

17  
2j



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**

Escuela Nacional de Estudios Profesionales

ACATLAN

**ESTABILIZACION DE UN SUELO ARCILLOSO  
CON CAL Y SU PROCESO CONSTRUCTIVO**

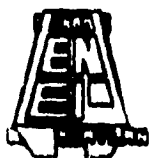
**TESIS PROFESIONAL**

*Que para Obtener el Título de*

**INGENIERO CIVIL**

*P r e s e n t a*

**Rodolfo Hernández Hernández**



Acatlán, Edo. de México

1966

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN  
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL.

**Sr. RODOLFO HERNANDEZ HERNANDEZ.**  
**ALUMNO DE LA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL.**  
**P R E S E N T E .**

De acuerdo a su solicitud presentada con fecha 23 de Marzo de 1995 me complace notificarle que esta Jefatura del Programa tuvo a bien asignarle el siguiente tema de Tesis: **"ESTABILIZACIÓN DE UN SUELO ARCILLOSO CON CAL Y SU PROCESO CONSTRUCTIVO"**, El cual se desarrolla como sigue:

- I.- INTRODUCCIÓN
- II.- PRODUCCION, CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA ESTABILIZACIÓN.
- III.- LA ESTABILIZACIÓN CON CAL Y LOS EFECTOS POSITIVOS SOBRE LOS SUELOS ARCILLOSOS
- IV.- PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA ESTABILIZACIÓN.

A la misma vez designado como asesor de tesis el Sr. Ing. FRANCISCO ANZURES ROSAS, profesor de esta escuela

Pido a usted tomar nota que en cumplimiento de lo especificado en la ley de profesiones, debiera prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito básico para sustentar examen profesional, así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título de trabajo realizado. Esta comunicación deberá imprimirse en el interior de la tesis

Sin mas por el momento, reciba un cordial saludo

**ATENTAMENTE,**  
**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**  
Acatlan Edo. de Mexico a 06 de noviembre de 1995.



**ENEP-ACATLAN**  
**JEFATURA DEL**  
**PROGRAMA DE INGENIERIA**

Ing. Carlos Rosales Aguilar.  
Jefe del Programa de Ingeniería Civil.

**A MIS PADRES :**

**SR. LORENZO HERNÁNDEZ BARRÓN**

**SRA. JOSEFINA HERNÁNDEZ DE HERNÁNDEZ.**

**A ellos que me dieron la vida.**

**A ellos que con abnegación, sacrificios y amor,  
me proporcionaron una formación que hoy llevo a culminar.**

**En ellos que siempre encontré en todo momento un apoyo incondicional,  
un aliento de esperanza para seguir siempre adelante y nunca darme por  
vencido ante las adversidades.**

**Unas manos que en todo momento estuvieron dispuestas a levantarme cuando  
me sentí derrotado.**

**Junto con ellos quiero empezar a caminar, caminar firme sin tropiezos,  
por que gracias a ellos, ahora comienzo a soñar en un futuro mejor.**

**A AMBOS, GRACIAS.**

**A las siguientes personas :**

**Ing. Francisco Anzures Rosas.**

**Asesor de este trabajo.**

**Por su valiosa orientación y comentarios hechos a este trabajo,  
ya que ellos sirvieron para mejorarlo en todos sus aspectos.**

**Ing. Edgar Olivares.**

**Ing. Manuel Rocha.**

**Ing. Rodolfo Campa.**

**Integrantes del Grupo Tribasa, residentes en Reynosa Tamaulipas.**

**Sr. José Antonio Salgado.**

**Miembro de la Asociación Nacional de Fabricantes de Cal (ANFACAL).**

**A cada uno de ellos por su amistad, orientación y apoyo incondicional,  
así mismo por toda la información proporcionada para el complemento de este trabajo.**

**A todos y cada uno de los profesores que de alguna  
u otra manera me transmitieron sus conocimientos  
y me dieron las bases para llegar a culminar la carrera.**

**A todos mis compañeros y amigos con los que tuve la fortuna de convivir  
dentro y fuera de un salón de clases, ya que de cada uno de ellos aprendí algo positivo.**

**A todas aquellas personas que directa o indirectamente me brindaron  
un apoyo y orientación para la culminación de este trabajo.**

**A TODOS, GRACIAS.**

**ESTABILIZACIÓN DE UN SUELO ARCILLOSO CON CAL  
Y SU PROCESO CONSTRUCTIVO**

	Pag.
INTRODUCCIÓN	1
<b>I. - ANTECEDENTES</b>	<b>4</b>
1. 1.    ANTECEDENTES HISTÓRICOS.	4
1. 2.    APLICACIONES ADICIONALES DE LA CAL.	8
<b>II. - PRODUCCIÓN, CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA ESTABILIZACIÓN</b>	<b>13</b>
II. 1.    PRODUCCIÓN DE LA CAL.	13
II. 1. 1.    LA CALIZA.	13
II. 1. 2.    SISTEMAS DE CALCINACIÓN DE LA CALIZA.	17
II. 1. 3.    LA CAL.	34
II. 1. 3. 1.    TIPOS DE CAL.	36

11.1.4.	PROPIEDADES FÍSICO - QUÍMICAS DE LA CAL.	42
11.2.	IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS ARCILLAS.	51
11.3.	PROPIEDADES FÍSICO - QUÍMICAS DE LA ARCILLA.	54
11.4.	SELECCIÓN DE MATERIALES PARA LA ESTABILIZACIÓN.	61
111.-	LA ESTABILIZACIÓN CON CAL Y LOS EFECTOS POSITIVOS SOBRE LOS SUELOS ARCILLOSOS	67
111.1.	CONCEPTO DE ESTABILIZACIÓN.	67
111.1.1	ESTABILIZACIÓN CON CAL.	69
111.2.	ACCIÓN DE LA CAL SOBRE LAS ARCILLAS.	70
111.3.	CAMBIOS FÍSICOS Y MECÁNICOS EN SUELOS ARCILLOSOS.	73
111.3.1.	PESO VOLUMÉTRICO SECO.	74
111.3.2.	LÍMITES DE CONSISTENCIA.	83
111.3.3.	LÍMITES DE CONTRACCIÓN LINEAL.	92
111.3.4.	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE.	96
111.3.5.	VALOR RELATIVO DE SOPORTE.	101
111.4.	DISEÑO DE UN SUELO ESTABILIZADO CON CAL.	109
111.4.1.	VENTAJAS ECONÓMICAS AL APLICAR ESTE MÉTODO CON RESPECTO A MÉTODOS TRADICIONALES.	120
IV.-	PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA ESTABILIZACIÓN	143
IV.1.	ACAMELLONAMIENTO DEL MATERIAL.	148
IV.2.	MEZCLA DEL MATERIAL CON LA CAL.	149
IV.3.	COMPACTACIÓN DE LA MEZCLA SUELO - CAL.	151
IV.4.	RIEGO DE IMPREGNACIÓN.	152
IV.5.	CARPETA DE CONCRETO ASFÁLTICO.	153

IV. 6.	APLICACIONES EN MÉXICO.	163
IV. 6. 1.	CALLE 20, EN CULIACÁN SINALOA.	163
IV. 6. 2.	PAVIMENTOS ESTABILIZADOS CON CAL EN CD. NETZAHUALCÓYOTL.	170
IV. 6. 3	AUTOPISTA MATAMOROS - REYNOSA EN CD. REYNOSA TAMAULPAS.	175
CONCLUSIONES		197
BIBLIOGRAFÍA		199



## INTRODUCCIÓN

A través de la historia, las diversas culturas de la humanidad han empleado diversos materiales para la construcción de sus muy variadas obras, la cal sin duda era un material importante para ello, ya que dada sus características podría formar parte de la estructura, o bien, emplearla como un cemento para la unión de los elementos.

Ejemplos de esas construcciones se tienen hoy en día, entre ellas se pueden mencionar a las pirámides egipcias, el coliseo romano, los edificios religiosos de los Mayas, y así mismo, en la edad media se empleo para las restauraciones del Palacio Virreinal; y como estos ejemplos, se podrían mencionar algunos más del intenso uso que se le dio a la cal en las diversas etapas del que hacer humano.

En la actualidad el empleo de la cal es intenso, ya que para su producción se cuenta con equipos y herramientas que van desde los rudimentarios hasta los más sofisticados.

La cal, tiene aplicación en diferentes actividades de la industria, ya que es utilizada en los procesos de producción que así se requiera; ejemplo de ello se tiene en la producción del vidrio, en la industria del papel, en la industria del ramo minero, en la industria metalúrgica, en tratamiento de aguas residuales y desperdicios industriales, en la protección al medio ambiente, en el hogar y varias aplicaciones más.

En la industria de la construcción, la aplicación que se le da a la cal es inigualable, ya que es usada en la fabricación de morteros, en recubrimientos y acabados de diversos elementos constructivos.

También es empleada la cal, para dar estabilidad a los suelos de las diversas obras de ingeniería, como son carreteras, pistas de aterrizaje, presas, cimientos de edificios y varias obras más; el empleo de la cal tiene como finalidad, la de mejorar las condiciones naturales propias del suelo.

La estabilización consiste básicamente en mejorar las características de un suelo, como son su resistencia y funcionalidad a largo plazo, modificando sus propiedades naturales por medio de agentes químicos o mecánicos. El suelo por naturaleza propia no es apto desde el punto de vista de la ingeniería para utilizarse como material de construcción, resulta que no cumple con las condiciones mínimas requeridas para soportar todos los esfuerzos al que será sometido por parte de las obras de gran magnitud primordialmente como lo serían: carreteras, pistas de aterrizaje, presas, entre otras; ya que sus propiedades físico-mecánicas en estado natural son pobres; para ello se tendrán que alterar sus propiedades naturales, siendo que es un material muy complejo y variable.

La estabilización con procedimientos químicos, comprende la modificación de la resistencia de la masa del suelo, por medio de agentes tales como la cal, el cemento Portland, cenizas volátiles, asfalto, con ello se incrementará su resistencia, trayendo consigo una mejor respuesta a los esfuerzos y un mejor funcionamiento del suelo; también se pueden realizar estabilizaciones a través de procedimientos mecánicos, ya sea por medio de rodillos, impactos de carga, presión estática y vibratorios; ambos procedimientos de estabilización, químicos y mecánicos, tienen la finalidad de mejorar las propiedades naturales de un suelo y poder emplearlo con éxito en las diversas obras de ingeniería.

En el presente trabajo, se presentan los efectos producidos por la cal al ser empleada para dar estabilidad a un suelo, para ello se incluyen las diversas reacciones químicas que tienen lugar al mezclar un suelo con cal, los cambios que con ello se generan y los beneficios resultantes. Para ello se deben conocer primero los diversos componentes, características y propiedades de ambos materiales, suelo-cal, y así entender los cambios generados por la cal en un suelo. Los cambios generados por la cal, son fundamentados con resultados obtenidos en las diversas pruebas de laboratorio realizadas, ya que al adicionarle cal a dichas pruebas, mejoró a gran escala las propiedades físico-mecánicas de un suelo; los resultados arrojados en algunas pruebas se mejoraron hasta en un 100 %, tal fue el caso para la prueba realizada para obtener el Valor Relativo de Soporte, resultado que superó a las normas de calidad de materiales exigidas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

El Valor Relativo de Soporte es un valor importante, ya que es considerado en el diseño estructural del pavimento flexible. Dicho diseño se realizó de acuerdo a los lineamientos propuestos por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Al realizar el diseño estructural del pavimento flexible, se redujeron los espesores para la base y subbase, ya que ambas fueron estabilizadas con cal, el 3 % de cal para la base y el 1.5 % de cal para la subbase, ambas con respecto a su Peso Volumétrico Seco Máximo. Con la reducción de espesores, obtenida para la base y subbase, el volumen de materiales requeridos para la construcción de estos espesores fue menor.

Al emplear una menor cantidad de materiales en la construcción, trae consigo un ahorro económico; los beneficios también se reflejarán en la reducción de los gastos generados por el mantenimiento proporcionado al pavimento, ya que al emplear la cal como un estabilizador, la vida útil del pavimento flexible será mayor, y así el mantenimiento hecho al pavimento será con menor frecuencia.

El procedimiento constructivo realizado fue el ideal, ya que al adicionar cal en la construcción de la base y subbase, no se presentaron ningún tipo de contratiempos o problemas por ello. La cal es muy versátil y da puntas y seguridad en la construcción, es decir, para emplearla no se requirió de maquinaria o equipos especiales, tampoco represento ningún peligro para el personal que tenía contacto directo o indirecto con ella, además por sus características físicas y químicas no fue necesario emplearla inmediatamente después de su descarga, con esto no se perdían o alteraban su propiedades como sucede con otros productos químicos.

En el presente trabajo, lo respectivo al capítulo tres y al capítulo cuatro, están basados en su totalidad, en la construcción llevada a cabo en una autopista de cuatro carriles en Reynosa Tamaulipas, estabilizándose la base y subbase del pavimento flexible con cal.

## CAPITULO I

### ANTECEDENTES

#### I. 1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS.

Uno de los materiales más antiguos de la construcción es sin duda la cal, antecedido solo por el barro y la piedra. Un ejemplo histórico de construcción con este material, data de la época de la I dinastía Egipcia, cuando se utilizaron losas de piedra caliza para revestimientos y techumbres de una pequeña estancia, en una tumba en Saqqara; aunque posiblemente la construcción de piedra más primitiva de la que se tiene referencia es la cámara de la fosa de la tumba del faraón Khasekhemui, perteneciente a la II dinastía (I y II dinastía, entre 3197-2778 años a. J. C.).

Algunas de las caras de los bloques de piedra caliza siguen planos naturales de encaje, aunque muchos parecen haber sido moldeados con martillos y marros de la época, luego tallados para nivelarlos.

Las más notables y acaso las más bellas de todas las estructuras egipcias en piedra caliza, fueron las pirámides, siendo la más primitiva la de los escalones en Saqqara, tumba del faraón Zoser, de la III dinastía; fue construida con bloques relativamente pequeños de piedra caliza, toscamente labrada y cubierta con otra blanca más finamente acabada.

Las pirámides construidas en Gizeh en la IV dinastía (2600-2500 a. J. C.), eran de bloques mucho más grandes de carácter ciclópeo, esta gran pirámide de 146.92 m de altura, fue elegida para su propia tumba por el rey de la dinastía, llamado Cheops. La siguiente pirámide fue la Khafra. Una tercer pirámide más pequeña que las anteriores, fue la de Mykerinos.

Estas tres pirámides fueron construidas con un núcleo de bloques de piedra caliza fósil local; la pirámide de Cheops, la de Khafra y la parte superior de la de Mykerinos, fueron forradas con bloques estrechamente unidos de piedra caliza de más fino granulado, transportando las piedras a través del río Nilo.

Hubo una interrupción en la construcción de pirámides durante largo tiempo, hasta la dinastía XII (III a XII dinastía, entre 2778-2423 años a. J. C.), en que se produjo una revivencia que duró unos doscientos años, pero las nuevas pirámides fueron construidas con ladrillos de barro secados al sol, forradas sólo de piedra caliza. En general, los trabajos de construcción declinaron en Egipto después de la IV dinastía, no volviendo a alcanzar el elevado grado de perfección y grandeza.

La primera piedra cercana a Roma que se empleó regularmente como material autónomo para los monumentos fue la piedra caliza. Un camino importante (año 80 a. J. C.) que llevaba al templo de Júpiter Anxur a los que vinieran de Roma, era sin duda la Via Appia de 650 km de longitud; toda ella se construyó con argamasa (mortero de cal, agua y piedra triturada), revestida con mosaico irregular de pequeños fragmentos de piedra caliza y sujeta en las esquinas con pequeños sillares de la misma piedra caliza; construcción que ha resistido más de 2000 años.

El Coliseo Romano (71-80 d. J. C.) lo erigió el emperador Vespasiano y lo inauguró su hijo y sucesor Tito; estructuralmente el éxito se halla en la soberbia calidad de los cimientos y en el cuidadoso empleo selectivo de los materiales, la principal estructura soportante era de sillería: caliza en el exterior y toba en el interior, la argamasa se limitaba a las bóvedas y paredes superiores del interior; para reducir al mínimo el empuje de la fila superior de asientos contra la pared exterior del ático, los asientos eran de madera. Todo eso era anticuado, pero resultó ser eficaz y seguro.

Las partes inferiores de las construcciones de la época, se edificaban con la tradicional mampostería adecuada en una región calcárea, pero las partes superiores eran algo completamente nuevo: grava de piedra caliza con mezcla abundante de mortero de cal. En el año 273 a. J. C. esto se reconoció como medio de suficiente resistencia para tales superestructuras, y al mismo tiempo mucho más adaptables que cualquier otro material tradicional de análoga resistencia.

La gran residencia de Domiciano, llamada oficialmente Domus Augustana, una de los escasos grandes edificios Romanos inaugurado en el año 92 d. J. C., estaba situada en una irregular depresión entre los dos promontorios del Palatino, terreno que creaba diversos problemas en el trazado de su planta. Todo el complejo estaba asentado en sólidos cimientos y construido con argamasa revestida de fino ladrillo e intercalaciones de hiladas horizontales de losetas. La mayor cubierta monolítica que se ha conservado desde la antigüedad, es la cúpula baja que cubre el mausoleo de Teodorico (526 d. J. C.), está tallada en un solo bloque de piedra caliza y tiene un diámetro luz de 9 m.

La contribución mayor de los romanos, fue el descubrimiento de la reacción de la mezcla de cal viva, agregados y ceniza volcánica con el agua, esta característica hidráulica resultaría en el desarrollo del cemento romano ó cal hidráulica elaborada con cal y puzolanas. Usando esta técnica, los romanos aplicaron esta mezcla como mortero para construir losas, pilares, pavimentos y otro tipo de estructuras.

La historia de los primeros 200 años de construcciones romanas con argamasa, son del aprovechamiento de las propiedades de dicho material durante numerosas generaciones de constructores. Con la caída del Imperio Romano gran parte de su tecnología se perdió con lo cual la cal cayó en desuso.

La arquitectura fue la expresión plástica por excelencia de los Mayas. En términos generales, estuvo condicionada por las limitaciones ambientales que imponía el bosque tropical, tanto en lo que a materiales de construcción se refiere como al tipo de estructuras levantas y a la decoración a ellas asociada. El arquitecto Maya se inclinó por la madera y la piedra como materiales básicos para construir sus edificios y en algunos casos, por las diferentes palmas que resultaron de gran utilidad para cubrirlos. Se empleaba siempre la tierra, hasta el punto de que una gran parte de los edificios primeramente edificados, se levantaron en tierra y después fueron recubiertos con adobe mezclado con arena volcánica.

El cemento se obtuvo de la cal, amontonando guijarros humedecidos de piedra caliza en torno a un gran tronco de madera y recubriéndolos con leña, después eran quemados y desmenuzados hasta conseguir un fino polvo, la cal. Este, mezclado con agua, arena o marga, se transformaba en cemento. El hormigón se consiguió a base de combinar el polvo de cal con piedras partidas; y el estuco, a partir de la mezcla del polvo de cal refinado hasta el máximo con agua y gomas vegetales extraídas de árboles resinosos. El material preferido por el arquitecto Maya para realizar sus obras más importantes fue la piedra, la variedad más frecuente fue la piedra caliza; levantaban amplias plataformas a base de piedras, tierra y desechos de todo tipo, que después se recubrieron con una capa de estuco o con sillares de piedra bien cortados, la finalidad de la plataforma, era la de sostener edificios de diversas formas y funciones. La mayor parte de las construcciones situadas sobre esas enormes plataformas, tuvieron carácter de templo o residencia y estaban cubiertas por una falsa bóveda, conseguida a base de aproximar hileras de piedra hasta enlazar con una clave central, la cual impuso ciertas limitaciones al arquitecto Maya, obligado a levantar muros muy pesados y excesivamente anchos perdiendo espacio en el interior. Un rasgo importante fueron los muros de mampostería levantados sobre la techumbres de los edificios y decorados con estuco, que constituía un gran panel que sirvió como espacio decorativo. En Palenque se desarrolla un estilo arquitectónico, en el que los edificios se cubren con techumbres muy inclinadas y contienen abundantes esculturas en estuco policromado. Los arquitectos que levantaron centros como Uxmal, Kabah, Sayil, Labná o el propio Chichén-Itzá, lograron trabajar la piedra caliza con tal perfección que quedó reducida a finas lajas utilizadas para cubrir el relleno de los edificios.

El apogeo de la escultura en el área Maya, se alcanzó en la zona del Usumacinta donde mediante la técnica del estuco, se representaron temas que hacían referencia continua a acontecimientos de tipo cortesano, militar y dinástico.

Además de la piedra, el estuco fue un material utilizado con profusión por los escultores Mayas, ya que la decoración de templos y palacios se realizaba a base de figuras de estuco, mientras que las paredes permanecían lisas. Alcanzó su máximo desarrollo el empleo del estuco, en ciudades tales como Palenque y Comalcalco donde prácticamente cada enjambre, cada panel libre se decoraban con estuco y más tarde se pintaban en rojo, azul, amarillo y otras tonalidades.

Durante la edad media y el renacimiento se empleó la cal para enyesados, base para murales y morteros de albañilería. Fue hasta el siglo XIX cuando el mortero de cal fue sustituido por los morteros de cemento Portland. La cal necesaria para la argamasa era muy costosa en el siglo XVI; la cal era un artículo de gran demanda en la capital mexicana. La escasez de la cal, hacia 1552 retrasó el avance de las construcciones en la capital. El suministro de cal era controlado por los recaudadores que la recibían en tributo por los encomenderos de Atampa, Hueyoxitla, Zumpango, Ajacuba y los corregidores de Tepepango y Citlaltepec. Estos hombres, resentidos por el bajo precio decretado para la cal en la ciudad, crearon un mercado negro donde se vendía el material al precio que ellos impusieran.

La demanda era enorme: entre 1555 y 1565 los indígenas trajeron 2 015 cargas de cal a la capital por ordenes de virrey, de ese volumen 1 615 se usaron en la restauración de la Casa Real o Palacio Virreinal.

A la escasez de la cal se aunaba el hecho de que no se podía confiar en los indígenas, pues si no se ejercía una estrecha vigilancia sobre ellos, solían sustituir la cal por cenizas en la elaboración de la argamasa. El abuso se generalizó a tal grado, que en 1538 el Consejo Municipal tuvo que designar un capataz que supervisara especialmente esta tarea.

La cal era indispensable en los grandes proyectos de México en aquella época. En la construcción de la iglesia de Santo Domingo, en la ciudad de México, la cal se extrajo de Zumpango, aunque la mayoría de la cal usada en la capital provenía de Calpulalpan, especialmente hacia fines de siglo. La cal fina para el estuco provenía de Cuicatlan, al sur de Puebla; este material era muy codiciado para el recubrimiento de pisos, como en San Gabriel de Cholula, donde se pavimentó todo el atrio con estuco rojo pulido.

Fuera de la ciudad de México, varias ciudades en construcción tuvieron que localizar sus depósitos de cal. En Puebla, hacia 1544 había depósitos y hornos de cal en las inmediaciones de la ciudad. El pueblo de Cuitzeo estaba localizado sobre un depósito de cal.

Hacia finales del siglo, parece que el precio de la cal sufrió una caída. Pese a todo, el alto costo de la cal influyó considerablemente en el estilo arquitectónico a mediados del siglo.

## 1.2. APLICACIONES ADICIONALES DE LA CAL.

La cal es un químico realmente fascinante, rico en historia y con literalmente cientos de usos; es posiblemente el más versátil de los químicos. Predominan los usos de la cal en: metalurgia, minería, fabricación de aceros, refinación del oro y el cobre, tratamiento de aguas negras y desperdicios industriales, desperdicios venenosos, manufactura del vidrio y varios químicos como el carburo y el carbonato de calcio, al tratar la basura se utiliza en los rellenos sanitarios, en la industria papelera para extraer la lignita de la madera por disolución y obtener así celulosa pura (pulpa de papel), se utiliza también para el curtido de las pieles, en la producción de la pintura, en la elaboración de la cerámica, así mismo la cal es uno de los remedios más importantes en la lucha contra la muerte lenta del medio ambiente. En el campo de la construcción, la cal se ha utilizado por siglos como uno de los principales morteros y materiales de recubrimiento y en la estabilización de suelos, ejemplo de ello se tiene en carreteras, calles y avenidas de ciudades, canchas de tenis, aeropistas, bases para vías férreas, estacionamientos, cimentaciones de edificios, obras hidráulicas como son los diques, canales de irrigación, presas de tierra.

Se mencionaran a continuación, algunos ejemplos reales de construcciones estabilizadas con cal.

*Estabilización de Carreteras:* A finales de la década de los 50 's en el estado de Texas, y después de que el Departamento de Carreteras del Estado de Texas, experimento y desarrollo las pruebas necesarias que permitieran llevar a la práctica la estabilización de las arcillas con cal, se inició la construcción de un proyecto carretero de 66 000 km, para lo cual se utilizo la cal para dar estabilidad al pavimento flexible; los considerables niveles de lluvia durante la construcción probaron ser una bendición para la cal, ya que el programa de construcción se aceleró en lugar de disminuir. Esto se debió a las propiedades de absorción de humedad de la cal, lo que permitió la continuidad de los trabajos, aún bajo la lluvia. El éxito de este gran proyecto, fue llevado a más de veinte estados de la unión americana, en los cuales utilizaron la cal para dar estabilidad a sus carreteras.

*Viaducto de Chicago:* Cuando se empezó la compactación en el mes de abril, después de un severo invierno, la terncería de arcilla era un lodazal tal, que sólo en sacos se podía usar la cal y tuvo que ser acarreada a mano; sin embargo, después de mezclar la cal y la arcilla, con un arado de disco, la arcilla se secó tanto que fue necesario agregar agua para la compactación. La capa estabilizada hizo un puente a través de la capa esponjosa del subsuelo formando una superficie de trabajo impermeable, y los camiones comenzaron en poco tiempo a acarrear el material adecuado para la base; además se eliminó cerca de un metro de recorte de terreno y de relleno con material granular, ahorrando con todo ello 6 semanas de intensos trabajos realizados.

*Cimentos para edificios:* En un edificio del departamento de carreteras de Texas, en Bryan Texas, se llevó a cabo una estabilización.



Primeramente y con el fin de suavizar una arcilla altamente expansiva, el área del edificio fue primeramente saturado con agua por 30 días, para dejar que la arcilla se preexpandiera. Después fue drenada toda el agua, la arcilla empapada fue estabilizada con cal, posteriormente se relleno con una capa compuesta de arena y grava, finalmente se construyó la losa de concreto del piso, así como las paredes de ladrillo del edificio. La cal no solo secó la arcilla rápidamente para la compactación, sino que también formo una barrera contra la humedad y mantenerla a un valor constante para no afectar el cimiento del edificio. A su vez ayudo a mantener la estabilidad en el edificio y minimizar el movimiento de la losa.

*Estabilización de Pistas Aéreas:* El aeropuerto de Dallas-Fort Worth, fue abierto al público en 1973 como el más grande del mundo. Construido expresamente para soportar todo tipo de aviones, desde los jets más pequeños, hasta los gigantes 747 de 340 t y aún para aeronaves más pesadas, ya que para cargas tan pesadas es imperativo tener una subbase fuerte y estable, cosa que proporciona la estabilización con cal; este aeropuerto se extiende a lo largo de 14 km de norte a sur, ocupando 71.20 km<sup>2</sup>; fue construido sobre una de las peores arcillas, con altos cambios de volumen. La estabilización con cal se utilizó debajo de cada km<sup>2</sup> del pavimento, en zonas de rodaje, debajo de todos los caminos, estacionamientos, debajo de todos los edificios (donde se inyectó lechada de cal a presión) debajo de todos los andenes de pasajeros y hasta debajo de todos los andenes de almacenamiento, el consumo de cal en esta impresionante obra fue aproximadamente de 300 000 t en un período de 3 a 4 años. Toda la subbase del suelo arcilloso se estabilizó con cal hidratada a espesores variables, las pistas de 22 a 30 cm de espesor y las fajas del estacionamiento de 46 cm. Gracias a la cal, permitió a todo el personal acarrear los materiales hacia las terminales sin atascarse, ya que gran parte de la construcción se hizo en época de lluvias. Aún los grandes trailers pudieron operar fácilmente en la subbase húmeda parcialmente compactada. A la fecha las pistas siguen en condiciones excelentes, aún cuando la obra esta asentada en una arcilla altamente expansiva.

Con este sistema se construyeron los aeropuertos de Houston y el de Denver.

Un ejemplo sobresaliente de la acción impermeabilizante de la cal es un trabajo en una *Base Militar de Texas*, donde se estabilizó una franja de prueba de 9 m de ancho de arcilla compactada. Cuatro días después de intensas lluvias, la franja de prueba permaneció como si fuera un listón blanco; dos días después que paró la lluvia, un tractor D-8 de orugas dejó unas huellas poco visibles al circular por allí, pero al entrar en el área no tratada, las huellas tenían una profundidad de 20 cm. Debido al éxito de los trabajos de prueba, se estabilizaron las terracerías de toda la pista de jets de 4 km de largo, más los acotamientos.

Otra muestra de flexibilidad, se vio en una obra de *reconstrucción*, donde el viejo pavimento de concreto se cubrió con una base de grava estabilizada con cal hidratada y a pesar del intenso tráfico del fin de semana y después de torrenciales lluvias permaneció firme. Más aún, a pesar de la lluvia fue necesario agregar agua durante el trabajo de reconstrucción.

*Usos Hidráulicos:* El canal Friant Kern, localizado en el valle de San Joaquín en California, al sureste de Fresno, fue construido en 1947; este canal es una obra enorme con una anchura máxima de 46 m y más de 242 km de largo. El canal proporciona agua para riego a cerca de 400 000 hectáreas. El canal fue secado a fin de poder hacer los trabajos necesarios para su estabilización con cal; poco después de regada la cal, se escarificó y se mezcló dentro del suelo altamente plástico. Como el bordo del canal tiene un talud de 2:1, aproximadamente de 26 grados, el compactador hubo de ser jalado sobre el talud, hacia arriba y hacia abajo por medio de un cable operado por un tractor de orugas.

La capa estabilizada del canal, esta constituida por un espesor de aproximadamente 1.20 m. La estabilización con cal se llevó a cabo en dos secciones del canal que estaban muy deterioradas y agrietadas. En una de las secciones se quitó el concreto viejo así como el suelo de abajo y se estabilizó con cal antes de colocar el concreto nuevo. Como el proyecto de estabilización era de gran envergadura, la construcción fue efectuada a lo largo de dos temporadas de invierno; en la primer temporada invernal se estabilizó el camino de mantenimiento, el bordo izquierdo, el fondo del canal y toda la sección recubierta con concreto. El bordo de la derecha se estabilizó durante la segunda temporada invernal y con esto se completo el proyecto.

El suelo tenía un índice de plasticidad entre 30 y 80 %. El recubrimiento de piedra a volteo colocada como tratamiento transitorio, no resolvió el problema. Los deslizamientos se repitieron año con año, las grietas que surgieron en la sección recubierta con concreto fueron causadas también por el suelo inestable. Mediante la estabilización con cal el suelo expansivo se convierte en uno no expansible, resistente al agua y fuerte, lo suficientemente fuerte para resistir la erosión provocada por la corriente del agua.

Se usó en el proyecto una cal viva granulada, en vez de cal hidratada. La cal viva comprobó tener grandes ventajas por su temperatura de hidratación, lo que facilitó el secado y el mezclado durante los meses fríos y húmedos de diciembre y enero, cuando la precipitación pluvial llegó a un total de 30 cm, que fueron los únicos meses en que el canal se pudo poner fuera de servicio para un trabajo tan considerable como este. Como resultado de la estabilización con cal, además del notable mejoramiento de los materiales, los costos de mantenimiento se redujeron substancialmente. La ingeniosa técnica de construcción usada en el canal Friant Kern, no sólo revolucionó la rehabilitación de canales, sino también la construcción de los nuevos canales siempre que se encuentren con suelos arcillosos. El proceso también ofrece gran potencial en la construcción de almacenes, diques, vertedores, taludes y hasta presas de tierra.

En una sección del *Dique* del Río Mississippi, cerca de West Memphis, Arkansas, se puso en práctica un novedoso proyecto de estabilización con cal. El dique de esa área había sido debilitado por deslizamientos periódicos de una arcilla pegajosa e inestable utilizada hace muchos años, cuando se construyó el terraplén; el proyecto de estabilización que incluía un total de 19 deslizamientos todos los cuales ocurrieron en la pendiente interna del dique.

El procedimiento de reparación utilizado en el dique, consistió en excavar primero en el suelo arcilloso del deslizamiento, transportar esa tierra a una zona de mezclado situada en el derecho de vía del dique; esparcir una capa uniforme de cal hidratada; mezclar la cal y la arcilla con un arado de disco, añadiendo agua según fuera necesitando, luego llevar de nuevo la tierra ya tratada con cal a la parte del deslizamiento de donde se excavó y posteriormente reemplazar la tierra de la superficie, quedando así restaurado el dique con su pendiente original. Sólo que después del tratamiento quedó en mejores condiciones que antes, porque la cal reacciona químicamente con la arcilla haciéndola menos plástica, más fuerte y más resistente al agua y mucho más estable que antes.

En la estabilización con cal, el suelo original puede ser utilizado y mantenerse el mismo ángulo de la pendiente. Esto es posible gracias a que la cal no sólo transforma la arcilla pegajosa en un material menos plástico más desmenuzable, sino que también reduce el cambio de volumen y el resquebrajamiento debido a su reacción cementante.

*Estabilización de Presas de Tierra:* La estabilización con cal se ha usado con mucho éxito en las presas en el estado de Tennessee, Texas, Mississippi, Arkansas y otros estados. Como proyecto de taludes, las capas de suelos dispersas fueron excavadas y tratadas con cal fuera del sitio, el material fue posteriormente reinstalado a la pendiente de la presa y compactado a una profundidad de 30 cm aproximadamente. La instalación y compactación se llevó a cabo en un levantamiento de tierra, después de terminado el trabajo se añadió la tierra para que creciera un pasto nuevo.

Otro importante proyecto se llevó a cabo en Nuevo México, en una presa de 60 m de altura, teniendo un núcleo impermeable de arcilla, el suelo de la presa era arcilla expansiva y fue tratado con cal fuera del lugar y posteriormente el suelo-cal fue reinstalado en el núcleo del fondo, a una profundidad de 13 cm el suelo estabilizado fue puesto en partes, donde el núcleo de la pendiente contenía piedra arenisca y roca sólida esto sirvió para una buena adhesión.

*Aplicaciones en México:* En México se tienen ya varios proyectos que fueron concluidos, esto indica que se le dio la confianza necesaria al utilizar la cal en la estabilización; desafortunadamente no hay en México, una difusión adecuada para utilizar la cal como una real e importante alternativa de estabilización de suelos para las muy diversas y variadas obras de la ingeniería mexicana.

De los escasos trabajos hechos, utilizando este método están: urbanizaciones, tratamiento de agua, vialidades, autopistas, centros comerciales, entre los más importantes; falta una verdadera difusión de este método, para darle así una alternativa importante a los constructores (empresas), para que aplique con más frecuencia en todas y cada una de sus obras a ejecutar.

**PROYECTOS REALIZADOS EN MÉXICO,  
UTILIZANDO LA CAL PARA DAR ESTABILIDAD  
A DIVERSAS OBRAS DE INGENIERÍA.**

	<b>SUPERFICIE O LONGITUD</b>	<b>AÑO</b>
PAVIMENTOS Y URBANIZACIÓN EN EL EDO. DE MÉXICO, CIUDAD NETZAHUALCÓYOTL.	800 ha	1971
CALLE 20, CULLACÁN SINALOA		1973
CARRETERA MONTERREY-CADEREITA	28 km	1992
ANILLO PERIFÉRICO, MONTERREY, N. L.	35 km	1993
GENERAL MOTORS, SILAO, GTO.	200 ha	1994
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA, TOIUCA	40 ha	1994
CENTRO COMERCIAL GALERÍAS, AGUASCALIENTES	20 ha	1994
DIVERSOS FRACCIONAMIENTOS, LEÓN, GTO.	URBANIZACIÓN	1970 - 1995
URBANIZACIÓN, SONORA Y BAJA CALIFORNIA SUR	URBANIZACIÓN	1995
AUTOPISTA MATAMOROS-REYNOSA CD. REYNOSA, TAMAULIPAS	80 km	1995

Al final de este trabajo, se hablará con más detalle de algunos de estos proyectos.

## **CAPITULO II**

### **PRODUCCIÓN, CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA ESTABILIZACIÓN**

#### **II.1. PRODUCCIÓN DE LA CAL.**

La cal constituye evidentemente el aglomerante más antiguo y sencillo para la preparación del mortero. Ofrece una gran ventaja, de que la roca que la contiene se encuentra casi en todas partes y su preparación es sumamente fácil. La calcinación de la piedra caliza, que es el producto de donde se obtiene la cal, es sometida a un proceso de calcinación ardua, para obtener finalmente la cal, clasificándose ésta dependiendo del tipo de mineral que la constituye, efectuándose dicha calcinación en diversos tipos de hornos. Las calces suelen designarse según sus propiedades naturales, por este motivo se tiene una gran variedad de este producto en el mercado. A continuación se revisarán algunos de los procesos necesarios por los cuales tiene que pasar la piedra caliza, para poder obtener su producto final, la cal.

##### **II.1.1. LA CALIZA.**

Las calizas son rocas sedimentarias, el tercer mineral más abundante en la corteza terrestre, sólo por debajo de las lutitas y las areniscas. El elemento calcio, que representa el 40 % de todas las calizas, es el quinto en abundancia en la corteza terrestre, antes se tiene al oxígeno, silicio, aluminio y fierro.

La caliza es una materia prima abundante, aparece en varios grados de pureza y no todos los depósitos son utilizables para la producción de cal de alta calidad.

La lutita, la arenisca, la lodolita y la caliza, representan alrededor del 99 % de todas las rocas sedimentarias, se puede ver gráficamente en la fig. 2 - 1.

De éstas, la lutita y la lodolita son las más abundantes, la caliza es la menos abundante. Aunque se han hecho varias estimaciones de la abundancia de cada tipo, la observación de las rocas expuestas en los continentes sugiere que la lutita y la lodolita representan aproximadamente el 46 % del total, la arenisca en el rango del 32 % y la caliza el 22 %, (fig. 2 - 2).

La caliza es una roca sedimentaria formada principalmente del mineral calcita  $\text{CaCO}_3$ , depositada bien por procesos orgánicos o por procesos inorgánicos. La mayoría de las calizas tienen una textura clástica (derivada de la palabra griega que significa "roto" o "fragmentado"), pero las texturas no-clásticas, particularmente la cristalina, son más comunes. Las calizas formadas bioquímicamente son creadas por la acción de plantas y animales que extraen carbonato de calcio del agua en que viven. El carbonato de calcio puede ser incorporado al esqueleto del organismo o precipitarse directamente. En cualquier caso, cuando el organismo muere deja una cantidad de carbonato de calcio, y con el transcurso de un largo período de tiempo, se pueden formar gruesos depósitos de este material. Los arrecifes antiguos y modernos son ejemplos bien conocidos de tales acumulaciones. Los "constructores" más importantes de los arrecifes modernos son las algas, los moluscos, los corales y los animales unicelulares (los mismos animales cuyos ancestros construyeron los arrecifes de los mares del pasado); los arrecifes ahora antiguos y profundamente sepultados, en el presente constituyen, frecuentemente, valiosos depósitos de petróleo. A continuación se presenta una clasificación generalizada de las rocas sedimentarias:

	ORIGEN	TEXTURA	TAMAÑO DE PARTÍCULAS O COMPOSICIÓN	NOMBRE DE LA ROCA
	DETRITICO	CLÁSTICA	GRANULO O MAYOR ARENA LIMO Y ARCILLA	CONGLOMERADO ARENISCA LODOLITA Y LUTITA
Q	INORGÁNICO	CLÁSTICA Y NO-CLÁSTICA	CALCITA, $\text{CaCO}_3$	CALIZA
U			DOLOMITA, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	DOLOMITA
I	BIOQUÍMICO		HALITA, $\text{NaCl}$	SAL
M			YESO, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	YESO
I			CALCITA, $\text{CaCO}_3$	CALIZA
C			RESTOS VEGETALES	CARBÓN
O				

#### CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS

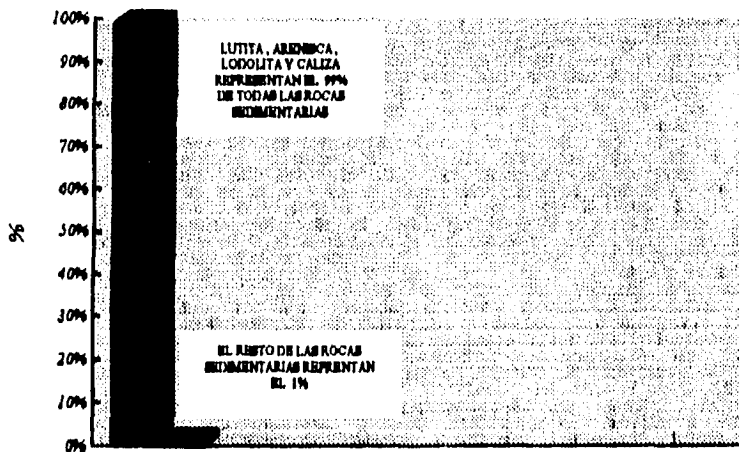


FIG. 2-1 PORCENTAJE DE ABUNDAMIENTO DE DIVERSAS ROCAS SEDIMENTARIAS

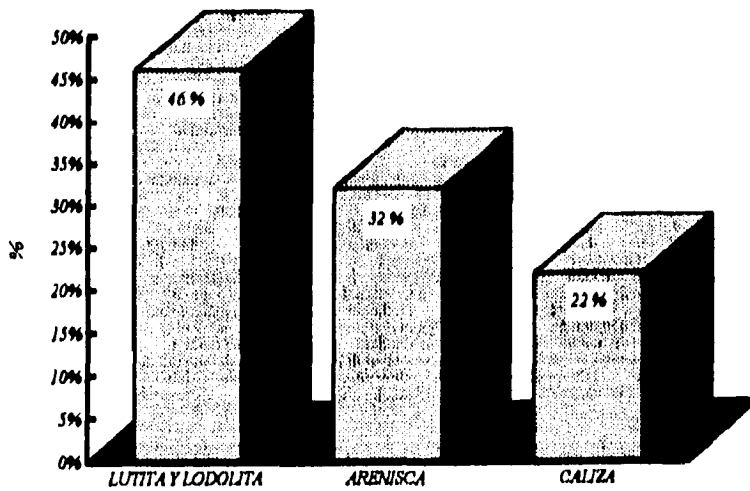


FIG. 2-2 ROCAS SEDIMENTARIAS MAS ABUNDANTES

Por lo tanto, se tiene que las calizas se producen por tres procesos principales:

a) Químicamente: por precipitación de una solución bajo condiciones adecuadas de concentración, temperatura y presión; las soluciones de calcio de donde las calizas se precipitaron probablemente fueron formadas cuando el calcio metálico se disolvió de rocas ígneas, por reacción con el carbonato de la atmósfera, en periodos en los que el contenido de carbono en la atmósfera era considerablemente mayor.

b) Biológicamente: a través de organismos animales y vegetales que concentran cal, algunas células son capaces de absorber carbonatos de calcio de una solución (agua de mar), para posteriormente depositarlo en forma de esqueleto o de concha en el organismo.

Al morir el organismo, el esqueleto o las conchas quedan como carbonato de calcio puro, éstos se depositan en capas en el lecho marino y junto con otros materiales se encuentran a menudo suspendidos en el océano, dichos depósitos pueden estar contaminados con cantidades variables de impurezas, tales como las arcillosas, sílicas de la arena o sedimentos. Estos depósitos, por ser de origen orgánico, contienen frecuentemente fósiles, restos petrificados de los animales o plantas que originaron el depósito.

c) Formación clásica: proceso de destrucción física de sedimentos calizos formados orgánica o químicamente y que fueron redepositados en otro lugar; la congelación, el deshielo y la erosión, son algunas de las fuerzas responsables de dichos depósitos, considerablemente menos importantes.

La mayoría de los depósitos de calizas han estado sujetos a cambios después de ser depositados; primero se acomodaron ligeramente, luego se comprimieron y compactaron bajo presión, y al ser sujetos a altas temperaturas cambió la estructura de los depósitos, se produjeron recristalización y los minerales resultantes son como se encuentran actualmente.

Pueden mostrar gran variedad de propiedades, aunque todas son modificaciones de la caliza mineral, y del carbonato de calcio, pero en variedades transformadas. Algunas de éstas variedades son:

• La Creta: palabra derivada del latín *calx* "cal", está formada en parte por calcita de origen bioquímico en la forma de esqueletos o fragmentos de esqueletos de plantas y animales oceánicos microscópicos.

• La Coquina: palabra derivada del español "concha", y se caracteriza por la acumulación de fragmentos grandes de conchas, este es un tipo de caliza más gruesa, compuesta de restos orgánicos.

• El Travertino, las Estalactitas y las Estalagmitas: la mayor parte de estos minerales se forman en las cavernas por la evaporación del agua que lleva carbonato de calcio en solución.

• La Tufa: palabra derivada del italiano que significa "roca suave", es una caliza porosa y esponjosa que se forma por la precipitación de calcita del agua de los ríos y manantiales.

• Mármol: una caliza de granos grandes que acepta con facilidad un fino pulimento, los mármoles contienen a menudo impurezas que producen su aspecto peculiar, y es un material muy pobre para la cal.

• Tiza: una caliza muy suave y blanca.



• Caliza Oolítica: el término oolita viene de la palabra griega que significa "huevo", pequeñas esferas del tamaño de la arena, capas concéntricas de carbonato de calcio formadas alrededor de centros de carbonato de calcio o granos de cuarzo.

• Calizas densas, masivas, de grano fino usualmente de origen orgánico: este tipo de calizas es la principal materia prima para obtención de la cal.

• Pisolítica: granos esféricos, grandes, semejantes a la oolítica, pero son de tamaño mayor, semejantes en tamaño a los chicharos.

• Carbonáceas: conteniendo carbón o material orgánico que en ocasiones se quema al calentarla.

• Arcillosas: caliza con contenido de arcillas.

• Arcilla Calcárea: una caliza impura conteniendo arcillas o pizarras.

• Con Horsteno: caliza conteniendo cristales separados de horsteno, es una variedad ya transformada del cuarzo.

• Espato de Islandia: una forma pura de carbonato de calcio, altamente cristalina, en ocasiones transparente usada en instrumentos ópticos.

• Estalactitas y estalagmitas: formada por precipitación química en cavernas calizas.

### 11.1.2. SISTEMAS DE CALCINACIÓN DE LA CALIZA.

Están en operación a nivel mundial, una gran variedad de plantas productoras de cal que van desde simples hornos construidos de piedra, operados intermitentemente, hasta las grandes instalaciones altamente sofisticadas, eficientes y de gran capacidad. Las características de operación, capacidad, energía requerida, espacio necesario, costos de inversión, todas estas y más características aplicadas a los sistemas de calcinación de cal son muy diferentes, por ello se describirán algunos de estos sistemas de calcinación.

El proceso de producción de la cal empieza desde la explotación de los yacimientos de la piedra caliza, materia prima fundamental, haciéndose la extracción a cielo abierto, generalmente se empieza por barrenar las partes de la cantera que están cerca de los tajos, para que al aplicar la dinamita, el desprendimiento de la piedra caliza se haga con más facilidad y en mayor cantidad. Obtenida la piedra caliza, un grupo de trabajadores empieza a partir con martos aquellas piedras que son bastante grandes para ser llevadas a los hornos. Reducida a un tamaño más o menos uniforme, estas piedras son llevadas a las plantas de calcinación por medio de camiones de volteo o se emplean carros de ferrocarril, cuando la distancia entre el yacimiento y la planta de calcinación es considerable, ya que sería muy costoso y poco práctico hacerlo con los camiones de volteo, y esto incrementaría innecesariamente los costos finales del producto.

Al llegar la piedra caliza a la planta, el camino que sigue para su transformación y obtención de sus propiedades finales dependerán, en mucho del tipo de sistema de calcinación instalado en la planta.

Así se tienen diversos tipos de hornos, de los cuales se mencionaran algunos a continuación:

*a) Horno Vertical Intermittente:*

En este tipo de horno y sirviéndose de la piedra caliza de mayor tamaño que la empleada en la calcinación, se forma una especie de campana, a la que se le da el nombre de bóveda, que es la parte en donde queda prácticamente la zona de combustión y de calcinación. Formada esta zona, se empieza a cargar el horno con piedras de hasta 10" de diámetro aproximadamente (25.4 cm), y una vez cargado, se cubre la parte superior con piedras calizas mucho más pequeñas para obstruir las salidas, pero siempre procurando que no se ahogue y aprovechar el calor al máximo. El tipo de combustible utilizado e instalado en las plantas, es un sencillo quemador de petróleo crudo, con resultados favorables gracias a las ventajas económicas logradas, este tipo de combustible vino a substituir a la leña, con el propósito de proteger los recursos naturales. La duración del proceso completo para la producción de una carga de piedra caliza varía de 72 a 96 h, de acuerdo con la capacidad del horno y con la clase de combustible que se utiliza para la calcinación.

*b) Horno Vertical de Alimentación Mezclada:*

Al llegar la piedra de la cantera, se comienza a cargar el horno con trozos de hasta 10" de diámetro aproximadamente (25.4 cm); el coque ó carbón mineral es utilizado como combustible en este tipo de horno; por la parte superior del horno, se introducen juntos en capas alternas el coque ó carbón mineral y la caliza. En el proceso de calcinación las capas alternas del material son sometidos a pasar por la zona de precalentamiento, una zona de calcinación y una zona de enfriamiento. La calcinación se controla ajustando la cantidad de descarga de material al horno y variando la corriente forzada o inducida a través del horno. Debido al tamaño relativamente grande de la alimentación y al contacto directo de la caliza con el combustible sólido en combustión, la calidad del producto es relativamente baja, usualmente en la descarga se presenta tanto cal sobre calcinada como crudos. Aproximadamente cada cuatro horas se extrae por la parte inferior el producto ya terminado, así mismo por la parte superior se va cargando con nuevas capas de combustible y de piedra caliza en capas alternas, sustituyendo así la que se ha convertido en cal viva. Muchos hornos de alimentación mezclada, han sido modificados para usar sistemas de combustión auxiliares de petróleo o gas, han alcanzado ya cierto desarrollo técnico.

La flama y los gases calientes de los quemadores están esparcidos alrededor de la circunferencia del horno a una altura aproximada de 3 ó 4 m. La función de los quemadores consiste en atomizar el combustible y se efectúa con la ayuda de los gases calientes, formándose una zona de combustión y de calcinación en el lugar en que esta operación se realiza cuando el producto está bien calcinado, pasa inmediatamente a la zona de enfriamiento, a la que llega todavía a temperaturas muy elevadas.

Algunas plantas cuentan con sistemas neumáticos que inyectan aire frío en la zona de enfriamiento, para que la cal baje rápidamente su temperatura, aprovechando al mismo tiempo el calor absorbido por este aire para aplicarlo a la piedra caliza, con lo cual se facilita la calcinación y la combustión, lográndose un ahorro en el consumo de combustible, para lo cual se utiliza el petróleo o el gas. Con este sistema, se obtiene una calcinación más uniforme, y por consiguiente una calidad más alta de la cal obtenida.

*c) Horno Vertical de Unidad Regenerativa de Flujo Paralelo:*

El más revolucionario y exitoso horno vertical, en donde los gases calientes entran primero en contacto con la piedra caliza o material parcialmente calcinado, y no con el producto terminado o material casi completamente calcinado. Por lo tanto una cualidad, es que se produce regularmente una cal suave.

Una segunda cualidad del horno, es que la parte superior de la columna, es usada como un regenerador, es decir, intercambiando el calor de los gases de salida a través de la cama de piedra con el aire de combustión, para ello se usan 2 ó 3 columnas y el flujo de gas se invierte automáticamente cada 10 ó 15 minutos.

*d) Horno Vertical con doble chimenea:*

Este horno esta en servicio en todo el mundo, también en México, produciendo cal de buena calidad, para las exigencias de las diversas industrias que requieran o utilicen este producto (fig. 2 - 3).

Consta de 2 chimeneas idénticas, colocadas en forma adyacente, las dos chimeneas están equipadas con un mecanismo de carga consistente en una *tolva de carga* que a su vez es alimentada por medio de una banda transportadora, cada chimenea esta recubierta de tabique refractario. De la tolva de carga, la piedra caliza es alimentada a cualquiera de las dos *válvulas alimentadoras*. El funcionamiento del horno es como sigue: asumiendo que las chimeneas están cargadas de piedra caliza y que la *chimenea uno* está en su ciclo de encendido, hay una *inyección de combustible* (gas) a una presión de 2 kg/cm<sup>2</sup> con orificios calibrados uno por cada *tubo quemador* y se inflama en la *zona caliente del horno*. Cada chimenea esta equipada con 19 tubos quemadores verticales instalados hacia abajo, los cuales quedan enterrados en la carga de piedra caliza. el *aire para la combustión* pasa a través de la chimenea uno y de la caliza que contiene los gases calientes quemados cruzan a través del *ducto de conexión*, y suben a través de la piedra caliza de la *chimenea dos*, transmitiendo su calor a la piedra caliza fría de las secciones altas de la chimenea dos. Saliendo los gases eventualmente a la atmósfera a través del *sistema de extracción*. Al mismo tiempo que el gas es inyectado a los tubos quemadores de la chimenea uno para la calcinación, los tubos quemadores de la chimenea dos se ponen a funcionar, en lugar de alimentarlos con gas, hay una *inyección de aire frío*, inyectado para conservar los quemadores frescos. Después de un tiempo predeterminado en un ciclo de tiempo aproximado a los 12 minutos, el ciclo de operación se invierte. Ahora el aire de combustión entra por el ducto colocado encima de la chimenea dos, los tubos quemadores de esta chimenea se les inyecta gas, y a los tubos quemadores de la chimenea uno se les inyecta aire frío para mantenerlos frescos.

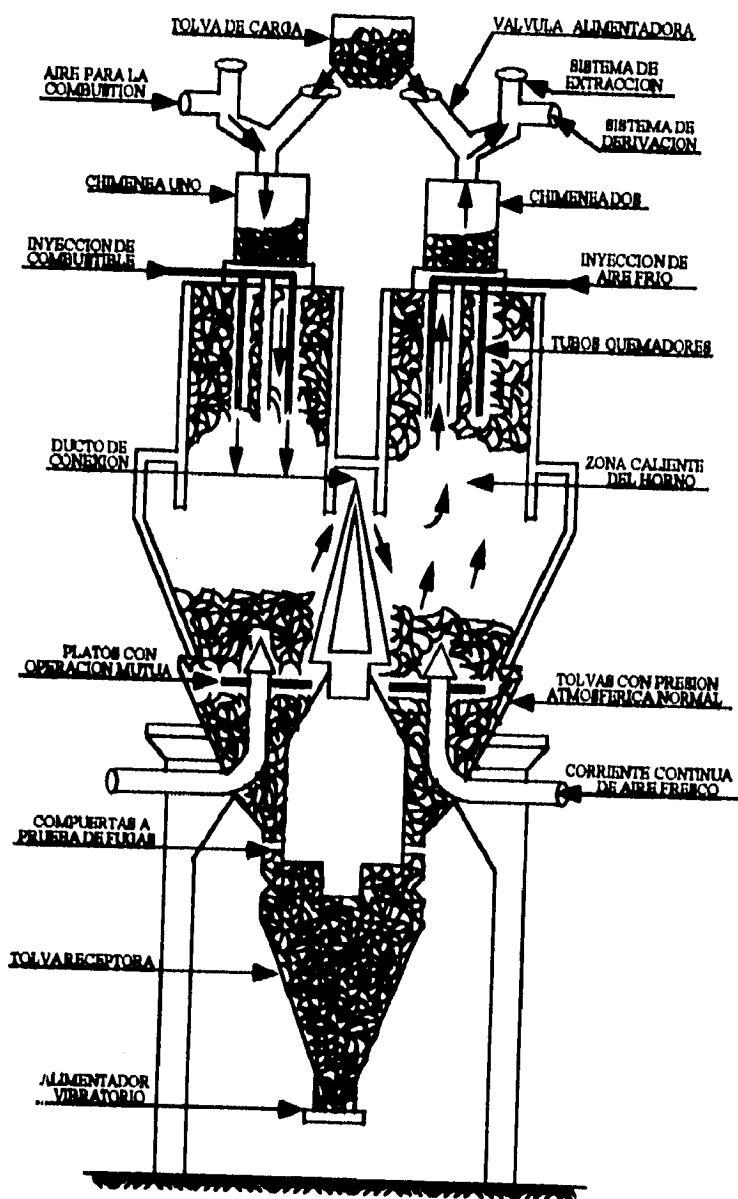


FIG. 2-9 ESQUEMA DE UN HORNO VERTICAL CON DOBLE CHIMENEA

Para ajustar la cantidad de gas a una nueva velocidad de producción del horno, cada tubo quemador tiene una placa-orificio removible de 25 mm de diámetro aproximadamente, sujeta a un cople autosellado de gas. El sistema de instrumentación registra las cantidades de combustible y temperatura de aire, que se transfieren de un horno a otro. Los instrumentos están equipados para cortar combustible, en caso de un exceso de temperatura en el sistema.

Durante toda la operación hay una corriente continua de aire fresco hacia la zona caliente del horno, de este modo el aire fresco se junta con los gases calientes que andan en esta zona, y tienden a salir a través de un horno que tenga apagados sus tubos quemadores. El dispositivo de descarga de platos operados mutuamente, trabaja continuamente, dejando caer la cal dentro de la tolva con presión atmosférica normal. Así mismo, las compuertas a prueba de fugas se abren para permitir a la cal caer en la tolva receptora y luego al transportador de descarga a través del alimentador vibratorio. Todas las válvulas y compuertas de carga y descarga se operan hidráulicamente por medio de controladores variables de tiempo; la velocidad de descarga de la cal en el horno, está controlada por monitores que registran el nivel de caliza en la chimenea, usando una señal de salida que gobierna la velocidad del movimiento reciprocante del plato de descarga. Lo atractivo de este horno es que consume el 60 % del combustible requerido por un horno rotatorio; el material obtenido tiene formas angulosas.

*e) Horno Rotatorio sin Precalentador:*

El relativamente alto consumo de combustible de este horno, han llevado a la instalación de un mayor número de sistemas de horno con precalentador externo, que tienen consumos de combustible considerablemente reducidos, manteniendo la calidad y uniformidad del producto.

El rendimiento térmico de los hornos rectos y largos puede ser mejorado, instalando recuperadores internos de calor en forma de divisiones refractarias, recuperadores de paletas múltiples, levantadores de tipo refractario o de alineación y represas internas. Todos estos accesorios internos mejoran la transmisión de calor exponiendo una mayor cantidad de material a los gases calientes o a la radiación de los gases calientes, aumentando el grado de mezcla del material dentro del horno rotatorio. Estas ventajas se ven reducidas por el aumento en los costos de mantenimiento, mayores cargas de polvo en los gases de salida y mayor cantidad de finos en el producto.

*f) Horno Rotatorio con Precalentador:*

El horno rotatorio (fig. 2 - 4) es básicamente un cilindro de placa de acero, largo, ligeramente inclinado, 1.0 a 1.5 % de inclinación, este cilindro está soportado por una rueda embalerada, el horno gira a velocidades entre 35 y 80 r.p.m. El tamaño de piedras calizas que se utiliza en estos hornos es variado, el rango apropiado de las partículas para obtener una calcinación uniforme debe ser tal que el diámetro de la partícula más grande sea el doble de la más pequeña.

El horno rotatorio con precalentador consta de tres secciones primordiales:

• El precalentador.

• El horno rotatorio.

• El enfriador de cal.

La piedra caliza es alimentada continuamente por la parte superior del precalentador, por medio de una *banda transportadora de material* y está a su vez cae a una *tolva de carga*, que está equipada con dos *alimentadores de caliza con compuerta*, estas compuertas descargan la caliza a dos *cámaras alimentadoras* equipadas con compuertas que alternadamente alimentan la caliza a un *sistema de distribución* instalado en la parte superior central del precalentador.

El *precalentador del horno* consiste de un espacio en forma de anillo y recubierto de tabique refractario y de un núcleo central, la piedra caliza baja por gravedad a través del precalentador, y se descarga por la acción de *empujadores*, que usualmente son veinte y que son accionados y operados mecánicamente; la caliza es empujada al *alimentador central del horno*.

Durante su paso por el precalentador, la caliza es parcialmente calcinada ya que absorbe el calor proveniente del *quemador del horno*, por lo general la piedra caliza alcanza una temperatura de 900 °C antes de ser alimentada al *horno rotatorio* y consecuentemente ya está parcialmente calcinada. Los gases salen del horno rotatorio a temperaturas aproximadas a los 1 100 °C y suben a través del precalentador, saliendo por el *ducto para la salida de los gases* a 280 °C aproximadamente; y todo esto sucede por que el precalentador funciona como un silo de almacenamiento.

La pérdida de presión en la cama del precalentador es directamente proporcional a la cantidad de transferencia de calor en la misma.

Una vez que fue desviada la caliza, parcialmente calcinada hacia el horno rotatorio, la mayor proporción de calcinación se lleva a cabo por calor radiante, en la sección enfrente del quemador. El quemador está diseñado para dar una combustión completa a una distancia corta y produce una flama radiante de alta intensidad. En general los materiales sólidos ocupan solamente el 10 % del volumen interno del horno, y están sujetos a una lenta acción de cascada debido a la rotación del horno. Se emplean diversos mecanismos dentro del horno para promover la transferencia de calor y exposición de las superficies del material a los gases calientes, estos mecanismos incluyen anillos de tabique refractario que actúan como represas, aletas para levantar el producto y la subdivisión de secciones del horno en tres o cuatro subsecciones con divisiones de ladrillo refractario.

Después de pasar a través de la zona radiante, la cal sale con una temperatura que oscila entre 1 200 y los 1 400 °C, y cae en el *enfriador de cal tipo contacto*. Está consiste en una cámara cilíndrica equipada con *aspas rotatorias del enfriador* en el fondo, que arrastran la cal del plato central a las *tolvas herméticas*. Un *distribuidor de aire fresco* permite su entrada dentro del enfriador por medio de un ventilador.

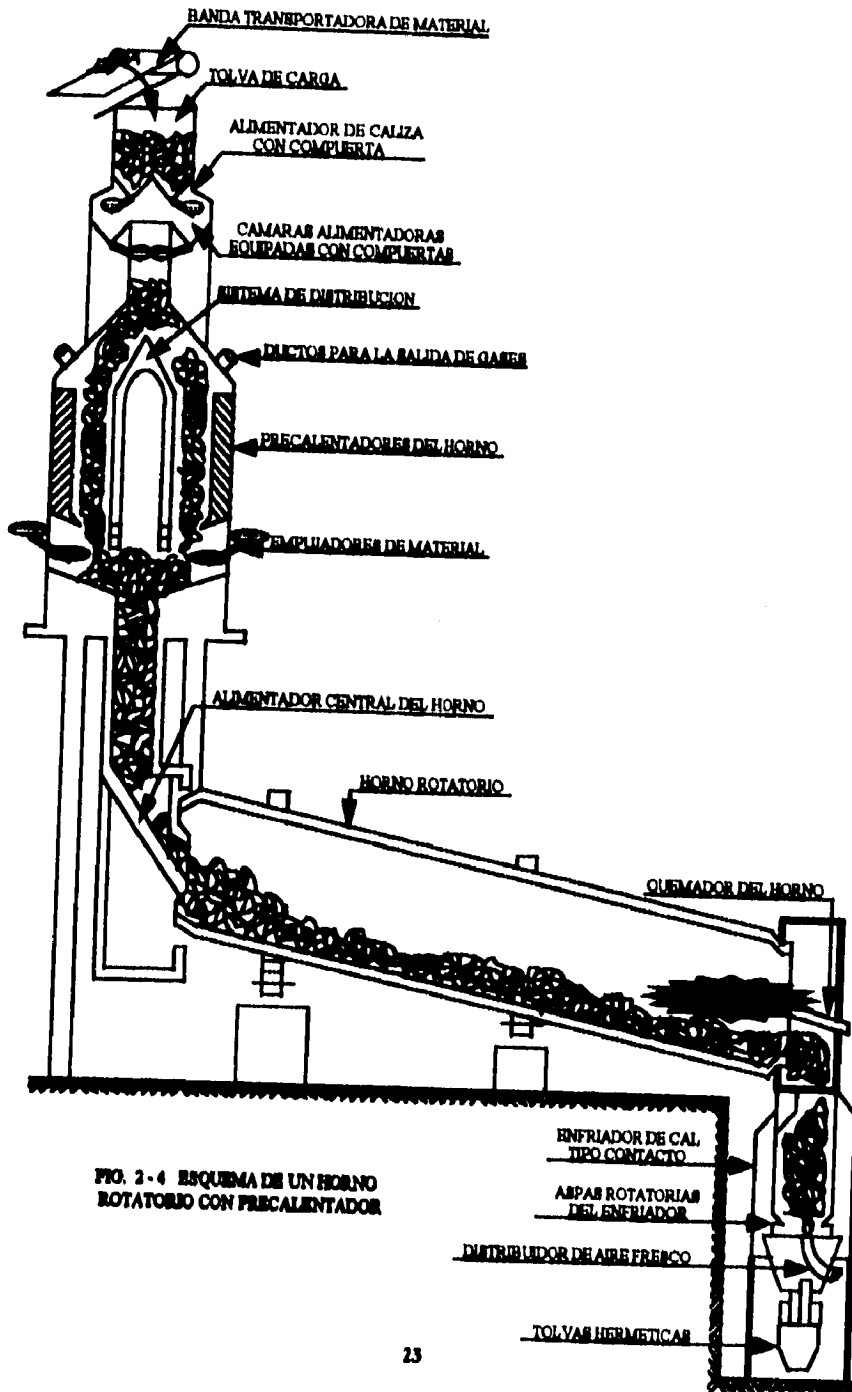


FIG. 2-4 ESQUEMA DE UN HORNO ROTATORIO CON PRECALENTADOR

La calcinación final resulta del intercambio del calor efectuado en el núcleo de masa caliza. El aire que pasa por la cal caliente, absorbe calor y entra al horno rotatorio como aire secundario para el quemador del horno.

Disponen los hornos, de un tablero de control en el que se registra directa o gráficamente la temperatura de los diferentes lugares, comprendiéndose entre ellos el horno horizontal, el de precalentamiento, la salida de los humos de combustión y la cámara de enfriamiento; así mismo se registra en el tablero el desprendimiento del  $\text{CO}_2$ , dato importante para poder controlar el proceso de calcinación. Se puede afirmar que los hornos rotatorios poseen el equipo más completo, teniendo posibilidad de ejercer un mayor control de calidad y más capacidad que cualquier otro tipo de horno, ya que el manejo del equipo es casi automático.

**g) Horno de Hogar Rotatorio:**

Un horno de considerable interés es el horno de hogar rotatorio u horno "Calcinatic". Una parrilla circular giratoria lleva la piedra caliza bajo los quemadores y combinando un control de temperatura con la velocidad de rotación de la parrilla, puede conseguirse un buen control de calidad de la cal para una amplia variedad de piedras calizas. Con este proceso es posible producir una cal viva altamente reactiva. El material está sujeto a muy poca presión o abrasión durante el proceso. Sin embargo el uso de este tipo de horno está limitado en general, a la producción de cal de alta calidad o al procesamiento de grados de piedra caliza que son difíciles de calcinar en caleras más comunes con hornos verticales y rotatorios.

**h) Horno Vertical de Flujo Cruzado:**

En donde los gases pasan a través de una columna de piedra formando un ángulo recto con el movimiento del material.

**i) Horno de Doble Inclinación:**

Son esencialmente dos columnas, una encima de la otra, que permiten a los gases calientes estar en contacto con la pendiente expuesta del material en cada columna.

**j) Horno Arbo:**

Una recirculación de los gases calientes de salida.

**k) Horno Unión Carbida:**

Una el principio de quemadores en forma de viguetas en dos niveles para obtener calcinación más uniforme.

**l) Horno de Columna Anular:**

Es una unidad de capacidad media de alta eficiencia. Por su diseño anular está sujeto a problemas con el refractario; el control del horno es complicado porque se usan quemadores múltiples, que requieren controles individuales. Este tipo de hornos tienen poca aplicación en las industrias productoras de cal, debido básicamente a los problemas antes expuestos.



**m) Horno de Centro Rotatorio:**

Horno en forma de rosca en donde la cama estacionaria del material es expuesta a múltiples quemadores, un precalentador y un enfriador recuperan el calor de los gases y de la cal de salida el cual se usa para precalentar la piedra y el aire de combustión.

**n) Horno de Lecho Fluidizado:**

Se han diseñado para la calcinación de piedras calizas de tamaño que van de 0.2 mm a 2 mm. Sus ventajas son de una buena eficiencia térmica y la producción de cal viva muy uniforme, suave y altamente reactiva a bajas temperaturas de calcinación. Sin embargo, estas unidades encuentran aplicaciones limitadas, debido al alto costo de preparación de la piedra caliza y a su relativamente avanzado control del proceso. La capacidad máxima de plantas en operación es incierta, pero la mayoría de las unidades operan con una capacidad aproximada de 150 t/día.

**A) Horno de Centro Vibratorio:**

Usualmente se limita a pequeñas capacidades, esto es debido a las dificultades en el diseño mecánico de partes vibratorias para las altas temperaturas a la que es expuesta; se usa un precalentador estacionario y un enfriador, similares a los del sistema de centro rotatorio, para reducir el consumo de combustible. La calidad de la cal producida por este sistema es excelente, pero la pérdida por finos puede ser alta debido al movimiento violento en la cama del material.

En las figs. 2 - 5, 2 - 6 y 2 - 7, se presenta un estudio complementario-comparativo de las características de algunos hornos expuestos anteriormente.

Como se ha mencionado, los hornos cuentan con sistemas de enfriamiento, todos diseñados para reducir la temperatura y precalentar el aire de la combustión secundaria para aumentar la eficiencia térmica del horno, los tres tipos más comunes son:

▲ *Enfriador planetario* (fig. 2 - 8 . a).

▲ *Enfriador de parrilla vibratoria* (fig. 2 - 8 . b).

▲ *Enfriador de contacto* (fig. 2 - 8 . c).

El *enfriador planetario*, consiste en una serie de tubos montados en el casco del horno, el producto cae dentro de los tubos de enfriamiento conforme giran debajo del horno. El aire a temperatura ambiente entra al enfriador, aspirado por un ventilador instalado en la parte trasera del horno. Conforme el aire frío pasa en contracorriente con la cal caliente, el aire se calienta y la cal se enfría. El intercambio de calor se mejora instalando en los tubos de enfriamiento aletas o placas que promueven el mejor contacto entre la cal y el aire.

El *enfriador de parrilla vibratoria*, consiste en una serie de parrillas de acero con movimientos recíprocos y que tienen ranuras. Una serie de ventiladores soplan aire a temperatura ambiente por debajo de las parrillas a través de las ranuras, fluidificando parcialmente la cal caliente depositada en las parrillas.

	<b>DOBLE CHIMENEA</b>	<b>UNION CARRIBE</b>	<b>FLUJO CRUZADO</b>	<b>INCLINADO DOBLE</b>	<b>ANULAR</b>	<b>REGENERATIVO FLUJO PARALELO</b>
<b>CHIMENEA</b>	RECTANGULAR	RECTANGULAR	RECTANGULAR	RECTANGULAR	REDONDO	REDONDO
<b>AREA SECCION M<sup>2</sup></b>	9.25 - 19.0	-----	3.90	5.10	9.10 - 17.00	2.35 - 16.0
<b>PRODUCCION T/DIA</b>	150 - 1 500	50 - 700	200	120 - 180	100 - 400	100 - 700
<b>TAMAÑO DE PIEDRA PULG.</b>	1.0 - 8.0	2.0 - 7.0	3/4 - 3.0	1/2 - 2 1/2	3/4 - 5.0	3/4 - 7.0
<b>COMBUSTIBLE</b>	CARBON PETROLEO	PETROLEO GAS	PETROLEO GAS	COQUE PETROLEO GAS	PETROLEO GAS	PETROLEO GAS
<b>CALOR KCAL / Kg</b>	825 A 1 000	1 119 A 1 190	915 A 1 010	865 A 950	865 A 960	772 A 885
<b>ENERGIA KWH / T</b>	21.0 - 25.0	10.0 - 25.0	26.0 - 30.0	16.0 - 26.0	10.0 - 30.0	10.0 - 25.0

**FIG. 2 - 5 ESTUDIO COMPLEMENTARIO-COMPARATIVO  
PARA DIVERSOS HORNO VERTICALES**

PLANTA No.	1	2	3	4	5	6
TIPO DE ENFRILADOR	CONTACTO	PLANETARIO	CONTACTO	PARRILLA	CONTACTO	CONTACTO
TAMAÑO DEL HORNO EN MT DIAM. X LONG.	3.20 X 91.45	3.20 X 135.65	3.50 X 145.70	3.50 X 123.75	0.35 X 123.45	4.10 X 111.95
PRODUCCION T/DIA	500	462	640	473	650	1300
COMBUSTIBLE	CARBON GAS	PETROLEO	PETROLEO	CARBON	CARBON	CARBON
CALOR KCAL/Kg	1700	1734	1730	1412	1411	1603
ENERGIA KWH/T	23.0	14.0	17.0	21.0	19.8	30.34
TAMAÑO DE PIEDRA PULG.	3/4 - 1 3/4	1/4 - 2.0	1.0 - 2 1/2	3/8 - 2 1/2	1/2 - 1 1/2	1.0 - 2 1/4
TEMPERATURA DE SALIDA °C	707.00	548.00	300.0	300.00	565.55	537.00

**FIG. 2-6 ESTUDIO COMPLEMENTARIO-COMPARATIVO PARA DIVERSOS  
HORNO ROTATORIOS SIN PRECALENTADOR**

PLANTA No	7	8	9	10	11	12	13
TIPO DE PRE CALENTADOR	VERTICAL	REJA	REJA	VERTICAL REDONDO	VERTICAL RECTANGULAR	VERTICAL POLIGONAL	VERTICAL POLIGONAL
TIPO DE ENFRIADOR	CONTACTO	CONTACTO	PARRILLA	CONTACTO	CONTACTO	CONTACTO	CONTACTO
TAMAÑO DEL HORNO EN MT DIAM X LONG	3.00 X 30.15	3.10 X 40.25	4.45 X 90.0	3.75 X 55.5	4.10 X 44.10	4.40 X 47.25	5.10 X 61.0
PRODUCCION T/DIA	450.0	500.0	1100.0	400.0	600.0	800.0	1100.0
COMBUSTIBLE	PETROLEO	PETROLEO	GAS	PETROLEO	GAS	CARBON	CARBON
CALOR KCal/Kg	1336	1324	1350	1210	1185	1084	1185
ENERGIA KWH/T	23.0	17.0	1.0	21.0	37.40	42.10	35.50
TAMAÑO DE PIEDRA PULG	3/4 - 1.0	1/2 - 3/4	1/2 - 3/4	3/4 - 1.0	3/4 - 1 3/4	3/8 - 1 3/4	3/8 - 1.0
TEMPERATURA DE SALIDA °C	1200	954.45	998.90	954.45	1065.55	1009.35	1009.35

FIG. 2 - 7 ESTUDIO COMPLEMENTARIO-COMPARATIVO PARA DIVERSOS HORNOS ROTATORIOS CON PRECALENTADOR

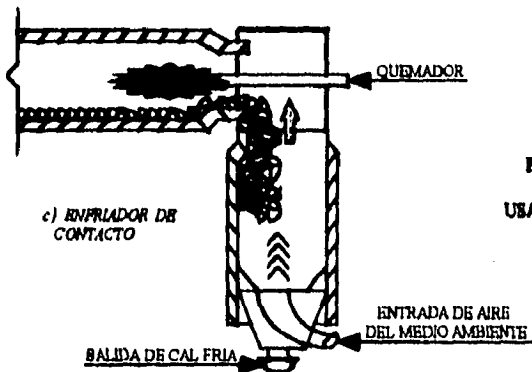
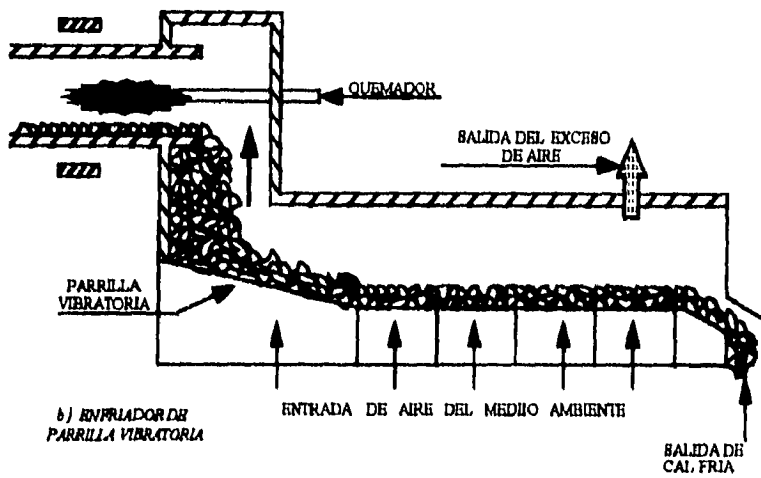
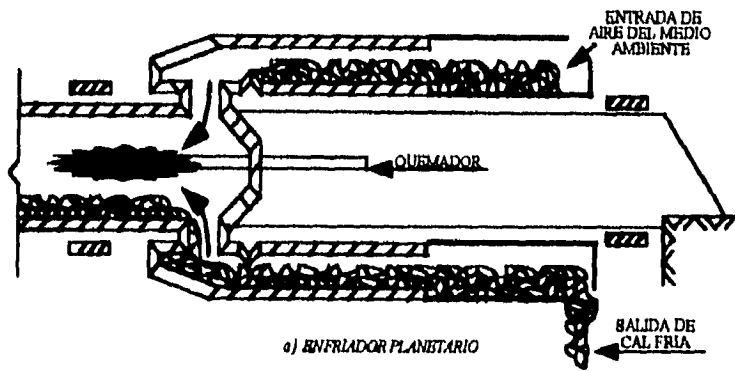
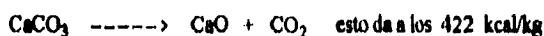


FIG. 2-8 TIPOS DE  
ENFRIADORES  
USADOS EN LOS HORNOS

A medida que la cal pasa por la zona de las parrillas se va enfriando y el aire que pasa a través de la cama de cal es precalentado antes de pasar como aire de combustión secundaria al horno.

El *enfriador por contacto*, es una unidad estática y opera similarmente al precalentador, pero en dirección opuesta, en este caso la cal caliente ya calcinada es alimentada por la parte alta y el aire a temperatura ambiente se inyecta por el fondo. La cal desciende lentamente enfriándose y el aire secundario de combustión es precalentado antes de entrar al horno. La temperatura de la cal en la descarga es aproximadamente de 90 °C.

En la calcinación de la caliza, generada en los hornos, se tiene una reacción básica esta es:



Esta ecuación establece que se requieren 422 kcal/kg para la reacción, a la temperatura real de descomposición de 900 °C. Estos requerimientos caloríficos sólo incluyen el calor para la reacción química, no incluyen el calor necesario para el precalentamiento de la caliza a la temperatura de descomposición. Incluyendo el calor necesario para que la caliza llegue a la temperatura necesaria de descomposición, el requerimiento teórico de calor sería de 626 Kcal/kg.

Para la cal dolomítica, el requerimiento teórico de calor sería de 572 Kcal/kg a la temperatura teórica de descomposición de 725 °C, la temperatura no sólo es afectada por el contenido de CO<sub>2</sub>, sino también por las impurezas como SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y álcalis.

Las *impurezas más importantes* en las calizas, las cuales influyen en un proceso de calcinación y en las características finales del producto, son:

SiO<sub>2</sub> (sílice u óxido de silicio), presentes en el cuarzo, horsteno, arcilla, pizarra, feldespato, etc.

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (óxido de aluminio o óxido de hierro), en arcillas, feldespatos, pirita, etc.

S (azufre) en pirita, yeso y anhídrita.

MgO (óxido de magnesio), no se considera como impurezas, ya que aparece en casi todas las calizas, y no es objetable excepto cuando se encuentra en grandes porcentajes.

Así se tiene, que las diversas calizas tienen un *porcentaje de impurezas*, teniendo la siguiente composición:

<i>Caliza</i>	CaCO <sub>3</sub>	CaO 56 %	CO <sub>2</sub> 44 %	
<i>Dolomita</i>	CaCO <sub>3</sub> MgCO	CaO 30.4 %	MgO 21.8 %	CO <sub>2</sub> 47.8 %
<i>Magnesita</i>	MgCO <sub>3</sub>	MgO 47.7 %	CO <sub>2</sub> 52.3 %	

Se acepta generalmente que las temperaturas (temperatura superficial del material en la zona de calcinación) de la cal, no exceda los 1 177 °C ya que se producirá una cal suave. Las temperaturas correspondientes del gas, usado en algunos hornos como combustible, es usualmente de 95 a 150 °C más altas, dependiendo de la posición del pirómetro de radiación (la temperatura indicada por este instrumento es relativa y no se debe confundirse con la temperatura del material, estas lecturas pueden ser influenciadas notablemente por la temperatura de la flama, el contenido del polvo en el horno, la radiación de los refractarios, etc.).

El mecanismo de la descomposición de la caliza (fig. 2 - 9) empieza: al calentar un cubo (a) de caliza, pasando de la temperatura ambiente a la de calcinación, lo primero que experimenta el cubo es una expansión (b), sucede antes de la descomposición.

Se inicia la calcinación superficial (c), el volumen de los poros aumenta, el volumen de la muestra permanece constante.

Cuando la calcinación es completa (d), la muestra tiene el máximo volumen de poros y el volumen de la muestra permanece casi sin cambiar.

Con mayor aumento de temperatura y mayores tiempos de calcinación los cristales crecen y comienza la sinterización (calcinación al máximo de la caliza) (e); tanto el volumen de los poros como el volumen de la muestra disminuyen.

En la fig. 2 - 10, se muestra el aumento de la densidad aparente de la cal al aumentar la temperatura y el tiempo de calcinación. Es obvio que la temperatura de calcinación es más importante que el tiempo de calcinación; después de 2 1/2 ó 5 h para una temperatura dada, se obtiene la máxima densidad aparente. Con tiempos de retención mayores de 3 h sólo se obtiene en hornos verticales, es más probable que este tipo de hornos produzcan calcs requemas, aún con bajas temperaturas de calcinación.

A fin de obtener una calcinación esencialmente completa sin exceder la temperatura de los 900 °C, es necesario calentar al menos una parte de las partículas de cal a más altas temperaturas; el exterior de una pieza de cal suave llega probablemente a una temperatura superficial cercana a los 1 200 °C, a fin de calentar el interior de la partícula a una temperatura ligeramente mayor que la de calcinación 900 °C. Dependiendo del tamaño de las partículas, el tiempo de calcinación (tiempo de residencia en el horno) tiene que ser aumentado ese tiempo de calcinación. Las características de transmisión de calor de los diferentes sistemas de calcinación de cal y de los diseños de los hornos son otro de los factores que determinan el grado de calcinación y la calidad de la cal producida. Hornos alimentados con piedras de forma muy irregular y de diversos tamaños, con grandes porcentajes de piedras planas o largas, son indeseables este tipo de piedras porque requieren mayores tiempos de retención en el horno. Resultados prácticos en un horno regenerativo de flujo paralelo (horno MCV-KVS), se muestran en la fig. 2 - 11.

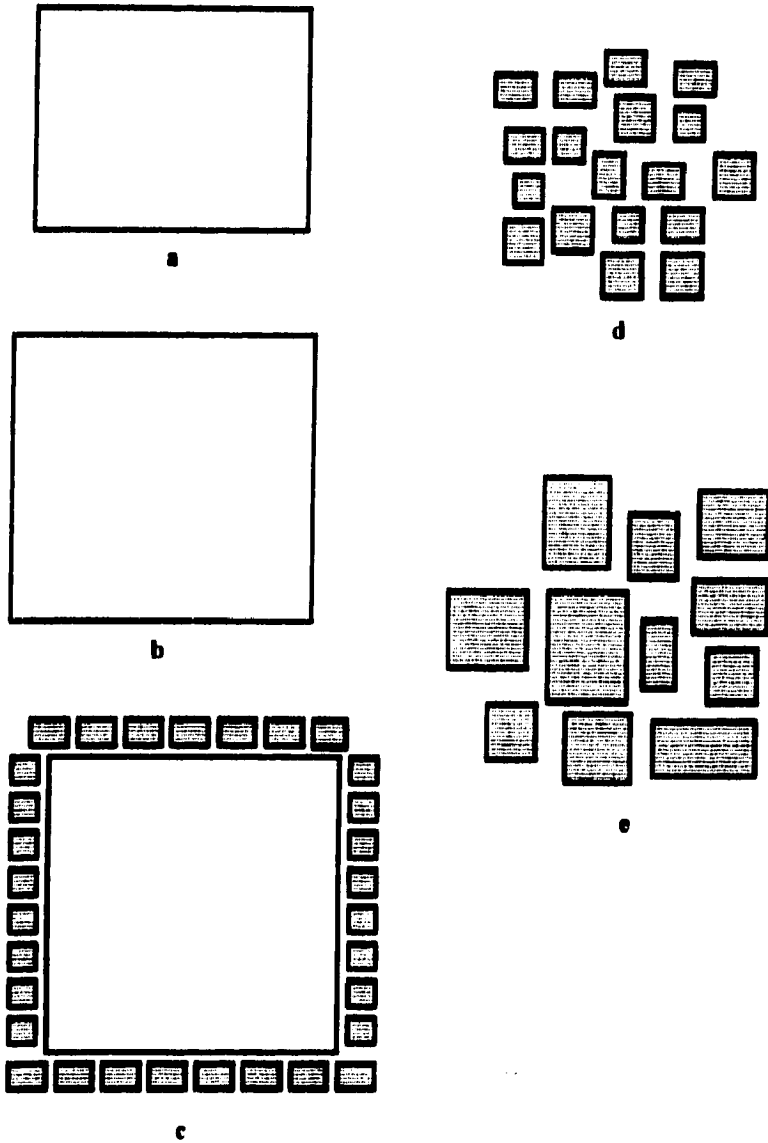


FIG. 2-9 REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL MECANISMO DE CALCINACION DE UNA PIEDRA CALIZA



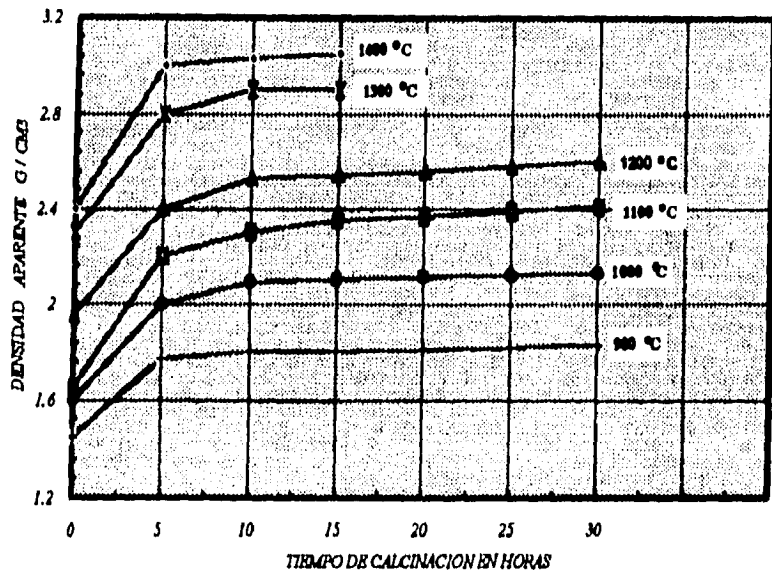


FIG. 2-10 DENSIDAD APARENTE - TIEMPO DE RETENCION EN EL HORNO Y TEMPERATURA DE CALCINACION

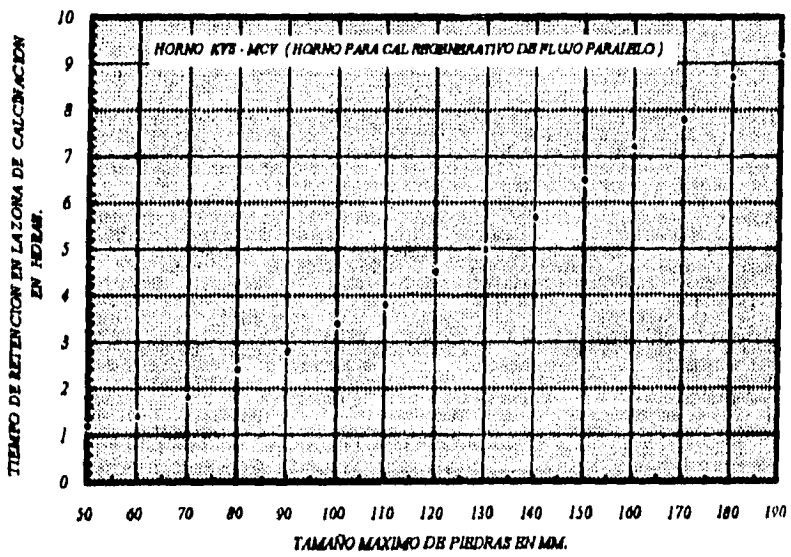


FIG. 2-11 TIEMPOS DE RETENCION - TAMAÑO DE LA ALIMENTACION EN EL HORNO REGENERATIVO DE FLUJO PARALELO

Los tiempos de retención mostrados, se refieren a las temperaturas superficiales máximas de 1178 °C, que corresponden a la cal suave. Los tiempos que se muestran en esta gráfica, son menores debido a una mejor transmisión del calor y la temperatura de calcinación más alta. Además del tamaño máximo de partículas permisibles, el grado de distribución por tamaños de la alimentación determina la uniformidad del producto obtenido; mayor variación en la distribución de tamaños de alimentación, producen normalmente mayor variación en la calidad de la cal.

Una mejor mezcla de la carga en un horno de cal contribuye también a características de producto más uniformes y permite el uso de alimentación con tamaños mayores.

Como una norma práctica, aproximadamente con una hora de tiempo de retención en un sistema de calcinación con una temperatura superficial de la piedra de 1149 °C, se obtiene la calcinación de una caliza de 3/4" de diámetro.

Se pueden entonces, emitir las conclusiones siguientes:

▬ El tamaño de los cristales, volumen de los poros, superficie específica y reactividad son cualidades de la cal estrechamente relacionadas.

▬ Con un tiempo de retención constante, una temperatura más alta produce engrosamiento de los granos, disminución de la superficie y de la porosidad y por lo tanto, menor reactividad. Las impurezas inorgánicas como  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , tienen el mismo efecto.

▬ La temperatura de calcinación es más importante que el tiempo de retención.

▬ Para cada temperatura y cada tamaño de alimentación hay un tiempo de retención óptimo.

▬ Las condiciones óptimas de calcinación tienen que ser determinadas para cada tipo de piedras.

### 11.1.3. LA CAL.

El óxido de calcio, llamada cal viva, es el producto de la calcinación del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). El producto de la calcinación de la dolomita ( $\text{CaCO}_3\text{MgCO}_3$ ) es llamada cal dolomítica.

La estructura cristalina del óxido de calcio es diferente de la del carbonato de calcio, el arreglo de los átomos cristalinos tiene que cambiar cuando se calcina el carbonato de calcio (se forman latices cúbicos, de caras concentradas). El arreglo de los granos cristalinos de óxido de calcio, ya sea que se encuentren muy unidos y compactados o que estén sueltos y el material sea muy poroso, todo ello determina las propiedades de la cal; se distinguen normalmente estas propiedades refiriéndose a la cal como: *suave, media y requemada*.

Debido a que la relación entre la densidad real, porosidad, densidad aparente y densidad bruta, son una medida del grado de calcinación de la cal viva, una importante comparación de estos valores se verán en la siguiente tabla:

<i>Densidad Real</i>	3.35 g/cm <sup>3</sup> (con cero porosidad)
<i>Densidad Aparente</i>	1.5 - 2.8 g/cm <sup>3</sup>
<i>Porosidad</i>	18 - 55 % (con un promedio de 36 %)
<i>Porosidad de dolomita calcinada</i>	8 - 12 %
<i>Densidad Bruta</i>	0.77 - 1.60 g/cm <sup>3</sup>

Los términos "suave", "media" y "requemada", se usan en la industria de la cal, y describen la reactividad de cada cal viva en particular, y esta propiedad depende principalmente de la temperatura de calcinación, y en menor grado del tiempo de calcinación de las impurezas de la materia prima.

La cal viva con una densidad aparente de 1.5 g/cm<sup>3</sup> a 1.8 g/cm<sup>3</sup>, tuvo una calcinación suave.

La cal viva con una densidad aparente de 1.81 g/cm<sup>3</sup> a 2.2 g/cm<sup>3</sup>, tuvo una calcinación media.

Las cales con una densidad aparente de 2.21 g/cm<sup>3</sup> a 2.8 g/cm<sup>3</sup>, son materiales requemados.

La relación entre la calidad de la cal, el grado específico de calcinación (expresado por la densidad aparente y la superficie específica de la cal viva) y el tipo de horno usado para producir la cal viva, se muestran en la fig. 2 - 12.

Los hornos rotatorios y el horno regenerativo de flujo paralelo (horno KVS-MCV) son productores consistentes de la cal suave.

Los hornos rotatorios alimentados con material fino producen una cal más calcinada, y los hornos verticales con alimentación mezclada, y los de unidades a contra corriente, producen cal con una calcinación entre media y requemada.

Las propiedades físicas generales de las cales vivas con diferentes grados de calcinación, se muestran en la siguiente tabla:

<b>GRADO DE CALCINACIÓN</b>	<b>SUAVE</b>	<b>MEDIA</b>	<b>REQUEMADA</b>
Densidad Real, g/cm <sup>3</sup>	3.35	3.35	3.35
Densidad Aparente, g/cm <sup>3</sup>	1.5 - 1.8	1.81 - 2.2	> 2.2
Porosidad Total, %	46 - 55	34 - 46	< 34
Superficie Específica, m <sup>2</sup> /g	> 1.0	0.3 - 1.0	< 0.3
Reactividad al Agua, °C/min	> 20	0.2 - 20	< 0.3

La resistencia de la cal a la compresión y por lo tanto su resistencia a la abrasión durante su manejo y almacenamiento, dependen en gran parte del grado de calcinación, como se muestra en la fig. 2 - 13.

La resistencia de la cal a la compresión varían de 32 a 118 kg/cm<sup>2</sup>, en las cales suaves (con densidad aparente entre 1.5 y 1.8 g/cm<sup>3</sup>) son las que tienen menor resistencia a la compresión y menor resistencia al rompimiento durante el manejo y almacenamiento.

Al realizar una comparación entre las *cales suaves* y las *cales quemadas* se tiene:

1. - Menor tamaño de los granos cristalinos.
2. - Mayor área superficial específica.
3. - Poros más pequeños, pero mayor volumen total de poros.
4. - Menor densidad aparente.
5. - Mayor reactividad química.

#### 11.1.3.1. TIPOS DE CAL.

Se conocerán algunos tipos de cal; definiendo primeramente la cal, se dirá que es el primer derivado, resultado de la manufactura de las calizas. Las cales suelen designarse según sus propiedades naturales, así, se tienen en el mercado diversos tipos de cal, de las cuales se mencionaran algunos tipos:

a. *Cal para la Agricultura*: Tiene granos gruesos, es una forma de cal hidratada sin refinar, es usada principalmente para neutralizar suelos ácidos y para problemas donde no sea necesario que la cal sea pura y uniforme.

b. *Cal Abreada*: Contiene proporciones variables de óxidos, hidróxidos, carbonatos de calcio y magnesio, quienes resultan del prolongado contacto con el aire de la cal viva. Es una prolongada descomposición de la cal viva que ha comenzado a hidratarse y carbonatarse.

c. *Cal de Autoclave*: Es una forma especial de cal dolomítica altamente hidratada, empleada principalmente para propósitos estructurales, que ha sido hidratada bajo presión en un autoclave, siendo esta, una hidratación por medio de vapor a presión y temperaturas elevadas, tiene forma de vasija cilíndrica, de paredes resistentes y cierre hermético.

d. *Cal Disponible*: Representa la totalidad de la cal libre (CaO) contenida en una cal viva o hidratada y es la parte activa de una cal. Representa un intento por cuantificar la concentración de cal.

e. *Cal Blancas*: Obtenida de la piedra caliza casi pura, con bajo contenido de magnesio, ácido silícico, alúmina y óxido de hierro; cuanto menor sea este contenido, será mejor ya que más rica será la cal; y calcinándola hasta su límite de sinterización pierde el ácido carbonico, resultando el óxido de calcio.

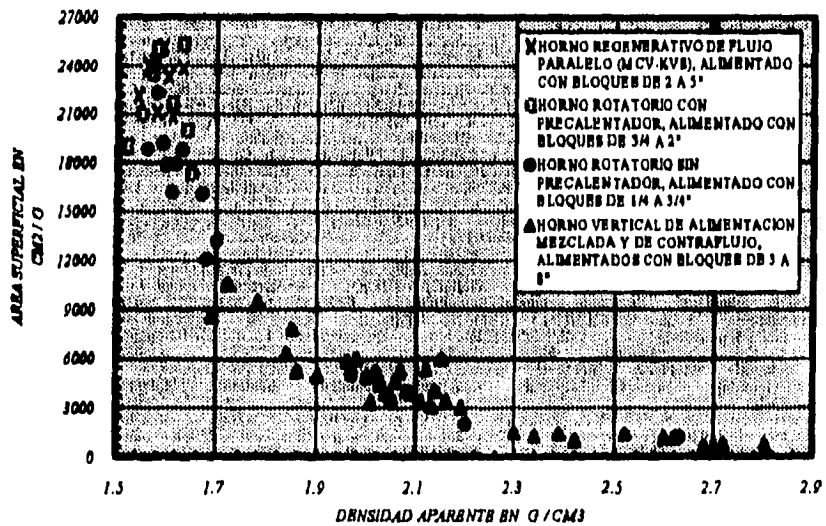


FIG. 2-12 GRADO ESPECIFICO DE CALCCINACION EN DIFERENTES HORNOS

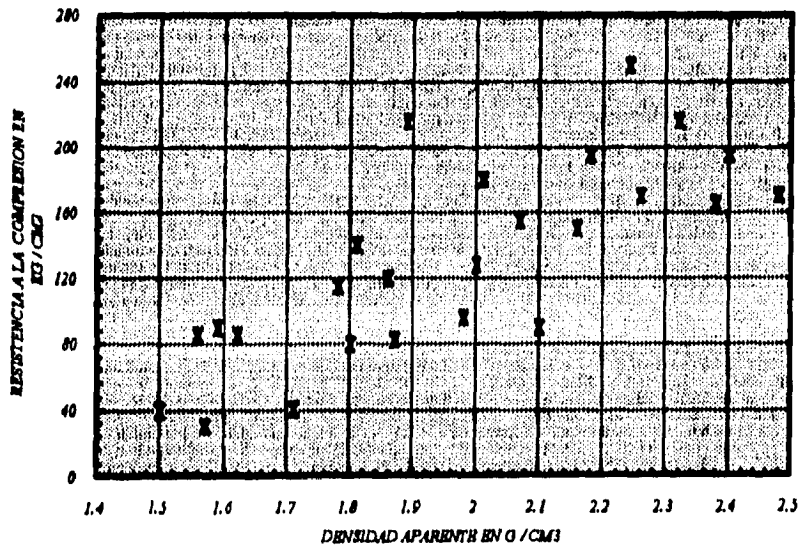


FIG. 2-13 RESISTENCIA A LA COMPRESION DE LA CAL EN DIFERENTES GRADOS DE CALCCINACION (DENSIDAD APARENTE)

*f. Cal Carburo:* Es el desecho de la cal hidratada, producto de la generación de acetileno del carburo de calcio y puede usarse como un lodo húmedo o polvo seco de variable grado de pureza y granulometría. Es de color gris y posee un penetrante olor de acetileno.

*g. Cal química:* Es una cal viva o hidratada que es empleada en una o varias de sus muchas aplicaciones químicas industriales. Generalmente tiene una alta pureza química. Comercialmente esta cal se obtiene de la calcinación controlada de una piedra caliza de alta calidad.

*h. Cal Hidratada:* Es un polvo seco, obtenido por la hidratación de la cal viva, hasta satisfacer su afinidad química con el agua, de esta manera convertir los óxidos en hidróxidos. Dependiendo del tipo de cal viva que se use y las condiciones de hidratación que se empleen, la cantidad de agua en combinación química varía de la manera siguiente:

• *Cal Hidratada con alto contenido de Calcio:* La cal viva con alto contenido de calcio produce una cal hidratada, que contiene generalmente de 72 a 74 % de óxido de calcio y de 23 a 24 % de agua.

• *Cal Hidratada Dolomítica (sin presión):* Bajo condiciones de hidratación atmosférica, tan solo se hidrata la fracción de la cal viva dolomítica, produciendo una cal hidratada con la siguiente composición química: 46 a 48 % de óxido de calcio; 33 a 34 % de óxido de magnesio y 15 a 17 % de agua.

• *Cal Hidráulica Dolomítica (bajo presión):* Esta cal se produce de la cal viva dolomítica bajo presión, lo que da como resultado la hidratación de casi todo el óxido de magnesio así como todo el óxido de calcio, dando como resultado la siguiente composición química: 40 a 42 % de óxido de calcio; 29 a 30 % de óxido de magnesio y 25 a 27 % de agua. Generalmente, la cal hidratada es embarca en bolsas de papel de 25 kg a granel, en carros de ferrocarril y en camiones tolva. Debido al proceso de hidratación, la cal tiene un tamaño de partículas finas, y los niveles de hidratación apropiados para la mayoría de los procesos químicos, deben de pasar un 85 % o más por la malla No. 200.

Mientras que para aplicaciones especiales, la cal hidratada clasificada por aire puede obtenerse tan fina como para que pase un porcentaje del 99.5 % por una malla del No. 325.

*l. Cal Hidráulica hidratada:* Es una forma químicamente impura de la cal con propiedades hidráulicas de límite variable, contiene apreciables cantidades de silicatos, alúminatos y regularmente algo de hierro químicamente combinado con la cal. Es empleada generalmente para propósitos estructurales.

*j. Cal:* Es un término general que implica únicamente una forma de cal calcinada, generalmente cal viva, pero puede también referirse a la cal hidratada o hidráulica.

Puede ser de calcio, de magnesio o dolomítica. Este término no puede ser aplicado a rocas calcáreas o cualquier forma carbonatada de cal.

*k. Lechada de Cal:* Es una forma de cal hidratada en suspensión acuosa, que contiene una cantidad considerable de agua libre.

**l. Cal Viva:** Es un óxido de calcio formado por la calcinación de calizas que liberan dióxidos de carbono. Puede ser principalmente de calcio, magnesio o dolomita en diversos grados de pureza; hay tres formas diferentes de obtenerla:

• **Cal Viva con alto contenido de Calcio:** Generalmente contiene de 0,5 a 2,5 % de óxido de calcio.

• **Cal Viva Dolomítica:** Generalmente contiene de 35 a 40 % de óxido de magnesio.

• **Cal Viva Magnesiana:** Generalmente contiene de 5 a 10 % de óxido de magnesio.

La cal viva se puede adquirir comercialmente por medio de furgones cargados a granel, en bolsas de papel, y en tamaños más o menos estandar, como sigue:

• **Cal Viva como sale del Horno:** Con un tamaño máximo de 8 pulgadas de diámetro.

• **Cal Triturada o en Módulos:** En tamaños que oscilan entre 2 1/2 a 3/4 de pulgada.

• **Cal Molida:** Producto que resulta al moler el material de mayor tamaño. Un tamaño típico es cuando todo el material pasa substancialmente por la malla No. 8 y el 40 al 60 % por la malla No. 100.

• **Cal Pulverizada:** Producto que resulta de un molido más intenso del que se usa al producir la cal molida. Un tamaño típico es aquel que pasa todo substancialmente por la malla No. 20 y el 85 al 95 % pasa por la malla No. 100.

• **Cal peletizada:** Nódulos de 1 pulgada, molidos a la finura de la cal.

La cal viva es un material químicamente activo, es recomendable por ello que se reduzca al mínimo su exposición al medio ambiente durante su manejo y almacenamiento.

La cal viva es sumamente reactiva con el agua, ya que genera un calor muy elevado en el proceso de hidratación. Es un producto inestable, higroscópico, es decir, es ávido de humedad que absorbe del aire, convirtiéndose paulatinamente en hidróxido de calcio.

Durante su hidratación, produce grandes cantidades de calor, lo que hace que la cal viva se convierta en un material peligroso de manejar. El calor producido, a su vez, evapora una cantidad de agua igual a la que se combina con la cal, por lo que el equipo hidratador, debe de asegurar una óptima disipación del calor generado, para impedir que el agua convertida en vapor, deje de hidratar la cal y se produzca un producto incompletamente hidratado.

**m. Cal Romana:** Es sinónimo de la cal hidratada, pero más impura y de tipo más hidráulico.

**n. Cal pobre:** Es la que contiene características bajas, en cuanto a su contenido de minerales idóneos para producir una buena calidad de cal.

Se mencionará a continuación, como es el proceso de hidratación de la cal, en una planta hidratadora típica fig. 2 - 14, la cual consta de una *tolva de granos gruesos* que almacena la cal viva en piedras de hasta 150 mm de diámetro aproximadamente, que se produce en los hornos de calcinación. El transporte a la tolva se hace por medio de bandas transportadoras.

La descarga de la tolva es controlada por medio de un *alimentador vibratorio*, que alimenta a una pequeña *placa inclinada*, en donde hay un *electroimán*, el cual se encarga de atrapar cualquier trozo de metal que pudiera venir entre la cal y que dañaría la quebradora en caso de caer en ella. La *quebradora* que puede ser de cono o de quijada, se alimenta de la tolva de granos gruesos, reduciendo las masas de cal a un tamaño aproximado a los 10 mm.

El material ya quebrado, es llevado por medio de un transportador de banda a la *tolva de finos*, la cual tiene una capacidad suficiente para mantener un abasto que asegure una operación continua en las subsecuentes etapas del proceso.

Instalado en la tolva de finos, hay un *alimentador de banda* de peso constante, es decir, este alimentador puede ser ajustado manualmente, para que alimente un peso constante de material al *hidratador*, el cual tiene como primer paso, un *premezclador*, en donde cae la cal y el agua, en las proporciones ya preñadas.

El agua que normalmente se usa en esta operación, es una *lechada caliente de cal*, proveniente del *colector húmedo de polvo*, que colecta la cal fina arrastrada por el vapor en el hidratador. En el premezclador, se lleva a cabo una mezcla rápida y completa, entre la cal y el agua, por medio de una flecha con paletas girando a alta velocidad. Este paso es esencial para obtener una buena hidratación. La mezcla de cal y agua, pasan después al cuerpo principal del hidratador, que tiene una flecha con paletas que giran a baja velocidad.

El vapor producido por la reacción entre el agua y la cal, mantiene a la cal en forma de lecho fluidizado, las partículas finas ya hidratadas flotan en la superficie y son descargadas a través de una compuerta de altura regular, instalada en la pared del extremo del hidratador.

Las partículas pesadas quedan en el fondo del hidratador, hasta que se completa su hidratación y se convierten en polvo fino, que sube a la superficie y se descarga por la compuerta antes mencionada. Los residuos no hidratables, se acumulan en el fondo del hidratador y son descargados periódicamente a través de una válvula localizada en el fondo de la misma.

En la parte superior del hidratador, hay un ducto el cual va conectado a un colector de polvo húmedo; todo el polvo y vapor producidos en el hidratador, son succionado por un abanico, que lo manda al colector húmedo de polvo, que es llamado también lavador precalentador. En este lavador de forma cónica y con regaderas de agua en su interior, se colecta el polvo proveniente del hidratador y se aprovecha el calor que viene del mismo. El polvo colectado en forma de lechada caliente, se alimenta como agua para hidratar la cal en su primera etapa, a través del premezclador.

El control del sistema de hidratación es simple y después del inicio de la operación en frío, casi no se necesitan ajustes a la alimentación del agua, a menos que cambie la calidad de la cal. El *tablero de instrumentos* tiene un medidor de flujo de agua, termómetro de carátula, que registra la reacción en el hidratador y un amperímetro, para medir la carga del motor principal.



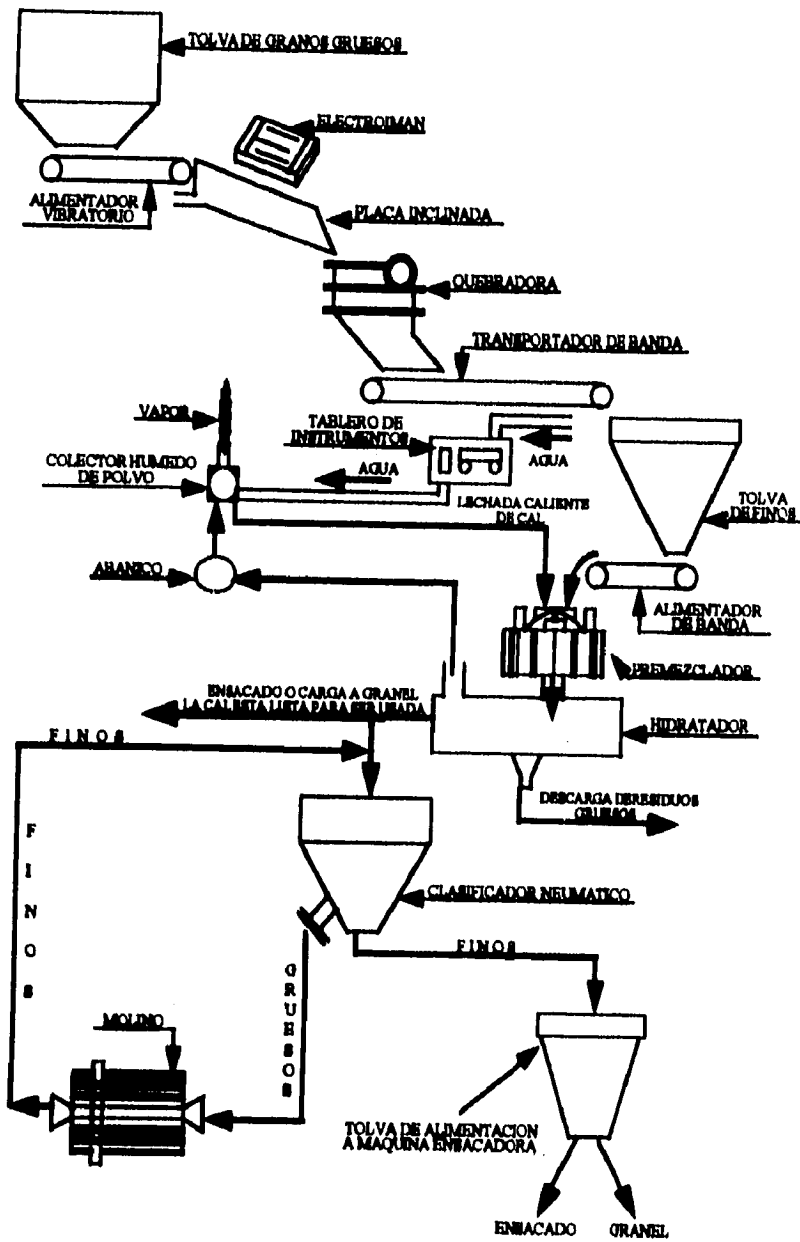


FIG. 2-14 PROCESO DE HIDRATACION DE LA CAL VIVA

La cal descargada del hidratador, queda normalmente en condiciones de poder usarse, sin necesidad de un tratamiento posterior. En caso de requerirse un producto más fino, entonces la cal descargada del hidratador, se pasa a uno o dos *clasificadores neumáticos*, los cuales clasifican la cal, según la granulometría que se desee, y en caso de haber una proporción considerable de partículas gruesas, éstas se pulverizarán en un *molino*, de donde lo molido, regresará a los clasificadores en un circuito cerrado. La cal fina proveniente de los clasificadores neumáticos, se manda a una tolva que alimenta a una *máquina ensacadora*, a granel o en camiones tolva.

Finalmente en la fig. 2 - 15, se puede observar un diagrama de flujo generalizado, en donde se resumen los pasos a seguir para la producción de la cal.

#### 11.1.4. PROPIEDADES FÍSICO - QUÍMICAS DE LA CAL.

##### **PROPIEDADES FÍSICAS DE LA CAL VIVA:**

**Color:** Generalmente la cal viva es blanca con diversos grados de intensidad, dependiendo de su pureza química. Otras menos puras o inadecuadamente calcinadas, pueden tener un ligero color gris ceniza o casi amarillento. La cal viva es invariablemente blanca por derivarse de la caliza.

**Olor:** Tiene un débil aunque característico olor que es difícil definirlo, excepto que es ligeramente "terroso" y aroma penetrante, aunque no ofensivo.

**Textura:** Todas las calces vivas son cristalinas, pero los conglomerados cristalinos varían bastante en tamaño y espacio debido a sus diversos orígenes.

**Estructura Cristalina:** La difracción con rayos X revelan un cristal puro de óxido de calcio en un sistema como el que se muestra en la fig. 2 - 16. Las aristas del cubo miden  $4.797 \text{ \AA}$ , con átomos de calcio localizados en medio. El óxido de magnesio posee el mismo enrejado cúbico cristalino del óxido de calcio, excepto que el cristal del MgO es ligeramente menor y más denso, con aristas de  $4.203 \text{ \AA}$ , esto explica la ligeramente mayor densidad promedio de la cal viva dolomítica.

**Porosidad-Densidad:** El grado de porosidad de una cal viva comercial varía ampliamente en porcentaje de espacio poroso, de 18 a 55 %, un promedio de 36 %; depende de la estructura de la caliza, temperatura e intensidad de calcinación. Dolomitas inertes disminuyen su porosidad de 8 a 12 %.

**Densidad Real:** La densidad real de un óxido de calcio puro es de  $3.35 \text{ g/cm}^3$ , pero se presupone de cero porosidad. Han sido reportados valores de  $3.40 \text{ g/cm}^3$  y menores, pero  $3.35 \text{ g/cm}^3$  parece ser un valor promedio aceptado. Calces comerciales tienen un intervalo más bajo que  $3.0 \text{ g/cm}^3$ ; óxidos dolomíticos puros pueden tener un intervalo tan alto como de  $3.5$  a  $3.6 \text{ g/cm}^3$ .

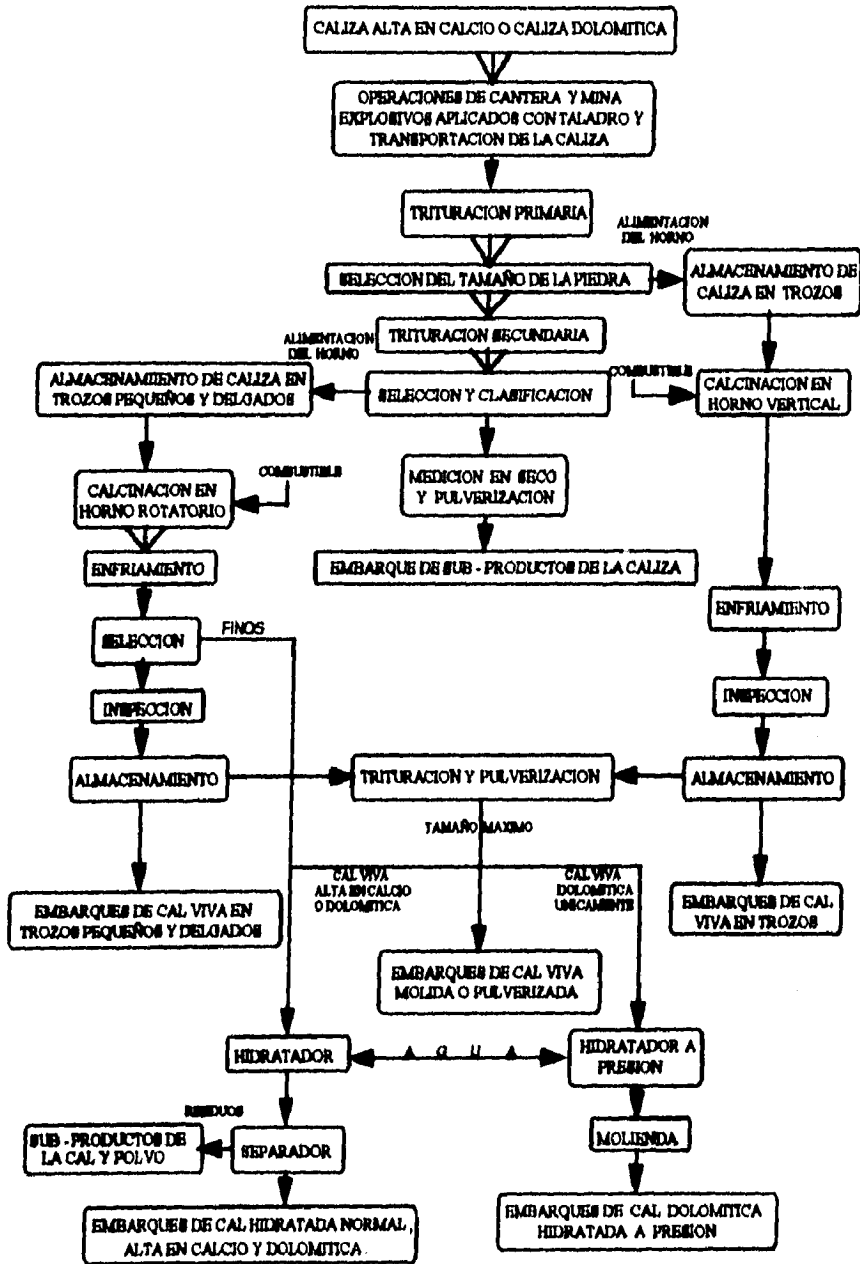


FIG. 2 - 15 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PRODUCCION DE CAL

La *Densidad Aparente* varía igualmente de 1.5 a 2.8 g/cm<sup>3</sup>; valores promedio de óxido comerciales son de 2.0 a 2.2 g/cm<sup>3</sup>. Calces dolomíticas tienen un promedio sobre el 3 a 4 % más que el mayor.

*Dureza*: La cal viva dolomítica varía entre 3 y 4 en la escala de Mohs. La cal viva común es variable pero generalmente entre 3 y 2. La misma amplia divergencia en la dureza y resistencia de las calizas es manifiesta en sus derivados, las calces.

*Resistividad Eléctrica*: Han sido calculados  $71 \times 10^8$  ohm/cm a 15 °C, disminuyendo a valores de 91 ohm/cm a 1 446 °C. La presencia de nitrógeno disminuye estos valores.

*Luminiscencia*: Todos los óxidos de cal son muy luminiscentes a altas temperaturas en el intervalo de calcinación de los 900 °C y más altos, de donde se origina el término "cal - brillante".

*Angulo de Reposo*: Hay algunas diferencias en valores con diferentes calces vivas y con diferentes granulometrías y graduaciones, pero con un ángulo del rango de 50 al 55° para tamaños de gravilla, es una razonable medida promedio para su cuantificación.

#### **PROPIEDADES FÍSICAS DE LA CAL HIDRATADA:**

*Color*: Todas las calces hidratadas secas, excepto aquellas que son totalmente impuras, son extremadamente claras en color, invariablemente más blancas que la cal viva de su origen. Sobrecargando de cal viva se puede producir un tenue color amarillento de cal hidratada resultante. Manchas negras de partículas de cuarzo son simplemente impurezas, generalmente silicatos. Por separado, los cristales de hidróxidos puros son limpios e incoloros.

*Olor*: Existe un aroma similar a una cal viva.

*Textura*: Se encuentra como un polvo fino. La finura varía en tamaño, pero puede ser de micro cristalina o tamaño coloidal (submicron). Los rayos X revelan una estructura cristalina definida, patrón uniforme hasta el más finamente hidratado.

*Estructura Cristalina*: En un cristal de forma de plato hexagonal o prisma con base perfectamente hendida, la partícula física es de un tamaño variable, pues los microscópicos conglomerados cristalinos varían en algunos grados, la estructura se muestra en la fig. 2 - 17.

*Densidad Real*: El intervalo en la densidad real, para diferentes calces hidratadas comerciales es mencionado a continuación:

<b>TIPO DE CAL</b>	<b>DENSIDAD REAL</b>
CALCIO	2.3 - 2.4 g/cm <sup>3</sup>
DOLOMITA ALTAMENTE HIDRATADA	2.4 - 2.6 g/cm <sup>3</sup>
DOLOMITA NORMALMENTE HIDRATADA	2.7 - 2.9 g/cm <sup>3</sup>

Los últimos dos, contienen del 25 a 35 % de óxido de magnesio en promedio.

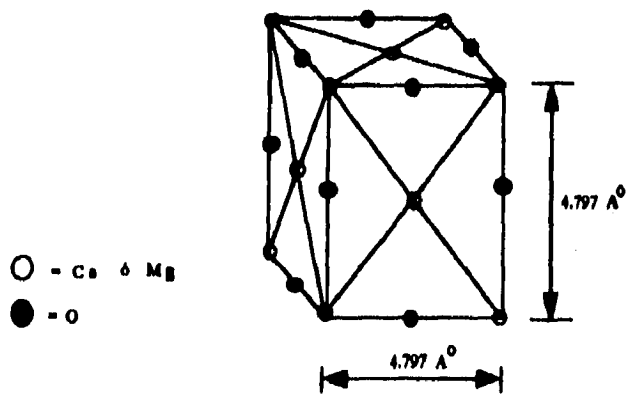


FIG. 2-16 ESTRUCTURA CRISTALINA DEL OXIDO DE CALCIO

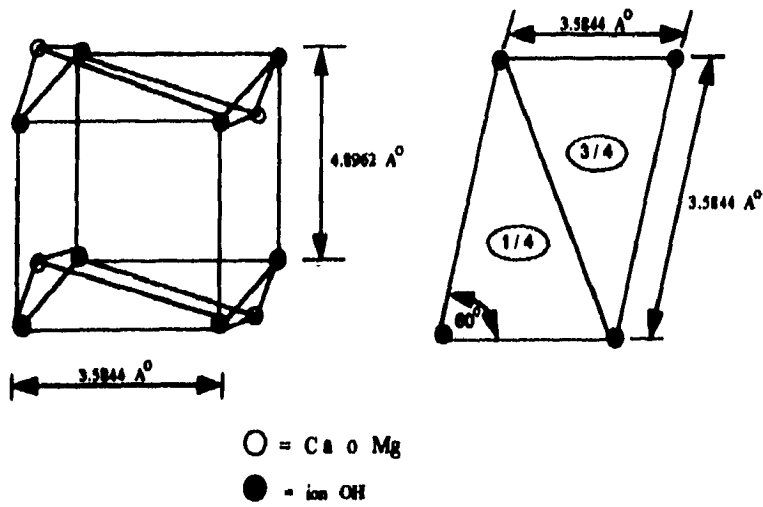


FIG. 2-17 ESTRUCTURA CRISTALINA DEL HIDROXIDO DE CALCIO

**Dureza:** Es un valor intermedio entre 2 y 3 en la escala de Mohs, se han reportado valores promedio de 2.5 en cristales puros de hidróxido de calcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

**Ángulo de Reposo:** Hay un amplio rango de ángulos de reposo para diversas calces hidratadas comerciales, ello depende de su granulometría, contenido de la mezcla, grado de aireación y en particular de la amplitud de su carga electrostática, puede variar de 15 a 80 grados.

Mineralógicamente cuatro carbonatos de calcio o de magnesio son importantes como constituyentes de la caliza, la dolomita y de la magnesita, ellos son:

	FORMULA QUÍMICA	PESO MOLECULAR	DENSIDAD APARENTE	DUREZA (ESC. MOHS)
CALCITA	$\text{CaCO}_3$	100	2.72 g/cm <sup>3</sup>	3.0
MAGNESITA	$\text{MgCO}_3$	84.3	3.00 g/cm <sup>3</sup>	3.5 - 4.5
DOLOMITA	$\text{CaCO}_3\text{MgCO}_3$	184.4	2.84 g/cm <sup>3</sup>	3.5 - 4.0
ARAGONITA	$\text{CaCO}_3$	100.1	2.04 g/cm <sup>3</sup>	3.5 - 4.0

La calcita, magnesita y dolomita son de interés comercial, la aragonita es relativamente escasa.

La densidad aparente no se debe confundir con la densidad bruta ó el peso bruto. La densidad bruta de la caliza triturada depende de la granulometría y del grado de compactación, un promedio adecuado sería el de 1.6 g/cm<sup>3</sup>.

La resistencia a la compresión puede variar dentro de un rango que va desde los 80 a los 240 kg/cm<sup>2</sup>; una piedra caliza masiva y densa tiene una resistencia a la compresión entre los valores que van de 1 266 kg/cm<sup>2</sup> a los 1 547 kg/cm<sup>2</sup>.

#### PROPIEDADES QUÍMICAS DE LA CAL:

Los elementos representativos del grupo II A en la Tabla Periódica de los Elementos, se tienen seis elementos químicos, los cuales se mencionaran a continuación: el berilio (Be), magnesio (Mg), calcio (Ca), estroncio (Sr), bario (Ba) y radio (Ra). Estos elementos son electropositivos, ya que así lo indican sus estructuras atómicas, sus átomos muestran una gran tendencia a perder dos electrones y formar dos cationes divalentes (ion que tiene dos valencias de cargas positivas).

Como grupo, estos elementos siguen a los metales alcalinos en actividad química (tendencia a perder electrones), aunque el sodio está detrás del calcio en la serie electromotriz. Los metales de este grupo son mucho más duros que los metales alcalinos (cesio, litio, potasio, rubidio y sodio), y sus puntos de ebullición y de fusión son más elevados.

En la siguiente tabla se vera la estructura atómica de los elementos del grupo dos de la tabla periódica de los elementos:

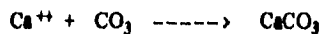
**ESTRUCTURA ATÓMICA DE LOS ELEMENTOS DEL GRUPO II A DE LA TABLA PERIÓDICA  
NUMERO DE ELECTRONES EN CADA NIVEL DE ENERGÍA**

ELEMENTO	K	L	M	N	O	P
BERILIO	2	2				
MAGNESIO	2	8	2			
CALCIO	2	8	8	2		
ESTRONCIO	2	8	18	8	2	
BARIO	2	8	18	18	8	2

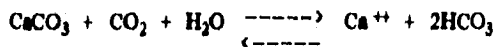
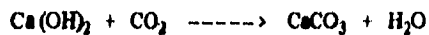
El calcio, el estroncio y el bario se les llama corrientemente *metales alcalinotérreos*. Los metales alcalinotérreos, son de color blanco argentino y cristalino. Se combinan fácilmente con el oxígeno si se exponen al aire.

A continuación se verán los **COMPUESTOS DEL CALCIO**:

**CARBONATO DE CALCIO**: El carbonato de calcio se obtiene por precipitación a partir de disoluciones frías:

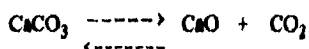


El precipitado consiste en cristales de caliza (creta precipitada); en cambio obtenido de disoluciones calientes se precipita (materia que por reacciones químicas se separa del líquido en el que estaba disuelto), la forma el aragonito y es menos estable. Haciendo pasar dióxido de carbono a través de agua de cal, se precipita el carbonato de calcio pero un exceso de gas lo re disuelve, originando el bicarbonato:



La segunda reacción es reversible. Al calentarse se expulsa el dióxido de carbono y el carbonato se precipita de nuevo. Cuando las aguas naturales de dureza temporal pierden dióxido de carbono (al llegar a la superficie de cavernas subterráneas y reducirse la presión a la atmosférica), se forman las estalactitas y estalagmitas, fig. 2 - 18.

**OXIDO DE CALCIO:** Se forma el óxido de calcio cuando el calcio se quema en el aire. En gran escala se produce, calentando calizas en grandes hornos de cal llamados también caleras:



La ecuación anterior alcanza el equilibrio cuando en contacto con la caliza y la cal existe una determinada concentración o presión parcial de  $\text{CO}_2$ .

La presión de equilibrio se llama "presión de descomposición" del carbonato de calcio. Si a cualquier temperatura la presión parcial del  $\text{CO}_2$  es inferior a la de equilibrio, se descompondrá la caliza para incrementar dicha presión al valor de equilibrio. En cambio si la presión parcial es superior a la de equilibrio, la cal se combinará con el dióxido de carbono para formar el carbonato y la presión descenderá al valor de equilibrio.

Los valores de equilibrio para presión del dióxido de carbono a diversas temperaturas son:

<i>Temperatura °C</i>	500	600	700	800	900	1 000
<i>Presión (mm de Hg)</i>	0.11	2.35	25.3	168	773	2 710

En la fabricación de la cal, la presión parcial del dióxido de carbono se mantiene inferior a la de equilibrio, al introducir a través del horno una corriente de aire que arrastra el  $\text{CO}_2$  y mantiene una atmósfera pobre en este gas.

En torno a la base del horno se disponen hogares, para someter toda la carga de caliza al calor de los productos de combustión; pero sin ponerse en contacto con el combustible ardiendo. Se evita elevar mucho la temperatura en el horno para que la arena de la caliza no se combine con la cal, formando con ello la escoria.

**HIDRÓXIDO DE CALCIO:** La cal reacciona con el agua desprendiendo mucho calor. El producto de la reacción es el hidróxido de calcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , y se le conoce como cal hidratada:



La cal expuesta al aire absorbe lentamente dióxido de carbono y agua. Este material se le conoce como cal apagada al aire.

El hidróxido de calcio es poco soluble en el agua, disminuyendo la solubilidad al aumentar la temperatura. La disolución se llama agua de cal.

Una suspensión del hidróxido en agua se llama lechada de cal, que se usa a veces para blanquear paredes con cal.



**Acidez:** El pH de una solución  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a 25 °C puede ser cuantificado, estos datos se muestran en la tabla siguiente:

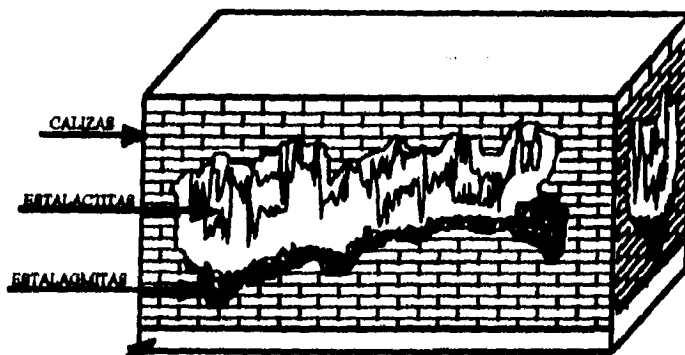
**pH DE SOLUCIONES DE HIDRÓXIDO DE CALCIO A 25 °C**

CaO g/l	pH
0.064	11.27
0.065	11.28
0.122	11.54
0.164	11.66
0.271	11.89
0.462	12.10
0.680	12.29
0.710	12.31
0.975	12.44
1.027	12.47
1.160	12.53

La anterior tabla indica que el aumento de una pequeña cantidad de óxido de calcio (CaO) a agua destilada causa un rápido incremento en el pH, de un 7 (neutral) a 11. De aquí que el aumento en el pH es gradual. Una solución saturada al 50 % de CaO incrementa ligeramente su acidez antes de alcanzar la saturación. La temperatura es un factor limitante en los aumentos de acidez, en temperaturas que reduzca la solubilidad decrecerá el pH en concentraciones solubles fraccionales. En forma parecida, el valor de pH bajo los 25 °C (fig. 2 - 19), son ligeramente mayores que a alta temperatura, probablemente como una solución saturada asciende a un pH de 0 °C a 13 °C. Debido a su baja solubilidad  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  posee un pH máximo de únicamente 10.5, la cal dolomítica es igual a  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

En la siguiente tabla se definen los porcentajes gravimétricos de los principales constituyentes de las calces, tanto en sus elementos como en sus compuestos:

Sustancias de la cal	Porcentajes de los elementos				Porcentajes de Compuestos			Óxidos Alcalinos Ca+Mg
	Ca	Mg	O	H	$\text{H}_2\text{O}$	CaO	Mg	
CaO	71.47		28.53			100		100
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	54.09		43.19	2.72	24.31	75.69		75.69
$\text{MgO}$		60.32	39.68				100	100
$\text{Mg}(\text{OH})_2$		41.69	54.85	3.46	30.88		69.12	69.12
$\text{CaO} \cdot \text{MgO}$	41.58	25.23	33.19			58.17	41.83	100
$\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgO}$	35.03	21.26	41.95	1.76	15.75	49.01	35.24	84.25
$\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2$	30.27	18.36	48.33	3.04	27.21	42.35	30.44	72.79



LA GRUTA QUEDA TOTALMENTE POR ENCIMA DEL NIVEL DE LAS AGUAS, Y LAS FILTRACIONES EN LO ALTO PERMITEN

FIG. 2-18 FORMACION DE ESTALACTITAS Y ESTALAGMITAS

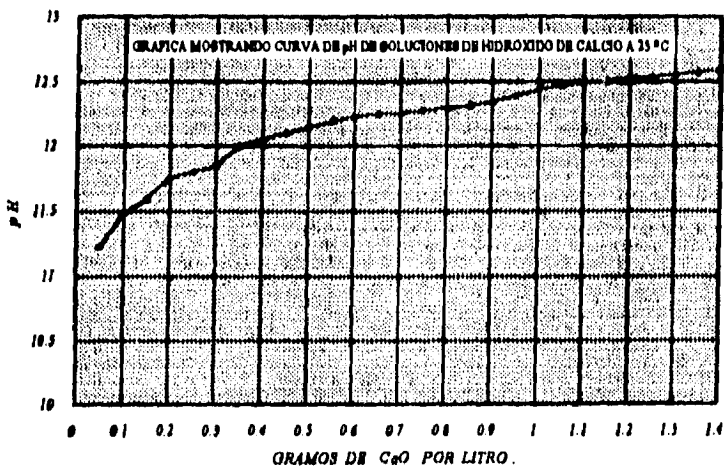


FIG. 2-19 GRAFICA MOSTRANDO CURVA DE PH DE SOLUCIONES DE HIDROXIDO DE CALCIO A 25 °C

## 11.2. IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS ARCILLAS.

En ingeniería, los materiales que constituyen la corteza terrestre se dividen en dos grandes categorías, que son las rocas y los suelos. Las rocas son los materiales duros y consolidados; y los suelos, son el conjunto de partículas minerales, producto de la desintegración mecánica o de la descomposición química de rocas preexistentes. Esencialmente, todo material suelto de la corteza terrestre (sin tener en cuenta la distribución de las partículas por tamaño, la composición, o el contenido orgánico) es considerado bajo la categoría de suelo. La parte activa de un suelo lo constituyen las arcillas, dadas las características físico-químicas y estructurales de estas partículas. El conocimiento de las estructuras mineralógicas, propiedades físicas y composición química de la fracción arcillosa, es indispensable para la técnica de la mecánica de los suelos y su estabilidad.

Al mismo, el suelo se identifica y clasifica según su apariencia y se tienen: suelos gruesos (gravas y arenas), y los suelos finos (limos y arcillas), los que finalmente se estudiarán, son los suelos finos. Los suelos finos están compuestos por partículas muy pequeñas que pasan por la malla No. 200, cuya abertura es de 0.074 mm. Se dividen en dos grupos: los limos y las arcillas; en ambos grupos se presentan los suelos orgánicos y los inorgánicos.

**LIMOS:** Los limos son suelos de grano fino cuyo tamaño varía entre los 0.074 mm y los 0.002 mm, presentan una textura suave al tacto y son poco o nada plásticos. Las variedades más comunes y menos plásticas están constituidas por partículas de cuarzo generalmente del mismo tamaño. Frecuentemente se presentan mezclados con arenas finas o arcillas, y generalmente se les encuentra en la ribera de los ríos y zonas lacustres. Su tonalidad abarca todos los matices del color pardo. Los limos orgánicos tienen mezcladas partículas de materia orgánica finamente divididas, y se diferencian de los limos inorgánicos en que los limos orgánicos son más plásticos y su color varía entre el gris claro a gris muy oscuro.

**ARCILLAS:** Las arcillas son agregados de partículas microscópicas y coloidales, constituidas por minerales, predominando los silicatos de aluminio hidratados; otros minerales constitutivos comunes son los silicatos de magnesio, hierro y otros metales también hidratados. Los minerales de las arcillas están compuestos de láminas delgadas de espesores microscópicos y submicroscópicos; un porcentaje considerable de partículas de arcilla está constituido por fragmentos pequeños, aplastados o escamosos de tales láminas. Estas escamas están mezcladas con otras de forma irregular y con material coloidal, los cuales tienen tamaños menores de 0.002 mm. Como las arcillas son finos plásticos del suelo, sus características mecánicas se ven seriamente afectadas por el contenido de agua, cuando éste es alto, poseen una baja resistencia al esfuerzo cortante y la compresibilidad aumenta. Esta propiedad es debida al comportamiento de las partículas de tamaño coloidal, a las cuales el agua se adhiere por atracción molecular, formando una película de espesor variable según la cantidad de agua y las características eléctricas de los coloides.

Al agua adherida se le conoce como "adsorbida" y es un fenómeno muy interesante. Cuando el contenido de agua del suelo arcilloso es bajo, disminuye la compresibilidad y aumenta la resistencia al corte que en algunos casos cuando el suelo está seco llega a ser considerable. La variación del volumen de las arcillas está en función de las variaciones de la humedad o contenido de agua, ya que la película que forma el agua adsorbida, evita que las partículas de suelo se toquen entre sí directamente provocando la expansión; cuando el agua se evapora el espesor de la película que cubre a las partículas disminuye y éstas se acercan entre sí provocando la contracción del suelo. La variación de la resistencia al esfuerzo cortante, se atribuye a que al cambiar el espesor de las películas de agua, cambia la separación entre las partículas coloidales y varía la fuerza atractiva molecular entre ellas y consecuentemente su resistencia al desplazamiento.

La resistencia de una arcilla no solamente varía con el contenido de agua, si se toma un trozo de arcilla en su estado natural y se amasa con la mano, sin cambiarle el contenido de humedad, se observará que su resistencia disminuye en mayor o menor grado, según la clase de arcilla de la que se trate y de su historia geológica. Por ejemplo, las arcillas de origen volcánico o de depósitos lacustres, son más sensibles al remoldeo que las arcillas marinas; otra característica de las arcillas, es que la resistencia perdida por el remoldeo se recupera parcialmente con el tiempo, a este fenómeno se le conoce con el nombre de "Tixotropía" y es por la naturaleza físico-química que poseen las arcillas.

Las propiedades de las arcillas están íntimamente ligadas al comportamiento físico-químico de los coloides que las constituyen, los cuales se suponen ligados entre sí por cadenas de moléculas de agua e iones positivos de calcio, sodio, magnesio, fierro, aluminio. El estado de agregación de las partículas coloidales y la intensidad de las fuerzas atractivas o repulsivas entre ellas, depende de la clase de cationes absorbidos y del espesor de la película del agua adsorbida. Según el concepto moderno del mineral de arcilla, las formas cristalizadas de estos minerales son los componentes de esta fracción denominados arcilla, pudiéndose encontrar también formando parte del conjunto en menores cantidades de minerales como cuarzo, calcita, feldespato y pirita; también integran la fracción arcillosa materia orgánica y sales solubles. Según el ordenamiento de las redes o estructuras reticulares de las formas cristalizadas, las arcillas pueden clasificarse en tres grupos mayores según el retículo esté formado por dos o tres capas.

Con retículo de dos capas están el grupo de la *Caolinita*, este término se deriva del chino kao-ling que significa "cerro alto", nombre de la montaña de la que por primera vez se embarcó la caolinita a Europa para ser usada en la cerámica.

Con retículo de tres capas están el grupo de las *Montmorillonitas*, este mineral fue descrito por primera vez de muestras colectadas cerca de Montmorillon, pueblo situado en la porción centro occidental de Francia; y el grupo de la *Illita*, el nombre de este mineral fue seleccionado por los geólogos del servicio geológico de Illinois en honor de su estado.

Los minerales de la arcilla están constituidos por tetraedros de silicio-oxígeno enlazados en láminas; estas láminas se combinan de diferentes maneras con los compuestos del átomo de aluminio y moléculas de oxhidrilo, por esta razón, al referirse a las arcillas, se habla de silicatos de aluminio hidratados. Por otra parte, la montmorilonita puede contener magnesio y algo de sodio y calcio, y la illita contiene potasio, ocasionalmente con algo de hierro y magnesio. No se sabe exactamente que factores determinan la clase de arcilla que se formará cuando se intemperiza un feldespato. Probablemente el clima desempeña un papel importante, pues la caolinita tiende a formarse como resultado del intemperismo químico intenso en climas cálidos y húmedos, en tanto que la illita y la montmorilonita parecen desarrollarse mejor en climas más secos y fríos, también la historia de la roca parece tener influencia.

La clasificación de las arcillas puede hacerse más amplia, pero para los fines de la estabilización de suelos, los grupos de la caolinita, la montmorilonita y de la illita, son los más importantes debido a sus propiedades físicas y químicas. Uno de los métodos más difundidos para la identificación de los minerales formadores de la arcilla es el análisis térmico diferencial, cuyo principio está basado en las características de las reacciones "exo" o endotérmicas que resultan de calentar el mineral en estudio a una velocidad constante hasta alcanzar aproximadamente los 1 000 °C, de temperatura. La temperatura necesaria para desprender el agua absorbida, es constante para los distintos minerales así como también la intensidad de esta reacción. El método clásico de identificación, es por difracción de rayos X, empleando el microscopio electrónico, espectrometría con rayos infrarrojos. También pueden identificarse las arcillas, estudiando su capacidad de cambio de bases, con un análisis químico, aunque este método no permite la identificación cuando los minerales se presentan formando mezclas. Sin embargo desde el punto de vista de la estabilización de suelos, puede recomendarse este método pues da una idea del conjunto de minerales arcillosos del suelo y de la propiedad que más influye en el proceso de estabilización, que es el intercambio iónico. Uno de los métodos más importantes, es el empleado por el cuerpo de ingenieros Australianos, que se basa en observaciones directas para así obtener información preliminar valiosa de los suelos en el campo, sin necesidad de efectuar pruebas de laboratorio. El método referido, se basa en los tres puntos siguientes:

a) Observación general del lugar y del perfil de suelo. Para realizar esto, es necesario efectuar de preferencia, pozos a cielo abierto o bien extraer muestras inalteradas. Deberá tomarse nota de los colores del suelo y del agua en los encharcamientos cercanos que hubiera.

b) Apreciación de la textura del suelo. La textura del suelo se deberá estimar con la ayuda del agua de lluvia o la destilada. Una textura arenosa en el suelo amasado con agua, indicaría la presencia de arena, una textura pastosa la presencia de arcilla y la ausencia de ambas indicaría limos. Si se permite que el suelo se seque en los dedos, el suelo arenoso no se adherirá a ellos, el limo se desprenderá fácilmente y la arcilla se adherirá fuertemente a los dedos.

c) Sumergir el espécimen completamente en agua de lluvia o destilada, no deberán agregarse agentes dispersantes ni humedecedores, se le conoce como "prueba de grumo".

### 11.3. PROPIEDADES FÍSICO - QUÍMICAS DE LA ARCILLA.

Las arcillas están constituidas básicamente por silicatos de aluminio hidratados, presentando además en algunas ocasiones, silicatos de magnesio (Mg), hierro (Fe) u otros metales también hidratados. Estos minerales tienen regularmente, una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas, de las cuales existen dos tipos: la silícica y la aluminica. La *lámina silícica* esta formada por un átomo de silicio, rodeado de cuatro átomos de oxígeno, conjuntamente forman tetraedros (fig. 2 - 20). Estos tetraedros se agrupan en unidades hexagonales, sirviendo un átomo de oxígeno de nexo entre cada dos tetraedros; las unidades hexagonales se repiten indefinidamente constituyendo una redícula laminar. La *lámina aluminica* esta formada por retículas de octaedros, dispuestos con un átomo de aluminio al centro y seis de oxígeno alrededor (fig. 2 - 21).

Se presentan esquemáticamente (fig. 2 - 22), las unidades de tetraedros y octaedros: (a) y (b) la unidad tetraédrica silícica; (c) la unidad octaédrica aluminica; (d) la unidad octaédrica de magnesio; (e) la unidad conocida como la brucita en la que los átomos interiores son de magnesio; (f) la lamina agrupada en tetraedros, conocida como silícica; (g) las unidades conocidas como gibbita, en la que los átomos interiores son de aluminio.

**CAOLINITA:** La lamina silícica (f), tiene en su valencia una fuerza superior a la del oxígeno, por lo tanto se encuentra insatisfecha, se aprecia esto en el esparcimiento que guardan los oxígenos, resulta posible que dicha unidad silícica se una a la unidad gibbita (g), como se muestra (fig. 2 - 23). En dicha figuras se puede apreciar la sustitución de dos de los oxígenos de la lamina silícica por dos hidróxilos de cada unidad tetraédrica de la gibbita, estableciéndose con ello una liga, tanto del tipo iónico como de valencia la cual es demasiado fuerte. En una representación esquemática, se puede apreciar que la lamina es eléctricamente neutra, obteniéndose con ello el mineral conocido como caolín. Se pueden unir láminas de este tipo unas sobre otras para formar cristales de caolín (formados a veces con más de 100 láminas de caolín) conocidos como caolinita, siendo las fuerzas que las unen del tipo hidrógeno y desarrolladas entre los iones oxígeno ( $O^{-2}$ ) y los iones hidróxilo ( $OH^{-1}$ ). Esta unión es también relativamente fuerte, debido a que las partículas quedan interrumpidas en sus bordes, se sigue mientras las cargas eléctricas para una lamina elemental de caolinita son neutras, en los bordes se habrán roto uniones, por lo cual se podrán tener bordes eléctricamente positivos o negativos, el rompimiento puede dar origen a partículas que no son eléctricamente neutras.

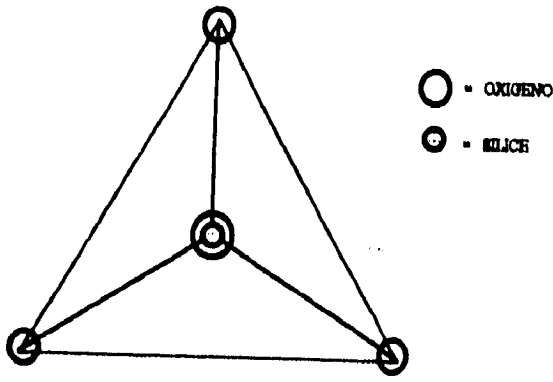


FIG. 2 - 20 LAMINA SILICEA

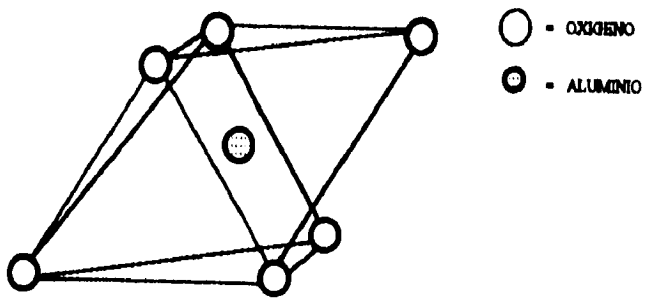
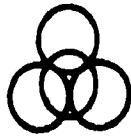
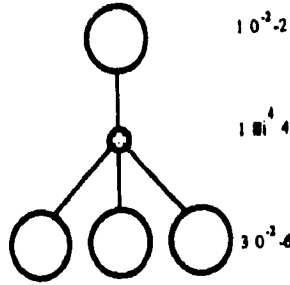


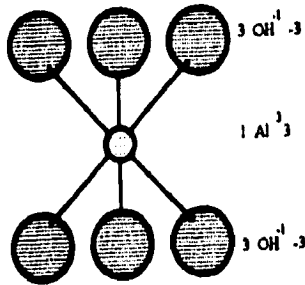
FIG. 2 - 21 LAMINA ALUMÍNICA



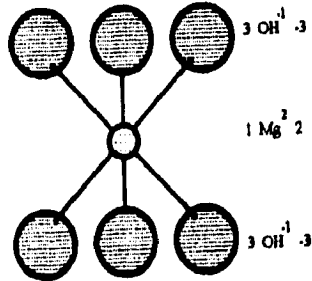
**a**



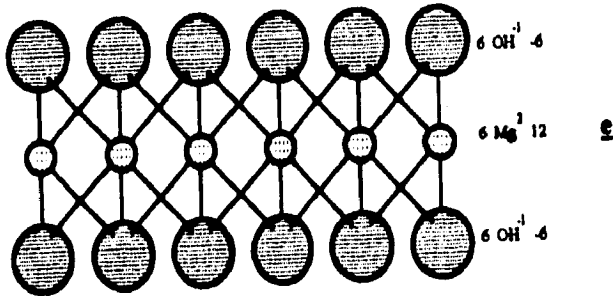
**b**



**c**



**d**



**e**

FIG. 2-23 ESQUEMA DE DIVERSAS UNIDADES TETRAEDRICAS Y OCTAEDRICAS



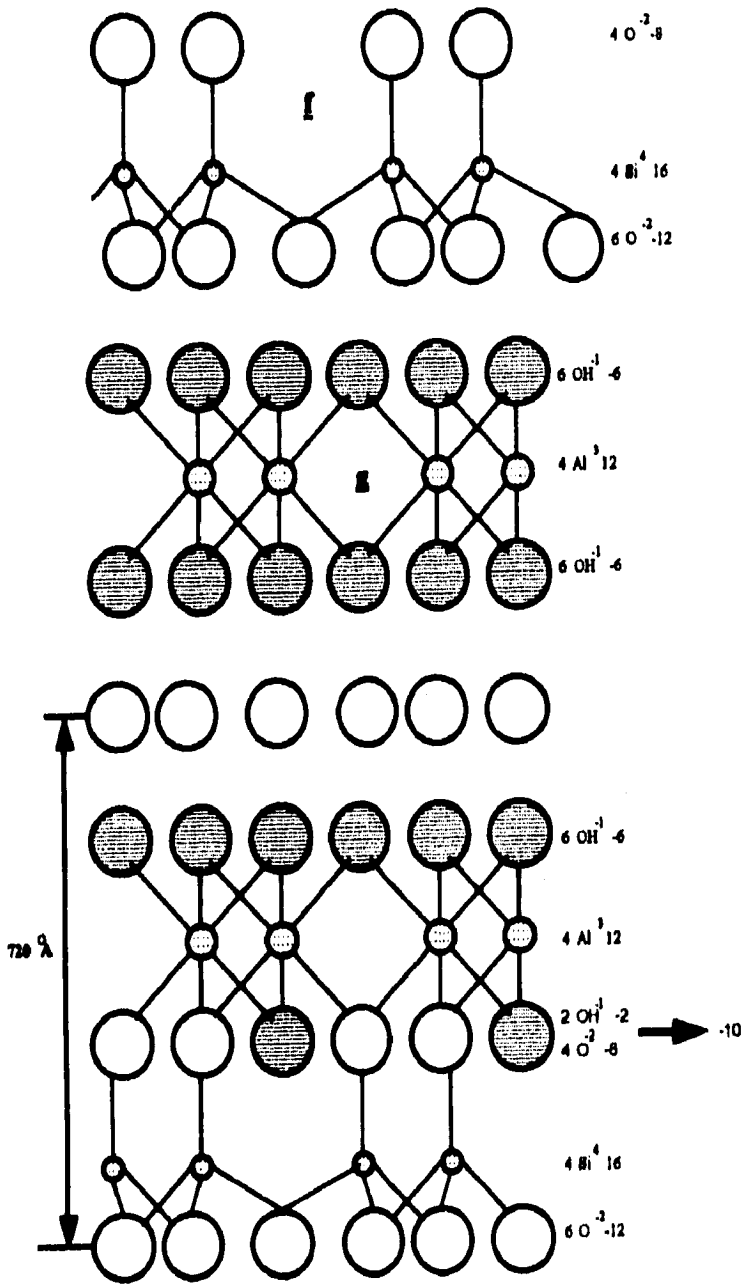


FIG. 3-23 INTERCAMBIO DE ATOMOS ENTRE LA REJICCA Y LA ORBITA

Sin embargo en las caolinitas, este último tipo de fuerzas son lo suficientemente fuertes, al grado que los cristales del caolín son lo bastante estables y no pueden penetrar las moléculas del agua entre las láminas individuales de la caolinita para separarlas, por lo que hace a la caolinita estable en presencia del agua. Las caolinitas están constituidas por una lámina silícica y otra aluminica, que se superponen indefinidamente (fig. 2 - 24 . a):



La caolinita es un mineral eléctricamente neutro, pero con la presencia del agua se disocian algunos hidróxilos ( $OH^{-1}$ ) y pierden los iones hidrógeno ( $H^{+1}$ ), dejando en consecuencia al cristal con una carga residual negativa, que se equilibra con la atracción de algunos cationes intercambiables presentes en el agua, por ejemplo sodio ( $Na^{+1}$ ) o calcio ( $Ca^{+2}$ ).

**MONTMORILONITA:** El espesor de las laminas de las montmorilonitas es del orden de 9.5 Å y se colocan una sobre otra como las hojas de los libros, están formadas por una lámina aluminica y dos silícicas superponiéndose indefinidamente (fig. 2 - 24 . b):



Teniéndose como liga entre las unidades a las atracciones mutuas de dos láminas hacia los cationes intercambiables anteriormente retenidos. La unión catiónica en la montmorilonita depende del tipo de catión que se tenga presente, pero en general es débil, por lo que el agua puede entrar fácilmente entre las láminas de la montmorilonita, ocasionando que se separen, no siendo difícil desasociar a las unidades estructurales de la montmorilonita. Por lo tanto, las arcillas montmorilonitas, con la presencia del agua, presentarán fuertes tendencias a la inestabilidad, con características muy importantes de expansión.

**ILITA:** La unidad estructural de la illita es muy semejante a la montmorilonita, con la excepción de siempre se presenta una sustitución isomorfa (sustitución de un átomo por otro) adicional de átomos de sílice ( $Si^{+4}$ ) por átomos de aluminio ( $Al^{+3}$ ) en la lámina silícica, resultando con ello una carga negativa. A pesar de ello, una parte sustancial de esa carga residual negativa se equilibra con cationes no intercambiables de potasio ( $K^{+1}$ ), lo que provee una liga fuerte entre las láminas de la illita para constituir las partículas. Efectivamente, la illita esta constituida por una lámina aluminica y dos silícicas interpuertas indefinidamente, similar a las montmorilonitas, pero la diferencia entre ambas, es de que, la illita además de esas láminas, tiene átomos de potasio en su estructura, por lo que dejan menos área libre, y con ello se reduce y es menor la expansividad, (fig. 2 - 24 . c):



Sin embargo en las caolinitas, este último tipo de fuerzas son lo suficientemente fuertes, al grado que los cristales del caolín son lo bastante estables y no pueden penetrar las moléculas del agua entre las láminas individuales de la caolinita para separarlas, por lo que hace a la caolinita estable en presencia del agua. Las caolinitas están constituidas por una lámina silícica y otra aluminica, que se superponen indefinidamente (fig. 2-24 . a):



La caolinita es un mineral eléctricamente neutro, pero con la presencia del agua se disocian algunos hidroxilos ( $OH^{-1}$ ) y pierden los iones hidrógeno ( $H^{+1}$ ), dejando en consecuencia al cristal con una carga residual negativa, que se equilibra con la atracción de algunos cationes intercambiables presentes en el agua, por ejemplo sodio ( $Na^{+1}$ ) o calcio ( $Ca^{+2}$ ).

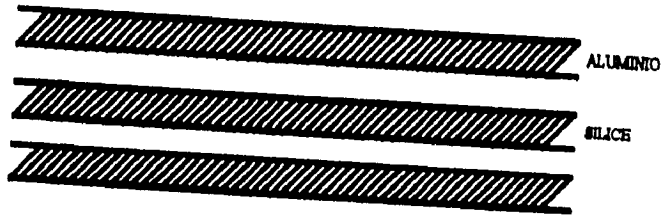
**MONTMORILONITA:** El espesor de las laminas de las montmorilonitas es del orden de 9.5 Å y se colocan una sobre otra como las hojas de los libros, están formadas por una lámina aluminica y dos silícicas superponiéndose indefinidamente (fig . 2 - 24 . b):



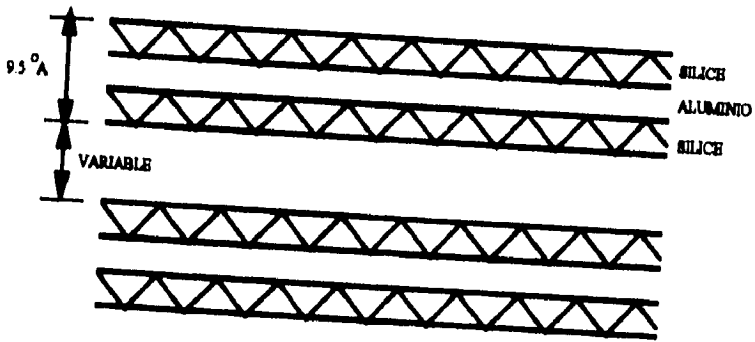
Teniéndose como liga entre las unidades a las atracciones mutuas de dos láminas hacia los cationes intercambiables anteriormente retenidos. La unión catiónica en la montmorilonita depende del tipo de catión que se tenga presente, pero en general es débil, por lo que el agua puede entrar fácilmente entre las láminas de la montmorilonita, ocasionando que se separen, no siendo difícil desasociar a las unidades estructurales de la montmorilonita. Por lo tanto, las arcillas montmorilonitas, con la presencia del agua, presentarán fuertes tendencias a la inestabilidad, con características muy importantes de expansión.

**ILITA:** La unidad estructural de la illita es muy semejante a la montmorilonita, con la excepción de siempre se presenta una sustitución isomorfa (sustitución de un átomo por otro) adicional de átomos de silice ( $Si^{+4}$ ) por átomos de aluminio ( $Al^{+3}$ ) en la lámina silícica, resultando con ello una carga negativa. A pesar de ello, una parte sustancial de esa carga residual negativa se equilibra con cationes no intercambiables de potasio ( $K^{+1}$ ), lo que provee una liga fuerte entre las láminas de la illita para constituir las partículas. Efectivamente, la illita esta constituida por una lámina aluminica y dos silícicas interpuestas indefinidamente, similar a las montmorilonitas, pero la diferencia entre ambas, es de que, la illita además de esas láminas, tiene átomos de potasio en su estructura, por lo que dejan menos área libre, y con ello se reduce y es menor la expansividad, (fig. 2 - 24 . c):

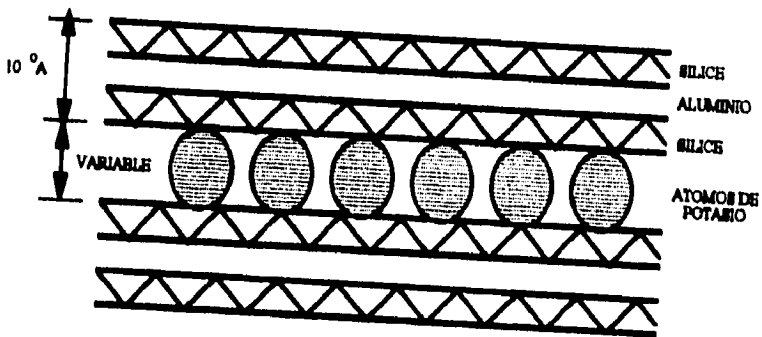




a) REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA CAOLINITA



b) REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA MONTMORILLONITA



c) REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA ILITA

FIG. 2-34 REPRESENTACION ESQUEMATICA DE DIVERSAS ARCILLAS

En general, las arcillas ya sean caolinitas, montmorilonitas o illitas, son plásticas ya que se contraen al secarse, presentan marcada cohesión según su humedad, son compresibles y al aplicárseles una carga en su superficie se comprimen lentamente, un ejemplo típico de ello, son los problemas de asentamiento que se presentan en las construcciones ubicadas en el primer cuadro del Valle de México. Se puede decir que un contenido mínimo del 15 % de arcilla en un suelo le dará a éstas las propiedades de un suelo arcilloso.

A continuación se mencionarán algunas propiedades física (ingenieriles) de diversos suelos:

	LIMO	CAOLINITA	ILITA	MONTMORILONITA	MATERIA ORGÁNICA	ARENA
<b>PERMEABILIDAD</b>						
SECO	-	-	--	--	++	++
HÚMEDO	+	-	--	--	++	++
<b>ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA</b>	++	+	-	--	+	++
<b>PLASTICIDAD</b>						
COHESIÓN	--	m	+	++	m	+
<b>RESISTENCIA</b>						
SECO	+	m	+	++	-	
HÚMEDO	--	-	m	--	--	
<b>COMPACTACIÓN CON LA HUMEDAD OPTIMA</b>	m	-	m	--	--	+
<b>ESTABILIDAD AL INTEMPERISMO</b>	+	+	m	+	--	++
<b>ABRASIVIDAD</b>	m	-	--	--	-	++

**SIMBOLOGÍA:**

- m Moderado
- + Alto
- ++ Muy alto
- Bajo
- Muy bajo

#### 11.4. SELECCIÓN DE MATERIALES PARA LA ESTABILIZACIÓN.

El extendido empleo de agentes químicos para mejorar las propiedades físicas de suelos de la combinación agregado-suelo, han enfatizado la necesidad de una clasificación y una metodología que simplifique la selección del más adecuado producto para ser empleado en las condiciones que presente el medio ambiente y las condiciones de servicio.

Un sistema de selección se basa en el desarrollado por el cuerpo de Ingenieros de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos de Norteamérica, denominado Sistema Guía para la Estabilización de Suelos (SSIS), el cual consiste en lo siguiente:

▬ *Tipo de Estabilización:* En el SSIS, como primer alternativa que presenta, es la estabilización química así como la mecánica, pueden ser consideradas y ambas alternativas evaluadas.

▬ *Factor de Uso:* El sistema clasifica la forma de construcción del suelo en *permanente* y en *temporal*. El término *temporal*, se refiere a pavimentos de vida corta, por ejemplo zonas de combate, ó bien de funcionamiento *permanente*, por ejemplo las pistas de despegue de sus aeropuertos, por lo que han considerado estos dos casos en su sistema guía.

▬ *Factor económico:* Una vez que se ha decidido, con base a factores de orden práctico o económico, el tipo de estabilización a realizar, habrá que decidir cual es la capa más conveniente a tratar de acuerdo con la disponibilidad de los materiales, su calidad y costo. Así en la fig. 2 - 25, es mostrada en forma esquemática el enfoque global sistemático de la guía.

▬ *Factores Ambientales:* Estos influyen principalmente en la durabilidad última y la conveniencia de estabilizar el suelo, tanto como la calidad de los materiales a emplear en la estabilización; una cantidad excesiva de lluvia puede alterar la efectividad de una estabilización pues podría lavar por ejemplo el estabilizador adicionado a un suelo. Por otro lado la temperatura ejerce también influencia en la velocidad de reacción química, razón por la cual deben tomarse en cuenta al elegir los métodos de estabilización en ciertas épocas del año.

Es necesario hacer notar que el SSIS no substituye el diseño estructural del pavimento, sino que nos auxilia para elegir el mejor estabilizador, llegando así a la elección más adecuada.

Una vez seleccionado el método de estabilización, deberán establecerse las premisas de comportamiento con las que el suelo deberá cumplir, dependiendo de las propiedades que se desee obtener del suelo estabilizado. Finalmente se deberán efectuar evaluaciones periódicas para verificar el funcionamiento de la estabilización y lo que es más aún, la aplicación del método de guía que se está exponiendo. El criterio para la estabilización química con cal, es de que la cal reacciona con suelos de mediana y moderada finura y grano fino; tiene efectos sobre los suelos, ya que cambia algunas de sus características físicas y mecánicas.

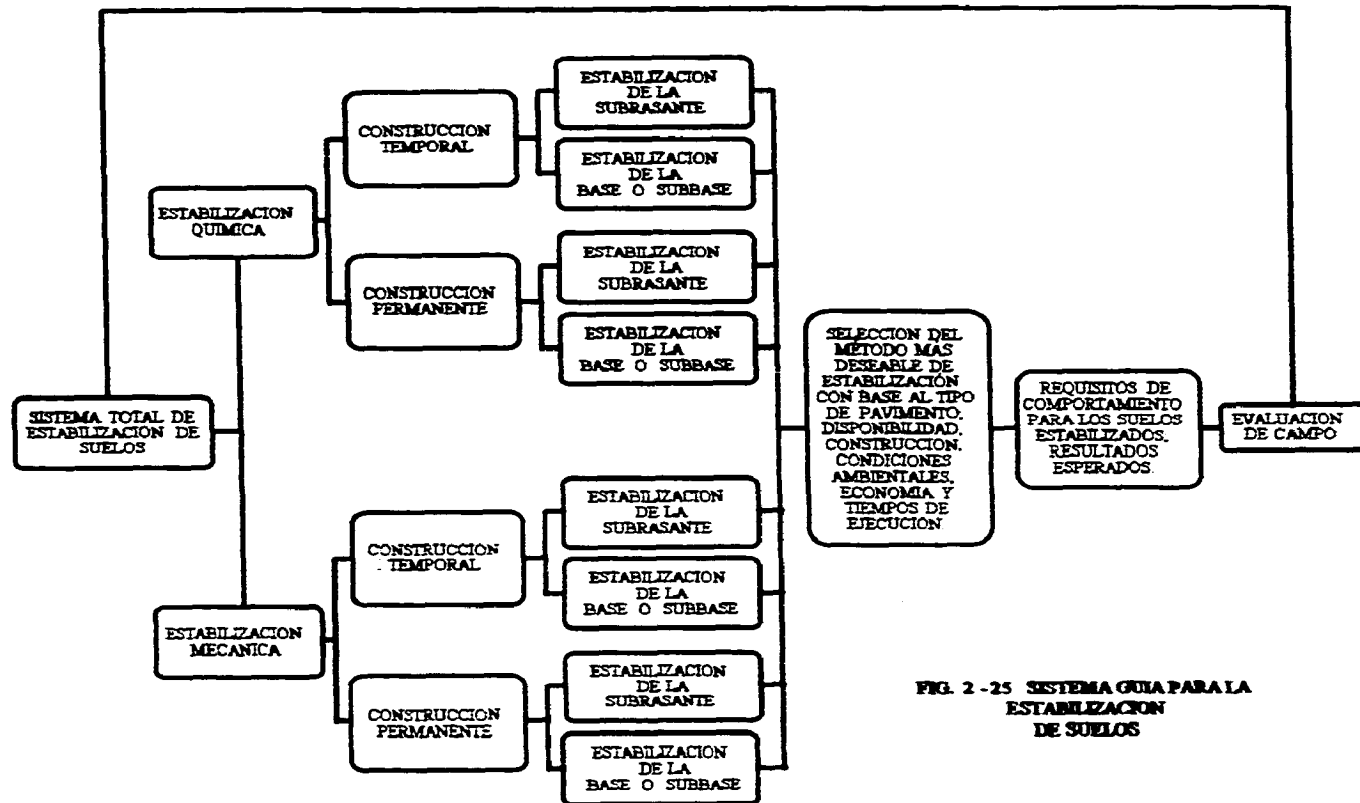


FIG. 2 - 25 SISTEMA GUIA PARA LA ESTABILIZACION DE SUELOS

En términos generales, los suelos que más reaccionan con la cal son las arcillas con gravas, limos arcillosos y las arcillas. Acorde con el SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos), todos los suelos pueden ser considerados como potencialmente capaces de ser estabilizados con cal.

**PRECAUCIONES PARA CONDICIONES AMBIENTALES Y CONSTRUCTIVAS**

<b>ESTABILIZADOR</b>	<b>MEDIO AMBIENTE O CONSTRUCCIÓN</b>	<b>PRECAUCIONES</b>
<b>CAL</b>	<b>MEDIO AMBIENTE</b>	SI LA TEMPERATURA DEL SUELO ES MENOR A 4 °C Y NO SE ESPERA UN INCREMENTO, LA REACCIÓN QUÍMICA NO SE PRODUCIRÁ RÁPIDAMENTE Y CONSECUENTEMENTE, LA RESISTENCIA OBTENIDA POR LA MEZCLA FORMADA POR SUELO-CAL SERÁ MÍNIMA.
	<b>CONSTRUCCIÓN</b>	LA MEZCLA DE SUELO-CAL DEBERÁ SER PROGRAMADA PARA SU CONSTRUCCION DE TAL MODO QUE SE OBTENGA LA SUFICIENTE DURABILIDAD PARA RESISTIR LOS CICLOS DE LA BAJA Y ALTA TEMPERATURA.

Entre los factores que puedan evitar la reactividad de los suelos con la cal se encuentran: la acidez de los suelos, la presencia de materia orgánica y sulfatos. La experiencia ha demostrado que cantidades significativas de sulfato disminuyen la eficiencia de la cal. Suelos pobremente drenados son los que se han presentado más reactivos, debido posiblemente al alto contenido de acidez y la disponibilidad de los componentes de la reacción química (suelos minerales intemperizados).

En la selección del tipo de cal (el mismo término de la cal es empleado generalmente tanto para designar la cal viva como la cal hidratada); en México tanto las cales de calcio como las de magnesio son elaboradas y están en el mercado; si bien hay diferencia entre las cales, en la resistencia de la mezcla suelo-cal, la selección del tipo de cal es usualmente marcada por su disponibilidad y por los requisitos de seguridad de un determinado trabajo. La cal hidratada para ser usada en los diversos trabajos de construcción (morteros, recubrimientos, piezas moldeadas, estabilización de suelos, pavimentos, edificación, entre otras muchas aplicaciones) deberá cumplir ciertas normas técnicas marcadas por la *Secretaría de Comunicaciones y Transportes*.



**CAL VIVA:** Es el producto de la calcinación de una roca caliza y está constituida, en su mayor parte, por óxido de calcio en asociación natural con una cantidad menor de óxido de magnesio. Deberá cumplir las siguientes normas respecto a su composición química:

	COMPONENTES	CAL BLANCA	CAL POBRE
A)	<i>Calculado con respecto a la porción no volátil</i>		
	Oxido de calcio, mínimo por ciento	75	20
	Oxido de magnesio, mínimo por ciento		95
	Oxido de calcio y magnesio, mínimo por ciento	95	95
B)	Sílice, alúmina y óxido de hierro, máximo por ciento	5	5
C)	<i>Calculado con respecto a la muestra, como se recibe</i>		
	Bióxido de carbono, máximo por ciento :		
	Si la muestra se toma en el lugar de la elaboración	3	3
	Si la muestra se toma en cualquier otro lugar	10	10

**CAL HIDRATADA:** Es el polvo seco obtenido de la combinación de cal viva con el agua, para formar el hidróxido de calcio ó hidróxido de magnesio.

Existen dos tipos de cal hidratada, y se designan como sigue :

Tipo N Cal hidratada normal  
 Tipo E Cal hidratada especial

El Tipo E difiere de la del Tipo N, por su valor de dar un alto valor de plasticidad en corto tiempo, así como por su mayor poder de retención de agua y por su limitación en contenido de óxido no hidratado.

Debiendo para ello cumplir con ciertas normas en cuanto a su composición química :

	COMPONENTES	TIPO N	TIPO E
A)	<i>Calculada con respecto a la porción no volátil :</i>		
	Oxido de calcio y magnesio, mínimo por ciento	95	95
B)	<i>Calculado con respecto a la muestra como se recibe :</i>		
	1) Bióxido de carbono, máximo por ciento :		
	Si la muestra se toma en el lugar de elaboración	5	5
	Si la muestra se toma en cualquier lugar	7	7
	2) Óxidos no hidratados, máximo por ciento		8

Para ambos tipos, la cal viva y la hidratada, deberán cumplir los siguientes requisitos de residuo:

a) El residuo retenido sobre una malla No. 30 (0.60 mm) no debe ser mayor del 5 %.

b) Si el residuo retenido sobre la malla No. 30 (0.60 mm) es mayor al 5 %, no deberá mostrar ampollas y agujeros, cuando se someta a la prueba de floreado y picado.

La pasta estandar hecha con la cal del Tipo E, deberá tener un valor de plasticidad no menor de 200 y deberá tener un valor de retención de agua no menor de 85 %.

La pasta estandar hecha con la cal del Tipo N, deberá tener después de una succión de 60 s tener un valor de retención de agua no menor de 75 %.

**CAL HIDRÁULICA HIDRATADA:** Es el producto cementante seco, resultado de la hidratación del material obtenido de la calcinación a una temperatura cercana a la fusión incipiente, de roca caliza que contenga sílice y alúmina, de tal manera que, además de formarse la cal viva deja suficientes silicatos de calcio no hidratados para proporcionar al polvo seco sus propiedades hidráulicas.

Las propiedades hidráulicas pueden aumentarse mediante la adición de clinker pulverizado o una puzolana pulverizada, ya sea natural o artificial.

La cal hidráulica hidratada puede usarse para morteros, recubrimientos y como aditivo plastificante en concretos de cemento Portland, es clasificada esta cal en dos tipos:

*Tipo A:* Cal hidráulica hidratada rica en calcio, que es la que contiene hasta 5 % en peso, de óxido de calcio con respecto a la porción no volátil.

*Tipo B:* Cal hidráulica hidratada magnésica, que es la que contiene más del 5 % en peso, de óxido de magnesio, con respecto a la porción no volátil.

La cal hidráulica hidratada *Tipo A* deberá satisfacer los siguientes requisitos, de su composición química:

	COMPONENTES	MÍNIMO	MÁXIMO
1)	Calculado con respecto a la porción no volátil:		
	Oxidos de calcio y de magnesio (CaO y MgO), porcentaje en peso.	60	70
	Sílice (SiO <sub>2</sub> ), porcentaje en peso	16	26
	Oxidos de hierro y aluminio (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), porcentaje en peso		12
2)	Calculada con respecto a la muestra como se recibe:		
	Bióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ), porcentaje en peso		5

*De finura:* La muestra no deberá dejar un residuo mayor de 5 % retenido en la malla No.30 (0.60 mm), ni más del 10 % en la malla No. 200 (0.074 mm).

**Tiempo de fraguado:** Para las pastas de cal de consistencia normal, el inicial deberá de ser mayor de 2 h y el final deberá de quedar de un lapso de 48 h.

**De sanidad:** Las barras de pasta de cal no deberán tener una expansión mayor de 1 %.

**De resistencia a la compresión:** No deberá de ser menor de 12 kg/cm<sup>2</sup> a la edad de 7 días, ni menos de 24 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días.

La cal hidráulica hidratada del *Tipo B*, deberá cumplir los requisitos mencionados para la del *Tipo A*, y los que en cada caso marque el proyecto y/o sea determinado por la S.C.T.

Entre las *ventajas* y *desventajas* de usar la cal viva o la cal hidratada en una estabilización, se podrán mencionar algunas de estas características:

Las principales *ventajas* de utilizar cal viva en vez de cal hidratada son dobles, bajo costo, debido a que se requiere aproximadamente un 0.25 % menos cal y se produce mucho menos pulverización, dado que la partículas de la cal viva son mucho más grandes que las de la cal hidratada y también son más pesadas. Así mismo es mucho más rápida la distribución de la cal viva ya que fluye más fácil.

La principal *desventaja* asimismo, es que es necesario incrementar más la seguridad de los trabajadores, por el calor generado en el proceso de hidratación de la cal viva. El calor generado durante el proceso de apagado es suficiente para producir quemaduras en la piel y en los ojos, así pues el trabajador, deberá estar totalmente protegido, particularmente en climas cálidos y húmedos.

En cambio, la cal hidratada, es menos peligrosa y no es necesario que el trabajador use equipos de protección ya que no pasa nada al tener contacto directo con la piel. Es por ello que para usar cal en la estabilización de suelos, y en general en la industria de la construcción se use regularmente la cal hidratada; en su debido momento la empresa responsable de utilizar el método de la estabilización de suelos con cal, elegirá la mejor alternativa en cuanto al tipo de cal se refiere para poderla utilizar en determinado proyecto.

## CAPITULO III

### LA ESTABILIZACIÓN CON CAL Y SUS EFECTOS POSITIVOS SOBRE LOS SUELOS ARCILLOSOS

#### III.1. CONCEPTO DE ESTABILIZACIÓN.

En una primera definición se puede mencionar a la estabilización como un proceso de mejoramiento de un suelo "malo" (aquel que desde el punto de vista de la ingeniería no es apto para usarse) por medio de agentes químicos y/o procedimientos mecánicos, que garantice el mejor comportamiento del suelo sobre el cual se construirá una estructura (un edificio, una base para carretera, una pista de aterrizaje para aeronaves, cimentación de un edificio etc.) sin que la estructura sufra deformaciones apreciables, flujos de agua excesivos o asentamientos mayores a los permisibles para garantizar la seguridad de los usuarios.

En una segunda definición, se puede mencionar a la estabilización como el proceso de someter a los suelos naturales a ciertos tratamientos para aprovechar mejor sus cualidades, de manera que puedan soportar las condiciones adversas del clima, proporcionando en todo momento un servicio adecuado que de ellos se espera.

Un problema que cotidianamente encara el Ingeniero Civil, es el de trabajar con suelos inadecuados, tratando de mejorar sus propiedades naturales, con procedimientos de construcción y técnicas apropiadas, que constituyen el proceso de estabilización.

En muchas ocasiones, suelos que son inadecuados en estado natural, pueden ser alterados con la adición de mezclas y agregados químicos o por medio de una adecuada compactación, y transformar así las propiedades de los suelos y dejarlos en óptimas condiciones para la construcción.

Como en todo problema de diseño, en ingeniería el aspecto económico (en cuanto a los beneficios derivados del proceso de estabilización) determinará el tipo de estabilización y que tanto de él se garantizará.

Es oportuno en este punto, el de revisar los principios básicos de diseño, de modo que la estabilización en sus diversas formas rinda frutos tanto técnica como económicamente.

Los suelos susceptibles a estabilizarse, son aquellos que tienen relativamente baja resistencia a los esfuerzos a los que serán sometidos, también se estabilizan los suelos expansivos y los de alto índice de contracción. Como ejemplo de aquellos suelos que deben de ser estabilizados, se tienen a los que son orgánicos, pantanosos, arcillosos y limosos (muy suaves), arcillas sensibles (expansivas), suelos muy húmedos o con alto contenido de agua, arenas sueltas o no confinadas.

Existe una gran variedad de procedimientos para estabilizar los suelos, aplicables a diversos casos, pero en general se pueden clasificar en dos grandes grupos:

*a) Procedimientos mecánicos:*

- Con rodillos.
- Impactos de carga.
- Presión estática.
- Vibración.

*b) Procedimientos químicos:*

- Cal.
- Cemento Portland.
- Cenizas volátiles.
- Asfalto.

Los procedimientos de estabilización, utilizando estos productos químicos, serían de interés generalizado en la construcción, si realmente se aplicaran en una gran diversidad de obras de ingeniería.

El suelo natural es un material complejo y variable, no obstante por su gran disponibilidad, ofrece grandes alternativas para ser utilizado adecuadamente como material en la ingeniería. Sin embargo, el suelo no es siempre trabajable total o parcialmente para las exigencias del ingeniero, por lo cual requiere de un proceso de mejoramiento, llamado estabilización, lo que implica que una decisión tan importante deberá ser tomada de acuerdo a lo siguiente:

1.- Aceptar el material tal como es, diseñando los parámetros suficientes para completar y mejorar las restricciones impuestas por su calidad natural.

2.- Remover el material del sitio, reemplazarlo con un material superior en calidad, resistencia y economía.

3.- Alterar las propiedades físico-químico-mecánicas del suelo existente para crear un nuevo material capaz de satisfacer los requerimientos que se necesitan.

Dado que el suelo es heterogéneo, aún en intervalos de pocos metros de profundidad, la alternativa de un agente estabilizador es frecuentemente gobernada por su "espectro de respuesta", es decir, el número y tipo de suelos en el cual el agente ha sido encontrado efectivo. Debe ser reconocido que la estabilización no es necesariamente un medicamento eficaz para curar todos los males de un suelo; el uso correcto de una estabilización, requiere del conocimiento de las propiedades que se deberán modificar, específicamente, es un elemento importante en la decisión para que un suelo deba ser estabilizado o no.

### III.1.1. ESTABILIZACIÓN CON CAL.

La estabilización con cal se empezó a impulsar en 1954, incrementando su empleo rápidamente en forma gradual; se ha popularizado en casi todo el mundo, por sus grandes ventajas. La cal se ha usado en la estabilización para la construcción de diversas obras de ingeniería; se emplea también la cal, para estabilizar una gran variedad de materiales, incluyendo suelos de mala calidad, para transformarlos en una subbase o mesa de trabajo; para formar una base muy resistente; en subrasantes plásticas y para estabilizar materiales marginales granulados, por ejemplo: gravas arcillosas, gravas limosas, gravas contaminadas, agregados triturados, entre otros más.

*La acción de la cal en un suelo puede ser explicada por tres reacciones básicas: La primera de ellas, es la alteración de la película de agua absorbida que rodea las partículas minerales de la arcilla, lo cual hace que cambie la plasticidad del suelo. Un segundo proceso por el cual la cal transforma al suelo, es el de la coagulación o floculación de sus partículas, que también produce cambios en la plasticidad del suelo. El tercer proceso por el cual el suelo se ve afectado por la cal, es la reacción de esta con los componentes del suelo para la formación de nuevos compuestos, produciéndose cambios en la resistencia y densidad del mismo. El grado al cual la cal reacciona con el suelo, depende de variables tales como la cantidad del estabilizador (cal), el tipo de suelo, curado y el tiempo que dure este proceso en la mezcla.*

Dado lo anterior, se puede dar una definición de la *estabilización utilizada en la construcción de pavimentos* (la definición anterior, fue para los suelos en general), y se puede decir que es un medio de consolidación de materiales de las terracerías, incrementando en forma clara su resistencia y capacidad de soporte, reduciendo su sensibilidad al agua y a los cambios de volumen producido por las variaciones de humedad en el suelo. Para lograr esta estabilidad se debe incorporar un aditivo al suelo de la terracerías, este sería la cal.

La mezcla suelo-cal muestra propiedades ingenieriles substancialmente diferentes a las del suelo natural antes de su estabilización. Normalmente estos marcados cambios son evidentes en tan importantes características como en la plasticidad, trabajabilidad, compactación, expansibilidad y resistencia.

• *Plasticidad y trabajabilidad:* La cal origina una marcada reducción en el índice plástico, un decremento en la contracción lineal y una mejor trabajabilidad. Si bien la trabajabilidad no puede ser cuantificada, se ha demostrado que la textura del suelo y el desmenuzamiento de la mezcla de suelo-cal, es bastante trabajable y fácilmente manejable.

Consecuentemente el uso de cal en suelos de plasticidad variable y trabajabilidad, no dependen mayormente de las propiedades químicas y mineralógicas del suelo. Sin embargo, algunos factores tales como el tipo de mineral arcilloso y contenido de arcillas pueden influir en la cantidad de cal requerida para llevar a un grado satisfactorio la estabilización.

• *Compactación:* Las características de compactación del suelo son cambiadas por la cal, en más de las ocasiones el peso volumétrico seco disminuye y la humedad óptima aumenta.

• *Expansibilidad:* Las propiedades de expansibilidad de suelos de grano fino que contienen apreciables cantidades de arcilla son alterados por el tratamiento con la cal. Las características expansivas son substancialmente reducidas en la reacción química producida, lo cual disminuye la afinidad de la arcilla para absorber agua e hincharse, y provocar problemas en las estructuras.

• *Resistencia:* Los incrementos obtenidos en la resistencia, en la estabilización suelo-cal son bastante variables. Algunos suelos no reaccionan ni llevan incremento alguno en la resistencia, algunos otros en cambio, muestran incrementos del cien por ciento, esto se observo básicamente en el V.R.S., valor esencial para el diseño estructural del pavimento.

### III.2. ACCIÓN DE LA CAL SOBRE LAS ARCILLAS.

Tanto el mecanismo de intercambio iónico, como el acunulamiento y condensación de cationes adicionales  $Ca^{++}$  y  $Mg^{++}$ , alrededor de las partículas de arcilla, tienen la propiedad de cambiar la densidad de cargas electrostáticas alrededor de las partículas de arcilla. De esta forma, las partículas de arcilla pueden atraerse unas con otras, provocando una agregación o floculación de partículas. Cuando estas partículas actúan como agregados de otras partículas, el suelo pierde sus características originales de elevada cohesión y plasticidad para adquirir características de un suelo desmenuzable o frágil, que mejora en forma inmediata su trabajabilidad. En el proceso de intercambio iónico, se opera la sustitución de los iones  $K^+$ ,  $H^+$  y  $Na^{++}$  por los cationes de  $Ca^{++}$  y  $Mg^{++}$ .

Las *Montmorilonitas* se presentan como fuertemente reactivas con la cal, sufriendo profundas modificaciones al quedar en contacto con ella, al sustituir un ion trivalente  $Al^{+++}$ , por un ion divalente  $Mg^{++}$ , sustitución isomorfa (sustitución de un átomo por otro), se provoca una compensación mediante la entrada de iones positivos entre las láminas, produciéndose, entre éstas ligas relativamente débiles.

La circulación de la solución de hidróxido de calcio,  $Ca(OH)_2$  (cal hidratada), entre las láminas de la arcilla, se lleva a cabo en una forma rápida, de tal manera que la superficie en contacto con la solución agresiva, sufre cambios prácticamente inmediatos, del tipo de intercambio catiónico, y una lenta acción puzolánica.

*Las montmorilonitas son minerales altamente reactivos con cal.*

El ataque de las montmorilonitas por la cal originan la formación de aluminatos. Estas nuevas especies minerales, abundantes y bien cristalizadas, formadas a expensas de la capa octahédrica, modifican tremendamente a las características geotécnicas del suelo, pero constituyen además un cemento, que no es de calidad inferior al formado en las caolinitas.

Se podría decir que las *Caolinitas* se revelan como un mineral poco sensible a la cal comparadas con las montmorilonitas, necesitando de tiempos de contacto largos para sufrir modificaciones.

La unión entre las láminas de la caolinita es del tipo hidrógeno. El ion  $H^+$  sufre la atracción de los oxígenos de dos láminas. Este tipo de unión es notablemente más fuerte que el caso de la montmorilonita, la solución de ataque no puede circular libremente entre las láminas; el mineral arcilloso es entonces atacado progresivamente por los bordes y caras expuestas.

Hay que tomar en cuenta que si la arcilla contiene carbonatos en exceso, se puede tener que éstos presenten un comportamiento diluyente y protector, es decir, que el hidróxido de calcio no puede reaccionar inmediatamente con los minerales arcillosos debido a la presencia de dichos carbonatos; sin embargo, se tiene que este tipo de suelo tiene también un alto contenido de carbonato, el cual reacciona con el hidróxido de calcio para formar más carbonatos es decir:



La *ilita* mostró una cierta pasividad en contacto con la cal; la *ilita* es el mineral arcilloso que reacciona más difícilmente con la cal, en este caso, además de la estructura muy cerrada de la *ilita* es posible que la presencia del azufre, movilice una parte de la cal para formar sulfatos, lo que contribuye aún más a disminuir las posibilidades de reacción del mineral arcilloso con cal.

Las velocidades de ataque hacia la montmorilonita, provienen del hecho de que la liga entre sus láminas son débiles, lo que permite a la solución de cal que circule fácilmente entre sus láminas, en comparación con el otro tipo de arcillas.



Debido a la pobre unión de las láminas, en la montmorilonita, se aumenta con ello, la superficie de ataque y permitiendo la formación de los aluminatos; mientras que en la *caolinita*, la distancia entre las láminas de los minerales es más pequeña y con ligas más fuertes, por lo que la solución de ataque no puede circular entre las láminas, siendo las superficies de ataques, solamente las correspondientes a las superficies de las partículas exteriores; en lo que respecta a las *illitas*, sus láminas (2 láminas de sílice y 1 lámina de aluminio, con átomos de potasio) son muy compactas y por lo tanto hace que la cal presente una reactividad muy débil.

*La acción de la cal sobre las arcillas podrá resumirse en las siguientes dos fases:*

• En una *primera etapa* se tiene una reacción iónica. La adición de cal a una arcilla corresponde a un aporte masivo de iones (OH)<sup>-</sup> y Ca<sup>++</sup>. Los cationes de calcio se unen a las superficies de las láminas arcillosas por los efectos de intercambio catiónico, desarrollando fuerzas eléctricas suficientes para contribuir a la formación de puentes que unen a las partículas arcillosas. Esta acción, análoga a una estructura poco compacta, ayuda en edades tempranas a modificar al material reduciendo (en ocasiones aumenta por las propiedades mismas del material), el límite líquido y aumentando en gran escala el límite plástico; lo que resulta prácticamente en una reducción en el índice plástico y además el suelo se vuelve menos sensible al agua.

• Una *segunda etapa*, durante la cual, las arcillas reaccionan en forma más o menos vigorosa de acuerdo con la naturaleza del material arcilloso. Esta reacción provoca una degradación más o menos acelerada del mineral arcilloso y la aparición de especies minerales nuevos, responsables del aumento en la resistencia a la compresión simple.

Todas las diferencias anteriores están relacionadas con las estructuras que guardan los tres minerales arcillosos tratados.

La cal al modificar la composición mineralógica de la arcilla, modifica sus respuestas al agua reduciéndose la plasticidad y teniéndose menos cambios volumétricos.

Debe tenerse presente que es indispensable la presencia del agua para tener éxito en el tratamiento, por la presencia de carbonatos y materia orgánica en el suelo, impide la acción de la cal. Así mismo, hay que considerar la necesidad de utilizar cales de buena calidad, es decir, que contengan un alto porcentaje de cal libre y que además la cal se presente como un polvo fino y no carbonatado, para evitar respuestas mediocres en la estabilización.

Todas las acciones de la cal sobre un suelo arcilloso de cualquier clase, no tendrían un verdadero valor, si todo lo anterior no va fundamentado con pruebas de laboratorio realizadas en el lugar donde se va construir la estructura. Se necesitan hacer diversos y completos estudios, para conocer la naturaleza del suelo a estabilizar, ya que conociendo sus características físico-químicas, y fundamentadas con pruebas de laboratorio, se sabrá que cantidad de cal sería la óptima para realizar una adecuada estabilización.

### III.3. CAMBIOS FÍSICOS Y MECÁNICOS EN SUELOS ARCILLOSOS.

Como se vio anteriormente, la cal reacciona químicamente con las arcillas en diversos grados, dependiendo del tipo de arcilla (principalmente con la montmorilonita), para cambiarle sus propiedades y así realizar una adecuada estabilización.

Entre los cambios efectuados por la cal hacia los suelos arcillosos se mencionaran algunos:

a) El *peso volumétrico máximo*, disminuye considerablemente, ya que en estado natural tiene diversos agentes químicos y al agregarle un mínimo porcentaje de cal, su valor lo disminuye.

b) El *índice de plasticidad* se abate rápidamente (en algunos casos, hasta más de la 4a. parte); esto es debido a que generalmente las variaciones en el límite líquido y en el límite plástico.

El *límite plástico* aumenta considerablemente; llega el momento, en la mayoría de las pruebas de laboratorio, que sus valores ya no tienen significativos cambios, debido ello a que la cal y la muestra ya reaccionaron en forma adecuada, llegando a este punto los valores se mantendrán casi constantes. Incluso los valores tienden a aumentar o disminuir, según sea el caso, por que la reacción de suelo-arcilla no puede ir más allá de la naturaleza propia de ambos compuestos.

c) El suelo se aglomera, disminuyendo substancialmente el contenido de finos, principalmente de partículas menores de la malla No. 40.

d) La cal y el agua aceleran la disgregación de grumos de arcilla durante la mezcla, el suelo se vuelve desmoronable o disgregable y puede ser trabajado fácilmente.

e) La cal ayuda a secar los suelos húmedos en forma rápida, por lo que acelera la operación de compactación.

f) Las características de *contracción y expansión* de los suelos se reducen marcadamente; el potencial expansivo se reduce.

g) Después del curado, la *resistencia a la compresión simple*, aumenta considerablemente.

h) Los valores de *soporte de carga* medidos por varias pruebas como el *valor relativo de soporte*, se ven incrementados notablemente, es la característica más marcada.

i) La capa estabilizada con cal forma una barrera resistente al agua, impidiendo una penetración de humedad por gravedad y por capilaridad a través del sub suelo. De esta manera la capa se convierte en una buena terracería o subrasante eliminando fácilmente el agua de lluvia que se le introduce, por lo cual permanece estable, minimizando de esta forma los retrasos de la construcción. En vista de la variedad de cambios significativos y mejoras que se producen en los suelos arcillosos por medio de la cal, se tocarán algunos efectos de la cal sobre las muestras arcillas con más detalle; diversas pruebas de laboratorio demostraron que la cal, verdaderamente cambio las propiedades originales de una arcilla.

### III.3.1. PESO VOLUMÉTRICO SECO MÁXIMO.

El concepto de *peso volumétrico*, bien puede considerarse como un neologismo técnico aplicado a materiales heterogéneos o discontinuos (concreto, arena, grava, etc.) que se utilizan para estimar *el peso medio por unidad de volumen de los materiales que integran un conjunto estructural*, refiriéndose al volumen, por la naturaleza de los materiales y cargas que gravitan en una construcción, el volumen aparente de los mismos materiales.

Para el Ingeniero Civil o el constructor, también es importante poder hacer comparaciones entre los pesos de los materiales heterogéneos o discontinuos, pues problemas relativos, se le presentan continuamente en cualquier tipo de construcción.

En los suelos se distinguen tres fases constituyentes las cuales se mencionarán a continuación: la sólida (partículas minerales), la líquida (generalmente agua) y la gaseosa (generalmente aire).

Entre estas fases es preciso definir un conjunto de relaciones que se refieren a sus pesos y volúmenes, las cuales sirven para establecer la necesaria nomenclatura y para contar con conceptos mensurables, a través de cuya variación puedan seguirse los procesos ingenieriles que afectan a los suelos.

En la fig. 3 - 1 se muestra un esquema de suelo parcialmente saturado, separado en sus tres fases y en ella acotados los pesos y volúmenes cuyo uso es de interés en la ingeniería, así mismo el significado de los símbolos utilizados. Las relaciones entre los pesos y los volúmenes se establece a través del concepto de peso volumétrico.

En la tecnología de las vías terrestres son usadas algunas de las siguientes relaciones:

Peso volumétrico de la masa:

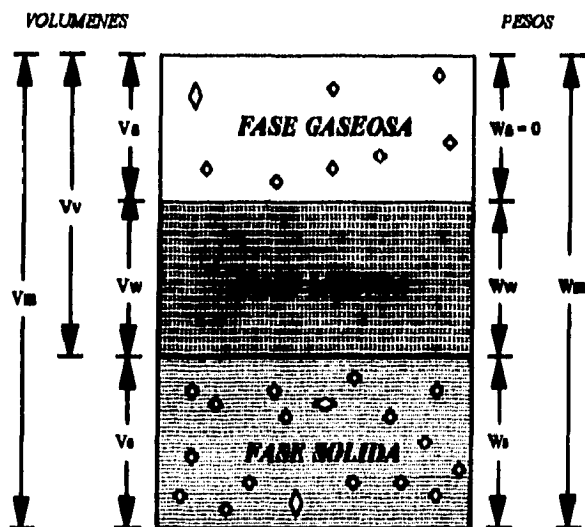
$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m} \quad , \quad \gamma_h = \frac{W_s + W_w}{V_m}$$

Peso volumétrico de los sólidos:

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

También se usa, sobre todo en cuestiones de compactación, el peso volumétrico seco, definido como la relación entre el peso de los sólidos y el volumen total del suelo:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_m}$$



- $V_m$  = Volumen total de la masa.
- $V_v$  = Volumen de los vacíos.
- $V_a$  = Volumen del aire.
- $V_w$  = Volumen del agua.
- $V_s$  = Volumen de los sólidos.
- $W_m$  = Peso total de la masa.
- $W_a$  = Peso del aire, considerado nulo.
- $W_w$  = Peso del agua.
- $W_s$  = Peso de los sólidos.

**FIG. 3-1 ESQUEMA DE UNA MUESTRA DE SUELO PARCIALMENTE SATURADA**

El *peso volumétrico del suelo en estado natural*, es el que corresponde a la condición que tienen los materiales en los bancos en su estado original, y en general, es el que se refiere al terreno natural sin haber sido removido.

El *peso volumétrico del suelo en estado suelto*, cuando su estructura natural ha sido alterada por algún proceso artificial como el de extracción, disgregación, cribado, trituración, etc., y que se ha depositado o almacenado sin someterlo a ningún tratamiento especial de compactación.

El *peso volumétrico del suelo en estado compacto*, cuando sus partículas sólidas que lo constituyen han adquirido un cierto acomodo por algún procedimiento de compactación.

La determinación del peso volumétrico del suelo en estado suelto en el laboratorio, deberá tratar de reproducir las condiciones de trabajo. Para ello es importante contar con una muestra preparada, la cual comprende las operaciones de secado, disgregación y cuarteo, que son necesarias para obtener las porciones representativas en condiciones adecuadas para efectuar los ensayos correspondientes. Las muestras inalteradas requieren las operaciones de labrado, la cual se llevará a cabo de acuerdo con las pruebas a que vaya a someterse el material, debiendo extremarse las precauciones con objeto de no cambiar su estructuras y contenido de agua.

El contenido de agua es el peso que pierde la muestra al someterla a un proceso de secado en horno a una temperatura de  $(105 \pm 5 \text{ } ^\circ\text{C})$  y el peso de las partículas sólidas es el que tiene la muestra después de someterla a dicho proceso. Su determinación proporciona una información complementaria y en ciertos casos constituye una etapa fundamental de otras pruebas que se efectúan a los suelos. La relación entre el peso del agua contenida en el suelo y el peso de su fase sólida:

$$w(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

El contenido de agua varía de teóricamente de 0 a infinito, pero en la práctica es difícil encontrar valores superiores a 1 000 %, a pesar de ello se han encontrado estos valores en arcillas procedentes del sureste de México; la conocida arcilla del valle de México suele tener agua, valores comprendidos entre 400 % y 600 % .

La prueba *Prueba de compactación por carga estática*, (fig. 3 - 2) que sirve para determinar el *Peso Volumétrico Seco Máximo* y la *Humedad Óptima* en suelos que se emplean en la construcción de terracerías, se explicará a continuación. El método consiste en preparar especímenes con material que pasa la malla No. 25 (malla de 1") agregándoles diferentes cantidades de agua y compactándolos con carga estática.

a) *El equipo necesario para la realización de esta prueba es el siguiente:*

Molde cilíndrico de compactación de 15.75 cm de diámetro interior y de 12.75 cm de altura, provisto de collarín y una base con dispositivo para sujetar el cilindro.

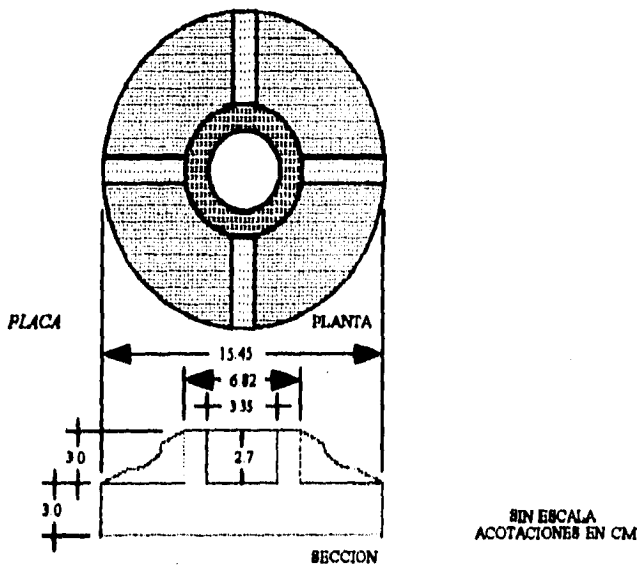
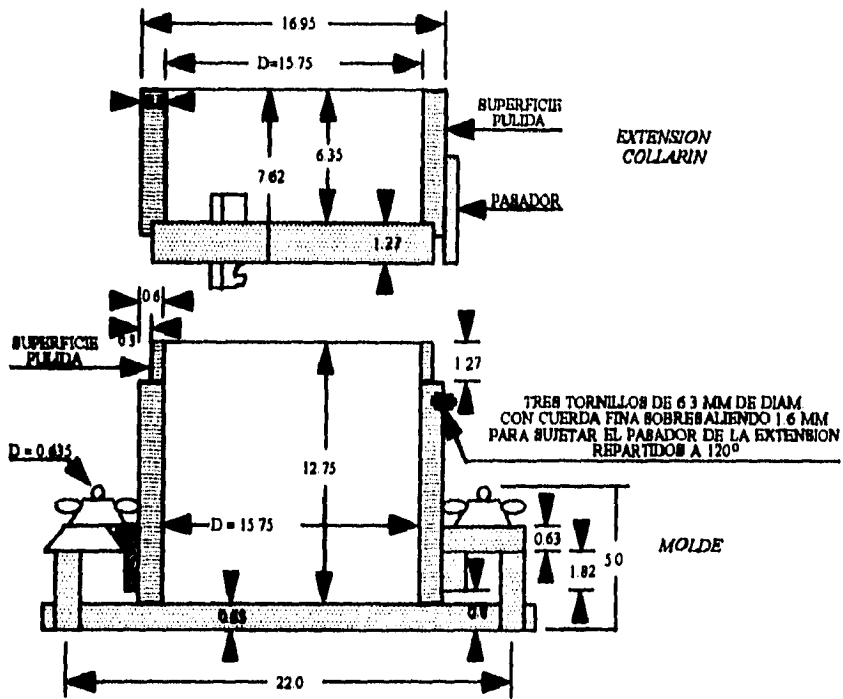


FIG. 3-2 MOLDE CILINDRICO Y PLACA PARA LA PRUEBA DE COMPACTACION ESTATICA

Máquina de compresión con capacidad mínima de 30 t y aproximación de 100 kg.

Varilla metálica de 1.9 cm de diámetro y 30 cm de longitud, con punta de bala.

Placa circular para compactar, con diámetro de 15.45 cm, con dispositivo para sujetarla en la cabeza de aplicación de la carga.

Malla de 25 mm.

Malla No. 4 (malla de 4.75 mm).

Balanza con capacidad mínima de 20 kg y aproximación de 5 g.

Calibrador con vernier tipo máuser.

*b) La preparación de la muestra se efectúa como se indica:*

De una muestra obtenida y preparada, teniendo cuidado de secar el material únicamente lo necesario para facilitar su desagregación, se toma y criba una cantidad suficiente para obtener una porción de 16 kg de material que pase la malla de 25 mm. Se divide mediante cuarteo la porción que pase la malla de 25 mm en cuatro partes con pesos aproximadamente iguales.

*c) La prueba se efectúa de la siguiente forma:*

Se toma una de las cuatro partes del material y se incorpora la cantidad de agua necesaria, para que una vez repartida uniformemente, presente una consistencia tal que, al ser comprimido en la palma de la mano la humedad sea muy ligeramente. Para favorecer lo anterior en algunos casos será necesario dejar el material húmedo un cierto tiempo en reposo, cubierto con una lona húmeda.

Se coloca el material humedecido, dentro del molde con su collarín instalado en tres capas del mismo espesor aproximadamente y se le da a cada una de ellas 25 golpes con la varilla metálica, distribuyéndolos uniformemente.

Al terminar la colocación de la última capa, se toma el molde que contiene el material, se coloca en la máquina de compresión y se compacta aplicando lentamente carga uniforme, hasta alcanzar en un lapso de 5 min la presión de  $140.6 \text{ kg/cm}^2$  equivalente a una carga de 26.5 t aproximadamente, se mantiene esta carga durante 1 min y se hace la descarga en el siguiente minuto. Al llegar a la carga máxima se observa la base del molde y si está ligeramente humedecida, el material tiene la humedad óptima de compactación y ha alcanzado su Peso Volumétrico Máximo.

Si al llegar a la carga máxima, no se humedece la base del molde, la humedad con que se preparó la muestra es inferior a la óptima y por lo tanto, se toma otra porción representativa del material y se le adiciona una cantidad de agua igual a la del espécimen anterior más  $80 \text{ cm}^3$ .

Mezclándose uniformemente, se preparan los especímenes que sean necesarios, hasta lograr que uno de ellos se observe el inicio del humedecimiento de la base del molde con la carga máxima, lo cual generalmente se consigue con menos de 4 especímenes.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Si antes de llegar a la carga máxima se humedece la base del molde por haberse iniciado la expulsión de agua la humedad con que se preparó la muestra es superior a la óptima, con la diferencia de que en lugar de adicionar 80 cm<sup>3</sup> de agua, se disminuyen estos 80 cm<sup>3</sup> en cada nueva porción representativa del material, hasta lograr que en una de ellas, con la carga máxima, se observe el inicio del humedecimiento de la base del molde. Terminada la compactación del espécimen preparado con la humedad óptima, se retira el molde de la máquina de compresión y se determina la altura del espécimen,  $h_e$ , restando de la altura del molde, la altura entre la capa superior del espécimen y el borde superior del molde; se registra este valor en cm con aproximación de 0.1 mm.

Se pesa el molde de compactación que contiene el espécimen compactado y se anota dicho peso,  $W_1$ , en kg con aproximación de 5 g.

Se saca el espécimen del cilindro, se corta longitudinalmente y de la parte central se obtiene una muestra representativa, se le determina su contenido de humedad,  $W_o$ , la cual se anota en una hoja de registro.

*d) Los cálculos y reportes en esta prueba son los siguientes:*

El volumen del espécimen compactado con la humedad óptima se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$V = \frac{A_m \times h_e}{1000}$$

En donde:

$V$  es el volumen del espécimen, en dm<sup>3</sup>.

$A_m$  es el área de la sección transversal del cilindro de compactación, en cm<sup>2</sup>.

$h_e$  es la altura del espécimen, en cm.

El peso volumétrico húmedo se calcula por medio de la fórmula siguiente:

$$\gamma_h = \frac{W_i - W_t}{V} \times 1000$$

En donde:

$\gamma_h$  es el peso volumétrico del espécimen húmedo, en kg/m<sup>3</sup>.

$W_i$  es el peso del espécimen húmedo más el peso del molde de compactación, en kg.

$W_t$  es el peso del molde de compactación, en kg.

$V$  es el volumen del espécimen, en dm<sup>3</sup>.

El peso volumétrico seco máximo,  $\gamma_{max}$ , se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$\gamma_{max} = \frac{\gamma_h}{100 + W_o} \times 100$$



En donde:

$\gamma_{max}$  es el peso volumétrico máximo del espécimen en estado seco, en  $\text{kg/m}^3$ .

$\gamma_m$  es el peso volumétrico del espécimen húmedo, en  $\text{kg/m}^3$ .

$W_o$  es la humedad óptima del espécimen, en por ciento.

Se reporta el peso volumétrico seco máximo,  $\gamma_{max}$ , en  $\text{kg/m}^3$ , y la humedad óptima,  $W_o$ , en por ciento, como valores correspondientes al material ensayado.

*e) Los errores más comunes al realizar esta prueba son:*

▬ La carga de compactación no se aplique en la forma especificada.

▬ Para estimación de la humedad óptima se considere como humedecimiento de la base del molde, un exceso de agua libre expulsada al aplicar la carga de compactación.

▬ Que el equipo y materiales utilizados para este fin, no cumplan con las especificaciones marcadas.

Pasando a los resultados arrojados para las diversas pruebas de laboratorio, en la fig. 3 - 3 se pueden observar las *variaciones del peso volumétrico máximo* para la base, experimentado con diversos porcentajes de cal; en lo que respecta a la muestra en estado natural (sin cal), se tienen valores de  $2\ 188\ \text{kg/m}^3$ , y al agregar el 1.5 % de cal respecto a su peso se reduce a  $2\ 117\ \text{kg/m}^3$ ; al agregar cal a las muestras en diversos porcentajes más, se observa que continúan disminuyendo los valores, esa disminución ya no es tan marcada como al inicio, esto se debe a que la cal y la muestra ensayada ya reaccionaron químicamente; llegará el momento en que los valores serán casi constantes y ya no habrá disminuciones muy marcadas en los valores. En lo que respecta a las *humedades óptimas*, estas sí tienden a aumentar en forma constante, ya que para las muestras naturales se encuentra valores de 6.4 %, y con el 1.5 % de cal se tienen ya valores de 7.9 % hasta llegar al 8.4 % de humedad óptima con el 5.0 % de cal.

En la subbase, fig. 3 - 4, sucede una cosa distinta, la muestra de suelo natural (sin cal), presentan un valor de  $2\ 176\ \text{kg/m}^3$  para el peso volumétrico máximo, al adicionar el 1.5 % de cal, disminuye a  $2\ 082\ \text{kg/m}^3$ ; pero al adicionarle 2 % de cal, el valor en lugar de disminuir tiende a aumentar, esto se debe básicamente a que la cal ya reacciono conjuntamente con la muestra ensayada y se llegó al porcentaje adecuado de cal, este sería el valor de 1.5 % respecto a su peso; si habrán cambios al adicionarle cal en un porcentaje diferente, pero ya no tan significativos. Para la humedad óptima, se continuo la misma tendencia que en la base, es decir, aumenta con respecto a los porcentajes diversos de cal adicionados, para muestras naturales se tiene una humedad del 8.3 %, y continua aumentando hasta llegar a un valor de 10.8 % con el 3.0 % de cal respecto a su peso volumétrico seco máximo. Se tiene, que llegará el momento de que los resultados de laboratorio ya no cambiarán, debido a que la cal y la muestra ensayada ya reaccionaron conjuntamente, entonces se estará llegando a un primer criterio de selección, y este sería el de seleccionar el porcentaje adecuado de cal con respecto a los resultados obtenidos en el laboratorio.

PORCENTAJE DE CAL	PESO VOLUMETRICO MAXIMO KG / M <sup>3</sup>	HUMEDAD OPTIMA %
0.0	2188	6.4
1.5	2117	7.9
3.0	2104	8.8
4.0	2098	8.0
5.0	2075	8.4

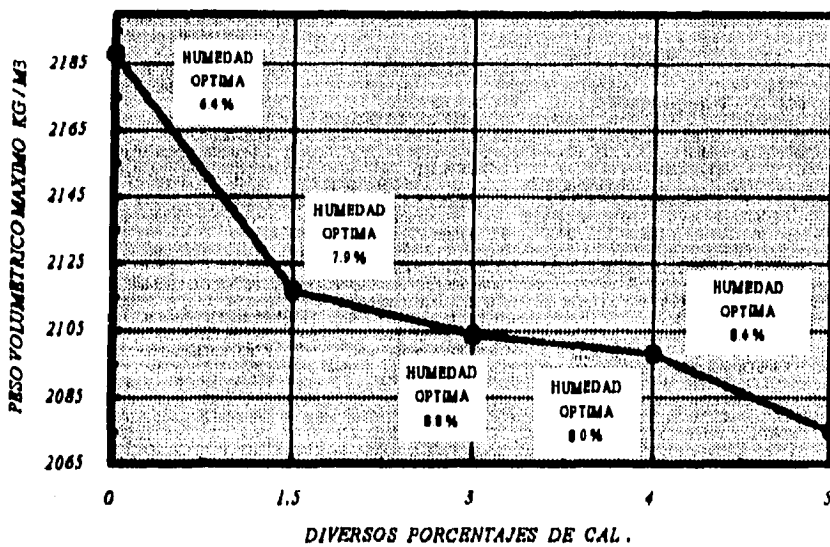


FIG. 3-3 VARIACIONES QUE PRESENTO EL PESO VOLUMETRICO MAXIMO PARA LA BASE

PORCENTAJE DE CAL	PESO VOLUMETRICO MAXIMO KG / M <sup>3</sup> .	HUMEDAD OPTIMA %
0.0	2176	8.3
1.5	2082	10.0
2.0	2097	10.3
3.0	2092	10.8

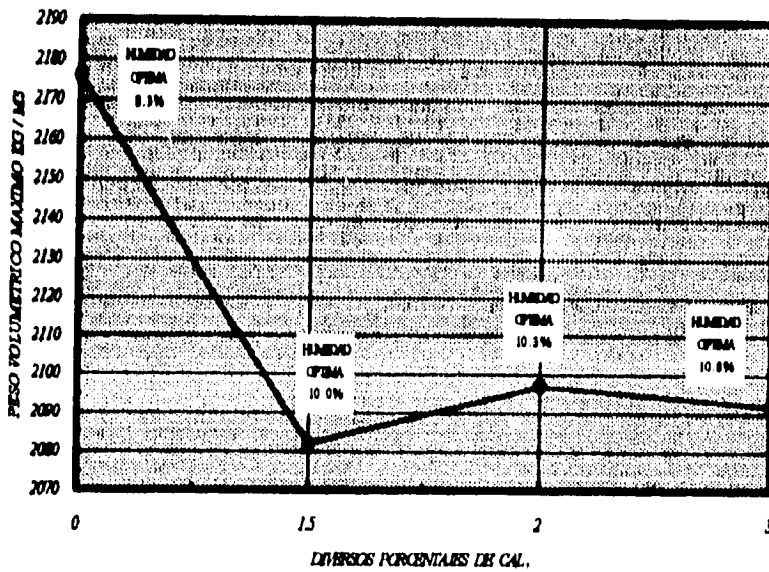


FIG. 3-4 VARIACIONES QUE PRESENTO EL PESO VOLUMETRICO MAXIMO PARA LA SUBBASE

Además se observó ya en la práctica, que al tratar con cal hidratada un suelo, se facilita notablemente el trabajo de compactación, especialmente cuando por estar en su condición natural con exceso de humedad o por la lluvia, se hace difícil trabajar sobre los suelos finos, pues aun en el caso de que la lluvia sorprenda los trabajos, el material puede trabajarse hasta varios días después, sin mermar la calidad de los trabajos. En cambio el cemento Portland requiere del cuidado de mezclar el suelo y el cemento, incorporar la humedad necesaria y compactar, en un período inferior a una hora, ya que el cemento comienza a fraguar al reaccionar con el agua.

### III.3.2. LIMITES DE CONSISTENCIA.

Existen suelos que al ser remoldeados cambian su contenido de agua, si es necesario adoptan una consistencia característica, que desde épocas antiguas se ha denominado *plástica*.

Estos suelos han sido llamados arcillas, originalmente por los hombres dedicados a la cerámica; la palabra pasó a la Mecánica de Suelos en épocas más recientes, con idéntico significado. La palabra es en este sentido, una propiedad tan evidente que ha servido de antaño para clasificar los suelos en forma puramente descriptiva. Pronto se reconoció que existía una relación específica entre la plasticidad y las propiedades físico-químicas determinantes del comportamiento mecánico de las arcillas. En este momento la plasticidad se convirtió en una propiedad ingenieril de interés científico estricto, dejando de ser una cualidad puramente descriptiva o de trabajabilidad en cerámica.

En Mecánica de Suelos la *plasticidad* puede ser definida como: *la propiedad de algunos suelos que se les permite bajo ciertas condiciones de humedad, mantener la deformación producida por un esfuerzo que les ha sido aplicado en forma rápida, sin agrietarse, desmoronarse o sufrir cambios volumétricos apreciables.*

Para medir la plasticidad de las arcillas se han desarrollado diversos métodos, de los cuales el debido a Atterberg, es de suma importancia, reconocido y aplicado mundialmente. Atterberg hizo ver en primer lugar, que la plasticidad no era una propiedad permanente de las arcillas, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua, para ello, la plasticidad de un suelo exige para ser expresada en forma conveniente, la utilización de dos parámetros en lugar de uno; además señaló esos parámetros y un modo tentativo.

Según su contenido de agua en orden decreciente, un suelo susceptible de ser plástico puede caer en alguno de los siguientes cinco estados de consistencia definidos por Atterberg:

- 1) *Estado Líquido*, cuando manifiestan las propiedades de una suspensión.
- 2) *Estado Semilíquido*, cuando los suelos tienen el comportamiento de un fluido viscoso.
- 3) *Estado Plástico*, en el cual los suelos se comportan plásticamente.

4) *Estado Semisólido*, en el que la apariencia de los suelos es la de un sólido; sin embargo, al secarse disminuye de volumen.

5) *Estado sólido*, en el que el volumen de los suelos no varía aún cuando se les someta a un secado.

Las fronteras entre los estados de consistencia, fueron establecidos por Atterberg, bajo el nombre general de límites de consistencia:

a) *Límite Líquido*, es el contenido de agua que marca la frontera entre los estados semilíquido y plástico.

b) *Límite Plástico*, es el contenido de agua que marca la frontera entre los estados plástico y semisólido.

c) *Límite de contracción*, es el contenido de agua que marca la frontera entre los estados semisólido y sólido.

d) La diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP), se denomina *Índice Plástico (Ip)*, y se representa como:  $I_p = LL - LP$ .

e) *La Contracción Lineal* de un suelo es la reducción del volumen del mismo, medida en una de sus dimensiones y expresada en porcentaje, cuando la humedad se reduce desde la correspondiente al límite líquido hasta la del límite de contracción.

f) Para definir las características de plasticidad de los suelos se utiliza el límite líquido, el índice plástico y la contracción lineal.

Para determinar el *Límite Líquido* de un suelo por el método estándar se emplea el procedimiento de Casagrande, el cual define como Límite Líquido el contenido de agua de la fracción del suelo que pase la malla No. 40 (0.425 mm), cuando al ser colocada en la copa de Casagrande y efectuar en ella una ranura trapecial de dimensiones especificadas, los bordes inferiores de la misma se ponen en contacto en una longitud de 1.3 cm después de golpear la copa 25 veces, dejándola caer sobre una superficie dura desde una altura de 1 cm, a la velocidad de 2 golpes por segundo.

a) *El equipo y materiales necesarios son los siguientes:*

Cápsula de porcelana de 12 cm de diámetro; cuentagotas; vidrio de reloj; paño absorbente.

Espátula de hoja de acero flexible de 7.5 cm de longitud y 2 cm de ancho, con punta redonda.

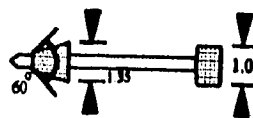
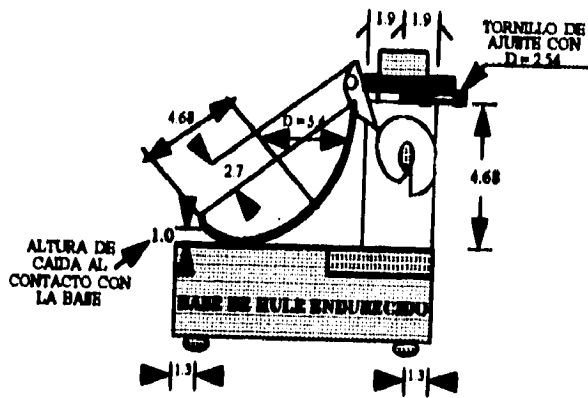
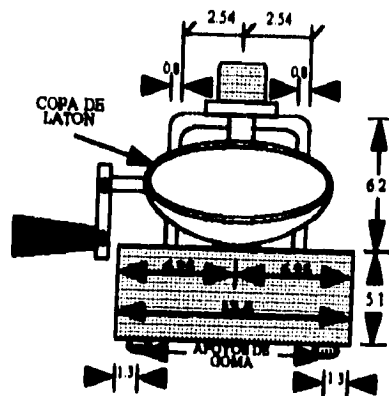
Copa de Casagrande calibrada, para una altura de caída de 1 cm provista de ranuradores, uno plano y otro curvo, con las características de la fig. 3 - 5.

Balanza de 200 g de capacidad y 0.01 de aproximación.

Horno con termostato que mantenga una temperatura constante de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ .

Desecador de cristal conteniendo cloruro de calcio anhidro.

Vaso de recipiente con capacidad de 0.5 l.



RANURADOR CURVO

SIN ESCALA  
ACOTACIONES EN CM.

FIG. 3-5 COPA DE CASAGRANDE PARA DETERMINAR EL LIMITE LIQUIDO

**b) La prueba se efectuará de la forma siguiente:**

**b1)** En la preparación de la muestra, para determinar el límite líquido, límites de plasticidad y de Contracción Lineal, se emplean 250 g de material previamente cribado por la malla No. 40 (0.425 mm), de los cuales se toma una porción representativa; la muestra se coloca en un recipiente apropiado, se le agrega agua en la cantidad necesaria para que tome el aspecto de un material saturado y se deja en reposo durante un período de 24 h, aproximadamente, en un lugar fresco, cubriendo el recipiente con un paño húmedo que se mantendrá húmedo a fin de reducir al mínimo la pérdida de agua por evaporación.

**b2)** Se toma una porción de 150 g aproximadamente, de la muestra preparada, inciso **b1**, se coloca en la cápsula de porcelana y se procede a homogeneizar la humedad con la espátula.

**b3)** Logrado lo anterior se coloca en la copa de Casagrande, previamente calibrada, una cantidad suficiente de material para que una vez extendido por medio de la espátula se tenga un espesor de 8 a 10 mm en la parte central de la muestra colocada. Para extender el material se procede del centro hacia los lados, sin aplicarle una presión excesiva con el mínimo de pasadas de la espátula.

**b4)** Se efectúa una ranura en la parte central del material que contiene la copa, con una pasada firme del ranurador, manteniéndolo siempre normal a la superficie interior de la copa. En el caso de materiales arenosos, en que es probable que deslicen sobre la copa cuando se use el ranurador curvo, podrán darse hasta 6 pasadas profundizando paulatinamente la ranura, de manera que solamente en la última pasada el ranurador toque el fondo de la copa.

**b5)** Se acciona la manivela del aparato para hacer caer la copa, a razón de 2 golpes por segundo y se registra el número de golpes necesarios para lograr que los bordes interiores de la ranura se pongan en contacto en una longitud de 1.3 cm.

**b6)** Una vez logrado lo anterior se toman con la espátula aproximadamente 10 g de material de la porción cerrada de la ranura y se colocan en un vidrio de reloj, para proceder de inmediato a determinar su contenido de agua.

**b7)** A continuación y una vez que se ha tomado la muestra para determinar su humedad, se regresa a la cápsula de mezclado el material que contiene la copa, se lavan y secan tanto la copa como el ranurador.

**b8)** En seguida se agrega agua con el cuentagotas al material contenido en la cápsula, se homogeneiza con la espátula y se repiten las etapas del **b3** al **b7**, para obtener de 4 series de valores, aumentando el contenido de agua para cada proceso.

**b9)** La cantidad de agua que se adicione al material, deberá ser de tal forma que las 4 series de valores queden comprendidas entre 10 y 35 golpes, siendo necesario obtener 2 valores arriba y 2 valores abajo de 25 golpes. Para consistencias menores de 10 golpes es difícil identificar el momento de cierre de la ranura en la longitud especificada; por otra parte, para más de 35 golpes, se dificulta la ejecución de la prueba.

*c) Los errores más comunes son los siguientes:*

*c1) Al efectuar la prueba la ranura se cierre debido al deslizamiento del suelo sobre la copa y no al flujo provocado por los golpes.*

*c2) Desajuste en la copa de Casagrande, verificando la caída de la copa que sea realmente de 1cm utilizando para ello el mango calibrador del ranurador que tiene precisamente esa dimensión.*

*c3) Pérdida de agua por evaporación en la muestra, debido a que la prueba no se realiza en lugares frescos y exentos de la corriente de aire.*

*c4) La caída de la copa no se efectúa a la velocidad requerida de 2 golpes por segundo.*

*Para determinar el Límite Plástico de un suelo que se define como el mínimo contenido de agua de la fracción que pasa la malla No. 40 (0.425 mm), para que se pueda formar con ella cilindros de 3 mm, sin que se rompa o desmoronen.*

*a) El equipo y materiales necesarios son los siguientes:*

*Cápsula de porcelana de 12 cm de diámetro.*

*Vidrios de reloj.*

*Espátula de hoja de acero flexible de 7.5 cm de longitud y 2 cm de ancho, con punta redonda.*

*Placa de vidrio con dimensiones mínimas aproximadas de 40 x 40 cm de lado y 0.6 cm de espesor.*

*Balanza de 200 g de capacidad y 0.01 de aproximación.*

*Alambre de acero, de 3 mm de diámetro y 10 cm de longitud.*

*Horno con termostato que mantenga una temperatura constante de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ .*

*Desecador de cristal conteniendo cloruro de calcio anhidro.*

*b) La prueba se desarrolla en la forma siguiente:*

*b1) Se toma una muestra de material preparado de acuerdo con el subíndice b1 de la determinación del límite líquido, a la cual se le da una forma de una pequeña esfera de aproximadamente 12 mm de diámetro, que deberá moldearse con los dedos para que pierda humedad y se forme un cilindro manipulándola sobre la palma de la mano, aplicando con los dedos la presión necesaria para tal objeto.*

*b2) A continuación se rola la muestra formando el cilindro con los dedos de la mano sobre la placa de vidrio, dándole la presión requerida para reducir su diámetro hasta que éste sea uniforme en toda su longitud y ligeramente mayor de 3 mm. La velocidad de rolado debe ser de 60 a 80 ciclos (movimiento completo de la mano hacia adelante y hacia atrás, hasta volver a la posición de partida) por minuto.*

*b3) Si al alcanzar dicho diámetro de 3 mm no se rompe en varias secciones simultáneamente, su humedad es superior a la del límite plástico. En este caso se debe juntar todo el material y formarse nuevamente una pequeña esfera, manipulándola con los dedos para facilitar la pérdida de agua y lograr una distribución uniforme de la misma.*



b4) Se repiten todas las operaciones descritas en los subíndices b1 al b3 de esta prueba, hasta que el cilindro se rompa en varios segmentos precisamente en el momento de alcanzar el diámetro de 3 mm, dicho diámetro se verificará comparándolo con el alambre de referencia.

b5) En seguida se colocan en un vidrio de reloj todos los fragmentos en que se haya dividido el cilindro y se efectúa la determinación de humedad correspondiente.

b6) Para mayor seguridad en los resultados de la prueba, se deben de llevar por lo menos 3 determinaciones sucesivas del límite plástico, en cada muestra.

b7) Los suelos con los que no es posible formar cilindros del diámetro especificado, con ningún contenido de agua se consideran como no plásticos.

b8) Se reportan como límite plástico del suelo, el promedio de las humedades que concuerden entre sí; dicho promedio se redondea al número entero más cercano.

c) Las causas más comunes de error de estas pruebas es:

c1) Imprecisión en las operaciones de pesado, como la cantidad de muestra que se toma para determinar el contenido de humedad es muy pequeña, cualquier error en este sentido influirá notablemente por lo que deberán extremarse las precauciones para lograr pesadas correctas.

c2) Que el cilindro se rompa antes de alcanzar el diámetro de 3 mm, ya que en este caso su humedad sería menor que la del límite plástico.

c3) Que la placa de vidrio no se encuentre limpia antes de cada ensaye, y esto dificulte o impida la formación del cilindro.

c4) Que al alcanzar el cilindro el diámetro de 3 mm el operador lo rompa en forma deliberada, modificando la presión, la velocidad de rotación o ambos casos.

El *Índice Plástico*, definido como la diferencia aritmética entre el límite líquido y el límite plástico, se calcula con la fórmula siguiente:

$$I_p = LL - LP$$

En donde:

$I_p$  es el índice plástico del suelo, en por ciento.

LL es el límite líquido del suelo, en por ciento.

LP es el límite plástico del suelo, en por ciento.

Se reporta como índice plástico la diferencia calculada como se indicó, excepto en los casos siguientes:

• Cuando los suelos son muy arenosos y no puede determinarse el límite plástico y se reportan el límite plástico y el índice plástico como NP (no plástico).

• Cuando el límite plástico sea igual o mayor que el límite líquido, se reporta el índice plástico como material NP (no plástico).

En la fig. 3 - 6, se observan las variaciones obtenidas en el laboratorio para el límite líquido, límite plástico e índice plástico al adicionarle diversos porcentajes de cal; pruebas realizadas para la base del pavimento; donde el *límite líquido* presenta un incremento mínimo; así en la muestra natural (sin cal), se encuentra un límite líquido del 23.6 % y al adicionarle el 1.5 % de cal se observa un incremento en su valor pasando a ser del 26.7 %; al experimentar con una cantidad mayor de cal, con el 3.0 y el 4.0 % respecto a su peso, tienden los resultados a disminuir, debido a que la cal reacciona químicamente con la muestra arcillosa utilizada para la prueba; si se observan los resultados para el 5 % de cal, los valores ya no se reducen, sino que tiende a aumentar mínimamente llegando al 22 %; debido ello a que la reacción conjunta entre la cal y la muestra ya llegaron a un estado adecuado; aunque es posible de que lleguen a bajar nuevamente los resultados del límite líquido con mayores porcentajes de cal, pero ya no serán tan significativos.

Las mismas observaciones se pueden hacer en cuanto a los *límites plásticos*, encontrándose la muestra natural, con un límite plástico del 16.3 %, al adicionarle 1.5 % de cal se observa que con este porcentaje de cal, la prueba arrojó un resultado inapropiado (INAP); con un porcentaje mayor de cal el 3.0 % y el 5.0 %, el límite plástico aumento a 17.0 % y 18.8 % respectivamente; se redujo para el 4.0 % adicionado de cal a un valor de 16.7 %, debido esta reducción a las reacciones surgidas entre la muestra arcillosa y la cal.

El *índice plástico* va en función de los resultados obtenidos del límite líquido y límite plástico, siendo así que el índice plástico ( $I_p$ ) es la diferencia del límite líquido (LL) y del límite plástico (LP),  $I_p = LL - LP$ .

En este caso para las pruebas realizadas, tienden los valores a disminuir en forma constante, conforme se adiciona la cal, así se observa en la gráfica; el suelo natural presenta un índice plástico del 7.3 %, hasta llegar al 3.2 % con el 5.0 % de cal.

En la fig. 3 - 7, se pueden observar las variaciones obtenidas en el laboratorio, para el límite líquido, límite plástico y el índice plástico, experimentados con diversos porcentajes de cal para la subbase del pavimento; el *límite líquido* para la muestra natural es de 27.5 % y al adicionarle cal, los valores tienden a aumentar, no se observa alguna disminución al ir incrementando en diversos porcentajes de cal, llegando a un valor del 33.8 % con un porcentaje del 3.0 % de cal; todo ello debido a que la reacción entre la cal y la muestra experimentada, no fue la idónea ni resultó la esperada para la subbase; pero esto no influye en gran medida en el comportamiento o estabilización de la capa en cuestión, influiría si los valores se incrementarían en un amplio margen de su valor original.

En cambio para el *límite plástico*, los resultados arrojados son más representativos que en el límite líquido, ya que la muestra de suelo natural representaba un límite plástico de 11.5 % y al adicionarle 1.5 % de cal se elevó el resultado hasta 21.2 % mostrando un incremento importante; al adicionarle 2 % de cal se observa un incremento no tan significativo en el valor, llegando a ser este de 24.4 % lo que indica que la reacción química entre la muestra arcillosa y la cal, tuvo su mejor respuesta en el primer incremento de cal.

PORCENTAJE DE CAL	LIMITE LIQUIDO %	LIMITE PLASTICO %	INDICE PLASTICO %
0.0	23.6	16.3	7.3
1.5	26.7	INAP	INAP
3.0	22.4	17.0	5.4
4.0	21.2	16.7	4.5
5.0	22.0	18.8	3.2

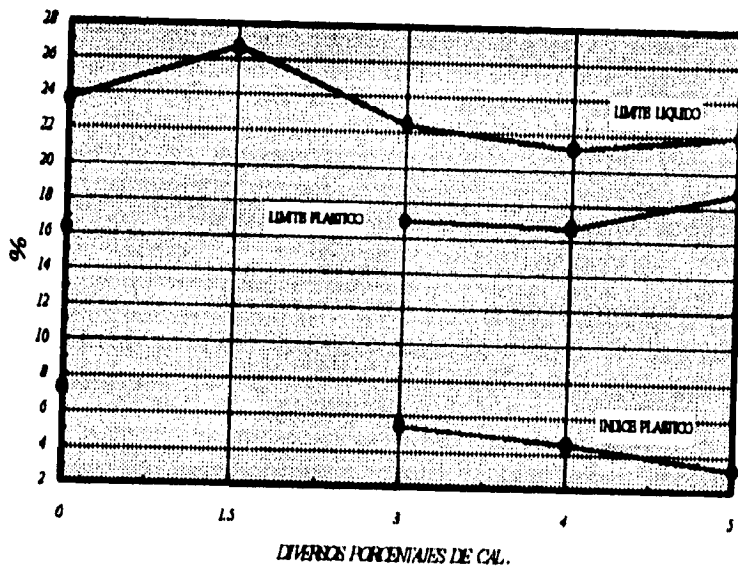


FIG. 3-6 VARIACIONES DEL LIMITE LIQUIDO, LIMITE PLASTICO E INDICE PLASTICO REGISTRADOS PARA LA BASE

PORCENTAJE DE CAL	LIMITE LIQUIDO %	LIMITE PLASTICO %	INDICE PLASTICO %
0.0	27.9	11.5	16.0
1.5	31.0	21.2	9.8
2.0	32.6	24.4	8.2
3.0	33.8	INAP	INAP

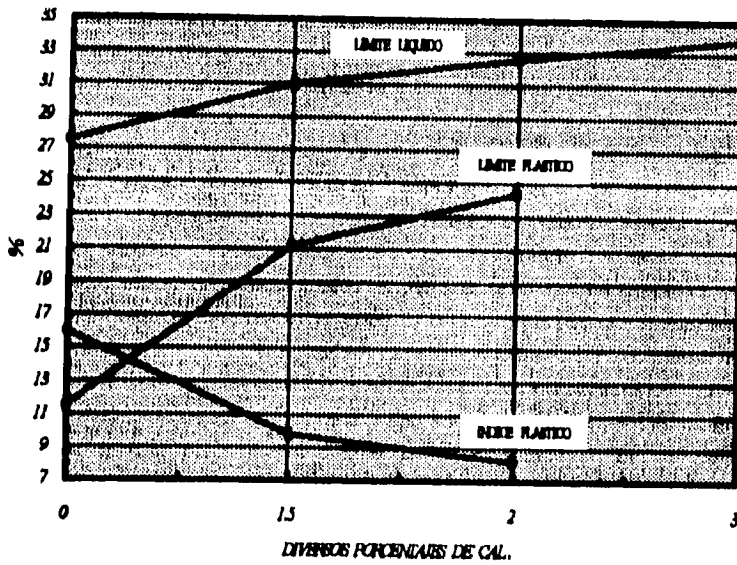


FIG. 3-7 VARIACIONES DEL LIMITE LIQUIDO, LIMITE PLASTICO E INDICE PLASTICO REGISTRADOS PARA LA SUBBASE

Para el *índice plástico*, dependiente en cuanto resultados de lo obtenido por el límite líquido y el límite plástico, se observa gráficamente una considerable disminución en sus valores, ya que se pasa de un valor del 16.0 % de la muestra en estado natural, a un 9.8 % con el 1.5 % de cal adicionada en la muestra, y esa misma tendencia de reducción en los valores se observa, ya que para el 2 % de cal suministrada a la muestra el valor obtenido es de 8.2 %; no sucede con el 3.0 % de cal, ya que da un resultado inapropiado (INAP).

### III.3.3. LIMITE DE CONTRACCIÓN LINEAL.

La *Contracción Lineal* de un suelo se define como la *reducción en la mayor dimensión de un espécimen de forma prismática rectangular*, elaborada con la fracción de suelo que pasa por la malla No. 40 (0.425 mm), cuando su humedad disminuye desde la correspondiente al límite líquido hasta la del límite de contracción, expresada dicha reducción como porcentaje de la longitud inicial del espécimen.

a) *El equipo y materiales necesarios para la prueba son los siguientes:*

Cápsula de porcelana de 12 cm de diámetro.

Espátula de hoja de acero flexible de 7.5 cm de longitud y 2 cm de ancho.

Moldes de lámina galvanizada del No. 16, con sección de 2 x 2 cm y 10 cm de longitud.

Grasa grafitada.

Calibrador con vernier del tipo máuser.

Horno de termostato que mantenga una temperatura constante de  $105 \pm 5^\circ \text{C}$

b) Se toma una muestra de material preparado de acuerdo con el subíndice *b1* de la determinación del límite líquido.

c) *La prueba se efectuará de acuerdo con los pasos siguientes:*

c1) Se agrega a la muestra agua o material menos húmedo tomando la porción preparada, hasta lograr que la humedad sea la correspondiente a la del límite líquido, lo cual se verifica empleando la copa de Casagrande y cumpliendo con la condición de que la ranura se cierre en una longitud de 1.3 cm precisamente a los 25 golpes.

c2) Con el material preparado en las condiciones indicadas, se procede a llenar el molde de prueba, al cual se le habrá aplicado previamente una capa delgada de grasa en su interior para evitar que el material se adhiera a sus paredes. El llenado del molde se efectúa en 3 capas, utilizando la espátula y golpeándolo después de la colocación de cada capa contra una superficie dura; para esto último deberá tomarse el molde por sus extremos, procurando siempre que el impacto lo reciba en toda su base, lo cual se logra conservando paralelismo entre dicha base y la superficie sobre la cual se golpea.

En cada caso las operaciones de golpeo deberán prolongarse lo suficiente para lograr la expulsión del aire contenido en la muestra colocada, lo que se pone de manifiesto cuando ya no aparecen burbujas en su superficie.

c3) A continuación se enrasa el material en el molde utilizando la espátula y se deja orear a la sombra hasta que cambie ligeramente su color, después de lo cual se pone a secar en el horno por un período de 18 h aproximadamente, a una temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ .

c4) Se extrae del horno el molde con el espécimen, se deje enfriar a la temperatura ambiente y a continuación se saca la barra del molde.

c5) Finalmente se mide con el calibrador la longitud media de la barra del material seco y la longitud interior del molde, con aproximación de 0.01 cm.

d) La *contracción lineal* se calcula de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$CL = \frac{L_i - L_f}{L_i} \times 100$$

En donde:

CL es la *contracción lineal* aproximada al décimo más cercano, en por ciento.

$L_i$  longitud inicial de la barra de suelo húmedo, que corresponde a la longitud interior del molde, cm.

$L_f$  es la longitud media de la barra de suelo seco, en cm.

e) *Las causas más frecuentes de error en esta prueba son:*

e1) Enrasado deficiente en el interior del molde, lo que ocasiona que el espécimen se rompa al contraerse.

e2) La forma incorrecta de golpear al molde, lo que ocasiona deficiencias de acomodo del material.

e3) No dar el número necesario de golpes a la barra para poder eliminar el aire contenido en el material.

Al agregar cal en cualquier porcentaje, se observa que la *contracción lineal* experimenta una reducción considerable en una muestra de suelo para tal fin, en la fig. 3 - 8 se observan las variaciones para la base; se tiene que para la muestra natural, sin cal, se encontró una *contracción lineal* del 3.4 %, la cual disminuyó hasta un 2.7 % al suministrarle el 1.5 % de cal, y así llegó a un valor de 1.2 % al agregarle una cantidad mayor de cal el 5 %. Así mismo para la expansión, la mezcla natural presentó un valor del 0.2 % y al suministrar el 1.5 % de cal, el valor se redujo hasta el 0 % .

Para la subbase, fig. 3 - 9, se puede observar que la muestra natural, sin cal, presentó una *contracción lineal* del 6.2 %, y al agregarle 1.5 % de cal, la *contracción* disminuyó al 3.8 % ; así se tiene que se llega hasta un valor de 2.5 % de la *contracción lineal* con un 3.0 % de cal. En cuanto a la expansión, la muestra natural presentó un 0.50 % y al adicionarle cal se reduce a 0.0 % . En ambos casos, tanto para la base como la subbase, la *contracción lineal* y la expansión se redujeron considerablemente.

PORCENTAJE DE CAL	CONTRACCION LINEAL %	EXPANSION %
0.0	3.4	0.2
1.5	2.7	0.0
3.0	2.0	0.0
4.0	1.7	0.0
5.0	1.2	0.0

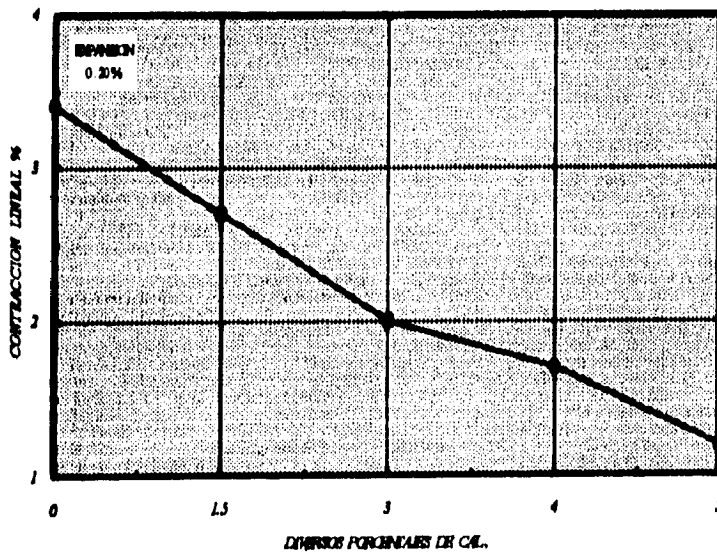


FIG. 3-8 VARIACIONES EN LA CONTRACCION LINEAL REGISTRADAS PARA LA BASE

PORCENTAJE DE CAL	CONTRACCION LINEAL %	EXPANSION %
0.0	6.2	0.9
1.5	3.8	0.0
2.0	3.2	0.0
3.0	2.5	0.0

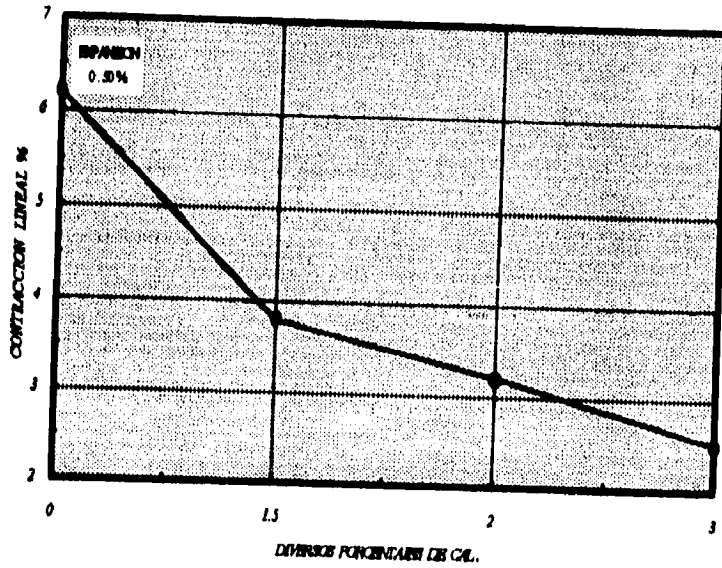


FIG. 3-9 VARIACIONES EN LA CONTRACCION LINEAL REGISTRADA PARA SUBBASE



#### III.3.4. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE.

Se puede definir la *resistencia* de un suelo como la *capacidad que tiene para soportar esfuerzos sin que se rompa o sufra deformaciones considerables* que afecten la estructura en que se utiliza, la ruptura de un suelo llega cuando en un plano se llega a un conjunto de esfuerzos normales y cortantes que un suelo no puede resistir. La resistencia del suelo generalmente se evalúa cuando se aplica una cierta carga o determinado número de cargas (repetición de cargas) y que el subsuelo va a soportar y resistir.

La prueba de *Resistencia a la Compresión Simple* en los laboratorios de Mecánica de suelos es la más usada. Esta prueba tiene la ventaja de ser fácilmente realizable y exige equipo relativamente simple, en comparación por ejemplo de la prueba triaxial. Sin embargo, una incorrecta interpretación de los resultados, son más difíciles que el caso de las pruebas triaxiales; por el contrario, los resultados de la prueba son de fácil aplicación a los trabajos de rutina, por lo menos en apariencia.

La prueba queda circunscrita a las arcillas y suelos cohesivos, pues en las arenas y suelos arenosos no es posible el labrado de las muestras.

a) *El equipo necesario para la realización de esta prueba es el siguiente:*

Una báscula de carga u otro aparato que cubra sus fines.

Cortador para el espécimen, segueta de alambre.

Recipiente para determinación del contenido de agua.

Extensómetro.

Balanza.

Cilindro metálico y demás equipo para preparar un espécimen de suelo remoldado, si éste es el caso.

b) *Preparación de la muestra:*

b1) *Especimen de suelo inalterado.*

Córtense prismas de unos 5 cm de lado de base y unos 12 ó 13 cm de longitud de la arcilla inalterada. Con un cortador y una segueta de alambre afinense los especímenes hasta su forma definitiva cilíndrica de 3.6 cm de diámetro de base y 9 cm de altura.

El material producto del labrado debe conservarse, protegiéndolo del secado.

b2) *Especímenes de suelo remoldado.*

Remoldéese la arcilla a mano hasta formar una masa homogénea, sin grumos, de material inalterado. Prepárese un fragmento de tubo de bronce o latón y una placa de vidrio, aceitándolas ligeramente. Con la arcilla fórmese una bola del tamaño de una nuez y colóquese ésta dentro del cilindro colocando sobre la placa de vidrio; apriéñese el material. Estas operaciones han de repetirse hasta llenar el molde. Finalmente, extráigase el espécimen del molde.

*c) Protección de la muestra contra la evaporación:*

Aun en pruebas de sólo unos minutos de duración, es conveniente proteger a los especímenes contra la evaporación, para ello existen muchos métodos, algunos de los cuales se mencionan a continuación, ordenados de menor a mayor efectividad:

- c1) Envuélvase la muestra en una toalla de papel húmedo, sin que quede ceñida.
- c2) Cúbrase el espécimen con una capa delgada de grasa.
- c3) Enciérrase el espécimen en una cámara cerrada con agua en el fondo.
- c4) Cúbrase el espécimen con una membrana de hule delgado.
- c5) Envuélvase el espécimen con las membranas de hule y una capa de grasa a prueba de agua entre ellas, sumergiendo el conjunto totalmente en agua.

*d) La prueba se realizará según el procedimiento siguiente:*

Los métodos de prueba dependen del equipo de carga disponible; se mencionarán los dos casos más comunes, como criterio general es de señalar que es conveniente que la prueba dure de 5 a 10 min.

Si la carga se aplica en incrementos, esto puede lograrse haciendo obrar cada minuto valores del orden de  $1/5$  a  $1/10$  de carga de falla estimada, al realizar esta estimación debe tenerse presente de la resistencia de las arcillas remoldeadas, en general, es menor que las del estado inalterado.

*e) Procedimiento de prueba con aplicación directa de la carga. (Esfuerzo controlado), fig. 3 -10.*

- e1) Móntese el espécimen, con su base y cabezal ya instalados bien centrados bajo el marco de carga.
- e2) Colocando una pequeña pesita en la ménsula, asegúrese un buen contacto entre el espécimen y el marco de carga, a través del balín y la placa del cabezal. Verifíquese previamente que el peso del marco de carga está correctamente balanceado por el contrapeso.
- e3) Móntese un extensómetro sensible al centésimo del milímetro en su soporte, adosado al marco de carga. Ajustese a una lectura inicial de cero.
- e4) Échese a andar un cronómetro y, simultáneamente, aplíquese el primer incremento de carga a la ménsula. Inmediatamente antes de aplicar el siguiente incremento de carga deberá observarse y registrarse la lectura del extensómetro.  
Cada incremento de carga debe aplicarse durante un minuto y la lectura del extensómetro debe hacerse 5 segundos antes de aplicar el siguiente.
- e5) Conforme la muestra se acerque a la falla deberá ser cuidadosamente observada para detectar sus grietas o posibles planos de falla y otros puntos de interés.
- e6) Si la muestra falla drásticamente regístrese el tiempo transcurrido tras la aplicación del último incremento de carga; después quítense las pesas de la ménsula. Si no hay falla brusca, la prueba se dará por terminada al sufrir la muestra una deformación unitaria del orden del 20% .

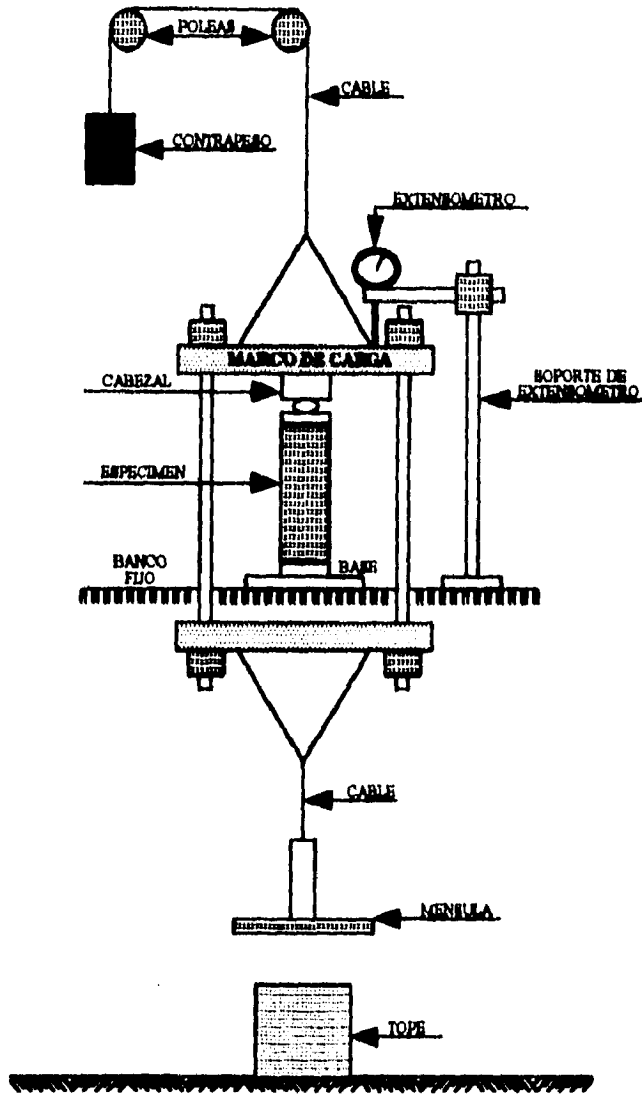


FIG. 3-10 ESQUEMA DE UN APARATO CON APLICACION DE CARGA DIRECTA PARA PRUEBA DE COMPRESION SIMPLE

e7) Qúitese la muestra del aparato y hágase un esquema de su falla y agrietamiento a una escala correcta.

e8) Córtese una laja delgada, de unos 3 mm de espesor paralela al plano de falla, para determinación del contenido de agua. El resto del espécimen se pondrá a secar para el mismo fin.

e9) Cálculense las deformaciones correspondientes a los diferentes esfuerzos, según los datos observados, calculando con áreas corregidas y dibújese un diagrama esfuerzo-deformación.

*f) Procedimiento de prueba con báscula de carga. (Deformación controlada).*

f1) Colóquese sobre la plataforma de la báscula de carga una placa metálica redonda, con dos brazos verticales entre los cuales va el puente para instalar el extensómetro; sobre esa base colóquese una placa destinada a soportar directamente al espécimen. Sobre dicho espécimen otra placa delgada hace el papel de cabezal, en el cual se apoyará, a través de un balín, el marco móvil de carga. La colocación de todos esos objetos hará que la aguja de la carátula de la báscula abandone su posición original de lectura cero; por medio de los pesos situados en los brazos horizontales de la báscula, deberá volverse dicha aguja a su posición original. En este momento la báscula está lista para la prueba.

f2) Céntrase bien el espécimen bajo el marco móvil, cuidando que el balín transmisor resulte perfectamente axial. Acciónese manualmente las palancas que mueven el marco móvil hasta lograr el contacto con el cabezal de la muestra, a través del balín; éste se hace notorio por un pequeño desplazamiento de la aguja de la carátula de la báscula, la cual deberá colocarse en cero otra vez, accionando ligeramente en sentido inverso el mismo control manual.

f3) Móntese el extensómetro y ajústese su carátula en lectura cero.

f4) Conéctese el mecanismo eléctrico de la báscula y échese a andar el mecanismo de aplicación de carga simultáneamente con un cronómetro. El marco de carga desciende ahora a una velocidad uniforme, comprimiendo el espécimen contra la plataforma, con lo cual la carátula de la báscula marcará las cargas aplicadas progresivamente.

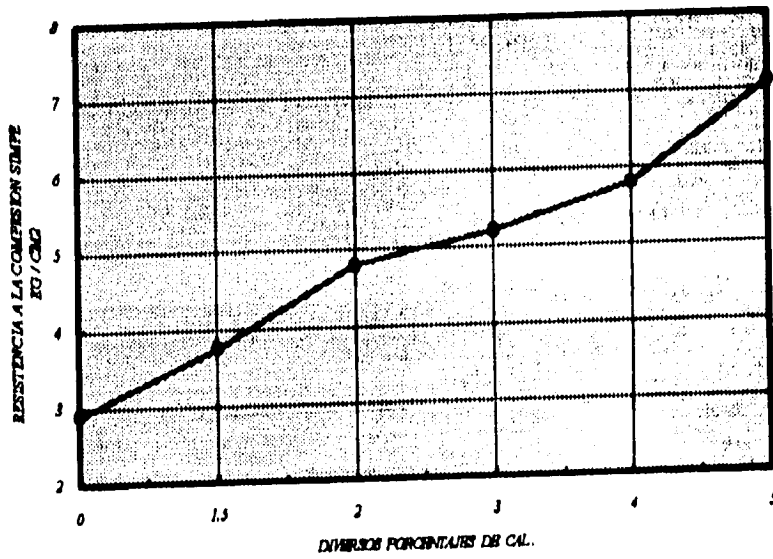
f5) Deberán hacerse lecturas de la carga aplicada a cada milímetro de deformación, según indicación del extensómetro. Esta frecuencia puede variarse de acuerdo con la mayor o menor rigidez del espécimen; en los especímenes más rígidos es recomendable una frecuencia mayor.

La velocidad de deformación es frecuentemente de 1 mm por minuto, sin embargo pueden apreciarse velocidades menores cuando se prueben muestras muy rígidas, de manera que la prueba dure un tiempo comprendido entre los 5 y 10 minutos ya señalados.

f6) Conforme la muestra se acerque a la falla deberá de ser observada cuidadosamente para detectar sus grietas, planos de falla u otros puntos de interés.

f7) Por lo general, la falla del espécimen está señalada por un regreso en la aguja de la carátula de la báscula, tanto mayor la falla sea más típicamente frágil. El instante en que esto ocurra debe ser registrado.

<b>PORCENTAJE DE CAL</b>  <b>%</b>	<b>RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE</b>  <b>KG / CM2</b>
0.0	2.9
1.5	3.6
2.0	4.8
3.0	5.2
4.0	5.8
5.0	7.1



**FIG. 3-11 GRAFICA DE LA PRUEBA DE COMPRESION SIMPLE,  
REALIZADA PARA LA SUBRASANTE**

Después deberá continuarse la prueba haciendo lecturas en la forma normal, hasta obtener algunos valores para la curva esfuerzo-deformación en las zonas adelante de la zona de carga máxima. La prueba deberá suspenderse al alcanzar la muestra una deformación unitaria del orden del 20% , si no se define una falla típica, deberá también suspenderse la prueba al llegar al mismo límite de deformación.

f8) Qúitese la muestra del aparato y hágase un esquema de su falla y agrietamiento a una escala correcta.

f9) Córtese una laja delgada, de unos 3 mm de espesor paralela al plano de falla, para determinación del contenido de agua. El resto del espécimen se pondrá a secar para el mismo fin.

f10) Calcúlense las deformaciones correspondientes a los diferentes esfuerzos, según los datos observados, calculando con áreas corregidas y dibújese un diagrama esfuerzo-deformación.

Las pruebas realizadas en el laboratorio, en donde mejores resultados se obtuvieron, fueron sin duda las que miden la resistencia a los suelos, en este caso la resistencia a la compresión simple; los resultados arrojados fueron muy por arriba de lo esperado, mejorando las características físicas hasta en un 100 % , respecto a sus condiciones naturales. Esta prueba, la *resistencia a la compresión simple*, únicamente se realizó en la capa de subrasante, para conocer su comportamiento y reacción a las cargas transmitidas a ella; no influye de manera significativa en el diseño del pavimento este tipo de pruebas, es por ello que se realizó únicamente en esta capa, y no en capas subsiguientes.

Así para la muestra natural, sin cal, se tiene un valor de 2.9 kg/cm<sup>2</sup>, al adicionarle cal en cualquier porcentaje se observa la tendencia de los valores a aumentar, fig. 3 - 11; para el 1.5 % de cal adicionada se obtiene un valor de 3.6 kg/cm<sup>2</sup>, y conforme son aumentados los porcentajes de cal, los resultados obtenidos se incrementan gradualmente, hasta que se llega a 7.1 kg/cm<sup>2</sup> con un 5.0 % de cal.

### III.3.5. VALOR RELATIVO DE SOPORTE.

Esta prueba fue originalmente desarrollada por el Departamento de Carreteras del Estado de California; actualmente es de uso muy extendido y el método de diseño en ella fundado quizá sirve para proporcionar más de la mitad de todos los pavimentos que se construyen actualmente en el mundo.

El *Valor Relativo de Soporte* (V.R.S.) del suelo, se puede definir como *la relación expresada como porcentaje entre la presión necesaria para penetrar los primeros 0.25 cm y la presión requerida para tener la misma penetración en un material arbitrario, adoptado como patrón, que es una piedra triturada en la que se producen las presiones en el vástago.*

Los factores que más afectan a los valores obtenidos de la prueba del V.R.S., son la textura del suelo, contenido de agua y su condición de compactación.

En los suelos friccionantes, prácticamente no hay expansión durante su saturación por lo que el monto de la sobrecarga dada por la placa perforada no es significativo durante esa etapa de la prueba; sin embargo el valor de la sobrecarga sí influye mucho en la etapa de penetración, pues el confinamiento afecta mucho la resistencia de los suelos friccionantes. En los suelos arcillosos ocurre precisamente lo opuesto. *Las pruebas de V.R.S. que se efectúan a los suelos tienen por objeto, determinar las características de resistencia que intervienen principalmente en el diseño de pavimentos, hay algunos tipos usados para este fin. Una de ellas es la Prueba de Porter Modificada, tiene por objeto esta prueba, la de determinar el Valor Relativo de Soporte de los suelos, empleados o que se pretenden usar en las terracerías, y se lleva a cabo en especímenes con diferentes grados de compactación y en condiciones de humedad estimadas como las más desfavorables que se consideren pueden alcanzar dichos suelos durante la operación de la obra, generalmente se utiliza se utiliza este V.R.S. en el proyecto o revisión de espesores de pavimento, teniendo esta prueba 3 variantes, según los cuales los especímenes correspondientes se elaboran ya sea con material que contenga la humedad óptima, con humedad igual o superior a la óptima, o bien con la humedad natural.*

*a) Prueba Porter Modificada variante I I se efectúa tomando en cuenta lo siguiente:*

*a1) La prueba se ejecuta en muestras tomadas en el terreno, sin variar su humedad, con las cuales se elaboran especímenes compactados a diferentes pesos volumétricos, incluyendo el del lugar para determinar en cada uno el valor relativo de soporte correspondiente; se efectúa a suelos que no van a presentar cambios apreciables en su contenido de agua y siempre que éste se encuentre dentro de límites que permitan la elaboración de los especímenes.*

*b) El equipo necesario para la realización de esta prueba es el siguiente:*

Molde cilíndrico de compactación de 15.75 cm de diámetro interior y de 12.75 cm de altura, provisto de collarín y una base con dispositivo para sujetar el cilindro.

Máquina de compresión con capacidad mínima de 30 t y aproximación de 100 kg.

Máquina de compresión con capacidad mínima de 3 t y aproximación de 10 kg provista de un pistón de penetración de acero, con diámetro de 4.95 cm y sección de 19.35 cm<sup>2</sup>.

Dos placas circulares de carga con diámetro de 15.4 cm teniendo un orificio central de 5.4 cm de diámetro y su peso de 3 kg cada una, fig. 3 - 12.

Extensómetro con carrera de 2.54 cm y aproximación de 0.01 mm, provisto de una abrazadera para acoplarlo al cilindro de penetración.

Cronómetro o reloj.

Varilla metálica de 1.9 cm de diámetro y 30 cm de longitud, con punta de bala.

Placa circular para compactar, con diámetro de 15.45 cm, con dispositivo para sujetarla en la cabeza de aplicación de la carga.

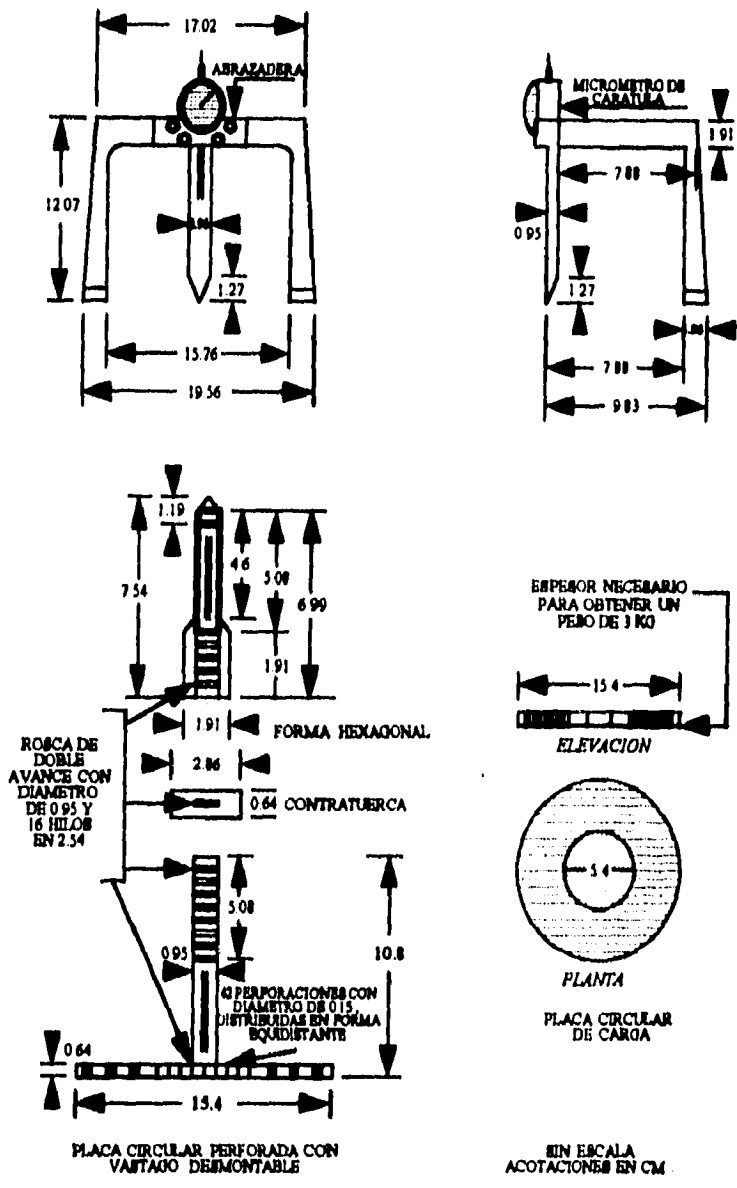


FIG. 3-12 PLACA CIRCULAR PERFORADA, PLACAS CIRCULARES DE CARGA Y TRIPODE QUE SE UTILIZAN EN LA PRUEBA PORTER VARIANTE II



Malla de 25 mm, Malla No. 4 (malla de 4.75 mm).

Balanza con capacidad mínima de 20 kg y aproximación de 5 g.

*c) Preparación de la muestra:*

d1) El muestreo consiste en la obtención de una porción del material con el que se pretende construir una estructura térrea o bien del material que ya forma parte de la misma, de tal manera que las características de la porción obtenida sean representativas del conjunto. El muestreo correspondiente se llevará a cabo tomando 25 kg de suelo; las muestras alteradas de suelos podrán obtenerse de una excavación, de un frente, ya sea de un corte o del banco o bien de perforaciones con herramientas especiales, debiendo transportarse la muestra en recipientes de lámina con tapa de cierre hermético, o bien, en bolsas de lona impermeabilizadas, en tal forma que no pierdan humedad.

*d) La prueba se efectúa en la forma siguiente:*

d1) A una muestra del material por estudiar, se le determina su peso volumétrico máximo seco y su humedad óptima, procedimiento descrito en la prueba Porter de compactación por carga estática.

d2) A otra muestra del mismo material, obtenida y preparada de acuerdo con el párrafo (c1) del índice (c) de esta prueba, se le determina su cantidad de humedad, y es simplemente someter a un proceso de secado al horno y determinar la relación que existe entre el peso del agua que contiene y el peso del material.

d3) A continuación se pesa la porción restante de la muestra a la que se le determina su humedad, se anota el peso  $W_m$ , en g con aproximación de 5 g y se agrega la cantidad de agua necesaria para que alcance la humedad óptima de compactación, la cual se calculará mediante la fórmula siguiente:

$$V = W_m \times \frac{W_2 - W_1}{100 + W_1}$$

En donde:

V Volumen de agua por agregar, en  $\text{cm}^3$

$W_m$  peso de la muestra con su humedad inicial, en g.

$W_2$  humedad óptima, en por ciento.

$W_1$  humedad inicial del material, en por ciento.

d4) Inmediatamente después se mezcla convenientemente el material y se pesa la muestra de prueba que se requiere para llenar el molde sin la extensión, determinando dicha cantidad para una compactación apropiada de 100 %, con la fórmula siguiente:

$$P_w = \frac{C}{100} \times \frac{\gamma}{1000} \times \frac{100 + W_2}{100} \times V$$

En donde:

$P_w$  es el peso de la muestra de prueba en estado húmedo, en kg.

$C$  es el grado de compactación con que se va a elaborar el espécimen, en por ciento.

$\gamma_d$  es el peso volumétrico seco máximo del material, en  $\text{kg/m}^3$ .

$W_2$  es la humedad óptima, en por ciento.

$V$  es volumen del cilindro de prueba sin collarín, en  $\text{dm}^3$ .

d5) Se coloca la muestra de la prueba en tres capas, dentro del molde con el collarín instalado, acomodando cada capa con 25 golpes ejecutados con la varilla metálica, procurando que no haya pérdida del material ni humedad.

d6) Se instala el molde en la máquina de compresión y se compacta la muestra en forma lenta y uniforme debiéndose retirar la carga momentáneamente, a cada 5 toneladas, para dar tiempo a que el material se acomode, en esta forma se continúa la aplicación de la carga hasta que el espécimen tenga la altura del cilindro sin el collarín y en el momento de que esto ocurre se sostiene la última posición durante un minuto. Si se presenta expulsión de agua antes de tener el espécimen la altura del molde, se mantiene la carga que se esté aplicando en ese momento, hasta que disminuya notablemente la salida del agua, y cuando esto ocurre, se da un pequeño incremento a la carga, repitiendo esta operación no más de tres veces para que el espécimen tenga la altura fijada; de lo contrario la muestra deberá desecharse.

d7) Se retira lentamente la carga del espécimen, se mide en éste el incremento de la altura que experimenta y se le aplica nuevamente carga hasta que la cara superior del espécimen baje el doble del incremento citado. Se repite esta operación no más de tres veces, hasta que el espécimen tenga la altura fijada; en el caso de que esté quede a una altura menor, deberá desecharse la muestra, repitiendo la muestra con otra porción del material.

Si durante cualquiera de las operaciones de carga hay expulsión de material, se repetirá la prueba con otra porción representativa de la muestra, revisando previamente los cálculos correspondientes.

d8) A continuación se colocan las dos placas de carga, se efectúa la penetración del espécimen, se dibuja la gráfica carga-penetración, correspondiente y se determina la carga  $C_{2.54}$ .

d9) Se repiten en nuevas muestras de material, los pasos d1 al d9, descritos anteriormente, variando el grado de compactación y la humedad como se indica a continuación:

<i>Porcentaje de compactación</i>	<i>Humedad de la prueba</i>
100	<i>Humedad óptima</i>
95	<i>Humedad óptima más 1.5 %</i>
90 a 75	<i>Humedad óptima más 3.0 %</i>

e) En esta prueba se calcula y reporta lo siguiente:

e1) El V.R.S. para cada espécimen, de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$\text{VRS} = \frac{C_{2.54}}{1360} \times 100$$

En donde:

VRS es el Valor Relativo de Soporte, en la prueba de Porter modificada, en porciento.

$C_{2.54}$  Es la carga aplicada al espécimen o la carga corregida, para una penetración de 2.54 mm, en kg.

f) Las causas de más frecuente error son:

f1) La distribución del agua en el material no sea uniforme.

f2) La carga de compactación no se aplique en la forma especificada.

f3) La carga de penetración no se efectúe a la velocidad especificada.

g) En esta variante deben tomarse precauciones para que la muestra preparada no pierda humedad antes de efectuar la prueba, por lo que es necesario verificar el contenido de agua y descartar las muestras que registren pérdidas sensiblemente de humedad, en cuyo caso se hará un nuevo muestreo.

En la fig. 3 - 13, se observan los resultados arrojados para la base, al experimentar con diversos porcentajes de cal y obtener los valores relativos de soporte, valores importantes para el diseño estructural del pavimento flexible. En la muestra de suelo natural se obtuvo un V.R.S. del 84.5 %, al suministrarle una cantidad de cal el 1.5 %, se observa inmediatamente el cambio generado por la cal en la muestra, llegando hasta un valor de 114.6%, si se continua aumentando los porcentajes de cal, los V.R.S. también aumentan considerablemente, llegando a un valor de 205.3 % con tan solo el 5.0 % de cal en peso.

En la subbase, fig. 3 - 14, en la cual se llega a tener un valor de 126.7 % de V.R.S con tan solo el 3.0 % de cal en peso, teniendo con una muestra natural 61 % del V.R.S.

Superando con estos resultados de laboratorio, las normas de la S.C.T. que nos mencionan que para la base se necesita un valor mínimo del 100 % de V.R.S. y para la subbase un valor mínimo del 50 %.

Por esto, la cal es recomendada para cambiar las características físico-mecánicas de los materiales utilizados en una estabilización de suelos.

Los porcentajes de cal ideales para la estabilización son: para la base el 3.0 % respecto a su peso volumétrico seco máximo, y para la subbase el 1.5 %; en la base los resultados arrojados por el laboratorio deben ser más estrictos, es por ello que se experimento con porcentajes mayores de cal, debiéndose cumplir al máximo todas y cada una de las normas de la S.C.T., ya que la base es la que recibe primeramente las cargas, después de la carpeta, es por ello que se deben de cuidar todos y cada uno de los materiales y procesos utilizados durante su construcción.

PORCENTAJE DE CAL %	VALOR RELATIVO DE SOPORTE %	NORMAS DE LA S. C. T.
0.0	84.5	100 MÍN.
1.5	114.8	"
3.0	171.8	"
4.0	191.5	"
5.0	205.5	"

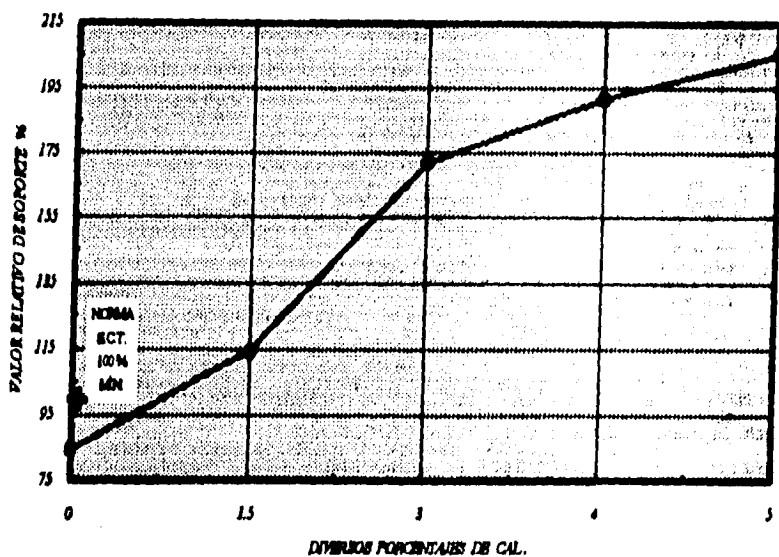


FIG. 3-13 VARIACIONES EN EL VALOR RELATIVO DE SOPORTE REGISTRADAS PARA LA BASE

PORCENTAJE DE CAL %	VALOR RELATIVO DE SOPORTE %	NORMAS DE LA S. C. T.
0.0	61.0	30 MÍN.
1.5	101.3	"
2.0	114.8	"
3.0	126.7	"

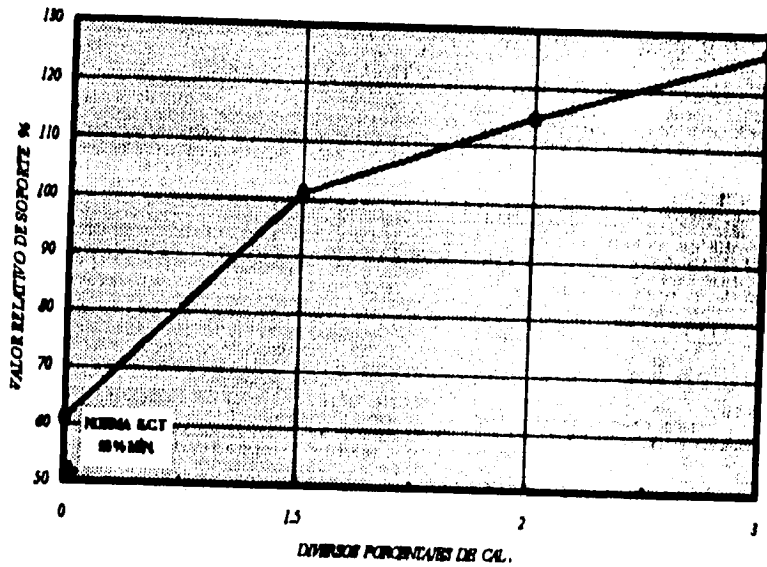


FIG. 3-14 VARIACIONES EN EL VALOR RELATIVO DE SOPORTE PARA LA SUBBASE

#### III. 4. DISEÑO DE UN SUELO ESTABILIZADO CON CAL.

Una buena parte de lo expuesto anteriormente, tiene el objeto de que se conozcan las propiedades del suelo, su comportamiento y su mejoramiento, están en cierta forma definidos para el propósito de este trabajo, que es la estabilización de los suelos y su aplicación a los pavimentos que son los que van a exigir el buen funcionamiento de las terracerías. A medida que los vehículos van evolucionando en peso, velocidad y comodidad, se crea la necesidad de proporcionarles una pista de circulación con condiciones de curvatura, pendiente, visibilidad, sección transversal, uniformidad, textura; en general, un diseño y construcción, apropiados a una demanda de operación cada vez más exigente.

*El pavimento se puede definir como el conjunto de capas de materiales previamente tratados que se superponen sobre el terreno de cimentación, y cuyas principales funciones son las de proporcionar una superficie de rodamiento uniforme de color y textura apropiadas para la circulación de vehículos, además, componerse de una estructura resistente a la acción del tránsito, a la del Intemperismo y otros agentes perjudiciales, así mismo debe soportar los esfuerzos y distribuirlos adecuadamente a las capas inferiores. Estos esfuerzos son producidos por las cargas impuestas por el tránsito vehicular.*

El pavimento es toda la estructura de una obra vial, que hace posible el tránsito expedito de los vehículos. La estructura o disposición de los elementos que lo constituyen, así como las características de los materiales empleados en su construcción ofrece una gran variedad de posibilidades, de tal suerte que las capas de que está formado, puede ser de materiales naturales seleccionados, sometidos a muy diversos tratamientos.

Para poder cumplir sus funciones, un pavimento debe satisfacer dos condiciones básicas:

*En primer lugar, ofrecer una buena y resistente superficie de rodamiento, con la rugosidad necesaria para garantizar buena fricción con las llantas de los vehículos y con el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos.*

*En segundo lugar, debe poseer la resistencia apropiada con las características mecánicas convenientes para soportar las cargas impuestas por el tránsito sin falla y con deformaciones que no sean permanentes, y que garanticen un tránsito en buenas condiciones.*

*El criterio de diseño estructural para pavimentos flexibles desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, es el que se utilizará en el presente sub-capítulo. Las recomendaciones que contiene se han hecho válidas mediante experimentaciones en tramos de prueba, carreteras típicas y pruebas aceleradas a escala natural en laboratorio. El método hace énfasis en el planteamiento general del problema, de tal manera que en forma sencilla se tome cuenta la interacción de las variables de diseño y los criterios de decisión, a fin de llegar a soluciones adecuadas para las condiciones imperantes del país.*

En el método, se destacan los conceptos de comportamiento a la fatiga de las diferentes capas que constituyen la carretera, el criterio de sección estructural de resistencia relativa uniforme y el tratamiento probabilístico para establecer niveles de confianza respecto a la falla. Además, los conceptos aplicados para valorar los coeficientes de daño en términos de esfuerzo a diferentes profundidades, constituyen un avance con relación a los factores empleados usualmente, que son de carácter empírico y no toman en cuenta ni las presiones de contacto ni la profundidad de la capa en que se analiza el deterioro.

En el método de diseño se relacionan resistencias críticas en el lugar ( $VRS_z$ ) contra aplicaciones de carga estándar esperadas en la vida de proyecto de la carretera. El criterio de diseño está limitado al caso típico de las estructuras empleadas en México, donde el espesor de proyecto de las carpetas de concreto asfáltico rara vez excede los 7.5 cm y las demás capas de la carretera están constituidas por materiales granulares o suelos finos estabilizados mecánicamente por compactación.

Para el caso que se presente deformabilidad perjudicial del terraplén causada por cambios volumétricos, asentamientos o consolidación, el diseño consistirá fundamentalmente en controlar las deformaciones del terraplén mediante técnicas de mecánica de suelos, seguido por recomendaciones sobre el espesor de un pavimento deseable, a fin de transmitir los esfuerzos a las terracerías y suelo de cimentación en condiciones adecuadas. Para desarrollar el modelo de comportamiento a la fatiga, considera está como deformación permanente acumulada, se supone que la carretera tiene una resistencia relativa uniforme en todas las capas de su estructura y llega a la falla funciona cuando ha soportado el número de cargas estándar especificado para la vida del proyecto.

Se emplean los conceptos de capacidad de carga en suelos cohesivos y la teoría de distribución de esfuerzos verticales de Boussinesq, deducida para una placa circular flexible de radio  $a$  apoyada uniformemente en la superficie de un medio elástico homogéneo e isotrópico, para su aplicación al caso de una estructura de capas múltiples, en la cual las gráficas adimensionales esfuerzo-deformación de los materiales son iguales. Estos esfuerzos se calculan mediante la fórmula siguiente:

$$z = p \left[ 1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \right]$$

donde:

$z$  esfuerzo vertical en  $\text{kg/cm}^2$ .

$p$  presión de contacto (presión de inflado) en  $\text{kg/cm}^2$ .

$a$  radio de la superficie de apoyo en cm.

z profundidad considerada en cm.

Se considera al esfuerzo vertical como un indicador adecuado del comportamiento a cargas repetidas de la capa correspondiente. Se supone que las carpetas asfálticas son delgadas y que su duración a la falla dependen de su resistencia a la tensión.

La carga estándar o eje equivalente se define como la sollicitación de un eje sencillo de 8.2 t y llantas con presión de contacto de 5.8 kg/cm<sup>2</sup>. Dado que las carreteras están sujetas a la acción de cargas diferentes en cuanto a magnitud y presión de contacto, es necesario ponderar su efecto multiplicando el número de cargas de cada tipo por su correspondiente coeficiente de daño, para establecer un patrón de referencia en términos de cargas estándar o equivalentes.

De acuerdo con el modelo desarrollado, dos cargas producen el mismo daño a la profundidad z cuando sus esfuerzos verticales a esa profundidad son iguales. Para obtener el coeficiente de daño d<sub>i</sub> producido por un eje cualquiera de peso P y presión p con relación al eje equivalente, se aplicara la siguiente ecuación:

$$\log d = \frac{\log \tau - \log \alpha}{\log 1.5}$$

donde:

d coeficiente de daño del eje en análisis.

$\tau$  esfuerzo provocado por el eje en análisis a la profundidad z.

$\alpha$  esfuerzo provocado por la carga equivalente a la profundidad z.

Es importante hacer notar que el coeficiente de daño varía con la profundidad, dependiendo del eje.

Para ejes sencillos, la carga puede caracterizarse por una placa circular de radio a<sub>1</sub>:

$$a_1 = \sqrt{\frac{1000 P}{2 \pi p}}$$

Para ejes dobles (tándem) o triples la ecuación anterior sigue siendo válida para las capas superficiales, en donde se supone que cada uno de los ejes del conjunto doble o triple actúa independientemente; pero no para las capas profundas, en donde existe interacción entre los esfuerzos producidos por dichos ejes.

En este caso se ha determinado empíricamente que el radio equivalente para los ejes dobles es:

$$a_2 = \sqrt{\frac{1111 P}{4 \pi p}}$$



Para ejes triples, el radio equivalente para capas profundas se establece tentativamente como:

$$a_3 = \sqrt{\frac{1333 P}{6 \pi p}}$$

En las ecuaciones antes mostradas,  $P$  es la carga total en toneladas del conjunto de ejes (sencillos, dobles o triples),  $p$  es la presión de inflado (o de contacto) en  $\text{kg/cm}^2$  y  $a_1$  es el radio en cm.

La *calibración del modelo* requiere hacerse en términos de un indicador de resistencia, el modelo se calibró en términos del Valor Relativo de Soporte crítico, esperado en el lugar durante la vida de servicio de la carretera ( $VRS_z$ ), considerándolo como un índice de resistencia del suelo a esfuerzos verticales.

Las *variables que intervienen en el diseño* de un pavimento flexible son numerosas y tienen interacción, por lo cual un proyecto adecuado debe analizar el problema desde un punto de vista general, entre las variables pueden mencionarse:

a) *Estructurales*: Incluyen características relativas a cada una de las capas que constituyen la carretera, como espesores, resistencia y deformabilidad en las condiciones esperadas de servicio.

b) *De carga*: Se refieren a los efectos producidos por el tránsito mezclado al circular por la carretera. En este caso son importantes datos relacionados con tránsito medio diario anual, tasa de crecimiento anual, cargas por el eje sencillo múltiple y lo más relevante la vida útil del proyecto. Para simplificar esta información, y poderla presentar en gráficas de diseño, generalmente el tránsito mezclado se transforma en tránsito equivalente en ejes sencillos, mediante el empleo de factores teóricos o empíricos.

c) *De clima y condiciones regionales*: Las características reológicas de los materiales que constituyen la carretera dependen de la temperatura, régimen de precipitación, precipitación media anual, nivel freático, geología y topografía de la región.

d) *Variables de conservación*: Un buen mantenimiento garantiza que las variaciones en las características constructivas de los materiales sean mínimas, no obstante el costo puede ser excesivo. La ausencia de conservación implica cambios fuertes y normalmente un deterioro acelerado del camino.

e) *Comportamiento*: El comportamiento del pavimento depende de la interacción entre las características estructurales, solicitaciones del tránsito, clima, condiciones regionales y tipo de conservación implicada. La *falla funcional* ocurre cuando el índice de servicio actual, o la estimación de la calificación media de los usuarios del camino, es menor de 2.5, en la escala de 0 a 5.

El *criterio de diseño* permite considerar tres variables de diseño, de acuerdo con lo antes expuesto: resistencia esperada en el campo ( $VRS_z$ ), número de aplicaciones de carga producida por el tránsito y nivel de confianza ( $Q_U$ ) deseado por el analista.

La confiabilidad del diseño resultante dependerá de la precisión con que pueden estimarse las variables de resistencia y tránsito.

Es utópico pretender determinar en forma exacta las variables de diseño, sobre todo porque estas deben predecirse a lo largo del tiempo y del espacio.

En general, el argumento más significativo del método de diseño es la resistencia, por tanto, deben estudiarse con el máximo cuidado tanto su valor medio como su intervalo de variación; la falta de precisión en la estimación de esta variable representa la mayor parte de la incertidumbre respecto al comportamiento del pavimento resultante. Por lo tanto la resistencia es una variable que depende de las características del suelo, condiciones climatológicas, drenaje, procedimientos de construcción y conservación, así como de las variaciones de dichos factores a lo largo de la carretera y de su vida de servicio.

El método mantiene el concepto de espesor equivalente ( $z_i = \sum a_i D_i$ ), para analizar casos particulares de capas estabilizadas con diferentes agentes.

Para capas estabilizadas con cal, cemento o asfalto, situados a diversas profundidades, el coeficiente de equivalencia estructural ( $a_i$ ) tiene limitaciones, y regularmente utilizan valores de 1.4, ya que la eficiencia del material dependerá de sus características mecánicas y de su ubicación en la estructura.

Cada capa (i) tiene un espesor equivalente  $a_i D_i$ , donde  $D_i$  es el espesor real y  $a_i$  es un coeficiente de equivalencia estructural que toma en cuenta la capacidad de repartición de carga del material, fig. 3 - 17 donde también se muestra el cálculo de espesores de diseño.

El tránsito está caracterizado por la variable  $\Sigma I$  o número de aplicaciones de carga estándar previsto al término del plazo de análisis, para su cálculo se empleará la siguiente fórmula:

$$\Sigma I = (\text{TDPA})(C_D)(C_T) \sum_{i=1}^p C_i (W_i \Sigma d_m + (1 - W_i) \Sigma d_v)$$

donde:

$\Sigma I$  número de aplicaciones de carga estándar producidas por p tipos de vehículos durante m años.

TDPA volumen de tránsito diario promedio anual en ambas direcciones en el año inicial de operación.

$C_D$  proporción del número de vehículos en el carril de proyecto (distribución direccional). Se recomienda emplear 0.5 para carreteras de dos carriles, 0.4 a 0.5 para cuatro carriles y 0.3 a 0.4 para seis o más carriles.

$C_T$  coeficiente de acumulación del tránsito al cabo de m años de operación, con una tasa de incremento anual de tránsito igual a r, y se calcula con la siguiente fórmula:

$$C_T = 365 \frac{(1+r)^m - 1}{r}$$

$C_i$  proporción de cada tipo de vehículo (i) en la corriente de tránsito (composición).

$W_i$  proporción de vehículos cargados por cada tipo de vehículo (i).

$d_m$  coeficiente de daño del vehículo tipo i cargado.

$d_v$  coeficiente de daño del vehículo tipo i vacío.

El coeficiente de daño de un vehículo a determinada profundidad es la suma de los coeficientes individuales de sus ejes o grupos de ejes a esa profundidad; como los coeficientes de daño varían con la profundidad, también varía el tránsito equivalente, en problemas de diseño no se conoce, a priori, la profundidad de cada capa, lo cual plantea teóricamente una dificultad en el proyecto. Para resolver este problema se recomienda diseñar el espesor de carpeta como una capa superficial con  $Z = 0$  cm con la profundidad que elija el proyectista; para determinar el espesor de las capas restantes, se puede calcular  $\Sigma I$  para  $Z = 30$  cm.

Se hace notar que durante el plazo de análisis, la composición, distribución direccional, proporción de vehículos vacíos y tasa de crecimiento anual de tránsito permanecen constantes. En la medida que se cumplan estas hipótesis y de la exactitud de los datos de tránsito inicial, se tendrá mayor o menor certeza en la determinación de  $\Sigma I$ .

Aunque teóricamente el nivel de confianza puede variar en forma continua de 0 a 1, para fines prácticos se presentan gráficas de diseño entre 0.5 y 0.9 únicamente, las cuales cubren todas las opciones necesarias para casos usuales. A mayor nivel de confianza se tendrán mayores espesores y mejor estructuración, por ejemplo, cambiar de un nivel de confianza a otro mayor puede significar pasar de carpeta de un riego a carpeta de concreto asfáltico. Para elegir el nivel de confianza, se debe tomar en cuenta el tipo e importancia de la carretera, procedimientos y control de construcción, tipo de conservación prevista y riesgos que se quieran aceptar. Para capas de base deberá considerarse un  $VRS_z$  máximo de 120, para fines de diseño de espesor de carpeta; valores mayores pueden dar por resultado carpeta demasiado delgadas para el tránsito que se tenga bajo consideración. Cuando se disponga de materiales de base con valores de  $VRS$  mayores de 120, el proyecto deberá limitarse a este valor.

**Determinación de espesores:** A continuación se calcularán los espesores reales de las diversas capas que forman el pavimento del cuerpo de la autopista Matamoros-Reynosa, siguiendo el método ya mencionado del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

a) Los valores relativos de soporte críticos ( $VRS_z$ ), proporcionados por los resultados de laboratorio, para el diseño de la autopista fueron los siguientes:

▲ Terreno natural,  $VRS_z = 2.0 \%$

▲ Subyacente,  $VRS_z = 5.0 \%$

▲ Subrasante,  $VRS_z = 10.0 \%$

▫ Subbase estabilizada con 1.5% de cal en peso,  $VRS_z = 101.30\%$ .

▫ Base estabilizada con 3.0% de cal en peso,  $VRS_z = 171.80\%$ .

b) Para calcular el número de aplicaciones de carga estándar ( $\Sigma 1$ ), producida por 6 390, durante 16 años, considerando una tasa de crecimiento del 4% se realizaron los cálculos de acuerdo a la fig. 3 - 15.

En la cual se puede observar que esta compuesta de diversas partes las cuales son:

▫ Tipo de vehículo: Se consideran los diversos tipos de vehículos, que se espera que transiten por la autopista.

▫ Composición del tránsito: Es el porcentaje que corresponde a cada tipo de vehículos con respecto al total del tránsito. Según estimaciones realizadas, se calcula que el tránsito diario promedio anual (TDPA) para finales del año de 1995, en el cual está planeado el inicio de operaciones de la autopista, será de 6 390 vehículos diarios. La composición vehicular proyectada está prevista que sea la siguiente:

TIPO	PORCENTAJE
Automóviles	85 %
Autobuses	4 %
Camiones	11 %

La clasificación que se le da a la composición vehicular, esta formada y distribuida de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}A - 2 &= 85 \% \\B - 2 &= 4 \% \\C - 2 &= 8.25 \% \\C - 3 &= 1.32 \% \\T3 - S2 &= 0.77 \% \\T2 - S1 - R2 &= 0.66 \%\end{aligned}$$

▫ Coeficiente de daño: Son los correspondientes a cada tipo de vehículo cargado a diferentes profundidades.

▫ Número de ejes equivalentes: Es el producto de multiplicar la columna de composición de tránsito por la de coeficientes de daño para las diferentes profundidades.

▫ Ejes equivalentes para tránsito unitario: Es la sumatoria de cada una de las profundidades que conforman el número de ejes equivalentes.

▫ TDPA (tránsito diario promedio anual) inicial en el carril de proyecto. Es el valor de TDPA, multiplicado por el coeficiente de distribución, para este caso será de 0.45 ya que es el valor para caminos de 4 carriles.

±  $C_T$ : Coeficiente de acumulación del tránsito al cabo de 16 años de operación,  $n$ , con una tasa de incremento anual de tránsito,  $r$ , igual al 4 %.

±  $\Sigma I$ : Es el resultado de la multiplicación de los renglones correspondientes a ejes equivalentes para tránsito unitario, TDPA inicial en el carril de proyecto y  $C_T$ .

Generalmente se recomienda emplear el valor de  $\Sigma I$  a la profundidad de 0 cm para obtener los espesores de las capas superficiales (carpeta y base) y de 30 cm para los espesores de las capas profundas (subbase, subrasante, subyacente y cuerpo de terraplén).

En fig. 3 -15, se realizaron los cálculos del tránsito equivalente acumulado, se puede observar que los valores obtenidos para las profundidades respectivas de 0 y 15 cm ( $8.31 \times 10^6$  y  $8.20 \times 10^6$ ) y las profundidades correspondientes respectivas de 30 y 60 cm ( $1.01 \times 10^7$  y  $1.20 \times 10^7$ ), son muy parecidas entre ellas, es por esta razón que se utilizaron los valores de  $8.31 \times 10^6$  y  $1.01 \times 10^7$  de las profundidades respectivas de 0 y 30 cm, para determinar los espesores de las capas superficiales y así mismo de las capas profundas.

c) Tratándose de una autopista, el nivel de confianza ( $Q_u$ ) empleado es de 0.9, el cual indica la gráfica se debe utilizar para encontrar los espesores equivalentes.

d) Entrando en la gráfica fig. 3 - 16, con un nivel de confianza  $Q_u = 0.9$ , se pueden leer los valores correspondientes a cada espesor utilizando el dato del  $VRS_x$  y el  $\Sigma I$ , mostrados en esta gráfica, rápidamente con este par de valores se obtienen los valores para cada espesor del pavimento.

e) Los espesores reales se obtienen dividiendo los espesores de cada capa ( $D_i$ ) por su respectivo coeficiente estructural ( $a_i$ ), dicho coeficiente se incrementa a 1.4 en la base y la subbase ya que ambas fueron estabilizadas con cal; las demás capas mantienen un valor de 1.0 ya que no fueron alteradas con ningún producto químico industrial. Los espesores finales se pueden ver también en la fig. 3 - 17, los cuales fueron:

CAPA	$D_i$	$a_i$	ESPESOR REAL	ESPEORES DEL PROYECTO, CON SUS RESPECTIVAS CAPAS ESTABILIZADAS CON CAL
CARPETA	12 cm	1	6.0 cm	7.5 cm
BASE ESTABILIZADA CON CAL	21 cm	1.4	15 cm	15 cm
SUBBASE ESTABILIZADA CON CAL	17 cm	1.4	12.14 cm	15 cm
SUBRASANTE	22 cm	1.0	22 cm	30 cm
SUBYACENTE	44 cm	1.0	44 cm	50 cm

TIPO DE VEHICULO	COMPOSICION DEL TRANSITO	COEFICIENTES DE DAÑO				No. DE EJES EQUIVALENTES 8.20 Tm.				
		Z=0	Z=15	Z=30	Z=60	Z=0	Z=15	Z=30	Z=60	
A-2	0.850	0.004	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	
B-2	0.040	2.000	1.890	2.457	2.939	0.080	0.076	0.098	0.118	
C-2	0.083	2.000	1.890	2.457	2.939	0.166	0.157	0.204	0.244	
C-3	0.013	3.000	2.817	2.457	2.940	0.039	0.037	0.032	0.038	
T3-S2	0.008	5.000	5.285	4.747	5.761	0.040	0.042	0.038	0.046	
T2-S1-R2	0.007	5.000	6.513	9.327	11.399	0.035	0.046	0.065	0.080	
$\Sigma$ - 1.000						EJES EQUIVALENTES PARA TRANSITO	0.363	0.358	0.437	0.526
						TDPA INICIAL EN EL CARRIL DE DISEÑO	2875.50	2875.50	2875.50	2875.50
						CT	7965.95	7965.95	7965.95	7965.95
						$\Sigma L$	8.31 E6	8.20 E6	1.01 E7	1.20 E7

FIG. 3 - 15 CALCULO DEL TRANSITO EQUIVALENTE ACUMULADO

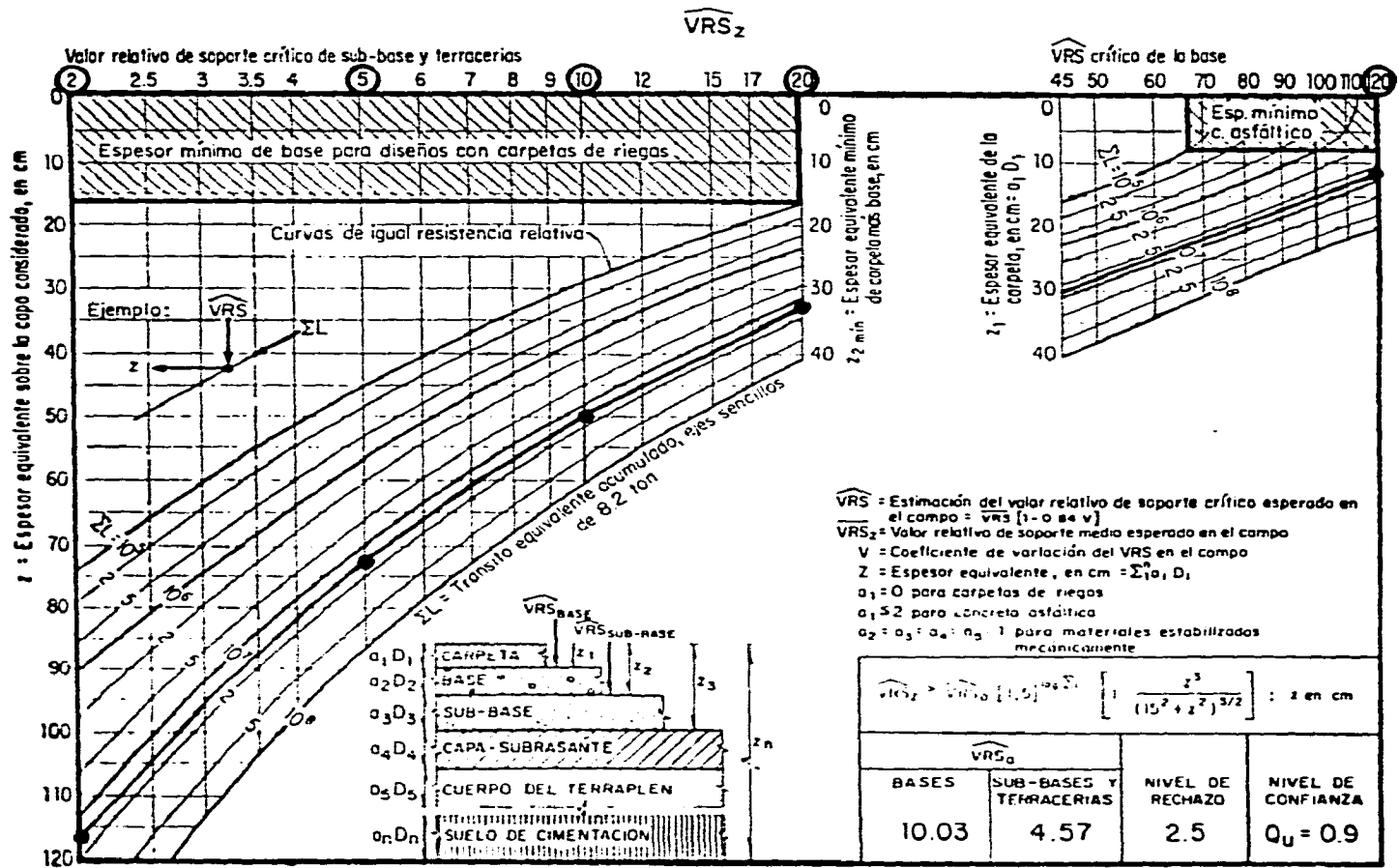
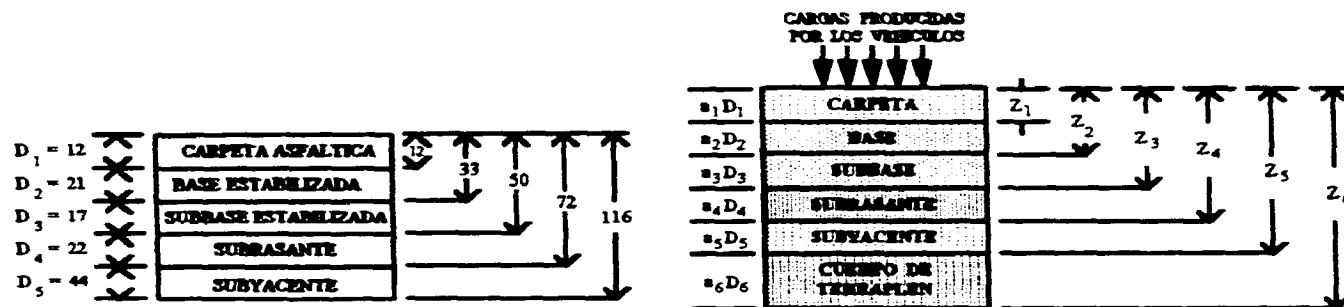


FIG. 3-16 GRAFICA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE CARRETERAS CON PAVIMENTO FLEXIBLE



CAPA	ESPEJOR DE CADA CADA $D_i$	COEFICIENTE DE EQUIVALENCIA ESTRUCTURAL $a_i$	ESPEJOR REAL $(D_i / a_i)$	ESPEJORES DEL PROYECTO, CON SUS RESPECTIVAS CAPAS ESTABILIZADAS CON CAL
CARPETA ASFALTICA	12 cm	2	6 cm	7.5 cm
BASE ESTABILIZADA CON CAL	21 cm	1.4	15 cm	15 cm
SUBBASE ESTABILIZADA CON CAL	17 cm	1.4	12.14 cm	15 cm
SUBRASANTE	22 cm	1	22 cm	30 cm
SUBYACENTE	44 cm	1	44 cm	50 cm

FIG. 3-17 ESPESORES EQUIVALENTES Y ESPESORES REALES



La capa de subyacente por tratarse de una autopista con un TDPA mayor de 5 000, las normas nos indican un espesor mínimo de 50 cm para dicha capa. En la subrasante se observa algo similar, un espesor obtenido por debajo de los 30 cm, se metió de 30 cm por las indicaciones que da la S.C.T.

#### **III.4.1. VENTAJAS ECONÓMICAS AL APLICAR ESTE MÉTODO CON RESPECTO A MÉTODOS TRADICIONALES.**

A continuación se presenta un presupuesto, calculado para el suelo estabilizado con cal, comparándolo contra uno construido en la forma tradicional; para ello se tomarán los espesores obtenidos en el diseño estructural del pavimento flexible, los cuales se obtuvieron en este trabajo, siguiendo los lineamientos propuestos por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

En dicho análisis se llegará a un costo final, el cual es arrojado para un suelo estabilizado con cal, obteniéndose un ahorro económico del 21.65 % en términos reales, en comparación con el no estabilizado; la ventaja de un suelo estabilizado con cal, es además, reducir los espesores en la estructura del pavimento, aumentar la resistencia de los materiales empleados; los ahorros significativos serán también en el mantenimiento que se le dará al pavimento durante su funcionamiento, ya que su vida económicamente útil es mucho mayor que uno no estabilizado.

## COSTO HORARIO DE MAQUINARIA

### CAMION DE VOLTRO FAMSA DE 7M3 MOTOR DIESEL DE 140 H.P.

Valor de compra (Vc):	N\$376,776	Pot. nominal motor (Pn): PH	140
Valor de rescate (Vre):	15%	Capacidad Carter (c): lit.	7
Valor de neumático (Vn):	N\$7,989	Precio combustible (Pc):	N\$1.32
Vida económica (Ve): hrs.	8,400	Factor de operación (Fo):	40%
Horas anuales (Ha): hrs.	1,400	Precio de lubricante (Pl):	N\$14.90
Tasa de interés (i):	23%	Tiempo p/cambio aceite (t): hrs.	140
Prima de seguro (s):	3%	Coef. motor diesel (Cd):	0.1514
Coefic. de mantenimiento (Q):	110%	Horas efect. de turno (H): hrs.	8
Coefic. de almacenamiento (k):	0%	Salario ayudante operador (Sa):	N\$57.57
Vida eco. neumático. (Vem): hrs.	1,800	Salario operador (So):	N\$93.36

#### 1.- CARGOS FIJOS:

DEPRECIACION:  $D = (V_a - V_r) / V_e$        $D = (368,787 - 55,318) / 8,400$       **N\$37.31**

DONDE:  $V_a = V_c - V_n$  ;  $V_r = V_a * V_{re}$

$V_a = 376,776 - 7,989$       **N\$368,787**

$V_r = 368,787 * 0.15$       **N\$55,318**

INVERSION:  $I = ((V_a + V_r) / (2 * H_a)) * i$        $I = ((368,787 + 55,318) / (2 * 1,400)) * 0.23$       **N\$34.84**

SEGUROS:  $S = ((V_a + V_r) / (2 * H_a)) * s$        $S = ((368,787 + 55,318) / (2 * 1,400)) * 0.03$       **N\$4.54**

MANTENIMIENTO:  $M = Q * D$        $M = 1.10 * 37.32$       **N\$41.05**

ALMACENAJE:  $A = k * D$        $A = 0.00 * 37.32$

**CARGOS FIJOS: N\$117.75**

#### 2.- CARGOS POR CONSUMOS:

COMBUSTIBLES:  $E = C_d * P_o * P_c$        $E = 0.1514 * 56 * 1.32$       **N\$11.19**

$P_o = P_n * F_o$        $P_o = 140 * 0.4$       **56**

LUBRICANTES:  $A = (c / t) + (.0035 * P_o) * P_l$        $A = (7 / 140) + (.0035 * 56) * 14.9$       **N\$1.09**

NEUMATICOS:  $LL = V_n / V_{em}$        $LL = 7,989 / 1,800$       **N\$4.44**

**CARGOS POR CONSUMO: N\$18.52**

#### 3.- CARGOS POR OPERACION:

OPERACION:  $O = (S_a + S_o) / H$        $O = (57.57 + 93.36) / 8$       **N\$18.87**

**CARGOS POR OPERACION: N\$18.87**

**COSTO HORARIO: N\$155.14**

**MOTONIVELADORA CATERPILAR 140 DE 180 H.P.**

Valor de compra (Vc):	NS1,376,167	Pot. nominal motor (Pn): PI1	180
Valor de rescate (Vre):	10%	Capacidad Carter (c): lit.	28
Valor de rescate (Vn):	NS20,771	Precio combustible (Pc):	NS1.67
Vida económica (Ve): hrs.	15,400	Factor de operación (Fo):	80%
Horas anuales (Ha): hrs.	1,400	Precio de lubricante (Pl):	NS14.50
Tasa de interés (i):	23%	Tiempo p/cambio aceite (t): hrs.	160
Prima de seguro (s):	3%	Coef. motor diesel (Cd):	0.1514
Coef. de mantenimiento (Q):	120%	Horas efect. de turno (H): hrs.	8
Coef. de almacenamiento (k):	0%	Salario ayudante operador (Sa):	NS57.57
Vida eco. automática (Vem): hrs.	4,000	Salario operador (So):	NS124.50

**1.- CARGOS FIJOS:**

DEPRECIACION:  $D = (V_c - V_r) / V_e$        $D = (1,355,396 - 135,540) / 15,400$       **NS79.21**

DONDE:  $V_r = V_c - V_n$  ;  $V_r = V_c - V_n$

$V_n = 1,376,167 - 20,771$       **NS1,355,396**

$V_r = 1,355,396 * 0.10$       **NS135,540**

INVERSION:  $I = ((V_c + V_r) / (2 * H_a)) * i$        $I = ((1,355,396 + 135,540) / (2 * 1,400)) * 0.23$       **NS122.47**

SEGUROS:  $S = ((V_c + V_r) / (2 * H_a)) * s$        $S = ((1,355,396 + 135,540) / (2 * 1,400)) * 0.03$       **NS15.97**

MANTENIMIENTO:  $M = Q * D$        $M = 1.20 * 79.21$       **NS96.05**

ALMACENAJE:  $A = k * D$        $A = 0.00 * 79.21$

**CARGOS FIJOS: NS112.71**

**2.- CARGOS POR CONSUMOS:**

COMBUSTIBLES:  $E = C_d * P_n * P_c$        $E = 0.1514 * 144 * 1.67$       **NS36.41**

$P_n = P_n * F_o$        $P_n = 180 * 0.8$       **144**

LUBRICANTES:  $A = (c / t) + (.0035 * P_n) * P_l$        $A = (28 / 160) + ((.0035 * 144) * 14.5)$       **NS7.48**

NEUMATICOS:  $LL = V_n / V_{em}$        $LL = 20,771 / 4,000$       **NS6.19**

**CARGOS POR CONSUMO: NS49.08**

**3.- CARGOS POR OPERACION:**

OPERACION:  $O = (S_a + S_o) / H$        $O = (57.57 + 124.5) / 8$       **NS22.76**

**CARGOS POR OPERACION: NS22.76**

**COSTO HORARIO: NS304.55**

**TRACTOCAMION EQUIPADO CON TOLVA DE 30 T DE CAPACIDAD**

Valor de compra (Vc):	N\$570,879	Pot. nominal motor (Pn): PH	280
Valor de rescate (Vre):	15%	Capacidad Carter (c): lts.	27
Valor de neumático (Vn):	N\$57,564	Precio combustible (Pc):	N\$1.32
Vida económica (Ve): hrs.	15,400	Factor de operación (Po):	70%
Horas anuales (Ha): hrs.	1,400	Precio de lubricante (Pl):	N\$14.50
Tasa de interés (i):	23%	Tiempo p/cambio aceite (t): hrs.	160
Prima de seguro (s):	3%	Coef. motor diesel (Cd):	0.1514
Cofic. de mantenimiento (Q):	120%	Horas efect. de turno (H): hrs.	8
Cofic. de almacenamiento (k):	0%	Salario ayudante operador (Sa):	N\$57.57
Vida eco. neumático. (Ven): hrs.	4,000	Salario operador (So):	N\$124.50

**1.- CARGOS FIJOS:**

DEPRECIACION:  $D = (V_a - V_r) / V_e$        $D = (513,315 - 76,997) / 15,400$       **N\$28.33**

DONDE:  $V_a = V_c - V_{re}$  ;  $V_r = V_a * V_{re}$

$V_a = 570,879 - 57,564$       **N\$513,315**

$V_r = 513,315 * 0.15$       **N\$76,997**

INVERSION:  $I = ((V_a + V_r) / (2 * H_a)) * i$        $I = ((513,315 + 76,997) / (2 * 1,400)) * 0.23$       **N\$40.40**

SEGUROS:  $S = ((V_a + V_r) / (2 * H_a)) * s$        $S = ((513,315 + 76,997) / (2 * 1,400)) * 0.03$       **N\$4.32**

MANTENIMIENTO:  $M = Q * D$        $M = 1.20 * 28.33$       **N\$34.00**

ALMACENAJE:  $A = k * D$        $A = 0.00 * 28.33$

**CARGOS FIJOS: N\$117.15**

**2.- CARGOS POR CONSUMOS:**

COMBUSTIBLES:  $E = C_d * P_o * P_c$        $E = 0.1514 * 196 * 1.32$       **N\$39.17**

$P_o = P_n * F_o$        $P_o = 280 * 0.7$       **196**

LUBRICANTES:  $A = (c / t) + (.0035 * P_o) * P_l$        $A = (27 / 160) + (.0035 * 196) * 14.5$       **N\$10.12**

NEUMATICOS:  $LL = V_n / V_{en}$        $LL = 57,564 / 4,000$       **N\$14.39**

**CARGOS POR CONSUMO: N\$63.68**

**3.- CARGOS POR OPERACION:**

OPERACION:  $O = (S_a + S_o) / H$        $O = (57.57 + 124.5) / 8$       **N\$22.76**

**CARGOS POR OPERACION: N\$22.76**

**COSTO HORARIO: N\$203.59**

**TRACTOCAMION PIPA, EQUIPADO CON TANQUE ELIPTICO DE 20 M3 DE CAPACIDAD**

Valor de compra (Vc):	N\$23,375	Pot. nominal motor (Pn): P11	280
Valor de rescate (Vre):	15%	Capacidad carter (c): lit.	27
Valor de neumático (Va):	N\$57,564	Precio combustible (Pc):	N\$1.32
Vida económica (Ve): hrs.	15,400	Factor de operación (Fo):	70%
Horas anuales (Ha): hrs.	1,400	Precio de lubricante (Pl):	N\$14.50
Tasa de interés (i):	23%	Tiempo p/cambio aceite (t): hrs.	160
Prima de seguro (s):	3%	Coef. motor diesel (Cd):	0.1514
Coef. de mantenimiento (Q):	120%	Horas efect. de turno (Hf): hrs.	8
Coef. de almacenamiento (k):	0%	Salario ayudante operador (Sa):	N\$57.57
Vida eco. neumático. (Ven): hrs.	4,000	Salario operador (So):	N\$124.50

**1.- CARGOS FIJOS:**

DEPRECIACION:  $D = (V_a - V_r) / V_e$   $D = (465,811 - 69,872) / 15,400$  **N\$25.71**

DONDE:  $V_a = V_c - V_m$ ;  $V_r = V_a * V_{re}$

$V_a = 23,375 - 57,564$  **N\$465,811**

$V_r = 465,811 * 0.15$  **N\$69,872**

INVERSION:  $I = ((V_a + V_r) / (2 * H_a)) * i$   $I = ((465,811 + 69,872) / (2 * 1,400)) * 0.23$  **N\$44.00**

SEGUROS:  $S = ((V_a + V_r) / (2 * H_a)) * s$   $S = ((465,811 + 69,872) / (2 * 1,400)) * 0.03$  **N\$6.74**

MANTENIMIENTO:  $M = Q * D$   $M = 1.20 * 25.71$  **N\$30.85**

ALMACENAJE:  $A = k * D$   $A = 0.00 * 25.71$

**CARGOS FIJOS: N\$106.30**

**2.- CARGOS POR CONSUMOS:**

COMBUSTIBLES:  $E = C_d * P_o * P_c$   $E = 0.1514 * 196 * 1.32$  **N\$39.17**

$P_o = P_n * F_o$   $P_o = 280 * 0.7$  **196**

LUBRICANTES:  $A = (c / t) + (.0035 * P_o) * P_l$   $A = (27 / 160) + (.0035 * 196) * 14.5$  **N\$18.12**

NEUMATICOS:  $LL = V_a / V_{en}$   $LL = 57,564 / 4,000$  **N\$14.39**

**CARGOS POR CONSUMO: N\$63.68**

**3.- CARGOS POR OPERACION:**

OPERACION:  $O = (S_a + S_o) / H$   $O = (57.57 + 124.5) / 8$  **N\$22.76**

**CARGOS POR OPERACION: N\$22.76**

**COSTO HORARIO: N\$192.74**

**COMPACTADOR DYNAPAC CA-15, CON MOTOR DIESEL DE 85 H.P.**

Valor de compra (Vc) :	N\$234,142	Pot. nominal motor (Pn) : PH	85
Valor de rescate (Vre) :	10%	Capacidad Carter (c) : lit.	15
Valor de neumático (Vn) :	N\$2,981	Precio combustible (Pc) :	N\$1.67
Vida económica (Ve) : hrs.	4,400	Factor de operación (Fo) :	75%
Horas anuales (Ha) : hrs.	1,000	Precio de lubricante (Pl) :	N\$11.50
Tasa de interés (i) :	23%	Tiempo p/cambio aceite (t) : hrs.	100
Prima de seguro (s) :	3%	Coef. motor diesel (Cd) :	0.1514
Coef. de mantenimiento (Q) :	100%	Horas efect. de turno (H) : hrs.	8
Coef. de almacenamiento (k) :	0%	Salario ayudante operador (Sa) :	N\$57.57
Vida eco. neumático. (Ven) : hrs.	3,000	Salario operador (So) :	N\$93.36

**1.- CARGOS FIJOS :**

**DEPRECIACION :**  $D = (V_a - V_r) / V_e$        $D = (231,161 - 23,116) / 4,400$       **N\$47.28**

**DONDE :**  $V_a = V_c - V_n$  ;  $V_r = V_n * V_{re}$

$V_a = 234,142 - 2,981$       **N\$231,161**

$V_r = 231,161 * 0.10$       **N\$23,116**

**INVERSION :**  $I = ((V_a + V_r) / (2 * H_a)) * i$        $I = ((231,161 + 23,116) / (2 * 1,000)) * 0.23$       **N\$29.24**

**SEGUROS :**  $S = ((V_a + V_r) / (2 * H_a)) * s$        $S = ((231,161 + 23,116) / (2 * 1,000)) * 0.03$       **N\$3.81**

**MANTENIMIENTO :**  $M = Q * D$        $M = 1.0 * 47.28$       **N\$47.28**

**ALMACENAJE :**  $A = k * D$        $A = 0.00 * 47.28$

**CARGOS FIJOS : N\$127.62**

**2.- CARGOS POR CONSUMOS :**

**COMBUSTIBLES :**  $E = C_d * P_o * P_c$        $E = 0.1514 * 63.75 * 1.67$       **N\$16.12**

$P_o = P_n * F_o$        $P_o = 85 * 0.75$       **63.75**

**LUBRICANTES :**  $A = (c / t) + ((.0035 * P_o) * P_l)$        $A = (15 / 100) + ((.0035 * 63.75) * 11.5)$       **N\$2.72**

**NEUMATICOS :**  $LL = V_n / V_{en}$        $LL = 2,981 / 3,000$       **N\$9.94**

**CARGOS POR CONSUMO : N\$19.81**

**3.- CARGOS POR OPERACION :**

**OPERACION :**  $O = (S_a + S_o) / H$        $O = (57.57 + 93.36) / 8$       **N\$18.87**

**CARGOS POR OPERACION : N\$18.87**

**COSTO HORARIO : N\$166.32**

**ESCOBA MECANICA DE 76 H.P.**

Valor de compra (Vc):	N\$274,586	Pot. nominal motor (Pn): PH	76
Valor de rescate (Vre):	15%	Capacidad Carter (c): lit.	7
Valor de neumático (Vn):	N\$4,460	Precio combustible (Pc):	N\$11.32
Vida económica (Ve): hrs.	8,400	Factor de operación (Fo):	60%
Horas anuales (Ha): hrs.	1,400	Precio de lubricante (Pl):	N\$11.50
Tasa de interés (i):	23%	Tiempo p/cambio aceite (t): hrs.	160
Prima de seguro (s):	3%	Cof. motor diesel (Cd):	0.1514
Cofic. de mantenimiento (Q):	120%	Horas efect. de turno (H): hrs.	8
Cofic. de abramamiento (k):	0%	Salario ayudante operador (Sa):	N\$0.00
Vida eco. neumático. (Ven): hrs.	2,500	Salario operador (So):	N\$57.57

**1.- CARGOS FIJOS:**

DEPRECIACION:  $D = (V_a - V_r) / V_e$        $D = (270,126 - 40,519) / 8,400$       **N\$37.33**

DONDE:  $V_a = V_c - V_n$  ;  $V_r = V_n \cdot V_{re}$

$V_a = 274,586 - 4,460$       **N\$270,126**

$V_r = 270,126 \cdot 0.15$       **N\$40,519**

INVERSION:  $I = ((V_a + V_r) / (2 \cdot H_a)) \cdot i$        $I = ((270,126 + 40,519) / (2 \cdot 1,400)) \cdot 0.23$       **N\$25.52**

SEGUROS:  $S = ((V_a + V_r) / (2 \cdot H_a)) \cdot s$        $S = ((270,126 + 40,519) / (2 \cdot 1,400)) \cdot 0.03$       **N\$3.33**

MANTENIMIENTO:  $M = Q \cdot D$        $M = 1.20 \cdot 27.33$       **N\$32.80**

ALMACENAJE:  $A = k \cdot D$        $A = 0.00 \cdot 27.33$       **N\$0.00**

**CARGOS FIJOS: N\$88.98**

**2.- CARGOS POR CONSUMOS:**

COMBUSTIBLES:  $E = C_d \cdot P_o \cdot P_c$        $E = 0.1514 \cdot 45.6 \cdot 1.32$       **N\$9.11**

$P_o = P_n \cdot F_o$        $P_o = 76 \cdot 0.60$       **45.6**

LUBRICANTES:  $A = (c / t) + (.0035 \cdot P_o) \cdot P_l$        $A = (7/160) + ((.0035 \cdot 45.7) \cdot 11.5)$       **N\$1.00**

NEUMATICOS:  $LL = V_n / V_{em}$        $LL = 4,460 / 2,500$       **N\$1.78**

**CARGOS POR CONSUMO: N\$12.78**

**3.- CARGOS POR OPERACION:**

OPERACION:  $O = (S_a + S_o) / H$        $O = 57.57 / 8$       **N\$7.20**

**CARGOS POR OPERACION: N\$7.20**

**COSTO HORARIO: N\$108.95**

**CAMION PETROLIZADORA FAMSA DE 6 000 L CON MOTOR DIESEL DE 130 H.P.**

Valor de compra (Vc) :	N\$393,077	Pot. nominal motor (Pn) : PH	130
Valor de rescate (Vr) :	15%	Capacidad Carter (c) : ln.	7
Valor de neumático (Vn) :	N\$7,989	Precio combustible (Pc) :	N\$11.32
Vida económica (Ve) : hrs.	8,400	Factor de operación (Fo) :	40%
Horas anuales (Ha) : hrs.	1,400	Precio de lubricante (Pl) :	N\$14.50
Tasa de interés (i) :	23%	Tiempo p/cambio aceite (t) : hrs.	140
Prima de seguro (s) :	3%	Coef. motor diesel (Cd) :	0.1514
Coefic. de mantenimiento (Q) :	110%	Horas efect. de turno (H) : hrs.	8
Coefic. de almacenamiento (k) :	0%	Salario ayudante operador (Sa) :	N\$57.57
Vida eco. neumático. (Ven) : hrs.	1,800	Salario operador (So) :	N\$93.36

**1.- CARGOS FIJOS :**

DEPRECIACION :  $D = (V_c - V_r) / V_e$        $D = (393,077 - 57,763) / 8,400$       **N\$38.97**

DONDE :  $V_e = V_c - V_n$  ;  $V_r = V_e * V_{re}$

$V_e = 393,077 - 7,989$       **N\$385,088**

$V_r = 385,088 * 0.15$       **N\$57,763**

INVERSION :  $I = ((V_e + V_r) / (2 * H_a)) * i$        $I = ((385,088 + 57,763) / (2 * 1,400)) * 0.23$       **N\$36.50**

SEGUROS :  $S = ((V_e + V_r) / (2 * H_a)) * s$        $S = ((385,088 + 57,763) / (2 * 1,400)) * 0.03$       **N\$4.74**

MANTENIMIENTO :  $M = Q * D$        $M = 1.10 * 38.97$       **N\$42.86**

ALMACENAJE :  $A = k * D$        $A = 0.00 * 38.97$

**CARGOS FIJOS : N\$122.95**

**2.- CARGOS POR CONSUMOS :**

COMBUSTIBLES :  $E = C_d * P_o * P_c$        $E = 0.1514 * 52 * 1.32$       **N\$10.39**

$P_o = P_n * F_o$        $P_o = 130 * 0.4$       **52**

LUBRICANTES :  $A = (c / t) + (.0035 * P_o) * P_l$        $A = (7/140) + ((.0035 * 52) * 14.5)$       **N\$2.69**

NEUMATICOS :  $LL = V_n / V_{en}$        $LL = 7,989 / 1,800$       **N\$4.44**

**CARGOS POR CONSUMO : N\$17.52**

**3.- CARGOS POR OPERACION :**

OPERACION :  $O = (S_a + S_o) / H$        $O = (57.57 + 93.36) / 8$       **N\$18.07**

**CARGOS POR OPERACION : N\$18.07**

**COSTO HORARIO : N\$159.34**



**PAVIMENTADORA BARBER-GREEN, SB-131, MOTOR DIESEL JOHN DEERE DE 130 H.P.**

Valor de compra (Vc):	N\$26,931	Pot. nominal motor (Pn):	PH	130
Valor de rescate (Vre):	10%	Capacidad Carter (c):	lit.	19
Valor de neumático (Vn):	N\$25,216	Precio combustible (Pc):		N\$1.67
Vida económica (Ve):	lrv. 7,000	Factor de operación (Fo):		70%
Horas anuales (Ha):	lrv. 1,000	Precio de lubricante (Pl):		N\$11.50
Tasa de interés (i):	15%	Tiempo p/cambio aceite (t):	lrv.	140
Prima de seguro (s):	3%	Coef. motor diesel (Cd):		0.1514
Coef. de mantenimiento (Q):	100%	Horas efect. de turno (H):	lrv.	8
Coef. de almacenamiento (k):	0%	Salario ayudante operador (Sa):		N\$57.57
Vida eco. neumático. (Ven):	lrv. 3,500	Salario operador (So):		N\$124.50

**1.- CARGOS FIJOS:**

DEPRECIACION:  $D = (V_a - V_r) / V_a$        $D = (801,735 - 80,174) / 7,000$       **N\$103.00**

DONDE:  $V_a = V_c - V_r$  ;  $V_r = V_n \cdot V_{re}$

$V_a = 26,931 - 25,216$       **N\$1,715**

$V_r = 801,735 \cdot 0.10$       **N\$80,174**

INVERSION:  $I = ((V_a + V_r) / (2 \cdot H_a)) \cdot i$        $I = ((801,735 + 80,174) / (2 \cdot 1,000)) \cdot 0.15$       **N\$66.14**

SEGUROS:  $S = ((V_a + V_r) / (2 \cdot H_a)) \cdot s$        $S = ((801,735 + 80,174) / (2 \cdot 1,000)) \cdot 0.03$       **N\$13.23**

MANTENIMIENTO:  $M = Q \cdot D$        $M = 1.0 \cdot 103.00$       **N\$103.00**

ALMACENAJE:  $A = k \cdot D$        $A = 0.00 \cdot 103.00$

**CARGOS FIJOS: N\$285.51**

**2.- CARGOS POR CONSUMOS:**

COMBUSTIBLES:  $E = C_d \cdot P_c \cdot P_n$        $E = 0.1514 \cdot 91 \cdot 1.67$       **N\$23.01**

$P_n = P_n \cdot F_o$        $F_o = 130 \cdot 0.7$       **91**

LUBRICANTES:  $A = (c / t) + (.0035 \cdot P_c) \cdot P_l$        $A = (19 / 140) + (.0035 \cdot 91) \cdot 11.5$       **N\$3.00**

NEUMATICOS:  $LL = V_n / V_{en}$        $LL = 25,216 / 3,500$       **N\$7.20**

**CARGOS POR CONSUMO: N\$34.01**

**3.- CARGOS POR OPERACION:**

OPERACION:  $O = (S_a + S_o) / H$        $O = (57.57 + 124.5) / 8$       **N\$22.76**

**CARGOS POR OPERACION: N\$22.76**

**COSTO HORARIO: N\$342.30**

**APLANADORA DE TRES RODILLOS COMPACTO-HUBER CD-900, CON MOTOR DE 73 H.P.**

Valor de compra (Vc) :	N\$287,037	Pot. nominal motor (Pn) :	73
Valor de rescate (Vre) :	10%	Capacidad Carter (c) :	lit. 12
Valor de neumático (Va) :	N\$0	Precio combustible (Pc) :	N\$1.67
Vida económica (Ve) : hrs.	6,000	Factor de operación (Po) :	70%
Horas anuales (Ha) : hrs.	1,200	Precio de lubricante (Pl) :	N\$11.50
Tasa de interés (i) :	15%	Tiempo p/cambio aceite (t) : hrs.	100
Prima de seguro (s) :	3%	Coef. motor diesel (Cd) :	0.1514
Coef. de mantenimiento (Q) :	80%	Horas efect. de turno (H) : hrs.	8
Coef. de almacenamiento (k) :	0%	Salario ayudante operador (Sa) :	N\$0.00
Vida eco. neumático. (Vna) : hrs.	0	Salario operador (So) :	N\$124.50

**1.- CARGOS FIJOS :**

**DEPRECIACION :**  $D = (V_c - V_r) / V_e$        $D = (287,037 - 28,704) / 6,000$       **N\$43.86**  
**DONDE :**  $V_s = V_c - V_n$  ;  $V_r = V_n * V_{re}$   
 $V_n = 287,037 - 0.00$       **N\$287,037**  
 $V_r = 287,037 * 0.10$       **N\$28,704**

**INVERSION :**  $I = ((V_s + V_r) / (2 * H_a)) * i$        $I = ((287,037 + 28,704) / (2 * 1,200)) * 0.15$       **N\$19.73**

**SEGUROS :**  $S = ((V_s + V_r) / (2 * H_a)) * s$        $S = ((287,037 + 28,704) / (2 * 1,200)) * 0.03$       **N\$3.96**

**MANTENIMIENTO :**  $M = Q * D$        $M = 0.80 * 43.86$       **N\$34.44**

**ALMACENAJE :**  $A = k * D$        $A = 0.00 * 43.86$   
**CARGOS FIJOS :**      **N\$101.18**

**2.- CARGOS POR CONSUMOS :**

**COMBUSTIBLES :**  $E = C_d * P_n * P_c$        $E = 0.1514 * 73 * 1.67$       **N\$18.91**  
 $P_n = P_n * P_o$        $P_o = 73 * 0.7$       **51.1**

**LUBRICANTES :**  $A = (c / t) + (.0035 * P_o) * P_l$        $A = (12 / 100) + (.0035 * 51.1) * 11.5$       **N\$1.19**

**NEUMATICOS :**  $LL = V_n / V_{na}$        $LL = 0.00 / 0.00$       **N\$0.00**  
**CARGOS POR CONSUMO :**      **N\$15.10**

**3.- CARGOS POR OPERACION :**

**OPERACION :**  $O = (S_a + S_o) / H$        $O = 124.50 / 8$       **N\$15.56**  
**CARGOS POR OPERACION :**      **N\$15.56**

**COSTO HORARIO :**      **N\$131.84**

**COMPACTADOR DE LLANTAS NEUMATICAS DUO-FACTOR CON MOTOR DE 105 H.P.**

Valor de compra (Vc):	N\$202,767	Pot. nominal motor (Pn): PH	105
Valor de rescate (Vrv):	10%	Capacidad carter (c): lit.	25
Valor de neumático (Vn):	N\$33,652	Precio combustible (Pc):	N\$1.67
Vida económica (Ve): hrs.	5,500	Factor de operación (Fo):	70%
Horas anuales (Ha): hrs.	1,100	Precio de lubricante (Pl):	N\$11.50
Tasa de interés (i):	23%	Tiempo p/cambio aceite (t): hrs.	160
Prima de seguro (s):	3%	Coef. motor diesel (Cd):	0.1514
Coef. de mantenimiento (Q):	120%	Horas efect. de turno (H): hrs.	8
Coef. de almacenamiento (k):	0%	Salario ayudante operador (Sa):	N\$97.57
Vida eco. neumático. (Ven): hrs.	2,500	Salario operador (So):	N\$93.36

**1.- CARGOS FIJOS:**

DEPRECIACION:  $D = (V_a - V_r) / V_e$        $D = (169,115 - 16,912) / 5,500$       **N\$37.67**

DONDE:  $V_a = V_c - V_n$  ;  $V_r = V_a * V_{rv}$

$V_a = 202,767 - 33,652$       **N\$169,115**

$V_r = 169,115 * 0.10$       **N\$16,912**

INVERSION:  $I = ((V_a + V_r) / (2 * H_a)) * i$        $I = ((169,115 + 16,912) / (2 * 1,100)) * 0.23$       **N\$19.46**

SEGUROS:  $S = ((V_a + V_r) / (2 * H_a)) * s$        $S = ((169,115 + 16,912) / (2 * 1,100)) * 0.03$       **N\$2.54**

MANTENIMIENTO:  $M = Q * D$        $M = 1.2 * 27.67$       **N\$33.21**

ALMACENAJE:  $A = k * D$        $A = 0.00 * 27.67$

**CARGOS FIJOS:      N\$82.87**

**2.- CARGOS POR CONSUMOS:**

COMBUSTIBLES:  $E = C_d * P_o * P_c$        $E = 0.1514 * 73.5 * 1.67$       **N\$19.60**

$P_o = P_n * F_o$        $P_o = 105 * 0.7$       **73.5**

LUBRICANTES:  $A = (c / t) + (.0035 * P_o) * P_l$        $A = (25 / 160) + (.0035 * 73.5) * 11.5$       **N\$3.11**

NEUMATICOS:  $LL = V_n / V_{en}$        $LL = 33,652 / 2,500$       **N\$13.46**

**CARGOS POR CONSUMO:      N\$35.16**

**3.- CARGOS POR OPERACION:**

OPERACION:  $O = (S_a + S_o) / H$        $O = (57.57 + 93.36) / 8$       **N\$18.87**

**CARGOS POR OPERACION:      N\$18.87**

**COSTO HORARIO:      N\$136.89**



<b>ESPECIFICACION:</b>					<b>UNIDAD : m3</b>	
Base de 15 cm de espesor, formada de una mezcla de grava de 1 1/2" y arcilla en proporción 80% - 20% , estabilizada con 3.0 % de cal en peso. Compactada al 100 % de su P.V.S.M. Incluye: Elaboración, densificación, acarreo y colocación de materiales necesarios a pie de obra.						
<b>CONCEPTO</b>		<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO U.</b>	<b>IMPORTE</b>	
				<b>NS</b>	<b>NS</b>	
<b>MATERIALES</b>						
Mezcla de 80% grava de 1 1/2" y 20% de arcilla		m3	1.3	45.50	59.15	
Agua		m3	0.25	7.00	1.75	
Cal (2104 kg/m3 * 0.030 * 1.10)		m3	0.015	266.00	3.99	
<b>SUMA</b>					<b>64.89</b>	
<b>MANO DE OBRA</b>						
<b>SUMA</b>						
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>						
Camión de volteo de 7 m3 (Descarga de mat.)		h	0.0803	155.14	12.46	
Motoniiveladora 140 (Mezcla y tendido material)		h	0.0031	384.55	1.19	
Tractocamión con tolva de 30 t (Descarga)		h	0.011	203.58	2.24	
Compactador CA-15 (Compactación)		h	0.0348	166.32	5.79	
Tractocamión pipa de 20 m3 (Riego de agua)		h	0.125	192.74	24.09	
<b>SUMA</b>					<b>45.77</b>	
				<b>COSTO DIRECTO :</b>	<b>NS110.66</b>	





<b>ESPECIFICACION:</b>						<i>UNIDAD : m<sup>2</sup></i>
Riego de liga sobre la base con FR-3 a razón de 0.75 Vm <sup>2</sup> . Incluye: calentamiento previo de los materiales, dosificación, elaboración y acarreos necesarios de los materiales a pie de obra.						
<b>CONCEPTO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO U.</b>	<b>IMPORTE</b>		
			<i>N\$</i>	<i>N\$</i>		
<b>MATERIALES</b>						
Asfalto rebajado FR-3	l	1.03	2.00	2.06		
<b>SUMA</b>					<b>2.06</b>	
<b>MANO DE OBRA</b>						
<b>SUMA</b>						
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>						
Carrion petrolizadora 6000 litros (Riego asfalto)	h	0.001	159.34	0.16		
<b>SUMA</b>					<b>0.16</b>	
				<b>COSTO DIRECTU :</b>	<b>N\$2.22</b>	



<b>ESPECIFICACION :</b>					<b>UNIDAD : m3</b>
Pavimento de concreto asfáltico de 7.5 cm de espesor, compactado al 95% , aplicado en caliente. Incluye: calentamiento previo de los materiales, dosificación, trazo y nivelación, elaboración y tendido, todos los materiales puestos a pie de obra.					
<b>CONCRETO</b>		<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO U.</b>	<b>IMPORTE</b>
				<b>N\$</b>	<b>N\$</b>
<b>MATERIALES</b>					
Concreto asfáltico agregado 3/4" a finos, con cemento asfáltico del No. 6					
		m3	1.03	94.91	97.76
<b>SUMA</b>					97.76
<b>MANO DE OBRA</b>					
Cadrilla (10 personas + 0.10 cabo )					
		Jor	0.0019	455.71	0.87
Herramienta menor					
		%	0.03	0.87	0.03
<b>SUBA</b>					0.89
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>					
Camión de volteo de 7 m3 (Descarga de mat.)					
		h	0.0003	155.14	12.46
Pavimentadora SB-131 (Tendido de material)					
		h	0.0083	342.30	2.84
Aplanadora CD-900 (Acomodamiento del mat.)					
		h	0.0119	131.84	1.57
Compactador de llantas neumática (Planchado)					
		h	0.009	136.89	1.23
<b>SUMA</b>					18.10
				<b>COSTO DIRECTO :</b>	<b>N\$116.75</b>
	<b>136</b>				

ESPECIFICACION:					UNIDAD:
Riego de sello sobre carpeta de concreto asfáltico. Incluye: calentamiento previo del asfalto, dosificación, elaboración, regado y traido y puestos todos los materiales a pie de obra.					
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO U.	IMPORTE	
			NS	NS	
<b>MATERIALES</b>					
Asfalto rebajado FR-3	l	1.03	2.00	2.06	
Arrea de 3/8" e finos.	m3	1.3	32.00	41.60	
<b>SUMA</b>					43.66
<b>MANO DE OBRA</b>					
Cuadrilla (2 peones + 0.10 cabo)	Jor	0.022	94.12	2.07	
Herramienta menor	%	0.03	2.07	0.06	
<b>SUMA</b>					2.13
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>					
Camión petrolizadora 6000 litros (Riego asfalto)	h	0.001	159.34	0.16	
Camión de volco de 7 m3 (Descarga de mat.)	h	0.0803	155.14	12.46	
Aplazadora CD-900 (Acomodamiento del mat.)	h	0.0119	131.84	1.57	
<b>SUMA</b>					14.19
<b>COSTO DIRECTO:</b>					<b>NS59.98</b>
137					



ESPECIFICACION :					UNIDAD :	m3
Base de 20 cm de espesor, formada de una mezcla de grava de 1 1/2" y arcilla en proporción 80% - 20% , materiales sin cal. Compactada al 100 % de su P.V.S.M. Incluye: Elaboración, dotificación, acarreo y colocación de materiales necesarios a pie de obra.						
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO U.	IMPORTE		
			NS	NS		
<b>MATERIALES</b>						
Mezcla de 80% grava de 1 1/2" y 20% de arcilla	m3	1.3	45.50	59.15		
Agua	m3	0.25	7.00	1.75		
<b>SUMA</b>				<b>60.90</b>		
<b>MANO DE OBRA</b>						
<b>SUMA</b>						
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>						
Camión de volco de 7 m3 (Descarga de mat.)	h	0.0403	155.14	12.46		
Motocultores 14G (Mezcla y tendido mat.)	h	0.0031	384.55	1.19		
Compactador CA-15 (Compactación)	h	0.0348	166.32	5.79		
Tractocamión pipa de 20 m3 (Riego de agua)	h	0.125	192.74	24.09		
<b>SUMA</b>				<b>43.53</b>		
			<b>COSTO DIRECTO :</b>	<b>NS104.43</b>		

<i>COSTOS DIRECTOS DE UN PAVIMENTO, ESTABILIZADO CON CAL.</i>			
<i>CONCEPTO</i>	<i>UNIDAD</i>	<i>COSTO DIR.</i>	
Subbase de 15 cm de espesor, con una mezcla del 70% grava de 1 1/2" y 30% de arcilla, estabilizada con 1.5% de cal.	m3	N\$95.27	
Base de 15 cm de espesor, con una mezcla del 80% grava de 1 1/2" y 20% de arcilla, estabilizada con 3% de cal.	m3	N\$110.66	
Barrido de la superficie a tratar.	m2	N\$0.11	
Riego de impregnación con FM-1 a razón de 1.5 l/m2.	m2	N\$1.81	
Riego de liga con FR-3 a razón de 0.75 l/m2.	m2	N\$2.22	
Pavimento de concreto asfáltico de 7.5 cm de espesor.	m3	N\$116.75	
Riego de selló sobre carpeta de concreto asfáltico.	m3	N\$59.98	
<i>COSTOS DIRECTOS DE UN PAVIMENTO, SIN CAL.</i>			
<i>CONCEPTO</i>	<i>UNIDAD</i>	<i>COSTO DIR.</i>	
Subbase de 20 cm de espesor, con una mezcla del 70% grava de 1 1/2" y 30% de arcilla, estabilizada con 0% de cal.	m3	N\$85.32	
Base de 20 cm de espesor, con una mezcla del 80% grava de 1 1/2" y 20% de arcilla, estabilizada con 0% de cal.	m3	N\$104.43	
Barrido de la superficie a tratar.	m2	N\$0.11	
Riego de impregnación con FM-1 a razón de 1.5 l/m2.	m2	N\$1.81	
Riego de liga con FR-3 a razón de 0.75 l/m2.	m2	N\$2.22	
Pavimento de concreto asfáltico de 10 cm de espesor.	m3	N\$116.75	
Riego de selló sobre carpeta de concreto asfáltico.	m3	N\$59.98	

Realizando un presupuesto para un tramo de 300 metros lineales, observando la fig. 4 - 15 (pag. 178), en donde se tienen las dimensiones del pavimento estabilizado con cal, y de ahí se obtuvieron las cantidades de obra.

<b>PRESUPUESTO DE UN PAVIMENTO, ESTABILIZADO CON CAL</b>					
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO DIR.	IMPORTE	
			NS	NS	
Subbase de 15 cm de espesor, estabilizada con 1.5% de cal en peso.	m3	472.5	95.27	45,016.79	
Base de 15 cm de espesor, estabilizada con 3% de cal en peso.	m3	472.5	110.66	52,286.67	
Barrido de la superficie a tratar.	m2	3150	0.11	343.20	
Riego de imprim. con FM-1 a razón de 1.5 l/m2	l	4725	1.81	8,539.68	
Riego de liga con FR-3 a razón de 0.75 l/m2	l	2362.5	2.22	5,243.19	
Pav. de concreto asfáltico de 7.5 cm de espesor.	m3	157.5	116.75	18,387.99	
Riego de sello, con arena de 3/8" a finos y FR-3	m3	19.95	59.98	1,196.98	
					Total de la obra
					NS131,014.06
<b>PRESUPUESTO DE UN PAVIMENTO, SIN CAL</b>					
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO DIR.	IMPORTE	
			NS	NS	
Subbase de 20 cm de espesor propuesto, sin ser estabilizada con cal.	m3	630	85.32	53,751.79	
Base de 20 cm de espesor propuesto, sin ser estabilizada con cal.	m3	630	104.43	65,791.09	
Barrido de la superficie a tratar.	m2	3150	0.11	343.20	
Riego de imprim. con FM-1 a razón de 1.5 l/m2	l	4725	1.81	8,539.68	
Riego de liga con FR-3 a razón de 0.75 l/m2	l	2362.5	2.22	5,243.19	
Pav. concreto asf. de 10 cm espesor propuesto.	m3	210	116.75	24,517.27	
Riego de sello, con arena de 3/8" a finos y FR-3	m3	19.95	59.98	1,196.98	
					Total de la obra
					NS159,382.70

<i>Con todo lo anterior expuesto se llega a la conclusión siguiente:</i>					
Así, se tiene que para el pavimento estabilizado con cal, arroja un total de:					NS131,014.06
Para un pavimento sin ser estabilizado con cal, arroja un total de:					NS159,382.70
Ahorros generados en el pavimento estabilizado con cal:					NS28,368.63
<p><b>Lo anterior significa un ahorro del 21.65 %, en términos reales del pavimento estabilizado con cal, respecto al no estabilizado; esto es para un tramo de 300 m lineales.</b></p>					
142					

## CAPITULO IV

### PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA ESTABILIZACIÓN

Naturalmente, antes de empezar la construcción o reparación de cualquier carretera, es necesario un diseño, que viene siendo la parte más compleja de los pavimentos, pero también es una parte creadora, ya que en esta etapa se deben cumplir especificaciones técnicas, lo que se lleva a elegir el proceso constructivo más adecuado para la obra, para lo cual se debe tomar en cuenta las condiciones climatológicas del lugar, el tráfico, tipo de suelos y todos los materiales de posible explotación dentro de nuestro radio de acción. La supervisión de los diversos trabajos a desarrollar forma una parte importante dentro de la obra, así mismo el control de calidad que se vaya llevando de los materiales.

En esta parte se mencionaran algunas de las funciones, características y propiedades, en términos generales, de las diversas partes que conforman un pavimento flexible.

Para conocer todas y cada una de las capas que conforman un proyecto tipo, se muestra la sección de un pavimento flexible en la fig. 4 - 15, donde se aprecia el espesor de cada una de las capas.

*A) El terreno natural se puede definir, como la franja de terreno incluida en el derecho de vía, que se verá afectada en su estructura por la construcción de una obra vial, y recibirá las cargas de tránsito distribuidas a través de la estructura.*

Una práctica recomendable, es que una vez que se haya aceptado la ruta por la que será construida la obra, se realicen estudios geológicos, de mecánica de suelos, hidráulicos o hidrológicos para el correcto proyecto y ejecución de la obra; estos estudios deben de hacerse a una magnitud de acuerdo como se vayan requiriendo y conforme vayan avanzando los trabajos en la obra.



En las obras viales, una vez que se haya decidido llevarlas a cabo, se hace la elección de la ruta, que es la franja de ancho variable en la que se procede a construir una obra vial, llámese carretera, ferrocarril ó aeropuerto. El ancho de la ruta que al inicio de los estudios puede ser de varios kilómetros, al final, cuando se tienen los planos definitivos, se tiene un ancho igual al derecho de vía, que será el ancho final necesario para la construcción, conservación y en su caso para la ampliación de la obra.

El procedimiento constructivo ejecutado en el terreno natural consta de tres fases: *desmonte*, *despalme* y *compactación*, si es requerida.

**Desmonte:** Consiste en quitar toda la vegetación existente dentro del derecho de vía; se incluye en este trabajo el desenraice, en caso de que al desenraizar queden hoyos, éstos se rellenarán con material de buena calidad compactándolo adecuadamente.

**Despalme y Compactación:** Una vez desmontado el terreno natural, se procede a extraer la capa de material que contenga material vegetal; el espesor de este material puede variar de 10 a 50 cm incluso puede llegar a medir un metro si se encuentra un espesor fuerte de material altamente compresible, a esta etapa se le llama despalme. En seguida y sólo que fuera necesario, se compactará el terreno natural, y cuando se haga, en general se llega al 90 % de su peso volumétrico suelto máximo.

**B) Las terracerías** pueden ser definidas como los volúmenes de materiales que se extraen o sirven de relleno para la construcción de una vía terrestre; la extracción puede hacerse a lo largo de la línea de la obra y si este volumen se usa en la construcción de terraplenes o de rellenos, se dice que se tienen terracerías compensadas; el volumen de corte que no se usa, se denomina desperdicio.

Si el volumen que se extrae en la línea no es suficiente para la construcción de terraplenes o de los rellenos, se necesitará extraer material fuera de ella o sea en zonas de préstamos; si estas zonas están cercanas a la obra, del orden de 10 a los 100 m a partir del centro de la línea, se llaman préstamos laterales, si estas zonas se encuentran a más de 100 m son préstamos de banco.

Las terracerías en terraplén se dividen en dos zonas, el cuerpo de terraplén que es la parte inferior, y la capa subrasante que es colocada sobre la anterior, con un espesor mínimo de 30 cm. Cuando el tránsito es mayor a los 5 000 vehículos diarios, al cuerpo de terraplén se le colocan los últimos 50 cm con material compactable y esta capa se le denomina capa subyacente. Las características y funciones de los materiales que se utilizan en estas capas de las terracerías son como sigue:

**B1) Cuerpo de terraplén:** La finalidad de esta capa es dar la altura necesaria para satisfacer principalmente las especificaciones geométricas, sobre todo la pendiente longitudinal, las de resistir las cargas de tránsito transferidas por las capas superiores y distribuir los esfuerzos a través de su espesor, para transmitirlos en forma adecuada al terreno natural, se le dará un grado de compactación del 95 % de su Peso Volumétrico Seco Máximo.

**B2) Capa Subyacente:** Su función primordial es darle soporte a la capa subrasante, ya que como se mencionó anteriormente, esta capa se adiciona cuando tenemos un tránsito mayor a los 5 000 vehículos diarios, y el mínimo espesor de la subrasante resultaría inadecuado para tales exigencias.

**B3) Capa subrasante:**

- a) Recibir y resistir las cargas del tránsito, que son transmitidas por el pavimento.
- b) Transmitir y distribuir adecuadamente las cargas del tránsito a la capa de subyacente.
- c) Evitar que cuando el cuerpo del terraplén esté formado de materiales finos plásticos, éstos contaminen el pavimento.
- d) Evitar que el pavimento sea absorbido por las terracerías, cuando éstas estén formadas principalmente por fragmentos de roca (pedraplenes).
- e) Evitar que las imperfecciones de la cama de los cortes se reflejen en la superficie de rodamiento.
- f) Uniformizar los espesores del pavimento, principalmente cuando se tiene mucha variación de los materiales de terracerías, a lo largo del camino.

**C) Base y Subbase:**

En caminos y aeropuertos sobre la capa subrasante, se constituye el pavimento, el de tipo flexible está constituido por la *subbase, base y carpeta asfáltica*.

La *subbase* y la *base* tienen finalidades y características semejantes, sin embargo, las bases suelen ser de mejor calidad:

- a) Recibir y resistir las cargas del tránsito a través de la capa que constituye la superficie de rodamiento (carpeta asfáltica o losa).
- b) Transmitir y distribuir adecuadamente las cargas a las terracerías.
- c) Impedir que la humedad de las terracerías asciendan por capilaridad.
- d) En caso de que haya alguna introducción de agua por la parte superior, permitir que ésta descienda hasta la capa subrasante en la que por el efecto del bombeo, o sobre elevación, sea desalojada hacia el exterior.

Para que la base y la subbase estabilizadas con cal, puedan cumplir adecuadamente sus funciones, ambas deben de cumplir ciertas normas que marca la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en el capítulo 4.01.03.009 del libro No. 4 . 01. 01 , Normas de calidad de los materiales, carreteras y aeropistas.

Las cuales se mencionarán a continuación para la *Subbase*:

- ⊖ La curva granulométrica del material deberá quedar comprendida entre la zona 1 y 3.
- ⊖ El tamaño máximo de las partículas del material no deberá ser mayor de 51 mm (2 ").
- ⊖ El grado de compactación no deberá compactarse en un porcentaje menor de 95 % de su peso volumétrico seco máximo.
- ⊖ Limite Líquido 25 % máximo.

▫ La cal utilizada deberá cumplir especificaciones mencionadas en el capítulo 2 de este trabajo.

▫ Contenido de materia orgánica un 3 % máximo.

además:

CARACTERÍSTICAS	ZONAS EN QUE SE CLASIFICA EL MATERIAL DE ACUERDO CON SU GRANULOMETRÍA		
	1	2	3
CONTRACCIÓN LINEAL, EN %	6.0 M <sub>áx.</sub>	4.5 M <sub>áx.</sub>	3.0 M <sub>áx.</sub>
VALOR CEMENTANTE PARA MATERIALES ANGULOSOS EN KG/CM <sup>2</sup>	3.5 M <sub>ín.</sub>	3.0 M <sub>ín.</sub>	2.5 M <sub>ín.</sub>
VALOR CEMENTANTE PARA MATERIALES REDONDEADOS Y LISOS EN KG/CM <sup>2</sup>	5.5 M <sub>ín.</sub>	4.5 M <sub>ín.</sub>	3.5 M <sub>ín.</sub>
VALOR RELATIVO DE SOPORTE, EN %	50 M <sub>ín.</sub>	50 M <sub>ín.</sub>	50 M <sub>ín.</sub>
EQUIVALENTE DE ARENA, EN %	20 M <sub>ín.</sub>	20 M <sub>ín.</sub>	20 M <sub>ín.</sub>

Para la base también se deben cumplir con normas técnicas que marca la S.C.T. y estas son:

▫ La curva granulométrica del material deberá quedar comprendida entre la zona 1 y 3, preferentemente que quede comprendida en las zonas 1 ó 2.

▫ El tamaño máximo de las partículas del material no deberá ser mayor de 51 mm (2") para materiales pétreos que para su utilización no requieren ningún tratamiento de disgregación, cribado o trituración.

▫ El tamaño máximo de las partículas del material no deberá ser mayor de 38 mm (1 1/2") para materiales pétreos que para su utilización requieren tratamientos de disgregación, cribado o trituración.

▫ El grado de compactación no deberá compactarse en un porcentaje menor de 95 % de su peso volumétrico seco máximo.

▫ La cal utilizada deberá cumplir especificaciones mencionadas en el capítulo 2 de este trabajo.

▫ Contenido de materia orgánica un 3 % máximo.



Para realizar la extracción de los materiales, se deben tomar en cuenta, aquellos que se encuentran en forma masiva, se deben obtener con tamaños accesibles, en obras viales son del orden de los 75 cm como máximo. Para ello se debe barrenar la roca, se coloca dinamita y algún otro producto de nitrógeno que disminuya el costo, se colocan los estopines y se lleva a cabo la explosión. De acuerdo a la cantidad de explosivos, la posición de éstos, y la dureza de la roca, será el tamaño máximo de los fragmentos que se producirán. Una vez aflojado el material, se cargan a los vehículos de transporte por medio de diferentes máquinas que se usan de acuerdo a la dificultad que se presenta por el tamaño de los fragmentos, así se puede realizar la carga por medio de palas manuales, de palas frontales o de palas mecánicas. En seguida se efectúan los tratamientos previos, o sea los que se lleven a cabo antes de que el material llegue a la obra; estos tratamientos pueden ser de cribado o de trituración, en la mayoría de los casos la base ó subbase ó ambas se les efectúa un estabilización del tipo químico, con cal, cemento u otro método, dando buenos resultados.

#### IV. I. ACAMELLONAMIENTO DEL MATERIAL.

En esta sección se explicarán las diversas etapas del proceso constructivo que se llevaron a cabo en la autopista Matamoros-Reynosa, en la cual se utilizó cal para estabilizar la base y la subbase.

El procedimiento constructivo realizado en base y subbase fueron idénticos, los resultados de laboratorio variaron en un porcentaje mínimo, por lo tanto, el procedimiento descrito a continuación es válido para ambas capas, y el descrito es para la base; se mencionara en su momento, aquellos elementos o procesos en los que hubo variaciones durante el proceso mismo. Para ello se incluye una sección tipo de la estructura del pavimento, fig. 4 - 15, en ella se pueden observar las diversas capas que forman el cuerpo del pavimento, todas ellas cumplen una función importante dentro del pavimento, de las cuales como ya se menciono, tanto la base como la subbase fueron estabilizada con cal.

Los materiales adecuados para realizar la estabilización, en la base, fue una mezcla grava-arcilla, 80 % grava de 1 1/2" con 20 % de arcilla, dicho proporcionamiento se fue modificando, para poder cumplir con ello, la curva granulométrica exigida por las normas de la S.C.T., esto dependía, además, de los resultados que se fueran obteniendo en las diversas pruebas de laboratorio realizadas y de la explotación de los bancos, ya que se encontraron materiales heterogéneos, llevando con esto un control más estricto de los materiales utilizados en cada una de las capas del pavimento; lo mismo ocurrió para la mezcla del 70 % grava de 1 1/2" con 30 % de arcilla, obtenida para la subbase. Las mezclas más adecuadas, ya mencionadas para la base y subbase, fueron seleccionadas después de intensas pruebas de laboratorio realizadas a los materiales obtenidos de los bancos de material propicios para ello.

Los materiales mezclados y dosificados previamente en la planta, son transportados a pie de obra, por medio de camiones de volteo, la mezcla es depositada en la obra, en donde se tira en el lugar propicio para iniciar la construcción de un nuevo tramo, los tramos se construyen de 300 m aproximadamente; es importante mencionar que la mezcla del material ya trae una humedad adecuada, dosificada en planta, con el propósito de que al llegar a la obra no se le agregue humedad en exceso.

Tirado el material a pie de obra, y después de haber verificado el volumen necesario para formar la nueva capa (en caso de faltar volumen se realizarán los recargues necesarios) se procede a abrir parcialmente y poco a poco el material hacia ambos extremos de la corona de la subbase (se menciona el procedimiento constructivo para la base, para subbase es el mismo, mencionando en su momento las variaciones), esto es realizado con la ayuda de la motoniveladora, se acamellona el material a ambos extremos para dejar libre la zona central de la corona, para que pueda entrar libremente un camión tolva con una capacidad aproximada de 30 t, el cual transporta la cal hidratada (hidróxido de calcio), y vaya depositando la cal a lo largo de todo el tramo a construir, se dosifica la cantidad necesaria para que la base alcance un 3.0 % de cal en peso, respecto al peso volumétrico seco máximo (PVSM), y de 1.5 % de cal respecto a su PVSM en la subbase.

La cal es depositada por partes, esto es, llega el camión tolva al inicio del tramo, manualmente se comienza a descargar la cal por las dos válvulas de salida que tiene en su parte inferior el camión, concluida la primer descarga el camión avanza ligeramente, procurando que la segunda descarga de cal se realice junto a la primera y no haya mucha separación entre la primer y la segunda descarga, estos pasos se repiten de tal forma, que la descarga sea realizada en forma racional, dosificándola de tal manera que el rendimiento alcanzado en obra para el camión tolva, sea en un tramo aproximadamente de 300 m.

Previendo que el aire sopla por momentos fuertes en la obra y levanta la cal durante la descarga y aún depositada en el tramo, se agrega a la dosificación un porcentaje de desperdicio, para evitar pérdidas en la mezcla de suelo-cal.

#### IV.2. MEZCLA DEL MATERIAL CON LA CAL.

Ya que se tiene el material acamellonado a ambos extremos de la corona de la subbase, y la cal distribuida al centro de estos acamellonamientos, se procede a iniciar la mezcla del material con la cal. El proceso de la mezcla en una *primera etapa*, se realiza con la ayuda de una motoniveladora, primeramente avanza sobre el material acamellonado y comienza a realizar movimientos de tal forma que el material comience a cubrir la cal, este proceso se repite a ambos extremos de la corona de la subbase, en donde está el material acamellonado, para que al final del proceso el material cubra perfectamente la cal distribuida al centro de la corona.

Una vez realizado lo anterior, y siguiendo con un procedimiento más en esta fase, al tener ya cubierta la cal con el material, se introduce a los trabajos de mezclado otra motoniveladora, es entonces que para realizar la mezcla se utilizan dos motoniveladoras; ambas comienzan a mezclar el material y la cal cubierta con éste, con el fin de tener una mezcla perfectamente homogénea, esto lo logran realizando movimientos hacia un lado y otro sobre la corona de la subbase, las motoniveladoras al ir realizando estos trabajos van avanzando a una velocidad lenta, para ir realizando un trabajo más eficaz, avanzan conjuntamente una detrás de la otra.

Al realizar la mezcla con ambas motoniveladoras, se busca una mayor eficiencia y un rendimiento más benéfico para la maquinaria, ya que al utilizar una sola el esfuerzo sería mayor y se reflejaría en los trabajos realizados, estos serían de más baja calidad que los obtenidos al final con las dos motoniveladoras.

Los trabajos necesarios para realizar la mezcla son pesados y tardados, requieren que el personal que maneje este tipo de maquinaria, sean operadores que estén realmente capacitados y experimentados para que realicen su labor lo más preciso posible, para que al estar mezclando los materiales, estos no se le salga de los lineamientos del camino y haya desperdicios innecesarios de material.

En una *segunda etapa*, se procura que el material ya mezclado en la primera etapa, quede acamellonado a ambos extremos de la corona de la subbase, dejando libre la zona central (como ocurrió cuando se deposita la cal, al inicio del proceso), con el propósito de que se introduzca la pipa, ésta avanza por la zona central que se dejó libre, en este caso de la mezcla. La pipa va avanzando por la zona central, teniendo a ambos extremos el material acamellonado, sus movimientos lo realiza a una velocidad baja para que el personal, vaya distribuyendo el agua hacia el material acamellonado a ambos extremos de la corona, con movimientos hacia la izquierda y derecha de su sentido de avance, de tal forma de que el agua proporcionada al material acamellonado sea en cierta forma la misma en todo su recorrido, es decir, no detener en un solo lugar la distribución del agua y provoque encharcamientos indeseables.

En un primer recorrido la pipa proporciona agua al material mezclado, posteriormente ambas motoniveladoras distribuyen un poco el material acamellonado en las orillas, y en un segundo recorrido la pipa vuelve a proporcionarle agua al material, de tal forma que los recorridos hechos por la pipa deben de ser los suficientes para proporcionar al material el agua requerida, ya que el agua no se distribuye en un solo recorrido. El agua distribuida al material debe de alcanzar la humedad óptima, esto es debido a los requerimientos propios de los materiales empleados y a la evaporización sufrida durante los tratamientos, debiéndose compensar el agua perdida en dichas labores. Una vez que el material tiene la humedad óptima, se procede al mezclado final, en una *tercera etapa*, se realizan los trabajos con ambas motoniveladoras, para homogeneizar el agua en todo el material, las cuales irán avanzando poco a poco, revolviendo el material de tal forma que todas y cada una de las partes que forman la mezcla alcancen los beneficios del agua; para ello las motoniveladoras realizan cambios sucesivos del material hacia un lado y otro, sobre la corona de la subbase.

Ya que se consiguió uniformizar la humedad, todo el material se distribuye a través de la corona de la subbase y así comenzar a formar el espesor suelto necesario de la capa, a esta operación se le llama tendido del material. Durante el proceso se debe cuidar que el material no se segregue, es decir, no se lleguen a separar los materiales finos de los gruesos; para ello es recomendable que el material húmedo sea colocado en el centro de la corona y se vayan distribuyendo hacia los lados con las motoniveladoras, las cuales son operadas a velocidades bajas, para realizar un trabajo más adecuado y eficiente.

Al finalizar el proceso del mezclado de los materiales, y al haber tendido el material para obtener el nuevo espesor suelto, el de la base, se tiene al concluir esta fase, que la humedad proporcionada al iniciar la mezcla es relativamente baja, casi nula, por ello resulta conveniente agregarle nuevamente agua, la pipa pasa distribuyendo el líquido, pero ahora ya sobre el material tendido, que ya forma un nuevo espesor del cuerpo del pavimento; distribuye el agua, de tal forma que en varias pasadas proporcione la cantidad necesaria, debiéndose alcanzar la humedad óptima, y dejarla lista para comenzar la compactación.

#### IV.3. COMPACTACIÓN DE LA MEZCLA SUELO - CAL.

Se compacta el material hasta alcanzar un grado de compactación del 100 % de su Peso Volumétrico Seco Máximo, este porcentaje de compactación se manejó para base y subbase, la cual se logra con rodillos lisos de tambor vibratorio (vibrocompactadores), la eficiencia para obtener la compactación es mayor utilizando esta clase de equipos, que aplican la carga a través de rodillos de aproximadamente 10 t.

Una compactación tiene como fin reducir el volúmenes de los materiales, en un tiempo relativamente corto, con el fin de que sean resistentes a las cargas y tengan una relación esfuerzo-deformación, conveniente durante la vida útil de la obra. Para alcanzar el grado de compactación se utilizaron dos vibrocompactadores, con el propósito de no forzar demasiado a un solo equipo, ya que se requiere un gran esfuerzo ó energía, que se traduce en un mayor costo; durante la compactación, tienen un seguimiento continuo los equipos, es decir, siguen una línea y cubren una franja del pavimento, uno de tras del otro, para obtener una adecuada compactación al pasar por la misma franja en forma casi instantánea los dos equipos, y reducir los tiempos y el número de pasadas sobre la corona de la base.

Una vez que se tiene el grado de compactación requerido por el proyecto para la capa, se procede a tomar lecturas de dicha capa, estas lecturas son las topográficas, para verificar que la capa tenga la pendiente mínima que marcan las normas técnicas de la S.C.T. las cuales requieren que la pendiente debe tener mínimo del 2 %. Otro tipo de lecturas son tomadas con el densímetro nuclear, el cual cuenta con un vástago que es penetrado en la capa a estudiar.



Al penetrar el vástago, de dicho densímetro nuclear, esté por medio de radiaciones nucleares manda lecturas al cerebro central del aparato el cual da las lecturas. Entre la información proporcionada, de acuerdo con el modelo y la marca, por este instrumento están: peso volumétrico húmedo, peso volumétrico seco, % de humedad óptima, y con ello se obtiene el Peso Volumétrico Seco de campo del suelo compactado, con este dato y con el Peso Volumétrico Seco Máximo del laboratorio se determina el grado de compactación de la capa en cuestión, y se ve si se está cumpliendo lo requerido para el proyecto.

$$G_c = \frac{\text{Peso volumétrico seco de campo}}{\text{Peso volumétrico seco máximo de laboratorio}} \times 100$$

Los sondeos realizados con este aparato, son 3 a cada 100 m. Esto es chequeado por el Ingeniero encargado de supervisar los trabajos en campo, y él es el responsable único de tomar decisiones en ese preciso instante en caso de que se cumpla o no el grado de compactación; y no nada más este proceso sino todos los trabajos descritos anteriormente del procedimiento constructivo.

Ya que se tiene el grado de compactación, pasa por última vez la pipa, pasa las veces que sean necesarias para dar una distribución uniforme en toda la corona y proporcionarle la cantidad de agua requerida, que es la óptima, para quitarle rigidez a la capa recién construida.

Durante el proceso de compactación y al final del mismo, la mezcla del material con la cal perdió humedad y debido a ello fue necesario agregarle agua nuevamente, además de que al finalizar la compactación el suelo quedó un poco rígido debido a la escasez de humedad y para contrarrestar esto, se le agregó agua.

#### IV. 4. RIEGO DE IMPREGNACIÓN.

Una vez alcanzado en la base el grado de compactación del proyecto y de haberle agregado agua, en la proporción adecuada, se deja secar la superficie durante 24 h aproximadamente, una vez que la superficie cumple con estas condiciones, se utiliza una escoba mecánica para barrer la superficie, con el objeto de alejar basura, polvo y partículas sueltas que pudiera haber y perjudicarían en cierto momento la calidad del riego de impregnación.

Se le debe proporcionar a la base, un riego de impregnación que se realiza distribuyendo asfalto FM-1 en proporción de 1.5 l/m<sup>2</sup>, aproximadamente, el cual debe cumplir con ciertas especificaciones técnicas que marcan la S.C.T., el asfalto deberá penetrar en la capa de la base cuando menos 3 mm.

El objetivo del riego de impregnación, es el de proteger la base tratada con cal de la lluvia y del tránsito normal de vehículos ligeros durante la construcción.

Todo este proceso es realizado con una petrolizadora que va distribuyendo el asfalto en forma uniforme, avanzando lentamente, para realizar una adecuada y uniforme distribución de la impregnación, realizando el riego de impregnación de las orillas hacia el centro de la corona de la base, el cual no debe realizarse bajo ninguna circunstancia si la superficie que se le va a dar este tratamiento, está mojada o no ha sido debidamente barrida, y preferentemente estos trabajos deberán ser ejecutados a la hora del día en que se presenten las más altas temperaturas.

Se dice que se realiza una buena impregnación, siempre y cuando la superficie presente un aspecto uniforme. La cantidad de asfalto deberá ser absorbida aproximadamente 24 h, después de haberla aplicado a la superficie y en un periodo normal de secado de aproximadamente 48 h.

#### IV.5. CARPETA DE CONCRETO ASFÁLTICO.

Antes de proceder a colocar la carpeta de concreto asfáltico se debe de proporcionar un riego de liga.

El riego de liga es un tratamiento superficial con la única intención de unir capas, en este caso serían la base tratada con cal y la carpeta asfáltica.

Generalmente el riego de liga se hace casi al momento de realizar el tendido de la carpeta asfáltica.

Cuando se tienen superficies secas y polvosas, es necesario barrer correctamente y dar un ligero riego de agua para romper en mínima parte la tensión superficial existente.

Sobre la base impregnada se aplicará en todo lo ancho de la sección un riego de liga con material asfáltico del tipo FR-3 a razón de 0.75 l/m<sup>2</sup>.

La carpeta asfáltica es la capa superior de un pavimento flexible y proporciona la superficie de rodamiento para los vehículos y proteger la base, impermeabilizando la superficie, para evitar posibles infiltraciones del agua de lluvia que podrían saturar parcial o totalmente las capas inferiores. Además evita que se desgaste o desintegre la base debido al tránsito de los vehículos; además la capa de rodamiento contribuye, en cierto modo, a aumentar la capacidad de soporte del pavimento, debiendo tener suficiente resistencia tanto al desgaste como a la fractura para soportar debidamente las cargas transmitidas a ella; debiendo ser antiderrapante y no deformable; especialmente si su espesor es mayor a los 7.5 cm. La carpeta de concreto asfáltico, se emplea cuando el tránsito es intenso y pesado, se elabora con materiales pétreos y productos asfálticos, colocadas sobre la base tratada con cal, este tipo de carpetas se elabora con cemento asfáltico, el cual deberá cumplir con las especificaciones marcadas por la S.C.T.

El cemento asfáltico, es el último residuo de la destilación del petróleo y a temperaturas normales es sólido, de color café oscuro. Para poder ser mezclado con los materiales pétreos deberá ser calentado a una temperatura de 140 °C, para ello deberá contarse con una planta. El material pétreo también deberá ser calentado y su temperatura oscila entre los 160 °C. Será necesario que la curva granulométrica del pétreo quede dentro de la zona especificada por la S.C.T., no permitiéndose cambios bruscos de la pendiente, con una tolerancia no mayor del 8 % en peso de tamaños menores que la malla No. 200, por lo cual todas las características físicas del pétreo y el cemento asfáltico se deberán cumplir con las especificaciones técnicas que marca la S.C.T.

La mezcla ya dosificada de planta es transportada ala obra, donde deberá llegar a una temperatura próxima de los 110 °C a 120 °C, si se considera necesario se deben utilizar lonas que cubran la mezcla durante el trayecto. Al llegar el equipo de transporte al tramo, descarga su contenido en la máquina extendora, que forma una franja de mezcla asfáltica dándole una ligera compactación. Al terminar de vaciar un camión la mezcla que acarreo, se para el tren de extendido y luego al ensamblar el siguiente, se reanuda el trabajo, por lo que entre vehículo y vehículo se forma una junta donde puede haber discontinuidad, que deberá ser evitada por un equipo de rastilleros, que en un número de 4 a 6 por extendora, tienen la responsabilidad de asegurar una textura conveniente en la superficie y borrar las juntas longitudinales entre las franjas.

A una temperatura mayor de 90 °C, se debe iniciar la compactación de la franja, para lo que al principio se utiliza un rodillo de 7 t aproximadamente, para dar una primer compactación y permitir la entrada a equipo con un peso de 15 t aproximadamente, la cual no deberá ser usada desde el principio por que produciría un desplazamiento lateral en la mezcla de concreto asfáltico; se pueden utilizar rodillos lisos o neumáticos; el orden de las operaciones de compactación principia comúnmente con las pasadas que se da con un compactador de rodillo liso, seguido del compactado intermedio efectuado con un compactador de neumáticos, para finalizar con una compactación final, para lo cual se utiliza un compactador de rodillos de doble eje; al final se deberán borrar las huellas de la compactación, utilizando para ello un rodillo liso.

Es una buena práctica universal ya, empezar las pasadas de los rodillos en las orillas exteriores de la capa recién tendida, e ir compactando hacia el centro del camino, o sea la cúspide del bombeo. En el caso de curvas con sobre elevación, la pasada del rodillo se inicia en el lado más bajo, y concluir en la cúspide; se seguirá el mismo procedimiento con las pasadas del compactador neumático. Una vez que se hayan dado las pasadas suficientes para cubrir toda la superficie del pavimento, deberán suspenderse los trabajos del compactador de neumáticos, ya que un exceso en las pasadas producirá afloramiento del cemento asfáltico.

Al concluir las pasadas con el compactador de neumáticos, y de una impresión de no haber sido terminada, en este caso, el empleo de un compactador de rodillos de doble eje eliminará cualquier huella dejada por los neumáticos, quedando una superficie lisa, como planchada.

El grado de compactación será del 95 % como mínimo con respecto al peso volumétrico del proyecto, no necesariamente corresponde al máximo. Para conocer el grado de compactación, se extraerán corazones con máquinas rotatorias.

El riego de sello sirve para proteger y sellar la superficie de un pavimento el cual será colocado sobre la carpeta.

Entre sus funciones están:

- Protección para la estructura del pavimento.
- Capa impermeable que tome algunos esfuerzos tangenciales de aceleración y frenaje.
- Capa de rodamiento con rugosidad.

Para la ejecución del riego de sello, se procederá como sigue:

- Se barre la superficie a tratar.
- Se procede al riego de ligante asfáltico.
- Se cubre el riego asfáltico con la capa de material pétreo.
- Se rastrea y plancha el tratamiento.
- Se barre y recolecta el material que no se adhiera al ligante asfáltico.

Los materiales pétreos tendidos y rastreados, como se mencionó, se planchan inmediatamente con un rodillo liso ligero, únicamente para acomodar las partículas, teniendo especial cuidado de no fracturarlas por el exceso de planchado. Después se realizará otro planchado, para lo cual se utiliza un compactador de neumáticos con peso aproximado de 4.5 a 7.5 t y una rastra de cepillo de fibra de raíz. Este equipo deberá pasar por la superficie las veces que sea necesario para mantener uniformemente distribuido el material y evitar que se formen acumulaciones u ondulaciones. El compactador de neumáticos deberá pasarse alternativamente con la rastra, durante el tiempo necesario para asegurar una adherencia máxima del material pétreo.

La aplicación del riego de sello con material pétreo 3-A ó 3-E a razón de 9 a 10  $\text{Vm}^2$  empleando asfalto rebajado del tipo FR-3 a razón de 0.7 a 1.0  $\text{Vm}^2$ .

**SECUENCIA DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO**



**2.1** MATERIAL TIRADO A  
PIEDRA OBRA, MEZCLADO  
Y DOSIFICADO EN LA PLANTA  
TRANSPORTADO CON  
CAMIONES DE VOLTEO.



**2.2** CON LA AYUDA DE LA  
MOTONIVELADORA, SE  
PROCEDE A CAMELLONAR EL  
MATERIAL A AMBOS EXTREMOS  
DE LA CORONA DEL  
PAVIMENTO.



**2.3** ACAMELLONADO EL  
EL MATERIAL A AMBOS DE  
EXTREMOS DE LA CORONA.  
ENTRA POR LA ZONA CENTRAL  
EL CAMION TOLVA EL  
CUAL TRANSPORTA LA CAL.



**2.4** LA CAL ES DESCARGADA  
MANUALMENTE POR LA PARTE  
INFERIOR DEL CAMION TOLVA,  
EL CUAL TIENE UNA CAPACIDAD  
APROX. DE 30 TONELADAS.



**E-5 LA PERSONA QUE  
DESCARGA LA CAL, REALIZA  
LA OPERACION MANUALMENTE,  
NO CORRE PELIGRO ALGUNO,  
YA QUE SE TRATA DE CAL  
HIDRATADA.**



**E-6 UNA VEZ DESCARGADA LA  
CAL, ESTA SE ENCUENTRA EN  
LA PARTE CENTRAL DE LA  
CORONA, Y A AMBOS EXTREMOS  
EL MATERIAL ACAMELLONADO.**

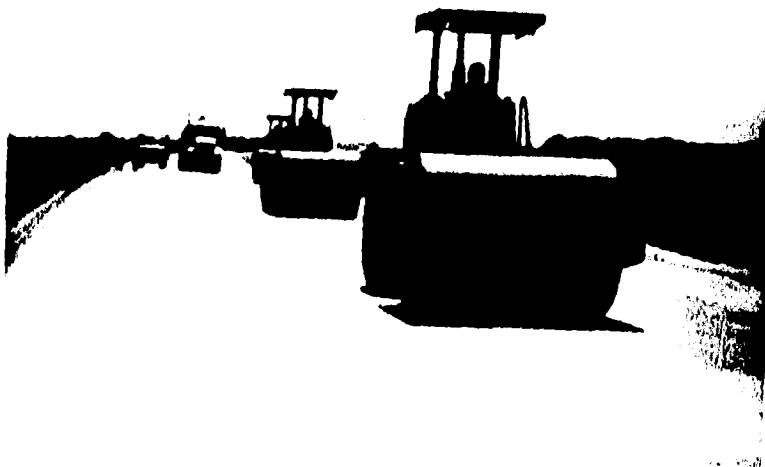


**7-7 PARA REALIZAR UNA  
MEZCLA MAS HOMOGENA  
DEL MATERIAL Y LA CAL.  
SE UTILIZA LA  
MOTONIVELADORA**

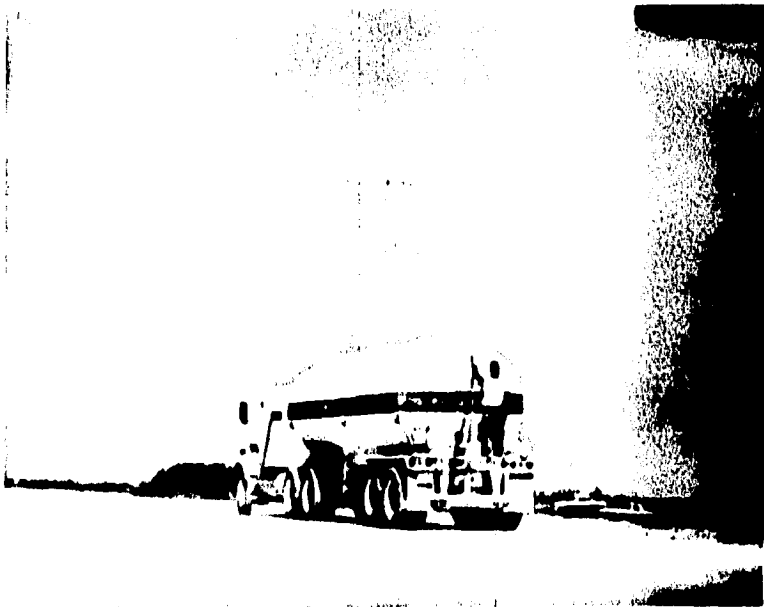




**2.8** UNA VEZ TENDIDO EL MATERIAL CON LAS MOTONIVELADORAS, SE LE PROPORCIONA LA HUMEDAD NECESARIA. ESTE MATERIAL TENDIDO ES UN NUEVO ESPESOR CONSTRUIDO, FORMANDO YA PARTE DEL PAVIMENTO.



**2.9** LA COMPACTACION SE REALIZA CON UN RODILLO LISO DE TAMBOR VIBRATORIO, UTILIZADO PARA DAR UNA COMPACTACION DEL 100% A LA BASE Y SUBBASE DEL PAVIMENTO.



**2-10** UNA VEZ COMPACTADA LA BASE AL 100 %, SE LE PROPORCIONA HUMEDAD CON LA PIPA, YA QUE AL REALIZAR LA COMPACTACION PERDIO HUMEDAD.



**2-11** ANTES DE APLICAR EL RIEGO DE IMPREGNACION, LA BASE ES HARRIDA CON UNA ESCOBA MECANICA, PARA ELIMINAR BASURA, POLVO Y PARTICULAS SUELTAS NO DESEABLES.



**E-13** SOBRE LA BASE, LA CUAL YA SE BARRIO, SE LE APLICARA UN RIEGO DE IMPREGNACION, ESTO SE REALIZA CON LA PETROLIZADORA.



**E-14** LA CARPETADA DE CONCRETO ASFALTICO YA APLICADA SOBRE LA BASE.

#### IV.6. APLICACIONES EN MÉXICO.

Apesar de que en México no se ha difundido ampliamente, y por lo mismo no habido una aplicación masiva del método de la estabilización de suelos con cal; los pocos trabajos realizados han demostrado que el método es adecuado y dejan una base sólida para que en un futuro próximo, realmente se empiece a fomentar el uso de la cal, como una alternativa convincente de los problemas de estabilización de suelos en las diversas construcciones de la ingeniería mexicana.

##### IV.6.1. CALLE 20, EN CULIACÁN SINALOA.

Topográficamente la zona es senciblemente plana con ligeras pendientes por lo que las características del drenaje son malas, geológicamente predominan los depósitos continentales constituidos por aglomerados de grava, arenas, limos y arcillas. Sobre estos depósitos existen una abundancia de tobas riolíticas con afloramientos de basalto. El clima de la región es semicálido y la precipitación anual es de 600 mm, siendo la temperatura promedio anual de 25 °C. Se adiciona un croquis de localización de la calle 20, fig. 4 - 1.

El pavimento a estabilizar, se encuentra muy dañado, presentando asentamientos, haches, hombros caídos, acanalamientos en la zonas de rodamientos, agrietamientos longitudinales y en piel de cocodrilo.

El pavimento está constituido por una carpeta asfáltica de mezcla en el lugar en la que se observe un exceso de finos y falta de afinidad entre el producto asfáltico y el agregado pétreo. La base es de 20 cm y está constituida por una grava arena de río, con tamaño máximo de 4", el material de la subrasante está constituida por una arcilla expansiva, de alta compresibilidad (CH), tomada de préstamos laterales, así mismo los terraplenes constituidos por ese mismo material.

Se realizaron diversas pruebas de laboratorio en las muestras obtenidas, con el objeto de clasificar la arcilla que se tiene en el lugar, tales pruebas fueron:

- a) Límites de consistencia.
- b) Contracción lineal.
- c) Pesos Volumétricos.
- d) Estabilidad de Hveem.
- e) Presión de expansión.

Estas pruebas se realizaron para el material arcilloso solo y el material estabilizado con diversos porcentajes de cal.

Con el objeto de estudiar la estabilización del suelo con cal, se elaboraron en el laboratorio las mezclas de suelo-cal, de acuerdo al procedimiento siguiente:

- a) Se macizó la arcilla hasta tamaño máximo de 3". Se adicionó la mitad del total de cal propuesta.
- b) Se mezcló perfectamente el suelo y la cal, agregando simultáneamente agua para obtener una humedad óptima.
- c) Se compactó ligeramente a la mezcla, mediante el compactador Hveem para formar especímenes que se dejaron en reposo y tapados durante un lapso de 5 a 7 días.
- d) Se disgregaron los especímenes para que todo el material pasara por la malla de 1" y el 60 % pasara por la malla No. 4.
- e) Se adicionó la otra mitad de cal; se agregó agua y se compactaron los especímenes de acuerdo con el método Hveem. En esta etapa se notó que el material resultó mucho más trabajable que en el caso de la arcilla sola. De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio, efectuadas a los materiales con la adición de cal y en estado natural, se pueden hacer comentarios de los resultados obtenidos:

1) En la fig. 4 - 2, se puede apreciar que el límite líquido disminuye a medida que se incrementa el contenido de cal, por otro lado el límite plástico se incrementa al incrementar dicho contenido de cal.

2) Lo anterior da lugar a que el índice plástico sufra una reducción y el suelo pase de un CH a un CL. La contracción lineal también se reduce considerablemente al efectuar la estabilización con cal, ambas tendencias se observan en la fig. 4 - 3, dicha contracción se reduce de aproximadamente 20 % en estado natural y hasta un 9% para el 6% de cal adicionada.

3) En la fig. 4 - 4, se puede notar que la presión de expansión para la humedad de compactación 22 % resultó ser de aproximadamente 0.43 kg/cm<sup>2</sup>, esto en la muestra sin cal, mientras que para un rango de humedades de compactación del 23 al 26 % corresponde a un rango de 0.03 a 0.0 kg/cm<sup>2</sup> en la presión de expansión respectivamente, esto para la muestra con 4 % de cal, o sea que compactando el material con humedades bajas se pueden desarrollar presiones de expansión del doble o aún mayores, que las que se desarrollan compactando con una humedad ligeramente excedida de la óptima.

4) Ahora bien estabilizando a la arcilla con cal se reduce considerablemente los pesos volumétricos del material, fig. 4 - 5, en estado natural se tiene un rango entre 1 710 a 1 550 kg/m<sup>3</sup>, y al adicionarle el 4 % de cal, se llega a tener rangos de 1 680 kg/m<sup>3</sup> con 19 % de humedad, y a 1 500 kg/m<sup>3</sup> con 24 % del contenido de humedad.

5) Lo que respecta a la estabilidad Hveem (Deformación lateral bajo cargas verticales) se tiene, de acuerdo a la fig. 4 - 6, que ésta se incrementa considerablemente con la adición de 4 % de cal, lo que se traduce en menores espesores del pavimento sobre la arcilla en cuestión, esto es siguiendo los lineamientos del método de California, fig. 4 - 7.

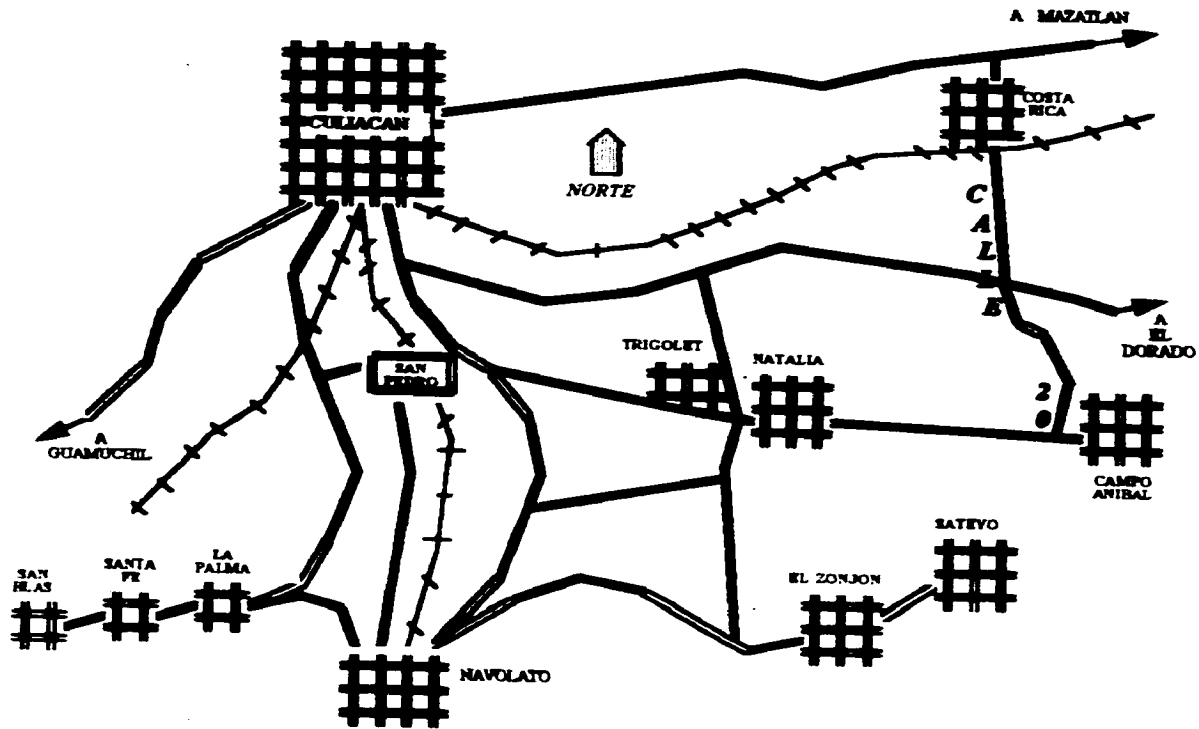


FIG. 4 - 1 CROQUIS DE UBICACION DE LA CALLE 29, EN CULIACAN, SINALOA

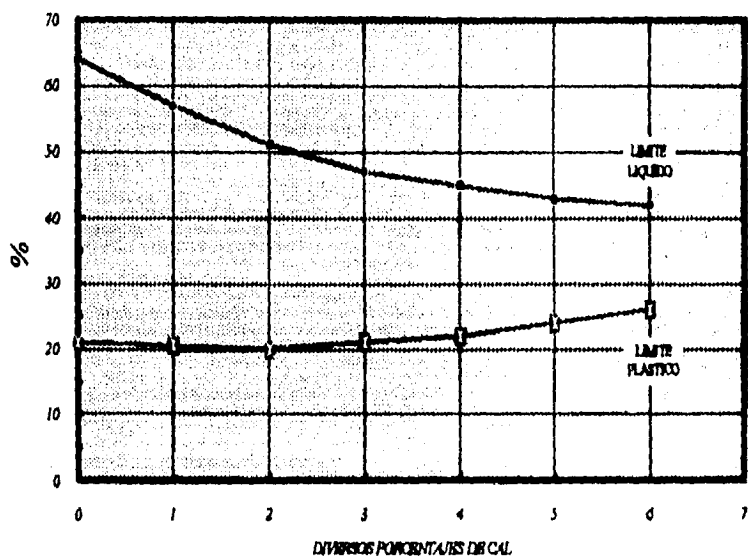


FIG. 4-2 VARIACIONES EN LIMITE LIQUIDO Y LIMITE PLASTICO

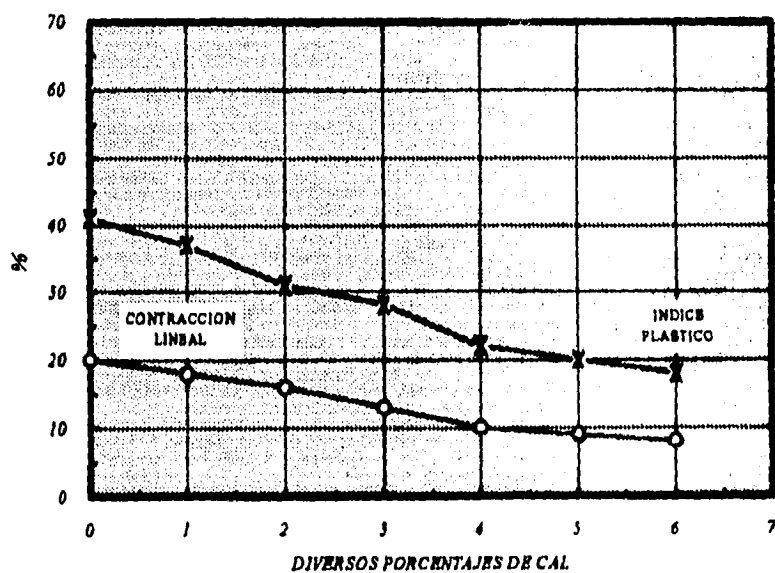


FIG. 4-3 VARIACIONES EN LA CONTRACCION LINEAL Y INDICE PLASTICO

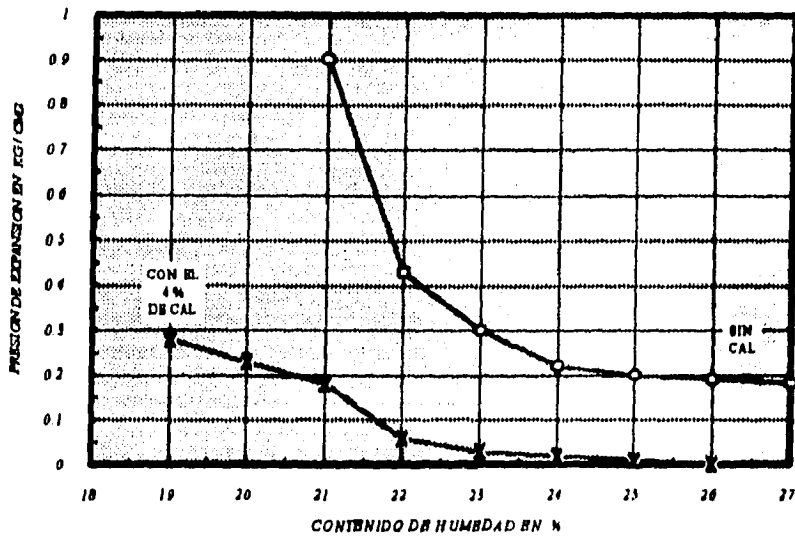


FIG. 4-4 VARIACIONES EN LA PRESION DE EXPANSION

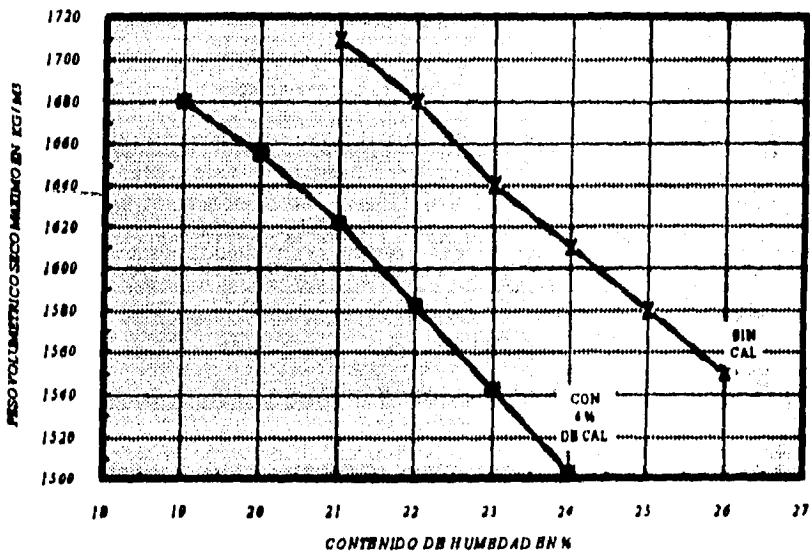


FIG. 4-5 VARIACIONES EN EL PESO VOLUMETRICO SECO MAXIMO



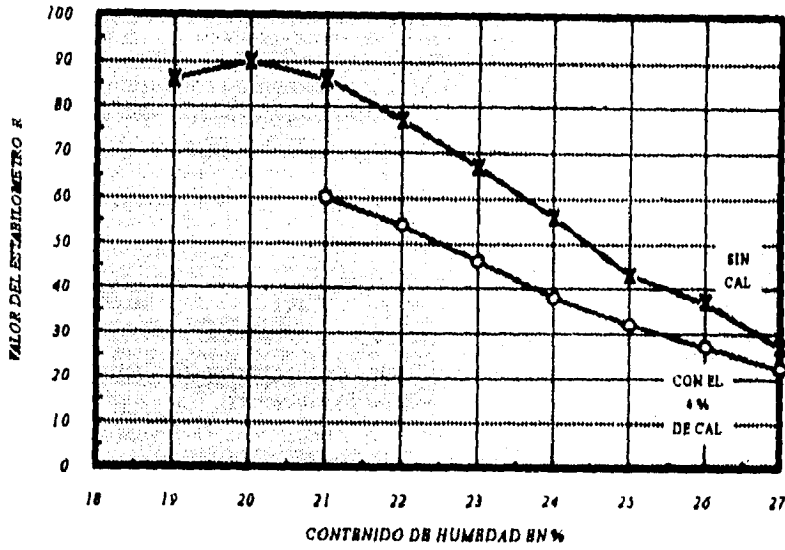


FIG. 4-6 VARIACIONES EN VALORES DEL ESTABILOMETRO

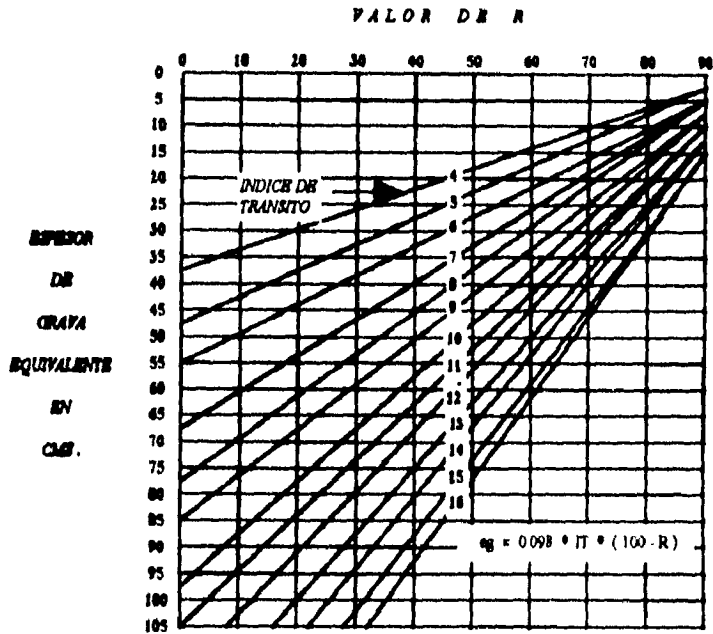


FIG. 4-7 GRAFICA PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES METODO DE CALIFORNIA

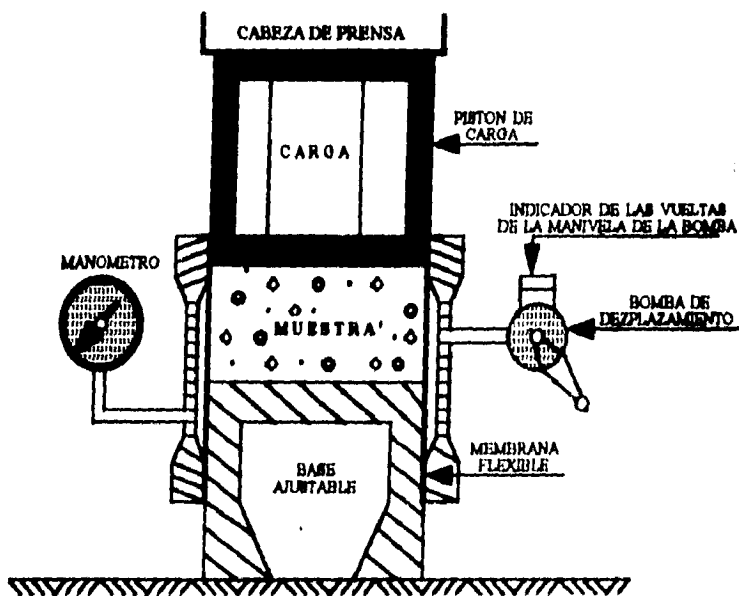


FIG. 4-8 ESQUEMA DEL ESTABILOMETRO DE HVEEM

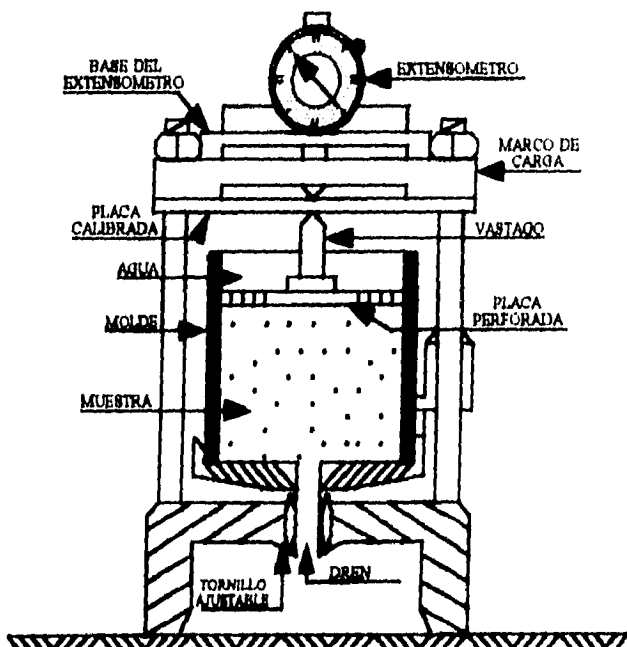


FIG. 4-9 ESQUEMA DEL ESPANSIOMETRO DE HVEEM

En la fig. 4 - 8, se observa el estabilometro de Hveem, y en la fig. 4 - 9, el expansionometro de Hveem.

De acuerdo con los estudios realizados, se proporcionarán algunas recomendaciones; de las cuales, la estructura del pavimento deberá de consistir de los siguientes elementos:

- a) Una carpeta asfáltica de 10 cm de mezcla en el lugar.
- b) Base de grava-arena de río con 10 % de finos del banco de préstamo, con un espesor de 30 cm.
- c) Subrasante estabilizada con el 4 % de cal, con un espesor de 50 cm compactada al 100 % de su peso volumétrico seco máximo y con una humedad óptima.
- d) Es de vital importancia darle una solución adecuada al drenaje longitudinal, ya sea elevada la rasante o construyendo sifones en los cruces del camino con los canales de riego.

#### IV.6.2. PAVIMENTOS ESTABILIZADOS CON CAL EN CD. NETZAHUALCÓYOTL.

La urbanización de Ciudad Netzahualcóyotl durante la década de 1960 y principios de la década de 1970, fueron obras de gran magnitud, sumamente difíciles y costosas debido al problema que presento el subsuelo desde el punto de vista ingenieril y los asentamientos desde el punto de vista socio-económico-políticos. La ciudad se encuentra prácticamente dentro del área urbana de la ciudad de México, limitada al norte por el lago de Texcoco, al oriente por los municipios de los Reyes y Chimalhuacán y al sur y al poniente por el Distrito Federal.

La Ciudad Netzahualcóyotl, geológicamente se encuentra dentro de una zona de depósitos o mantos compresibles de origen volcánico y lacustre, constituidos por arcillas de alta plasticidad y elevada compresibilidad, el espesor de estos mantos aumenta conforme se adentra en la zona de lago.

En cuanto a su topografía, la zona es senciblemente plana con una pendiente de drenaje hacia el noroeste. Todo ello sumado a los escasos recursos económicos del municipio, trajeron consigo difíciles tiempos para el desarrollo de infraestructura deseado.

Las avenidas grandes existentes en Cd. Netzahualcóyotl, tenían una capa superficial de mejoramiento de 10 a 15 cm de material de relleno de mejor calidad que las arcillas naturales. El mejoramiento en algunas zonas llega a tener hasta 70 cm de espesor, fue realizado por colonos, comerciantes y permisionarios para poder transportarse y transportar bienes de consumo, pero en épocas de lluvia, las calles se hacían intransitables debido a las arcillas, aún para vehículos ligeros. Los tipos de materiales para el mejoramiento consistían de canchajo, concreto asfáltico e hidráulico, productos de demolición, materiales basálticos, arena, limos arenosos, troncos de madera, raíces, etc. Esto origino que la vida de los pavimentos fuera efímera, siendo en algunos casos, ya casi imposible transitar debido a su falla total.

Entre las diversas causas que fueron deficiencias comunes en la construcción de estos pavimentos se pueden mencionar :

- a) No estabilizar las zonas de falla.
- b) Deficiencias en la eliminación de materia orgánica y sobre tamaños de relleno.
- c) Zonas sin control de calidad, tanto en materiales como procedimientos constructivos.
- d) No vigilar continuamente el comportamiento de los suelos, para evitar fallas por cortante.
- e) Falta de drenaje adecuado. Nulo mantenimiento a los pavimentos existentes.

A continuación se darán una serie de datos de las propiedades mecánicas de los suelos de Ciudad Netzahualcóyotl, los cuales llevan el punto de partida para hacer objetivas las dificultades de cualquier obra de Ingeniería en la zona:

**a) Límites de consistencia:**

Límite líquido varío entre 70 y 350 %

Límite plástico varío entre 35 y 90 %

Índice de plasticidad superior al 30 %

Estos valores sitúan a los suelos dentro de la carta de plasticidad correspondiéndoles los signos CH, MH y OH.

**b) Contracción lineal:**

Superior al 10 %

**c) Humedad o contenido de agua:**

Para éstas arcillas se ha encontrado que la humedad está arriba de la óptima y oscila entre 60 y 300 % de su peso seco, siendo la óptima entre 55 y 60 %

**d) Peso volumétrico seco máximo:**

Según las pruebas de la S.O.P., este oscila entre 950 y 1 100 kg/m<sup>3</sup>, o sea que se tienen suelos muy ligeros que denotan origen volcánico.

**e) Granulometría:**

Todo el material pasa por la malla No. 10 y en general la malla No. 200 retiene menos del 40 % o sea que pasa más del 60 %.

**f) Valor de soporte:**

Según la prueba estandar de valor relativo de soporte (VRS) varío entre 0 y 5 %.

**g) Composición de los suelos:**

Se tiene en la zona arcillas orgánicas e inorgánicas y el mineral que las compone es esencialmente la montmorillonita a base de silicatos de aluminio; además contienen carbonatos y bicarbonatos de sodio, cloruro de sodio, óxido de sílice y materia orgánica.

Conforme se acumulaba información del comportamiento de los suelos, se vio la necesidad de cambiar los criterios y procedimientos de los pavimentos convencionales con el objeto de disminuir los espesores de éstos, utilizando pavimentos estabilizados, reduciendo notablemente la inversión necesaria para su ejecución. Es así que se iniciaron una serie de investigaciones en colaboración con la Dirección General de Obras Públicas del Estado de México, asesorados por Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, con el objeto de aprovechar los mejoramientos existentes, corrigiendo sus características con cal hidratada.

Los resultados más importantes de estas investigaciones se presentan a continuación:

*A) Límites de Consistencia o Atterberg.*

Los límites de consistencia, son un índice muy representativo para determinar la calidad de los suelos. Se puede observar, en fig. 4 - 11, que el aditivo estabilizador empleado, la cal hidratada dio excelentes resultados, ya que con porcentajes inferiores del 10 % en peso, se logró anular el índice plástico de las arcillas y reducir la contracción lineal, a menos de 6 %.

Usando concentraciones de 6 % de cal en los suelos arcillosos, se logró reducir el límite líquido a un punto óptimo, no así el límite plástico, el cual tiende a aumentar, fig. 4 -10.

*B) Resistencia a la compresión sin confinamiento.*

Esta prueba da una idea de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos estabilizados y de la forma como la cal va reaccionando con el suelo en función del tiempo y de los diversos porcentajes agregados en el mismo suelo. A mayor cantidad de cal, mayor es la resistencia a una misma edad, sin embargo, llega un momento en que la resistencia no aumenta a pesar de aumentar el porcentaje de cal, se puede observar en la fig. 4 -12, o sea, que llega el momento en que se hace constante el aumento es debido a la reacción llegó a su límite. Para resolver el problema de las arcillas plásticas de la región, se procedió a mezclar los suelos con cal hidratada, con el objeto de mejorar la calidad del suelo desde el punto de vista plástico, de esta combinación, se logró obtener magníficos resultados, ya que para suelo en particular, se determina la cantidad de cal necesaria para modificar las características del suelo; de este modo con la cal se hace tratable aún en el caso de estar el suelo con una humedad superior a la óptima.

*C) Compactación, Humedad y Peso Volumétrico Máximo.*

En el caso de la cal hidratada se observó una ligera tendencia a disminuir el peso volumétrico máximo y aumentar la humedad óptima, al aumentar el contenido de cal.

Además se observó, que al tratar con cal hidratada un suelo, se facilita notablemente el trabajo de compactación, especialmente cuando está el suelo en su estado natural con un exceso de humedad o por la lluvia, se hace difícil trabajar suelos finos, se observó, que aún en el caso de que la lluvia sorprenda los trabajos que se realizan en el campo durante la jornada, el material puede trabajarse incluso varios días después, sin mermar los resultados.

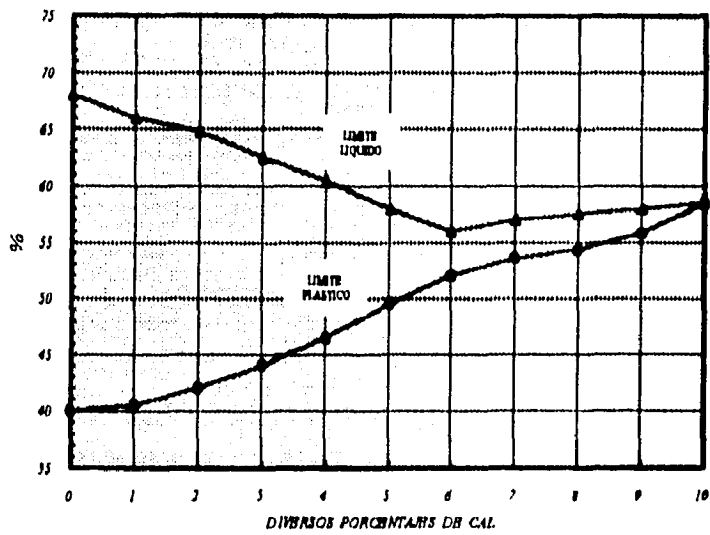


FIG. 4-10 VARIACIONES EN LIMITE LIQUIDO Y LIMITE PLASTICO

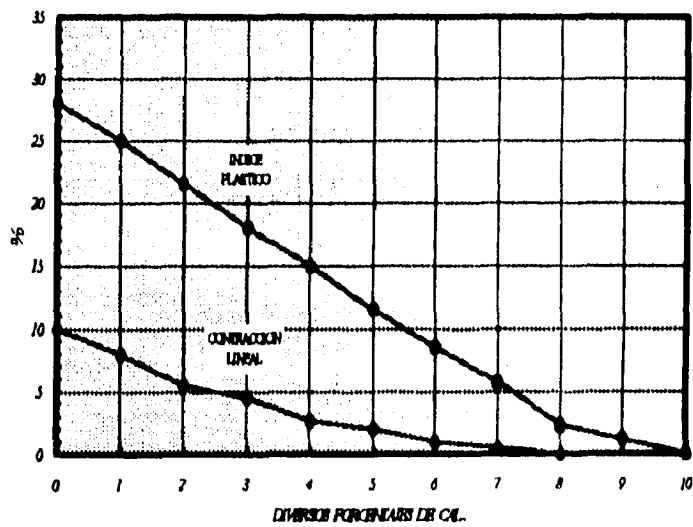


FIG. 4-11 VARIACIONES EN EL INDICE PLASTICO Y CONTRACCION LINEAL

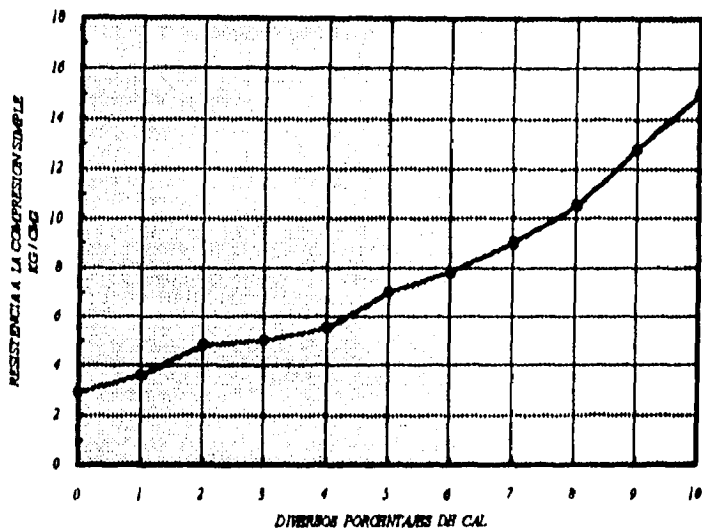


FIG. 4-12 VARIACIONES EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE

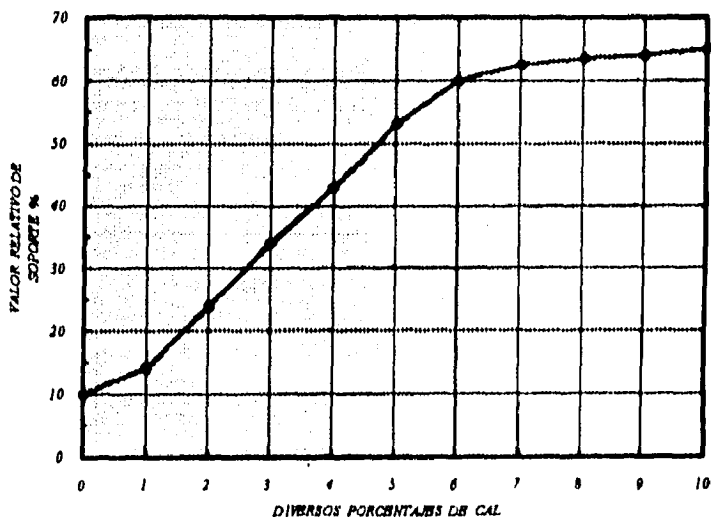


FIG. 4-13 VARIACION EN EL VALOR RELATIVO DE SOPORTE

#### *D) Valor Relativo de Soporte.*

De todas las pruebas que se realizaron durante el tratamiento de suelos estabilizados, la del Valor Relativo de Soporte, fue la que mejores resultados arrojó, fig. 4 - 13.

Ahora bien en la prueba del Valor Relativo de Soporte, sucede lo mismo que en la resistencia a la compresión simple, llega el momento que ya no aumenta los valores.

En la combinación de suelo-cal, dio magníficos resultados, en general superaron en mucho a los requisitos que exigía la S.O.P. para los materiales de subrasante, subbases o bases del pavimento.

#### **IV.6.3. AUTOPISTA MATAMOROS-REYNOSA EN CD. REYNOSA TAMAULIPAS.**

Reynosa, se fundó el 14 de Marzo de 1749, contando entonces con una población de 279 habitantes al mando del capitán Carlos Cantú. En sus 246 años de vida, la ciudad siempre ha participado en el acontecer social y político de nuestro país. Don Antonio Gutiérrez de Lara se levantó en armas en el mes de Noviembre de 1810 en apoyo del movimiento insurgente y fue hasta el 24 de Noviembre de 1926, por decreto presidencial se le dio su actual categoría de ciudad. El 4 de julio de 1802 fue trasladada a 8 km al este, sobre la misma margen del río Bravo, debido a las constantes inundaciones que sufría la ciudad.

Su vida pujante, integrándose día con día al concierto de la civilización y la tecnología moderna, sobrepasando la industria petrolera, y las industrias maquiladoras, misma que es base de su riqueza y una fuente permanente de empleo generadora de actividad comercial, que aunada al creciente desarrollo del sector primario, promueven el desarrollo económico y social de un elevado número de poblaciones.

El municipio se localiza en el noreste del país y colinda al norte con el condado de Hidalgo Texas; al este con el municipio de Río Bravo; al sur con el municipio de Méndez; al oeste con el Edo. de Nuevo León y al noroeste con el municipio de Gustavo Díaz Ordaz.

El gobierno Municipal de Reynosa, estudiando la necesidad de contar con una carretera que trajera consigo beneficios al propio municipio y a la población en general, se dio a la tarea de proyectar dicha infraestructura, la cual debería satisfacer en gran medida la creciente demanda por parte de los usuarios y el creciente desarrollo económico del municipio.

Es entonces que proponen unir la nueva autopista de Reynosa a la del tramo ya existente de origen en Matamoros, dicho proyecto sería autorizado más tarde por el gobierno estatal de Tamaulipas, es entonces que a este valioso proyecto, se le da el nombre de Autopista Matamoros-Reynosa, por tener origen de kilometraje en el tramo existente de Matamoros, siendo de cuatro carriles la nueva autopista, se muestra un croquis general de dicha autopista en la fig. 4 - 14.



Dicha autopista traerá consigo muchos beneficios a nivel municipal y estatal ya que une los municipios de Matamoros y Reynosa, municipios fronterizos del estado de Tamaulipas con el sur de los Estados Unidos de Norteamérica.

Entre los beneficios se mencionan algunos:

▬ Para la comunidad una mayor seguridad en sus traslados, originando menos accidentes, ahorrando tiempo en sus traslados, lo que trae consigo un ahorro de combustible.

▬ Mayor rapidez y seguridad en transportar las mercancías y los productos hacia otros municipios y a los Estados Unidos.

▬ Fomentar más el intercambio comercial, dentro de propio Estado de Tamaulipas y hacia los Estados Unidos, lo que traerá consigo un aumento en las ofertas de empleo, debido al intenso movimiento e incremento que surgirán en el ramo económico.

▬ Un aumento en el ramo turístico, ya que se tendrá una opción importante de comunicación, al utilizar esta importante vía, la autopista.

A continuación se mencionara lo referente a los resultados arrojados en las diversas pruebas de laboratorio realizadas, todas ellas para la Autopista Matamoros-Reynosa.

CROQUES GENERAL DE LA AUTOPISTA MATAMOROS-REYNOSA  
EN EL ESTADO DE TAMAULIPAS

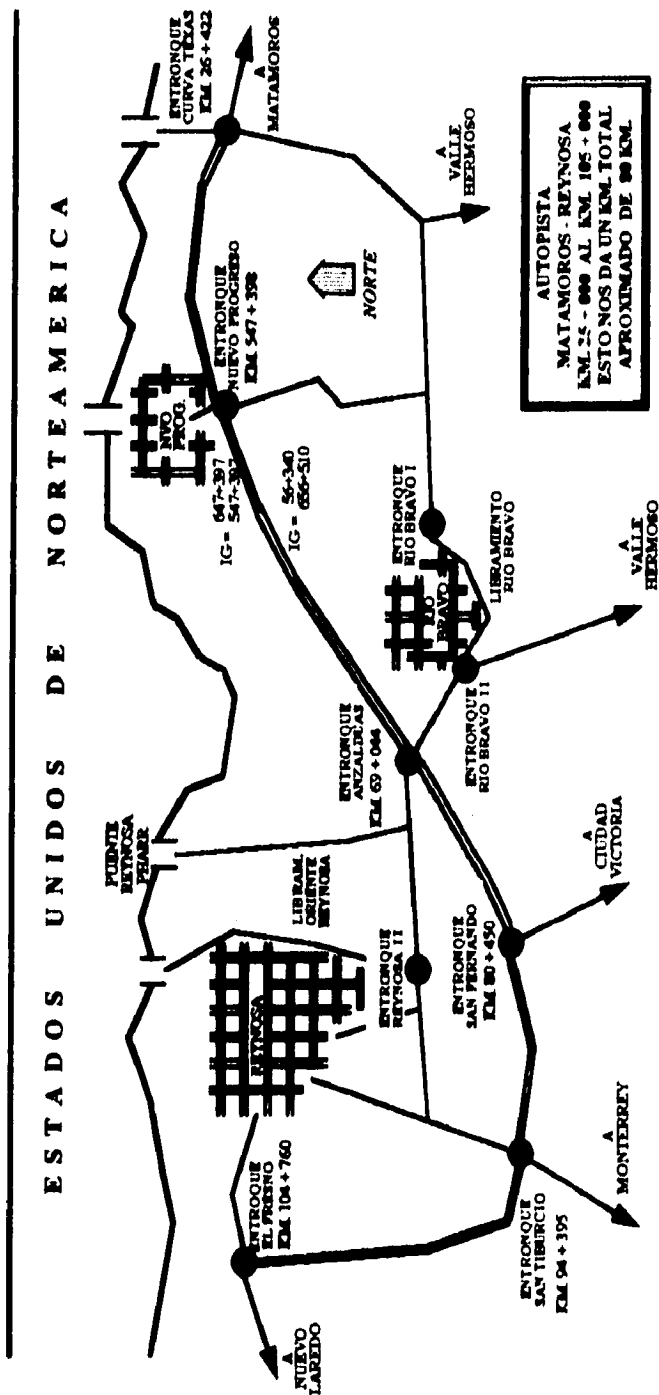


FIG. 4 - 14 CROQUES DE UBICACION DE LA AUTOPISTA MATAMOROS-REYNOSA

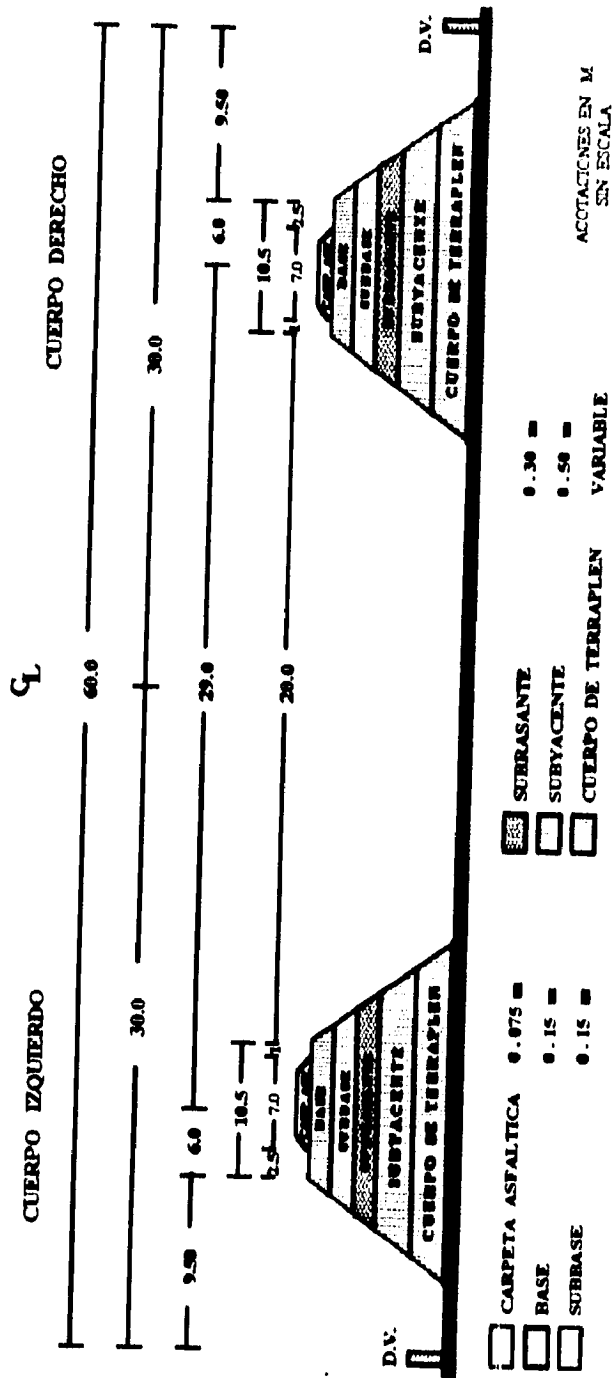


FIG. 4-15 SECCION TIPO DE LA AUTOVIA MATAMOROS-REYNOSA DE CUATRO CARRILES

#### A. - SUBRASANTE:

Las características que deben cumplir los materiales que serán empleados en las terracerías son mencionadas en los cuadros 1 y 2 del inciso 002 - C.01 del capítulo 4.01.01.002 del libro 4.01.01 de las Normas de Calidad de los Materiales, en la parte correspondiente a Carreteras y Aeropistas, editadas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Los materiales empleados para terracerías en cualquier obra deberán cumplir con estas normas ya que de ello depende en parte el éxito de los trabajos.

Se realizaron en las terracerías pruebas de laboratorio, las cuales se realizaron en el suelo natural arrojando ciertos resultados, posteriormente se realizaron en las mismas terracerías las mismas pruebas agregándole ahora un porcentaje del 6 % de cal, observando en ambos resultados variaciones importantes en cuanto a sus propiedades físico-mecánicas, se podrá observar que tan importante es la cal al utilizarla para estabilizar suelos arcillosos. Dicha prueba no se llevo a campo, nadamás se realizó en el laboratorio, sin llevarla a la práctica, para tener una referencia importante de los beneficios del uso de la cal. Lo referente a las pruebas de laboratorio realizadas a las terracerías en estado natural se ratifica en las figs. 4 - 16 . A . , y las mismas pruebas en las terracerías , pero con el 6 % de cal adicionada, en la fig. 4 - 16 . B .

También se presentan los resultados arrojados por el laboratorio para la subrasante, fig. 4 - 16 . C . , no se le adiciono cal a las pruebas, se realizaron con las muestras en estado natural.

OBRA :	AUTOPISTA MATAMOROS - REYNOSA	ENSAYES Nos :	260/94		
LOCALIZACION :	TRAMO LA CURVA TEXAS - REYNOSA	FICHA DE RECIBO :	09 - MAYO - 1994		
EMPRESA :	TRIBARRA	FICHA DE INFORME :	18 - MAYO - 1994		

IDENTIFICACION	No DE ENSAYE				
	ESTACION	4 + 300	4 + 700	537 + 409	537 + 809
	LADO (LIBRAMIENTO ORIENTE)	CPO DER	CPO DER	CPO IZQ	CPO IZQ
	CAPA	TERRACERIAS		TERRACERIAS	

CARACTERÍSTICAS	TAMAÑO MÁXIMO	4 0	4 0	4 0	4 0
	% RETENIDO EN LA MALLA DE 75 mm .	0 0	0 0	0 0	0 0
	% QUE PARA LA MALLA DE 4.75 mm .	100	100	100	100
	% QUE PARA LA MALLA DE 0.425 mm .	95	87	98	95
	% QUE PARA LA MALLA DE 0.075 mm .	66	50	81	60
	EQUIVALENTE DE HUMEDAD DE CAMPO %				
	límite LIQUIDO %	61.6	66.0	31.4	28.8
	índice PLÁSTICO %	43.8	44.5	7.8	7.4
	CONTRACCIÓN LINEAL %	17.0	17.4	3.0	2.8
	P.E.S. FUERTO kg / m <sup>3</sup>	1 110	1 176	1 136	1 132
	P.E.S. MÁXIMO kg / m <sup>3</sup>	1 681	1 707	1 711	1 673
	HUMEDAD ÓPTIMA %	21.8	20.7	20.1	10.5
	HUMEDAD NATURAL %				
	COMPACTACION DEL LUGAR %				
V.R. ESTANDAR SATURADO %	3.5	3.0	12.5	22.3	
EDANCIÓN %	3.91	5.66	1.84	1.50	
CLASIFICACION	CH1	CH1	OL	OL	

RESUMIDORES	TIPO DE PRUEBA		PORTER MODIFICADA VARIANTE II			
	CURVA DE PROYECTO					
	Cond. del lugar	HUMEDAD DE PRUEBA %				
		VALOR RELATIVO DE SOPORTE %				
		ESPESOR REQUERIDO cm .				
	90 % de comp.	HUMEDAD DE PRUEBA %	24.8	23.7	23.1	13.5
		VALOR RELATIVO DE SOPORTE %	INAP	INAP	8.0	14.3
		ESPESOR REQUERIDO cm .				
	95 % de comp.	HUMEDAD DE PRUEBA %	22.3	22.2	21.6	12.0
		VALOR RELATIVO DE SOPORTE %	INAP	INAP	11.4	20.1
		ESPESOR REQUERIDO cm .				
	100 % de comp.	HUMEDAD DE PRUEBA %				
VALOR RELATIVO DE SOPORTE %						
ESPESOR REQUERIDO cm .						

FIG. 4-16.A. INFORME DE ENSAYE PARA MATERIALES EN TERRACERIAS, SIN CAL

OBRA :	AUTOPISTA MATAMOROS - REYNOSA	ENSAYES Nos	261 / 94		
LOCALIZACION :	TRAMO LA CURVA TEXAS - REYNOSA	FECHA DE RECIBO	02 - MAYO - 1994		
EMPRESA :	TRIBASA	FECHA DE INFORME	18 - MAYO - 1994		

IDENTIFICACION	No. DE ENSAYE				
	ESTACION	4 + 300	4 + 700	537 + 409	537 + 809
	LADO (LIBRAMIENTO ORIENTE)	CPO DER	CPO DER	CPO IZQ	CPO IZQ
	CAPA	TERRACERIAS		TERRACERIAS	

CARACTERÍSTICAS	TAMAÑO MÁXIMO	4 0	4 0	4 0	4 0
	% RETENIDO EN LA MALLA DE 75 mm.	0 0	0 0	0 0	0 0
	% QUE PASA LA MALLA DE 4.75 mm.	100	100	100	100
	% QUE PASA LA MALLA DE 0.425 mm.	57	46	91	75
	% QUE PASA LA MALLA DE 0.075 mm.	24	21	47	46
	EQUIVALENTE DE HUMEDAD DE CAMPO %				
	LÍMITE LÍQUIDO %	41 9	39 2	24 4	25 6
	ÍNDICE PLÁSTICO %	15 2	9 4	INAP	INAP
	CONTRACCIÓN LINEAL %	5 8	3 6	1 5	1 8
	P.E.S. SEQUEO KG/M3	1 116	1 207	1 160	1 160
	P.E.S. MÁXIMO KG/M3	1 569	1 650	1 714	1 668
	HUMEDAD ÓPTIMA %	25 2	22 7	20 3	14 0
	HUMEDAD NATURAL %				
	COMPACTACIÓN DEL LUGAR %				
V.R.S. BOMBANDA SATURADO %	17 6	20 6	66 2	52 5	
EXPANSIÓN %	1 06	0 77	0 10	0 09	
CLASIFICACION	BC	BC	BM	BM	

ESTUDIOS	TIPO DE PRUEBA	PORTER MODIFICADA VARIANTE 11				
	CURVA DE PROYECTO					
	Cual del lugar	HUMEDAD DE PRUEBA %				
		VALOR RELATIVO DE SOPORTE %				
		ESPESOR REQUERIDO cm.				
	90 % de comp.	HUMEDAD DE PRUEBA %	24 2	25 7	23 3	17 0
		VALOR RELATIVO DE SOPORTE %	11 1	12 9	41 6	33 0
		ESPESOR REQUERIDO cm.				
	95 % de comp.	HUMEDAD DE PRUEBA %	26 7	24 2	21 8	15 5
		VALOR RELATIVO DE SOPORTE %	16 0	18 8	60 4	47 8
		ESPESOR REQUERIDO cm.				
	100 % de comp.	HUMEDAD DE PRUEBA %				
VALOR RELATIVO DE SOPORTE %						
ESPESOR REQUERIDO cm.						

FIG. 4-16. B. INFORME DE ENSAYE PARA MATERIALES EN TERRACERIAS, CON EL 6 % DE CAL

OBRA :	AUTOPISTA MATAMOROS - REYNOSA	ENVAYES Nos	2 231, 2 232 Y 2233
LOCALIZACION :	TRAMO LA CURVA TEXAS - REYNOSA	FECHA DE RECIBO	07 - JUNIO - 1994
EMPRESA :	TRIBASA	FECHA DE INFORME	16 - JUNIO - 1994

EVENTO - FICACION	No. DE ENVAYE	2 231	2 232	2 233
	ESTACION	27 + 600	28 + 000	28 + 400
	LADO (LIBRAMIENTO ORIENTE)	CPO DER	CPO DER	CPO DER
	CAPA	SUBRASANTE		

C A R A C T E R I S T I C A S	TAMAÑO MÁXIMO	2 1/2"	1 1/2"	2"
	% RETENIDO EN LA MALLA DE 75 mm.	0.0	0.0	0.0
	% QUE PASA LA MALLA DE 4.75 mm.	55	50	56
	% QUE PASA LA MALLA DE 0.425 mm.	35	33	33
	% QUE PASA LA MALLA DE 0.075 mm.	16	15	15
	EQUIVALENTE DE HUMEDAD DE CAMPO %			
	LÍMITE LÍQUIDO %	38	40	38
	ÍNDICE PLÁSTICO %	16	17	18
	CONTRACCIÓN LINEAL %	5	5.2	6.8
	P.E.S. SUJETO KG / MO.	1 505	1 450	1 444
	P.E.S. MÁXIMO KG / MO.	1 853	1 856	1 850
	HUMEDAD ÓPTIMA %	15.9	15.4	15.2
	HUMEDAD NATURAL %			
	COMPACTACIÓN DEL LUGAR %			
V.R.S. ESTÁNDAR SATURADO %	62	55	58	
EXPANSIÓN %	0.51	0.41	0.21	
CLASIFICACIÓN	BC	BC	BC	

E S T U D I O R E S	TIPO DE PRUEBA	PORTER MODIFICADA VARIANTE 11			
	CURVA DE PROYECTO				
	Cant. del lugar	HUMEDAD DE PRUEBA %			
		VALOR RELATIVO DE SOPORTE %			
		ESPESOR REQUERIDO cm.			
	80 % de comp.	HUMEDAD DE PRUEBA %			
		VALOR RELATIVO DE SOPORTE %			
		ESPESOR REQUERIDO cm.			
	95 % de comp.	HUMEDAD DE PRUEBA %			
		VALOR RELATIVO DE SOPORTE %			
		ESPESOR REQUERIDO cm.			
	100 % de comp.	HUMEDAD DE PRUEBA %	15.9	15.4	15.2
VALOR RELATIVO DE SOPORTE %		76	81.8	66	
ESPESOR REQUERIDO cm.					

FIG. 4-16. C. INFORME DE ENSAYE PARA MATERIALES  
EN LA SUBRASANTE, SIN CAL.

## **B . - SUBBASE Y BASE :**

Los resultados de las diversas pruebas deben cumplir en su mayor parte con las especificaciones marcadas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, comprendidas en el capítulo 4.01.03.009 , del libro 4.01.01 de las Normas de Calidad de los Materiales, referentes a carreteras y aeropistas; dichas especificaciones ya se mencionaron a principios de este capítulo, siendo ellas para materiales estabilizados con cal, ya que las normas son un poco diferentes cuando se utiliza un mecanismo químico en la estabilización.

Primeramente se presentan los formatos, fig. 4 - 17, que presentan las pruebas de laboratorio para la subbase, estas pruebas fueron realizadas sobre muestras en estado natural y en muestras con diversos porcentajes de cal adicionada, se ensayaron con: 0 % (A), 1.5 % (B), 2.0 % (C) y 3.0 % (D), de cal en peso respectivamente en cada prueba; los efectos de la cal en algunas de las pruebas y sus variaciones en las mismas, fueron presentadas en el capítulo 3 del presente trabajo, se hicieron las observaciones pertinentes para esas prueba y una representación en forma de gráfica. Así mismo, se adicionan los resultados obtenidos de la compactación en la subbase, fig. 4 - 18.

Enseguida son presentados los formatos, fig. 4 - 19, que presentan las pruebas de laboratorio para la base, se realizaron para muestras en estado natural y muestras con diversos porcentajes de cal, se ensayaron con las pruebas con: 0 % (A), 1.5 % (B), 3.0 % (C), 4.0 % (D) y 5.0 % (E), de cal en peso respectivamente en cada muestra; los comentarios pertinentes para algunas de las pruebas y sus variaciones en forma gráfica se realizaron en el capítulo 3 del presente trabajo. Adicionando los resultados obtenidos de la compactación en la base, fig. 4 - 20.

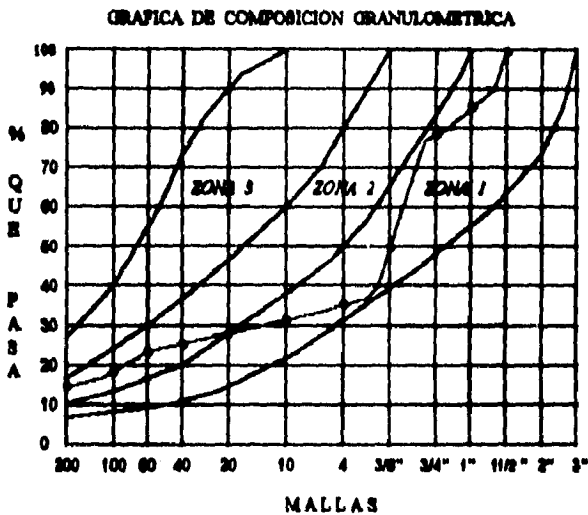


OBRA : AUTOPISTA MATAMOROS - REYNOSA ENVAJE No. 671/95  
 LOCALIZACION : TRAMO LA CURVA TEXAS - REYNOSA FECHA DE RECIBO : 8 - ENO - 1995  
 EMPRESA : TRIBARRA FECHA DE INFORME : 16 - ENO - 1995

MATERIAL PARA CAPA DE : BASE  SUBBASE   
 DESCRIPCION DEL MATERIAL : CONGLOMERADO CALIZO PARA USARSE EN PAV FLEXIBLE  
 TRATAMIENTO PREVIO AL MUESTREO : 70% 1 1/2 - 30% FINOS, DOBIFICADO Y MEZCLADO EN LA PLANTA  
 CLASE DE DEPOSITO MUESTREADO : TRITURADO Y CRIBADO PARCIAL, BANDA TRANSPORTADORA  
 BANCO PROCEDENTE DEL MATERIAL PISTREO : BANCO EL PUERTO, MEZCLA SIN CAL.

PESO VOLUMETRICO SUELTO NO / M3	<u>1.684</u>
PESO VOLUMETRICO MAXIMO NO / M3	<u>2.176</u>
HUMEDAD OPTIMA %	<u>9.3</u>

COMPOSICION GRANULOMETRICA	
MALLA	% RETENIDO
3"	
2"	
1 1/2"	100
1"	86
3/4"	70
5/8"	50
No. 4	35
No. 10	31
No. 20	28
No. 40	25
No. 60	23
No. 100	19
No. 200	15



V.R.E. (ESTANDAR) % : 61.0  
 EXPANSION % : 0.30  
 VALOR CEMENTANTE NO / CM3 : 10.8  
 EQUIVALENTE DE ARENA : 12.6

PRUEBAS EN MAT. MAYOR A LA MALLA 3/8"

ABSORCION % : 1.28  
 DENSIDAD : 2.53  
 DURABILIDAD : \_\_\_\_\_

PRUEBAS SOBRE EL MATERIAL TAMIZADO POR LA MALLA No. 40

LMITE LIQUIDO % : 27.5 EQUIV. HUM. DE CAMPO % : \_\_\_\_\_  
 LMITE PLASTICO % : 11.5 CONTRACCION LINEAL % : 6.2  
 INDICE PLASTICO % : 16.0 CLASIFICACION U.C.C. : GC (GRAYA ARCILLOSA)

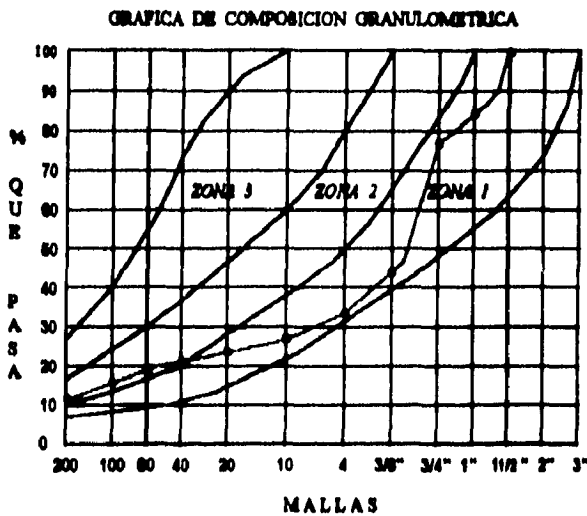
FIG. 4-17. A. INFORME DE ENVAJE PARA MATERIALES EN LA SUBBASE, SIN CAL

OBRA : AUTOPISTA MATAMOROS - REYNOSA ENSAYE No. : 672/93  
 LOCALIZACION : TRAMO LA CURVA TEXAS - REYNOSA FECHA DE RECIBO : 8.ENE.1993  
 EMPRESA : TRIBASA FECHA DE INFORME : 16.ENE.1993

MATERIAL PARA CAPA DE : BASE  SUBBASE   
 DESCRIPCION DEL MATERIAL : CONGLOMERADO CAUZO PARA USARSE EN : PAV FLEXIBLE  
 TRATAMIENTO PREVIO AL MUESTREO : 70% 1 1/2 - 30% FINOS, DOSIFICADO Y MEZCLADO EN LA PLANTA  
 CLASE DE DEPOSITO MUESTREADO : TRITURADO Y CRIBADO PARCIAL, BANDA TRANSPORTADORA  
 BANCO PROCEDENTE DEL MATERIAL PETREO : BANCO EL PUERTO, MEZCLA CON 1.5% DE CAL EN PERO.

PESO VOLUMETRICO SUBLTO 100 / M3	<u>1.672</u>
PESO VOLUMETRICO MAXIMO 100 / M3	<u>2.082</u>
HUMEDAD OPTIMA %	<u>10.0</u>

COMPOSICION GRANULOMETRICA	
MALLA	% RETENIDO
3"	
2"	
1 1/2"	100
1"	84
3/4"	78
3/8"	46
No. 4	33
No. 10	27
No. 20	24
No. 40	21
No. 60	19
No. 100	16
No. 200	12



V.R.E (ESTANDAR) % : 101.3  
 EXPANSION % : 0.0  
 VALOR CEMENTANTE 100 / CM2 : 8.5  
 EQUIVALENTE DE ARENA : 16.0

PRUEBAS EN MAT. MAYOR A LA MALLA 3/8"

ABSORCION % : 1.38  
 DENSIDAD : 2.48  
 DURABILIDAD : \_\_\_\_\_

PRUEBAS SOBRE EL MATERIAL TAMIZADO POR LA MALLA No. 40

LMITE LIQUIDO % : 31.0 EQUIV. HUM. DE CAMPO % : \_\_\_\_\_  
 LMITE PLASTICO % : 21.2 CONTRACCION LINEAL % : 3.8  
 INDICE PLASTICO % : 9.8 CLASIFICACION BUCS : OC (GRAVA ARCILOSA)

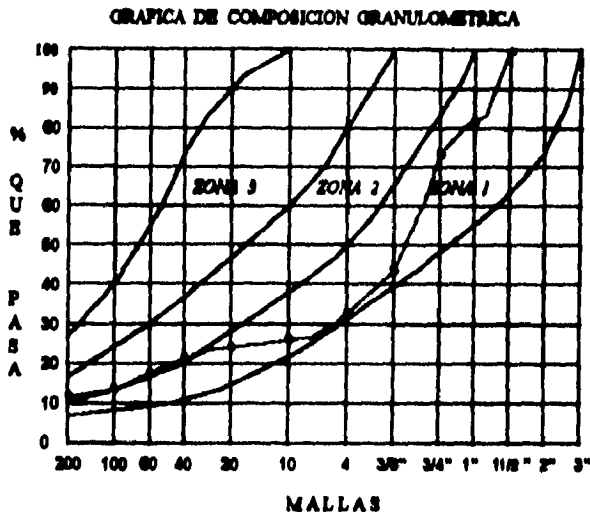
FIG. 4-17. B. INFORME DE ENSAYE PARA MATERIALES EN LA SUBBASE, CON 1.5% DE CAL

OBRA : AUTOPISTA MATAMOROS - REYNOSA ENVASE No : 673/95  
 LOCALIZACION : TRAMO LA CURVA TEXAS - REYNOSA FECHA DE RECIBO : 1 - ENE - 1992  
 EMPRESA : TRIBASA FECHA DE INFORME : 16 - ENE - 1992

MATERIAL PARA CAPA DE : BASE  SUBBASE   
 DESCRIPCION DEL MATERIAL : CONGLOMERADO CALIZO PARA USARSE EN : PAV. FLEXIBLE  
 TRATAMIENTO PREVIO AL MUESTREO : 70% 1 1/2 - 30% FINOS, DOSIFICADO Y MEZCLADO EN LA PLANTA  
 CLASE DE DEPOSITO MUESTREADO : TRITURADO Y CRIBADO PARCIAL, BANDA TRANSPORTADORA  
 BANCO PROCEDENTE DEL MATERIAL PEBREO : BANCO EL PUERTO, MEZCLA CON 2.9% DE CAL EN PEBREO

PESO VOLUMETRICO SUERTO KG/M3	<u>1.675</u>
PESO VOLUMETRICO MAXIMO KG/M3	<u>2.097</u>
HUMEDAD OPTIMA %	<u>10.3</u>

COMPOSICION GRANULOMETRICA	
MALLA	% RETENIDO
3"	
2"	
1 1/2"	100
1"	81
3/4"	73
3/8"	44
No. 40	32
No. 60	26
No. 80	24
No. 100	21
No. 150	18
No. 200	14
No. 300	11



V.R. (ESTANDAR) % : 114.8  
 EXPANSION % : 0.0  
 VALOR CEMENTANTE KG/CM2 : 7.7  
 EQUIVALENTE DE ARENA : 21.6

PRUEBAS EN MAT. MAYOR A LA MALLA 3/8"

ABSORCION % : 1.12  
 DENSIDAD : 2.57  
 DURABILIDAD : \_\_\_\_\_

PRUEBAS SOBRE EL MATERIAL TAMIZADO POR LA MALLA No. 40

LMITE LIQUIDO % : 32.6 EQUIV. HUM. DE CAMPO % \_\_\_\_\_  
 LMITE PLASTICO % : 24.4 CONTRACCION LINEAL % : 3.2  
 INDICE PLASTICO % : 8.2 CLASIFICACION SUCS : GC (GRAVA ARCILLOSA)

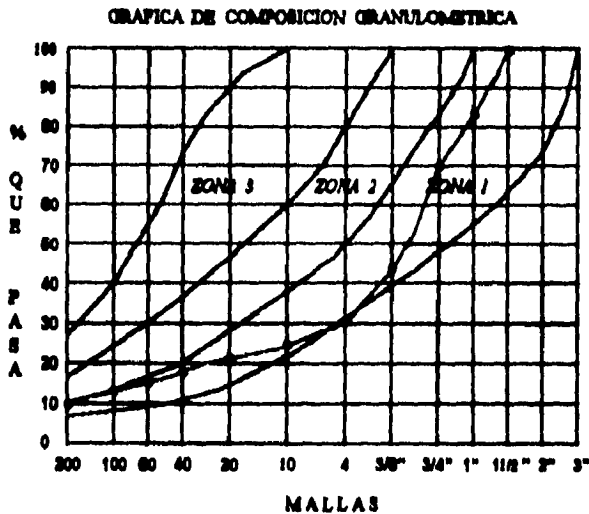
FIG. 4-17.C. INFORME DE ENSAYE PARA MATERIALES EN LA SUBBASE, CON 2% DE CAL

OBRA : AUTOPISTA MATAMOROS - REYNOSA ENVASE No. : 674/95  
 LOCALIZACION : TRAMO LA CURVA TEXAS - REYNOSA FECHA DE RECIBO : 2 - ENE - 1992  
 EMPRESA : TRIBASA FECHA DE INFORME : 16 - ENE - 1992

MATERIAL PARA CAPA DE : BASE  SUBBASE   
 DESCRIPCION DEL MATERIAL : CONGLOMERADO CALIZO PARA USARSE EN : PAV. FLEXIBLE  
 TRATAMIENTO PREVIO AL MUESTREO : 70% 1 1/2 - 30% FINOS, DOSIFICADO Y MEZCLADO EN LA PLANTA  
 CLASE DE DEPOSITO MUESTREADO : TRITURADO Y CRIADO PARCIAL, BANDA TRANSPORTADORA  
 BANCO PROCEDENTE DEL MATERIAL, PISTON : BANCO EL PUERTO, MEZCLA CON 3.9% DE CAL EN PISO

PESO VOLUMETRICO SUJETO 100 / M3	<u>1.644</u>
PESO VOLUMETRICO MAXIMO 100 / M3	<u>2.092</u>
HUMEDAD OPTIMA %	<u>10.9</u>

COMPOSICION GRANULOMETRICA	
MALLA	% RETENIDO
3"	
2"	
1 1/2"	100
1"	84
3/4"	70
3/8"	42
No. 40	30
No. 60	24
No. 100	21
No. 200	18
No. 400	16
No. 600	13
No. 800	10



V.R.S. (ESTANDAR) % : 126.7  
 EXPANSION % : 0.0  
 VALOR CEMENTANTE 100 / CM2 : 7.2  
 EQUIVALENTE DE ARENA : 24.6

PRUEBAS EN MAT. MAYOR A LA MALLA 3/8"

ABSORCION % : 1.29  
 DENSIDAD : 2.49  
 DURABILIDAD : \_\_\_\_\_

PRUEBAS SOBRE EL MATERIAL TAMIZADO POR LA MALLA No. 40

LIMITE LIQUIDO % : 33.8 EQUIV. HUM. DE CAMPO % : \_\_\_\_\_  
 LIMITE PLASTICO % : INAP CONTRACCION LINEAL % : 2.5  
 INDICE PLASTICO % : INAP CLASIFICACION SUCS : GM (GRAVA LIMBA)

FIG. 4-17.D. INFORME DE ENSAYE PARA MATERIALES EN LA SUBBASE, CON 3% DE CAL

OBRA : AUTOPISTA MATAMOROS - REYNOSA ENVAYES Nos : 790 - 795  
 LOCALIZACION : KM 56+550 AL 57+060 FECHA DE RECIBO : 4 FEBRERO 1995  
 EMPRESA : TRIBAJA FECHA DE INFORME : 8 FEBRERO 1995

REPORTE DE CAMPO No 62/95 COMPACTACION  RECOMPACTACION   
 CAPA COMPACTADA : BASE  SUBBASE  SUBABANTE  REVESTIMIENTO   
 GRADO DE COMPACTACION MÍNIMO ESPECIFICADO PARA LA CAPA ENVAYADA : 100 % CRO. DEBILCHO

ENVAYE No.	ESTACION	LADO	ESPESOR DE LA CAPA ENVAYADA	PESO VOLUMETRICO (KCO NO/MD)		HUMEDAD %		% DE COMPACTACION
				MAXIMO	DEL LUGAR	OPTIMA	DEL LUGAR	
790	56+550	C	15 0 cm	2 131	2 132	8 5	6 8	100 0
791	56+590	D	15 0 cm	2 131	2 131	8 5	6 7	100 0
792	56+620	I	16 0 cm	2 131	2 132	8 5	6 9	100 0
793	56+650	C	15 0 cm	2 131	2 134	8 5	6 0	100 1
794	56+690	D	15 0 cm	2 131	2 130	8 5	6 5	100 0
795	56+720	I	14 0 cm	2 131	2 130	8 5	7 1	100 3
796	56+750	C	17 0 cm	2 131	2 135	8 5	6 1	100 2
797	56+790	D	14 0 cm	2 131	2 130	8 5	6 2	100 0
798	56+820	I	15 0 cm	2 131	2 141	8 5	7 0	100 5
799	56+850	C	15 0 cm	2 131	2 130	8 5	5 9	100 0
790	56+890	D	15 0 cm	2 131	2 139	8 5	5 9	100 4
791	56+920	I	17 0 cm	2 131	2 137	8 5	6 9	100 3
792	56+950	C	15 0 cm	2 131	2 144	8 5	5 9	100 6
793	56+990	D	14 0 cm	2 131	2 139	8 5	6 2	100 4
794	57+020	I	17 0 cm	2 092	2 099	10 0	7 4	100 3
795	57+050	C	15 0 cm	2 092	2 099	10 0	7 1	100 5

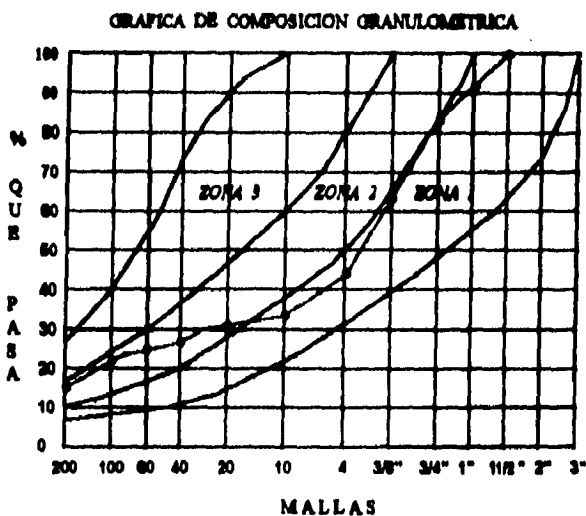
FIG. 4-10 INFORME DE COMPACTACIONES PARA LA SUBBASE

OBRA : <u>AUTOPISTA MATAMOROS - REYNOSA</u>	ENVASE No. : <u>715/92</u>
LOCALIZACION : <u>TRAMO LA CURVA TEXAS - REYNOSA</u>	FECHA DE RECIBO : <u>18 - FEB - 1992</u>
EMPRESA : <u>TRIBANA</u>	FECHA DE INFORME : <u>27 - FEB - 1992</u>

MATERIAL PARA CAPA DE :	BASE <input checked="" type="checkbox"/>	FUBBARI <input type="checkbox"/>
DESCRIPCION DEL MATERIAL :	<u>CONCRETO CALZO PARA USARSE EN : PAV FLEXIBLE</u>	
TRATAMIENTO PREVIO AL MUESTREO :	<u>80% 1.1/2 - 20% FINOS, DOBIFICADO Y MEZCLADO EN LA PLANTA</u>	
CLASE DE DEPOSITO MUESTREADO :	<u>TRITURADO Y CRIADO PARCIAL, BANDA TRANSPORTADORA</u>	
BANCO PROCEDENTE DEL MATERIAL PRUBO :	<u>BANCO EL PUERTO, MEZCLA SIN CAL</u>	

PESO VOLUMETRICO SUJETO KG / M3	<u>1.632</u>
PESO VOLUMETRICO MAXIMO KG / M3	<u>2.182</u>
HUMEDAD OPTIMA %	<u>6.4</u>

COMPOSICION GRANULOMETRICA	
MALLA	% RETENIDO
3"	
2"	
1 1/2"	100
1"	91
3/4"	83
3/8"	62
No. 4	44
No. 10	31
No. 20	31
No. 40	26
No. 60	25
No. 100	22
No. 200	17



V.R.S. (ESTANDAR) % :	<u>14.5</u>
EXPANSION % :	<u>0.20</u>
VALOR CEMENTANTE KG / CM3 :	<u>7.8</u>
EQUIVALENTE DE ARENA :	<u>20.35</u>

PRUEBAS EN MAT. MAYOR A LA MALLA 3/8"	
ABSORCION % :	<u>1.04</u>
DENSIDAD :	<u>2.51</u>
DURABILIDAD :	

PRUEBAS SOBRE EL MATERIAL TAMIZADO POR LA MALLA No. 40			
LMITE LIQUIDO % :	<u>23.6</u>	EQUIV. HUM. DE CAMPO % :	
LMITE PLASTICO % :	<u>16.3</u>	CONTRACCION LINEAL % :	<u>3.4</u>
INDICE PLASTICO % :	<u>7.3</u>	CLASIFICACION SUCS :	<u>GM (GRAVA LIMPIA)</u>

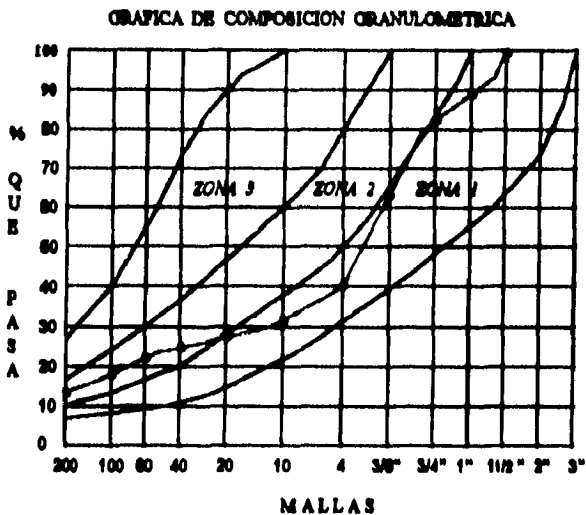
FIG. 4-19. A. INFORME DE ENSAYE PARA MATERIALES EN LA BASE, SIN CAL

OBRA : <u>AUTOPISTA MATAMOROS - REYNOSA</u>	ENVAJE No : <u>716/92</u>
LOCALIZACION : <u>TRAMO LA CURVA TEXAS - REYNOSA</u>	FECHA DE RECIBO : <u>18 - FEB - 1992</u>
EMPRESA : <u>TRIBASA</u>	FECHA DE INFORME : <u>27 - FEB - 1992</u>

MATERIAL PARA CAPA DE :	BASE <input checked="" type="checkbox"/>	FUBBAME <input type="checkbox"/>
DESCRIPCION DEL MATERIAL : <u>CONGLOMERADO CALIZO</u>	PARA USARSE EN : <u>PAV FLEXIBLE</u>	
TRATAMIENTO PREVIO AL MUESTREO : <u>80% 1 1/2 - 20% FINOS, DOSIFICADO Y MEZCLADO EN LA PLANTA</u>		
CLASE DE DEPOSITO MUESTREADO : <u>TRITURADO Y CRIBADO PARCIAL, BANDA TRANSPORTADORA</u>		
BANCO PROCEDENTE DEL MATERIAL PISTREO : <u>BANCO EL FUERTO, MEZCLA CON 1.5% DE CAL EN PESO</u>		

PESO VOLUMETRICO SUJETO 100 / M3	<u>1.647</u>
PESO VOLUMETRICO MAXIMO 100 / M3	<u>2.117</u>
HUMEDAD OPTIMA %	<u>7.9</u>

COMPOSICION GRANULOMETRICA	
MALLA	% RETENIDO
3"	
1"	
1 1/2"	100
1"	92
3/4"	81
3/8"	61
No. 40	40
No. 10	31
No. 20	28
No. 40	24
No. 60	22
No. 100	18
No. 200	14



V.R.S. (ESTANDAR) % :	<u>114.6</u>
EXPANSION % :	<u>0.0</u>
VALOR CEMENTANTE 100 / CM2 :	<u>7.4</u>
EQUIVALENTE DE ARENA :	<u>23.5</u>

PRUEBAS EN MAT. MAYOR A LA MALLA 3/8"	
ABSORCION % :	<u>1.11</u>
DENSIDAD :	<u>2.49</u>
DURABILIDAD :	

PRUEBAS SOBRE EL MATERIAL TAMIZADO POR LA MALLA No. 40			
LIMITE LIQUIDO % :	<u>26.7</u>	EQUI. HUM. DE CAMPO %	
LIMITE PLASTICO % :	<u>INAP</u>	CONTRACCION LINEAL %	<u>2.7</u>
INDICE PLASTICO % :	<u>INAP</u>	CLASIFICACION SUCS :	<u>GM (GRAVA LIGERA)</u>

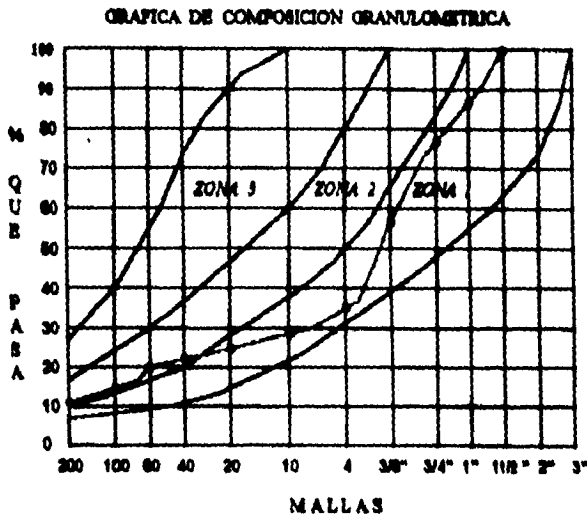
FIG. 4-19. B. INFORME DE ENSAYE PARA MATERIALES EN LA BASE, CON 1.5% DE CAL

OBRA : AUTOPISTA MATAMOROS - REYNOSA ENVAJE No. : 717/95  
 LOCALIZACION : TRAMO LA CURVA TEXAS - REYNOSA FECHA DE RECIBO : 18 - FEB - 1992  
 EMPRESA : TRIBASA FECHA DE INFORME : 27 - FEB - 1992

MATERIAL PARA CAPA DE : BASE  FUBASE   
 DESCRIPCION DEL MATERIAL : CONGLOMERADO CALZO PARA USARSE EN PAV. FLEXIBLE  
 TRATAMIENTO PREVIO AL MUESTREO : 80% 1 1/2 - 20% FINOS, DOMIFICADO Y MEZCLADO EN LA PLANTA  
 CLASE DE DEPOSITO MUESTREADO : TRITURADO Y CRIBADO PARCIAL, BANDA TRANSPORTADORA  
 BANCO PROCEDENTE DEL MATERIAL PEBREO : BANCO EL PUERTO, MEZCLA CON 3% DE CAL EN PESO

PESO VOLUMETRICO BUERTO KG/M3	<u>1.635</u>
PESO VOLUMETRICO MAXIMO KG/M3	<u>2.104</u>
HUMEDAD OPTIMA %	<u>9.9</u>

COMPOSICION GRANULOMETRICA	
MALLA	% RETENIDO
3"	
1"	
1 1/2"	100
1"	88
3/4"	78
3/8"	58
No. 40	36
No. 60	29
No. 80	25
No. 100	22
No. 150	20
No. 200	14
No. 300	11



V.R.S (ESTANDAR) % : 171.8  
 EXPANSION % : 0.0  
 VALOR CEMENTANTE KG/CM2 : 6.7  
 EQUIVALENTE DE ARENA : 28.2

PRUEBAS EN MAT. MAYOR A LA MALLA 3/8"

ABSORCION % : 1.11  
 DENSIDAD : 2.50  
 DURABILIDAD : \_\_\_\_\_

PRUEBAS SOBRE EL MATERIAL TAMIZADO POR LA MALLA No. 40

LMITE LIQUIDO % : 22.4 EQUI. HUM. DE CAMPO % : \_\_\_\_\_  
 LMITE PLASTICO % : 17.0 CONTRACCION LINEAL % : 2.0  
 INDICE PLASTICO % : 5.4 CLASIFICACION BUCS : GM (GRAVA LIMBA)

FIG. 4-19. C. INFORME DE ENSAYE PARA MATERIALES EN LA BASE, CON 3% DE CAL

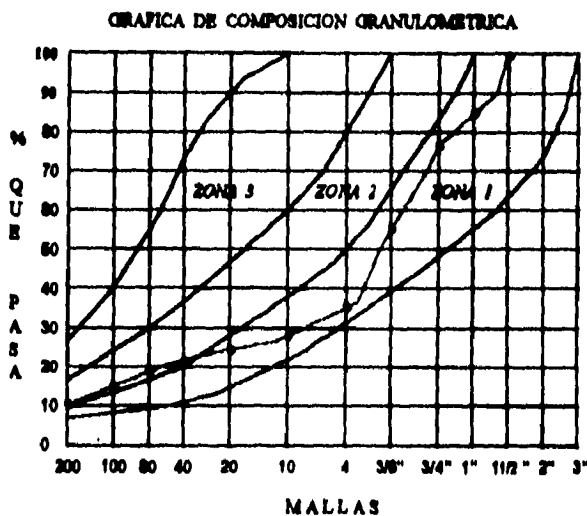


OBRA : <u>AUTOPISTA MATAMOROS - REYNOSA</u>	ENLACE No. : <u>718/93</u>
LOCALIZACION : <u>TRAMO LA CURVA TEXAR - REYNOSA</u>	FICHA DE RECIBO : <u>18-FEB-1993</u>
EMPRESA : <u>TRIBASA</u>	FICHA DE INFORME : <u>27-FEB-1993</u>

MATERIAL PARA CAPA DE : <u>BASE</u> <input checked="" type="checkbox"/> <u>SUBBASE</u> <input type="checkbox"/>
DESCRIPCION DEL MATERIAL : <u>CONGLOMERADO CALIZO</u> PARA USARSE EN : <u>PAV FLEXIBLE</u>
TRATAMIENTO PREVIO AL MUESTREO : <u>80% 1 1/2 - 20% FINOS, DOBIFICADO Y MEZCLADO EN LA PLANTA</u>
CLASE DE DEPOSITO MUESTREADO : <u>TRITURADO Y CRIBADO PARCIAL, BANDA TRANSPORTADORA</u>
BANCO PROCEDENTE DEL MATERIAL PISTEO : <u>BANCO EL PUERTO, MEZCLA CON 4% DE CAL EN PISTEO</u>

PESO VOLUMETRICO SUELTO KG/M3	<u>1.620</u>
PESO VOLUMETRICO MAXIMO KG/M3	<u>2.091</u>
HUMEDAD OPTIMA %	<u>8.0</u>

COMPOSICION GRANULOMETRICA	
MALLA	% RETENIDO
3"	
2"	
1 1/2"	100
1"	86
3/4"	77
5/8"	56
No. 4	35
No. 10	28
No. 20	26
No. 40	21
No. 60	19
No. 100	15
No. 200	10



V.R. (ESTANDAR) % :	<u>191.5</u>
EXPANSION % :	<u>0.0</u>
VALOR CEMENTANTE KG/CM2 :	<u>7.4</u>
EQUIVALENTE DE ARENA :	<u>28.8</u>

PRUEBAS EN MAT. MAYOR A LA MALLA 3/8"	
ABSORCION %	<u>1.10</u>
DENSIDAD	<u>2.49</u>
DURABILIDAD	<u></u>

PRUEBAS SOBRE EL MATERIAL TAMIZADO POR LA MALLA No. 40			
LMITE LIQUIDO % :	<u>21.2</u>	EQUI. HUM. DE CAMPO %	<u></u>
LMITE PLASTICO % :	<u>16.7</u>	CONTRACCION LINEAL %	<u>1.7</u>
INDICE PLASTICO % :	<u>4.5</u>	CLASIFICACION SUCS	<u>GM (GRAVA LIMOSA)</u>

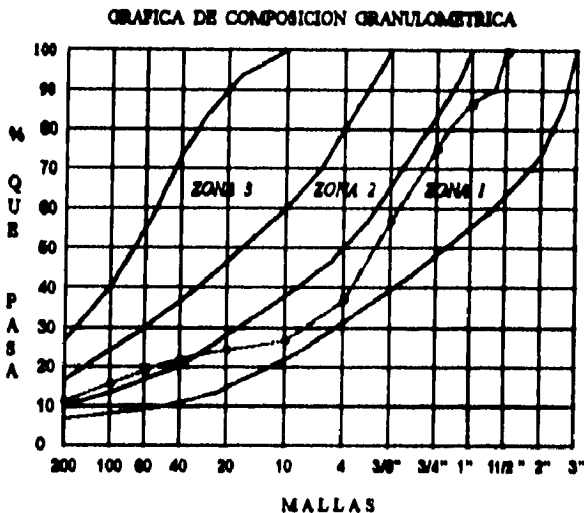
FIG. 4-19.D. INFORME DE ENSAYE PARA MATERIALES EN LA BASE, CON 4% DE CAL

OBRA : AUTOPISTA MATAMOROS - REYNOSA ENLACE No. : 719/95  
 LOCALIZACION : TRAMO LA CURVA TEXAS - REYNOSA FECHA DE RECIBO : 18 - FEB - 1995  
 EMPRESA : TRIBARRA FECHA DE INFORME : 27 - FEB - 1995

MATERIAL PARA CAPA DE : BASE  FUBBANE   
 DESCRIPCION DEL MATERIAL : CONGLOMERADO CALZO PARA USARSE EN : PAV FLEXIBLE  
 TRATAMIENTO PREVIO AL MUESTREO : 80% 1 1/2 - 20% FINOS, DOBIFICADO Y MEZCLADO EN LA PLANTA  
 CLASE DE DEPOSITO MUESTREADO : TRITURADO Y CRIBADO PARCIAL, BANDA TRANSPORTADORA  
 BANCO PROCEDENTE DEL MATERIAL PISTREO : BANCO EL PUERTO, MEZCLA CON 5% DE CAL EN PISO

PESO VOLUMETRICO SUERTO KG/M3	<u>1.640</u>
PESO VOLUMETRICO MAXIMO KG/M3	<u>2.972</u>
HUMEDAD OPTIMA %	<u>9.4</u>

COMPOSICION GRANULOMETRICA	
MALLA	% RETENIDO
3"	
2"	
1 1/2"	100
1"	88
3/4"	76
3/8"	57
No. 4	34
No. 10	28
No. 20	26
No. 40	21
No. 60	20
No. 100	15
No. 200	11



V.R. (ESTANDAR) % : 205.3  
 EXPANSION % : 0.0  
 VALOR CEMENTANTE KG/CM2 : 7.8  
 EQUIVALENTE DE ARENA : 27.5

PRUEBAS EN MAT. MAYOR A LA MALLA 3/8"

ABSORCION % : 1.06  
 DENSIDAD : 2.50  
 DURABILIDAD : \_\_\_\_\_

PRUEBAS SOBRE EL MATERIAL TAMIZADO POR LA MALLA No. 40

LMITE LIQUIDO % : 22.0 EQUIV. HUM. DE CAMPO % : \_\_\_\_\_  
 LMITE PLASTICO % : 19.8 CONTRACCION LINEAL % : 1.2  
 INDICE PLASTICO % : 3.2 CLASIFICACION SUCS : GM (GRAVALIMOSA)

FIG. 4-19. E. INFORME DE ENSAYE PARA MATERIALES EN LA BASE, CON 5% DE CAL

OBRA : AUTOPISTA MATAMOROS - REYNOSA ENVAYES No. 4812-4825  
 LOCALIZACION : KM. 57+580 AL 58+020 FECHA DE RECIBO 24-MAR-1993  
 EMPRESA : T.B.I.B.A.A. FECHA DE INFORME 27-MAR-1993

REPORTE DE CAMPO No. 603/93 COMPACTACION  RECOMPACTACION   
 CAPA COMPACTADA : BASE  SUBBASE  SUBRASANTE  REVESTIMIENTO   
 GRADO DE COMPACTACION MENIMO ESPECIFICADO PARA LA CAPA ENVAYADA 100% M. CRO. DIRECTO

ENVAYE No.	ESTACION	LADO	ESPEJOR DE LA CAPA ENVAYADA	PESO VOLUMETRICO MCO NO/MD		HUMEDAD %		% DE COMPACTACION
				MAXIMO	DEL LUGAR	OPTIMA	DEL LUGAR	
4812	57+580	D	15.0 cm	2.098	2.099	8.0	7.8	100.0
4813	57+620	I	15.0 cm	2.098	2.103	8.0	7.4	100.2
4814	57+650	C	16.0 cm	2.098	2.101	8.0	6.3	100.1
4815	57+690	D	16.0 cm	2.098	2.110	8.0	7.0	100.5
4816	57+720	I	15.0 cm	2.098	2.104	8.0	6.9	100.3
4817	57+750	C	15.5 cm	2.098	2.106	8.0	7.6	100.3
4818	57+790	D	15.0 cm	2.098	2.106	8.0	6.6	100.3
4819	57+820	J	16.0 cm	2.098	2.131	8.0	7.9	100.5
4820	57+850	C	15.0 cm	2.104	2.111	8.8	6.3	100.3
4821	57+890	D	15.0 cm	2.104	2.122	8.8	7.9	100.8
4822	57+920	I	15.0 cm	2.104	2.118	8.8	7.7	100.6
4823	57+950	C	15.0 cm	2.104	2.111	8.8	6.9	100.3
4824	57+990	D	15.0 cm	2.104	2.105	8.8	7.6	100.0
4825	58+020	I	15.0 cm	2.104	2.107	8.8	6.7	100.1

FIG. 4-20 INFORME DE COMPACTACIONES PARA LA BASE

**C. - CARPETA ASFÁLTICA:**

Los resultados deben cumplir con las especificaciones marcadas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en la sección 010 - C.01, del capítulo 4.01.03.010, de las Normas de Calidad de los materiales, del libro 4.01.01 referente a carreteras y aeropistas.

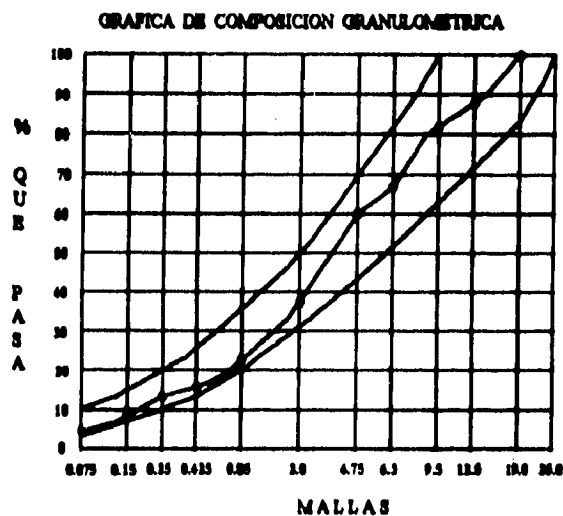
Según las normas de la S.C.T., la granulometría del material pétreo deberá quedar comprendido entre las curvas marcadas dentro de la fig. 4 - 21, comparando los resultados se concluye que, el material cumple con las especificaciones de la S.C.T. así mismo cumple con las especificaciones de temperatura de tendido de la mezcla.

OBRA :	<u>AUTOPISTA MATAMOROS - REYNOSA</u>	ENSAJE No :	<u>TRP - 13003</u>
LOCALIZACION :	<u>PLANTA 201 + 100 DEL V.DER. 200 mts</u>	FECHA DE RECIBO :	<u>11 - JULIO - 1993</u>
CONSTRUCTORA :	<u>TRUBARA</u>	FECHA DE INFORME :	<u>11 - JULIO - 1993</u>

D E S C R I P C I O N	DESCRIPCION DEL MATERIAL :	<u>CONCRETO ASFALTICO</u>	PARA USARSE EN :	<u>CARPETA</u>
	TRATAMIENTO PREVIO AL MUESTREO :	<u>SECADO Y MEZCLADO CON CEMENTO No. 4</u>		
	CLASE DE DEPOSITO MUESTREADO :	<u>CAMION</u>		
	BANCO PROCEDENTE DEL MATERIAL PRUEBA :	<u>TRITURADORA MATRIMAR CERRALVO, N. L.</u>		

VIAJE No.:	<u>16</u>	TENDIDO EN Km.:	<u>27+100</u>	A Km.:	<u>27+225</u>	CARRIL:	<u>EXTERIOR</u>	FRANJA:	<u>DERECHA</u>
°C DE MEZCLA AL SALIR DE PLANTA:	<u>135</u>	°C EN EL TENDIDO:	<u>118</u>	°C AL INICIAR COMPACT.:	<u>113</u>				

FIENO VOLUMETRICO FUELT0 100 / M3	_____
COMPOSICION GRANULOMETRICA	
MALLA	% QUE PASA
No. 25	
No. 19	100
No. 12.5	89
No. 9.5	82
No. 6.3	68
No. 4.75	60
No. 3	37
No. 0.85	23
No. 0.425	16
No. 0.25	14
No. 0.15	8
No. 0.075	4



CARACTERISTICAS DE LA MEZCLA	DEL PROYECTO	
CONTENIDO ASFALTO %	<u>4.4</u>	<u>4.0</u>
MARCA	<u>NINGUNO</u>	
TIPO	_____	_____
CANTIDAD %	_____	_____
AFINIDAD	<u>BUENA</u>	

CARACTERISTICAS DEL ESPECIMEN	ESPECIFICACION	
P.E. 100/M3	<u>2.362</u>	_____
ESTABILIDAD 100	<u>721</u>	<u>700 MÍN</u>
FLUJO mm.	<u>2.4</u>	<u>2.4</u>
VACIOS %	<u>3.0</u>	<u>3-5</u>
V.A.M %	<u>14.0</u>	<u>14 MÍN</u>

CARACTERISTICAS DEL ASFALTO	
TIPO DE CEMENTO	<u>No. 4</u>
PENETRACION	<u>11</u>
VISCOSIDAD	<u>92</u>
TIEMPO RECOM.	_____
TIEMPO APLICAC.	_____

FIG. 4-21 INFORME DE ENSAYE PARA MATERIALES PARA LA CARPETA ASFALTICA

## CONCLUSIONES

**A)** La cal empleada actualmente en todos los ramos de la producción, es obtenida después de un intenso proceso de producción, para lo cual son empleados hornos rudimentarios y los de alta tecnología; las características específicas de una cal, son el resultado del proceso por el cual fue llevada, de ahí que en el mercado exista una gran variedad de éste producto y esto debe tenerse presente cuando se elija el producto adecuado para realizar trabajos de estabilización.

**B)** La cal utilizada en la estabilización, funciona primordialmente en aquellos suelos en los que gobiernan características de expansibilidad como lo son algunos tipos de arcillas, existen en ambos materiales, cal-arcilla, propiedades químicas que al mezclar ambas se generan reacciones químicas fuertes, y en base a ello la cal cambia y hasta supera las propiedades físico-mecánicas originales de las arcillas, haciéndola más estable aún bajo la presencia del agua principal elemento que afecta su comportamiento.

En este trabajo se obtuvieron mezclas de grava-limosa y grava-arcillosa, y resultaron potencialmente adecuadas para ser estabilizadas con cal, todo ello después de intensas pruebas de laboratorio realizadas a las mezclas.

El método, estabilización de suelos arcillosos con cal, se aplico en este trabajo para estabilizar con cal la base y subbase de un pavimento flexible de una autopista de cuatro carriles. La cal puede ser empleada para dar estabilidad estructural a los proyectos que así lo exijan, para ello se aplicara por ejemplo, a obras tales como: carreteras, pistas aéreas, reconstrucción de pavimentos, presas de tierra, diques, canales de irrigación, cimientos de edificios y puentes, así mismo para dar estabilidad a edificaciones y estructuras de pequeña envergadura a los que se quiera aplicar el método; todo ello debe de ir bien fundamentado con todas las pruebas de laboratorio necesarias para cada caso.

C) Para obtener excelentes resultados en la estabilización, se realizaron diversas pruebas de laboratorio, entre las más importantes se pueden mencionar al peso volumétrico seco máximo, límites de consistencia, límite de contracción lineal y el valor relativo de soporte, siendo esta última la de más trascendencia en el caso de los pavimentos flexibles, ya que el resultado obtenido fue de suma importancia para el diseño estructural del mismo; se ensayaron todas las pruebas de laboratorio necesarias en un sin número de muestras de suelo mezclado con diversos porcentajes de cal, con el propósito de conocer las propiedades que se tuvieron que modificar y hasta cierto grado superar, y con todo ello se obtuvo la dosificación adecuada de suelo-cal.

D) El empleo de la cal en la estabilización de la base y subbase del pavimento flexible, trajo consigo una reducción en los espesores, ya que se mejoró considerablemente la resistencia de los materiales, y con ello se cumplieron con todas las normas técnicas que estipula la S.C.T. Las ventajas económicas al utilizar la cal en la estabilización de suelos, resulto ser positivo, además de la reducción de espesores, las ventajas económicas también se reflejarán en el mantenimiento que se le dará al pavimento, ya que al utilizar la cal en la estabilización se amplió su vida económicamente útil, lo que hace suponer que dicho mantenimiento en la obra no debe presentar problemas durante su servicio.

Al ser México un país donde las soluciones económicas son una necesidad, la cal se presenta como un material ideal para ser empleado exitosamente en obras en donde es necesario una buena alternativa de estabilización.

El diseño estructural del pavimento flexible, utilizando el método del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México fue el idóneo, ya que se caracteriza por ser aplicable a los diversos problemas que se encuentran en el territorio nacional.

E) El procedimiento constructivo empleado en la estabilización de suelos con cal, resulto ser el adecuado, ya que se empleo maquinaria de fácil adquisición en el mercado nacional y no fue necesario la contratación de mano de obra calificada o de algún equipo especial para los trabajos, con esto disminuyeron los costos. La cal empleada en la construcción no resulto un peligro para el personal durante y después de los trabajos, ya que se utilizo cal hidratada; la mayor ventaja al emplear la cal, es de que al descargarla y estar expuesta al medio ambiente, ésta no pierde y si conserva sus propiedades fisico-químicas con ello, y no es necesario emplearla inmediatamente después de la descarga, caso contrario sucede con algunos otros productos químicos.

## **BIBLIOGRAFÍA.**

1. - NORMAN DAVEY  
HISTORIA DE LA CONSTRUCCIÓN  
EDIT. JANO, BARCELONA 1967.
2. - JOHN B. WARD PERKINS  
ARQUITECTURA ROMANA  
EDIT. AGUILAR, MÉXICO 1976.
3. - BIBLIOTECA IBEROAMÉRICANA  
LOS MAYAS, EL PUEBLO DE LOS SACERDOTES SABIOS, TOMO 8  
EDIT. ANAYA, MÉXICO 1988.
4. - GEORGE KUBLER  
ARQUITECTURA MEXICANA DEL SIGLO XVI  
EDIT. FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, MÉXICO 1983.
5. - DICCIONARIO DE LA CONSTRUCCIÓN  
EDIT. C.E.C.S.A., BARCELONA, ESPAÑA.
6. - ASOCIACIÓN NACIONAL DE FABRICANTES DE CAL A.C (ANFACAL)  
FOLLETERÍA PROPORCIONADA POR ESTE ORGANISMO.
7. - FLORIAN SCHWARDZKOPF  
TECNOLOGÍA DE LA CALCINACIÓN DE LA CAL  
KENNEDY VAN SAUN CORPORATION, 1975.
8. - L. DON LEET Y SHELDON JUDSON  
FUNDAMENTOS DE GEOLOGÍA FÍSICA  
EDIT. LIMUSA, MÉXICO 1990.



9. - ATISA - ATKINS  
ANÁLISIS DE LA INDUSTRIA PRODUCTORA DE CAL EN MEXICO  
MÉXICO 1981.
10. - ROSENBERG L. JEROME  
QUÍMICA GENERAL  
EDIT. MCGRAW - HILL, MÉXICO 1982.
11. - FERNÁNDEZ LOAIZA CARLOS  
MEJORAMIENTO Y ESTABILIZACIÓN DE SUELOS  
EDIT. LIMUSA, MÉXICO 1991.
12. - JUÁREZ BADILLO EULALJO Y RICO RODRÍGUEZ ALFONSO  
MECÁNICA DE SUELOS, TOMO I  
EDIT. LIMUSA, MÉXICO 1990.
13. - RICO RODRÍGUEZ ALFONSO Y CASTILLO HERMILO DEL.  
INGENIERÍA DE SUELOS EN LA VÍAS TERRESTRES, TOMO II  
EDIT. LIMUSA, MÉXICO 1984.
14. - SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES  
NORMAS PARA CONSTRUCCIÓN E INSTALACIONES,  
CARRETERAS Y AEROPISTAS, PAVIMENTOS  
LIBRO 3.01.03, MÉXICO 1983.
15. - SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES  
NORMAS DE CALIDAD DE LOS MATERIALES,  
CARRETERAS Y AEROPISTAS,  
LIBRO 4.01.01, MÉXICO 1986.
16. - SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES  
NORMAS PARA MUESTREO Y PRUEBAS DE LOS MATERIALES,  
EQUIPOS Y SISTEMAS  
CARRETERAS Y AEROPISTAS,  
LIBRO 6.01.01, MÉXICO 1986.
17. - SOCIEDAD MEXICANA DE MECÁNICA DE SUELOS A.C.  
VII REUNIÓN NACIONAL, CELEBRADA EN GUADALAJARA, JAL.  
MÉXICO 1974.

- 18.- OLIVERA BUSTAMANTE FERNANDO  
ESTRUCTURACIÓN DE LAS VÍAS TERRESTRES  
EDIT. C.E.C.S.A., MÉXICO 1991.
- 19.- SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES  
SUBSECRETARIA DE INFRAESTRUCTURA  
DATOS VIALES DE 1982.
- 20.- CORRO C. SANTIAGO, PRADO O. GUILLERMO Y MAGALLANES N. ROBERTO  
INSTRUCTIVO PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL  
DE PAVIMENTOS FLEXIBLES PARA CARRETERAS  
ELABORADO PARA LA S. A. H. O. P., MÉXICO 1980.
- 21.- CORRO C. SANTIAGO, PRADO O. GUILLERMO  
DISEÑO ESTRUCTURAL DE CARRETERAS CON PAVIMENTO FLEXIBLE  
PARA EL INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA U.N.A.M.  
LIBRO No. 325 , MÉXICO 1974.
- 22.- VARELA ALONSO LEOPOLDO  
COSTOS DE CONSTRUCCIÓN PESADA Y EDIFICACIÓN  
TOMO 4.I , INGENIERÍA DE COSTOS Y MAQUINARIA  
2a. EDICIÓN, MÉXICO 1993.
- 23.- FIDEICOMISO 195, COMIBIÓN NACIONAL DE CAMINOS ALIMENTADORES  
Y AEROPISTAS, SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES,  
GUÍA DE INGENIERÍA DE COSTOS CONACAL  
MÉXICO 1992.