

081413

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

UES BIBLIOTECA CENTRAL



INVENTARIO: 10120645

***EVALUACION DEL USO DE LA
LAVA VOLCANICA EN
LA INDUSTRIA***

SEMINARIO DE GRADUACION

PRESENTADO POR

MARIA ELENA CAZARES MARTEL
ANGELA ELIZABETH RIVERA GRANADOS
RICARDO ALONSO ESCOBAR VASQUEZ

PARA OPTAR AL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO EN EL GRADO DE LICENCIADO

julio de 1976



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR EN FUNCIONES: DR. CARLOS ALFARO CASTILLO

SECRETARIO GENERAL: DR. MANUEL ATILIO HASBUN

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO: ING. RODOLFO JENKINS G.

VICE-DECANO: ARQ. GUILLERMO GONZALEZ G.

SECRETARIO: ING. EDUARDO ALONSO PLEITES C.

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA

JEFE DEL DEPARTAMENTO: LIC. JOSE ANTONIO SILVA T.

CUERPO DE ASESORES

DIRECTOR:

Lic. Víctor Manuel Segura L.

- Jefe del Laboratorio de Control de Calidad del CENTA.
- Profesor titular de las cátedras Química Analítica, Tratamiento de Aguas y Análisis Instrumental del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de El Salvador.

ASESORES:

Lic. Porfirio Aquino R.

- Profesor Titular de la cátedra de Procesos Unitarios del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de El Salvador.

Lic. Flaviano Rivera S.

- Jefe del Laboratorio Geoquímico del "Centro de Investigaciones Geotécnicas"

RECONOCIMIENTO

Los ponentes del presente Seminario patentizan su sincero agradecimiento al CENTRO DE INVESTIGACIONES GEOTECNICAS, por su valiosa y espontánea colaboración en la realización del mismo. Así mismo dejan constancia de su reconocimiento a los señores: Ing. Mario E. Choussy, Dr. - Rosendo Molina; del Laboratorio Geoquímico-CEL, Dr. Mario Falconio, al Cuerpo de asesores por su dedicado y constante empeño en este trabajo, y a todas aquellas personas que de una otra forma participaron en su elaboración.

María Elena Cazares

Angela Elizabeth Rivera

Ricardo Alonso Escobar

San Salvador, Julio de 1976

DEDICATORIA

A MI MADRE: MARY

A MIS HERMANAS: FLORY Y GLADYS

Y A TODAS LAS DEMAS PERSONAS QUE DE UNA
U OTRA MANERA HAN CONTRIBUIDO EN MI FOR-
MACION ACADEMICA

MARIA ELENA

DEDICATORIA

A MIS PADRES: RAMON Y FIDELINA

A MIS HERMANOS: VILMA, NORMA, MARINA,
RICARDO, CARMEN y SALOMON.

A LA MEMORIA DE
MI HERMANO: RAMON RIGOBERTO

A : MARIO

A : TODOS MIS AMIGOS

ANGELA ELIZABETH.

DEDICATORIA

A MI MADRE:	MARIA ALEJANDRINA
A MI HERMANA	SOLEDAD INES
A MI TIO	LISANDRO
A	ELSY
A	TODOS

RICARDO ALONSO

CONTENIDO

	<u>Pag. #</u>
INTRODUCCION	1
CAPITULO 1 ESTUDIO GEOLOGICO SOBRE EL CONTENIDO DE ROCAS IGNEAS Y UBICACION DE LAS PRINCIPALES CANTERAS DE LAVA VOLCANICA EN EL SALVADOR.	
1.1 - COMPOSICION DE LA CORTEZA TERRESTRE	3
1.2 - CLASIFICACION DE LAS ROCAS	5
1.3 - COMPOSICION DE LAS ROCAS	8
1.4 - ROCAS IGNEAS O ERUPTIVAS	15
1.4.1 - GENERALIDADES Y ORIGEN	15
1.4.2 - COMPOSICION QUIMICA DE LAS ROCAS IGNEAS	16
1.4.3 - CLASIFICACION DE LAS ROCAS IGNEAS	18
1.5 - ESTUDIO GEOLOGICO SOBRE EL CONTENIDO Y DISTRIBUCION DE LAS ROCAS IGNEAS EN EL SALVADOR	21
1.5.1 - ROCAS IGNEAS EXTRUSIVAS O VOLCANICAS	21
1.5.2 - ROCAS SEDIMENTARIAS	24
1.5.3 - ROCAS METAMORFICAS	25
1.6 - UBICACION DE LAS CANTERAS DE LAVA VOLCANICA DEL TIPO BASALTICO EN EL PAIS	25
1.7 - GLOSARIO DE TERMINOS GEOLOGICOS	29
CAPITULO 2 DETERMINACION DE LOS ELEMENTOS QUIMICOS CONSTITUYENTES DE LA LAVA VOLCANICA	
2.1 - SELECCION DEL METODO UTILIZADO PARA LA DETERMINACION DE LA COMPOSICION QUIMICA DE LA LAVA VOLCANICA	39

2.2 -	DESCRIPCION DEL PRINCIPIO DE LA ESPECTROFOTOMETRIA POR ABSORCION ATOMICA	40
2.3 -	PREPARACION Y ANALISIS QUIMICO DE LAS MUESTRAS DE LAVA VOLCANICA	43
2.3.1 -	RECOLECCION DE LAS MUESTRAS	44
2.3.2 -	METODOLOGIA UTILIZADA EN LAS MUESTRAS DE LAVA	45
2.3.3 -	DETERMINACION DE LA COMPOSICION QUIMICA DE LA LAVA VOLCANICA MEDIANTE ESPECTROFOTOMETRIA POR ABSORCION ATOMICA	49
2.4 -	RESULTADOS DE LOS ANALISIS DE MUESTRAS DE LAVA VOLCANICA DE SAN MIGUEL Y QUEZAL TEPEQUE	50

CAPITULO 3

FUNDAMENTOS TEORICOS SOBRE LAS PROPIEDADES ADSORBENTES, FILTRANTES Y DE AISLAMIENTO TERMICO A EVALUARSE EN LA LAVA VOLCANICA

3.1 -	FUNDAMENTOS TEORICOS SOBRE PROCESOS DE ADSORCION	53
3.1.1 -	ADSORCION EN SUPERFICIES SOLIDAS	53
3.1.2 -	CARACTERISTICAS GENERALES DEL PROCESO DE ADSORCION	54
3.1.3 -	ASPECTOS PRACTICOS SOBRE ADSORCION A NIVEL INDUSTRIAL	59
3.1.4 -	CARACTERISTICAS DE LOS ADSORBENTES	65
3.2 -	FUNDAMENTOS TEORICOS SOBRE PROCESOS DE FILTRACION	69
3.2.1 -	ASPECTOS GENERALES	69
3.2.2 -	COADYUVANTES DE FILTRACION	71

	<u>Pag. #</u>
3.2.3 -	TEORIA DE FILTRACION 73
3.2.4 -	VARIABLES QUE AFECTAN EL PROCE SO DE FILTRACION 76
3.2.5 -	EQUIPO DE FILTRACION 78
3.3 -	CONCEPTOS FUNDAMENTALES EN AISLAMIENTO TERMICO 81
3.3.1 -	FORMAS DE TRANSMISION DEL CA- LOR 81
3.3.2 -	COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD - TERMICA 82
3.3.3 -	CALCULO DE LAS PERDIDAS CALORI- FICAS 87
3.3.4 -	MATERIALES AISLANTES TERMICOS 90
3.3.5 -	COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD DE LOS MATERIALES AISLANTES TERMI- COS 91
3.3.6 -	CLASIFICACION DE LOS MATERIALES AISLANTES TERMICOS 97
CAPITULO 4	EVALUACION DEL USO DE LA LAVA VOLCANICA COMO MA- TERIAL ADSORBENTE, FILTRANTE Y AISLANTE TERMICO
4.1 -	EVALUACION DE LA LAVA VOLCANICA COMO AD- SORBENTE 100
4.1.1 -	METODOLOGIA 100
4.1.2 -	DISCUSION DE RESULTADOS 114
4.2 -	EVALUACION DEL MATERIAL COMO MEDIO FIL - TRANTE 119
4.2.1 -	METODOLOGIA 119
4.2.2 -	DISCUSION DE RESULTADOS 126

	<u>Pag. #</u>
4.3 - EVALUACION DE LA LAVA VOLCANICA COMO AISLANTE TERMICO	128
4.3.1 - METODOLOGIA	128
4.3.2 - DISCUSION DE RESULTADOS	135
4.4 - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	137
4.4.1 - CONCLUSIONES	137
4.4.2 - RECOMENDACIONES	141
APENDICE A FIGURAS CORRESPONDIENTES A LA EVALUACION DE LA LAVA VOLCANICA COMO MATERIAL ADSORBENTE	145
APENDICE B FIGURAS CORRESPONDIENTES A LA EVALUACION DE LA LAVA VOLCANICA COMO MEDIO FILTRANTE	152
APENDICE C FIGURAS CORRESPONDIENTES A LA EVALUACION DE LA LAVA VOLCANICA COMO AISLANTE TERMICO	155
BIBLIOGRAFIA	159

.....

I N T R O D U C C I O N

Ante la necesidad de aprovechar al máximo los recursos naturales disponibles, la búsqueda de materias primas nuevas que puedan ser utilizadas como sustitutos de igual o mejor calidad que las existentes y que a la vez puedan ser obtenidas a menores costos, plantea uno de los principales objetivos a que deben encaminarse los programas de investigación en los países en vías de desarrollo.

El Salvador, situado como una estrecha faja de 100 Kms. de ancho medio, es atravesado en dirección WNW - ESE por una cadena de volcanes jóvenes. Casi todo el país está cubierto por formaciones volcánicas y masas de erupciones, únicamente en el rincón del noroeste encontramos subsuelo que no es de origen volcánico. Aparte de los esbeltos picos cónicos como testigos del volcanismo reciente, ruinas volcánicas mas antiguas, cráteres formados por hundimientos y lagos de origen volcánico saltan a la vista y son rodeados por capas extensas de toba, cenizas, escorias y lava; siendo la lava volcánica del tipo andesítico y basáltico la mas abundante de todas ellas.

Considerando entonces la abundancia de lava volcánica existente en el país y la necesidad ya mencionada referente a la búsqueda de materias primas nuevas, se propuso como objetivo principal del presente seminario, evaluar la posible utilización de aquella en procesos de adsorción, filtración y aislamiento térmico; aspectos en los cuales hasta la fecha, este recurso no ha sido explotado.

Con el fin de lograr este objetivo, el esquema de trabajo seguido comprendió lo siguiente:

- 1°) Un estudio geológico sobre la ubicación y contenido de rocas en el país y particularmente de lava volcánica.
- 2°) Un análisis de los conceptos teóricos en cada uno de los aspectos a investigarse, los cuales proporcionarán criterios - mas amplios y prácticos para el control de las variables de - operación en la realización de las pruebas y para la interpretación de los resultados.
- 3°) La evaluación experimental de las propiedades adsorbentes, - filtrantes y de aislamiento térmico que constituyen el objetivo principal de este seminario.

Las conclusiones que se presentan al final de este trabajo obtenidas a - partir de las pruebas realizadas, indican claramente que la lava volcánica deberá considerarse como un importante recurso que al ser debidamente aprovechado puede ser un sustituto de materiales comunmente utilizados a nivel industrial.

Hemos deseado además, contribuir a futuras investigaciones aportando una serie de recomendaciones que consideramos serán de gran utilidad para las instituciones a las cuales están dirigidas.

CAPITULO 1

ESTUDIO GEOLOGICO SOBRE EL CONTENIDO DE ROCAS IGNEAS Y UBICACION DE LAS PRINCIPALES CANTERAS DE LAVA VOLCANICA EN EL SALVADOR *

1.1 - COMPOSICION DE LA CORTEZA TERRESTRE.

Considerada como un todo, la tierra es una esfera de material desconocido rodeada por un número de delgadas capas envolventes. El interior se conoce como barisfera; ésta es seguida hacia afuera por la litósfera, que es la rocosa corteza terrestre; a continuación por una capa mas o menos continua de agua que es la hidrósfera; y finalmente por la capa externa de gases y vapores que es la atmósfera.

La corteza externa de la tierra hasta una profundidad de 16 km. mas o menos, está compuesta de rocas ígneas y rocas metamórficas, con un manto delgado e interrumpido de rocas sedimentarias que descansan sobre las mismas. Según datos aportados, la litósfera hasta una profundidad de 16 km se forma de rocas ígneas en un 95% ; pizarras en un 4%; piedra arenisca en un 0.75% y piedra caliza en un 0.25% *; y su composición, basada en la composición química promedio de cada clase de roca y tomando en cuenta las proporciones dadas anteriormente, se presenta en la tabla 1.1 bajo la forma de -

* Estos porcentajes están expresados en una relación de pesos.

óxidos (1). En la suposición de que la corteza de 16 km. está compuesta totalmente de rocas ígneas, los resultados de los cálculos, solamente difieren en total con respecto a los anteriormente dados en la tabla 1.1, en la segunda cifra decimal.

De lo mencionado anteriormente, se desprende la gran importancia que tiene el estudio detallado de las rocas, principales constituyentes de la corteza terrestre y en muchos casos, importantes fuentes de recursos industriales.

TABLA 1.1- COMPOSICION DE LA CORTEZA TERRESTRE

Oxidos	Porcentaje en peso
SiO ₂	59.07
Al ₂ O ₃	15.23
Fe ₂ O ₃	3.10
FeO	3.71
MgO	3.45
CaO	5.10
Na ₂ O	3.71
K ₂ O	3.11
H ₂ O	1.30
CO ₂	1.35
TiO ₂	1.03
P ₂ O ₅	0.30
MnO	0.11
Resto*	0.44

* Incluye: ZrO₂ , Cl, F, S, (Ce, Y)₂O₃ , Cr₂O₃, V₂O₃ , NiO, BaO, SrO, Li₂O, Cu, C.

1.2 - CLASIFICACION DE LAS ROCAS, :

No importando la teoría sobre el origen de la tierra, lo cierto es que toda parte de la superficie terrestre original, pasó por una etapa de fundido, y el primer material sólido que existió se derivó de un baño fundido o magma. Además, todas las rocas posteriormente formadas se han producido a partir de dicha corteza o a partir de erupciones subsecuentes de materia fundida. Las rocas formadas por la consolidación del magma fundido se denominan Rocas Primarias o Igneas.

Una vez que la corteza original se consolidó y la hidrósfera y atmósfera se formaron; las aguas y el aire, ambos con una gran potencia química, comenzaron a atacar las rocas primarias. La acción desintegradora producida desprendió despojos, y la acción química produjo despojos y materiales en solución. Los fragmentos sueltos fueron barridos por el agua y el viento, reuniéndose finalmente en los huecos de la corteza, donde encontraron agua y materias solubles. Los despojos recogidos y depositados a partir de su suspensión en agua o en aire, finalmente fueron cementados para formar una dura roca añadiéndose así a la corteza sólida. Bajo circunstancias adecuadas, la materia soluble precipitó directa o indirectamente, mediante la ayuda de organismos en tiempos geológicos posteriores. Las rocas así producidas, eventualmente se solidificaron y ayudaron a construir la corteza denominándose Rocas Secundarias o Sedimentarias; debido a que están compuestas de materiales de segunda mano o derivadas.

Las rocas sedimentarias se dividen en Químicas y Orgánicas, de conformidad con el procedimiento por el cual recibieron sus caracteres mas distintivos.

Por último, los movimientos terrestres llevan las rocas primarias y secundarias hacia profundidades en la corteza, donde son sometidas a grandes temperaturas y presiones siendo entonces parcial o totalmente reconstituidas; sus caracteres originales son parcial o totalmente borrados y nuevos caracteres les son impuestos; este tipo de roca se conoce como Roca Metamórfica.

La clasificación de las rocas se establece entonces de la siguiente manera:

- a) Rocas Igneas o Primarias.
- b) Rocas Secundarias o Sedimentarias.
- c) Rocas Metamórficas.

Las rocas primarias se distinguen por la presencia de minerales - cristalinos que se traban los unos con los otros, o que son fijados por una pasta diminutamente cristalina, o en un vidrio . Muestran como las lavas actuales, signos como de haber sido enfriadas a partir de una temperatura elevada. Son voluminosas generalmente, no estratificadas, no fosilíferas y frecuentemente ocupan vetas y fisuras que rompen a través de otras rocas que ellas han calentado y alterado.

Las rocas secundarias están compuestas de materiales elásticos y

precipitados, o de sustancias de naturaleza y origen orgánico. Se distinguen por la presencia frecuente de estratificaciones, residuos orgánicos (fósiles) y otras marcas indicadoras de deposición a partir de agua o aire en el mar o en la tierra.

Las rocas metamórficas, presentan en algunos aspectos caracteres - intermedios entre las dos primeras. Una temperatura y presión elevadas provocan la cristalización, y , por lo tanto, tal como en - las rocas primarias frecuentemente consisten de cristales trabados entre sí. Además, la presión provoca el desarrollo de capas, folios o bandas mas o menos regulares por lo cual este tipo de roca se parece a las de origen secundario.

Existen otros criterios de clasificación para las rocas, habiéndose establecido por ejemplo, en base al material del cual se componen, una clasificación en Minerógenas, que son las que constan principalmente de materias minerales e inorgánicas; y en Orgánicas compuestas principalmente de materias orgánicas. Al mismo tiempo, según la composición mineralógica se las ha dividido en Rocas Simples, en cuya composición entra una sola especie como la Cloritina (constituida por Clorita), y Compuestas, constituidas por dos o mas especies minerales como la Protogina (constituida por Ortosa, Cuarzo y Talco). Sin embargo, la clasificación mencionada de rocas Igneas, Sedimentarias y Metamórficas es la mas aceptada.

1.3 - COMPOSICION DE LAS ROCAS.

Los elementos presentes en las rocas, suelen reportarse en los análisis químicos bajo la forma de óxidos; sin embargo, caen en varias combinaciones a partir de las cuales surgen los minerales formadores de rocas, en los cuales los óxidos como tales, son de una importancia secundaria. Estos elementos se dividen en Primarios y Secundarios. Los Primarios forman el 97.7% en peso de la corteza terrestre y comprenden: (2)

- 1) El Oxígeno, que entra en la constitución de casi todas las rocas y representa aproximadamente una mitad en peso de la corteza terrestre.
- 2) El Silicio, que representa mas de una cuarta parte en peso de la corteza terrestre, unido al oxígeno formando la sílice que es abundantísima, ya libre, ya combinada, sobre todo con la alúmina, magnesia, cal y otras bases. La sílice forma un 50% en peso de todas las rocas.
- 3) El Aluminio, combinado con el oxígeno forma la alúmina, que es la base común de los silicatos.
- 4) El Magnesio, combinado con el oxígeno forma la magnesia, que constituye gran número de silicatos (Hornablenda, Augita, Peridoto, Serpentina, etc), abundantes en las rocas.
- 5) El Calcio, cuyo óxido llamado cal, entra en la composición de

numerosos silicatos (Anfiboles, Piroxenos, Hiperstena, Diálogas, Epidota, etc) así como de la Caliza, Dolomita, del Yeso y la Anhidrita en estado de carbonato y sulfato, respectivamente.

- 6) El Oxido de Potasio y la Potasa, forman con la sílice vidrios ó compuestos fusibles, cuyo hecho indica ya una de sus especiales funciones en la estructura de la tierra. La sílice, la alúmina y los silicatos de alúmina, son completamente infusibles, pero la adición de la potasa (o de otras bases que son isomorfas, como la sosa, cal, magnesia, protóxido de hierro, etc) - origina compuestos fusibles. Como según todas las probabilidades, la tierra estuvo en su principio en estado de fusión, debieron los álcalis desempeñar entonces un papel principal, siguieron y siguen desempeñándolo en todas las operaciones ígneas. Los feldespatos que se hallan en todas las rocas ígneas son silicatos de alúmina y potasa, sosa o cal.

Todo lo dicho anteriormente del potasio es aplicable al sodio, cuyo óxido, la sosa, juega un papel análogo al de la potasa.

Los dos óxidos del Hierro, el protóxido y el sesquióxido, se encuentran en abundancia con los álcalis, la cal, la magnesia y la alúmina; formando silicatos que son de considerable importancia en la composición de las rocas, como por ejemplo, la hornablenda, la augita, la epidota, etc.

7) El Carbono, forma la principal parte de las rocas combustibles; pero la importancia de este elemento dimana principalmente del ácido carbónico en cuya composición entra, el cual es constituyente de la atmósfera y con la cal forma la caliza; y con esta base y la magnesia la dolomita, rocas muy abundantes. Este ácido y el silícico son los únicos que entran ampliamente en la constitución de las rocas.

Los elementos secundarios comprenden los siguientes:

- 1) El Azufre, que se encuentra nativo y originando los sulfuros y sulfatos tales como el yeso y la anhidrita.
- 2) El Hidrógeno, que con el Oxígeno forma el agua que entra en la composición de varios minerales petrográficos importantes.
- 3) El Cloro, que junto con el sodio origina el cloruro sódico.
- 4) El Nitrógeno, cuya principal importancia radica en la parte que le corresponde en la constitución de la atmósfera.

Todos los elementos mencionados se combinan en diferentes proporciones para formar así los minerales constituyentes de las rocas, definiéndose entonces estos, como sustancias inorgánicas naturales con una composición química definida y distinguiéndose como esenciales o constituyentes los que determinan el carácter de la roca; y como no esenciales o accesorios, aquellos que aún formando parte de ellas, no le imprimen caracteres especiales.

Entre los minerales formadores de rocas se pueden mencionar: los silicatos, que son los compuestos mas abundantes; los óxidos, carbonatos, fosfatos, sulfatos, etc, en importancia cada vez menor.

Haciendo referencia primero a los silicatos, los feldespatos constituyen el grupo mas abundante e importante, no solo de los silicatos, sino de los minerales formadores de rocas en general. Los miembros principales son: la Ortoclasa y la Microclina, ambos silicatos de potasio y aluminio, y las diversas Plagioclasas, que son mezclas en todas proporciones, de dos miembros externos; Albita, que es silicato de sodio y aluminio y Anortita, que es silicato de calcio y aluminio. Aleados a los feldespatos, pero conteniendo menos sílice en proporción a las bases presentes, se encuentran los minerales - Feldespatoides, de los cuales los mas importantes son la Nefelina, que es silicato de sodio y aluminio; y la Leucita que es silicato de potasio y aluminio.

El grupo de la mica forma una liga entre los silicatos de álcali-
alúmina anteriormente mencionados y los silicatos mas pesados y -
mas oscuros ferromagnesianos que se describirán mas tarde. De las micas propiamente dichas, los dos miembros principales son la mica blanca o Moscovita, que es silicato de potasio, aluminio, magnesio y hierro, con hidroxilo; y la Biotita que es monoclinica de -
composición variable.

Entre los minerales silicáticos ferromagnesianos propiamente dichos, existen tres grupos principales: los Piroxenos, Anfiboles y

Olivinas. Los Piroxenos son meta-silicatos de calcio, magnesio y hierro, de los cuales los dos miembros principales son los Ortopiroxenos, meta-silicatos sencillos de magnesio, hierro y augita, el Piroxeno monoclinico que es un metasilicato complejo de calcio, magnesio, hierro y aluminio. Los Anfiboles forman un grupo paralelo a los piroxenos, el miembro principal es la hornablenda, un mineral de composición similar a la augita pero mas rico en calcio. Las Olivinas son ortosilicatos sencillos de magnesio y hierro.

Existen otros silicatos como formadores de rocas, contándose entre ellos los Granates, que es una serie isomórfica variada, principalmente de silicatos de hierro, magnesio, calcio y aluminio; la Epidota que es un silicato de calcio, hierro y aluminio es un producto que resulta de la alteración de minerales de silicatos ricos en cal; etc.

Entre los minerales de óxidos, solamente hay cuatro como grandes formadores de rocas; el Cuarzo, que es el dióxido de silicio, es talvez el mas abundante después de los feldespatos; la sílice Coloidal impura, sobre todo la variedad obscura que se conoce como Calcedonia, también forma grandes masas rocosas; cabe mencionar después los óxidos de hierro: Magnetita (Fe_3O_4), Hematita (Fe_2O_3) y Limonita ($FeO(OH).nH_2O + Fe_2O_3.nH_2O$) que forman los materiales colorantes rojos, cafés y amarillos de las rocas; otro mineral ampliamente distribuido en las rocas es la Ilmenita que es el óxido de hierro y titanio ($FeTiO_3$).

De los carbonatos, la Calcita o carbonato de calcio y la Dolomita o carbonato doble de calcio y magnesio son los mas abundantes.

Entre los fosfatos, la Apatita que es un fosfato de calcio con algo de fluor ó cloro combinados, está universalmente distribuidos en pequeñas cantidades, y entre los sulfuros, las Piritas constituidas por disulfuro de hierro son abundantísimas y muy comunes en las rocas; el yeso, que es un sulfato de calcio con agua combinada y las Baritas un sulfato de bario, forman ocasionalmente masas rocosas - lo mismo que el cloruro de sodio.

La tabla 1.2 presenta los minerales conocidos como petrográficos - por presentarse como elementos mas o menos importantes de las rocas.

Según la importancia relativa de los minerales mencionados en la Tabla 1.2, como constituyentes de las rocas, se les ha dividido - en cuatro grupos:

- 1º Metales y elementos accesorios (Magnetita, Hematita, Ilmenita, Apatita, Zircón, Espinela, Titanita).
- 2º Silicatos magnésicos y ferruginosos (Biotita, Anfíbol, Piroxeno, Olivino).
- 3º Elementos feldespáticos (feldespatos propiamente dichos: Nefelina, Leucita, Melilita, Sodalita, Hauyina).
- 4º Sílice libre.

TABLA 1.2 - MINERALES PETROGRAFICOS

1º	Elementos Nativos Grafito Azufre Hierro	Otreilita Serpentina Glauconita
2º	Oxidos Sílice Cuarzo Tridimita Opalo Corindon Oxidos de hierro Hematitas Limonitas Magnetita Ilmenita Cromita Epinelas Oxidos de Manganeso	4º Carbonatos Calcita Aragonita Dolomita Siderita
		5º Sulfatos Anhidrita Yeso Baritina Micas Moscovita Biotita Anfiboles Monoclínicos Rómbicos (antofilita) Sódicos Piroxenos Monoclínicos Rómbicos
3º	Silicatos Feldespatos Ortosa Sanidino Plagioclasas Leucita Nefelina Epidota Zoisita Vesubianita Andalucita Dicroita Escapolitas Cianita Granates Turmalina Zircón Titanita Zeolitas Caolin Talco Cloritas	6º Fosfatos Apatita Vivianita 7º Fluoruros Fluorita 8º Cloruros Sal común 9º Sulfuros Pirita Marcasita Pirrotina

1.4- ROCAS IGNEAS O ERUPTIVAS.

1.4.1- GENERALIDADES Y ORIGEN.

Las rocas ígneas o eruptivas son aquellas que resultan del enfriamiento y solidificación de un magma fundido. El magma es una mezcla silicática cuyo principal componente es, como puede deducirse de la composición de la corteza terrestre; la sílice, seguida del aluminio y una proporción variable de cationes de hierro, magnesio, calcio, potasio y otros.

A estas rocas formadas a partir de los magmas fundidos; se les llama "Pirogenéticas" o "Piroclásticas" (formadas por el fuego); así, las lavas volcánicas vertidas sobre la superficie de la tierra se han originado a raíz de una actividad ígnea interna muy grande; como consecuencia de ésto, existe una distinción entre las "Rocas Ígneas Extrusivas" que son el producto de las erupciones hacia la superficie y las "Rocas Ígneas Intrusivas" que están incrustadas en la corteza terrestre y se exponen en la superficie únicamente por la eliminación de las capas que las cubren por movimientos terrestres . (5)

Las rocas ígneas, se diferencian ampliamente de las demás rocas, en que constan de una estructura maciza y sólida; esto es, que sus minerales constituyentes no están arreglados en paralelo ni en capas.

Entre los minerales que forman las rocas ígneas, los mas comunes e importantes son: cuarzo, feldespatos, piroxenos, micas y otros.(3)

1.4.2- COMPOSICION QUIMICA DE LAS ROCAS IGNEAS.

Se ha estimado que las rocas ígneas forman alrededor del 95% en peso de la corteza terrestre; por lo cual su composición química difiere muy ligeramente de la de aquella. En la tabla 1.3 se presenta una composición promedio de las rocas ígneas en porcentaje de elementos y sus respectivos óxidos. (1)

Prácticamente, todos los elementos conocidos se encuentran en las rocas ígneas, pero de ellos, los que se consideran comunes y que constituyen el 99.5% en peso, son el oxígeno, la sílice, el aluminio, el hierro, el potasio, el sodio, el calcio y el magnesio.

El elemento de mayor importancia en las rocas ígneas, es el silicio que en forma de sílice puede variar desde un máximo de 80% en peso hasta un mínimo teórico del 0%; pues sólo en casos muy raros desciende abajo del 40%. Es tal su importancia que se ha hecho una especificación de las rocas ígneas de acuerdo a su composición de sílice; se llaman "Ácidas" si sobrepasan el 65% en peso de sílice; "Medias" si están comprendidas entre el 55 y el 65% en peso de sílice y "Básicas" cuando su composición de sílice es menor del 50% en peso. (2,3)

El aluminio alcanza un nivel máximo del 25 al 30% en peso; y el rango general es del 12 al 18% en peso. Los óxidos de hierro son bajos, el 1% ó menos en las rocas muy ácidas; pero se incrementa en las básicas llegando hasta del 10 al 20% en peso. El magnesio representa únicamente trazas en las rocas ácidas, y se va elevando según va -

TABLA 1.3- COMPOSICION QUIMICA PROMEDIO DE LAS
ROCAS IGNEAS

Elementos	Porcentaje en Peso	Oxidos	Porcentaje en peso
Oxígeno	46.590	SiO ₂	59.120
Silicio	27.720	Al ₂ O ₃	15.340
Aluminio	8.130	Fe ₂ O ₃	3.080
Hierro	5.010	FeO	3.800
Calcio	3.630	MgO	3.490
Sodio	2.850	CaO	5.080
Potasio	2.600	Na ₂ O	3.840
Magnesio	2.090	K ₂ O	3.130
Titanio	0.630	H ₂ O	1.150
Fósforo	0.130	CO ₂	0.102
Hidrógeno	0.130	TiO ₂	1.050
Manganeso	0.100	ZrO ₂	0.039
Azufre	0.052	P ₂ O ₅	0.299
Bario	0.050	Cl	0.048
Cloro	0.048	F	0.030
Cromo	0.037	S	0.052
Carbono	0.032	(Ce,Y) ₂ O ₃	0.020
Fluor	0.030	CR ₂ O ₃	0.055
Zirconio	0.026	V ₂ O ₃	0.026
Níquel	0.020	MnO	0.124
Estroncio	0.019	NiO	0.025
Vanadio	0.017	BaO	0.055
Cerio e Itrio	0.015	SrO	0.022
Cobre	0.010	Otros	0.023
Otros	0.034		
Total	100.000	Total	100.000

disminuyendo la sílice, alcanzando hasta un 30% en las rocas extremadamente básicas. La cal viva (óxido de calcio), es muy baja en las ácidas y gradualmente crece hasta un 15% en las básicas. El potasio es alto en las rocas de leucita; encontrándose entre el 10 y el 12% en peso; varía entre el 4 y el 7% en peso en las rocas medias y desaparece en los tipos básicos. El sodio tiene un máximo similar al del potasio en las rocas Nepelinas; el mismo rango en las ricas en albita, acercándose a la extinción en las extremadamente básicas. En casi todos los tipos de roca indicados, el agua se presenta del 0.5 al 1% en peso. (3)

1.4.3- CLASIFICACION DE LAS ROCAS IGNEAS.

Se clasifican en Extrusivas e Intrusivas, según estén en la superficie o en el interior de la tierra; en Ácidas, Medias y Básicas, según su contenido de sílice. Además, según la profundidad a que se han consolidado se han clasificado en "Plutónicas" las profundas; "Hipobisales" las intermedias y las "Efusivas o Volcánicas" las externas (4). Existen también una serie de subdivisiones considerando la mineralogía, en las cuales la base fundamental son los feldespatos y feldespatoides; entre estas subdivisiones se encuentran las siguientes series: (3)

1º SERIE DE ROCAS CRISTALINAS O VITREAS: Son las más evidentes después del enfriamiento del magma; son casi siempre ácidas y las más comunes son las obsidianas negra, roja y parda.

- 2º SERIE DE RIOLITAS: Comprende los magmas ígneos que contienen sílice del 65 al 80% en peso; Aluminio del 12 al 15%; óxidos de hierro del 1 al 3% en peso; Magnesio menos del 1%; Cal del 1 al 2%, potasio y sodio del 5 al 8%. Son muy comunes en la naturaleza y cristalizan en una forma grosera y tosca.
- 3º SERIE DE TRACITAS: Comprende los magmas ígneos que contienen del 55 al 65% de sílice; del 15 al 20% de aluminio; del 1 al 3 % de óxidos de hierro; del 1 al 2% de magnesio; del 1 al 3% de cal y del 7 al 12% de potasio y sodio. Son menos comunes que la serie anterior, algunos minerales livianos coloreados están en exceso.
- 4º SERIE DE PERLITAS: Comprende a los magmas ígneos que contienen del 50 al 60% de sílice; del 18 al 22% de aluminio; del 1 al 3% de óxidos de hierro; del 1 al 2% de magnesio; 1% de cal; y del 10 al 15% de sodio y potasio. Esta serie contiene las rocas leucitas y nefelinas; y son de gran interés científico.
- 5º SERIE DACITA-CUARZO-DIORITA: Comprende los magmas ígneos que presentan una composición del 60 al 70% de sílice; del 12 al 15% de aluminio; del 1 al 3% de óxidos de hierro; del 1 al 3% de magnesio; del 2 al 4% de cal y del 4 al 7% de sodio y potasio (Sodio en exceso). Son comunes en centros de erupción volcánica.
- 6º SERIE ANDESITA-DIORITA: Comprende los magmas ígneos de la si-

guiente composición: 50 a 65% de sílice, 15 a 18% de aluminio, 4 a 9% de óxidos de hierro, 2 a 7% de magnesio, 3 a 8% de cal, 3 a 5% de sodio y de 2 a 3% de potasio. Es la serie de rocas - que está mas diseminada, son generalmente de color gris claro.

- 79 SERIE BASALTICA: Comprende los magmas ígneos que contienen entre el 40 y el 55% de sílice, 16 a 20% de aluminio, de 6 a 15% de óxidos de hierro, 5 a 10% de magnesio, 6 a 12% de cal, 2 a 4% de sodio y del 1 al 2% de potasio. Es una serie de rocas - que está muy diseminada y contienen un exceso de silicatos obscuros que les dan un color gris obscuro o negro.

Casi todas las series anteriores de rocas poseen la característica de cristalizar en forma muy grosera y tosca; y todas contienen en menor o mayor grado, minerales tales como la augita, biotita, magnetita, hornablenda, ortoclasa, plagioclasa, piroxeno, cuarzo y otros más.

Del estudio de las rocas eruptivas, resulta que fueron mas abundantes en los períodos geológicos mas antiguos llamados Primarios, en los que la actividad interna del globo se manifestó con una energía considerable; fueron muy escasas en los períodos Secundarios, en que la tierra pasó por una época de reposo; y que volvieron a abundar en los períodos Cuaternario y Terciario, en que la tierra reemprendió su actividad interna. Según eso las rocas eruptivas se dividen en dos series de una duración de importancia desigual: (2) la "Serie

"Antigua" en la que predominan las rocas de tipo granítico que se presentan en grandes macizos de contornos irregulares; y la "Serie Moderna" en la que predominan rocas en filones de tipo volcánico y como rocas características pueden mencionarse a las Traquitas y al Basalto.

1.5 - ESTUDIO GEOLOGICO SOBRE EL CONTENIDO Y DISTRIBUCION DE ROCAS EN EL SALVADOR.

1.5.1- ROCAS IGNEAS EXTRUSIVAS O VOLCANICAS.

Este tipo de rocas es el que mas abunda en el país por ser su geología eminentemente volcánica, unas veces aparece esparcida en forma de material fundido sobre la superficie terrestre denominándose lavas, como material que posteriormente se consolidó a roca. La lava se puede apreciar en forma de filones, capas, coladas y mantos; todas tienen un caracter andesítico, basáltico, riolítico y dacítico.

Coladas de lava de caracter basáltico son corrientes en las faldas de los volcanes que tuvieron su actividad en épocas pasadas, en algunos centros de erupción este tipo de lava aparece en la capa superior de la colada, está constituida por fragmentos heterogéneos angulosos o bien por rocas extremadamente fracturadas y plagadas de cavidades irregulares a manera de poros volviéndose esta capa de condición permeable, por debajo de esta zona rocosa normalmente se encontraron coladas de lava de textura densa e impermeable; ejemplo

de esto lo constituyen las corrientes de lava del volcán de San Salvador que afloran en la carretera del Sitio del Niño a Quezaltepeque.

Los productos piroclásticos fueron emitidos al exterior por los volcanes y depositados en la superficie terrestre por acción del viento muchas veces lejos del centro emisor, se definen usualmente según sus rasgos de tamaño; el material mas fino corresponde al polvo o ceniza volcánica muy abundante en San Salvador y sus alrededores, siendo el Lago de Ilopango su principal emisor. Otros productos piroclásticos existentes en el país son arenas volcánicas, así como materiales de diámetro mayor que las arenas, estos materiales así depositados toman el nombre de Lapilli, siendo ejemplos de ellos las depositaciones efectuadas por la Laguna de Alegría y la Laguna de Aramauca, que se presentan en cortes de la carretera Panamericana hacia el oriente del país; Km 16 y entre kms. 149 y 150 respectivamente. Otro producto piroclástico de importancia es el Pómez, por estar actualmente encontrándosele aplicación en la industria de la construcción, de abundancia en los alrededores de los centros emisores que son Volcán de San Salvador, Lago de Ilopango y Lago de Coatepeque; los depósitos de Pómez descansan generalmente sobre rocas altamente descompuestas; en los alrededores del Lago de Coatepeque se pueden apreciar laderas conteniendo estrictamente Pómez hasta 15 metros de espesor; existen ejemplos detallados al oeste y nor-oeste de Ciudad Arce y al nor-este del Congo. Otros depósitos semejantes a los descritos y eyectados por el Volcán de

San Salvador e Ilopango son los que se encuentran ubicados en los alrededores de San Salvador, Ciudad Delgado, Panchimalco y Los Planes de Renderos.

Los productos piroclásticos una vez acumulados tienden a sufrir procesos de litificación transformándose en otro tipo de roca conocida por Toba; y dependiendo del tipo, forma y tamaño de los fragmentos componentes se identifican diversos tipos de tobas. Tipos de tobas de peculiar textura son las que afloran en la carretera del Litoral en la región de Comalapa, denominándoseles tobas fundidas y quedan expuestas en los cortes de la carretera, alcanzando espesores hasta de 100 metros, no se observan estratificaciones pero se nota una textura paralela muy marcada de numerosos fragmentos planos que suelen ser de obsidiana de tono negro vitroso; la roca en sí en la parte superior es de color gris con incrustaciones fragmentosas de obsidiana, hacia la base la roca se torna de un color gris rojizo a rosado opaco; revela una roca de textura fluida solidificada de manera vitrosa. Otro yacimiento de importancia de tobas fundidas es el ubicado en la villa de Zaragoza cerca del puerto de La Libertad, aflorando a ambos lados de la carretera que conduce a dicho puerto; y el material se encuentra bastante erosionado por la acción del tiempo variando de espesor; todo se presenta bajo un color gris obscuro.

Sedimentos Volcánicos Detríticos: Este tipo de sedimento lo encontramos localizado en su mayor parte al sur y sur-oeste de San Salvador y consisten esencialmente de depósitos de lodo volcánico, de -

lahars, aglomerados gruesos, tobas brechadas, así como escasas corrientes de lava andesítica y basáltica intercaladas; ejemplo en las orillas del Lago de Coatepeque con lavas basálticas y estratos de aglomerados volcánicos conteniendo numerosos bloques angulosos y subangulosos de fragmentos líticos; también se aprecian espesores de Lapilli, escoráceos de composición andesítica y basáltica de colores negro, café y rojizo; todo ésto cubierto de cenizas amarillentas mas jóvenes.

1.5.2- ROCAS SEDIMENTARIAS.

Se originan de la destrucción de rocas mas antiguas o pre-existentes formando el subgrupo de sedimentarias elásticas; también las rocas sedimentarias pueden provenir de actividad orgánica y/o química y se engloban bajo el término de sedimentarias no elásticas.

Las rocas sedimentarias elásticas, aparecen sin coherencia o sueltas como ocurre con las gravas, arenas, limas y arcillas; así por ejemplo aluviones y sedimentos fluviales. En el país se encuentran en la zona costera y resultan ser materiales sueltos, no consolidados, de diferentes diámetros; también se encuentran relleno de paredes de cauces de ríos importantes tales como el Lempa y el Grande de San Miguel.

Las rocas sedimentarias no elásticas, son un tipo de rocas de fase marina, cubren un área pequeña aproximada del 5% de todo el país y se encuentran ubicadas al nor-oeste del territorio, en la región -

de Metapán siendo la caliza la roca de mayor importancia de esta - región, de variedades de color gris a gris oscuro, cuyo principal uso industrial es en la fabricación de Cemento Portland.

1.5.3- ROCAS METAMORFICAS.

Son muy escasas en nuestro país, pueden pertenecer por su origen a las rocas eruptivas propiamente dichas o también ser debidas a formaciones sedimentarias, como en este caso ocurrencia de pequeños afloramientos de mármol debidos a transformaciones de calizas por cambios fuertes de presión y temperatura o por la carga de capas geológicas posteriores, dando origen a un metamorfismo de contacto entre las calizas y un intrusivo granítico o granodiorítico que originó este pequeño afloramiento de marmol a causa de la recristalización de las calizas.

Considerando entonces la geología de nuestro país, este trabajo se realizará utilizando lava volcánica de tipo basáltico, por su naturaleza porosa y la abundancia de los depósitos.

1.6- UBICACION DE LAS CANTERAS DE LAVA VOLCANICA DEL TIPO BASALTICO EN EL PAIS.

Se conoce como cantera a la formación geológica de donde se extraen las piedras para utilizarlas posteriormente ya sea con fines industriales como en el presente caso o de cualquier otra naturaleza.

Las principales canteras de lava basáltica en el país están ubicadas en los siguientes lugares:

Volcán de Izalco. Está localizado en la zona occidental del país, al norte de la ciudad de Izalco a unos 4 Kms. Su acceso es sobre una carretera de tierra en regular estado, pero no solo donde está ubicada la colada de reciente erupción hay lava, sino que desde el Cantón el Guayabo (Km 46) de Armenia pasando por la Hacienda los Lagartos, El Bebedero y todos los cantones de Izalco hay lava; por lo que su capacidad de explotación puede considerarse la mejor del país. Su producción puede estimarse en 1×10^8 metros cúbicos.

Volcán de Santa Ana. Ubicado en la zona occidental del país, localizado en el Cantón el Arado a unos 8 Kms al sur de Chalchuapa; su capacidad de explotación es buena por su buen acceso y facilidad de recolección del material. Su capacidad de producción puede estimarse en 16×10^6 metros cúbicos de lava.

Cerro Singüil. Está ubicado en el occidente del país, sobre la carretera que conduce de Santa Ana a San Cristóbal de la Frontera a la altura del Km. 70; toda la carretera se encuentra pavimentada. Su capacidad de explotación puede estimarse en 1×10^6 metros cúbicos de lava.

Volcán San Diego o Cerro Quemado. Se encuentra ubicado al norte de la zona occidental, en la zona de la Central Eléctrica Guajoyo; dista 40 Kms de Santa Ana, su acceso es bueno ya que está ubicado a la

vera de la carretera Santa Ana- Metapán. Su producción puede estimarse en 4×10^6 metros cúbicos de lava.

Volcán de San Salvador. Se encuentra ubicado en la zona central, al sur de Quezaltepeque, dista de San Salvador unos 40 Kms. Su capacidad de explotación se considera buena, su producción se estima en 40×10^6 metros cúbicos de lava; su acceso es bueno.

Volcán de San Miguel. Se encuentra ubicado en la zona oriental del país, sobre la antigua carretera que de San Miguel conduce a Usulután. Son tres diferentes coladas y su distancia es variable de 1 a 30 Kms. de San Miguel y a 20 Kms. de Usulután. Su capacidad de explotación puede estimarse en 80×10^6 metros cúbicos de lava.

En conclusión, existe lava al aire libre en las tres zonas del país, con buenas vías de acceso; los mantos son tan grandes que se necesitarían muchos años para agotar su existencia; esperándose además que su capacidad de explotación sea buena. (7)

La ubicación de las canteras de lava volcánica en el país se encuentra ilustrada en la figura 1.1.

Para la selección de los lugares donde se recolectaron las muestras que se sometieron a estudio, se tomaron como base dos factores:

- a) Capacidad de producción y explotación del depósito.
- b) Existencia y condiciones de las vías de acceso.



Fig. 1.1 Ubicación de las principales canteras de lava en El Salvador.

Considerando el primero de los factores, se seleccionaron en orden de importancia tres lugares: Volcán de Izalco, Volcán de San Miguel y Volcán de San Salvador. Al considerar el segundo factor, se decidió eliminar el Volcan de Izalco en vista de que los dos últimos - presentan mayores facilidades de acceso durante todo el año, además, están localizados en zonas diferentes del país.

1.7 - GLOSARIO DE TERMINOS GEOLOGICOS.

ALBITA: Es un silicato alumínico sódico de fórmula $\text{Si}_3\text{O}_8\text{AlNa}$; frecuentemente se encuentra en pizarras cristalinas y en rocas alcalinas.

ANDESITAS: Son rocas volcánicas compuestas esencialmente de andesina y uno ó más constituyentes ferromagnesianos. Son de color oscuro.

ANDALUCITA: Es un mineral trimórfico ortorómbico. Su fórmula es : Al_2SiO_3 .

ANFIBOLES: Grupos mineral de fórmula general: $\text{A}_{2-3}\text{B}_5(\text{SiAl}_4)\text{O}_{11}(\text{OH})_2$; en donde A puede ser fe, Mg, Ca y Na y B puede ser MgFe, Al y fe.

ANHIDRITA: Sulfato de calcio, en cristalización rómbica; se encuentra junto con el yeso en los yacimientos salinos!

APATITO: Es un mineral que cristaliza en prismas hexagonales; puede ser incoloro, verde, rojo, violeta ó gris; se presenta compacto y

fibroso con brillo vitreo. Su fórmula es $(PO_4)_3 (F, OH, Cl) Ca_5$.

ARAGONITO: Es un mineral rómbico, puede ser incoloro, amarillo - verdoso, rojizo o violeta; se halla en las cavidades de rocas volcánicas, en arcillas o yeso.

ARCILLAS: Es una sustancia mineral blanda y plástica que se endurece al fuego; se deposita en las cuencas ocupadas por las aguas.

ARENISCAS: Son sedimentos detríticos compactos; están compuestos - predominantemente de granos de cuarzo.

AUGITA: Mineral monoclinico de composición Si_2O_6CaMg . Es un elemento de las rocas eruptivas.

BARITINA. Mineral que se presenta en cristales rómbicos, tubulares o prismáticos; pueden ser incoloros, amarillos, pardo-rojizos. Su composición es $BaSO_4$.

BASALTO: Roca volcánica efusiva, básica, negra. Está compuesta esencialmente de feldespato, augita, aluminio y augita.

BATOLITA: Rocas plutónicas, en su mayoría graníticas, solidificadas a grandes profundidades.

BIOTITAS: Minerales monoclinicos del grupo de las micas, pardo-negro, frecuentemente con brillo nacarado.

CALCITAS: Minerales del carbonato de calcio $CaCO_3$, hexagonal romboédrico. Principal componente de la caliza.

CALIZA: Roca constituida casi exclusivamente por carbonato de calcio.

CAOLIN: Tierra de porcelana, originada por la meteorización de rocas ricas en feldespatos . Se compone de diminutos cristales monoclinicos del mineral Caolinita de composición $Si_4O_{10} \cdot (OH)_8 \cdot Al_4$.

CLORITAS: Minerales monoclinicos semejantes a las micas de coloración verde oscuro.

CORINDON: Mineral cristalizado en pirámides, prismas y rombohedros, muy duro ; y químicamente es alúmina.

CROMITA: Mineral negro parduzco de brillo semimetálico, cristaliza según la forma cúbica, de composición $FeO \cdot Cr_2O_3$. Es una importante fuente de cromo.

CUARZO: Mineral muy difundido que cristaliza en forma trigonal; químicamente es sílice anhidra; SiO_2 . Es incoloro y claro como el agua si es puro, pero frecuentemente presenta coloración.

DACITAS: Es el equivalente extrusivo del cuarzo-diorita. Sus principales minerales son plagioclasa, cuarzo, piroxeno u hornablenda o -ambos. Se pueden presentar como fenocristales en un vidrio o como masas de feldespatos y minerales finamente cristalizados.

DETRITICOS: Son minerales compuestos de detritos ó residuos; y se encuentran dentro de las rocas sedimentarias.

DIALOGUITAS: Son minerales trigonal de composición CO_3Mn ; se pre-

enta en cristales rosados ó de color frambuesa.

DIORITA: Roca plutónica de color verde oscuro; constituida por plagioclasas u hornablendas, biotita ó piroxenos.

DOLOMITA: Es un mineral que forma cristales blancos ó coloreados desde transparentes a translúcidas. Su composición es CaMg(OH)_2 .

EPIPIDOTO: Es un silicato hidratado de aluminio, calcio y hierro, monoclinico propio de las rocas cristalinas y metamórficas.

$\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_3(\text{SiO}_4)_3\text{OH}$.

EFUSIVAS: Es el término aplicado a las rocas ígneas que se encuentran inyectadas en el interior de la tierra.

FELDESPATOS: Grupo de minerales formadores de rocas, son derivados de la sílice y muy abundantes.

FELDESPATOIDES: Son minerales alumino-silicatos de sodio, potasio ó calcio; similares en composición a los feldespatos, pero contienen menor proporción de sílice.

FENOCRISTAL: Término aplicado a rocas ígneas con cristales grandes y ordinariamente visibles.

FILONES: Es una masa de mineral situada entre capas de terrenos diferentes, son el resultado del relleno por distintos minerales de las grietas de la corteza terrestre en un sentido inclinado muy próximo a la vertical.

FISURA: Es un corte, quiebre ó fractura extensa en las rocas.

FLUORITA: Es un mineral isométrico; CaF_2 , es la principal fuente del fluor.

GRAFITO: Mineral de color negro a gris plomo, con brillo metálico muy blando y untuoso. Compuesto casi exclusivamente de carbono.

GRANATES: Grupo de minerales silicáticos del sistema cúbico.

GRANITO: Es la más difundida e importante roca eruptiva; esencialmente está constituida por una mezcla granulosa de tres minerales; feldespatos, cuarzo y mica.

GRANODIORITA: Roca plutónica compuesta de cuarzo, calcio, ortoclasa con biotita y hornablenda ó piroxeno como minerales oscuros.

GLAUCONITA: Mineral verde relacionado con las micas, esencialmente es un silicato de hierro y potasio; muy comun en rocas sedimentarias.

GRAVAS: Término aplicado a piedra machacada cuyo tamaño no excede a unas 2 pulgadas de diámetro medio.

HEMATITA: Es un mineral hexagonal rómbico, principal derivado del hierro. Su composición es Fe_2O_3 .

HIPERSTENA: Son minerales que forman parte de los piroxenos.

HORNABLENDA: Es un mineral del grupo de los anfiboles; su composición es $(\text{CaNa})_3 \text{MgFe}$.

ILMENITA: Mineral hexagonal rómbico, principal derivado del titanio.

Su fórmula es FeTiO_3 .

LACOLITAS: Cuerpo intrusivo que forma una especie de cúpula sobre las demás rocas.

LAHARS: Derrumbes ó lodos de materiales pirogenéticos en las faldas de un volcán.

LAPILLI: Eyección volcánica que varía de 4 a 32 mm. de diámetro.

LEUCITA: Mineral pseudo-isométrico, se encuentra en rocas volcánicas ricas en potasio. Su composición es $\text{KAl}_2\text{Si}_2\text{O}_6$.

LIMAS: Depósitos sedimentarios que consisten esencialmente de carbonato de calcio. Por calcinación producen la lima, que es el óxido de calcio. (Cal).

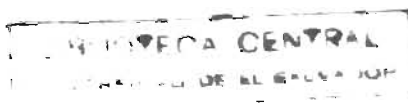
LIMONITA: Término genérico para el óxido de hierro hidroso oscuro; específicamente identificado.

LITIFICACION: Proceso por el cual los materiales adquieren consistencia de piedra.

MAGNETITA: Mineral de hierro del grupo Fe^{2+} Fe_2O_4 . Isométrico negro, comunmente octahédrico. Frecuentemente es un accesorio mineral de las rocas ígneas.

MARCASITA: Son piritas de hierro de color blanco y composición S_2Fe .

MANTO: Veta mineral delgada y horizontal.



MELILITAS: Es un grupo mineral de fórmula general $(MgAl)(AlSi)_2O_7$.

MICA: Grupo mineral consistente de filosilicatos con una estructura laminada. La fórmula general del grupo es: $(K, NaCa) (Mg, Fe, Li, Al)_{2-3} (AlSi)_4O_{10}(OH, F)_2$.

MICROCLINA: Mineral miembro del grupo de feldespatos, triclinico y dimorfo. Muy común en rocas de granito.

MOSCOVITA: Mineral miembro del grupo de las micas, puede presentarse en color verde, rojo, blanco o ligeramente pardo.

NEFELINAS: Mineral hexagonal de composición $(SiO_4Al)Na$. Se presenta en cristales incoloros y transparentes o bien turbios y diversamente coloreados.

OBSIDIANA: Forma vítrea en que se presentan varias rocas volcánicas. Generalmente son negras o de color gris, la mayoría son de composición riolítica.

OLIVINAS: Son soluciones sólidas de fosterita (Mg_2SiO_4) con fayolita $(FeSiO_4)$. Su composición se expresa en porcentaje mol de sus componentes.

OPALO: Mineral amorfo usado como una gema.

ORTOCLASA: Mineral miembro del grupo de los feldespatos; monoclinico muy común en las rocas graníticas. Su composición es $KAlSi_3O_8$.

PIROCLASTICO: Término general aplicado a materiales volcánicos que

han sido explosivas o aireadamente arrojados por un volcán, Se aplica también a rocas formadas por este material.

PIROGENETICO: Aplicado a rocas ígneas, usualmente desarrolladas a altas temperaturas.

PLUTONICAS: Serie de rocas que provienen de un mismo material original a través de varias capas metamórficas.

POMEZ: Lava volcánica excesivamente celular y vítrea; generalmente de composición riolítica.

SANIDINA: Es una variedad de la ortoclasa.

SERPENTINA: Mineral rómbico de color amarillo a verde oscuro, fibroso u hojoso; en su mayor parte se ha originado a partir de la olivina. Su composición es: $\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_6\text{Mg}_6$.

SIDERITA: Mineral de CO_3Fe , comunmente contiene magnesio y manganeso. Es un meteorito de hierro.

SODALITA: Mineral isométrico: $\text{Na}_4\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3\text{Cl}$.

TALCO: Mineral que se presenta en masas escamosas, hojosas de color blanco, verdoso o amarillo. Son untuosos y suaves al tacto. Químicamente es un silicato magnésico hidratado.

TITANITA: Mineral monoclinico. CaTiSiO_5 .

TRACITAS: Roca extrusiva compuesta esencialmente de feldespatos aléaticos y una cantidad menor de biotita, hornablenda y piroxenos.

TRAQUITAS: Roca efusiva moderna.

TRIDIMITAS: Mineral trimórfico, con cuarzo y cristobalita. Hexagonal a alta temperatura y ortorómbico a baja.

TOBA: Roca de origen volcánico; amarilla, gris ó parda; también es una roca de origen químico compuesta de carbonato de calcio ó sílice.

TURMALINA: Mineral trigonal que puede tener todos los colores aunque en la mayoría de casos es negro y rara vez incoloro. Químicamente es un silicato borado o hidratado de aluminio con litio, magnesio ó - hierro.

VESUBIANITA: Mineral tetragonal, muy común encontrársele con arcillas metafosforeadas. Su composición es $\text{Ca}_{10}\text{Al}_{14}(\text{Mg,fe})_2(\text{SiO}_4)_5(\text{Si}_2\text{O}_7)_2(\text{OH})_4$.

VETA: Ocurrencia de mineral, usualmente diseminado a través de una cantidad de materia o mineral (Ganga).

VIDRIO: Mezcla de ácido silícico y óxidos metálicos; transparente a - la luz.

VIVIANITA: Tierra férrea azul, monoclinica y de fórmula $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$.

YESO: Mineral monoclinico, generalmente laminar o tubular. Su composición es $\text{SO}_4 \text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

ZEOLITAS: Grupo de minerales bien cristalizados; incoloros, blancos o de colores claros. Son silicatos hidratados que contienen además de aluminio, calcio, sodio y raramente bario.

ZOISITA: Mineral ortorómbico encontrado en rocas metamórficas.

CAPITULO 2

"DETERMINACION DE LOS ELEMENTOS QUIMICOS CONSTITUYENTES DE LA LAVA VOLCANICA"

2.1- SELECCION DEL METODO UTILIZADO PARA LA DETERMINACION DE LA COMPOSICION QUIMICA DE LA LAVA VOLCANICA.

Un método experimental debe poseer varias características, para llegar a ser usualmente utilizado en el análisis de rocas y silicatos; estas características son:

- 1) Debe ser simple en su operación
- 2) Debe ser suficientemente sensible
- 3) Debe de estar relativamente libre de interferencias, o métodos adecuados deberán estar disponibles para la corrección de tales interferencias.
- 4) Debe ser suficientemente rápido para permitir que gran número de análisis sean efectuados rutinariamente.
- 5) Debe ser preciso y exacto.

De todas las técnicas de instrumentación de que actualmente se dispone, la espectrofotometría por absorción atómica es una de las que satisfacen todos los requerimientos anteriores, debido a esto, se seleccionó para la determinación de la composición química de la lava volcánica de los lugares escogidos para el muestreo que fueron Quezaltepeque y San Miguel .

2.2- DESCRIPCIÓN DEL PRINCIPIO DE LA ESPECTROFOTOMETRIA POR ABSORCIÓN ATÓMICA.

El principio básico de Absorción Atómica puede describirse como el inverso de los métodos de emisión para la determinación de elementos metálicos.

En todas las técnicas de emisión (llama, chispa, rayos X, etc), la muestra se excita de algún modo para hacer que ésta emita radiación de interés; al mismo tiempo que emite otro tipo de radiación que no es de interés. Mediante un sistema de filtros, se selecciona entonces la radiación con la que se va a trabajar; se mide la intensidad de dicha radiación y se compara con patrones para determinar así la concentración del elemento buscado en la muestra. En absorción atómica, el proceso se invierte; el elemento de interés en la muestra no se excita, sino simplemente se disocia de sus enlaces químicos y se coloca en un estado no excitado, no ionizado y en su estado mínimo de energía, condiciones en las cuales es capaz de absorber radiación emitida en líneas discretas de ancho de banda angosta (las mismas líneas que serían emitidas por el elemento al excitarse).

La disociación del elemento de sus enlaces químicos se efectúa quemando la muestra en una llama, por lo que el diseño del quemador es un factor crítico en un sistema de absorción atómica.

Las líneas de emisión que deberán ser absorbidas por la muestra, se logran generalmente mediante lámparas de cátodo hueco que son fuentes llenas de argón o neón a muy baja presión, y que tienen el cátodo fa

bricado o revestido por el elemento que se va a analizar. Estas lámparas solo emiten el espectro del elemento buscado y el del gas de relleno.

Para separar la radiación de interés del elemento a determinar de la no deseada, se pasa el espectro de emisión a través de un filtro o monocromador, que está ajustado para dejar pasar solamente la radiación buscada y rechazar las demás.

La manera mas simple de realizar el principio de absorción atómica se muestra en la figura 2.1-a . La luz proveniente de una lámpara de cátodo hueco pasa a través de la llama, después de la cual, la longitud de onda de resonancia (que corresponde a transiciones de un estado de energía mínimo a un nivel mas alto de energía), se aísla mediante un monocromador o filtro y luego incide sobre el fotodetector y pasa al sistema electrónico. Este método se conoce como sistema de haz continuo, pues la luz, tanto de la lámpara como de la llama es continuo y produce por tanto una corriente directa o continua en el detector.

El sistema de haz continuo presentó problemas desde el comienzo debido a la emisión de la llama. En absorción atómica la llama es considerada idealmente como una cámara de muestra calentada que no debería emitir radiación, y sin embargo no es así ya que sí tiene emisión. Por esta razón, se desarrolló el sistema conocido como de haz simple alterno que se muestra en la figura 2.1-b; en el cual la luz de la fuente se rebana en tanto que la de la llama se deja inalterada.

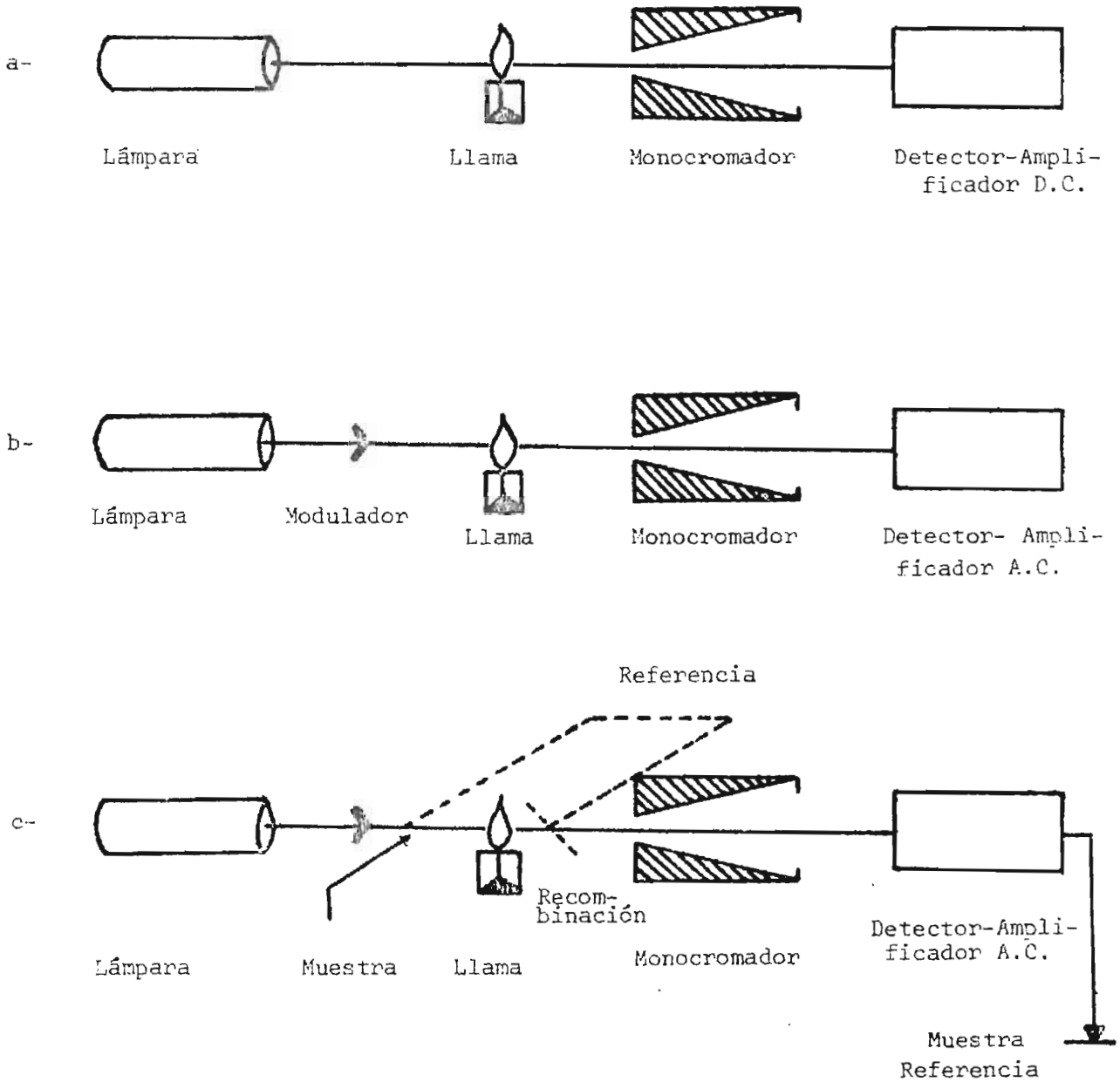


Figura 2.1 - Esquema simplificado del principio de Absorción Atómica

- a) Sistema de haz continuo.
- b) Sistema de haz simple alterno.
- c) Sistema de haz doble alterno.

La luz rebanada produce entonces una corriente alterna en el detector, y a esto se debe el nombre de haz simple alterno. El circuito electrónico amplifica únicamente la señal alterna e ignora la que proviene de la llama. El rebanador puede ser óptico, pero el mismo efecto se puede lograr al operar la lámpara con una corriente pulsante.

Existe también el sistema de haz doble alterno como el mostrado en la figura 2.1-c . En este caso el rebanador consiste en un espejo recortado que hace pasar alternativamente el haz a través de la llama y fuera de ella. Los haces de muestra y referencia se unen y se toma la relación entre los dos. (11)

2.3- PREPARACION Y ANALISIS QUIMICO DE LAS MUESTRAS DE LAVA VOLCANICA:

El análisis de rocas, y por consiguiente de lava, consiste en la determinación de cada uno de los elementos minerales contenidos en ella. Por ser el ión oxígeno el más abundante en las rocas, los constituyentes elementales suelen expresarse por tanto, en porcentaje de óxidos, de manera que el total corresponda aproximadamente al cien por ciento del peso de la muestra calcinada. Otra forma alternativa de presentar los resultados sería expresándolos como tanto por ciento de los distintos elementos.

Los análisis se han efectuado en dos tipos de muestras; una sometida a tratamiento de purificación y otra sin tal tratamiento. El método experimental de análisis seguido comprendió los siguientes pasos:

- a) Recolección de las muestras,
- b) Preparación de las muestras,
- c) Determinación de la composición química de las muestras de lava volcánica, mediante espectrofotometría por absorción atómica.

A continuación, se especifica detalladamente cada uno de los pasos realizados en la preparación y análisis de las muestras.

2.3.1- RECOLECCION DE LAS MUESTRAS.

Como se indicó en el Capítulo 1, los lugares seleccionados para la recolección de las muestras de lava, fueron los depósitos del volcán de San Miguel en la zona oriental y los del volcán de San Salvador en la zona central.

El aspecto superficial de los depósitos, es en ambos lugares, de color negro grisáceo y de una consistencia muy porosa; existiendo también afloramientos de lava de zonas mas profundas, de color gris claro y consistencia muy compacta.

La recolección de las muestras se efectuó con la ayuda del "Centro de Investigaciones Geotécnicas"; habiéndose realizado en una forma aleatoria en diferentes puntos de la superficie de los depósitos, por presentar esta lava la porosidad adecuada para las pruebas a realizar.

2.3.2- METODOLOGIA UTILIZADA EN LA PREPARACION DE LAS MUESTRAS DE LAVA.

Los pasos seguidos en la preparación de las muestras para efectuar el análisis químico son los siguientes:

- 1º Trituración y tamizado.
- 2º Eliminación del agua absorbida: $H_2O(-)$.
- 3º Eliminación de la materia orgánica y del agua de combinación: $H_2O(+)$.
- 4º Purificación.
- 5º Fusión y Solubilización.

TRITURACION Y TAMIZADO.

La trituración de la lava, se llevó a cabo en un triturador de mandíbula, y en seguida el producto triturado, se hizo pasar por un molino de disco.

Para la separación de partículas por tamaños, se usaron tamices de la serie Tyler· habiéndose escogido la porción de partículas retenidas entre las mallas 200/325 por ser la correspondiente a partículas del tamaño adecuado para la fusión de la lava. (8)

ELIMINACION DEL AGUA ADSORBIDA: $H_2O(-)$

El H_2O , los iones OH^- y los demás constituyentes son partes integrantes de la muestra y deben determinarse como una parte mas del análisis. La pérdida de peso a $212^\circ F$ ($100^\circ C$) se suele expresar como agua adsorbida o como $H_2O(-)$ y el procedimiento para su eliminación se -

efectúa de la siguiente manera: Se seca un crisol de aluminio o porcelana y se deja enfriar en un desecador. Se pesa el crisol y se pone en él una cantidad adecuada de la muestra tamizada. Se vuelve a pesar y se coloca de 10 a 16 horas en una estufa regulada a temperatura constante comprendida entre 212 y 230°F (100°C - 110°C). Nuevamente se pasa al desecador y una vez frío se pesa. Los cálculos se efectúan de la siguiente manera: (8,9)

$$\% \text{ humedad adsorbida: H}_2\text{O}(-) = \frac{\text{Pérdida de peso}}{\text{Peso de la muestra}} \times 100$$

ELIMINACION DE MATERIA ORGANICA Y AGUA DE COMBINACION (PERDIDAS POR IGNICION).

La pérdida de peso de la muestra comprendida entre 212°F y una temperatura máxima entre 1472 y 1832°F, se expresa como materia orgánica y agua de combinación. Frecuentemente las pérdidas se refieren al peso con que queda la muestra después de su desecación a 212°F, - excluyendo así el agua adsorbida del total del 100% . (8)

PURIFICACION.

Para la purificación de las muestras se hicieron dos tipos de lavado:

- a) Lavado con agua a 176°F (80°C).
- b) Lavado con solución de HCl 10% V/V.

Con el objeto de comparar el efecto de la purificación con los lava-

dos anteriores, se escogieron dos muestras, una proveniente de San Miguel y la otra de Quezaltepeque, a las cuales no se les realizó el tratamiento de lavado. También se eligió una tercera muestra proveniente de San Miguel; la cual fue sometida al siguiente proceso:

- 1º Selección de un gramo de muestra.
- 2º Lavado con 50 ml de agua destilada a 176°F.
- 3º Lavado con 50 ml de HCl 10% V/V.
- 4º Lavado con 40 ml de agua destilada (para eliminar el ácido - residual).
- 5º Filtración al vacío.
- 6º Secado de 212 a 230°F hasta peso constante.

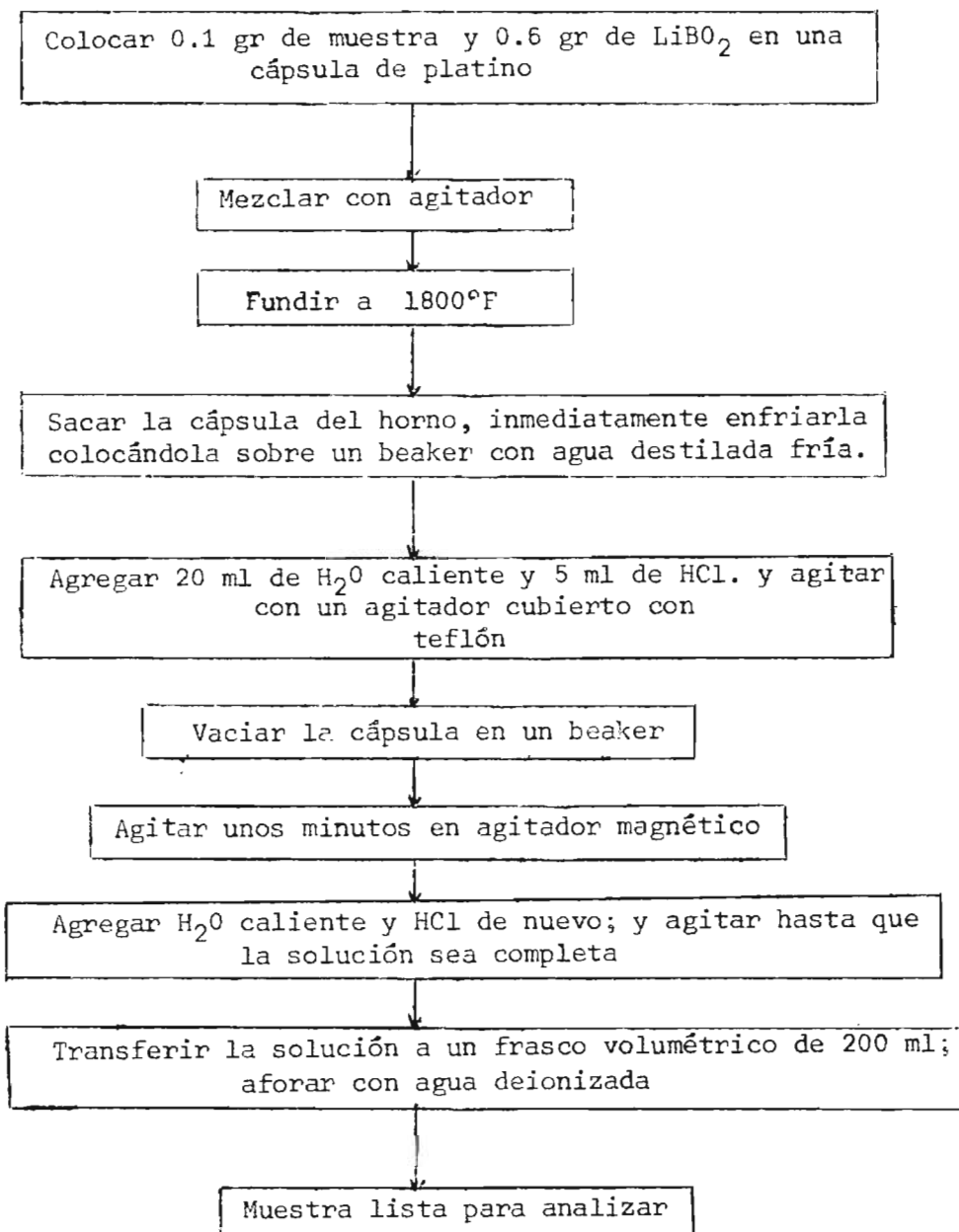
El objetivo del lavado con agua a 176°F, es provocar la eliminación de sustancias orgánicas e inorgánicas solubles en agua; tales como sales de sodio, potasio, calcio, etc. En el lavado con ácido clorhídrico se pretende eliminar los óxidos que puedan ser atacados por el ácido; tales como óxidos de sodio, de potasio y otros.

El lavado final con agua, elimina el HCl residual que pudo haber quedado retenido en el material.

FUSION Y SOLUBILIZACION.

Este proceso se realizó mediante el mecanismo de fusión con metaborato de litio; el cual se presenta en el esquema 2.1

ESQUEMA 2.1. PROCEDIMIENTO PARA LA FUSION Y DISOLUCION DE LAS MUESTRAS DE LAVA VOLCANICA.



2.3.3- DETERMINACION DE LA COMPOSICION QUIMICA DE LA LAVA VOLCANICA MEDIANTE ESPECTROFOTOMETRIA POR ABSORCION ATOMICA.

A las muestras de lava fundidas y solubilizadas tal como se indica en el esquema 2.1, se le determinó su composición química utilizando para tal fin un equipo de absorción atómica, habiéndose determinado los siguientes elementos: silicio, aluminio, hierro, calcio, magnesio, sodio y potasio; por ser estos elementos los mas abundantes en este tipo de rocas; segun los datos reportados en la literatura petrográfica.

Los análisis mediante espectrofotometría por absorción atómica es -
tán condicionados a las especificaciones particulares del mismo -
en cuanto a su manejo y condiciones de operación.

En la absorción atómica el sistema de lectura está diseñado de una -
manera tal, que al efectuar los análisis, se cumple con la Ley de -
Beer; es decir, que la concentración es proporcional al logaritmo ne-
gativo de la absorción por lo cual, se obtiene medidas con una rela-
ción lineal en absorbancia, o incluso calibrados directamente en con-
centración. Basándose en la característica anterior, las determina-
ciones se realizan comparando las muestras en soluciones acuosas, con
una serie de soluciones patrón de composición conocida, las cuales se
preparan en idénticas condiciones que la solución problema con el -
fin de evitar toda clase de interferencias.

Los resultados de los análisis se reportan en las tablas 2.1 , 2.2 y
2.3 bajo la forma de porcentajes de óxidos; calculados mediante la -

siguiente relación: (10)

$$\text{Porcentaje de óxido} = \frac{C \times V \times \text{f.d.} \times \text{f.c.}}{W} \times 100$$

En donde:

- C : Concentración del elemento en la solución muestra en mg/lit;
leída en el equipo de absorción atómica.
- V : Volumen de la solución muestra no diluida en ml.
- f.d.: Factor de dilución. (Volumen de la solución de muestra diluida, en ml/volumen de alicuota tomada para hacer la dilución, en ml).
- f.c.: Factor de conversión de elemento a óxido. (Peso molecular del óxido/peso atómico del elemento).
- W : Peso de la muestra en grs.

2.4- RESULTADOS DE LOS ANALISIS DE MUESTRAS DE LAVA VOLCANICA DE SAN MIGUEL Y QUEZALTEPEQUE.

TABLA 2.1. COMPOSICION QUIMICA DE LA LAVA DE QUEZALTEPEQUE.
(Volcán de San Salvador)

Elemento	Oxido	Porcentaje de Oxido
Si	SiO ₂	51.360
Al	Al ₂ O ₃	15.120
Fe	Fe ₂ O ₃	16.016
Ca	CaO	1.769
Mg	MgO	1.726
Na	Na ₂ O	3.687
K	K ₂ O	1.603
Pérdidas por ignición		1.510
T o t a l		92.791

TABLA 2.2 . COMPOSICION QUIMICA DE LA LAVA DE SAN MIGUEL.

Elemento	Oxido	Porcentaje de Oxido
Si	SiO ₂	47.080
Al	Al ₂ O ₃	19.278
Fe	Fe ₂ O ₃	10.468
Ca	CaO	3.598
Mg	MgO	2.756
Na	Na ₂ O	2.835
K	K ₂ O	0.844
Pérdidas por Ignición		0.875
T o t a l		88.834

TABLA 2.3. COMPOSICION QUIMICA DE LA LAVA DE SAN MIGUEL

PURIFICADA

Elemento	Oxido	Porcentaje de Oxido
Si	SiO ₂	47.080
Al	Al ₂ O ₃	19.278
Fe	Fe ₂ O ₃	10.582
Ca	CaO	3.448
Mg	MgO	2.723
Na	Na ₂ O	2.781
K	K ₂ O	0.822
Pérdidas por Ignición		0.875
T o t a l		87.589

Como puede observarse, los datos presentados en las tablas anteriores están comprendidos dentro de los límites reportados para este tipo de rocas (Ver tabla 1.3).

El tratamiento de purificación efectuado en la lava de San Miguel, no causó ninguna variación apreciable en su composición, lo cual - indica la ausencia de materiales solubles tanto en agua como en - una solución diluida de ácido clorhídrico.

Podría intentarse otros tratamientos con soluciones más concentradas de ácido, pero debido a limitaciones de tiempo, materiales y equipo no ha sido posible llevarlos a cabo.

CAPITULO 3

" FUNDAMENTOS TEORICOS SOBRE LAS PROPIEDADES ADSORBENTES, FIL- TRANTES Y DE AISLAMIENTO TERMICO A EVALUARSE EN LA LAVA VOLCANICA "

3.1- FUNDAMENTOS TEORICOS SOBRE PROCESOS DE ADSORCION.

Ciertos materiales sólidos tienen la propiedad de retener selectivamente sobre su superficie partículas sólidas, líquidas o gaseosas; a este proceso se le conoce como adsorción.

3.1.1- ADSORCION EN SUPERFICIES SOLIDAS.

Toda superficie sólida observada desde un punto de vista microscópico, presenta irregularidades sobre su área. Las regiones de irregularidades son particularmente susceptibles a campos de fuerza residuales y los átomos superficiales del sólido pueden atraer otros átomos o moléculas de cualquier fase gas o líquida que los rodee. También a causa de su estructura atómica, las superficies de los cristales puros tienen campos de fuerzas no uniformes con sitios o centros activos donde la adsorción es mayor.

La adsorción presenta dos tipos:

- a) Adsorción Física
- b) Adsorción Química

a) **Adsorción Física:** Este tipo de adsorción se asemeja al proceso de condensación. Se caracteriza porque las fuerzas que atraen

las moléculas del fluido a la superficie sólida son débiles, y el proceso va siempre acompañado de una liberación de calor del mismo orden de magnitud que el calor de condensación; 900 a -- 9000 BTU/lbmol. Un rápido equilibrio de carácter reversible se establece entre las moléculas del fluido y del sólido a causa - de los bajos requerimientos caloríficos.

- b) **Adsorción Química:** Es un tipo específico de adsorción y envuelve fuerzas mucho más fuertes que la adsorción física. De acuerdo a Langmuir, las moléculas adsorbidas son mantenidas en la - superficie por medio de fuerzas de valencia semejantes a las - que ocurren entre los átomos en las moléculas. Esta adsorción va acompañada por calores de la misma magnitud que los calores de reacción química: 9000 a 180000 BTU/lb mol.

Un detalle importante en adsorción química, es que su magnitud no excede a aquella correspondiente a una capa monomolecular, debido a que - las fuerzas de valencia que mantienen las moléculas en la superficie disminuyen rápidamente con la distancia. (12)

3.1.2- CARACTERISTICAS GENERALES DEL PROCESO DE ADSORCION.

El hecho característico del proceso de adsorción es la afinidad observada entre el soluto y el adsorbente. La afinidad no es sin embargo el único factor que determina el grado de retención del soluto, hay un equilibrio dinámico que envuelve al soluto, al adsorbente y al solvente utilizado para la disolución y/o el arrastre del soluto. El

solvente así como el soluto, es siempre adsorbido de la solución. Hay una competencia entre las partículas de soluto y solvente mientras chocan para ocupar la superficie del adsorbente. Entre mas fuertemente es adsorbido el solvente, mayor es la competencia para la adsorción del soluto. El adsorbente entonces debe exhibir afinidad preferencial o selectiva para los diferentes solutos, y simultáneamente, el solvente debe disolver los solutos y proporcionar una fuerza impulsora para la migración de éstos cuando el proceso se realiza en una columna rellena con el adsorbente utilizado.

a) Variación de la adsorción con la concentración del soluto.

Es posible seguir cualitativamente el mecanismo por el cual el proceso de adsorción es desarrollado. Si consideramos por ejemplo, que la isoterma típica de adsorción (Fig. 3.1) para un soluto A sigue la ecuación:

$$m = K C^{1/n} \quad (3-1)$$

donde m: Cantidad de soluto adsorbido por unidad de masa de adsorbente.

C: Concentración en equilibrio de soluto

K: Constante característica del sistema soluto-solvente-adsorbente.

n: Constante característica del sistema cuyo valor usualmente está entre 1 y 2.

se podría entonces calcular la cantidad de adsorbente requerido para

La viscosidad de la solución es necesariamente un factor importante para determinar la velocidad de adsorción. Es probable que la disminución de la viscosidad cuando la temperatura aumenta, sea la razón principal de que la decoloración de soluciones por adsorbentes se efectúe de ordinario a alta temperatura.

c) Influencia del adsorbente sobre la adsorción en solución.

Puesto que el soluto tiene que trasladarse en un disolvente mas o menos viscoso para llegar hasta la superficie del adsorbente, los caracteres de eficiencia de éste en solución son enteramente distintos de los del adsorbente que ha de ser utilizado para adsorción en fase gaseosa.

Los adsorbentes que se usan en soluciones obran principalmente por medio de la superficie externa que queda al descubierto.

Para que sea aprovechable la superficie interna, debe ser accesible por medio de capilares de mayor diámetro que los indispensables para la rápida adsorción de gas. La difusión del soluto a la superficie interna se efectúa de manera relativamente lenta a través del disolvente y es muy lenta en capilares de diámetro pequeño. Además, la resistencia física del adsorbente es mucho menos importante para la adsorción de líquidos por sólidos que para la adsorción en fase de vapor.

Sucede con frecuencia que la adsorción en solución carece de especificidad. Esto está de acuerdo con la teoría de que la función del sólido es suministrar una gran superficie de interfa-

se en la que pueda efectuarse la adsorción, mas bien que producir un efecto específico en el soluto. Los datos que se hallan en la literatura indican claramente que se pueden hacer pocas generalizaciones acerca del efecto específico de los sólidos en la adsorción en solución.

d) Influencia del soluto sobre la adsorción en solución.

Con disolventes que son adsorbidos casi en igual cantidad, las concentraciones de soluto que se requieren para producir determinado grado de adsorción, están según Freundlich, aproximadamente en la misma razón que las solubilidades de los solutos en esos solventes.

Otro hecho conocido, es que la adsorción de sustancias orgánicas en soluciones acuosas, aumenta de manera notable y regular según se asciende en la serie de homólogos. Sin embargo, hasta ahora no se ha propuesto ninguna teoría que tome en cuenta todos los hechos conocidos acerca de la influencia de los solutos sobre la adsorción en solución. En general, la adsorción de electrólitos por sólidos es mucho menor que la adsorción de no electrólitos. La adsorción de ácidos suele ser mayor que la de sales.

Con frecuencia ocurre que un ión de un electrólito es adsorbido mas fuertemente que el otro ión por determinados adsorbentes. En unos casos, los cationes son adsorbidos mas fuertemente que los aniones; otras veces ocurre lo contrario. Esta adsorción preferencial de iones casi siempre es efecto de una doble des-

composición, en la que uno de los iones del adsorbente es desalojado hacia la solución, o un ión de alguna impureza que hay sobre el adsorbente es desalojado e ingresa en la solución.(13)

3.1.3- ASPECTOS PRACTICOS SOBRE ADSORCION A NIVEL INDUSTRIAL.

A) Generalidades.

Al estudiar la adsorción industrial conviene distinguir entre adsorción estática, en que el adsorbente y la fase gaseosa o líquida que contiene el soluto son estacionarios, salvo las corrientes naturales de convección ; y la adsorción dinámica, en que el adsorbente está en contacto con una corriente forzada del soluto, ya sea por sí solo o mezclado con una cantidad insignificante de líquido adsorbido.

Las curvas de equilibrio isotermas se aplican a la adsorción estática. En la práctica nunca se lleva al equilibrio la adsorción dinámica. En el caso de ésta última se debe considerar no solo la cantidad de soluto retenida (concentración en el adsorbente), sino también la eficiencia de adsorción. La concentración del soluto en el adsorbente es función directa del tiempo transcurrido desde el comienzo de la operación.

La figura 3.2 presenta una curva típica de adsorción dinámica que muestra la concentración del soluto en el líquido en comparación con la concentración en el adsorbente. Al principio, el soluto es extraído totalmente; pero luego, en determinado momento

to. la concentración del líquido de salida aumenta mas o menos súbitamente hasta que, finalmente, es igual a la de entrada (Punto s en la figura 3.2).

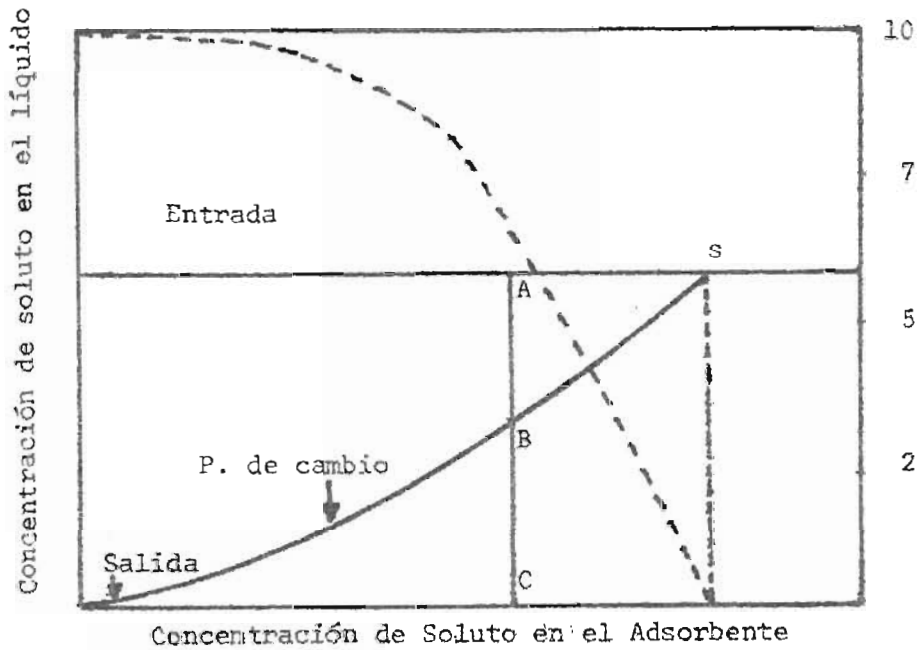


Figura 3.2 - Curva de Eficiencia para un proceso de Adsorción Dinámica

La eficiencia de adsorción se expresa mediante la razón AB/l que es la cantidad extraída por el adsorbente sobre la cantidad de soluto que había en el líquido antes del tratamiento (línea de trazos en la figura 3.2).

En el punto S la eficiencia es cero, se alcanza el equilibrio y la concentración en el adsorbente llega a su punto máximo que corresponde al equilibrio o valor de saturación en las

diciones existentes. Así, los puntos finales de todas las curvas de eficiencia son determinados por los puntos de equilibrio.

Para operaciones en fase líquida, en lugar de representar gráficamente la concentración, es mas conveniente trazar la curva del rendimiento; éste es normalmente el volumen de líquido pasado por unidad de masa de adsorbente.

Tanto la forma general, como los valores de coordenadas de las curvas de la figura 3.2 pueden variar considerablemente según el sistema de adsorbente y soluto que se considere. El punto de cambio de la curva de eficiencia, puede señalar un cambio - más o menos súbito; en muchos casos no hay cambio brusco, sino que la curva de eficiencia decrece continuamente desde un máximo inicial. En la práctica, el adsorbedor (recipiente que contiene el adsorbente), se separa de la corriente cuando la eficiencia desciende a determinado valor.

b) Factores de Control.

Al diseñar instalaciones para adsorción, se han de tener en cuenta los efectos de muchas variables interdependientes y con frecuencia es necesario transigir en algunos puntos. Estas variables son:

1) Temperatura: Puesto que a presión constante el grado de adsorción disminuye cuando aumenta la temperatura, al aumentar ésta habrá liberación de soluto (desorción). Esta regla tiene algunas excepciones, pero estos casos se deben a procesos dis-

tintos de la adsorción verdadera, tales como la reacción química, solución sólida, disociación, etc. Es de notar que en operaciones en fase líquida, cualquiera que sea el efecto en el valor de saturación, el aumento de temperatura acrecienta la rapidez con que se alcanza este valor, debido a la disminución de la viscosidad y al aumento en la rapidez de difusión.

En la adsorción dinámica, el aumento de temperatura por regla general, no solo reduce el valor de saturación sino también disminuye la eficiencia. Toda la curva de eficiencia se vuelve mas baja, la concentración correspondiente al punto de cambio disminuye y el cambio en este punto se hace menos marcado conforme aumenta la temperatura.

2) Densidad: A temperatura constante, la adsorción disminuye cuando disminuye la densidad de la solución. Por consiguiente, la reducción de la densidad, ya sea por evacuación o mediante una corriente de gas que contenga poco o nada del soluto, es uno de los medios de efectuar la desorción. En la adsorción dinámica, la reducción de la densidad hace que retrocedan el punto de cambio y el punto de saturación.

3) Tamaño de Partícula: Tanto la eficiencia como la concentración en el punto de cambio se incrementan con el aumento de espesor del lecho del adsorbente, pero el valor de saturación o de equilibrio permanece inalterado. Este efecto se reduce al aumentar el tamaño de las partículas que forman el lecho, y hay

un espesor mínimo, variable según la rapidez de la corriente, - por debajo del cual no hay punto de cambio.

4) Velocidad de la Corriente: Si aumenta la velocidad de flujo por unidad de masa de adsorbente, se produce el mismo efecto general en la curva de eficiencia que cuando se aumenta la temperatura, aunque no cambia el valor de equilibrio.

5) Disipación de Calor: Si no se disipa el calor generado por la adsorción, el aumento de temperatura puede perjudicar la eficiencia. En la adsorción dinámica, una parte del calor aumenta la temperatura del fluido y se disipa con la corriente.

Si el fluido tiene alto calor específico y la cantidad de soluto es pequeña, como sucede en operaciones en fase líquida, es insignificante el aumento de temperatura.

En operaciones en fase líquida, al primer contacto con el líquido se genera cierta cantidad de calor debido a la humedad que contiene el adsorbente.

6) Naturaleza del Adsorbente: Este factor es muy importante, ya que se observan diferencias en funcionamiento según el adsorbente que se esté utilizando.

7) Naturaleza del Soluta: Para un adsorbente dado, la adsorbabilidad de diferentes sustancias puede variar mucho, de suerte que en presencia de una mezcla de sustancias se efectúa la adsorción selectiva.

Aunque al principio de la operación sean adsorbidas varias sustancias simultáneamente, los adsorbatos que quedan retenidos con menor fuerza, son desalojados gradualmente y se obtiene una segregación según las densidades relativas de las sustancias en la mezcla. Si se pasa lentamente la mezcla por un lecho grueso de adsorbente por tiempo limitado, las sustancias son retenidas en capas sucesivas, la primera de las cuales contiene la sustancia mas adsorbible. Si se deja que prosiga la adsorción, las sustancias mas fuertemente adsorbidas llegan hasta las siguientes capas del lecho y provocan la desorción de las demás sustancias, hasta que todo el lecho contiene casi únicamente un soluto. La eficiencia de adsorción para esa sustancia disminuye a medida que la adsorción progresa. (13)

c) Procesos de Adsorción.

Hay dos métodos industriales de tratamiento por adsorción.

1º Percolación

2º Proceso por contacto.

LA PERCOLACION, consiste en pasar por una capa fija de adsorbentes en forma granular el líquido del que se han de extraer una o mas sustancias. Esta es una operación intermitente ya que es necesario cambiar periódicamente la carga ya gastada.

EL PROCESO POR CONTACTO, es aquel en el cual las partículas finas del adsorbente se mantienen en suspensión en la corriente -

de líquido, del que se separan por filtración luego que transcurre suficiente tiempo de contacto. Las partículas de adsorbente se mueven contra la corriente o en la dirección de ésta, según que se aplique o no el principio de contracorriente.

En el primer caso, la adsorción es dinámica y en el segundo estática si no hay turbulencia; como de continuo se suministra nuevo adsorbente al líquido para reponer el que se extrae de éste, la operación es continua.

En la adsorción en fase líquida, se emplea el método de percolación con adsorbentes de alto costo: la carga se regenera periódicamente. Aunque se podrían regenerar las partículas que se emplean en el proceso por contacto, por lo común no se hace tal cosa, y de ahí que los adsorbentes utilizados con este proceso suelen ser de bajo costo.

La regeneración o desorción (llamada también reactivación y revivificación), consiste en separar el soluto del adsorbente. En operaciones en fase líquida es preciso dejar que escurra el adsorbedor, y se debe lavar su interior y la carga de adsorbente con un disolvente adecuado para extraer la sustancia adsorbida. Se aplica luego calor para eliminar la humedad. (13)

3.1.4- CARACTERISTICAS DE LOS ADSORBENTES.

Un buen adsorbente debe llenar los siguientes requisitos:(14)

a) Debe ser virtualmente insoluble en el solvente para prevenir la -

disolución de la columna mientras el solvente es percolado a través de él. Esta característica restringe la cantidad de adsorbentes aconsejables para solventes acuosos y orgánicos. Debido a esto, solo los adsorbentes químicamente inertes tales como el carbón, alúmina y silicatos complejos, son ampliamente usados con todos los solventes comunes. Sin embargo, hay numerosas sustancias inorgánicas y muy pocas orgánicas que son usadas como adsorbentes en sistemas con solventes no polares.

- b) El adsorbente no debe interactuar, excepto por el mecanismo de adsorción, con el solvente o el soluto. Usualmente, algún conocimiento de los constituyentes de la muestra es requerido para poder seleccionar un adsorbente que no interactúe con ellos. Las anteriores son las reacciones obvias entre los solutos ácidos y los adsorbentes básicos comunes; tales como magnesia, óxido de calcio y carbonato de calcio. La neutralización de solutos alcalinos con solventes ácidos es encontrada en menos ocasiones.

Reacciones de precipitación son algunas veces envueltas, particularmente cuando los solutos son iones metálicos. Puesto que algunos adsorbentes son agentes secantes y catalizadores muy eficientes, pueden también encontrarse reacciones de deshidratación y polimerización.

- c) Aunque es una característica deseable, los adsorbentes no necesitan ser incoloros o blancos. La adsorción resuelve efectivamente solutos coloreados o sin color en adsorbentes coloreados o incoloros, el problema es determinar la posición de las diferentes zonas.

d) Indudablemente, la mayoría de los sólidos deben ser adsorbentes efectivos para ciertas muestras de mezclas, pero deben ser suficientemente baratos para desecharlos después de una sola aplicación. La economía llega a ser importante cuando se considera que relativo a las cantidades de solutos resueltos, grandes volúmenes de adsorbente puro son requeridos. Una consideración de costos no es demasiado importante si el adsorbente puede ser recuperado y usado de nuevo. Por algunas razones no explicadas, muchos procesos de adsorción no son completamente reversibles y el adsorbente usado llega a contaminarse.

Hasta la fecha, ha sido imposible obtener resultados idénticos con los mismos adsorbentes obtenidos de diferentes fuentes. La práctica común ha sido comenzar el trabajo experimental con suficiente adsorbente obtenido de una sola fuente para completar el trabajo; pero excepto para los procedimientos más exactos, esto no es necesario.

La fuerza de adsorción de los adsorbentes comunes es usualmente afectada en forma considerable por el contenido de humedad. Así, los tratamientos de control de ésta en la preparación de adsorbentes son importantes.

e) Las propiedades físicas de un adsorbente deben ser tales, que el solvente pueda ser percolado a través de la cama de adsorbente a una velocidad razonable; los factores conflictivos, tamaño de partícula y área superficial del adsorbente son involucrados. La capacidad de un adsorbente dado es inherentemente pequeña, direc

tamente proporcional al área de la superficie expuesta e inversamente proporcional al tamaño de la partícula. Debe procurarse proporcionar una superficie grande y uniforme de adsorbente para el proceso de adsorción; al mismo tiempo, consideraciones prácticas hacen necesario utilizar un tamaño de partícula suficientemente grande, de modo que las velocidades de flujo sean razonables. - Cuando se utilizan partículas de adsorbente muy pequeñas, surge la inconveniencia de que la fuerza de gravedad debe ser suplementada con una diferencia de presión entre los extremos de la columna para acelerar las velocidades de flujo.

La variación del tamaño de las partículas está comprendida en el rango de los 100 a 325 mesh de la serie Tyler de tamices. Aún así, las partículas pequeñas producen velocidades de flujo tan lentas que un coadyuvante de filtración es requerido: tierras diatomáceas, kiesselguhr y ciertas formas de sílica son buenos coadyuvantes ya que son adsorbentes débiles finamente divididos, inertes y muy porosos. Cuando se mezclan con adsorbentes más fuertes actúan como un inerte diluyente e incrementan la porosidad total de la cama adsorbente. Se mezclan con el adsorbente en relaciones de peso tan altas como 1:1 para obtener una cama porosa sin afectar apreciablemente las características de adsorción.

Los adsorbentes usados son casi siempre sin excepción, compuestos orgánicos e inorgánicos que contienen oxígeno; son hidrofílicos con una alta capacidad para adsorber agua y una ligera tendencia para adsorber

sustancias no polares. No son semejantes en actividad o en capacidad para adsorber solutos.

La tabla 3.1 que se presenta a continuación, enumera algunos de los adsorbentes hidrofílicos más comunes en orden creciente de su poder de adsorción. Las posiciones relativas de éstos en la tabla fueron de terminadas para los adsorbentes activados, los cuales se obtienen por medio de un secado a elevadas temperaturas.

TABLA 3.1 - ADSORBENTES HIDROFILICOS INORGANICOS

Carbonato de Sodio
Carbonato de Potasio
Carbonato de Calcio
Sulfato de Calcio
Fosfato de Calcio
Carbonato de Magnesio
Oxido de Calcio
Acido Salicílico
Silicatos de Magnesio
Carbón
Oxido de Magnesio
Oxido de Aluminio
Tierras de Füller (Diatomáceas
o Tierras de Infusorios).

3.2- FUNDAMENTOS TEORICOS SOBRE PROCESOS DE FILTRACION.

3.2.1- ASPECTOS GENERALES.

El elevado desarrollo industrial alcanzado en los últimos tiempos, ha hecho de la filtración una parte vital de casi todos los procesos industriales. Dado que la filtración es aceptada y aplicada en una gran

variedad de separaciones, es necesario definir exactamente a que tipo de separación se referirá este estudio; y es a la separación de partículas sólidas de una fase líquida. Sin embargo, está limitada a partículas sólidas no disueltas, y la separación es causada por el paso - forzado del líquido a través del medio filtrante poroso el cual retiene los sólidos.

La fuerza que hace pasar el líquido por el medio filtrante; es una diferencia de presión, la que puede ser proporcionada por la gravedad, por formación de vacío, por una corriente de aire comprimido ó por fuerza centrífuga.

Las partes esenciales de un filtro son:

- a) El medio poroso filtrante.
- b) El soporte permeable del medio.
- c) El dispositivo para el drenaje de sólidos.

La selección de un medio filtrante, es una operación muy importante y presenta el problema de que cada sistema que se va a filtrar posee caracteres propios, siendo imposible hacer generalizaciones. Sin embargo, un medio filtrante debe reunir las siguientes características:
(17,19)

- a) Capacidad de retener los sólidos sin obstruirse.
- b) Capacidad de impedir que las partículas densas penetren en sus poros, lo que aumenta la resistencia a la circulación.
- c) Química y físicamente inertes.

- d) Resistencia mecánica: evitar el desgaste y soportar presión.
- e) Resistencia mínima a la circulación del filtrado.

Al seleccionar un medio filtrante se dispone de varios tipos, entre ellos se encuentran los siguientes:

I. Medio Rígido

- a) Medio suelto
- b) Medio fijo

II. Medio Flexible

- a) Entretejido
- b) No entretejido

El medio filtrante del tipo suelto está compuesto de partículas de estructura rígida, y es el que interesa estudiar en este trabajo por ser precisamente el tipo en el cual podría ubicarse la lava volcánica. Presenta la ventaja de un bajo costo y fácil limpieza, pero tiene el inconveniente de que este tipo de medio filtrante puede usarse solamente en posición horizontal, y si no se permite la remoción de partículas gruesas, la limpieza de la superficie debe hacerse únicamente por medio de un lavado en corriente regresiva y sin disturbar el arreglo del lecho del filtro. (17).

3.2.2- COADYUVANTES DE FILTRACION.

Otro de los aspectos de interés con relación al trato de la lava volcánica en la filtración son los Coadyuvantes de Filtración; los

cuales se utilizan en filtraciones difíciles y están constituidos por partículas sólidas inertes que promueven la velocidad de filtración. Se encuentran en varios grados y en diferentes rangos de tamaño de partículas y superficie específica. Generalmente los materiales usados como coadyuvantes, son de origen volcánico; tal como los llamados "Perlitas" o como las Tierras Diatomáceas que tienen su origen en fósiles silíceos de pequenísimas plantas marinas . (18)

Cuando se seleccionan en forma apropiada y se dosifican en la proporción correcta, aumentan enormemente la filtrabilidad de algunas suspensiones. Su acción es esencialmente mecánica, y entre sus propiedades requeridas se encuentran las siguientes:

- a) Tamaño de Partícula: Se relaciona directamente con el trabajo de filtración; los filtros mas permeables tienen un tamaño promedio de partículas más grande. Un estrecho control, mantiene una claridad más alta a máxima velocidad.
- b) Permeabilidad: Es la característica fundamental que diferencia un grado de filtración de otro. Está estrechamente relacionada a la distribución del tamaño de partículas.
- d) Densidad: Esta propiedad es muy importante, pues cuando es demasiado baja se presenta el inconveniente de que se produce una excesiva compresibilidad la cual produce tapones, reduciendo o interrumpiendo el flujo de filtrado.

Los coadyuvantes son utilizados en filtros de operación continua y batch y se usan mezclados con la suspensión a filtrar, determinándo-



se las cantidades correctas por medio de pruebas en laboratorio o - por experiencias en tal operación. (18)

3.2.3- TEORIA DE FILTRACION.

Aunque se utilice muy raras veces en el diseño o proyecto de un filtro, la teoría de filtración es útil para interpretar los ensayos de laboratorio, para averiguar las condiciones óptimas para llevarlos a cabo y para predecir los efectos de las variaciones en las condiciones de funcionamiento. El empleo de la teoría de filtración es limitado, porque las características filtrantes deben determinarse siempre con el lodo o fango a tratar, siendo inaplicables los datos obtenidos con un material a la filtración de otro.

La filtración da como resultado la formación de una capa o torta de partículas sólidas sobre la superficie del medio poroso. Una vez que ha sido formada esta capa, su superficie actúa como medio filtrante, depositándose los sólidos que van aumentando el espesor de esta torta mientras el líquido claro pasa a través de ella. La torta se compone por consiguiente, de una masa voluminosa de partículas de forma irregular entre las que hay conductos capilares.

La filtración es primordialmente un problema de flujo de fluidos; siendo generalmente aceptado el punto de vista de que bajo condiciones de filtración, el régimen de flujo del filtrado a través del "cake" o torta y del medio filtrante es laminar. Además, la Ley de "Poiseuille" - señala que la velocidad de filtración es directamente proporcional a -

la presión aplicada. La ecuación de velocidad de filtración es la siguiente: (18)

$$U = \frac{dV}{A dt} = \frac{Pg_c}{\mu(R_c + R_f)} \quad (3-2)$$

En donde:

A = Area de filtración, (pie²)

g_c = Factor de conversión: 32.17 (lbm-pie/lbf-seg²).

P = Presión de filtración, (lbf/pie²): caída de presión a través del filtro.

R_c = Resistencia que opone la torta a la filtración, (1/pie).

R_f = Resistencia inicial del filtro (1/pie): Resistencia del medio filtrante.

U = Velocidad de filtración del filtrado fluyendo a través de la torta y el medio filtrante, (pie/seg).

dV/dt = Velocidad de filtración de flujo del filtrado, (pie³/seg).

μ = Viscosidad del filtrado, (lbs/pie-seg).

t = Tiempo de filtración, (seg).

El espesor y la resistencia de la torta se incrementa durante el período de filtración. En cualquier instante., la resistencia de la - torta depende de la masa de partículas sólidas depositadas sobre el medio filtrante como consecuencia del paso de cierto volumen de filtrado.

a) Filtración a Presión Constante.

En este tipo de filtración, la velocidad de flujo del filtrado

decrece. Las interrelaciones entre V y t, se expresan mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{t}{V} \frac{\mu \alpha \omega V}{2A^2 P g_c} + \frac{U R_f}{A P g_c} = K_1 V + C \quad (3-3)$$

En donde:

V = Volumen de filtrado, (pie³).

α = Resistencia específica, (pie/lbm). Deberá asumirse - constante o usar un valor promedio.

ω = lbs de sólido depositado/ pie³ de filtrado.

La ecuación (3-3) es aplicable a filtros de torta, sean éstos de operación continua o intermitente.(18)

b) Filtración a Velocidad Constante.

Durante esta filtración la presión se incrementa según crece el espesor de la torta, siendo la presión y el volumen de filtración las variables determinantes y sus interrelaciones son obtenidas en términos de P y V como variables mediante la ecuación: (18)

$$P = \frac{\alpha \mu \omega}{A^2 g_c} \left(\frac{dV}{dt} \right) V + \frac{\mu R_f}{A g_c} \left(\frac{dV}{dt} \right) = K_2 V + C_2 \quad (3-4)$$

o en términos de P y t como variables:

$$P = \frac{\alpha \mu \omega}{A^2 g_c} \left(\frac{dV}{dt} \right) t + \frac{\mu R_f}{A g_c} \left(\frac{dV}{dt} \right) = K_3 t + C_2 \quad (3-5)$$



c) Lavado de la Torta y del Medio Filtrante.

El lavado de la torta y del medio filtrante puede hacerse de dos maneras:

- a) Por desplazamiento
- b) Por difusión de masa.

En el lavado por desplazamiento, la cantidad de líquido que se usa es la suficiente para limpiar los espacios vacíos de la torta; y en el lavado por difusión de masa, se usa el líquido necesario para alcanzar el grado de limpieza deseado en el medio filtrante.

3.2.4- VARIABLES QUE AFECTAN EL PROCESO DE FILTRACION. (19)

a) Efecto de la Presión.

Cuando la torta se compone de partículas duras y granuladas que la hacen rígida e incompresible, un aumento de presión no produce ninguna deformación de las partículas y de sus intersticios. Por consiguiente, para tortas incompresibles la velocidad de filtración es directamente proporcional a la presión. Cuando la torta se compone de partículas muy blandas y fáciles de deformar, la velocidad es independiente de la presión.

b) Espesor de la torta:

Es un factor importante en la fijación de capacidad en el proyecto de un filtro. Se ha demostrado que despreciando la resis

tencia que ofrece el soporte, la velocidad media durante una filtración es inversamente proporcional a la cantidad de torta depositada.

Si la resistencia de la torta es alta con relación a la del medio filtrante, se alcanzará en consecuencia la capacidad más elevada de un filtro cuando el espesor de la torta sea cero. Si la resistencia es baja en relación a la del medio, se aumentará el espesor económico de la torta.

c) Efecto de la temperatura.

En la mayoría de las tortas incompresibles este efecto se manifiesta por su influencia sobre la viscosidad. Una elevación de la temperatura baja la viscosidad del filtrado y hace que la velocidad varíe inversamente a la viscosidad.

d) Efecto del tamaño de las partículas.

Pequeñas variaciones del tamaño de las partículas afectan la resistencia de la torta y los cambios mayores afectan la compresibilidad. La disminución del tamaño da como resultado menores velocidades de filtración y produce mejor rendimiento de filtrado.

e) Efecto del tipo de Medio Filtrante.

Al elegir un medio filtrante hay que buscar el término medio más conveniente entre la mayor abertura posible, con el objeto de reducir su obstrucción, y lo suficientemente cerrado para impe-

dir el excesivo derrame de partículas finas.

El efecto de la obstrucción del medio sobre la velocidad de filtración, es tan apreciable que en última instancia llega a causar su sustitución. Para tenerlo en cuenta hay que utilizar un coeficiente de seguridad al predecir las capacidades de los filtros.

f) Efecto del Contenido de Sólidos.

Este efecto está indicado en las ecuaciones de la filtración con la inclusión de ω que es el peso de los sólidos que forman la torta por unidad de volumen de filtrado.

Si se concentra o espesa una suspensión antes de filtrarla, se reducirá el tiempo necesario para su filtración sobre un área - dada de filtro, en proporción directa a la disminución de la relación de líquido a sólido en la suspensión.

3.2.5- EQUIPO DE FILTRACION.

Los equipos de filtración se pueden clasificar dependiendo de la fuerza propulsora (gravedad, presión o vacío); del método de operación (intermitente ó continuo) o dependiendo que sea el filtrado o la torta el producto deseado.

Desde el punto de vista de aprovechamiento del filtrado, el "filtro intermitente de agua por gravedad" se utiliza para tratar mayor volumen de filtrado que cualquier otra clase de filtro. Estos filtros -

constan de tanques llenos de un material poroso por el cual pasa el líquido, y sale del tanque por un sistema múltiple colector que hay en el fondo. El medio filtrante (arena y grava), separa las partículas sólidas suspendidas y está sostenido por grava o piedra machacada que se coloca sobre el fondo perforado. Los diferentes tamaños del medio filtrante se depositan en capas para evitar que se mezclen partículas de distintos tamaños. Cada medio filtrante de tamaño graduado debe ser uniforme en tamaño de partícula para obtener máxima porosidad y velocidad de filtración. (13)

En una operación continua, los poros del medio filtrante se obstruyen con los sólidos extraídos del filtrado, lo cual requiere la extracción de dichos sólidos mediante el lavado inverso cada cierto tiempo para mantener o renovar la capacidad del filtro. La acumulación constante de sólidos reduce la capacidad efectiva media a un valor menor que la mitad del calculado para filtros limpios.

Se usan comunmente dos tipos de filtros: El "filtro lento" y el "filtro de arena rápido". El filtro de arena lento consiste en un depósito hermético al agua; en el fondo lleva un sistema de drenaje formado por una capa inferior de piedra partida y una serie de lechos de grava de tamaño de partícula decreciente de abajo a arriba. Las partículas del último lecho son lo bastante pequeñas para retener la arena. Encima de estos lechos de grava se coloca cierta cantidad de arena relativamente fina. Al funcionar el filtro se acumula en la superficie un sedimento fino que aumenta la resistencia al paso del agua, aumento que ha de compensarse elevando la altura del agua sobre la -

arena. Después de funcionar varias semanas o meses, la acumulación de este depósito es a veces tan grande que se necesita una altura de agua excesiva; entonces hay que interrumpir la filtración, se deja escurrir el agua del filtro y se sacan de la superficie unos centímetros de arena. Esta arena se lleva a lavadores donde se limpian y luego se coloca en otro filtro o se guarda para uso futuro.

Los filtros de arena rápidos son casi iguales a los lentos. Sin embargo, el método de operación es muy distinto. Se construyen en secciones pequeñas por la necesidad de lavado a contra-corriente, para reducir el tamaño de las bombas necesarias para la limpieza; la altura de la arena en estos filtros es menor que en los filtros lentos y se opera a presión mucho más alta. La velocidad de filtración es alta y a causa de esto se necesita una superficie relativamente pequeña.

Con los filtros de arena lentos, es posible obtener un agua bastante clara sólo por filtración; esto no es posible con los filtros rápidos. La acumulación de lodo en estos filtros es muy rápida, por lo que es preciso limpiar el medio filtrante muy a menudo. En realidad, es necesario un lavado a contracorriente cada 20 a 24 horas de uso. Durante este lavado se bombea agua filtrada desde el fondo a presión suficiente para que se separen ligeramente los granos de arena haciendo que ésta suba en el lecho, se agite y suelte la turbiedad atrapada.(13)

La evaluación de las propiedades filtrantes de la lava volcánica se realizará de acuerdo a lo descrito anteriormente para filtros de arena por gravedad; por supuesto con las variaciones necesarias para adap

tar los recursos existentes en el laboratorio. Para tal fin, se tomará como base el arreglo de las capas de medio filtrante de la parte superior al fondo para filtros verticales de gravedad, que puede ser el siguiente: (21)

Una capa de medio fino, 0.0177 a 0.0197 pulg.

Una capa de medio grueso, 0.0315 a 0.0472 pulg.

Una capa de soporte delgado de 1/8 a 1/4 de pulg.

Una capa de soporte mediano de 1/4 a 1/2 de pulg.

Una capa de soporte grueso de 1/2 a 1 pulg.

Los tamaños anteriores pueden adaptarse a las medidas de los tamices de la serie Tyler de la siguiente manera:

Capa de medio fino: 28/32 mesh (0.0232 a 0.0195 pulg).

Capa de medio grueso: 16/20 mesh (0.0390 a 0.032 pulg).

Capa de soporte delgado: 3/6 mesh (1/8 a 1/4 de pulg).

Capa de soporte mediano (1/4 a 1/2 de pulg).

Capa de soporte grueso: (1/2 a 1 pulg) .

3.3- CONCEPTOS FUNDAMENTALES EN AISLAMIENTO TERMICO.

3.3.1- FORMAS DE TRANSMISION DEL CALOR.

Entre dos cuerpos a temperaturas diferentes se producen cambios, los cuales se manifiestan mediante un flujo de calor desde el cuerpo a mayor temperatura hacia el de menor temperatura.

Este flujo de calor se puede realizar mediante tres mecanismos:(15)

- a) Conducción
- b) Convección
- c) Radiación

En la Conducción no existe movimiento alguno visible de materia, ocurriendo lo mismo en la transmisión por radiación; por el contrario, la transmisión de calor por convección requiere de una corriente de flujo para poderse realizar.

Todos los cuerpos sólidos o líquidos emiten permanentemente radiaciones en su superficie. Esta emisión depende de la naturaleza y la temperatura de la superficie, es totalmente independiente de los objetos que la rodean, no necesita soporte material y por lo tanto puede realizarse en el vacío .

3.3.2- COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD TERMICA.

a) Definición.

El coeficiente de conductividad térmica "K" ha sido definido - como la cantidad de calor que fluye a través de la unidad de superficie, en la unidad de tiempo, si es igual a la unidad el gradiente de temperatura por unidad de longitud entre las dos superficies a través de las cuales fluye el calor. (16)

El coeficiente de conductividad térmica es una magnitud física, positiva, característica del cuerpo considerado, dependiendo su valor numérico del sistema de unidades usado.

Los diferentes materiales que se utilizan en la industria se pueden clasificar por el orden de sus conductividades decrecientes en la siguiente forma:

- a) Metales y aleaciones
- b) Sustancias minerales
- c) Materiales aislantes
- d) Gases y líquidos

Atendiendo al uso que se dará a la lava volcánica, se mencionarán aquí las características mas comunes presentadas por los aislantes térmicos; ellos son agregados de sustancias de composición heterogénea, poco conductores, pulverulentos, por lo general porosos; casi todos están formados por fibras y granos, basándose su "poder aislante" en su porosidad, es decir, en la importancia relativa de las células de aire aprisionadas en la materia prima constituyente del aislante.

Sus conductividades están comprendidas entre 0.14 y 1.6 BTU/hr-pie² (°F/pulg).

b) Medidas de los Coeficientes de Conductividad Térmica.

Es fundamental disponer de coeficientes de conductividad de los diferentes tipos de aislantes, a fin de poder determinar en forma útil los espesores de los aislamientos a prever, o por el contrario la importancia de las pérdidas caloríficas que podría dejar pasar un tipo de aislamiento dado.

Por otra parte, la experiencia ha demostrado que en la mayoría de materiales aislantes, es imposible el afirmar con certeza que de una muestra a otra se volverán a encontrar rigurosamente las mismas propiedades. Lo anterior explica que dos laboratorios puedan recoger resultados a veces divergentes, y en la práctica es casi imposible recoger resultados con una precisión superior al cinco por ciento.(15)

Medidas de Laboratorio.

Los métodos de medida del coeficiente de conductividad son numerosos, pero de hecho están ligados al mismo principio fundamental.

Las medidas pueden ser efectuadas en "regimen permanente" y en "regimen variable".

Método de Regimen Permanente.

Es el más usado de los dos. En este método una de las caras del cuerpo cuyo coeficiente se desea medir se pone en contacto con una fuente de calor y la otra con una fría. Siendo el regimen estacionario, las temperaturas son constantes y uniformes, teniéndose por resultado que el cuerpo es atravesado por un flujo de calor uniforme que penetra en él por la cara caliente y sale por la fría.

Pudiéndose hacer la medida de ese flujo sobre una u otra de las caras, lo cual ha originado dos métodos:

a) Realizando la medida sobre la cara fría y conduciendo el flujo

a un calorímetro para medir la cantidad de calor transmitida en un tiempo dado.

- b) Midiendo el flujo suministrado por la fuente caliente y determinando la cantidad de calor que cede, siendo fácil de realizar cuando este calor es producido por una resistencia eléctrica recorrida por una corriente. Como es conocido, la cantidad de calor desprendida en corriente continua viene dada por la siguiente expresión: (15)

$$Q = 3.4127 E.I. \quad (3-6)$$

Donde: E = Tensión eléctrica en voltios

I = Intensidad de la corriente eléctrica en amperios

Q = BTU/hr.

Conociendo el flujo de calor Q y con ayuda de termopares, las temperaturas T_1 y T_2 en dos puntos A y B del cuerpo estudiado se obtiene "K" mediante la siguiente relación:

$$A = KN (T_1 - T_2) \quad (3-7)$$

En donde: K = Coeficiente de transferencia de calor del cuerpo.

N = Es un factor geométrico que depende de la posición de los puntos A y B, así como de la superficie del cuerpo estudiado.

Los diversos métodos varían, en su principio, por la forma que se dé al cuerpo que se desea estudiar.

Suele ser natural el no utilizar mas que formas geométricas simples, y por eso en la práctica se emplean únicamente: la placa plana, la esfera hueca y el cilindro hueco.

Como cada uno de los cuerpos, de los que se quieren estudiar sus coeficientes de conductividad, tienen dimensiones finitas e incluso limitadas, es necesario cuidar de que no existan pérdidas de flujo de calor que puedan producirse en la periferia de la placa o por los extremos del cilindro.

3.3.3- CALCULO DE LAS PERDIDAS CALORIFICAS.

Método del Cilindro.

Este método es denominado a veces de Van Rinsum. El aparato está formado por un tubo que contiene en su interior una resistencia eléctrica. El material a estudiar en forma de cilindro hueco, se aplica sobre este tubo metálico. (16)

La transmisión de calor a través de cilindros de paredes gruesas es llamada "Conducción Radial" o bidimensional, la cual está regida por la ecuación general de la transmisión de calor por conducción, cuya expresión matemática es la siguiente:

$$R_t = \frac{1}{K_m} \int_{L_1}^{L_2} \frac{dL}{A} \quad (3-8)$$

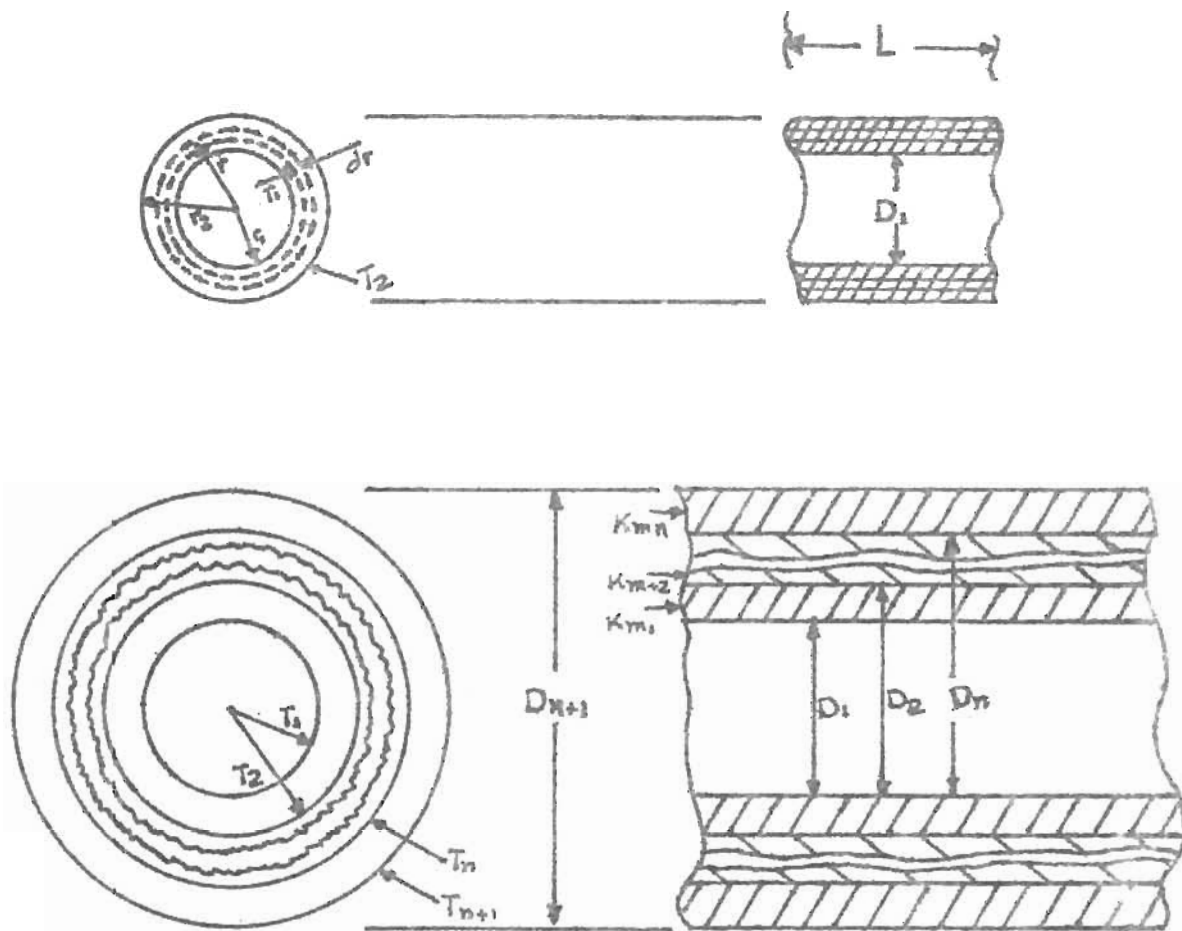


Figura 3.3 - Cilindro de Paredes Gruesas

Donde:

R_t : Es la resistencia térmica que viene definida como la razón de la caída de temperatura a través de ese conductor, a la velocidad de transmisión de calor a través del mismo.

k_m : Es el coeficiente de conductividad térmica media en - BTU/(hr, pie² (°F/pie)) para el intervalo de temperatura T_1 a T_2 .

A : viene definida como el área en pie², tomada perpendicularmente al sentido de la corriente o flujo de calor.

L : Es la distancia que recorre el flujo de calor en el sentido de éste.

Para un cilindro $dL = dr$

$$A = 2\pi \ell r$$

Donde: ℓ : es la longitud del cilindro en pies.

Entonces:

$$R_t = \frac{1}{K_m} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{2\pi r \ell} \quad (3-9)$$

$$R_t = \frac{1}{2 \pi \ell K_m} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (3-10)$$

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{R_t} \quad (3-11)$$

$$Q = \frac{(T_1 - T_2) 2\pi \ell K_m}{\ln \frac{D_2}{D_1}} \quad (3-12)$$

La resistencia térmica total para el cilindro compuesto mostrado en la figura 3.3, formado por varios cilindros concéntricos cuyas respectivas conductividades son K_{m1} , K_{m2} , ... K_{mn} se puede determinar aplicando la Ecuación (3-11); puesto que representa un sistema en serie, la velocidad de transmisión de calor para cualquier cilindro dentro de un sistema de n cilindros concéntricos es:

$$Q = \frac{2 (T_1 - T_{n+1})}{\frac{1}{K_{m_1}} \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{K_{m_2}} \ln \frac{D_3}{D_2} + \dots + \frac{1}{K_{m_n}} \ln \frac{D_{n+1}}{D_n}} \quad (3-13)$$

3.3.4- MATERIALES AISLANTES TERMICOS.

El aislamiento térmico no impone el empleo de un aislante; es bien conocido el hecho que el aire en reposo es el cuerpo que tiene mejor poder aislante.

Si la radiación no interviniera el vacío absoluto aislaría mejor todavía y sería el aislante ideal.

De hecho, este aislamiento sin materiales aislantes existe y se utiliza; pero en la mayoría de los casos corrientes, se obtiene el aislamiento utilizando materiales aislantes¹¹.

El papel esencial de un aislante es evidentemente, el de ofrecer una buena resistencia a la transmisión del calor. Pero también se suele exigir de un aislante cualidades complementarias tales como: (15)

- a) Una buena resistencia mecánica
- b) Un buen comportamiento a las temperaturas de empleo (sin modificaciones de su estructura).
- c) Una buena conservación de sus propiedades con el tiempo (ausencia de envejecimiento).
- d) Ausencia de efectos dañinos sobre los materiales en contacto con el aislante (en particular ausencia de acción corrosiva sobre los metales, cemento, etc).

- e) Ausencia de reacciones químicas con los materiales con que se va a encontrar en contacto.
- f) Resistencia a los diferentes agentes de destrucción (impureza, resistencia a los roedores, a los gusanos, etc).

3.3.5- COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD DE LOS MATERIALES AISLANTES TERMICOS.

La conductividad de un aislante es una conductividad térmica aparente, formada por un cierto número de factores que surgen de procesos de intercambio de calor netamente diferentes. En efecto, en un aislante el calor progresa a la vez:

- a) Por conducción a través del gas (por lo general del aire) - inmóvil en las células.
- b) Por convección en el gas ocluido en las células (a pesar de sus pequeñas dimensiones).
- c) Por conducción a través de la materia prima que aprisiona - las células de aire.
- d) Por último, los elementos sólidos del material al estar a temperaturas diferentes cambian entre sí energía en forma de - radiación.

Por lo tanto el movimiento del calor a través de un aislante es un fenómeno muy complejo que depende de numerosos factores, entre los - cuales están:

- a) La porosidad .
- b) La masa volumétrica aparente del material.
- c) La temperatura media en el aislante.
- d) La composición química del material.
- e) La humedad contenida por el aislante.

a) Influencia de la Porosidad.

Se concibe que el coeficiente de conductividad de un cuerpo poroso se sitúe entre el del aire contenido en los poros y el de las partes sólidas del aislante considerado, podría decirse como una aproximación que ese coeficiente depende del volumen de los poros y de la importancia del vacío con relación a la materia, o sea del peso específico del aislante.

Llamando ϵ al factor de porosidad, es decir a la fracción del volumen total que es ocupado por los huecos en el seno del medio poroso, puede definirse la 'permeabilidad específica' "p" de un aislante poroso como el caudal de fluido que lo atraviesa por unidad de sección, bajo el efecto de una diferencia de presión unidad, bajo el espesor unidad y por una viscosidad dinámica unidad.

Carman logró encontrar la siguiente expresión . (15)

$$P = \frac{G}{S^2} \frac{\epsilon^2}{(1-\epsilon)^2} \quad (3-14)$$

En donde:

S : Superficie desarrollada por unidad de volumen de fase sólida , y

G : Un coeficiente adicional función de la estructura del material.

La tabla 3.2 contiene la masa volumétrica y los porcentajes de materia: sólida y de aire para los aislantes mas corrientes.

TABLA 3.2- MASA VOLUMETRICA Y PORCENTAJES DE MATERIA SOLIDA Y DE AIRE PARA ALGUNOS AISLANTES.

Aislante	Masa volumétrica (kg/m ³)	Porcentaje de materia sólida	Porcentaje de aire
Fibras aislantes			
Materiales ...	10	0.3	99.7
-- ---	30	1.1	98.9
-- ---	100	3.9	96.1
-- ---	300	5.0	95.0
Corcho bruto	180	12.8	87.2
Corcho expandido	80	5.2	94.8
Kieselguhr	300	11.9	88.1

TABLA 3.3 - VARIACION DEL COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD EN FUNCION DEL DIAMETRO DE LOS POROS EN LOS AISLANTES MINERALES FIBROSOS

Diámetros de los poros (pulg)	0.020	0.039	0.197	0.394	0.787	1.968
Coefficiente de - conductividad térmica. (BTU/hr-pie ² (°F/pulg))	0.171	0.186	0.295	0.466	0.777	2.022

Los valores anteriores son sensiblemente los mismos, estén los poros completamente cerrados o en parte abiertos.

La forma de los poros y la dirección de las fibras juegan también su papel; en el caso de que un aislante fibroso tenga sus fibras orientadas, el coeficiente de conductividad depende de la dirección del flujo de calor. Si éste se evalúa paralelamente a las fibras, el poder aislante será evidentemente menos bueno que en el caso de que el flujo calorífico sea perpendicular a ellas.

b) Influencia de la masa volumétrica aparente.

Tal como se esperaría, la masa volumétrica aparente de un aislante comprende el aire ocluido en los poros. Por tanto, la masa térmica está ligada a la porosidad. Por ser el aire en reposo el cuerpo que tiene menor coeficiente de conductividad ($k=0.155$ BTU/hr pie² (°F/pulg)) a la temperatura ambiente, un volumen determinado de él actuará tanto mejor cuanto que las células en que está aprisionado tengan dimensiones mas pequeñas.

Pero inversamente, por debajo de un cierto límite, la influencia de las partes sólidas es la que manda, en detrimento de las células de aire aprisionadas.

En los aislantes porosos, la variación del coeficiente de conductividad estudiado, en función de la masa volumétrica, tiende a pasar por un mínimo (para un valor propio en cada tipo de aislante) y después a aumentar ligeramente.

c) Influencia de la Temperatura.

En general el coeficiente de conductividad aumenta su valor con la temperatura. Esto se debe principalmente a la influencia de la radiación, y se sabe que crece proporcionalmente con la cuarta potencia de la temperatura absoluta de la cara opuesta.

Por esta misma razón existe una relación entre el crecimiento del coeficiente de conductividad en función de la temperatura y el tamaño de los poros del aislante.

En la práctica se ha demostrado que la ecuación de la conductividad en función de la temperatura absoluta puede expresarse en la forma:

$$K = a \sqrt{T} + b T^3 \quad (3-15)$$

en donde a y b son constantes características del aislante considerado.

d) Influencia de la Composición Química.

La parte sólida y el gas ocluido en los poros forman al aislante, y ambas tienen una influencia considerable sobre el coeficiente de conductividad .

La estructura cristalina o amorfa es de gran importancia; la conductividad de los cuerpos cristalizados es bastante superior a la del mismo cuerpo en estado amorfo y disminuye con la temperatura.

Cuando las células o poros de un aislante están llenos de un gas diferente del aire, el coeficiente de conductividad del aislante varía con la naturaleza del gas. Por ejemplo: el poliuretano expandido, sustituyendo el aire ocluido por freón, a 68°F tiene un coeficiente de conductividad aparente de 0.124 BTU/hr-pie² (°F/pulg); mientras que la K del poliuretano con células de aire, bajo las mismas condiciones es de 0.217 BTU/hr-pie² (°F/pulg).

e) Influencia de la Humedad.

La humedad ejerce una influencia considerable sobre el coeficiente de conductividad de los materiales porosos.

La curva de la figura 3.4 ilustra este fenómeno, el cual puede explicarse de la siguiente manera: Las primeras trazas de humedad se difunden en estado de vapor desde las fibras mas calientes hacia las mas frías, en donde este vapor se condensa y las moja. Parte de esta agua vuelve a veces a vaporizarse sobre las fibras mas calientes, pero a partir del 2% de humedad para las fibras minerales, el fenómeno tiende a estabilizarse, las células entre las fibras se van llenando progresivamente de agua, y el aumento de conductividad no es ya debido más que a la sustitución del aire por el agua de las células.

Como el coeficiente de conductividad del agua es 3.935 BTU/hr-pie²(°F/pulg) o sea unas 25 veces la conductividad del aire, el

coeficiente de conductividad aparente del aislante mojado o simplemente húmedo, se hace muy malo.

Coeficiente de Conductividad
Térmica

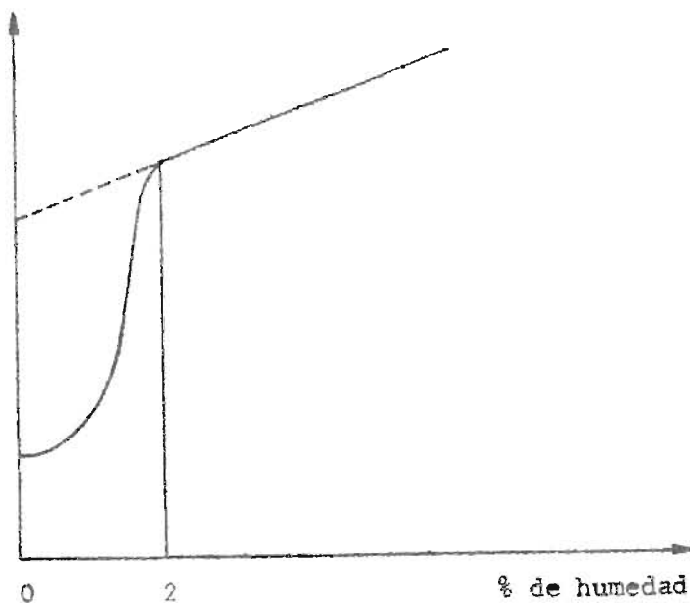


Figura 3.4 - Variación del Coeficiente de Conducción de Calor con el contenido de humedad en las fibras minerales.

3.3.6- CLASIFICACION DE LOS MATERIALES AISLANTES TERMICOS.

Los materiales aislantes existentes son muy numerosos, existiendo varias formas de clasificarlos; entre ellas dos parecen ser las mas sencillas y exactas:



- a) Clasificación según el origen de las materias que constituyen el aislante.
- b) Clasificación en función de sus estructuras.

En efecto el "poder aislante" de un material depende principalmente de su estructura siendo sus otras propiedades función de su naturaleza como son: la resistencia a las temperaturas mas o menos elevadas, las propiedades mecánicas, la imputrescibilidad, etc.

Clasificación de los materiales aislantes según su naturaleza:

- a) Aislantes de origen animal o vegetal.
- b) Aislantes de origen mineral (diatomeas, kiesselguhr).
- c) Productos de síntesis (poliuretano, poliestireno).

Clasificación en función de su estructura.

- a) Aislantes pulverulentos (ej. gránulos de sílice+fósil, diatomeas, Kiesselguhr).
- b) Aislantes fibrosos (ej. lanas de vidrio y lanas de roca).
- c) Espumas.
- d) Aislantes aglomerados

Una tercera clasificación que es la más utilizada en la práctica es según la temperatura de utilización. De acuerdo a esta los materiales aislantes se han reunido en tres grupos, ellos son:

- a) Aislantes refractarios (soportan temperaturas mayores de 2552°F).
- b) Semirefractarios ($1830^{\circ}\text{C} < T < 2010^{\circ}\text{F}$).
- c) Aislantes ordinarios ($T < 1650^{\circ}\text{F}$).

Los aislantes ordinarios son los que se utilizan en los problemas de aislamiento térmico o frigorífico y son muy numerosos; entre ellos se espera que esté la lava volcánica.

CAPITULO 4

" EVALUACION DEL USO DE LA LAVA VOLCANICA COMO MATERIAL ADSORBENTE FILTRANTE Y AISLANTE TERMICO "

4.1- EVALUACION DE LA LAVA VOLCANICA COMO ADSORBENTE.

Como se mencionó anteriormente, las características requeridas en un material para su utilización como adsorbente, son las siguientes:

- a) Insolubilidad en el solvente.
- b) Ausencia de reactividad con el soluto y el solvente, excepto por el mecanismo de adsorción.
- c) Propiedades físicas adecuadas tales como; porosidad, tamaño de partículas y área superficial, para la obtención de velocidades de flujo razonables.
- d) Bajo costo.
- e) Preferentemente blanco o incoloro.

En vista de que la lava volcánica presenta las características anteriores, a excepción de la última, se consideró la posibilidad de utilizarla como material adsorbente. Para comprobar lo anterior se realizaron varias pruebas utilizando la metodología que se detalla a continuación.

4.1.1- METODOLOGIA.

Para evaluar el poder adsorbente del material volcánico, se sometió éste a ciertos tratamientos previos cuyo objetivo fue incrementar

la porosidad y por consiguiente el área superficial, aumentando así la eficiencia en el proceso de adsorción.

Estos tratamientos consistieron en:

- 1) Reducción de tamaño y calcinación.
- 2) Reducción de tamaño, calcinación, lavados con HCl (40% v/v), con NaOH (40% p/v) y con H₂O para eliminar el ácido o base residual. El objetivo de cada uno de estos lavados se describirá mas adelante en este mismo capítulo.

PRUEBAS EVALUATIVAS PARA LA LAVA COMO MATERIAL ADSORBENTE.

Se efectuaron en total cinco pruebas, con las tres primeras se pretendió comprobar el efecto del tamaño de las partículas sobre las velocidades de flujo, con miras a lograr un punto de equilibrio entre una velocidad de flujo razonable y una alta relación de soluto adsorbido por unidad de masa de adsorbente. De las restantes, una de ellas se encaminó a lograr un aumento en la porosidad del material mediante tratamientos de lavado; y la última a comprobar su posible reutilización mediante un proceso de regeneración.

Para determinar la cantidad de soluto adsorbida por unidad de masa de adsorbente, se hizo necesario determinar las concentraciones de colorante en las corrientes de entrada y salida de la columna que contenía el material adsorbente. Como es conocido el hecho que, sus tancias coloreadas absorben energía radiante cuya longitud de onda está en el rango de la región visible, esto ha originado la varia-

ble absorbancia, la cual se ha definido mediante la siguiente relación: (21)

$$A = a b C \quad (\text{Ley de Beer-Lambert})$$

donde:

A = absorbancia

a = Longitud del tubo

b = Constante

C = Concentración en gr/lt.

Entonces, siendo a y b constantes A será directamente proporcional a la concentración del soluto en la solución. Aprovechando la ecuación anterior se determinó la absorbancia de la solución coloreada en un Espectrofotómetro Coleman Modelo 295, el cual trabaja con energía luminosa en el rango de 400-700 mμ.

Los procedimientos para la realización de cada una de las pruebas se detallan a continuación:

PRUEBA Nº 1: Adsorción de Colorantes con lava volcánica calcinada de tamaño de partícula comprendido entre los tamices 200/325 de la serie Tyler.

Esta prueba se realizó haciendo pasar una solución coloreada a través de una columna rellena con lava volcánica. Se hicieron dos ensayos cuya única diferencia fue el colorante utilizado, ya que en

uno se utilizó cristal violeta y en el otro azul de metileno. Los pasos seguidos fueron los siguientes:

a) Preparación del material.

La roca volcánica fue inicialmente reducida hasta un tamaño de partícula comprendido entre 200 y 325 mesh. A continuación, el material pulverizado se sometió a un proceso de calcinación a una temperatura de 1472°F (800°C) durante un período de 2 horas.

b) Empaquetamiento de la columna.

Para la realización de la prueba se utilizó una columna cromatográfica rellena con 200 gramos del material de ensayo con una altura inicial de 30 cms, sostenidos por una capa de lana de vidrio y arena de 2.5 cm. de espesor. (figura 1-A del Apéndice). El empaquetamiento de la columna se hizo con material seco, procurando que fuera lo mas homogéneo posible para evitar resquebrajamientos.

c) Preparación de las Soluciones Coloreadas.

Las soluciones se prepararon tomando 0.6 ml de una solución acuosa al 1% p/v del respectivo colorante y aforando hasta un volumen de 1 litro.

d) Realización de la Prueba.

La solución coloreada se hizo pasar a través de la columna reco

lectándose en la parte inferior volúmenes de 50 ml, a los cuales se les hicieron lecturas de absorbancia.

e) Resultados Obtenidos

TABLA 4.1. CONDICIONES DE OPERACION Y RESULTADOS OBTENIDOS
EN LA PRUEBA N° 1

Volumen acumulado (ml)	Absorbancia	
	Sln. Cristal Violeta	Sln. Azul de Metileno
50	0.010	0.000
100	0.011	0.001
150	0.008	0.000
200	0.010	0.000
250	0.010	0.001
300	0.010	0.001
350	0.017	0.000
400	0.005	0.000
450	0.000	0.000
500	0.000	0.000
550	0.000	0.001
600	0.002	0.001
650	0.003	0.002
700	0.000	0.001
750	0.002	0.002

Condiciones de Operación

Columna : 200 grs. de lava calcinada de 200 a 325 mesh (0.0017
a 0.0029 pulg.)

Altura inicial: 11.8 pulg.

Altura final: 12.0 pulg.

Velocidad de flujo: 0.08 ml/min.

Soluciones: Cristal Violeta y Azul de Metileno

Longitud de onda para ambas

soluciones: 608 m μ

Absorbancia inicial para ambas

soluciones: 1.0

Debido a que el tamaño de partículas utilizado en esta prueba produjo velocidades de flujo excesivamente lentas, se suspendió su ejecución por carecer de importancia desde el punto de vista práctico.

PRUEBA N^o 2: Adsorción de colorantes con lava volcánica calcinada de tamaño de partículas comprendido entre los tamices 48/100 de la serie Tyler.

Se realizó de una manera similar a la prueba N^o 1, variando únicamente el tamaño de las partículas, el cual se fijó entre los tamices de la serie Tyler de 48 a 100 mesh, recolectándose volúmenes de 200 ml.

a) Resultados Obtenidos.

TABLA 4.2 - CONDICIONES DE OPERACION Y RESULTADOS OBTENIDOS EN
LA PRUEBA Nº 2

Volumen acumulado (ml.)	A b s o r b a n c i a	
	Sol. Cristal violeta	Sol. Azul de metileno
0	0.000	0.000
200	0.004	0.003
400	0.005	0.005
600	0.007	0.005
800	0.032	0.008
1000	0.103	0.015
1200	0.144	0.040
1400	0.220	0.050
1600	0.220	0.090
1800	0.262	0.117
2000	0.360	0.135
2200	0.405	0.185
2400	0.462	0.250
2600	0.342	0.320
2800	0.385	0.365
3000	0.525	0.585
3200	0.568	0.625
3400	0.585	0.690
3600	0.603	0.695
3800	0.622	0.725
4000	0.655	0.720
4200	0.675	0.745
4400	0.660	0.730
4600	0.697	0.735
4800	0.650	0.750
5000	0.713	0.740
5200	0.720	
5400	0.745	
5600	0.730	
5800	0.750	
6000	0.760	
6200	0.735	
6400	0.740	
6600	0.750	

Condiciones de Operación:

Columna: 180 grs de lava calcinada de 48 a 100 mesh

(0.0058 a 0.0116 pulg.)

Altura inicial: 10.24 pulg.

Altura final: 10.43 pulg.

Velocidad de flujo: 4.42 ml/min

Soluciones: Cristal violeta y Azul de metileno.

Longitud de onda para ambas

soluciones: 608 m μ

Absorbancia inicial para am-

bas soluciones: 1.0

En las figuras A-2 y A-3 del apéndice se presentan las gráficas de absorbancia y eficiencia contra volumen acumulado para esta prueba.

PRUEBA N^o 3 : Adsorción del colorante Cristal Violeta, con lava calcinada con tamaño de partícula comprendido entre los tamices 100/200 de la serie Tyler.

La única variante con respecto a la prueba N^o 2 consistió en que se utilizaron partículas comprendidas entre las mallas 100 y 200 de la serie Tyler, realizándose la prueba únicamente con el colorante cristal violeta.

a) Resultados Obtenidos.

TABLA 4.3 - CONDICIONES DE OPERACION Y RESULTADOS OBTENIDOS
EN LA PRUEBA N° 3

Volumen acumulado (ml)	Absorbancia
0	0.000
200	0.000
400	0.000
600	0.002
800	0.003
1000	0.003
1200	0.004
1400	0.005
1600	0.030
1800	0.020
2000	0.023
2200	0.035
2400	0.030
2600	0.075
2800	0.142
3000	0.100
3200	0.130
3400	0.125
3600	0.170
3800	0.180
4000	0.290
4200	0.310
4400	0.300
4600	0.330
4800	0.350
5000	0.400
5200	0.475
5400	0.500
5600	0.535
5800	0.550
6000	0.615
6200	0.640
6400	0.645
6600	0.735
6800	0.725
7000	0.740
7200	0.740
7400	0.750
7600	0.765
7800	0.760
8000	0.750
8200	0.765

Condiciones de Operación:

Columna: 150 grs. de lava calcinada de 100 a 200 mesh.

(0.0029 a 0.0058 pulg.)

Altura inicial : 8.66 pulg.

Altura final: : 8.82 pulg.

Velocidad de flujo: : 1.75 ml/min.

Solución Cristal Violeta.

Longitud de onda: 608 m μ

Absorbancia inicial: 1.0

En la figura A.4 del apéndice, se presenta las gráficas de absorbancia y eficiencia contra volumen acumulado correspondientes a esta - prueba.

PRUEBA N^o 4. Adsorbancia del colorante azul de metileno con lava volcánica calcinada y tratada de tamaño de partícula comprendido entre los tamices 100/200 de la serie Tyler.

La metodología para la realización de esta prueba es similar a la de las anteriores excepto en lo que se refiere a la preparación del material de relleno y a la utilización de un solo colorante.

a) Preparación del material.

Después de calcinar 200 grs de material con tamaño de partículas entre 100 y 200 mesh, en idénticas condiciones a las de las pruebas anteriores se sometieron al siguiente tratamiento.

- 1) Lavado con 250 ml de HCl (40% v/v).
- 2) Lavado con H₂O hasta alcanzar pH = 7.
- 3) Lavado con 250 ml de NaOH (40% p/v).
- 4) Lavado con H₂O hasta alcanzar pH = 7.

El aumento en la concentración del ácido utilizado para el lavado, con respecto al empleado en los lavados para el análisis químico (10% v/v); obedece a que esta última concentración no causó ninguna alteración en la composición química de la lava, como puede verse en las tablas II y III del capítulo N° 2 incrementando entonces la concentración del ácido y realizando además un lavado con una solución de NaOH, se pretendió provocar mayor porosidad en el material mediante la eliminación de sustancias solubles que pudieran estar obstruyendo sus poros.

b) Resultados Obtenidos.

TABLA 4.4 - CONDICIONES DE OPERACION Y RESULTADOS OBTENIDOS EN
LA PRUEBA N° 4

Volumen acumulado	Absorbancia
000	0.000
200	0.005
400	0.008
600	0.010
800	0.040
1000	0.175
1200	0.300
1400	0.475
1600	0.518
1800	0.470
2000	0.645
2200	0.658
2400	0.675
2600	0.692
2800	0.700
3000	0.620
3200	0.730
3400	0.740
3600	0.750
3800	0.735
4000	0.755
4200	0.740
4400	0.745
4600	0.720
4800	0.730
5000	0.745

Condiciones de Operación:

Columna: 150 grs de lava calcinada y tratada de 100 a 200 mesh.
(0.0029 a 0.0058 pulg).

Altura inicial: 9.25 pulg.

Altura final: 9.45 pulg.

Velocidad de flujo: 1.75 ml/min.

Solución: Azul de Metileno.
Longitud de onda 608 mμ
Absorbancia inicial 1.0

La figura A-5 del apéndice, presenta la gráfica de absorbancia y eficiencia contra volumen acumulado para esta prueba.

PRUEBA N° 5. Adsorción del colorante cristal violeta con lava regenerada del tamaño de partícula comprendido entre los tamices 48/100 de la serie Tyler.

Su objetivo fue comprobar la posible reutilización de la lava volcánica como material adsorbente, mediante un tratamiento de reactivación del material utilizado en la prueba N° 2 con el colorante Cristal Violeta. Este tratamiento consistió en separar el colorante retenido en el adsorbente mediante su solubilización en agua, comprobándose la extracción completa del colorante a través de lecturas de absorbancia en el agua de lavado, hasta lograr obtener una absorbancia de cero. Seguidamente se eliminó la humedad del material por medio de secado a una temperatura de 350 °C hasta obtener peso constante.

La metodología es idéntica a la de las pruebas anteriores.

a) Resultados Obtenidos:

TABLA 4.5 CONDICIONES DE OPERACION Y RESULTADOS OBTENIDOS
 EN LA PRUEBA N° 5

Volumen acumulado (ml)	Absorbancia
0	0.000
200	0.004
400	0.005
600	0.008
800	0.020
1000	0.075
1200	0.122
1400	0.175
1600	0.225
1800	0.280
2000	0.250
2200	0.340
2400	0.450
2600	0.480
2800	0.524
3000	0.578
3200	0.550
3400	0.652
3600	0.692
3800	0.710
4000	0.715
4200	0.720
4400	0.720
4600	0.715
4800	0.730
5000	0.725

Condiciones de Operación:

Columna: 150 grs. de lava utilizada en la prueba N° 2 reactivada, de 48 a 100 mesh. (0.0058 a 0.0116 pulg.)

Altura inicial: 9.45 pulg.

Altura final : 9.57 pulg.

Solución: Cristal Violeta.

Longitud de onda: 608 mμ

Absorbancia inicial: 1.0

En la figura A-2 del apéndice, se presenta la gráfica de absorbancia y eficiencia contra el volumen acumulado para la prueba anterior.

Los valores de eficiencia graficados en las figuras del apéndice A, han sido obtenidos tal como se detallan a continuación:

Tomando la figura A-3.

Volumen acumulado: 1600 ml.

Absorbancia : 0.082

Absorbancia inicial: 1.0

$$\text{Eficiencia: } \frac{\text{Absorbancia inicial} - \text{absorbancia}}{\text{Absorbancia inicial}} \times 100$$

Así:

$$\text{Eficiencia} = \frac{1.0 - 0.082}{1.0} \times 100$$

Eficiencia : 91.80%

4.1.2- DISCUSION DE RESULTADOS

En las figuras A-2, A-3, A-4 y A-5 del apéndice, aparecen graficados los resultados obtenidos en las pruebas de adsorción mostrando

estas curvas gran similitud, con la curva típica de adsorción dinámica que aparece en la figura 3.2 .

Tal como se indicó anteriormente, las primeras tres pruebas se efectuaron con el fin de comparar el efecto del tamaño de las partículas sobre las velocidades de flujo; determinándose que partículas de tamaño pequeño tales como las usadas en la prueba N° 1 -- (200/325 mesh), generan velocidades de flujo extremadamente lentas (0.08 ml/min), resultando por ello imprácticas para procesos que se realizan bajo la acción de la gravedad, a pesar de poseer gran capacidad de adsorción sobre los dos tipos de colorantes usados. Para mejorar las velocidades de flujo al utilizar este tamaño de partículas, se puede aplicar una diferencia de presión entre los extremos de la columna.

Como se esperaba, un incremento en el tamaño de las partículas provocó un aumento en las velocidades de flujo (tablas 4.2 y 4.3), pero al mismo tiempo, se redujo la capacidad de adsorción del material, puesto que como puede observarse en las figuras A-6 cuando se utilizaron partículas comprendidas entre los tamices 100/200 fue posible pasar a través del lecho de adsorbente un mayor volumen de solución que cuando se utilizaron partículas de tamaño comprendidos entre los tamices 48/100, para un mismo valor de eficiencia en ambas pruebas.

En todos los procesos de adsorción, existe una región alrededor del punto de cambio en la curva de operación, que permite determinar el

volumen a partir del cual los valores de eficiencia comienzan a de
scender mas o menos bruscamente; a este volumen se le ha llamado vo-
lumen óptimo de operación y puede servir también para comprobar
la influencia del tamaño de las partículas sobre la capacidad de
adsorción, ya que para el lecho de partículas de tamaños compren-
didos entre los tamices 48/100, los volúmenes óptimos fueron de 715
y 1200 ml para los colorantes cristal violeta y azul de metileno res-
pectivamente, mientras que para el lecho de partículas con tama-
ños comprendidos entre los tamices 100/200, el volumen óptimo fue -
de 2200 ml para el colorante cristal violeta, lo cual indica que pa-
ra este último tamaño de partículas, la capacidad de adsorción de la
lava es mayor.

También, en toda curva de adsorción se conoce como punto de satura-
ción o de equilibrio, al volumen a partir del cual la concentración
de soluto en el efluente es igual a la concentración en la alimenta-
ción. En las pruebas efectuadas con lava volcánica no se logró al-
canzar este punto, ya que después de cierto volumen de solución pasa-
do a través de la columna, la concentración de colorante en el efluen-
te se mantuvo relativamente constante pero por debajo de la concentra-
ción inicial. Además, al utilizar partículas de tamaños mayores, el
adsorbente se satura con mas rapidez.

En vista de los resultados anteriores, se considera conveniente uti-
lizar partículas de tamaño comprendido entre 100 y 200 mesh, que ade-
más de producir una velocidad de flujo razonable para procesos que
se realizan bajo la acción de la gravedad, poseen buena capacidad de

adsorción para los tipos de colorantes empleados.

Con el tratamiento químico a que se sometió el material en la prueba N° 4, se esperaba obtener una mayor eficiencia en la capacidad de adsorción. Sin embargo, analizando los resultados obtenidos en las pruebas 2 y 4 para el colorante azul de metileno, que aparecen graficados en las figuras A-3 y A-5 del apéndice, se observa una eficiencia menor para el material tratado, aun cuando el tamaño de partículas de éste debería contribuir a producir el efecto contrario. Este resultado probablemente se deba a que el tratamiento realizado no fue el adecuado para este material, pues existe la posibilidad de que haya ocurrido una obstrucción de los poros, causada por retención de los reactivos utilizados y/o productos de reacciones no previstas.

Con respecto a la prueba N° 5, puede decirse que es posible la reutilización del material mediante el proceso de regeneración, ya que presentó un comportamiento de adsorción similar al de la prueba N° 2 de la cual se tomó el material que fue sometido a reactivación. (figura A-2 del apéndice).

Además de las pruebas reportadas anteriormente, se realizaron otras utilizando soluciones coloreadas de desechos industriales.

Estas soluciones fueron las siguientes:

a) Desechos de una industria textil.

- b) Solución alcohólica coloreada, proveniente de una planta de cosméticos.
- c) Acido acético coloreado.
- d) Solución de azúcar no refinada.

Los resultados obtenidos en estas pruebas no fueron satisfactorios, a pesar de haberse realizado variaciones en las condiciones de operación tales como: variación de pH y utilización de un proceso de adsorción por contacto en lugar del de percolación. Por la imposibilidad de conocer la estructura química de estos colorantes, - puede suponerse que es diferente a la de los colorantes cristal violeta y azul de metileno, siendo esta la posible razón de que no se generen fuerzas de enlace entre las moléculas de éstos y las del adsorbente. Al mismo tiempo, es probable que el peso molecular de estos colorantes sea menor que el de los retenidos (cristal violeta : 407.5 grs/mol y azul de metileno : 791 grs/mol), debiéndose también a esto la ausencia de retención por la lava.

Al efectuar un tratamiento ácido-base en las soluciones coloreadas, se intentó disminuir la solubilidad del colorante en el solvente que lo contenía, facilitando de esta manera su retención en el adsorbente. Con el mismo fin se utilizó el proceso por contacto, aumentándose con esto el tiempo de interacción entre el adsorbente y el colorante. A pesar de todas las variaciones introducidas, los resultados fueron negativos, siendo éste el motivo por el cual no han sido reportados.

En conclusión, la lava volcánica puede utilizarse como material adsorbente, para ciertos tipos de colorantes; presentando además la propiedad de poder ser regenerada mediante un tratamiento sencillo de bajo costo.

4.2- EVALUACION DEL MATERIAL COMO MEDIO FILTRANTE.

Actualmente, la operación de filtración es utilizada en la mayoría de los procesos industriales para la purificación de aguas, en lo que respecta a la eliminación de sólidos suspendidos.

Casi todos los materiales utilizados como medios filtrantes, presentan la característica de ser sólidos porosos. Haciendo entonces una comparación de la lava volcánica con ellos, se decidió evaluar su comportamiento como medio filtrante; para lo cual se realizaron las pruebas cuya metodología y resultados se presentan a continuación.

4.2.1- METODOLOGIA

La evaluación de las propiedades filtrantes de la lava volcánica se realizó de acuerdo a lo descrito en la sección 3.2 para filtros de arena por gravedad. Para tal fin, el medio filtrante y el soporte, lava volcánica y grava respectivamente, se ordenaron en una serie de lechos con tamaños de partículas decrecientes de abajo hacia arriba; a través de los cuales se hizo pasar una corriente de aguas negras proveniente del río Acelhuate y recolectada en la zona de -

Aguas Calientes. A estas aguas se les determinó el contenido de sólidos suspendidos antes de ser sometidas al proceso de filtración y después de la recolección de ciertos volúmenes de filtrado, con el fin de determinar la proporción en que son retenidos los sólidos por el filtro durante la ejecución de la prueba.

PRUEBA Nº 1

La ejecución de esta prueba requirió los siguientes pasos:

a) Preparación del material

El material sin sufrir ningún tratamiento previo, se sometió a un proceso de reducción de tamaño que consistió en:

- 1) Trituración: Esta se realizó en un triturador de mandíbula, efectuándose una reducción gruesa del tamaño de la roca.
- 2) Molido: En este paso se continuó la reducción del tamaño de las partículas de roca hasta lograr los tamaños necesarios para el arreglo de las capas del filtro.
- 3) Tamizado. Se utilizaron tamices de la serie Tyler separándose las fracciones correspondientes a los tamices 28/48, 14/28 y 3/8 que fueron las utilizadas en la disposición de los lechos del filtro.

b) Disposición del Filtro.

En un tubo de vidrio de 3.75 pulg. de diámetro interno y 60 pul-

gadas de altura se dispusieron las capas de medio filtrante y soporte cuyas alturas y tamaño de partículas se detallan a continuación:

Tipo de capa	Altura (pulg)	Tamaño de partículas (pulg)	
Medio fino	4	0.0232	- 0.0116
Medio semi-grueso	3 3/8	0.0460	- 0.0232
Medio grueso	1 5/8	0.2630	- 0.0930
Soporte mediano	1 5/8	0.5000	- 0.2500
Soporte grueso	2 5/8	1.0000	- 0.5000

c) Ejecución de la Prueba.

De las diversas maneras de operación de filtros utilizados en la práctica, se escogió la operación continua a presión constante, por ser la más fácil de controlar, considerando las limitaciones de equipo con que se cuenta en el laboratorio. Para lograr lo anterior, se procuró mantener una altura de agua constante sobre el medio filtrante, ya que de esta manera, las únicas fuerzas que actúan sobre la columna de lava son la presión atmosférica y la cabeza de presión producida por el agua.

1) Alimentación del filtro.

La alimentación de las aguas negras provenientes de un tanque agitado manualmente, se efectuó por gravedad, controlándose la velocidad por medio de válvulas reguladoras de flujo operadas también manualmente.

2) Drenaje

El drenaje del filtrado se efectuó por la parte del fondo de la columna, utilizándose como sistema colector un embudo adaptado a una manguera, la cual descargaba en un recipiente graduado con el fin de controlar el volumen recolectado en cualquier instante de operación.

Un esquema del equipo utilizado se presenta en la figura B-1 del apéndice.

3) Determinación de sólidos suspendidos.

Para la determinación de los sólidos suspendidos presentes en las aguas negras se utilizó un espectrofotómetro modelo DR-EL/2 de la Hach Chemical Company. Este instrumento está diseñado para medir concentraciones de sustancias particulares en agua, el color de las cuales varía en intensidad como una función de dicha concentración. (22)

d) Condiciones de Operación y resultados obtenidos.

Las condiciones de operación y los resultados obtenidos en la prueba N° 1 se reportan en la siguiente tabla:

TABLA 4.6 - CONDICIONES DE OPERACION Y RESULTADOS OBTENIDOS
EN LA PRUEBA N° 1

Medición	Tiempo (min)	Volumen acumulado (ml x 10 ⁻³)	Velocidad de flujo de filtrado (ml/min x 10 ⁻²)	Sólidos suspendidos (p.p.m.)
1	5	1.297	5.182	52
2	10	3.656	4.247	52
3	15	5.491	3.086	50
4	20	6.870	2.435	48
5	25	7.979	2.010	48
6	30	8.917	1.727	47
7	35	9.600	1.529	48
8	40	10.522	1.359	49
9	45	11.140	1.104	47
10	50	11.664	0.991	47

Porcentaje promedio de sólidos suspendidos retenidos: 92%

Condiciones de Operación

Aguas negras: Densidad inicial : 62.06 lbs/pie³

Altura del agua 24 pulg

Contenido inicial de sólidos suspendidos: 600 p.p.m.

Filtro: Altura total del material filtrante y del soporte: 13.25 pulg.

Altura de la torta formada después del proceso de filtración. 0.25 pulg.

Presión ejercida por la
columna de agua: 124.12 lbf/pie².

La figura B-2 del apéndice muestra la gráfica de velocidad de flujo contra tiempo para esta prueba.

PRUEBA N° 2

Esta prueba se realizó de manera similar a la anterior, diferenciándose en que para las mediciones de sólidos suspendidos se recolectaron fracciones de 1 litro cada una y además, se agregó una capa de lava volcánica con tamaños de partículas comprendidos entre los tamices de 60 y 100 mesh de la serie Tyler en la parte superior del filtro, quedando distribuidos los lechos de medio filtrante y soporte como se detalla a continuación:

Tipo de capa	Altura (pulg)	Tamaño de partícula (pulg)
Medio fino	3	0.0097 - 0.0058
Medio semi-fino	3	0.0232 - 0.0116
Medio semi-grueso	3 3/8	0.0460 - 0.0232
Medio grueso	1 5/8	0.2630 - 0.0930
Soporte mediano	1 5/8	0.5000 - 0.2500
Soporte grueso	2 5/8	1.0000 - 0.5000

Filtro	Altura total del material filtrante y del soporte:	15.25 pulg.
	Altura de la torta formada después del proceso de filtración:	0.40 pulg.
	Presión ejercida por la columna de agua:	113.78 lbf/pie ²

El porcentaje promedio de sólidos suspendidos se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\% = \frac{\text{Sólidos suspendidos iniciales} - \text{Sólidos suspendidos finales}}{\text{Sólidos suspendidos iniciales}} \times 100$$

La figura B-2 del apéndice, muestra la gráfica de velocidad de flujo de filtrado contra tiempo para esta prueba.

4.2.2- DISCUSION DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos presentados en las tablas 4.6 y 4.7 demuestran que la lava volcánica posee una gran capacidad para remover sólidos suspendidos en soluciones acuosas ya que los porcentajes de sólidos retenidos fueron de 92% y 96% para la primera y segunda - prueba respectivamente.

El aumento en eficiencia alcanzado en la segunda prueba, fue causado por la utilización de una capa accesoria de lava con tamaño de partículas mas pequeño que el utilizado en la capa superior para la prueba N° 1 .

En las gráficas de velocidad de flujo de filtrado contra tiempo - presentadas en las figuras B-2 del apéndice, se observa un decaimiento exponencial para la velocidad producido por la obstrucción de los capilares del medio filtrante y por la formación de una - torta de partículas sólidas acumuladas sobre la capa superior del filtro. Además, esta velocidad es en todo momento menor para la - prueba N° 2 que para la prueba N° 1 debido a la resistencia adicional ofrecida por la capa accesoria de lava volcánica.

El material utilizado en la prueba N° 1 se sometió a un proceso de lavado en co-corriente, con el objeto de comprobar su reutilización. Los resultados fueron satisfactorios desde el punto de vista de velocidades de flujo, sin embargo, no han sido reportados por no haberse logrado efectuar las mediciones necesarias, específicamente en lo que respecta a sólidos suspendidos, debido a que el espectrofotómetro no se encontraba en las condiciones adecuadas. Un lavado en contra-corriente rendiría mejores resultados puesto que en este tipo de lavado, ocurre una fluidización del lecho de partículas facilitándose de esta manera la remoción de los sólidos atrapados; mientras que en el proceso a co-corriente solamente ocurre un arrastre de ellos.

En términos generales puede decirse que el material volcánico presenta las características adecuadas para ser utilizado como material filtrante.

4.3- EVALUACION DE LA LAVA VOLCANICA COMO AISLANTE TERMICO.

Considerando que la mayoría de materiales silíceos son reconocidos como buenos aislantes térmicos y que el aire en reposo ocluido en los poros de un material es el mejor aislante, se planteó la posibilidad de utilizar la lava volcánica para tal fin dado su alto contenido de sílice (aproximadamente 50% en peso) y su alta porosidad.

A fin de evaluar las propiedades aislantes de la lava volcánica, se propuso efectuar mediciones del coeficiente de conductividad térmica de ésta; para verificar en que grado dicho material permite la conservación del calor.

4.3.1- METODOLOGIA.

Las determinaciones de los coeficientes de conductividad de la lava se realizaron de acuerdo al "Método del Cilindro Hueco ó Método de Van Rinsum", cuyos fundamentos teóricos se presentaron en la sección 3.3. Este método consiste en la adaptación del material a la forma de un tubo hueco dentro del cual se coloca un tubo metálico, en este caso de Cobre, de 35.968 pulg de longitud y 1.125 pulg. de diámetro conteniendo en su interior una resistencia eléctrica por la que se hace circular una corriente mediante la aplicación de determinado potencial eléctrico. La circulación de esta corriente origina una disipación de energía que se manifiesta por un flujo de calor aumentando las temperaturas de la pared interna y exter

na del aislante, las cuales fueron medidas en un potenciómetro mediante termocouplas de Cobre-Constantan adaptadas a dichas paredes. La figura C-1 del apéndice presenta las especificaciones y medidas del equipo utilizado.

Los pasos experimentales fueron los siguientes:

a) Preparación del material

La lava volcánica previamente triturada y tamizada hasta un tamaño de partícula inferior al correspondiente a 100 mesh, - se aglomeró en proporciones de 75, 80 y 85% en peso con cemento Portland, para la fabricación de los tres cilindros que fueron sometidos a prueba. El período de fraguado de estos cilindros fue de una semana y el secado de tres. La forma cilíndrica se obtuvo vertiendo la mezcla en moldes de lámina galvanizada con las medidas adecuadas.

b) Ejecución de la Prueba.

1) Calibración del Aparato.

Con el propósito de calibrar el aparato de prueba se procedió a medir experimentalmente el coeficiente de conductividad térmica de un aislante conocido, fibra de vidrio en este caso, la cual fue adaptada a la forma de un cilindro con las mismas dimensiones de los cilindros de lava.

Con los valores del coeficiente de conductividad para la -

fibra de vidrio reportados por los fabricantes (K_r , Tabla 4.8) y los medidos experimentalmente (K_e , Tabla 4.9) cuyos cálculos se detallan posteriormente, se procedió a encontrar una relación entre la temperatura media y el ΔK ($\Delta K = K_e - K_r$) correspondiente, esta relación resultó ser lineal y se presenta en la figura C-2 del apéndice, deduciéndose de ella la siguiente ecuación de corrección.

$$\Delta K = m \bar{T} + b$$

siendo m = pendiente de la recta

$$= 0.000525 \text{ BTU/hr-pie}^2 (\text{°F/pulg})\text{°F}$$

b = intercepto

$$= 0.010 \text{ BTU/hr-pie}^2 (\text{°F/pulg})$$

De donde: $\Delta K = 0.000525 \bar{T} + 0.010$

y para la determinación del coeficiente de conductividad de la lava, se utilizará la siguiente ecuación:

$$K_c = K_e - \Delta K$$

Siendo K_c y K_e = coeficiente de conductividad térmica corregido y experimental respectivamente.

2) Procedimiento y Cálculos.

Como se mencionó anteriormente, para la realización de la -

prueba se aplicó una determinada diferencia de potencial a la resistencia eléctrica, la cual originó un paso de corriente a través de ella.

Cuando el sistema alcanzó condiciones de estabilidad, se procedió a efectuar lecturas de las temperaturas en las paredes externa e interna del cilindro. Con estos valores se efectuaron los cálculos de coeficiente de conductividad térmica mediante la aplicación de las siguientes ecuaciones:

Flujo de Calor : utilizando la ecuación 3-6 de la sección 3.3, se tiene:

$$Q = 3.4127 E I$$

Donde: Q = flujo calorífico en BTU/hr.

E = tensión eléctrica en voltios

I = intensidad de la corriente eléctrica en amperios.

Coefficiente de Conductividad Térmica: Haciendo uso de la ecuación 3-12 de la sección 3.3, se tiene:

$$K = \frac{12 Q \ln (D_2/D_1)}{\Delta T 2\pi l}$$

Donde K = coeficiente de conductividad térmica en BTU/hr-pie²
(°F/pulg).

D_1 = diámetro interno del cilindro
= 1.125 pulg.

D_2 = diámetro externo del cilindro
= 3.125 pulg.

l = longitud del cilindro
= 2.968 pies

$\Delta T = T_2 - T_1$ = diferencia entre las temperaturas de las paredes externa e interna del cilindro.

c) Resultados Obtenidos.

Los resultados obtenidos en la calibración del aparato se encuentran en las tablas 4.8 , 4.9 y 4.10 y los obtenidos para los cilindros de lava volcánica se presentan en la tabla 4.11 y aparecen graficados en la figura C-3 del apéndice.

TABLA 4.8 - VALORES DEL COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD TERMICA PARA LA FIBRA DE VIDRIO REPORTADOS POR LOS FABRICANTES.(23)

$\bar{T}(\text{°F})$	$K_T = \frac{\text{BTU}}{\text{hr- pie}^2 (\text{°F/ pulg})}$
50	0.210
75	0.225
100	0.238
150	0.270
200	0.300
250	0.335

TABLA 4.9 - VALORES EXPERIMENTALES DEL COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD TERMICA PARA LA FIBRA DE VIDRIO.

Densidad aparente : 4.80 lbs / pie³

T ₁ (°F)	T ₂ (°F)	\bar{T} (°F)	ΔT (°F)	E (voltios)	I (amp.)	Q BTU/hr	K _e BTU/hr-pie ² (°F/pulg)
121.0	87.0	104.00	34.0	10.0	0.520	17.762	0.343
180.0	90.5	135.25	89.5	16.0	0.835	45.636	0.335
216.0	85.8	150.90	130.2	20.5	1.035	72.476	0.366
338.0	92.0	215.00	246.0	29.0	1.518	150.437	0.402
410.0	95.6	252.80	314.4	36.5	1.840	229.410	0.479

TABLA 4.10 - VALORES DEL COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD TERMICA EXPERIMENTAL (K_e) Y DE REFERENCIA (K_r) PARA LA FIBRA DE VIDRIO

\bar{T} (°F)	K _e BTU/hr-pie ² (°F/pulg)	K _r BTU/hr-pie ² (°F/pulg)	ΔK (K _e - K _r)
104.00	0.343	0.242	0.1010
135.25	0.335	0.262	0.0731
150.90	0.366	0.272	0.0938
215.00	0.402	0.303	0.0989
252.80	0.479	0.336	0.1430

TABLA 4.1 - COEFICIENTES DE CONDUCTIVIDAD TERMICA EXPERIMENTALES Y CORREGIDOS PARA LAS DIFERENTES PROPORCIONES DE LAVA VOLCANICA UTILIZADAS EN LAS PRUEBAS DE AISLAMIENTO TERMICO

T ₁ (°F)	T ₂ (°F)	T̄(°F)	ΔT(°F)	E volt.	I amp.	Q BTU/hr	K _e	ΔK	K _c
Cilindro con 75% en peso de lava volcánica Densidad Aparente: 99.03 lbs/pie ³									
92.00	76.50	84.25	15.50	9.50	0.500	16.210	0.690	0.009	0.681
130.20	95.00	112.60	35.20	25.00	1.200	102.381	1.921	0.077	1.844
170.00	84.80	127.40	85.20	37.00	1.950	242.226	1.908	0.077	1.831
263.30	108.00	185.65	155.30	58.00	2.680	530.470	2.255	0.107	2.148
314.80	121.30	218.05	193.50	64.00	2.960	646.501	2.206	0.124	2.082
Cilindro con 80% en peso de lava volcánica Densidad Aparente: 106.64 lbs/pie ³									
112.00	93.20	102.60	18.80	17.00	0.680	39.451	1.386	0.064	1.322
156.00	97.60	126.80	58.40	32.00	1.370	149.613	1.692	0.077	1.615
225.10	92.12	158.60	133.00	46.50	2.170	344.358	1.710	0.094	1.616
311.00	112.70	211.85	198.30	61.00	2.850	593.298	1.976	0.122	1.854
380.40	109.00	244.70	271.40	64.50	3.480	766.015	1.863	0.138	1.725
Cilindro con 85% en peso de lava volcánica Densidad Aparente: 120.59 lbs/pie ³									
119.30	91.10	105.20	28.20	16.00	0.905	49.435	1.158	0.066	1.092
280.00	107.00	153.95	93.70	31.00	1.668	176.488	1.244	0.091	1.153
273.00	100.00	186.50	173.00	45.50	2.200	336.931	1.286	0.108	1.178
320.00	107.00	213.50	213.00	51.00	2.823	491.370	1.523	0.122	1.401
397.40	130.20	263.80	267.20	60.00	3.420	699.981	1.730	0.149	1.581

* Los valores de K_e, ΔK y K_c están expresados en BTU/hr-pie²(°F /pulg).

4.3.2- DISCUSION DE RESULTADOS.

El material utilizado en la fabricación de los cilindros para las pruebas de aislamiento térmico, cumple algunas de las propiedades requeridas en un aislante; es decir:

- a) Buen comportamiento a las temperaturas de empleo.
- b) Conservación de sus propiedades con el tiempo.
- c) Ausencia de efectos dañinos sobre los materiales en contacto con él; específicamente ausencia de acción corrosiva.
- d) Ausencia de reacciones químicas con los materiales con que se va a encontrar en contacto.
- e) Resistencia a los diferentes agentes de destrucción. (Imputrescibilidad, resistencia a los gusanos, a los roedores, etc).

Además, analizando los datos de conductividad térmica presentados en la tabla 4.11 y graficados en la figura C-3 del apéndice, se deduce que un incremento en la proporción de lava volcánica en los cilindros, origina coeficientes de conductividad térmica menores y por consiguiente un mejoramiento de las propiedades aislantes del material. En base a lo anterior, se podrían esperar resultados mas satisfactorios al aumentar la proporción de lava a valores mayores que los utilizados (75 , 80 y 85% en peso); sin embargo, al realizar ésto, se presenta el inconveniente de que los cilindros - se vuelven quebradizos y difíciles de manejar.

De las tres pruebas llevadas a cabo, los coeficientes de conductividad obtenidos para los cilindros con 80 y 85% en peso de lava volcánica, están comprendidos dentro del rango aceptado para la mayoría de los aislantes térmicos conocidos (0.14 a 1.6 BTU/hr-pie² (°F/pulg). Considerando también las temperaturas a que fue sometido el material, podría ser clasificado como un aislante ordinario, ya que como se explicó anteriormente, éstos son los que soportan temperaturas menores de 1652°F.

Las muestras de lava volcánica analizadas presentaron un contenido de sílice del 50% aproximadamente. Al comparar los coeficientes de conductividad para ésta, con los de un material que contiene alrededor del 85% de sílice (23), puede verse que los valores para la lava volcánica son mayores que los del material mas rico en sílice; sin embargo, estas variaciones no son muy notorias a pesar de la gran diferencia en el contenido silíceo debido a que la lava volcánica contiene además aluminio en una proporción del 15% (expresada como óxido), que posee también propiedades aislantes.

En general, puede decirse que el material presenta las características adecuadas para ser utilizado como un aislante térmico ordinario, pero deberán tomarse en cuenta los inconvenientes que para usos prácticos pudieran surgir como consecuencia de su excesivo peso, si se le compara con otros aislantes de bajo peso, tales como fibra de vidrio y poliuretano.

4.4 - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

La evaluación experimental de las propiedades industriales de la lava volcánica, produjo los resultados presentados en las primeras secciones de este capítulo. Un análisis de estos resultados proporciona un estimado general del comportamiento de la lava para cada uno de los fines propuestos, tomando en cuenta las limitaciones de equipo y en muchos casos la ausencia total de éste para una investigación más completa.

Considerando entonces, la importancia de sintetizar los resultados obtenidos, se presentan a continuación las conclusiones generales del trabajo realizado y se plantean a la vez algunas recomendaciones que dejan el campo abierto a futuras investigaciones.

4.4.1. CONCLUSIONES.

a) COMO MEDIO ADSORBENTE.

- La lava volcánica puede ser utilizada como un adsorbente de tipo selectivo, ya que los valores de eficiencia obtenidos en las pruebas realizadas con los colorantes cristal violeta y azul de metileno, son satisfactorios y se alcanzaron velocidades de flujo razonables al utilizar partículas de tamaño comprendido entre las mallas 48 y 200 de la serie Tyler, a pesar de que el proceso se realizó bajo la acción de la gravedad. Con el propósito de incrementar estas velocidades de flujo, se recomienda aplicar una diferencia de presión entre los extremos de la columna.

- Tomando en cuenta la facilidad de regenerar las propiedades adsorbentes de la lava volcánica mediante un procedimiento sencillo y de bajo costo que consiste en separar el colorante retenido en el adsorbente por su solubilización en agua, aplicando posteriormente calor para eliminar la humedad, es posible sustituir con ella algunos adsorbentes comunes para soluciones de colorantes orgánicos con estructura y peso molecular semejantes a los de los usados en las pruebas realizadas (cristal violeta y azul de metileno).
- Las propiedades adsorbentes del material no pueden ser incrementadas por tratamientos con ácido y/o bases fuertes; por el contrario, estas propiedades decrecen con dichos tratamientos.
- Debido a su abundancia y bajo costo, la lava volcánica puede ser utilizada en procesos de adsorción que requieren grandes cantidades de material adsorbente ó en procesos en los cuales por alguna razón, exista contaminación y se haga necesaria la completa sustitución del adsorbente.
- El proceso de calcinación del material adsorbente, al eliminar la materia orgánica aumenta la porosidad y por consiguiente lel área superficial, originando una mayor eficiencia en los procesos de adsorción. Por lo tanto, todo material que será utilizado con fines adsorbentes deberá someterse a este tratamiento.

- Para procesos de adsorción que se realicen bajo la acción de la gravedad, no deberán utilizarse partículas de adsorbente muy finas, debido a que originan velocidades de flujo excesivamente lentas. Un tamaño adecuado de partículas para este tipo de proceso, es el comprendido entre las mallas 100 y 200 de la serie Tyler, que produce buenos valores de velocidad de flujo y eficiencia.

- b) COMO MEDIO FILTRANTE:

 - La lava volcánica puede ser utilizada como medio filtrante para eliminar sólidos suspendidos en cualquier tipo de aguas y el filtro funcionará mejor entre más alta sea la columna de medio filtrante y más pequeño sea el tamaño de sus partículas.

 - Considerando la alta eficiencia obtenida en la retención de sólidos suspendidos con el filtro de lava y además su gran abundancia, se concluye que la lava volcánica puede sustituir como medio filtrante a la arena, que es la que comunmente se utiliza en la industria para tal fin.

 - A pesar de la facilidad de limpieza que presenta el material en las operaciones de filtración, es conveniente considerar los costos relativos entre lavarlo o sustituirlo por un material no usado debido a que con un lavado a contracorriente, que es el indicado, se incurriría en costos adicionales de agua y equipo de bombeo.

C) COMO AISLANTE TERMICO:

- Considerando la resistencia a la conducción del calor presentada por la lava volcánica aglomerada con Cemento Portland, ésta puede ser utilizada como un aislante térmico.

En relación a las temperaturas de empleo, aunque por su naturaleza inorgánica posee un punto de fusión alto (mayor de 1800°F) y podría ser utilizada a elevadas temperaturas, surge el inconveniente de que a tales temperaturas el coeficiente de conductividad térmica es demasiado alto, sobrepasando los límites aceptados para la mayoría de aislantes conocidos. De modo que aún el material aglomerado en una proporción del 85% p/p de lava volcánica y 15% p/p de cemento Portland, que es el que presenta los menores coeficientes de conductividad, no deberá utilizarse a temperaturas superiores a los 300°F; si se desea un aislamiento efectivo.

- Siendo el material aglomerado con cemento Portland resistente a la acción de roedores y además imputrescible, puede emplearse en aislamiento de tuberías en industrias alimenticias y en aquellas otras en las cuales las tuberías estén expuestas a la intemperie.
- La alta densidad del material aglomerado con Cemento Portland, origina ciertas limitaciones en su utilización. También, debido a su baja resistencia mecánica, presenta serias dificultades para su manejo.

4.4.2- RECOMENDACIONES

Con el fin de contribuir a futuras investigaciones que proporcionen mayor información sobre los posibles usos de la lava volcánica en la industria, se plantean las siguientes sugerencias.

AL DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA.

- Investigar tratamientos mas adecuados para la preparación del material con el propósito de aumentar su capacidad adsorbente, e investigar las razones por las cuales los tratamientos con ácidos y/o bases fuertes provocan un decrecimiento en las propiedades adsorbentes de la lava volcánica.
- Realizar ensayos de adsorción con partículas de adsorbente de tamaño fino, aplicando una diferencia de presión en los extremos de la columna a fin de obtener velocidades de flujo razonables, reduciendo de esta manera el tiempo necesario para la realización del proceso.
- Considerar la posibilidad de incrementar la porosidad total de la cama de adsorbente, mezclando éste con un coadyuvante (Diatomáceas, ciertas formas de sílice y otras formas de lava volcánica como la Perlita), en la proporción adecuada para obtener una cama mas porosa sin variar apreciablemente las características adsorbentes de la lava volcánica.
- Utilizar para trabajos de adsorción, lava volcánica de las capas

superficiales de las canteras debido a que presenta un bajo contenido de humedad, no siendo necesario entonces realizar tratamientos costosos y complicados para la eliminación de ésta durante la preparación de la lava como material adsorbente.

- Realizar una evaluación completa de la lava volcánica como material adsorbente, cuando se desee retener colorantes diferentes al cristal violeta y azul de metileno, con el objeto de comprobar su efectividad en el proceso de adsorción de aquellos.
- Para procesos de filtración en los cuales el filtrado ha de ser utilizado con fines alimenticios, se recomienda efectuar un lavado del material filtrante antes de ser utilizado, con el propósito de evitar la contaminación del filtrado por arrastre de cualquier material contaminante retenido sobre la superficie del medio filtrante. Si existiese la posibilidad de contaminación con algún elemento tóxico (Arsénico, Plomo, Cromo, etc), se recomienda investigar tratamientos de eliminación de estos, que garanticen la calidad del filtrado.
- Investigar el comportamiento de la lava volcánica como medio filtrante, sometiendo el agua a filtrar a un tratamiento previo a alcalinización, floculación y oxidación, con el fin de insolubilizar las partículas y aumentar su tamaño, facilitando de esta manera su retención en el filtro. Esto podría ser utilizado para la retención de coloides, materia orgánica soluble y microorganismos.
- Efectuar pruebas de filtración, utilizando un coadyuvante (Diatomáceas, ciertas formas de sílice, Perlita, etc) para lograr un incre-

mento en la eficiencia de la operación en lo que respecta a la claridad del filtrado.

- Investigar el comportamiento aislante de la lava volcánica, aglomerada con otro tipo de material (por ejemplo, resinas termoestables) - que le proporcione mayor dureza y resistencia mecánica, facilitando así su manejo.
- Efectuar tratamientos en el material con miras a incrementar su porosidad y mejorar así sus propiedades aislantes. Uno de estos tratamientos puede ser el de someter la lava volcánica pulverizada a un proceso de calcinación. Otra forma de provocar mayor porosidad en el material aglomerado, consiste en introducir en la mezcla algún tipo de material (zacate seco, aserrín, etc) que por calcinación posterior origine espacios vacíos en los cilindros de prueba.
- Investigar la posible utilización de la lava volcánica para propósitos abrasivos, en base a los usos ya conocidos para arenas industriales con alto contenido de sílice en pulido de vidrios, aserradura de rocas, etc.
- Considerando que el material volcánico es químicamente inerte y muy poroso, se recomienda realizar pruebas en las cuales se utilice como soporte de catalizadores.

A LA ADMINISTRACION NACIONAL DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS (ANDA)

- Evaluar la factibilidad técnica y económica de utilizar filtros de

lava volcánica como sustitutos de los filtros de arena en sus -
plantas de tratamiento de agua.

A LA COMISION EJECUTIVA HIDROELECTRICA DEL RIO LEMPA (CEL)

- Investigar la factibilidad técnica y económica de utilizar la lava volcánica para aislamiento de tuberías en sus plantas geotérmicas.

A P E N D I C E A

FIGURAS CORRESPONDIENTES A LAS PRUEBAS DE ADSORCION

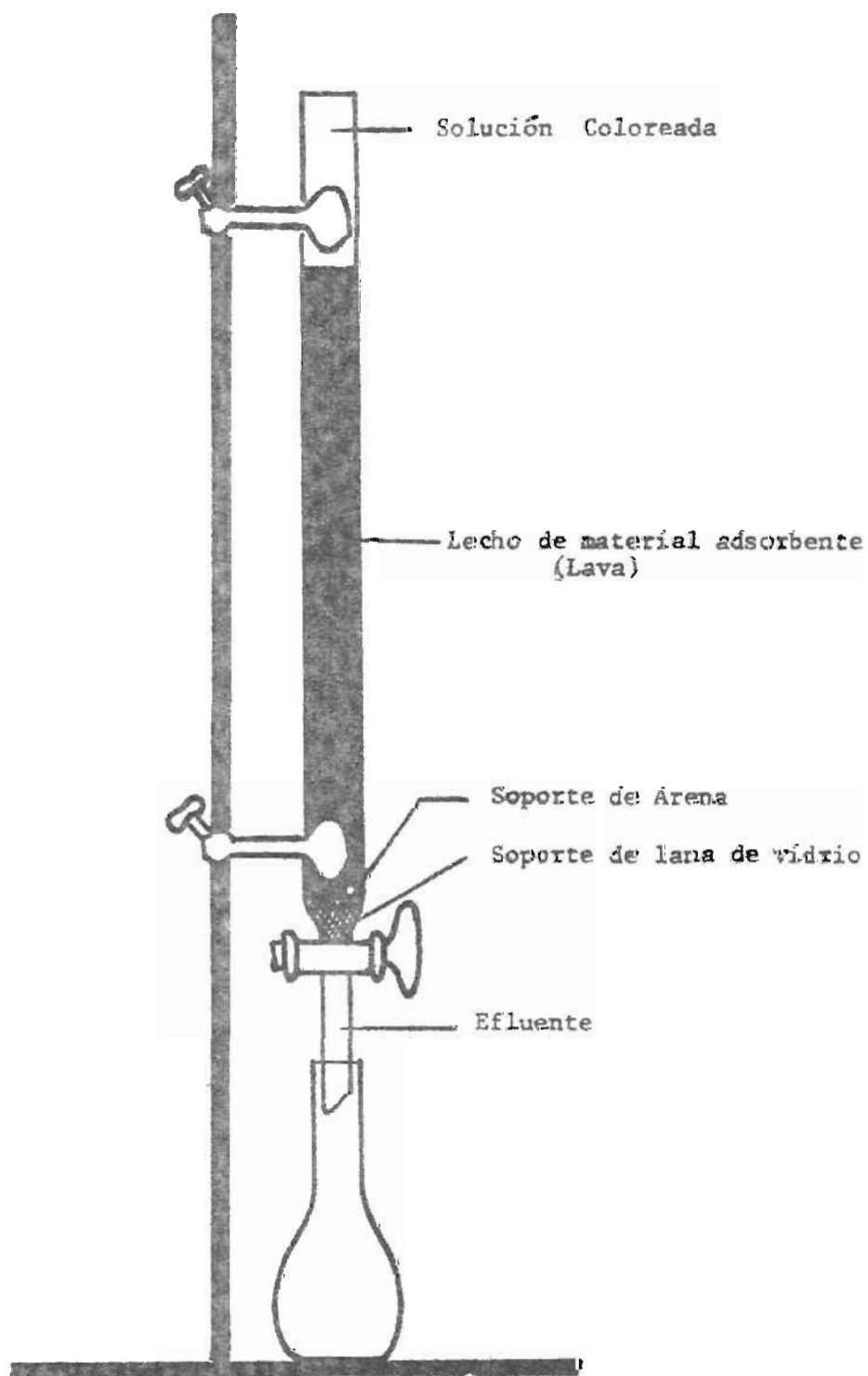


Figura A.1- Esquema del equipo utilizado en las pruebas de Adsorción

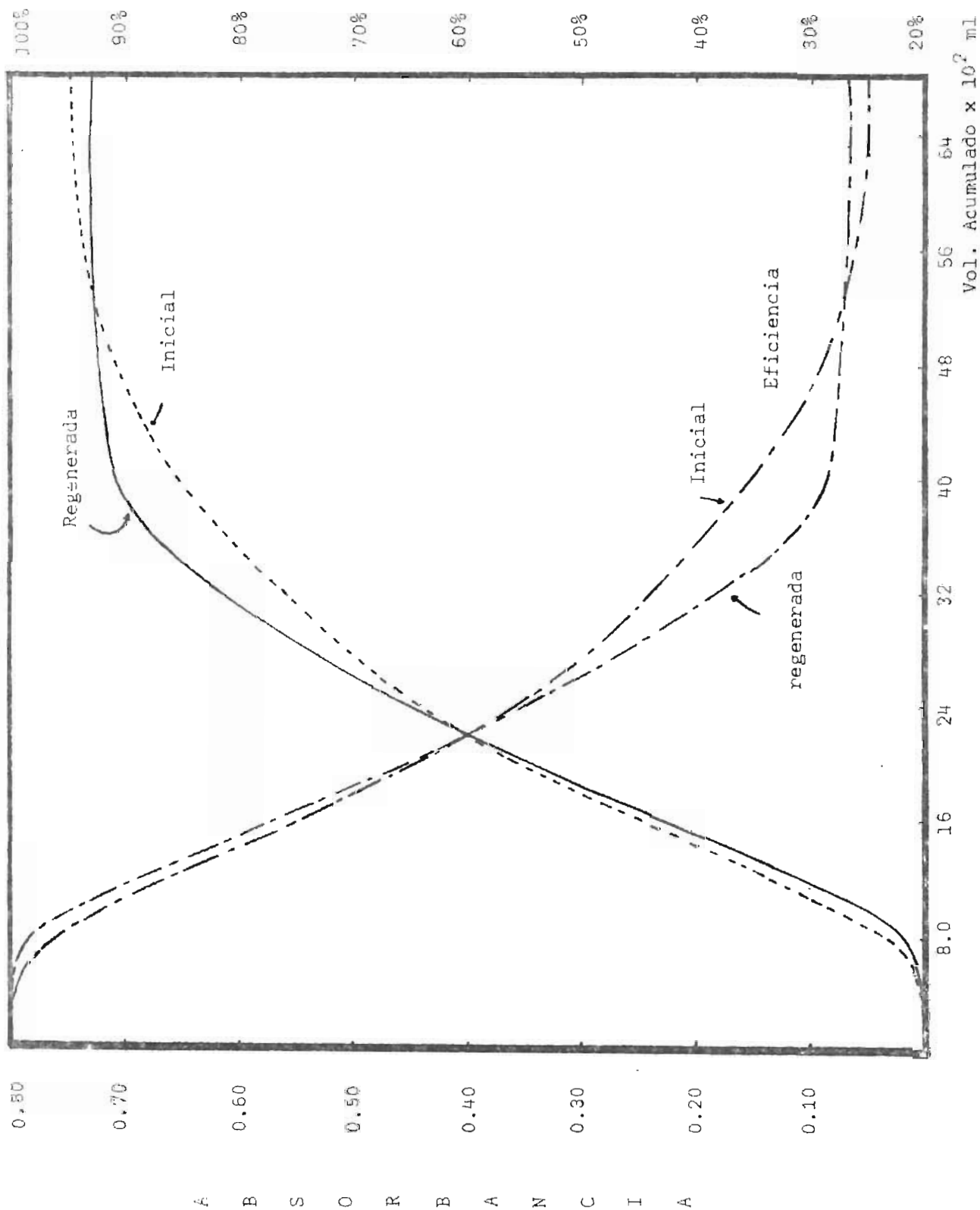


Figura A.2 - Gráficos de Adsorción correspondientes a Pruebas 2 y 5 con el colorante Cristal Violeta.

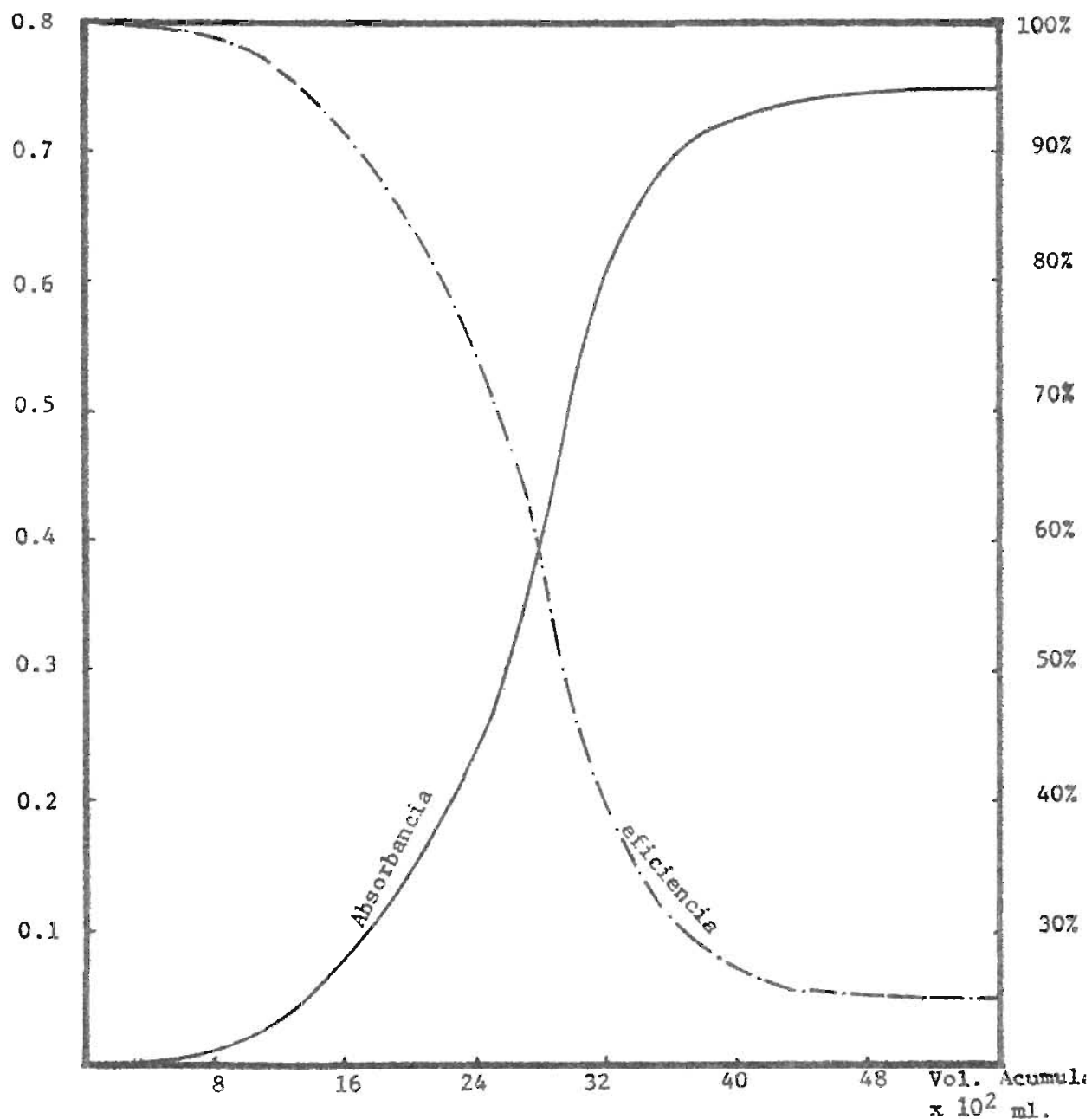


Figura A.3 - Gráfico correspondiente a la Prueba N° 2 de Adsorción con el colorante Azul de Metileno

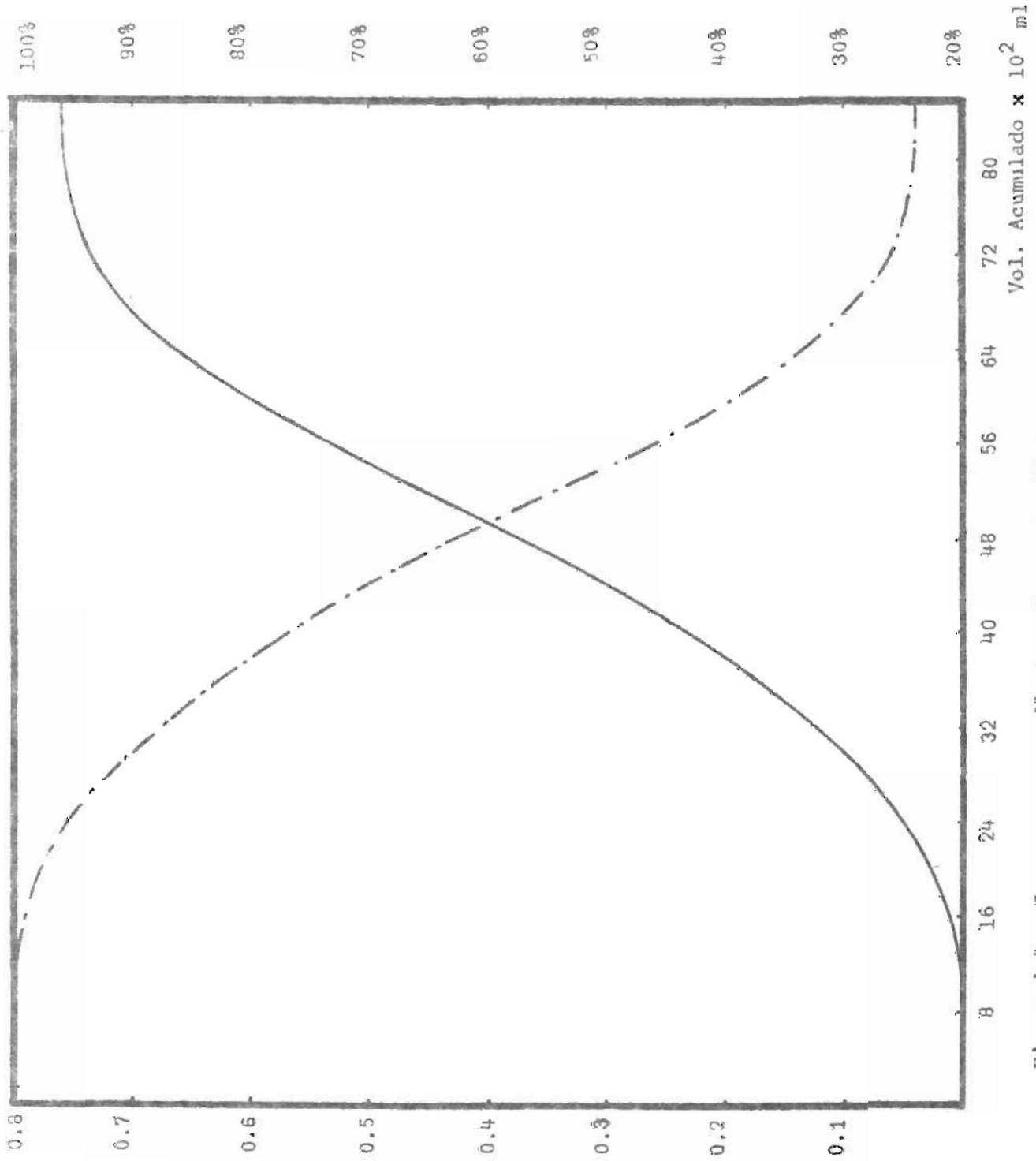


Figura A.4 - Curva correspondiente a la prueba N° 3 de Adsorción en el colorante Cristal Violeta

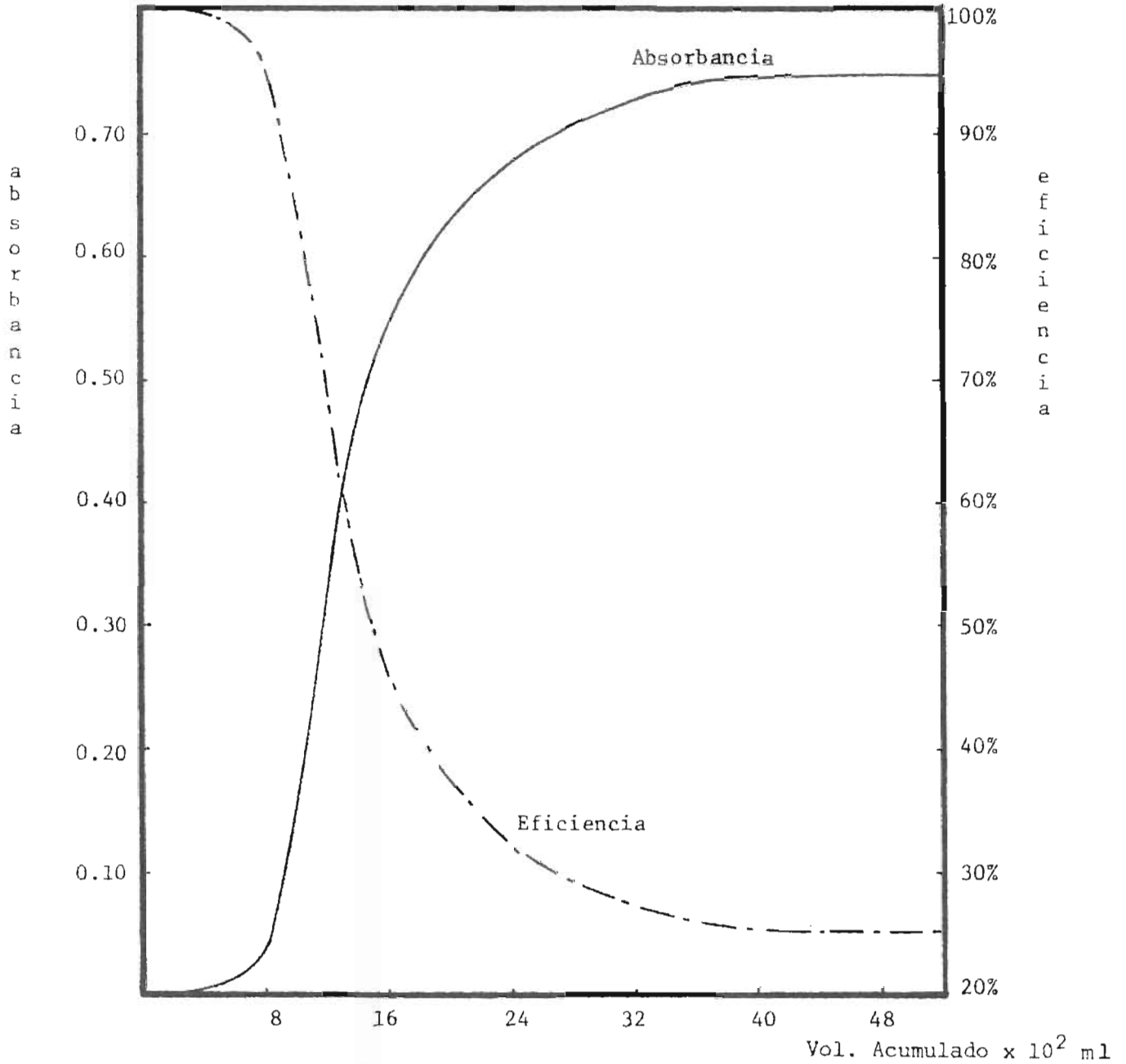


Figura A.5- Gráfico correspondiente a la prueba N.º 4 de adsorción con el colorante Azul de Metileno

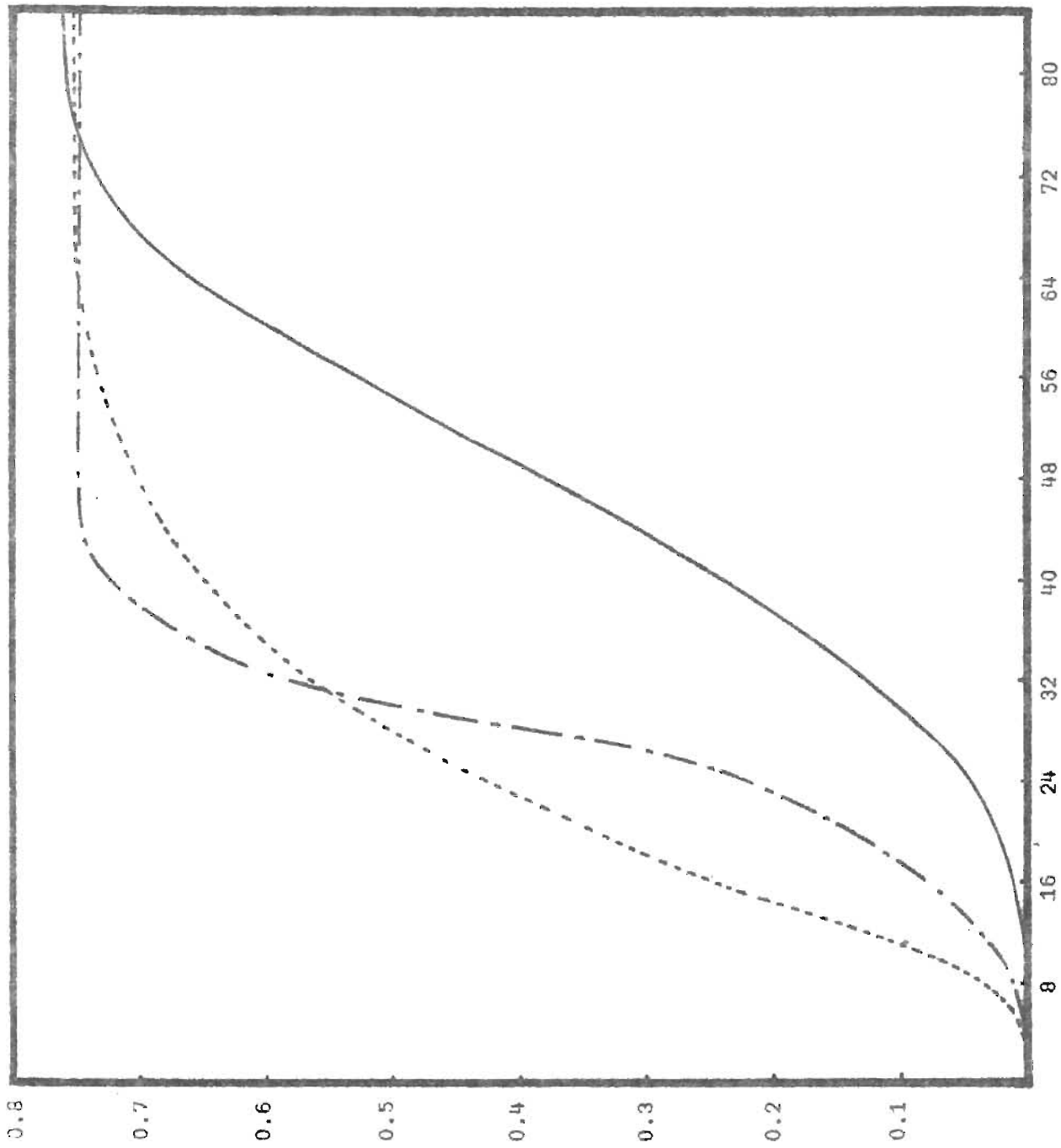


Figura A.6 - Comparación de gráficos correspondientes a las pruebas 2 y 3 con los colorantes Azul de Metileno y Cristal Violeta

A B S O R B A N C I A

BIBLIOTECA CENTRAL
UNIV. N. S. J. SALVADOR

A P E N D I C E B

FIGURAS CORRESPONDIENTES A LAS PRUEBAS DE FILTRACION

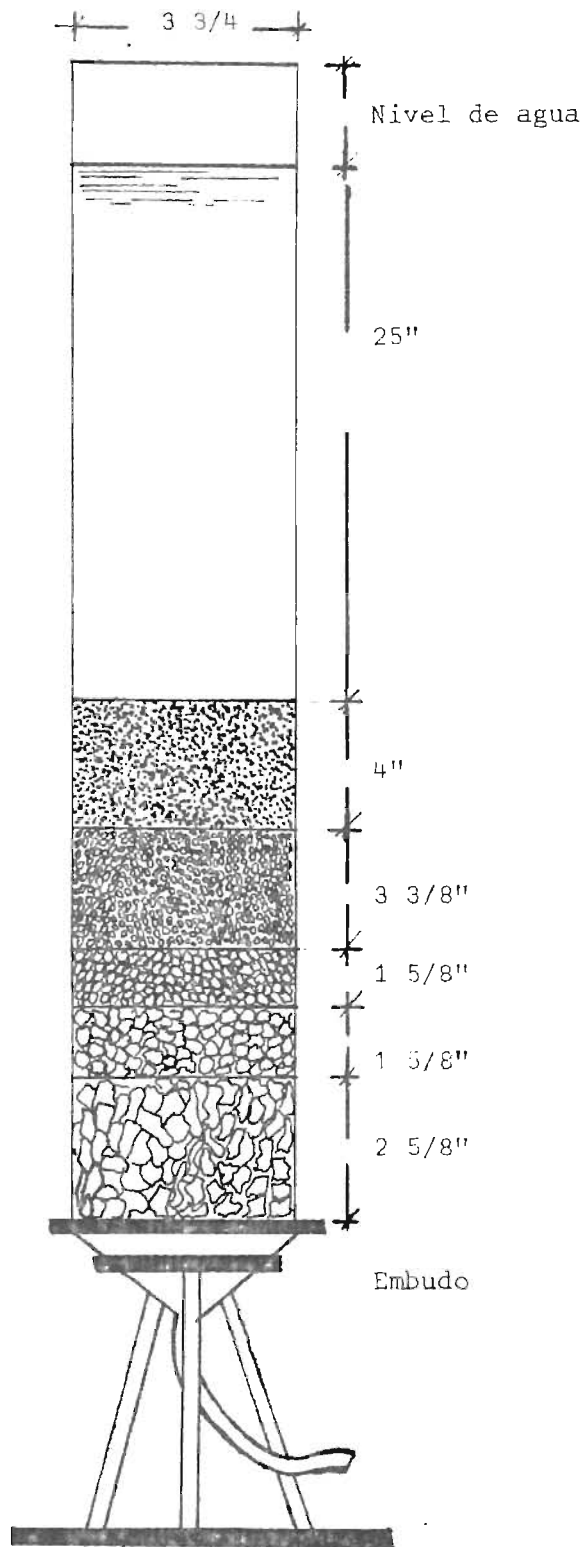


Figura B-1 Esquema del equipo utilizado en las Pruebas de Filtración

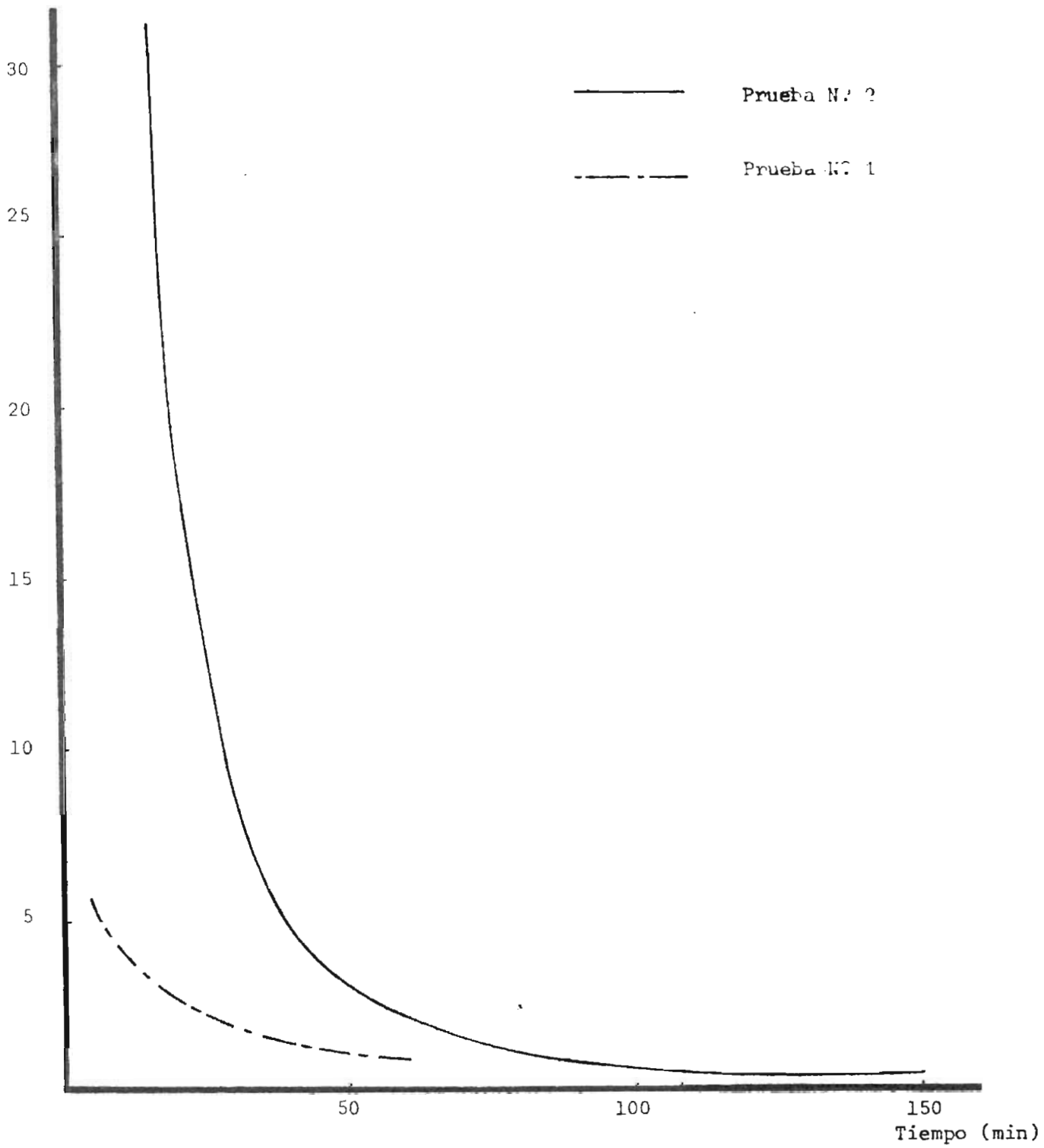
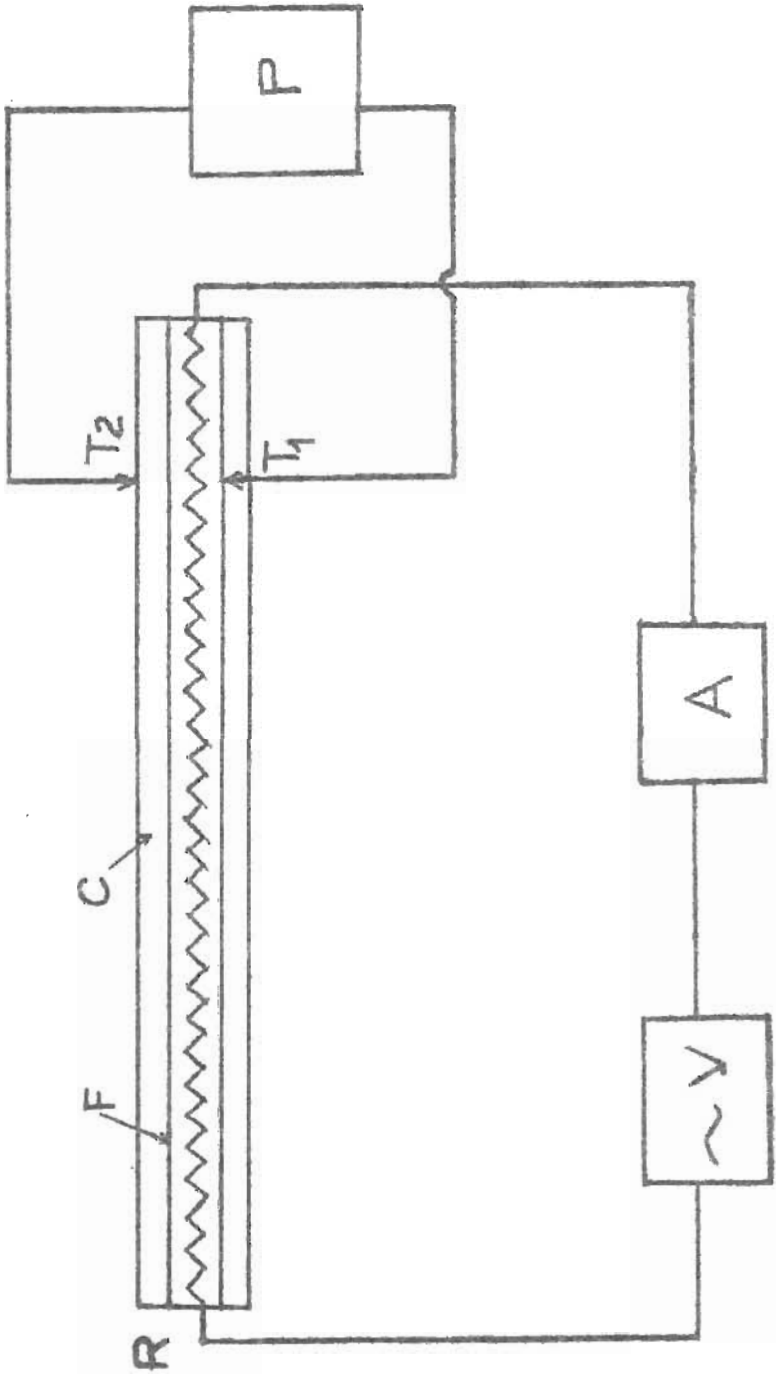


Figura B.2 - Gráficos correspondientes a las pruebas de Filtración

A P E N D I C E C

FIGURAS CORRESPONDIENTES A LAS PRUEBAS DE AISLAMIENTO

TERMICO



- F: Tubo de cobre.
- V: Autotransformador de voltaje variable. (Entrada: 110 V. Salida: 0 a 120 v)
- A: Amperímetro de corriente alterna.
- P: Potenciómetro.
- R: Resistencia eléctrica.
- C: Cilindro de lava volcánica.
- T₁: Termocupla del tubo (Cobre- constantan).
- T₂: Termocupla del aislante. (Cobre - constantan)

Figura C-1 * Esquema del equipo utilizado en las pruebas de Aislamiento Térmico

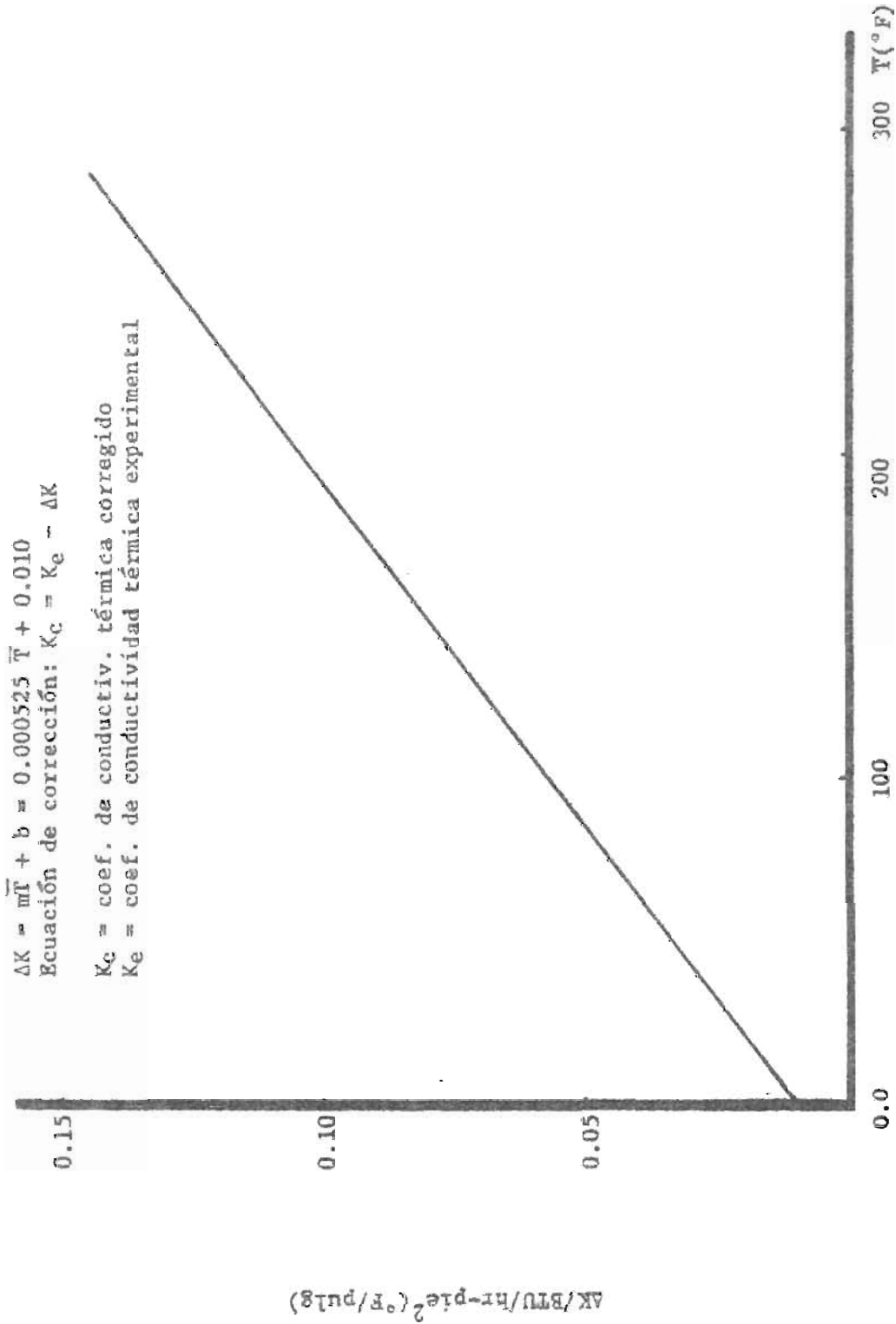


Figura C.2- Curva de calibración del equipo utilizado en aislamiento térmico

Clave:

- 1 - Fibra de vidrio
- 2 - Lava volcánica en proporción de 85% p/p
- 3 - Lava volcánica en proporción de 80% p/p
- 4 - Lava volcánica en proporción de 75% p/p

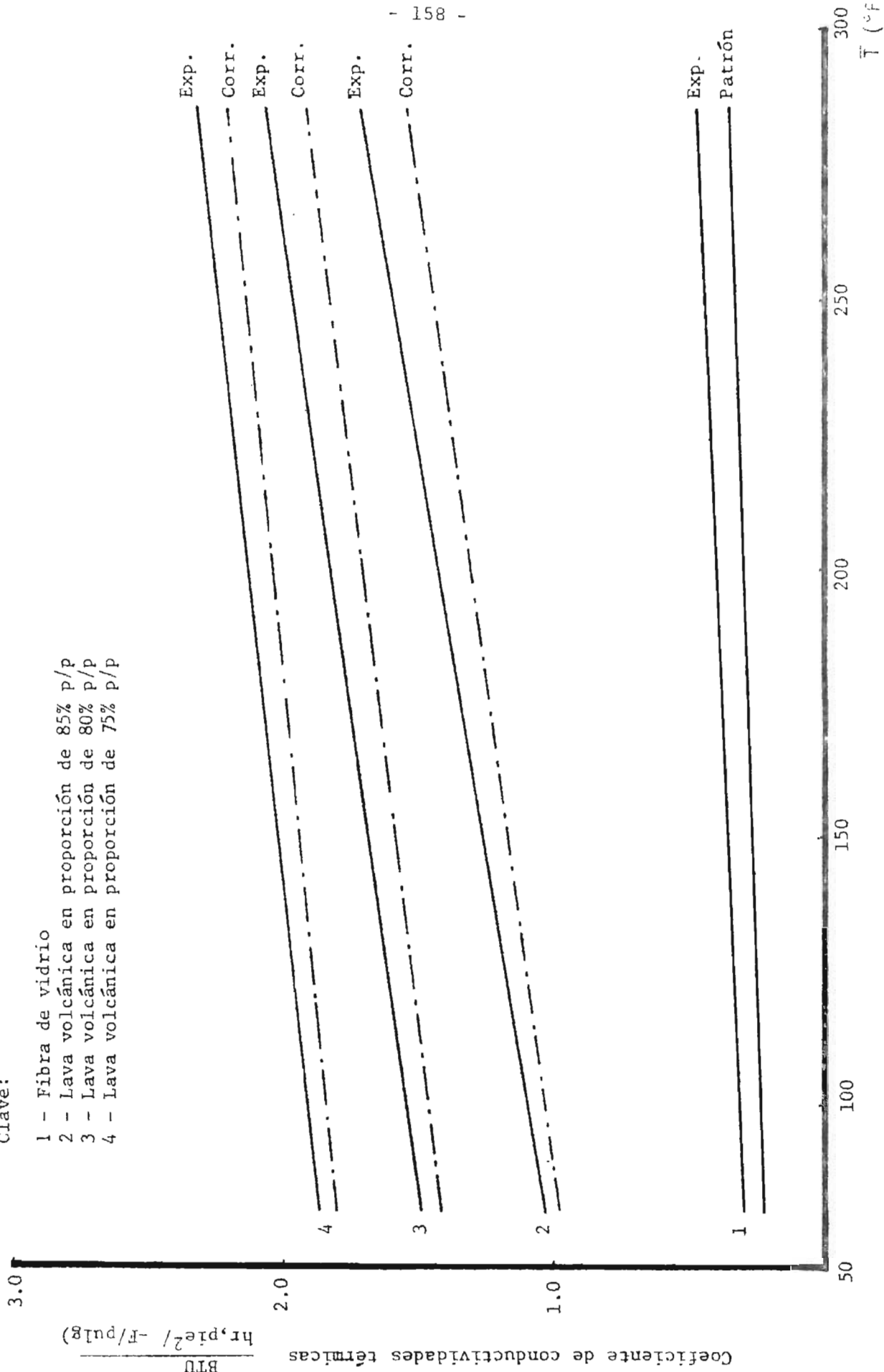


Figura C.3- Gráficos correspondientes a los coeficientes de conductividad térmica para las diferentes proporciones de lava volcánica

BIBLIOGRAFIA

- 1) Tyrrel, C.W. 'Principios de Petrología' Compañía Editorial Continental, S.A. México, 1960.
- 2) "Enciclopedia Universal Ilustrada Europea - Americana, Tomos XXIX y LI, Espasa Calpe, S.A., Madrid.
- 3) Peele, R. "Mining Engineers Handbook" Third Edition, Vol. I, John Wiley and Sons, Inc. New York, 1941.
- 4) González B, F. "Introducción a la Geoquímica" Serie de Química. Monografía N^o 8, Organización de Estados Americanos, Washington D.C. 1972.
- 5) Huan, W.T. "Petrología", 1a. Edición en Español, Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana, México, 1968.
- 6) "Estudios del Centro de Investigaciones Geotécnicas", Ministerio de Obras Públicas, San Salvador, 1975.
- 7) Barraza M, Tesis en Ingeniería Civil, "Tecnología del Concreto", Tomo VII, Concreto de Lava Volcánica, Universidad de El Salvador, San Salvador, 1970.
- 8) Jackson, M.L. "Análisis Químico de Suelos" 2a. Edición, Trad. José Beltrán Ramírez, Ediciones Omega, S.A. Barcelona, 1970.
- 9) Obregon Pérez, A. "Métodos de Análisis Químicos de Rocas y Materiales Similares", Universidad Autónoma de México, México D.F., 1973.
- 10) "Analytical Methods for Atomic Absorption Spectrophotometry" Perkin Elmer, Norwalk, Connecticut, U.S.A., 1973.
- 11) Kant, H. "Instrumentación para Espectrofotometría por Absorción Atómica" Perkin Elmer Corporation, Ediciones Guadalupe, Colombia.

- 12) Smith, J.M. "Chemical Engineering Kinetics", 2a. Edition McGraw Hill, Kogakusha Ltd., Tokyo, 1970
- 13) Othmer- Kirk, "Enciclopedia de Tecnología Química", Vol. 1 y 8, 1a. Edición en Español, Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana, México, 1962.
- 14) Berg, E. W. "Physical and Chemical Methods of Separation", McGraw Hill Book Company Inc., New York, 1963.
- 15) Gasquet, R. "Aislamiento Térmico Industrial", 1a. Edición en Español, Compañía Editorial Continental, S.A., Madrid, 1968.
- 16) Brown, A. I. Marco S.M. "Transmisión de Calor", 3a. Edición, Compañía Editorial Continental, S.A., Madrid, 1963.
- 17) Dickey, G.D., "Filtration", Reinhold Publishing Corporation, New York, 1963.
- 18) Larian, M.G. "Fundamentals of Chemical Engineering Operations", Prentice Hall Inc. Englewood, Cliffs, N.J. 1958.
- 19) Perry, J. "Manual del Ingeniero Químico", Tomo II, Trad, Santiago Alonso, Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana, México, 1969.
- 20) Nordell, E. "Tratamiento de Aguas para la Industria y otros Usos", 3a. Impresión en español, Compañía Editorial Continental, S.A., Buenos Aires, 1969.
- 21) "Manual de Laboratorio de Química Analítica", Departamento de Ingeniería Química, Universidad de El Salvador, San Salvador, 1975.

- 22) "Methods Manual" , Hach Direct Reading Engineers Laboratory, Model: DR-EL/2

- 23) Solorzano, L.M., Tesis en Ingeniería Química, "Utilización de los depósitos de Sílica proveniente de aguas residuales de una planta Geotérmica", Universidad de El Salvador, San Salvador, 1976.

.
.
.
.
.