzo a tensión de esta mezcla presentó el comportamiento reportado en la literatura de $f_t = 10\% f'_c$, mismo comportamiento de la mezcla arena Joyitas con grava de Joyitas.
- En el caso del agregado triturado del banco Tribasa, la trabazón mecánica por la morfología angular del agregado permitió un incremento en la resistencia de la mezcla estudiada, bajo esfuerzo de tensión ($f_t = 35.75 \text{ kg/cm}^2$ 43 % superior contra la mezcla con agregados volcánicos $f_t = 25 \text{ kg/cm}^2$).
- De acuerdo a los resultados obtenidos de resistencia a compresión y tensión podemos resolver que el concreto hidráulico elaborado con agregado fino y grueso de Joyitas presenta una menor resistencia a la compresión en comparación con el concreto hidráulico elaborado con agregado fino de Joyitas y agregado grueso de Tribasa. Esto se podía predecir desde el momento en que conocimos las propiedades físicas del agregado de Tribasa (densidad, absorción, peso volumétrico seco suelto, peso volumétrico seco varillado y granulometría) ya que presentan mucho mejores características que los agregados de Joyitas, por lo tanto los agregados de Tribasa son mejores para la elaboración del concreto hidráulico.
- Por Microscopía Óptica se obtuvo que los agregados pétreos analizados presentan una textura hialopilitica, pero también se observa una textura pilotáxica en otra parte de la muestra. Se observaron fenocristales de plagioclasa y augita, en las microfotografías.
- Por Fluorescencia de Rx se encontró que algunos de los elementos analizados se presentan como impurezas en los feldespatos y piroxenos: en el caso de el Hierro (Fe) lo podemos relacionar con la Anortita; el Manganeso (Mn) se presenta en la Anortita; al Aluminio (Al) se presenta en la Augita, Cristobalita y en la Enstatita, en el caso de la Augita, parte del Si puede estar sustituido por Al; al calcio (Ca) se presenta en la Enstatita. De los elementos traza podemos decir que Rb, Sr, Ba, Y, y Pb se encuentran relacionados de una mayor forma con los feldespatos; a los elementos como Nb, V, Cr, Co, Ni, Cu Zn se presentan en los piroxenos como impurezas isomorfas. El Zr se presenta como una fase aparte en forma de pequeños cristales. Finalmente encontramos elementos que nos indican un probable grado de alteración de los materiales pétreos como son el K, por ejemplo.
- Por Difracción de Rayos X se encontró, en el caso de la arena de Joyitas, que está constituida por Anortita y Augita (piroxeno monoclinico); en el caso de la grava de Joyitas, está constituida por Albita, Augita, Nontronita

y Anortita; la grava de Tribasa está constituida por Anortita y Enstatita (piroxeno rómbico).

- La Ceniza volcánica, del banco San Isidro, está constituida por Cristobalita, Albita y Ferroactinolita.
- Por Microscopía Electrónica de Barrido fue posible apreciar una gran cantidad de cristales de Etringita, con forma acicular, para concreto hidráulico con una edad de 160 días, del microanálisis realizado a las agujas obtuvimos la presencia de Ca, Si, Al, y S.
- La composición mineralógica y geoquímica de los agregados pétreos analizados es un factor importante en el comportamiento del concreto hidráulico, ya que en el caso del agregado de Tribasa la grava esta constituida por Enstatita (piroxeno rómbico) el cual es más estable que la Augita (piroxeno monoclinico) de los agregados de Joyitas [6].
- Se recomienda emplear en el caso de requerirlo ceniza volcánica, ya sea con agregados pétreos basálticos o con agregados pétreos de origen volcánico como son el caso de arena y grava de Joyitas, pero solamente en la proporción 50%-50%, es decir, 50 por ciento de arena y 50 por ciento de ceniza volcánica, además de la grava y el agua, para obtener un aumento en el revenimiento del 20%.
- La metodología empleada en esta investigación puede ser empleada en futuras investigaciones con la certeza de que el camino a seguir cuenta con resultados satisfactorios. Se realizó una caracterización mineralógica y geoquímica de los agregados pétreos empleados llegando a conocer los minerales y sus propiedades de que constan cada uno de los agregados pétreos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abrams, Duffus. The Design of Concrete Admixtures. First ed., Lewis Institute. Chicago. IL. USA. 1918, pp 15-29.
2. ACI Comite 318, American Concrete Institute, Build Code Requirements for Structural Concrete, Aci 318-95, Farmington Hills, Mich., 1995, pp 35-52.
3. Alonso E., L. Martínez-Gómez, W. Martínez, and L. Villaseñor, "Mechanical properties of concrete elaborated with igneous aggregates", Cement and Concrete Reserch, Elsevier Science, Volume 32, Numbre 2, February 2002, pp 317-321.
4. Avalos Borja, M., Gradilla I., "CONCIENCIA, EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO COMO UNA HERRAMIENTA EN LA INVESTIGACIÓN", Instituto de Física, UNAM, México.
5. American Society for Testing Materials, ASTM Section Tour, Construction Volume 02, Concrete and Aggregates, West Conshohochen, PA, USA, 2000.
6. Betejtin A., "CURSO DE MINERALOGÍA", Ed. Paz, Moscu, pag. 354-359, 550-555, 620-637.
7. British Standard 1881: Part 202, Recommendations for Surface Hardness Tests by the Rebound Hammer, BSI, U.K., 1986, pp 67-79.
8. Cárdenas Vargas, J., Yáñez Mondragón, C., Juárez Jacobo, R., Sánchez González, J., Macedo Palencia, R., Rodríguez Salinas, J., "MONOGRAFÍA GEOLÓGICO-MINERA DEL ESTADO DE GUANAJUATO", Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal Subsecretaría de Minas e Industria Básica, México, 1992, pp. 18-27, 32,33.
9. Cervantes Ríos, R., "ESTUDIO COMPARATIVO DE MEZCLAS DE CONCRETO CON DIFERENTES ADITIVOS Y SOLICITACIONES", Tesis Licenciado en Ingeniería Civil, UMSNH, Morelia, Mich., México, 2001, pp 77-80.
10. Concretos Mexicanos (CEMEX), "MANUAL DEL CONSTRUCTOR", México, 2000, pp 30-45.
11. Concretos Mexicanos (CEMEX), "TECNOLOGÍA DEL CONCRETO", 2000, pp 23-29.
12. De la Peña R., B., " HORMIGÓN AUTOCOMPACTABLE", Revista BIT, Chile, 2001, pp 112- 123.

13. DEMANT A., “CARACTERISTICAS DEL EJE NEOVOLCÁNICO TRANSMEXICANO Y SUS PROBLEMAS DE INTERPRETACIÓN”. Revista Instituto de Geología UNAM, v. 2, Mexico, 1978, pp. 172-187.
14. Fragosa Estrella, R., “EFECTOS DE LA REACCIÓN ALCALI-AGREGADO EN EL CONCRETO”, Tesis Maestro en Ingeniería (Construcción), UNAM, México D.F., 1995, pp 1-24, 30-63.
15. Garduño-Monroy, V. H., Corona-Chávez P., Isadre-Alcántara I., Menéela L, Arreygue E., Bigioggero B., Y Chiesa S., “CARTA GEOLÓGICA DE MICHOACÁN ESCALA 1: 250 000”. Editores UMSNH. México 1999, pp 1-8, 27-44.
16. González Cuevas, O. M., “ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL CONCRETO REFORZADO”, Tercera edición, Limusa / Noriega editores, México, 1998, pp 15-45.
17. Holcim APASCO, “CURSO DE TECNOLOGÍA ESENCIAL DE CONCRETO”, México, 2005, pp 18-26.
18. Linares Duran, C., “CORRELACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN CONCRETO SIMPLE CON AGREGADO VOLCÁNICO, ADITIVO FLUIDIFICANTE Y SOMETIDOS A AMBIENTE AGRESIVO”, Tesis Licenciado en Ingeniería Civil, UMSNH, Morelia, Mich., México, 1999, pp 15-20, 70-93.
19. Navarro L., Martínez W., Espinoza A., “ANÁLISIS DE MATERIALES”, Manual de Análisis de Materiales, Resistencia de Materiales, FIC – UMSNH, 2000, pp 159-215.
20. Nawy, E. G., “CONCRETO REFORZADO UN ENFOQUE BÁSICO” Editorial Prentice, México, 1988, pp 71-83.
21. NOM, Norma Oficial Mexicana y Organismo Nacional de Normalización y certificación de la Construcción y Edificación, S.C. Norma Mexicana NMX C-414-ONNCCE-1999, pp 6-8.
22. Ostroumov, M. “FUNDAMENTOS DE CRISTALOGRAFÍA Y MINERALOGÍA PARA INGENIEROS”, UMSNH, IIM, México, 2002, pp 12-45, 93-134.
23. Ostroumov, M., “TÉCNICAS ANALÍTICAS EN LA INVESTIGACIÓN DE MINERALES”, UMSNH, IIM, México, 1999, pp 22-35,50-65.
24. Pérez Alama, V., “EL CONCRETO ARMADO EN LAS ESTRUCTURAS” Cuarta edición, Editorial Trillas, México, 1986, pp 50-65.

25. Powers, T. C., "STUDIES OF WORKABILITY OF CONCRETE," Journal of the American Concrete Institute, Vol. 28, Farmington Hills, Michigan, February 1932, pp 55-70.
26. Rizzi A., Consiglio, Nazionale della Ricerche "MEB", Centro di Studio per la Geodinamica Alpina e Cuaternaria, Italia, 1997, pp 53-62.
27. Scanlon, J. M., "FACTORS INFLUENCING CONCRETE WORKABILITY", Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, STP 169C, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, 1994.
28. Torres Alanis, P. H., "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL CONCRETO HIDRÁULICO ELABORADO CON MATERIALES PÉTREOS DE LOS BANCOS JOYITAS Y TRIBASA" Tesis Licenciado en Ingeniería Civil, UMSNH, Morelia, Mich., México, 2003, pp 7-18.