



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ACATLÁN

MÉTODOS PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS DE LOS SUELOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

DEL BOSQUE DE LA MORA LUIS

ASESOR: ING. JUAN VÍCTOR PADILLA CORREA

Marzo 2005

m. 342212



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.



Con infinito agradecimiento a Dios, por sus enseñanzas, amor y bondades que he recibido en el transcurso de la vida que me ha otorgado. A mis padres, hermano, abuelos y tíos, por ser un ejemplo de bien y perseverancia; por sus consejos siempre amorosos y pacientes. A mis amigos más queridos, por su magia, cariño y sobre todo amistad sincera. A los profesores, a los ingenieros y compañeros que me ayudaron a dar mis primeros pasos como ingeniero civil y me forjaron a base de enseñanza constante.

A todos, mi más profundo agradecimiento por su apoyo y comprensión; gracias por estar acompañándome en este camino.

“Por la Gracia de Dios, la cual me ha sido dada como hábil constructor coloqué el cimiento; otro edificará sobre el.”

1ª Carta del Apóstol San Pablo a los Corintios



INDICE

Introducción.....	4
Capítulo 1: Conceptos generales.....	6
1.1 El suelo y sus propiedades básicas	6
1.2 Granulometría	8
1.3 Límites de Atterberg	10
1.4 Clasificación de suelos	11
1.5 Permeabilidad	13
1.6 Fenómeno de consolidación de suelos	14
1.7 Teoría de la resistencia al esfuerzo cortante	19
Capítulo 2: Mejoramiento de suelos.....	22
2.1 Propiedades del suelo que se busca mejorar	23
2.1.1 Resistencia mecánica	23
2.1.2 Estabilidad volumétrica	24
2.1.3 Durabilidad	25
2.1.4 Permeabilidad	26
2.1.5 Compresibilidad	27
2.2 Aplicabilidad, factibilidad y conveniencia del mejoramiento de suelos	27
2.3 Métodos para el mejoramiento de suelos	28
2.3.1 Compactación de suelos	29
2.3.2 Geotextiles y geomembranas	30
2.3.3 Compactación por medio de explosivos	32
2.3.4 Mejoramiento térmico con calor	34
2.3.5 Congelamiento de suelos	37
Capítulo 3: Métodos de mejoramiento superficial.....	41
3.1 Factores a considerar en la selección del aditivo	41
3.1.1 Tipos de suelos y aditivos	42
3.2 Selección de los aditivos	42
3.3 Estabilización con cemento	45
3.3.1 Elementos que forman la mezcla suelo – cemento	45
3.3.1.1 Cemento	45
3.3.1.2 Suelo	46
3.3.1.3 Agua	48
3.3.2 Diseño de la mezcla suelo – cemento	48
3.3.2.1 Tipos de mezclas suelo – cemento	48
3.3.2.2 Proporcionamiento de la mezcla	49
3.3.3 Procedimiento constructivo	51
3.3.3.1 Escarificación, pulverización y pre-humedecimiento del suelo	51
3.3.3.2 Dosificación y disposición del cemento	51
3.3.3.3 Mezclado de los materiales	53
3.3.3.4 Compactación	53
3.3.3.5 Curado	54



3.4	Estabilización con cal	54
3.4.1	Diseño de la mezcla	55
3.4.2	Proceso constructivo	58
3.4.2.1	Preparación	59
3.4.2.2	Regado o dispersión de la cal	59
3.4.2.3	Mezclado preliminar	59
3.4.2.4	Mezclado final	59
3.4.2.5	Compactación	60
3.4.2.6	Curado y protección de la superficie tratada	60
3.5	Estabilización de suelos por modificación de la granulometría	60
3.5.1	Diseño de la mezcla	63
3.5.1.1	Granulometría	63
3.5.1.2	Plasticidad de la mezcla	65
3.5.2	Procedimiento constructivo	70
3.5.2.1	Preparación	70
3.5.2.2	Adición y disgregación del material importado	70
3.5.2.3	Mezclado	70
3.5.2.4	Compactación	70
3.6	Estabilización con otros productos químicos	71
3.6.1	Ceniza volátil	71
3.6.1.1	Diseño de la mezcla suelo – ceniza volátil	71
3.6.2	Materiales bituminosos	73
3.6.2.1	Métodos constructivos	73
3.6.3	Combinaciones de agentes estabilizadores	74
3.6.3.1	Cal – cemento	74
3.6.3.2	Cal – asfalto	74
3.6.3.3	Cal – ceniza volátil y cal – ceniza volátil - cemento	74
3.7	Ejemplos prácticos del empleo de la estabilización superficial para el mejoramiento de suelos	75
3.7.1	Empleo de mezclas suelo – cemento y suelo – cal para el mejoramiento de suelos para la construcción de bases y subbases de pavimentos.	75
3.7.2	Mejoramiento de las arcillas expansivas de Jiutepec, Morelos por medio de la adición de cal.	78
Capítulo 4: Métodos de mejoramiento profundo.....		81
4.1	Vibroflotación	81
4.2	Jet Grouting	89
4.2.1	Sistema de monofluido	92
4.2.2	Sistema de tres fluidos o kajima	93
4.3	Inyecciones	97
4.3.1	Aplicaciones	97
4.3.2	Limitaciones	101
4.3.3	Mezclas de inyección	101
4.3.3.1	Propiedades	101
4.3.3.2	Características de las mezclas	103
4.3.4	Materiales empleados	104
4.3.4.1	Cemento Pórtland	104



4.3.4.2 Aleaciones o mezclas	104
4.3.4.3 Rellenos	105
4.3.5 Técnicas de inyectado	105
4.3.6 Equipo de perforación	110
4.3.7 Equipo de inyección	111
4.3.7.1 Mezcladoras y dosificadoras	111
4.3.7.2 Bombas de inyección	112
4.3.7.3 Tanques de almacenamiento	112
4.3.7.4 Tuberías	112
4.3.7.5 Obturadores	113
4.3.8 Finalización del tratamiento	113
4.4 Aplicaciones prácticas de los métodos de mejoramiento profundo	115
4.4.1 Ejemplos de la aplicación de la vibroflotación a nivel mundial	115
4.4.2 Compactación por vibrado de suelos potencialmente licuables en la Planta de Nitrogeno Cantarell, en Antonio Cárdenas, Campeche	116
4.4.3 Utilización de Jet Grouting en un túnel con frente mixto para la construcción del tramo entre las Lumbreras L8 y L del interceptor Oriente, en la Cd de México	119
4.4.4 Trabajos de subexcavación e inyección de suelos para la restauración de la Catedral Metropolitana	122
4.4.5 Trabajos de inyección de suelos en las torres Petronas, Kuala Lumpur, Malasia	124
Capítulo 5: Métodos de mejoramiento mecánico.....	126
5.1 Precarga	126
5.1.1 Tipo de suelos que pueden ser tratados con precarga.	130
5.1.2 Efectos de la precarga.	130
5.1.3 Consolidación de suelos por medio de vacío.	131
5.2 Compactación dinámica.	133
5.3 Ejemplos de aplicación práctica de los métodos de mejoramiento mecánico.	141
5.3.1 Empleo de la precarga para el mejoramiento del subsuelo previo a la construcción de tanques de almacenamiento de crudo de 500 mil barriles. Terminal marítima de Dos Bocas, Tabasco, México.	141
5.3.2 Tratamiento de un relleno de arena en Jacksonville, Florida, USA	145
Conclusiones.....	147
Bibliografía.....	152
Relación de Figuras.....	154
Relación de tablas.....	157



INTRODUCCIÓN

En la actualidad, una situación común que debe enfrentar un ingeniero civil, ya sea encargado de proyectos o de construcción, es la relacionada con el suelo donde ha de efectuar una construcción o con el que va a emplear como material de construcción. Los problemas asociados con el suelo pueden conjuntarse en diferentes causas, como por ejemplo baja capacidad de carga, alta deformabilidad, mala graduación, contenidos excesivos de agua, alta plasticidad, posibilidad de licuación, presencia de cavernas, estratos blandos muy superficiales, entre otros.

Es claro que ante la existencia de estas anomalías en el subsuelo, los proyectos o construcciones deberán de considerar cambios importantes, e incluso, se puede considerar el cambio de sitio de construcción de la obra, o el empleo otros materiales. El costo en este caso puede ser extremadamente elevado, y en algunas ocasiones, puede ser más elevado que la misma construcción.

Ante esta situación, el empleo de métodos para el mejoramiento de los suelos, se convierte en una opción viable y factible para dar solución a los problemas encontrados en el sitio o con el suelo, en el caso de su empleo como material de construcción, como es el caso de construcción de carreteras o plataformas de trabajo.

Por consiguiente, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal fungir como guía para ingenieros civiles de proyecto o construcción en la selección del tipo de tratamiento a seguir para determinados tipos de suelos u objetivos a seguir, que dependerán del tipo de construcción a efectuar o finalidad del suelo mejorado o tratado.

De esta manera, se desprenden los siguientes capítulos, con los temas relativos al mejoramiento de suelos:

En el capítulo 1 se definen algunos de los conceptos básicos empleados en geotécnica, principalmente aquellos que van a ser considerados para la elección del método de mejoramiento, y que serán ampliamente empleados en la presente investigación.

El mejoramiento de suelos como alternativa en la geotécnica y las características que debe cumplir un mejoramiento de suelos, así como su factibilidad, aplicación y conveniencia son tratados en el capítulo 2, donde además se incluye una breve explicación de otros métodos y materiales poco empleados en México para el mejoramiento de suelos, como es el caso del tratamiento térmico o congelamiento del suelo por medio de la circulación de salmueras; se incluye además una explicación de productos usados en la ingeniería civil como elementos de refuerzo en suelos blandos, como es el caso del empleo de geotextiles y geomembranas en la construcción de terraplenes sobre materiales arcillosos.



El capítulo 3 abarca los métodos para el mejoramiento o estabilización de capas de suelo superficiales. Principalmente, el objetivo de este capítulo se basa en trabajos necesarios para el mejoramiento o estabilización de suelos para su empleo en estructuras de pavimentos (base, sub-base) o en plataformas de construcción.

Los métodos para el tratamiento de estratos de suelos a una mayor profundidad se encuentran incluidos en el capítulo 4, y están referidos al tratamiento de estratos de suelos menos superficiales, en donde se planea el desplante de estructuras como edificios, tanques de almacenamiento, entre otros, y que por las características del subsuelo se presentarían problemas de asentamientos, licuación, etc. Se trata en este capítulo de técnicas como la vibroflotación, el jet grouting y la inyección de mezclas de cemento dentro de la masa de suelo.

Otros métodos, donde la aplicación de fuerzas externas provoca una alteración en las condiciones de la masa de suelo, son tratados en el capítulo 5, donde básicamente se explican los métodos de precarga, consolidación de suelos por vacío y de compactación dinámica.

Esperando cumplir con el objetivo anteriormente establecido, queda el presente trabajo.



CAPITULO 1

CONCEPTOS GENERALES.

El objetivo de este capítulo es mostrar y explicar de una manera clara y sencilla los conceptos más importantes de la Mecánica de Suelos para una mejor comprensión de este trabajo. Son explicados el concepto de “suelo” desde el punto de vista de la ingeniería civil, sus criterios de clasificación, sus propiedades más importantes, la teoría de la resistencia al esfuerzo cortante, entre otros conceptos, ya que del conocimiento de ellos dependerá, en gran parte, el método por el cual van a ser mejorados y los resultados que se espera obtener.

1.1 El suelo y sus propiedades básicas.

La palabra suelo tiene numerosos significados y connotaciones para los diferentes grupos de profesionistas que tratan con este material. Para la mayoría de los ingenieros de suelos, este es una delgada capa sobre la corteza terrestre que proviene de la desintegración y / o alteración física o química de las rocas, y además, puede ser producto de las actividades de los seres vivos que se encuentran sobre ella. El espesor de la capa de suelo, va a depender de la profundidad hasta la que son afectadas por dichas actividades. Debido a la formación de sus partículas constitutivas, contiene vacíos de diferentes tamaños. Estos vacíos pueden contener aire, agua materia orgánica o diferentes combinaciones de estos materiales. Las partículas que los forman provienen principalmente de la desintegración física y química de rocas, y por ello, pueden tener diferentes tamaños, desde varios centímetros, hasta partículas tan pequeñas que se requieren microscopios para poder observarlas individualmente⁸.

Sobre este material, van a edificarse diversas estructuras, como presas, pavimentos, edificios, etc., y por ello, debe cumplir con ciertas características que harán que la estructura que sobre ellos se apoya sea segura, sobre todo en cuanto a su resistencia mecánica y deformabilidad. Además, el suelo también se emplea como material empleado en la construcción de diversas estructuras, como pavimentos o presas, y para esto debe cumplir con características aún más específicas.

En el suelo se distinguen tres fases que lo constituyen: la sólida; la líquida y la gaseosa. La fase sólida está formada principalmente por las partículas minerales del suelo; la líquida por el agua libre; y la fase gaseosa, que comprende sobre todo el aire, aunque podrían estar presentes otros gases²⁸.

Las fases líquida y gaseosa del suelo forman juntas el volumen de vacíos del suelo, mientras que la fase sólida constituye el volumen de sólidos²⁷.

Se dice que un suelo es totalmente saturado cuando todos sus vacíos están ocupados por agua. Un suelo en tal circunstancia consta, de solo dos fases, la líquida y la sólida.



Las relaciones fundamentales de los suelos son muy importantes para el manejo comprensible de sus propiedades mecánicas; estas relacionan las tres fases en el suelo y son la porosidad, la relación de vacíos, el grado de saturación y el contenido de agua o humedad.

La relación de vacíos, oquedad o índice de poros es la relación entre el volumen de los vacíos (agua y aire) y el volumen de los sólidos de un suelo.

La porosidad de un suelo es la relación entre su volumen de vacíos y el volumen total de su masa (incluidas las tres fases) y se expresa como porcentaje.

El grado de saturación de un suelo es la relación entre su volumen de agua (fase líquida) y el volumen de sus vacíos. Mide principalmente el porcentaje de agua que contienen los vacíos de un suelo. Cuando este valor es del 100%, el suelo se considera saturado, y cuando es del 0%, se dice que es un suelo seco.

El contenido de agua o humedad de un suelo es la relación entre el peso de agua contenida en el mismo y el peso de su fase sólida. El contenido de humedad es con frecuencia el factor más importante en el comportamiento de un suelo. Tiene una influencia diferente en cada tipo de suelo, pero su mayor efecto se tiene en los suelos de partículas finas, como las arcillas. Las partículas finas y los pequeños vacíos entre ellas retardan el movimiento del agua, y tienen la tendencia de sujetarla por la tensión superficial y por la atracción de los minerales de arcilla y las partículas de agua²⁶. A este fenómeno se le conoce como adsorción y forma una doble capa que rodea las partículas de arcilla.

Otras relaciones importantes que se manejan en la Mecánica de suelos son las de densidad. La densidad aparente de un elemento de suelo se define fundamentalmente como su masa

por unidad de volumen, la cual se expresa con la formula $\rho = \frac{M}{V}$, donde M es la masa del suelo y V es el volumen del suelo.

Si el elemento de suelo está saturado y conserva la misma relación de vacíos, entonces la densidad será la de saturación, mientras que si el suelo se encuentra seco se tendrá la densidad seca.

La densidad de un suelo también se maneja en relación a los vacíos del suelo y las partículas que forman estos huecos y las que los llenan. De esta manera, la estructura de un suelo puede ser densa o suelta. Una estructura densa tiene partículas pequeñas llenando los huecos que dejan las partículas más grandes. Cuando cada partícula está rodeada íntimamente por otras partículas, el contacto entre las partículas aumenta, la tendencia al desplazamiento de las partículas individuales bajo una carga disminuye y el suelo es capaz de soportar cargas más grandes. Suelos gruesos bien graduados, usualmente densos, muestran una buena estabilidad y resistencia ante una carga, mientras que los suelos sueltos, con estructuras abiertas con grandes huecos, se compactan ante la presencia de una

carga, además de que presentan asentamientos o desintegración bajo cimentaciones o tráfico.

Por último, el peso volumétrico de un suelo se define como el peso del mismo suelo por unidad de volumen, contemplando en el peso los sólidos y la fase líquida. El peso volumétrico seco del material es el peso de una muestra de suelo seca por unidad de volumen⁷.

1.2 Granulometría

La granulometría de un suelo indica las proporciones en porcentaje para cada tamaño de grano dentro de un conjunto dado de partículas. Por lo tanto, el análisis granulométrico tiene por objeto determinar el tamaño de las partículas que componen el suelo y la proporción de una determinada fracción de partículas como porcentaje de la masa total de la muestra²⁷.

La granulometría se expresa con la curva granulométrica, la cual se obtiene midiendo la distribución de tamaño de las partículas de una muestra de suelo representativa, haciéndola pasar a través de una serie de tamices estándar con aberturas cada vez más pequeñas, midiendo posteriormente la masa retenida en cada uno de ellos. Con el resultado del peso retenido en cada tamiz puede calcularse el porcentaje de la masa de la muestra que pasa a través de cada tamiz para representarlo en función de la abertura correspondiente. En la figura 1.1 se observan algunas curvas granulométricas típicas.

Si una curva granulométrica presenta escalones o segmentos horizontales, significa que faltan las fracciones entre los puntos extremos del segmento horizontal y la graduación es discontinua. Un suelo de este tipo se denomina como mal graduado, en contraposición a un suelo bien graduado que tiene una curva granulométrica suave y de pendiente uniforme²⁶.

El conocimiento de la granulometría es importante para juzgar en general y para clasificar el suelo, permitiendo obtener deducciones acerca del origen geológico del suelo, así como la posibilidad de identificar problemas como licuación, lixiviación, aflojamiento del suelo inicialmente resistente y en consecuencia una disminución notable de su capacidad de carga, entre otros. Además, a partir de la granulometría se puede seleccionar un método de mejoramiento que sea adecuado para el material en función de este parámetro.

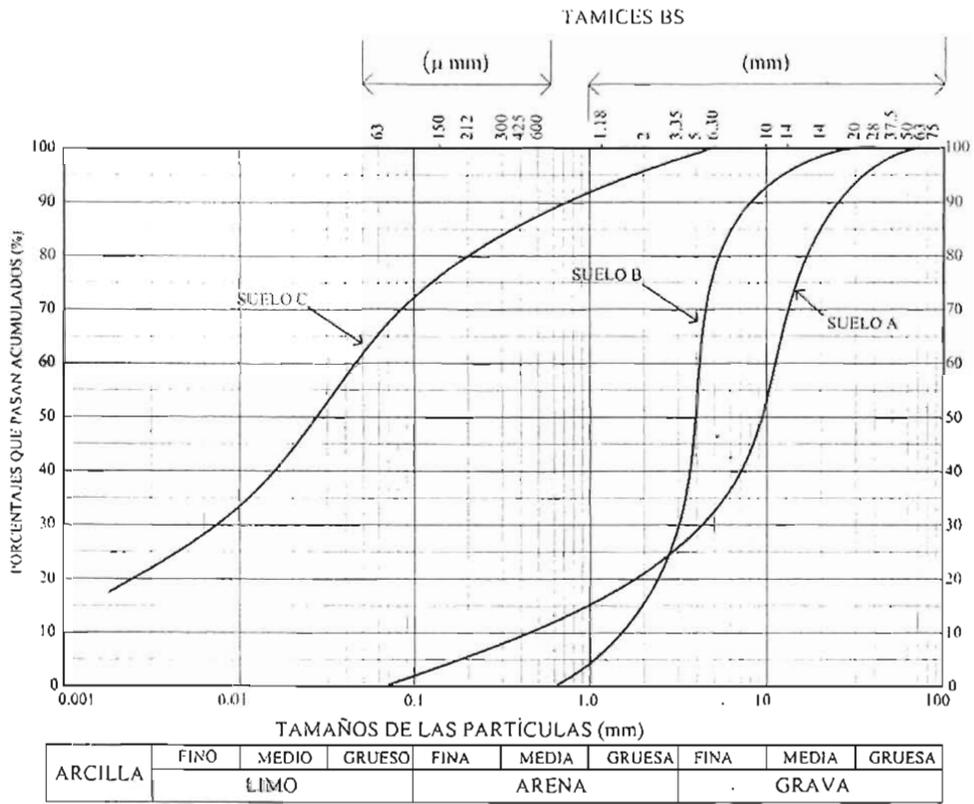


FIGURA 1.1 CURVAS GRANULOMÉTRICAS TÍPICAS DE DIFERENTES SUELOS

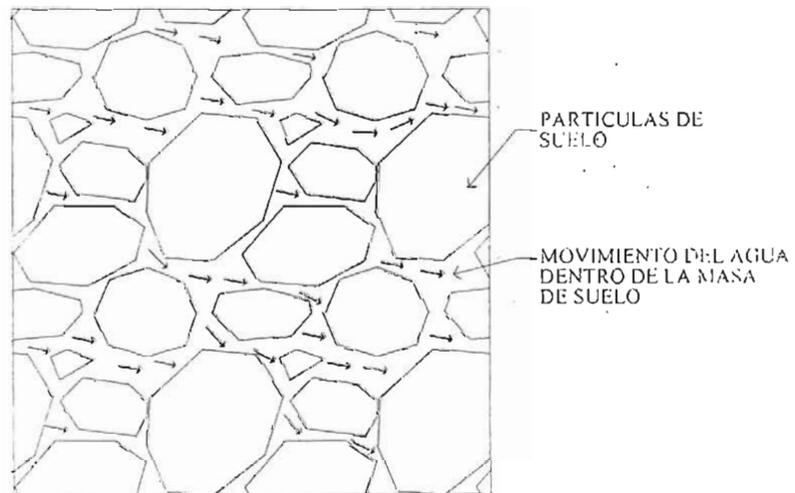


FIGURA 1.2 ESQUEMATIZACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL AGUA DENTRO DE LA MASA DE SUELO



1.3 Límites de Atterberg

En mecánica de suelos finos, la plasticidad puede definirse como la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse y agrietarse, o dicho de una manera más sencilla y comprensible, es la propiedad que presentan los suelos de poder deformarse, hasta cierto límite, sin romperse⁷.

Una de las características más importantes de las arcillas es su plasticidad. La magnitud de la plasticidad de una arcilla natural depende de su composición mineralógica y contenido de humedad. De esta manera, la consistencia varía de acuerdo con el contenido de humedad, desde un estado sólido en condición seca, pasando por un estado semisólido para bajos contenidos de humedad en que el suelo se desmorona y no presenta plasticidad, pasando también por un estado plástico para altos contenidos de humedad, hasta llegar finalmente a un estado esencialmente líquido para contenidos de humedad muy altos. De este modo, la plasticidad no es una propiedad permanente de estos materiales, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua.

Basándose en lo anterior, Atterberg estableció cuatro estados de consistencia para suelos de grano fino (arcillas o limos): líquido, plástico, semisólido y sólido. Las líneas divisorias entre estos estados son llamados límite líquido, límite plástico y límite de contracción o retracción.

En la práctica, la plasticidad de un suelo es determinada mediante la observación de los diferentes estados físicos por los que pasa a medida que cambia el contenido de humedad. Los límites entre los diferentes estados, dependiendo del contenido de humedad al momento que este cambia, son llamados límites de consistencia o límites de Atterberg²⁷.

El límite líquido es el contenido de humedad que se tiene en el cambio del estado sólido al estado semisólido o estado no plástico. Arriba de este valor, se presume que el suelo tendrá un comportamiento fluido, debajo de este valor, se deformará bajo presión sin desmoronarse, siempre que muestre un estado plástico.

El límite plástico es el contenido de humedad que se tiene en el cambio entre el estado plástico y el estado semisólido. Entre el límite líquido y el límite plástico se tiene el índice de plasticidad, que es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, y define el rango del contenido de humedad para que el suelo permanezca en el estado plástico.

Comparando el índice de plasticidad con los valores que marcan las especificaciones respectivas para cada proyecto o tipo de obra, se puede determinar si un suelo presenta las características adecuadas para su uso.

El límite de retracción se define como el cambio del estado sólido al estado semisólido o estado no plástico.



1.4 Clasificación de suelos.

Los procesos de meteorización de las rocas y los efectos del transporte y la manera en como se depositan producen partículas individuales de suelo ampliamente variables en tamaño y forma.

El tamaño de las partículas en un depósito tiene una influencia fundamental en las propiedades y en el comportamiento ingenieril del depósito, por tanto, las partículas de un suelo se describen en función de su tamaño, utilizando términos como grava, arena, limo y arcilla.

La grava, esta constituida por fragmentos de roca no consolidada de 4.75 mm a 7.5 centímetros de dimensión (según Sistema Unificado, Tabla 1.1 y Figura 1.3). La arena consta de partículas de roca de 4.75 a 0.075 milímetros. Por último, los limos y las arcillas son suelos de grano fino y sus partículas individuales no pueden distinguirse fácilmente a simple vista. La tabla 1.1, muestra los términos anteriores y las dimensiones aproximadas para los diferentes sistemas de clasificación de suelos.

TABLA 1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS SEGÚN EL TAMAÑO DE SUS PARTÍCULAS.

Descripción de las partículas	Tamaño de las partículas (mm.)			
	Normas británicas	AASHTO*	ASTM**	Unificado ***
Grava	60 – 2	75 – 2	> 2	75 – 4.75
Arena	2 – 0.06	2 – 0.05	2 – 0.075	4.75 – 0.075
Limo	0.06 – 0.002	0.05 – 0.002	0.075 – 0.005	< 0.075 finos
Arcilla	< 0.002	< 0.002	< 0.005	

* American Society of State Highway and Transportation Officials.

** American Society for Testing and Materials.

*** Sistema de Clasificación Unificado (SUCS).

El objetivo de clasificar los suelos es aportar unas bases sobre las cuales puedan agruparse dependiendo de sus propiedades físicas y de su apariencia, con el propósito de comparar diferentes suelos, describir sus propiedades y estimar su conveniencia para la utilización en un trabajo de ingeniería específico.



Métodos para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos

DIVISIÓN PRINCIPAL		SÍMBOLO DEL GRUPO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE LA CLASIFICACIÓN	
SUELOS DE GRANOS FINOS 50% o más pasa por el tamiz No. 200	LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido superior a 50% Límite líquido inferior o inferior	GW	Gravas bien graduadas y mezclas de limos y grava con pocos finos o silt	Mayor que 4 Entre 1 y 3 $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ $C_c = \frac{D_{30} - D_{10}}{D_{60} - D_{10}}$	
				Si los criterios para GW no se cumplen	
		GM	Gravas limosas, mezclas de grava - arena y limo	Límites de Atterberg localizados bajo la línea "A" o índice de plasticidad inferior a 4.	
				Si los límites de Atterberg se localizan en el área sombreada se debe clasificar empleando símbolos dobles.	
		GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava - arena y arcilla	Límites de Atterberg sobre la línea "A" c	
				Índice de plasticidad superior a 7	
		SW	Arenas y arcillas arenosas bien graduadas con pocos finos o silt	Superior a 6	
				Entre 1 y 3	
	SI	Arenas y arcillas arenosas mal graduadas con pocos finos o silt	Si no se cumplen los criterios para SW		
			Para los límites de Atterberg localizados en el área sombreada se debe clasificar empleando símbolos dobles		
SM	Arenas con limos	Límites de Atterberg localizados bajo la línea "A" o índice de plasticidad inferior a 4.			
		Límites de Atterberg sobre la línea "A" c			
SC	Arenas con arcillas	Índice de plasticidad superior a 7			
SUELOS DE GRANOS FINOS 50% o más pasa por el tamiz No. 200	LIMOS Y ARCILLAS	ML	Limos inorgánicos, arenas muy finas, polvo de roca, arenas limosas o arcillosas.	GRÁFICO DE PLASTICIDAD	
				Para la clasificación de los suelos finos y para la fracción fina de los suelos granulares. Los límites de Atterberg situados en el área sombreada corresponden a la clasificación de frontera y requieren símbolos dobles.	
		CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas arcillas limosas, suelos sin mucha arcilla	Ecuación de la Línea "A": $IP = 0.73(LL - 20)$	
				Para la identificación visual y manual véase ASTM - Norma D 2488	
		OL	Limos orgánicos y arcillas limosas de baja plasticidad.	Para la clasificación de los suelos finos y para la fracción fina de los suelos granulares. Los límites de Atterberg situados en el área sombreada corresponden a la clasificación de frontera y requieren símbolos dobles.	
				Ecuación de la Línea "A": $IP = 0.73(LL - 20)$	
		MH	Limos inorgánicos, arenas finas o limos micáceos o de diatomáceas, limos	Para la clasificación de los suelos finos y para la fracción fina de los suelos granulares. Los límites de Atterberg situados en el área sombreada corresponden a la clasificación de frontera y requieren símbolos dobles.	
				Ecuación de la Línea "A": $IP = 0.73(LL - 20)$	
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad arcillas grasas.	Para la clasificación de los suelos finos y para la fracción fina de los suelos granulares. Los límites de Atterberg situados en el área sombreada corresponden a la clasificación de frontera y requieren símbolos dobles.	
				Ecuación de la Línea "A": $IP = 0.73(LL - 20)$	
OH	Arcillas orgánicas de plasticidad alta o media.	Para la clasificación de los suelos finos y para la fracción fina de los suelos granulares. Los límites de Atterberg situados en el área sombreada corresponden a la clasificación de frontera y requieren símbolos dobles.			
		Ecuación de la Línea "A": $IP = 0.73(LL - 20)$			
PT	Turba, estiércol y otros suelos altamente orgánicos	Para la clasificación de los suelos finos y para la fracción fina de los suelos granulares. Los límites de Atterberg situados en el área sombreada corresponden a la clasificación de frontera y requieren símbolos dobles.			
		Ecuación de la Línea "A": $IP = 0.73(LL - 20)$			

FIGURA 1.3 CLASIFICACIÓN DE SUELOS DE ACUERDO AL SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN (S.U.C.S.)



Las características físicas y la apariencia de un suelo granular dependen principalmente del tamaño de las partículas en el depósito de suelo. En un suelo arcilloso, ellas dependen de la adherencia y la plasticidad, propiedades que están asociadas con su composición mineralógica y su contenido de humedad, y también por su textura natural o macroestructura. Por tanto, la fracción granular de un depósito de suelo se clasifica de acuerdo con su distribución de tamaños de las partículas o granulometría, y la fracción arcillosa se clasifica de acuerdo con sus características de plasticidad, con los parámetros mejor conocidos como límites de Atterberg.

Con estas dos características del suelo, estos han sido clasificados de muchas y diferentes maneras. Para evitar que existan mundialmente diferentes clasificaciones de suelos, se creó el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.), el cual se muestra en la Figura 1.3, donde también se pueden observar las diferentes combinaciones que pueden existir para cada tipo de suelo²⁷.

Como ya se mencionó anteriormente, la distribución de tamaños de las partículas en una masa de suelo se representa usualmente con la curva de gradación o granulométrica. La Figura 1.2, muestra algunas curvas granulométricas típicas.

Esta curva se obtiene midiendo la distribución de tamaño de las partículas de una muestra de suelo representativa. La forma de la curva indica si el tamaño de las partículas en el suelo varía en un rango amplio o estrecho, y se utiliza para describir la gradación del suelo. Si un suelo grueso (como arena o grava) contiene proporciones aproximadamente iguales de todos los tamaños de partículas se describe como bien graduado, y se caracteriza por tener una curva relativamente suave que cubre un amplio rango de partículas, como el suelo A en la figura 1.2. Por el contrario, se dice que un suelo se considera como mal graduado en cualquiera de los casos B y C de la misma gráfica.

1.5 Permeabilidad.

La permeabilidad es la medida del movimiento de agua dentro del suelo. Esta depende del tamaño y forma de los vacíos entre partículas de suelo, y por consiguiente, los suelos gruesos son más permeables que los suelos finos como limos o arcillas. Aunque el volumen mayor de agua ocurre en grandes vacíos y fisuras, las arcillas poseen un amplio sistema de "microporos", y de esa manera, la condensación capilar y la humedad del ambiente juegan un papel importante en la permeabilidad del suelo⁸. La figura 1.2 muestra de manera esquemática el movimiento del agua a través de la masa de suelo.

Otros factores que afectan la permeabilidad de un suelo son: la relación de vacíos, porosidad, granulometría, viscosidad del agua, porcentaje de finos dentro de la matriz gruesa o una distribución no uniforme de los componentes finos, la presencia de lentes más



permeables, la compacidad del suelo, los conductos formados por raíces y la presencia del nivel freático.

El rango de permeabilidades que pueden encontrarse es muy amplio (tabla 1.2). Algunos suelos tienen poros muy abiertos, y por consiguiente son muy permeables. Otros, particularmente las arcillas duras, tienen permeabilidades debajo de 10^{-9} cm/seg. Sin embargo, la presencia de estratificación y planos de discontinuidad en el suelo, o fisuras pueden resultar en permeabilidades mucho más altas en este tipo de arcillas²⁶.

TABLA 1.2 COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD TÍPICOS DE ALGUNOS MATERIALES.

Tipo de suelo	Coefficiente de permeabilidad (m/seg)
Arcilla	$< 10^{-9}$
Arcilla arenosa	10^{-9} a 10^{-8}
Limo	10^{-8} a 10^{-7}
Turba	10^{-9} a 10^{-6}
Arena fina	10^{-6} a 10^{-4}
Arena gruesa	10^{-4} a 10^{-3}
Arena gravosa	10^{-3} a 10^{-2}
Grava	$> 10^{-2}$

La permeabilidad de un suelo presenta algunos problemas asociados con la presión de poro o con filtraciones. Una inadecuada disipación de poro puede causar riesgo de falla por deslizamiento en terraplenes y filtraciones muy elevadas causan tubificación en el suelo.

1.6 Fenómeno de consolidación de los suelos arcillosos saturados.

Cuando un depósito de suelo se somete a un incremento de esfuerzos totales, por ejemplo, como resultado de la carga aplicada por la construcción de un edificio, se produce en el suelo un exceso de presión intersticial (agua en los vacíos del suelo). Puesto que el agua no puede resistir esfuerzos cortantes, es decir, el exceso de presión intersticial se disipa mediante un flujo de agua hacia el exterior. La velocidad a la cual se produce este proceso depende principalmente de la permeabilidad de la masa de suelo²⁶.

La disipación del exceso de presión de poro o intersticial debida al flujo de agua hacia el exterior se denomina consolidación (Figura 1.4), proceso que tiene dos consecuencias importantes:



- a. Conduce a una reducción del volumen de poros y, por tanto, a una reducción del volumen total de la masa del suelo, lo cual se manifiesta en el asentamiento de la superficie del terreno y, por consiguiente, en un asentamiento de la estructura.
- b. Durante la disipación del exceso de presión, el esfuerzo efectivo en la masa de suelo aumenta y por tanto se incrementa su resistencia al esfuerzo cortante. La consolidación y la resistencia al esfuerzo cortante son, por lo tanto, procesos que se relacionan mutuamente.

De lo anterior se deduce que cuando un suelo se consolida se produce una disminución de la relación de vacíos acompañada por un incremento del esfuerzo efectivo.

En un suelo granular, como por ejemplo una arena, la permeabilidad es relativamente alta, y por ello, el exceso de presión intersticial puede disiparse al instante. En consecuencia, el asentamiento de la estructura por lo general se termina al final de la construcción. En contraste, los depósitos de arcilla a menudo tienen una permeabilidad muy baja y por ello la disipación del exceso de presión del agua es un proceso excesivamente lento. En consecuencia, una estructura puede continuar asentándose durante varios años después de terminada la construcción.

Aunque el proceso de consolidación se aplica a todos los suelos, en la práctica solo tiene interés en el caso de estructuras cimentadas en depósitos de arcilla saturadas. El nivel de consolidación para un estrato de suelo compuesto por estos materiales, se ve afectado por varios factores, como son:

- a. La permeabilidad del suelo.
- b. La extensión o espesor del suelo compresible y la distancia que el agua intersticial tiene que recorrer para salir de la zona donde las presiones debidas a las cimentaciones están actuando, es decir, la distancia a la que se encuentra un material más permeable.
- c. La relación de vacíos del suelo compresible.
- d. La relación entre los nuevos esfuerzos por las cargas de la estructura y los esfuerzos originales.
- e. La compresibilidad del suelo.

Las propiedades de consolidación de un suelo dependen de los incisos a, c, d, e, los cuales son agrupados para obtener una propiedad del suelo llamada coeficiente de consolidación (C_v), que es un valor que indica que tan rápido o que tan lento será el proceso de consolidación. El coeficiente de consolidación se expresa de la siguiente manera:

$$C_v = \frac{k(1+e)}{a_v \gamma_w} = \frac{km_v}{\gamma_w}$$



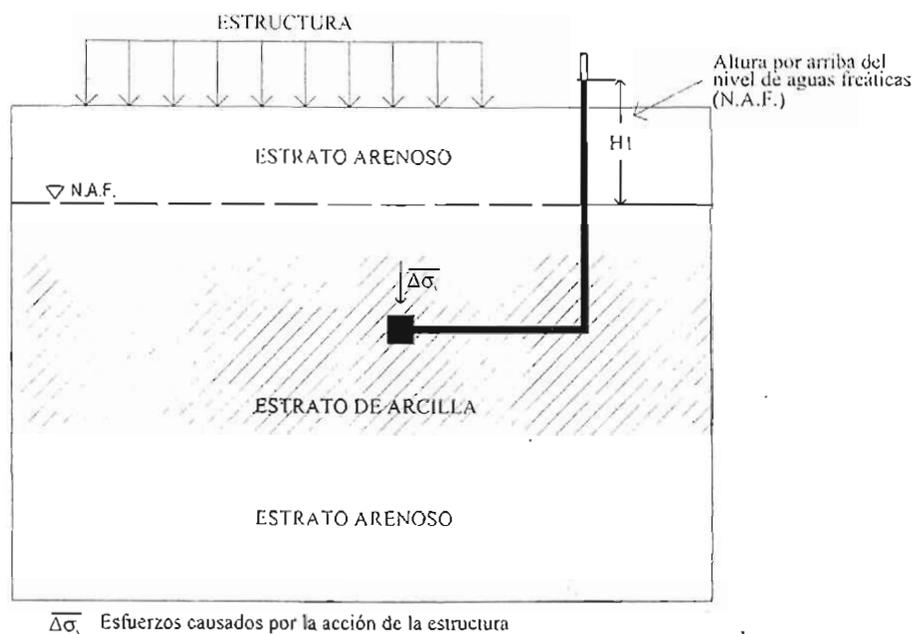
donde:

C_v	Coefficiente de consolidación del suelo
e	Relación de vacíos del suelo
k	Coefficiente de permeabilidad
a_v	Coefficiente de compresibilidad del suelo
γ_w	Peso volumétrico del agua
m_v	Es conocido como el módulo de compresibilidad del suelo, y está dado por la expresión $\frac{a_v}{1+e}$

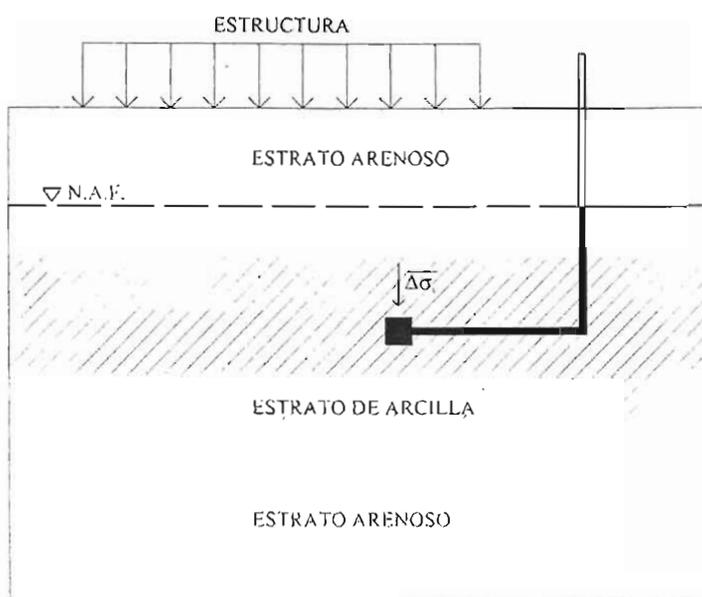
La teoría de la consolidación indica que este proceso termina cuando la presión del agua que está entre los vacíos del suelo baja a la presión hidrostática normal, y en la cual el drenado del agua intersticial cesa (Figura 1.4). Se asume que se tiene una condición de consolidación al 100% cuando toda la carga de la estructura es soportada por las partículas de suelo y ya no existe exceso de presión de poro. Para valores de porcentaje de consolidación abajo del 100%, la compresión del suelo, y por consiguiente el asentamiento de la estructura, sigue en proceso²⁷.

El tiempo que se tarda un suelo en llegar al 100% de consolidación depende en gran medida del material que lo compone, siendo las arcillas el material que más tarda en llegar a esta condición, sobre todo por la baja permeabilidad que presenta. En casos prácticos, una consolidación al 100% de un estrato de arena puede darse al finalizar la construcción de la obra, mientras que para arcillas el fenómeno puede durar aún años después de finalizada la construcción.

Por lo anterior, se dice entonces que un suelo está totalmente consolidado cuando su volumen permanece constante bajo la acción de un estado de esfuerzo constante. Un suelo normalmente consolidado es aquel en el cual las condiciones actuales corresponden a su presión de consolidación final o extrema. Cuando un suelo está sometido a una sobrecarga que es inferior a la presión extrema de consolidación que existió en algún momento del pasado, se dice que está preconsolidado; esto sucede, por ejemplo, en el caso de suelos consolidados bajo la acción de una capa de hielo que ya no existe. Cuando se tiene un cambio en las condiciones del esfuerzo, se tiene que alcanzar un nuevo estado de equilibrio. La teoría de la consolidación se puede expresar de igual manera por medio de las llamadas curvas de consolidación, en las cuales una muestra de suelo se ve sujeta a cargas que producen deformaciones en su estructura⁸.

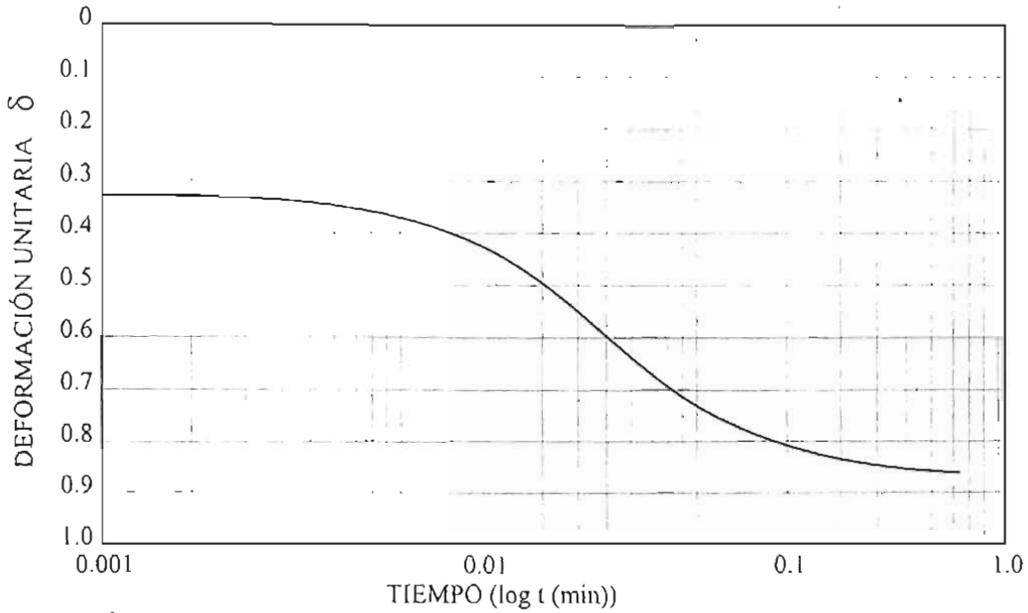


PRESIÓN HIDROSTÁTICA EN UN ESTRATO ARCILLOSO CUANDO LOS ESFUERZOS DEBIDOS AL INCREMENTO DE CARGA POR LA ESTRUCTURA AUMENTAN.

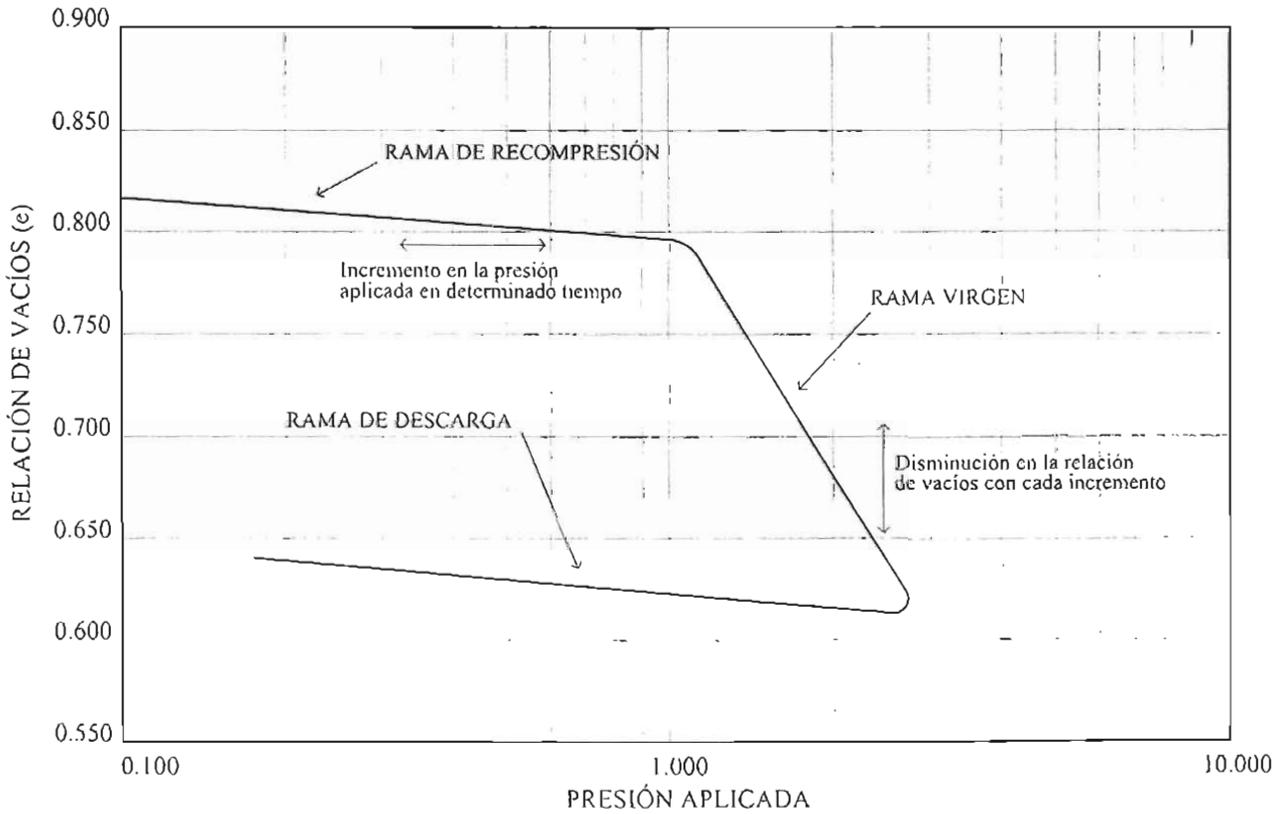


PRESIÓN HIDROSTÁTICA EN UN ESTRATO ARCILLOSO CUANDO SE TIENE EL 100 % DE CONSOLIDACIÓN

FIGURA 1.4 TEORÍA DE LA CONSOLIDACIÓN DE SUELOS



1.5a CURVA TÍPICA DE CONSOLIDACIÓN



1.5b CURVA TÍPICA DE COMPRESIBILIDAD

FIGURA 1.5 CURVAS DE CONSOLIDACIÓN Y DE COMPRESIBILIDAD TÍPICAS

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



La figura 1.5 muestra una curva de consolidación idealizada. Al incrementarse la carga, la relación de vacíos disminuye en una forma cada vez más lenta, ya que el espécimen de prueba se hace más denso o más compacto. La llamada rama virgen corresponde a un suelo que no ha sido cargado anteriormente. Al descargar el suelo, se obtiene la curva de expansión, es decir, en este punto el suelo se comporta como un material semi-elástico, una parte de la deformación es permanente y otra parte reversible.

1.7 Teoría de la Resistencia al Esfuerzo Cortante.

La capacidad de un depósito de suelo para soportar una carga impuesta por una estructura o de una masa de suelo para soportarse a sí misma es gobernada por la resistencia al esfuerzo cortante o resistencia mecánica. Como resultado, la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo se vuelve de importancia fundamental en el diseño de cimentaciones, diseño de carreteras y aeropuertos, problemas de estabilidad de taludes y presiones laterales que se ejercen en muros subterráneos, muros de retención y excavaciones⁸.

Una muestra de suelo, sometida a un esfuerzo de corte tiende a producir un desplazamiento de las partículas entre sí o de una parte de la masa del suelo con respecto al resto del mismo.

Por ejemplo, en la Figura 1.6 se muestran las deformaciones típicas que pueden sufrir los suelos con la aplicación de una carga externa. En el primer caso (a), se dice que hay un disgregamiento de las partículas. En el segundo caso (b), se dice que la masa se desliza a lo largo de ciertas líneas de rotura, o si la masa de suelo es plástica se produce lo que se denomina fluencia plástica (c)²⁶.

Estos movimientos dentro de la masa de suelo tienden a ser contrarrestados por la resistencia al corte del suelo.

Es aceptado, que la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, está dada por la ecuación de Coulomb:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

En la que:

τ = Resistencia al esfuerzo cortante del suelo (en unidades de presión, por ejemplo kg/cm²).

c = Cohesión del suelo (en unidades de presión).

σ = Esfuerzo normal total en el plano de falla (en unidades de presión).

ϕ = Ángulo de fricción interno del suelo (sin unidades)



La cohesión de un suelo puede definirse como la adherencia entre sus partículas debida a la atracción entre ellas en virtud de las fuerzas moleculares.

El ángulo de fricción interna es un valor que depende de la uniformidad de las partículas del suelo, del tamaño y forma de los granos y de la presión normal.

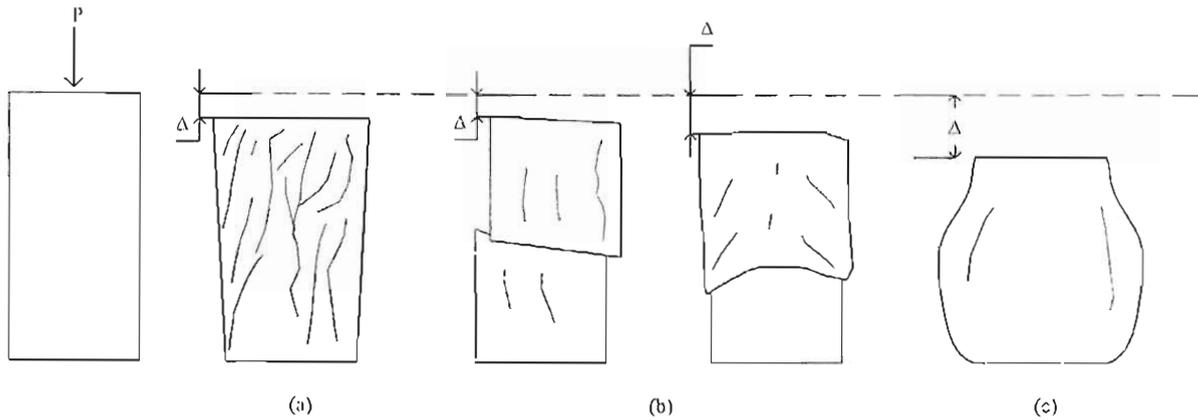
El esfuerzo normal en el plano de falla es la presión que ejerce una columna de suelo justo encima del punto en el cual podría ocurrir la falla. Su cálculo depende del peso volumétrico del suelo, de la profundidad a la que considera el plano de falla y de la colocación del nivel de aguas freáticas.

La resistencia al corte de un suelo resulta de la resistencia a la fricción que tiene lugar en los puntos de contacto entre partículas y, como tal, su valor depende sólo de la magnitud de los esfuerzos efectivos que actúan en el esqueleto de suelo; cuanto mayor sea la presión entre las partículas, mayor será la resistencia al corte. Por tanto, puede esperarse que en lo fundamental todos los análisis de la resistencia mecánica del suelo se hicieran en términos de esfuerzos efectivos con c y ϕ , ya sea por ejemplo, para cálculos de la capacidad de carga, análisis de estabilidad de taludes de corte, etc.

En general, según Coulomb, los suelos presentan características mixtas, es decir, presentan a la vez cohesión y fricción interna, sin embargo, existen dos casos límites:

- a. Las arenas lavadas y secas no poseen cohesión. En este material, la resistencia al corte se reduce a la expresión $\tau = \sigma \tan \phi$, y dependerá únicamente del esfuerzo total y del acomodo de las partículas, entre otros factores, como lo indica el ángulo de fricción interna.
- b. Las arcillas blandas, las cuales se comportan como si el ángulo de fricción interna de sus partículas fuera igual a cero, la carga de ruptura o resistencia última del suelo será igual a la cohesión, como se indica en la expresión $\tau = c$.

La cohesión de un suelo y su ángulo de fricción interna, componentes del esfuerzo de corte del mismo, pueden obtenerse de diferentes maneras, y entre ellas las más importantes son las pruebas de compresión triaxial (Figura 1.7), las cuales se realizan aplicando al suelo una presión de confinamiento (que es constante durante toda la prueba) y una presión axial que va aumentando en el transcurso de la prueba hasta el momento en el que falla las muestras en la forma convencional. Graficando los resultados obtenidos en este tipo de prueba de compresión para diferentes especímenes, los valores de la cohesión y el ángulo de fricción interna pueden obtenerse de la recta de la resistencia mecánica del suelo, dada por la envolvente de resistencia, que es la recta que pasa tangente a los círculos de falla (generalmente se deben obtener tres para resultados más confiables).



TIPOS DE DEFORMACIONES QUE PUEDE SUFRIR UN SUELO, AL SER APLICADA UNA SOBRECARGA.

- a) Disgregamiento de partículas de la masa de suelo
- b) Deslizamiento de la masa de suelo a lo largo de líneas de falla o rotura.
- c) Fluencia plástica de la masa de suelo

FIGURA 1.6 COMPORTAMIENTO DE SUELOS ANTE LA ACCIÓN DE SOBRECARGAS APLICADAS SOBRE ELLOS (COMPRESIÓN SIMPLE).

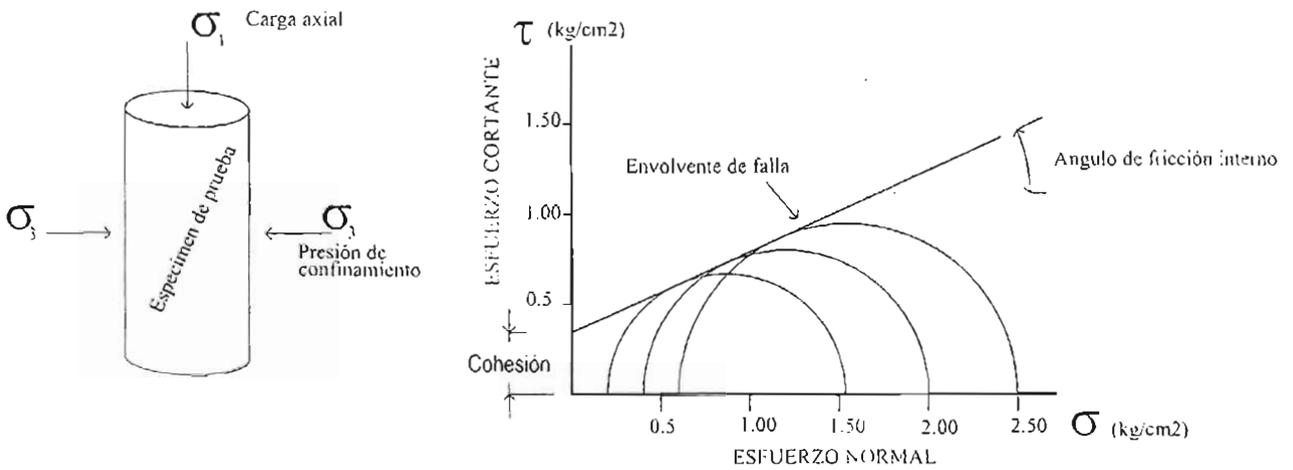


FIGURA 1.7 TEORÍA DE LA RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE OBTENIDA A PARTIR DE PRUEBAS DE COMPRESIÓN TRIAXIAL.



CAPITULO 2

MEJORAMIENTO DE SUELOS.

Los suelos encontrados en la naturaleza pueden ser muy variables y complejos, y debido a su gran disponibilidad y bajo costo, estos ofrecen una gran oportunidad para utilizarlos como material en la construcción.

Sin embargo, puede ocurrir que un suelo en un determinado lugar sea inadecuado, parcial o totalmente, debido a que no cumple con los requisitos especificados para el fin que se le desea dar, por ejemplo, para apoyar cimentaciones, construir carreteras, etc. En este caso, el ingeniero encargado del proyecto o construcción deberá tomar una de las decisiones siguientes:

- a. Aceptar el material tal y como está y efectuar el diseño de la estructura de acuerdo con las restricciones impuestas por la calidad del material.
- b. Remover y desechar el suelo de baja calidad del lugar, y sustituirlo por suelo de características adecuadas y que cumplan con los requisitos especificados para el proyecto.
- c. Cambiar el lugar del proyecto.
- d. Alterar o cambiar las propiedades del material existente para crear nuevas condiciones que sean capaces de enfrentar mejor las solicitudes del proyecto que se planea desarrollar sobre el.

La última opción, es decir, la alteración de las propiedades del suelo para enfrentar ciertos requisitos específicos de ingeniería es conocida como el mejoramiento de los suelos^{14, 13}.

Las propiedades mecánicas de un suelo se pueden alterar de muchas formas como puede ser por medios mecánicos, drenaje, adición de agentes estabilizantes, por la acción de cargas sobre el, congelándolo, etc.

Sin embargo, y debido a la gran variabilidad de suelos, cada método resulta aplicable solamente a un número determinado de ellos. Además, en unos cuantos metros se puede encontrar variabilidad en los tipos de suelos, de tal manera que aplicando el método seleccionado, este no puede ser efectivo para todos los suelos encontrados y la elección del método de mejoramiento estará gobernada por el número y tipo, así como la extensión de los suelos en los que este proceso sea efectivo. También, es indispensable reconocer que el mejoramiento de suelos no es una herramienta mágica, que ayude a mejorar todas las propiedades de un suelo. Por consiguiente, se debe tener una clara apreciación de las propiedades que se desea mejorar, pues este requisito específico es un elemento muy importante para tomar la decisión correcta acerca del método más adecuado, el mejoramiento que se desea obtener, o si es conveniente o no realizar el proceso de estabilización o mejoramiento.



Por otro lado, no debe pensarse en el mejoramiento solo como una medida correctiva, sino también como una medida preventiva o de seguridad contra condiciones adversas que se desarrollen durante la construcción o durante la vida útil de la estructura, como pueden ser sismos o elementos que alteren ciertas características del suelo, como incrementos en la humedad por lluvia excesiva, entre otros¹³.

Para seleccionar el método de mejoramiento más adecuado, se deben contemplar ciertas cuestiones, las cuales son tratadas en este capítulo.

2.1 Propiedades del suelo que se busca mejorar.

Entre las propiedades del suelo que más interesa mejorar se pueden contar las siguientes¹³:

1. Resistencia Mecánica
2. Estabilidad Volumétrica.
3. Permeabilidad.
4. Durabilidad.
5. Compresibilidad.

2.1.1 Resistencia Mecánica.

Es sabido, que la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos, salvo algunas excepciones, es en general más baja cuando estos se encuentran húmedos. Los suelos arcillosos al secarse alcanzan grandes resistencias teniéndose inclusive la condición más alta de resistencia cuando se calientan a temperaturas muy elevadas como sucede en la fabricación de tabiques y ladrillos. Algunas veces, sin embargo, la resistencia mecánica de un suelo es menos importante que su deformabilidad bajo carga. La presencia de deformación debida a cambios en las cargas externas es, por supuesto, similar en muchas maneras a los cambios volumétricos debidos a las fuerzas internas causadas por la variación de la humedad. La veracidad de esta relación es evidenciada con el hecho de que los estabilizadores empleados para mejorar la resistencia del suelo también mejoran la estabilidad volumétrica, y viceversa¹⁴.

Como se mencionó anteriormente, existen casos en donde la disminución de la humedad puede significar una reducción en la resistencia. Esto se puede observar claramente en cortes realizados en arcillas, las cuales al secarse por la temperatura se comportan como materiales friccionantes y pierden resistencia mecánica, provocando problemas de estabilidad. Además, la acción abrasiva del tránsito por ejemplo, puede hacer que un material cohesivo se pulverice y pierda su cohesión.



Resulta evidente que los procedimientos que sirvan para mantener a un suelo sin que se produzcan cambios volumétricos son también adecuados para mantener y mejorar la resistencia del suelo, como lo es la adición de agentes que transformen a un suelo fino en una masa rígida o granular. Estos agentes pueden ser químicos, teniendo al cemento Pórtland y la cal como los más comunes.

Sin embargo, debe tenerse muy presente que en general el agua ablanda a los suelos cohesivos, razón que obliga a que cuando se quiera tener una resistencia que permanezca en el tiempo se propicie el adecuado drenaje, como el uso de drenes en cortes formados en arcillas o suelos gruesos.

El drenaje del suelo hace que se reduzca la cantidad y/o presión en el agua intersticial, lo que suele permitir el aumento de su peso volumétrico y de esta manera mejorar su resistencia. Esto se puede realizar mediante precarga y drenes verticales para conseguir una rápida consolidación, lo que disminuiría los asentamientos provocados por la sobrecarga de la estructura que va a soportar.

Es muy importante, sin embargo, tener presente que este método de mejoramiento puede requerir de periodos largos, dependiendo de condiciones tales como las trayectorias de drenaje, permeabilidad del suelo, espesor de las capas, coeficientes de consolidación y grado de saturación.

En resumen, las propiedades mecánicas de un suelo pueden ser fácilmente modificadas, o mantenidas en una condición constante por la estabilización o mejoramiento. Los métodos empleados para mejorar la estabilidad volumétrica son también efectivos para mantener o mejorar las propiedades mecánicas. Las condiciones hidráulicas en el suelo son también identificadas como factores de importancia en problemas prácticos, ya que de ellas depende en gran medida el comportamiento de ciertos tipos de suelos. Por último, la densificación es casi siempre un medio muy útil para mejorar la calidad de las propiedades mecánicas de un suelo, como se puede observar en los resultados obtenidos en la práctica después de aplicar métodos como la vibroflotación o la compactación dinámica.

2.1.2 Estabilidad Volumétrica.

Muchos suelos se expanden y se contraen con los cambios de humedad, los cuáles se pueden presentar en forma rápida o acompañando a las variaciones estacionales. Si las presiones de expansión que se desarrollen debido a un incremento en la humedad no son controladas en alguna forma, estas presiones pueden levantar pavimentos, inclinar postes, fracturar muros, romper tubos de drenaje, etc., por lo cual es de vital importancia detectar a los suelos expansivos y el tratamiento más adecuado para evitar los problemas anteriores.

De esta manera, la estabilidad volumétrica de un suelo es su capacidad de mantenerse en un volumen casi constante sin verse afectado por la presencia o ausencia de agua.

El cambio en el volumen de los suelos, especialmente en los arcillosos con presencia de minerales montmoriloníticos, está relacionado con la viscosidad y movilidad del agua adsorbida por las partículas de arcilla o de las partículas circundantes, las cuales aumentan o disminuyen de volumen con relativa facilidad durante condiciones de humedad natural o condiciones secas^{8, 13}.

Actualmente, las soluciones para evitar cambios volumétricos en suelos expansivos consisten en introducir humedad al suelo, en forma periódica, ya que al no haber variación en la humedad no existirán cambios de volumen; también se emplea la aplicación de cargas que equilibren la presión de expansión y la utilización de membranas impermeables que impidan la pérdida de humedad. De la misma manera, se puede apoyar la estructura a profundidades tales que no se registre variación estacional en la humedad¹⁴.

Otro medio podría consistir en modificar a la arcilla expansiva transformándola en una masa rígida o granular cuyas partículas estén lo suficientemente ligadas para resistir la presión expansiva interna de la arcilla lo cual puede lograrse por medios químicos, con la adición de un agente estabilizador como cemento o cal, que reduzca la facilidad para atraer o perder humedad de estos suelos. En estos casos, aún cuando la capa a estabilizar sea pequeña deberá tenerse en cuenta que el suelo subyacente es aún susceptible de expandirse, pero tales movimientos podrían tolerarse siempre y cuando la capa estabilizada se mueva en forma uniforme. Un medio más podría consistir en hacer que el agua se mueva más lentamente dentro de la masa expansiva mediante el sellado de sus poros o grietas. Algunas veces se ha adoptado la solución de cubrir al suelo con membranas impermeables para reducir la posibilidad de cambios en la humedad.

2.1.3 Durabilidad.

Al igual que con todos los materiales de construcción, una condición muy deseable en los suelos es la durabilidad, definida como la resistencia a los procesos de intemperización, erosión y abrasión. La durabilidad en caminos está relacionada con las capas superficiales de los pavimentos en la formación de baches o disgregaciones, erosiones en los taludes y cortes y cambios en la textura de los agregados de las carpetas¹².

Ocasionalmente, sin embargo, se producen erosiones profundas internas en los terraplenes o cortes debido no solo a una baja durabilidad sino también a una alta permeabilidad. Desde luego que una baja durabilidad tiene una alta repercusión en el costo de mantenimiento, más que en fallas estructurales de consideración. En los suelos estabilizados la durabilidad baja se debe en general a un diseño deficiente que puede tener su origen en la elección de un estabilizante o método de mejoramiento inadecuado, por ejemplo, cuando se aplica cal



hidratada con algún tipo de arcilla con la cual no reacciona favorablemente; también puede deberse a una cantidad insuficiente de estabilizante, o a una resistencia inadecuada contra los ataques del agua o agentes químicos, por ejemplo, cuando se intenta estabilizar suelos arcillosos en zonas salinas con cemento¹².

Actualmente, una deficiencia importante en los estudios de las estabilizaciones es la carencia de pruebas adecuadas para estudiar la durabilidad. Las pruebas de intemperismo a veces no son adecuadas para el estudio de agregados para pavimentos por no reproducirse en forma eficiente el ataque a que estarán sujetos. En las pruebas con aplicación de efectos cíclicos, no se tiene aún una correlación precisa entre el tránsito y las pruebas en que se somete a los especímenes a efectos de secado y humedecimiento que son más bien de orden cualitativo que cuantitativo.

La durabilidad es, de esta manera, uno de los aspectos más difíciles de cuantificar y la reacción común ha sido la de sobre diseñar, lo cual a veces no suele ser lo correcto. La resistencia a los efectos del tránsito puede mejorarse mucho mediante la estabilización, pero existen problemas, como por ejemplo la formación de polvo suelto en caminos revestidos, en donde es fácil tener una solución económica. En zonas donde se quiere evitar la formación de polvo que fácilmente se levante con la acción del viento, como lo es en el caso del área que rodea a las aeropistas se aplican soluciones temporales mediante riegos asfálticos o de hules, sales o cloruro de calcio.

2.1.4 Permeabilidad.

En los suelos la permeabilidad se plantea, en términos generales, en dos problemas básicos, como lo es el relacionado por la disipación de las presiones de poro y el relacionado con el flujo del agua a través del suelo. El tener presiones de poro excesivas puede originar deslizamientos en terracerías y el flujo de agua puede ocasionar tubificaciones y arrastre de material. Además, en regiones con lluvia intermitente, la permeabilidad del suelo es frecuentemente una fuente de problemas durante la construcción, ya que en áreas con capas de arcillas impermeables se forman acumulaciones de agua o encharcamientos con los respectivos problemas de drenaje y capacidad de carga. Los suelos de texturas abiertas o muy porosos y algunas arcillas agrietadas pueden generar pérdidas por filtración en estructuras de retención de agua (como presas), e incluso, si el gasto de filtración es muy grande puede arrastrar material y provocar asentamientos indeseables en estas estructuras¹⁵.

Los métodos de mejoramiento o estabilización empleados para variar o alterar la permeabilidad de un suelo no necesariamente mejorarán la estabilidad volumétrica o la resistencia mecánica, y en algunas ocasiones pueden incluso disminuir estas propiedades. En muchos casos, la permeabilidad en un suelo puede ser fácilmente alterada. Altas permeabilidades pueden ser reducidas por compactación, inyecciones, o, en el caso de arcillas, por agentes floculantes. Cuando se requiere incrementar la permeabilidad, es decir,



hacer el material más permeable, la única opción es realizar mezclas con floculantes o arena y grava, como es en el caso para drenes o pozos de absorción o como relleno en la parte posterior de elementos de contención para aliviar el empuje hidrostático.

2.1.5 Compresibilidad.

Los cambios de volumen o compresibilidad, tienen una importante influencia en las propiedades ingenieriles de los suelos, pues si se modifica la permeabilidad, se alteran las fuerzas existentes entre las partículas tanto en magnitud como en sentido, lo que tiene una importancia decisiva en la modificación de la resistencia del suelo al esfuerzo cortante y en la presencia de desplazamientos o deformaciones, las cuales deberán ser analizadas previamente a la construcción de la estructura, basando el análisis en los parámetros máximos establecidos en reglamentos y/o normas oficiales.

En el caso de suelos finos saturados, si no se permite el drenaje, y se aplican esfuerzos, estos serán tomados por el agua. En el momento en que se permita el drenaje, los esfuerzos son transmitidos gradualmente al esqueleto o estructura del suelo; este proceso produce una compresión gradual de dicha estructura, fenómeno conocido como consolidación.

La compresibilidad de un suelo puede presentar variaciones importantes dependiendo de algunos factores tales como la relación de la carga aplicada respecto a la que el suelo soportaba anteriormente, tiempo de aplicación de la carga una vez que se ha disipado la presión de poro en exceso, la naturaleza química del líquido intersticial, y sobre todo las características propias del suelo como son tipo de suelo, densidad y permeabilidad⁸.

De esta manera, es esencial que cualquier proyecto deba considerar cuidadosamente la importancia relativa de todas las propiedades más importantes (estabilidad volumétrica, resistencia mecánica, permeabilidad y durabilidad) para un trabajo en particular antes de tomar la decisión del tipo o método de mejoramiento.

2.2 Aplicabilidad, factibilidad y conveniencia del mejoramiento de suelos.

La aplicación y selección del método de mejoramiento de suelos para un objetivo en particular va a depender de muchos factores, los cuales incluyen:

- Tipo y grado de mejoramiento requerido.
- Tipo de suelo, estructura geológica, condiciones de infiltración.
- Costo del mejoramiento (el tamaño del proyecto puede ser decisivo y es en muchos casos el factor más importante para la decisión de aplicar o no un tratamiento).
- Disponibilidad de equipo y materiales, y la calidad requerida para el trabajo.



- Tiempo de construcción disponible.
- Posible daño a estructuras cercanas o contaminación de fuentes de agua subterránea.
- Durabilidad de los materiales involucrados (relacionada con la vida esperada para la estructura según el entorno proporcionado y las condiciones de esfuerzo).
- Toxicidad de los aditivos químicos empleados (normas establecidas pueden restringir la elección de estos materiales).
- Si el proceso de mejoramiento es reversible o no puede ser reversible.
- Reutilización de los componentes.
- Confiabilidad de los métodos de análisis y diseño.
- Factibilidad en el control de la construcción y mediciones del desarrollo del mejoramiento.

Otras condiciones que deben tomarse en cuenta son:

- Si el suelo está saturado o seco, y la condición de humedad que tenga.
- Si el suelo está normalmente consolidado y el grado de consolidación que tenga (historia de cargas).
- O si el suelo es de naturaleza especial, como altamente orgánico, un relleno sanitario, o un depósito de basura industrial.

La factibilidad de un método en particular depende fuertemente del tipo de problema que se tiene en la mano, como mejorar suelos para cimentaciones, terraplenes en suelos blandos, taludes inestables, excavaciones, estructuras de retención de tierra o filtraciones en presas.

La conveniencia de un método en particular de mejoramiento de suelos es largamente observada en términos de impacto ambiental y consumo de energía. El uso de inyecciones o lechadas tóxicas y técnicas experimentales, como densificación por descargas eléctricas o modificación de suelos por radicación están catalogadas como últimas en la lista según la conveniencia.

Aspectos de la aplicabilidad, factibilidad y conveniencia serán planteados con cada método de mejoramiento de suelos en los capítulos subsecuentes.

2.3 Métodos para el mejoramiento de suelos.

En el presente trabajo se presentan métodos de mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos, los cuales son resumidos brevemente en la tabla 2.1, donde se muestra al campo de aplicación del método, dependiendo de su empleo.

Sin embargo, no son todos los métodos existentes, ya que con el paso del tiempo, nuevas técnicas, materiales, maquinaria y procesos van apareciendo, haciendo los métodos convencionales más rápidos y eficientes.



TABLA 2.1 MÉTODOS EMPLEADOS PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SUELOS

Método	Campo de aplicación
Suelo – Cemento	<i>Construcción de pavimentos, terraplenes, muros de contención, pantallas impermeables</i>
Suelo – cal	<i>Construcción de pavimentos, tratamiento en zonas con problemas de expansibilidad de arcillas</i>
Modificación de la granulometría	<i>Construcción de pavimentos, rellenos impermeables o permeables.</i>
Vibroflotación	<i>Mejoramiento de las condiciones de cimentación profunda.</i>
Jet grouting	<i>Mejoramiento de las condiciones de cimentación profunda</i>
Inyección de suelos	<i>Mejoramiento de las condiciones de cimentación, relleno de oquedades en el subsuelo</i>
Precarga	<i>Mejoramiento de las condiciones de cimentación al reducir asentamientos por consolidación</i>
<i>Compactación dinámica</i>	<i>Mejoramiento de las condiciones de cimentación</i>

2.3.1 Compactación de suelos.

La compactación de suelos es uno de los componentes más críticos e importantes en la construcción de carreteras, aeropistas, terraplenes y cimentaciones. La durabilidad y estabilidad de una estructura está relacionada con el cumplimiento de una adecuada compactación del suelo sobre el que se va a apoyar. De esta manera, las fallas estructurales de caminos y pistas de aterrizaje en aeropuertos, y daños en las estructuras causados por asentamiento de la cimentación pueden eliminarse al completar una adecuada compactación^{17,9}.

Este método de mejoramiento consiste en la densificación mecánica de los suelos. La densificación es realizada al presionar las partículas de suelo para llevarlas a un estado más estrecho de contacto con la obvia expulsión de aire y agua de la masa de suelo en el proceso. La compactación, implica la densificación del material por la aplicación de cargas móviles en la masa de suelo. Este método contrasta con la consolidación de suelos con partículas finas en que este proceso va haciendo más denso el suelo como resultado de la aplicación de una carga estática⁹.

Ningún proceso constructivo aplicado a suelos naturales da un cambio tan marcado en las propiedades de un suelo a un costo tan bajo como la compactación. El principal objetivo de este método es mejorar las propiedades ingenieriles del material en todos o en algunos de los siguientes aspectos:



- Aumentar la resistencia al corte, y por consiguiente, mejorar la estabilidad de terraplenes y la capacidad de carga de cimentaciones y valores de VRS en pavimentos, ya sean de autopistas o aeropistas.
- Disminuir la compresibilidad y, por consiguiente, reducción en los asentamientos.
- Disminuir la relación de vacíos y, de esta manera se obtiene una reducción en la permeabilidad.
- Reducir el potencial de expansión, contracción o expansión por cambios en la humedad del material.

El grado de compactación de un suelo o de un relleno se mide cuantitativamente mediante la densidad seca. La densidad seca (o peso volumétrico seco máximo) que se obtiene mediante un proceso de compactación depende de la energía utilizada durante la compactación, denominada energía de compactación, y también del contenido de humedad del suelo durante el proceso de compactación (o humedad óptima).

La compactación es mencionada en capítulos posteriores como parte importante de un proceso de mejoramiento o estabilización, como es en el caso de estabilización con cemento o cal, donde se requiere que una capa estabilizada con este material sea compactada⁹.

2.3.2 Geotextiles y geomembranas.

Uno de los avances más importantes de la ingeniería de suelos en las décadas de los años setenta y ochenta fue el empleo de telas poliméricas para mejorar el comportamiento ingenieril de las estructuras de suelo. A partir de las primeras aplicaciones en la construcción de vías de acceso provisionales construidas sobre suelos blandos, estos materiales se utilizan con amplitud actualmente en la construcción de aeropistas importantes, vías férreas, canales, presas, estructuras marinas, puentes, taludes en terraplén y en corte, muros de contención y cimentaciones de edificaciones.

Alrededor del mundo se fabrican una amplia variedad de productos que se comercializan con diferentes nombres registrados en forma de geotextiles, geomembranas, mallas abiertas o geomallas. En su fabricación se emplean principalmente polímeros plásticos; los más comunes son el polipropileno, el poliéster, el polietileno y la poliamida. Puesto que no existe una terminología formalmente reconocida para denominar estas telas, la tendencia es designar como geotextiles a las telas permeables y como geomembranas a las impermeables. Las geomembranas pueden emplearse como revestimiento impermeable en canales, embalses, etc.

Cuando estas telas se incorporan en una estructura de suelo contribuyen en una o más de las cuatro funciones siguientes: Refuerzo, Separación, Filtración y/o Drenaje.

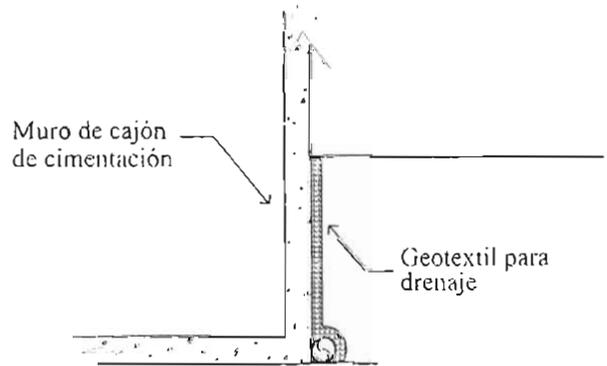
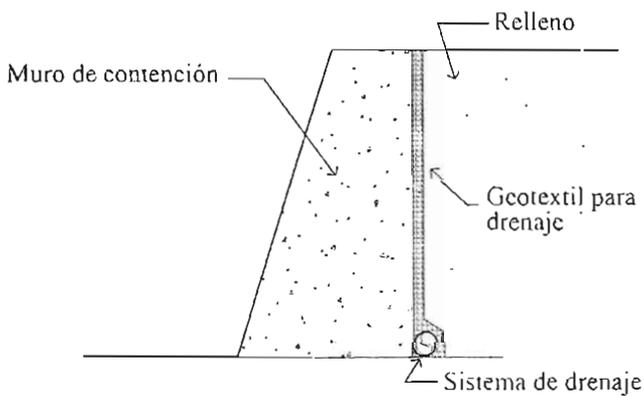
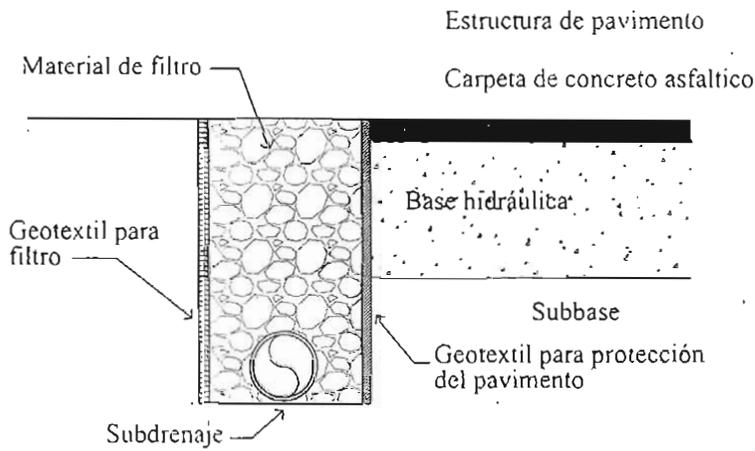
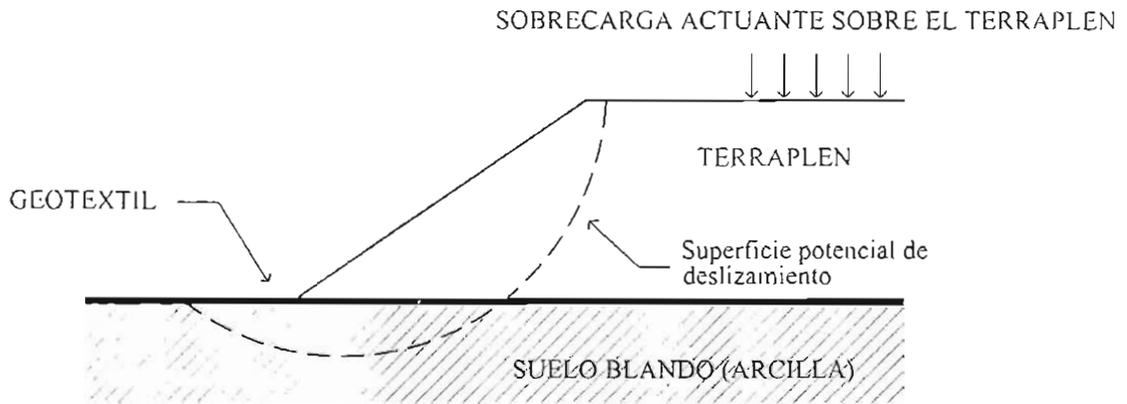


FIGURA 2.1 EMPLEO COMÚN DE GEOTEXILES EN PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL.

Un problema frecuente en la construcción de terraplenes sobre terrenos blandos es la inestabilidad a corto plazo, debida a la baja resistencia del suelo de cimentación. Este problema puede evitarse mediante la colocación de un geotextil entre el suelo blando y la capa de material de relleno, como se muestra en la Figura 2.1. A corto plazo, la resistencia a la tensión del geotextil proporcionará la resistencia adicional necesaria para evitar que se produzca el corte a lo largo de una superficie de falla potencial que pase por el suelo de cimentación. Sin embargo, a medida que se produce el proceso de consolidación del suelo aumenta su resistencia al corte y su estabilidad a largo plazo ya no depende de la presencia del geotextil.

También se pueden emplear para cumplir el mismo propósito que el refuerzo en construcciones con tierra armada.

Algunos de los factores que deben considerarse antes de escoger el geotextil son: la resistencia al impacto y a la abrasión, que son importantes cuando sobre el geotextil se colocan rocas de gran tamaño o con aristas cortantes como en el caso de elementos de subdrenaje; la permeabilidad y la distribución del tamaño de los poros cuando se utilicen para filtros y la resistencia al ataque químico cuando estén en contacto con productos peligrosos. Además, cuando se requiera que los geotextiles se comporten adecuadamente a lo largo de la vida útil de una estructura, un factor de gran importancia es la capacidad para resistir la degradación ambiental y la meteorización in situ a largo plazo. Los ambientes climáticos en los que se pueden colocar los geotextiles pueden ser templados, tropicales, desérticos o permanentemente congelados con agentes de meteorización y degradación diferentes en cada uno; es claro que los geotextiles que resisten bien en un ambiente pueden deteriorarse con rapidez en otro. Sin embargo, no existe aún información suficiente que permita establecer la vida útil de los geotextiles cuando se instalan en ambientes hostiles.

2.3.3 Compactación por medio de explosivos.

La energía liberada por las detonaciones de cargas altamente explosivas dentro de una masa de suelo provoca que se realice un reacomodo de las partículas hacia una estructura más densa. Las explosiones destruyen la estructura del suelo, lo que causa un movimiento de las partículas. Además, la generación de presiones de poro excesivas puede inducir la licuación del suelo y así contribuir al proceso de densificación.

La primera vez que este método se empleo exitosamente fue a finales de la década de los años 30, pero no obstante su antigüedad, esta técnica apenas recientemente ha sido aceptada como una alternativa viable para la densificación de suelos. La renuencia de emplear la compactación con explosivos se debe a la preocupación por daños a las estructuras cercanas al lugar donde se están realizando las detonaciones por las vibraciones inducidas por las explosiones. Sin embargo, una adecuada secuencia de detonaciones ha demostrado ser una



medida efectiva en el control de estas vibraciones, impartiendo al suelo solo la energía necesaria para provocar la licuación y densificación.

Los suelos friccionantes relativamente limpios, con densidades iniciales aproximadamente menores del 50% son los más adecuados para ser densificados con compactación explosiva.

Los suelos que tengan densidades iniciales mayores de 50% pueden aflojarse mediante explosiones. Una ventaja de esta técnica de mejoramiento es que puede ser usada a grandes profundidades, incluso más que otros métodos. Se tienen registros que ha sido empleada exitosamente hasta 40 metros con la máxima profundidad efectiva desconocida. Como regla general, a mayor profundidad, mayor carga explosiva, y las dificultades prácticas de colocar cargas de mayor tamaño a mucha profundidad puede ser el factor limitante de la profundidad a la cual este método puede ser empleado.

Un programa típico de explosiones consiste en cargas colocadas en una cuadrícula, espaciadas de 3 a 8 metros, y de 8 a 15 metros en áreas remotas, con cargas pesando entre 2 y 15 kilogramos. Para estratos de suelo menores a 10 metros de espesor, las cargas son colocadas usualmente a una profundidad entre la mitad y tres cuartos del espesor de la capa a ser tratada, con una profundidad de dos terceras partes del espesor de la capa siendo lo más común. Estratos mayores a 10 metros de espesor son comúnmente divididos en subcapas, donde cada subcapa es tratada en forma separada, con secuencias ya sea de abajo hacia arriba o viceversa, ya que no existe evidencia acerca de cual de las dos secuencias es más efectiva^{15, 17}.

El asentamiento de la superficie es inmediato después de la explosión, con asentamientos típicos del orden de 2 a 10 por ciento del espesor de la capa tratada. Cuando se emplea el método varias veces (pasadas múltiples), el mayor asentamiento ocurre en la primera pasada y disminuye con cada pasada adicional. No obstante el asentamiento en el suelo es inmediato, el incremento en la resistencia a la penetración depende usualmente del tiempo y puede requerir varias semanas para desarrollarse completamente.

La cantidad de explosivos requeridos para tratar una unidad de volumen de suelo varía de 15 a 35 g/m³. Para mediciones calorimétricas, la densidad de energía de TNT es aproximadamente de 4560 J/g. Sin embargo, solamente cerca del 67% de esta energía es transformada en energía mecánica. De los valores anteriores, la energía mecánica requerida para tratar una unidad de volumen de suelo por medio de compactación con explosivos¹⁷ es estimada en un rango de 22 a 100 kJ/m³.



2.3.4 Mejoramiento térmico con calor.

Este método está basado en el conocimiento antiguo de que altas temperaturas pueden convertir a las arcillas en bloques o ladrillos. A temperatura suficiente, el proceso de endurecimiento se vuelve irreversible, y una inmersión total en agua no destruye ni afecta la resistencia del ladrillo. De esta manera, el tratamiento de suelos arcillosos a temperaturas que exceden los 400° C da como resultado cambios permanentes de consideración en sus propiedades mecánicas. Este punto contrasta con el proceso de congelamiento de suelos, el cual debe ser mantenido constantemente para ser efectivo, ya que una vez que este se ha deshielado, en ocasiones puede quedar menos resistente que antes de efectuado el tratamiento¹⁵.

Calentar un suelo con el fin de mejorarlo es un proceso que gasta mucha energía, generalmente entre 50 y 100 litros de combustible para estabilizar un metro cúbico de suelo, y en una era de incremento en el costo de la energía y preocupación por la contaminación, el mejoramiento de suelos a gran escala con este método es cada vez menos recurrido, excepto en circunstancias muy especiales.

El calor empleado en esta técnica puede ser generado al quemar combustibles líquidos, gaseosos o sólidos y puede ser transmitido al suelo mediante contacto o por perforaciones. Las Figuras 2.2 y 2.3 muestran la forma en como puede ser transmitido el calor al suelo. La máquina empleada en la figura 2.3 se mueve a una velocidad de 2 a 10 metros por hora produciendo una capa de 20 centímetros de espesor de suelo “horneado”¹⁷.

El tratamiento por medio de perforaciones o por circulación de gas caliente (Figura 2.4) consta de una unidad de calor instalada en un sistema cerrado dentro de cada perforación. En este sistema, el calor es mantenido de 7 a 15 días a temperaturas que varían del mejoramiento requerido o de la humedad natural del suelo.

Con esta técnica se han reportado incrementos en la resistencia de 10 a 20 veces el valor de resistencia original, aún cuando el suelo haya sido saturado previamente a la prueba de resistencia.

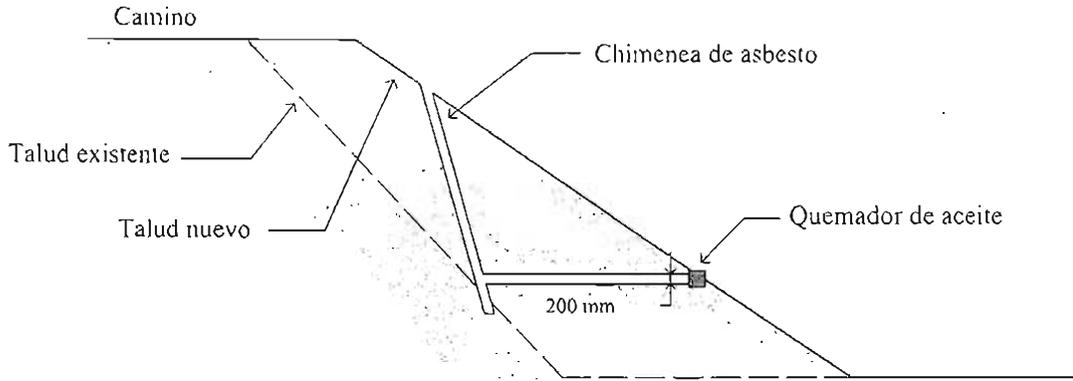


FIGURA 2.2 EMPLEO DEL MEJORAMIENTO TÉRMICO CON CALOR EN LA ESTABILIZACIÓN DE UN TERRAPLEN

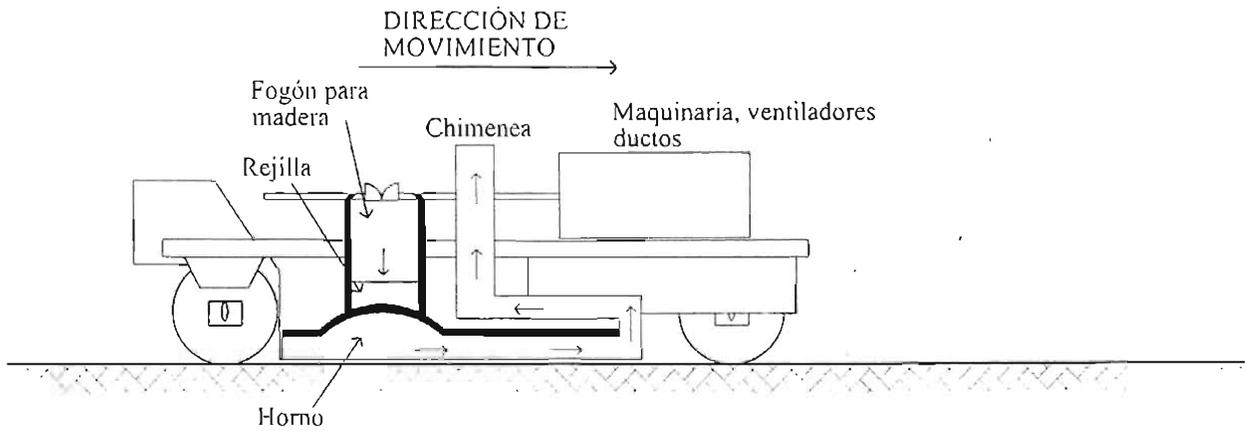


FIGURA 2.3 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA MÁQUINA DE TRATAMIENTO TÉRMICO CON CALOR

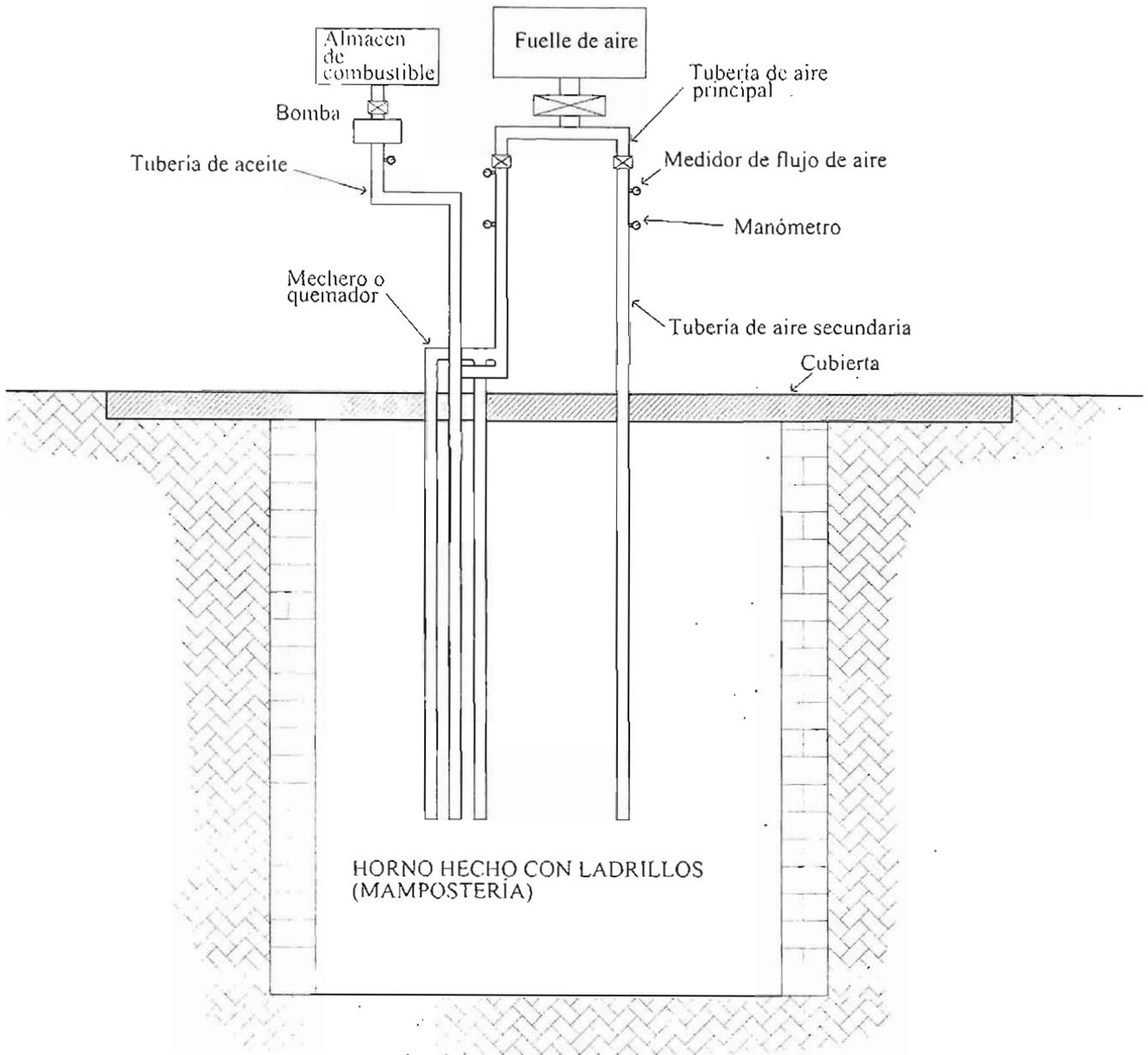


FIGURA 2.4 MEJORAMIENTO TÉRMICO DE SUELOS MEDIANTE SISTEMA DE CALENTAMIENTO DEL TIPO CERRADO COLOCADO EN UNA PERFORACIÓN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



2.3.5 Congelamiento de suelos.

El mejoramiento de suelos a través del congelamiento artificial tiene mucha aplicabilidad para resolver problemas de cimentaciones en terrenos difíciles, con el nivel de aguas freáticas muy superficial, debido a que proporciona una importante ganancia en la resistencia mecánica y un control de las filtraciones en cuestión de horas o días después de iniciado el proceso, sin embargo, y debido a que debe mantenerse un sistema de refrigeración constante (lo que resulta en costos elevados) no es muy empleado en México, pero se puede aplicar en casos donde se requiera una resistencia temporal, como es en el caso de excavaciones o en áreas pequeñas. Otro problema que presenta es el cambio volumétrico en el agua del suelo. Un metro cúbico de agua puede convertirse en 1.09 m^3 al congelarse, con un peso volumétrico de 920 kg/m^3 . De esta manera, la fase líquida en los suelos tiene la capacidad de aumentar su volumen hasta en un 9% durante el congelamiento, o que provocaría una expansión vertical del orden de 25 a 50 milímetros, dependiendo del clima de la zona. Además, después del congelamiento, el deshielo del suelo puede iniciar el fenómeno de consolidación¹⁵.

El conocimiento de las propiedades de suelos congelados y con hielo ha permitido trabajar principalmente en zonas de congelamiento permanente o incluso en zonas árticas, donde en muchas ocasiones las propiedades del terreno congelado naturalmente pueden proporcionar ciertas ventajas. En contraste, en proyectos de carreteras o cimentaciones, se debe lidiar con el problema de un congelamiento por temporada y deshielo. Los problemas que se pueden tener bajo esta circunstancia son: colapso después del deshielo y pérdida de la durabilidad.

La experiencia obtenida al trabajar con suelos congelados de forma natural no es necesariamente transferible a terrenos congelados artificialmente, debido principalmente a tres aspectos: la temperatura mantenida durante el proceso de congelamiento del suelo es extremadamente baja (-20 a -160°C), mientras que la encontrada en suelos congelados de forma natural es rara vez menor a -15°C ; la estructura del hielo y la formación de lentes de hielo y su orientación depende de la dirección del flujo de calor, el nivel de congelamiento, y otros factores; además, en terrenos congelados permanentemente, como los encontrados en zonas árticas, los lentes son paralelos a la superficie del terreno y disminuyen con la profundidad, en suelos congelados artificialmente, los lentes son paralelos a las tuberías mediante las cuales se congela el agua del suelo.

La resistencia del suelo es muy dependiente de la temperatura, especialmente en arcillas con alto contenido de humedad, en las cuales esta puede quedar sin congelar dentro de los poros. Puede decirse que la resistencia mecánica aumenta linealmente conforme disminuye la temperatura en el suelo, de esta manera, la resistencia a -40°C será aproximadamente tres veces mayor que la resistencia a -10°C .



El congelamiento del agua dentro de un suelo puede hacerse mediante dos técnicas o elementos congelantes: con salmueras o con gases.

La circulación de salmueras para congelar un suelo puede observarse en la figura 2.5. El refrigerante, usualmente una solución de cloruro de calcio, es bombeada a través de un sistema cerrado de tuberías, congelando el suelo mientras atraviesa las perforaciones cerradas. Para este refrigerante, la temperatura más común es de -55°C . El tiempo requerido para congelar el suelo depende en gran medida del tipo de suelo y su contenido de agua, la temperatura de la salmuera o solución y del espaciamiento entre los orificios.

El uso de gases para congelar el suelo es menos convencional, pero cuando se realiza el más común es el nitrógeno líquido (Figura 2.6). El nitrógeno líquido teóricamente tiene una temperatura de -196°C y es bombeado a través de tuberías en el subsuelo y después liberado a la atmósfera, o, si el suelo es lo suficientemente poroso, es inyectado en el terreno. Debido a que involucra altas temperaturas, se requieren sistemas de monitoreo y una distribución del refrigerante más sofisticada que cuando se emplean salmueras, sin embargo, gracias a estas bajas temperaturas, el congelamiento se realiza rápidamente, e incluso se puede completar en unas cuantas horas. Esto es una ventaja en emergencias en construcciones, particularmente cuando se encuentran filtraciones, además de que un rápido congelamiento reduce la formación de lentes de hielo, los cuales pueden causar deformaciones indeseables en el terreno.

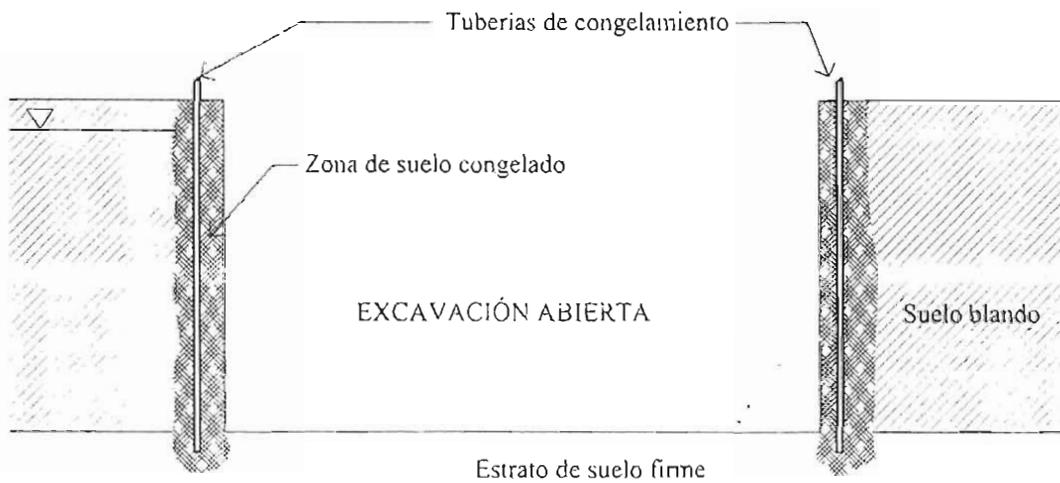
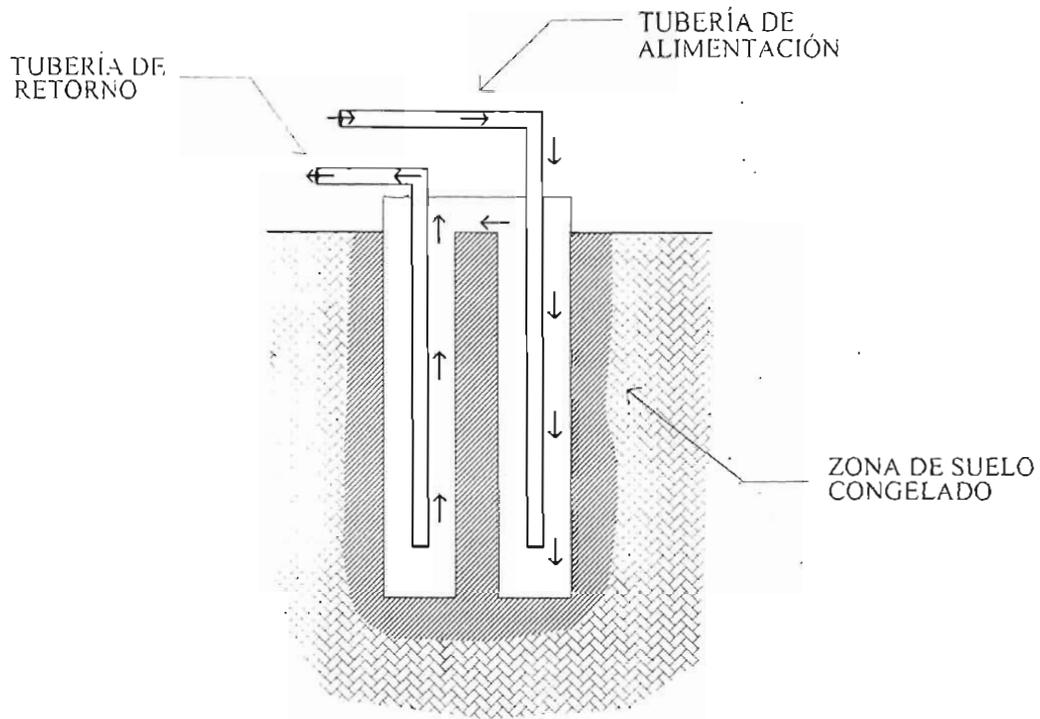


FIGURA 2.5 SISTEMA DE MEJORAMIENTO DE SUELOS MEDIANTE LA CONGELACIÓN Y CIRCULACIÓN DE SALMUERAS Y APLICACIÓN EN LA ESTABILIZACIÓN DE EXCAVACIONES

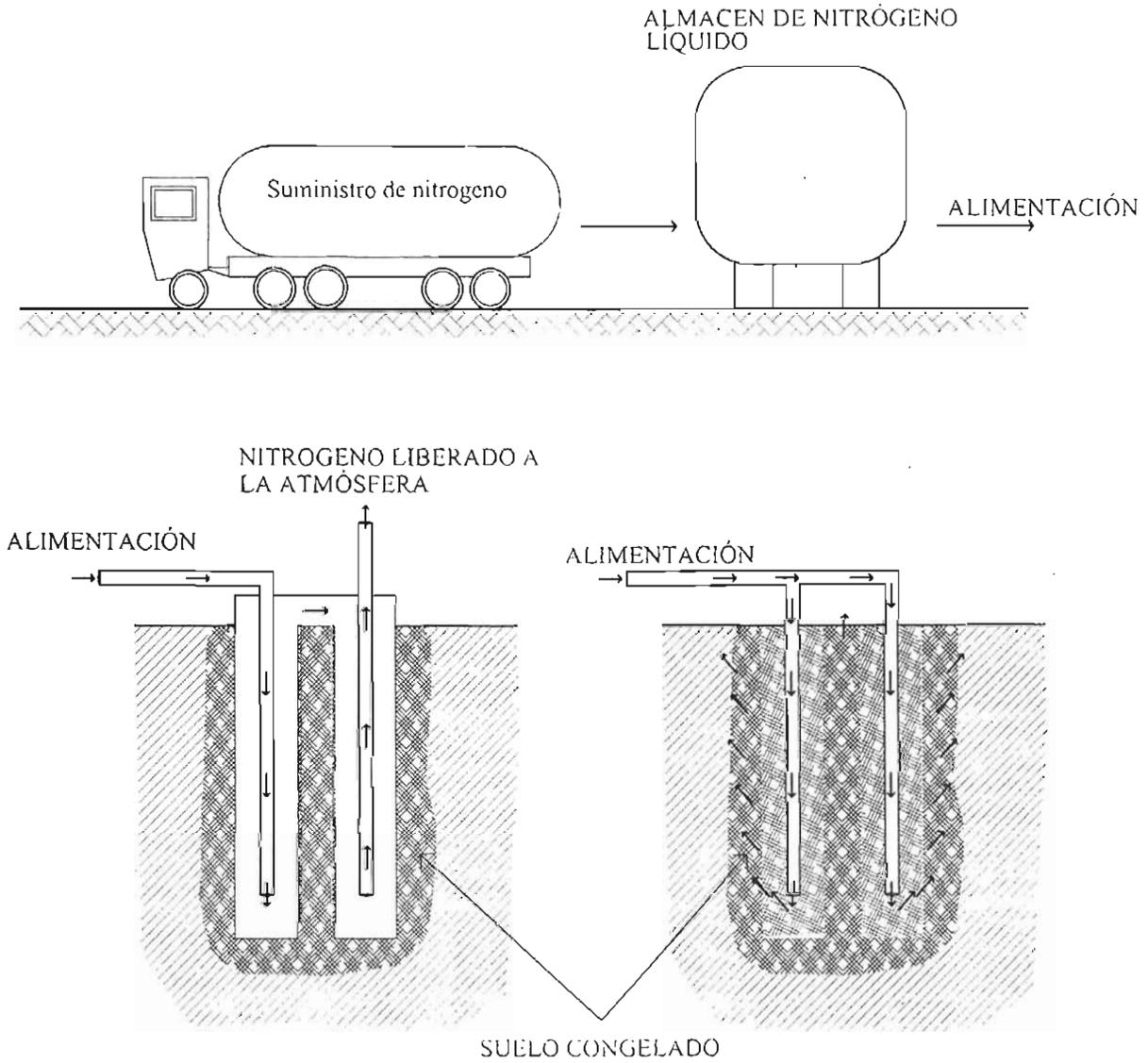


FIGURA 2.6 CONGELAMIENTO DE SUELOS CON NITRÓGENO LÍQUIDO. ALTERNATIVAS DE COLOCACIÓN DEL SISTEMA DE TUBERÍAS



CAPITULO 3

MÉTODOS DE MEJORAMIENTO SUPERFICIAL.

La estabilización es el proceso de combinación y mezclado de materiales con suelos para mejorar algunas de sus propiedades. El proceso puede incluir la combinación de suelos para conseguir una granulometría mejorada o la mezcla de aditivos comerciales que pueden alterar la textura, plasticidad, granulometría o actuar como cementantes del suelo.

Algunos de los productos de manufactura comercial que pueden añadirse al suelo en cantidades apropiadas son el cemento tipo Portland, la cal, el asfalto y la ceniza volátil^{12, 13}.

Las mejoras más comunes que se logran mediante la estabilización incluyen una mejor granulometría, reducción del índice de plasticidad y expansibilidad, incremento de la durabilidad y resistencia. La efectividad de la estabilización, lo que llevaría a cumplir con las anteriores mejoras, depende de la habilidad de obtener una uniformidad en el mezclado de los materiales a emplear.

El diseño de pavimentos está basado en cumplir con las mínimas especificaciones de calidad para capa de material en el sistema estructural del mismo pavimento. Cada capa debe evitar deflexiones excesivas que causarían fallas por fatiga dentro de la capa o en las capas que la cubren y prevenir una deformación permanente excesiva. Como la calidad de la capa es incrementada, la habilidad de cada una de ellas para distribuir la carga sobre un área más grande también mejora, por lo cual una reducción en el espesor requerido para la sección estructural del pavimento es permitida. Sin embargo, para que se pueda hacer esta reducción, el material tratado deberá cumplir con los requisitos de granulometría, resistencia, estabilidad y durabilidad, indicados en los manuales técnicos de diseño de pavimentos.

En lugares húmedos, la estabilización también puede emplearse como medio para construir una plataforma de trabajo para operaciones de construcción. Este tipo de mejoras en la calidad de un suelo también se conocen como modificación de suelos. Los suelos estabilizados también pueden ser empleados como rellenos o incluso como material de desplante de cimentaciones, restituyendo el suelo natural con suelo estabilizado para mejorar las capacidad de carga y reducir asentamientos inmediatos¹².

3.1 Factores a considerar en la selección del aditivo.

En la selección del agente estabilizador, los factores que deben ser considerados son el tipo de suelo que va a ser tratado, la finalidad de la capa tratada, el tipo de mejoramiento



deseado, los valores de resistencia y durabilidad necesarios para la capa estabilizada, el costo y las condiciones climáticas.

3.1.1 Tipos de suelos y aditivos.

Existe más de un estabilizador que se puede aplicar para cada tipo de suelo, sin embargo, hay varios factores que hacen el uso de algún estabilizador más adecuado, como son la granulometría del suelo, la plasticidad y la textura.

El cemento Pórtland, por ejemplo, puede ser empleado en el tratamiento de varios tipos de suelo, sin embargo, puesto que es necesario que el cemento se mezcle íntimamente con las partículas finas (menores a 0.074 mm) se deben evitar grandes cantidades de material plástico. Generalmente, materiales bien graduados que poseen suficiente material fino para producir una matriz de agregado flotando (homogéneo) son apropiados para la estabilización con cemento³.

La cal puede reaccionar con suelos con mediana a alta plasticidad, produciendo decrementos en esta característica, incrementando la trabajabilidad, reduciendo expansiones e incrementando la resistencia²⁰.

La ceniza volátil es un material puzolánico que reacciona con cal y es en consecuencia usado siempre en combinación con este material en suelos que contienen pequeñas cantidades de finos o carecen de ellos. Frecuentemente se le agregan pequeñas cantidades de cemento Pórtland para incrementar la resistencia. Esta combinación de cal – cemento-ceniza – (también conocida como LCF) se utiliza exitosamente en el tratamiento de materiales que van a emplearse como base para pavimentos.

Los materiales asfálticos y bituminosos se emplean como impermeabilizantes y para incrementar la resistencia del suelo. Básicamente, los suelos idóneos para emplear asfalto en la estabilización son las arenas y materiales granulares puesto que es necesario recubrir todas las partículas del suelo.

3.2 Selección de los aditivos.

La selección de las opciones se puede hacer mediante la tabla 3.1, que muestra las restricciones más importantes, como son la granulometría y la plasticidad.



TABLA 3.1 GUÍA PARA LA SELECCIÓN DE ADITIVOS ESTABILIZADORES.

Tipo de suelo	Tipo de aditivo estabilizador recomendado	Restricción en el Índice de Plasticidad y en el Límite Líquido	Restricción en el porcentaje de material que pasa la malla no.200	Observaciones
SW o SP	Asfalto Cemento Pórtland LCF	IP menor a 25		
SW - SM o SP - SM o SW - SC o SP - SC	Asfalto Cemento Portland Cal LCF	IP menor a 10 IP menor a 30 IP menor a 12 IP menor a 25		
SM o SC o SM - SC	Asfalto Cemento Pórtland Cal LCF	IP menor a 10 IP mayor de 12 Menor a 25	Menor al 30% del peso	
GW o GP	Asfalto Cemento Pórtland LCF	 IP menor a 25		Solo material bien graduado. Debe pasar por lo menos el 45% del material la malla 4.
GW - GM o GP - GM o GW - GC o GP - GC	Asfalto. Cemento Pórtland Cal LCF	IP menor a 10 IP menor a 30 IP mayor a 12 IP menor a 25		Solo material bien graduado. Debe pasar por lo menos el 45% del material la malla 4.
GM o GC GM - GC	Asfalto Cemento Pórtland Cal LCF	IP menor a 10 Mayor a 12 Menor a 25	Menor al 30% del peso	Solo material bien graduado. Debe pasar por lo menos el 45% del material la malla 4.
CH o CL o MH o ML o OH o OL o ML - CL	Cemento Pórtland Cal	LL mayor a 40 e IP mayor a 20 IP mayor de 12		Suelos orgánicos y suelos altamente ácidos que estén dentro de esta área no son susceptibles de estabilización por medios ordinarios



La tabla 3.2, muestra los métodos de estabilización más adecuados, dependiendo de la aplicación del material a tratar.

TABLA 3.2 MÉTODOS MÁS RECOMENDADOS SEGÚN EL OBJETIVO QUE PERSEGUIRÁ LA ESTABILIZACIÓN Y EL USO QUE SE DARÁ A LA CAPA DE SUELO.

Finalidad de la capa tratada	Tipo de suelo	Método
1. Estabilización superficial. a. Mejorar la capacidad de carga y las características de distribución de esfuerzos.	Granular fino	SA, SC, MB, C
	Granular grueso	SA, SC, MB, C
	Arcillas de bajo IP	C, SC, CMB, LMS, SL
	Arcillas de alto IP	SL, LMS
b. Reducir la susceptibilidad a las heladas	Granular fino.	CMS, SA, SC, LF
	Arcillas de bajo IP	CMS, SA, SL, LMS
c. Impermeabilizado.	Arcillas de bajo IP	CMS, SA, LMS, SL
d. Control de la expansividad	Arcillas de bajo IP	CMS, SC, C, LMS, SL
	Arcillas de alto IP	SL
e. Reducir elasticidad	Arcillas de alto IP	SL, LMS
	Limos o arcillas plásticas	SC, CMS
2. Materiales para base a. Mejorar los materiales estándar.	Granular fino	SC, SA, LF, MB
	Arcillas de bajo IP	SC, SL
b. Mejorar la capacidad de carga y las características de distribución de esfuerzos.	Granular grueso	SA, SC, MB, LF
	Granular fino	SC, SA, LF, MB
c. Reducción de expansiones	Granular fino	SC, SA, LF, MB
3. Atenuante de polvo.	Granular fino	CMS, SA, otros
	Suelos plásticos	CMS, SL, LMS, APSB

Métodos:

<i>Abreviatura</i>	<i>Método</i>
APSB	Asfalto (superficial)
C	Compactación
CMS	Suelo modificado con cemento
LF	Cal - ceniza volátil
LMS	Suelo modificado con cal
MB	Mezclas de suelos
SA	Suelo - asfalto
SC	Suelo - cemento
SL	Suelo - cal

Hasta este punto, se deben tomar en cuenta otros factores para la selección final del aditivo, como disponibilidad del material, costos, etc.



Una vez que el aditivo ha sido seleccionado, es recomendable preparar y probar muestras en el laboratorio, con el fin de desarrollar una mezcla de diseño que cumpla con los criterios mínimos de ingeniería para la estabilización de suelos.

3.3 Estabilización con cemento

La estabilización de suelos con cemento es una de las técnicas más usadas actualmente. El método, también conocido como suelo – cemento, es popular mundialmente y su utilización más común se da en el proyecto y construcción de vías terrestres⁶.

La norma ACI 116R define al suelo – cemento como “una mezcla de suelo y cantidades medidas de cemento Pórtland y agua, compactada a una densidad elevada”. De una manera más amplia, el ACI 230.1R – 90 define al suelo – cemento como “un material producido por mezcla, compactación y curado de una mezcla de suelo/agregado, cemento Pórtland, posiblemente aditivos incluyendo puzolanas; y agua, para formar un material endurecido con propiedades ingenieriles específicas”.

Este método de estabilización se basa en las reacciones químicas que ocurren entre el suelo y el cemento cuando ambos se mezclan con una apropiada cantidad de agua. En los suelos medianamente gruesos, estas reacciones consisten básicamente en la conglomeración de las gravas, arenas, arcillas y limos debido a la reacción del cemento con los componentes silicosos de ellos. En suelos más finos, el hidrato de calcio que se forma como consecuencia del contacto del cemento con el agua, libera iones de calcio, que toman el agua que existe entre las partículas de arcilla, lo que da como resultado una disminución de la porosidad y las características plásticas de la fracción fina del suelo, así como un aumento en la resistencia y la durabilidad.

3.3.1 Elementos que forman la mezcla suelo – cemento.

3.3.1.1 Cemento.

El cemento tipo Pórtland puede ser usado para modificar y mejorar la calidad del suelo o para transformar a este en una masa cementada, la cual incrementaría su resistencia y durabilidad significativamente⁶.

Prácticamente todos los tipos de cemento son útiles para la estabilización de suelos y normalmente se emplean los de fraguado y resistencia normales. En algunos casos, se pudiera preferir la utilización de cementos finos, debido principalmente a que las partículas de cemento tienen tamaños comprendidos entre 0.5 y 100 micras, con un promedio alrededor de 20 micras y la hidratación de las partículas más grandes podría tardar mucho o incluso no llegar a producirse nunca. El empleo de este tipo de cemento, incrementaría la



resistencia de la mezcla suelo – cemento, pero desde el punto de vista económico podría no ser factible.

El cemento puede ser usado como estabilizador en un rango muy amplio de suelos: sin embargo, es recomendable que el suelo tenga un índice de plasticidad menor a 30, y para suelos de grano grueso el porcentaje que pase la malla no. 4 debe ser mayor al 45%.

El cemento es el elemento más costoso en el método y fijar su proporción determina la factibilidad técnica de la estabilización, a parte de que las propiedades que se logren para la mezcla dependen también esencialmente de la cantidad de cemento que se emplee.

Es recomendable que se emplee el mismo tipo de cemento durante el progreso del trabajo, sin embargo, si es necesario, se pueden usar diferentes clases de cemento en diferentes etapas del proyecto.

3.3.1.2 Suelo

Prácticamente todas las combinaciones de suelos pueden ser endurecidas con cemento, y cualquiera que no tenga cantidades excesivas de materia orgánica puede ser tratado para mejorar su comportamiento mecánico.

Basándose en su granulometría, los suelos pueden dividirse en tres grupos:

1. Arenas y gravas con 10 a 35% de arcilla y limos combinados. Son los suelos que tienen las características más favorables y generalmente requieren la menor cantidad de cemento para un adecuado endurecimiento. Casi todos los materiales granulares trabajan bien si contienen 55% o más pasando la malla 4 y 37% pasando la malla 10. También, entran en este grupo materiales excepcionalmente bien graduados que puedan contener arriba de 65% de material retenido en la malla no. 4 y suficiente material fino para un adecuado aglutinamiento.
2. Suelos arenosos deficientes de finos, como algunas arenas de playa, arenas glaciales y dunas hacen buenas mezclas suelo – cemento aunque la cantidad de cemento requerida para un endurecimiento adecuado es usualmente mayor que la empleada con un suelo del tipo 1. La pobre granulometría y la ausencia de finos en este tipo de suelos, afecta a la construcción, ya que hace más difícil la compactación debido a la poca tracción del terreno para el equipo de construcción.
3. Los suelos arcillosos y suelos limosos hacen mezclas satisfactorias de suelo – cemento, pero aquellos que contengan altos porcentajes de arcilla son duros de pulverizar. Generalmente, entre más arcilloso sea un suelo, la cantidad de cemento requerida para una buena estabilización será mayor.

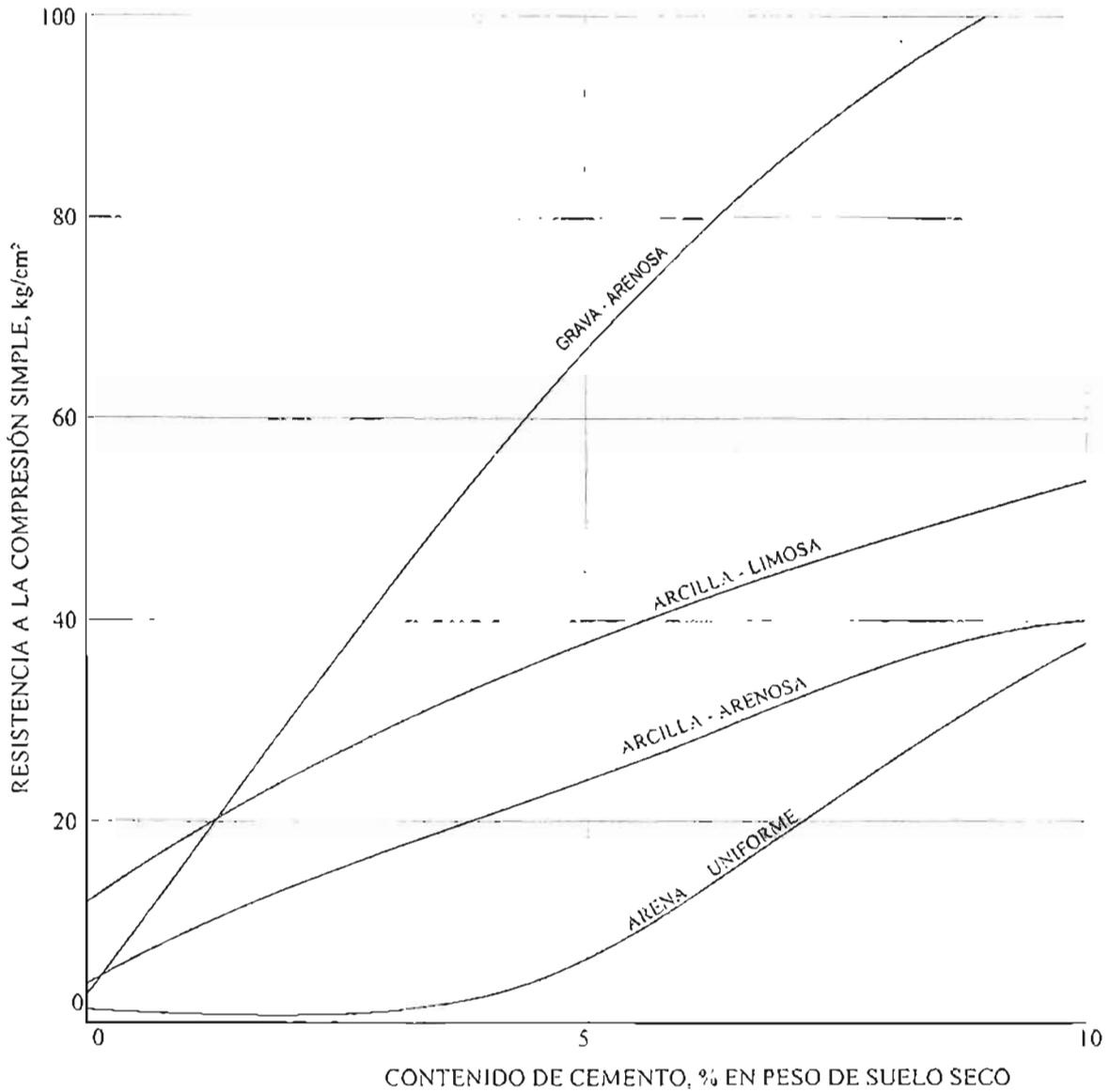


FIGURA 3.1 VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DE ESPECIMENES ESTABILIZADOS CON CEMENTO EN DIVERSOS SUELOS TÍPICOS



No obstante lo anterior, no es necesaria una buena granulometría, puesto que la estabilidad es alcanzada mediante la hidratación del cemento y el posterior aglutinamiento de las partículas del suelo y no por la cohesión y fricción interna del material. La única limitación estriba en lo difícil que pueda realizarse un adecuado mezclado del cemento con el suelo, lo cual puede ser muy complicado en arcillas suaves y húmedas.

La gráfica de la Figura 3.1, muestra la variación de la resistencia a la compresión simple, de especímenes estabilizados con cemento en diversos suelos típicos con respecto al contenido de cemento.

3.3.1.3 Agua.

El agua tiene dos propósitos: ayudar a obtener la máxima compactación (densidad) debido a la lubricación de los granos de suelo y es necesaria para hidratar el cemento que endurecerá y aglutinará al suelo en una masa sólida. Una correcta mezcla debe contener la suficiente agua para cumplir ambos propósitos satisfactoriamente.

El agua debe estar relativamente limpia y libre de cantidades dañinas de álcalis, ácidos o materia orgánica.

3.3.2 Diseño de la mezcla suelo – cemento.

3.3.2.1 Tipos de mezclas suelo – cemento.

En general, existen tres tipos de mezclas suelo – cemento, que son:

- Suelo – cemento modificado. Es una mezcla no endurecida o semi endurecida. Cuando cantidades pequeñas de cemento Pórtland son añadidas a suelos limo – arcillosos, las propiedades físicas y químicas del suelo son cambiadas. El cemento reduce la plasticidad y absorción de agua e incrementa su resistencia mecánica. El grado de mejoramiento con estas mezclas depende de la cantidad de cemento y tipo de suelo. Con este tipo de mezclas solo se emplea el suficiente cemento para cambiar las propiedades físicas del suelo para el grado deseado. Se usa principalmente en bases, sub – bases y en sub – rasantes.
- Suelo – cemento fluido o autocompactado. Son mezclas que se comportan como concreto fluido y posteriormente como suelo, por lo que sus propiedades están comprendidas entre ambos límites, dependiendo de la edad a la que se evalúan. Se caracterizan por su fluidez, la cual les permite auto compactarse y rellenar los vacíos inaccesibles a las herramientas y equipos de obra.



- Suelo cemento compactado. También se le conoce como suelo – cemento simplemente. Es una mezcla de suelo pulverizado, cantidades calculadas de cemento tipo Pórtland y agua que se compacta hasta lograr una alta densidad. El resultado es una losa rígida teniendo una resistencia a la compresión mejorada y resistencia a los efectos de desintegración por humedad y secado. Es la mezcla más utilizada de todas.

3.3.2.2 Proporcionamiento de la mezcla

La cantidad de cemento requerido depende que tanto el suelo va a ser va a ser modificado o estabilizado.

La cantidad de cemento requerido para mejorar la calidad del suelo mediante modificación es determinada mediante aproximaciones de prueba y error. Si el propósito de la modificación es reducir el índice de plasticidad del suelo, se deben preparar muestras sucesivas de mezclas suelo – cemento a diferentes niveles de tratamiento y obtener su índice. Se selecciona entonces la mezcla con el menor contenido de cemento que produzca el índice de plasticidad menor^{15, 13}.

Si el objetivo de la modificación es mejorar la granulometría del suelo a partir de la adición de finos, el análisis deberá llevarse en muestras con varios niveles de tratamiento para determinar el contenido mínimo aceptable de cemento.

El contenido de cemento determinado en ambos casos debe verificarse para ver si proporciona una resistencia a la compresión sin confinar lo suficientemente buena de acuerdo al criterio establecido para modificación de suelos¹³.

Si el suelo va a ser estabilizado, puede seguirse el siguiente procedimiento para determinar la cantidad de cemento requerido.

1. Determinar la clasificación y granulometría del suelo sin tratar. El suelo debe cumplir con los requisitos de granulometría mostrados en la tabla 3.3 antes de ser usado en el diseño del espesor de la capa a tratar.

TABLA 3.3 REQUERIMIENTOS DE GRANULOMETRÍA

Malla	Porcentaje que pasa (deseado)
1"	100
3/4"	70 – 100
3/8"	50 – 80
No. 4	35 – 65
No. 10	20 – 50
No. 40	15 – 30



No. 200	5 - 15
---------	--------

2. Seleccionar un contenido de cemento de la tabla 3.4, dependiendo de la clasificación del suelo.

TABLA 3.4 RANGO BÁSICO DE REQUERIMIENTOS DE CEMENTO

Clasificación de suelos	Cantidad de cemento inicial en porcentaje del peso de suelo seco
GW, GP, SW, SP, GM, SM	3 - 5
SP, GM, SM, GP	5 - 8
SM, SC, algunos GM, GC	5 - 9
SP	7 - 11
CL, ML	7 - 12
ML, MH, OH	8 - 13
CL, CH	9 - 15
OH, MH, CH	10 - 16

3. Usando el contenido de cemento estimado, determinar la curva de compactación de las mezclas suelo - cemento.
4. Se deben preparar muestras de las mezclas suelo - cemento para la prueba de compresión simple y para la prueba de durabilidad. Los especímenes deben ser curados en un cuarto húmedo por siete días antes de probarse.
5. Comparar los resultados de las pruebas de compresión simple con los requerimientos mostrados en la tabla 3.5. La cantidad de cemento más baja que cumpla con los requerimientos de resistencia a la compresión simple y demuestre la durabilidad requerida será considerada como la cantidad de diseño.

Si la mezcla reúne los requisitos de durabilidad, pero no los requerimientos de resistencia, se considera a la mezcla como un suelo modificado.

TABLA 3.5 REQUERIMIENTOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARA SUELOS ESTABILIZADOS CON CEMENTO Y CAL.

Resistencia a la compresión mínima sin confinar (psi)			
Capa de suelo estabilizado	Pavimentos flexibles		Pavimentos rígidos
	Fuerza aérea, Ejército	Marina	
Base	750	750	500
Sub - base	250	300 (cemento) 150 (cal)	200

Es preferible que el contenido de cemento seleccionado no le de a la capa de suelo – cemento una resistencia elevada ya que será muy susceptible al agrietamiento. Como consecuencia de este fenómeno se ha ido imponiendo la idea de considerar a una capa de suelo tratado con cemento como algo que debe ser flexible, constituido por fragmentos de suelo – cemento entrelazados y trabados unos con otros. Para lograr este fin, suelen proponerse en la actualidad resistencias a la compresión simple que no pasen de 55 kg/cm^2 ; resistencias más altas producen en la capa un comportamiento rígido.

3.3.3 Procedimiento constructivo.

El procedimiento constructivo de una capa de suelo – cemento consta de las siguientes etapas:

- Escarificación, pulverización y pre – humedecimiento del suelo (si es necesario).
- Dosificación y dispersión del cemento.
- Mezclado de los materiales. Aplicación del agua.
- Compactación y acabado.
- Curado.

3.3.3.1 Escarificación, pulverización y pre – humedecimiento del suelo.

La escarificación se realiza con más frecuencia en suelos plásticos, debido a que los suelos gruesos de naturaleza friccionante no suelen requerirla. Es usual no aceptar grumos mayores de tres centímetros en el momento de la mezcla con el cemento y se especifica que el 80% de los grumos de la misma deben pasar la malla no. 4.

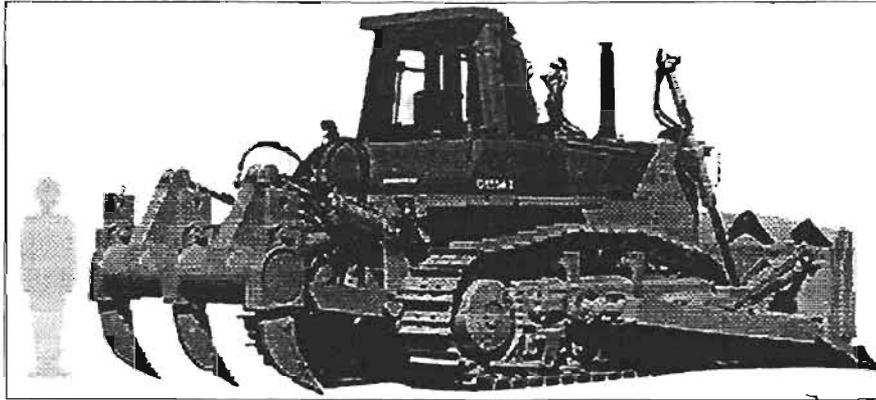
El prehumedecimiento puede ayudar en las operaciones de escarificación y pulverización, reduciendo muchas veces los tiempos de maniobra.

La maquinaria que se va a emplear en la construcción, debe ser aquella que cuyo diseño permita visiblemente cortar a la profundidad requerida. (Figura 3.2a)

3.3.3.2 Dosificación y dispersión del cemento.

La dosificación y dispersión del cemento para la mezcla puede hacerse por medios mecánicos mediante el uso de tractores o camiones dispersadores; o bien directamente con sacos, vaciando el cemento en el lugar de trabajo, procurando lograr un tendido uniforme y rastreando posteriormente (figura 3.2b)

El cemento solo debe esparcirse en el lugar donde la operación de mezclado será terminada en el mismo día.



a)



b)



c)

FIGURA 3.2 EQUIPO EMPLEADO EN EL MEJORAMIENTO SUPERFICIAL DE SUELOS
a) ESCARIFICADORA, b) DOSIFICADORA DE CEMENTO, c) COMPACTADOR DE RODILLOS



3.3.3.3 Mezclado de los materiales.

El proceso de mezclado es una de las partes más importantes, y el mejor sistema para lograr un buen mezclado del cemento con el suelo y el agua es mediante el uso de una planta dosificadora. Cuando se usa una planta, es común que el agua se añada en un 2% adicional al contenido óptimo para compensar pérdidas de manejo¹⁵.

Naturalmente, existen máquinas mezcladoras para este caso, las cuales recogen el suelo cubierto de cemento de camellones, y lo van removiendo sucesivas veces, a la vez que se incorpora el agua, generalmente proporcionada con camiones tanque. En este caso, es común que la mezcla se realice en tres pasadas de la mezcladora, con incorporación de agua en la segunda.

Las máquinas mezcladoras múltiples facilitan el mezclado y lo hacen más preciso. Estas levantan el material, lo pulverizan y lo mezclan con unos primeros rotores, se añade el agua en el paso por un segundo grupo de ellos y los últimos rotores remueven todos los ingredientes y tienden el material para su compactación inicial.

Después del último incremento de agua, el proceso de mezclado debe continuar hasta obtener una mezcla de suelo – cemento – agua homogénea y uniforme, teniendo particular cuidado en tener una distribución satisfactoria de la humedad en toda la zona a tratar (orillas y en todo el espesor de la capa tratada).

Un tiempo excesivo de mezclado puede favorecer la segregación de partículas de suelo, lo que va en contra de la homogeneidad de la mezcla; además, como esta teniendo lugar la hidratación del cemento, una maniobra de mezclado excesivamente larga puede estar rompiendo los nexos recién creados entre el cemento y las partículas de suelo.

3.3.3.4 Compactación.

La compactación de la mezcla deberá iniciarse inmediatamente terminado el proceso de mezclado (no más de una hora entre mezclado y compactación) de lo contrario, el cemento puede hidratarse antes de que la compactación esté completa.

El equipo usado para la compactación de mezclas suelo – cemento es la misma que se usaría si en el cemento no estuviera presente en el suelo y por lo tanto dependerá del tipo de suelo (Figura 3.2c).

Se pueden usar muchos métodos para determinar la densidad de compactación: cono de arena, aceite o métodos nucleares.

Es también importante determinar la profundidad de compactación y prestar especial atención a que se esté realizando una buena compactación en las orillas.



3.3.3.5 Curado.

Una capa de suelo – cemento requiere que su contenido de agua no se pierda durante cierto tiempo para que el cemento se hidrate adecuadamente. Por este motivo, la mezcla debe estar protegida de secado y pérdida de agua por aproximadamente 14 días.

La superficie debe ser mantenida en una condición húmeda mediante riegos ligeros y continuos de agua o bien cubrirla con algún material que impida la pérdida de humedad. Para este caso, es frecuente utilizar membranas de material bituminoso sobre grandes áreas para asegurar un curado adecuado.

3.4 Estabilización con cal.

La estabilización de suelos con cal es considerada como una de las formas más antiguas de mejoramiento de suelos por la adición de un agente químico. Las técnicas de estabilización son similares a las de la estabilización con cemento, pero existen tres diferencias importantes que conviene destacar^{20, 17}.

En primer lugar, la cal tiene un rango de aplicación que se inclina mucho más hacia el lado de los suelos más arcillosos que el cemento, y, obviamente, se extiende mucho menos hacia el lado de los materiales granulares de naturaleza friccionante. Sin embargo, suelos clasificados de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos como (CH), (CL), (MH), (ML), (SC), (SM), (GC), (GM), (SW – SC), (SP – SC), (SM – SC), (GW – GC), (GP – GC) y (GM – GC) pueden ser considerados como potencialmente aptos para ser estabilizados con cal.

Como segunda diferencia, se tiene que el uso de la cal se está volviendo más común en pre – tratamientos, pues en estos casos no es necesario que se cumplan con todos los requisitos de una estabilización definitiva.

Otra diferencia entre cal y cemento se tiene en el comportamiento de la resistencia en suelos tratados con cemento y en mezclas suelo – cal. Los suelos tratados con cal, presentan un comportamiento en su resistencia a la compresión simple como la mostrada en la gráfica de la Figura 3.3. En la gráfica se puede observar como la resistencia de distintos tipos de suelos aumenta en términos generales hasta contenidos de cal del orden de 8% en peso, más allá de ese límite es frecuente que la resistencia no presente aumentos notorios, e incluso, en algunos casos, disminuya. En el caso de mezclas suelo – cemento, la resistencia sigue aumentando para contenidos muy altos del estabilizante (arriba del 20%¹⁷).

En la gráfica de la figura 3.3 se pueden observar las mejoras en la resistencia con el tiempo, lo que le da a este tipo de mezclas largos periodos de durabilidad.



La resistencia para este tipo de mezclas aumenta lentamente, requiriendo cerca de 14 días en clima cálido y hasta 28 días en clima frío para conseguir una resistencia significativa. La figura 3.4 muestra los valores típicos de resistencia de suelos estabilizados con cal sometidos a prueba a diferentes días de su preparación. Además, otro beneficio importante que se obtiene al emplear la cal en arcillas es la reducción en la expansión provocada por cambios en la humedad.

La forma más usual de cal empleada en trabajos de estabilizaciones es la hidratada. La cal viva se usa con frecuencia en pre tratamientos de suelos húmedos.

El efecto básico de la cal es la construcción de silicatos de calcio que se forman por la acción química de la cal sobre los minerales de arcilla, para formar compuestos cementadores. Cuando la superficie mineral de la arcilla es alterada se producen los siguientes beneficios:

- Reducción de la plasticidad.
- Reducción de la capacidad de acumular agua.
- Reducción de la expansibilidad.
- Mejora en la estabilidad e incrementa resistencia.
- Trabajabilidad.

3.4.1 Diseño de la mezcla.

El criterio más usual en la tecnología de pavimentos es dar a una capa de suelo – cal el mismo espesor que habría de darle a la misma capa, si solo estuviera formada por la matriz de suelo.

La tabla 3.6, presenta los contenidos de cal usuales para diferentes tipos de suelos. Esta información debe manejarse como norma de criterio, sin excluir del diseño de la mezcla las determinaciones de laboratorio correspondientes.

TABLA 3.6 CONTENIDOS DE CAL USUALES PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Tipo de suelo	Pre tratamientos	Estabilizaciones definitivas
	%	%
Roca triturada	2 – 4	No recomendada
Gravas arcillosas bien graduadas	1 – 3	3
Arenas	No recomendada	No recomendada
Arcilla arenosa	No recomendada	5
Arcilla limosa	1 – 3	2 – 4
Arcilla plástica	1 – 3	3 – 8
Arcilla muy plástica	1 – 3	3 – 8
Suelos orgánicos	No recomendada	No recomendada

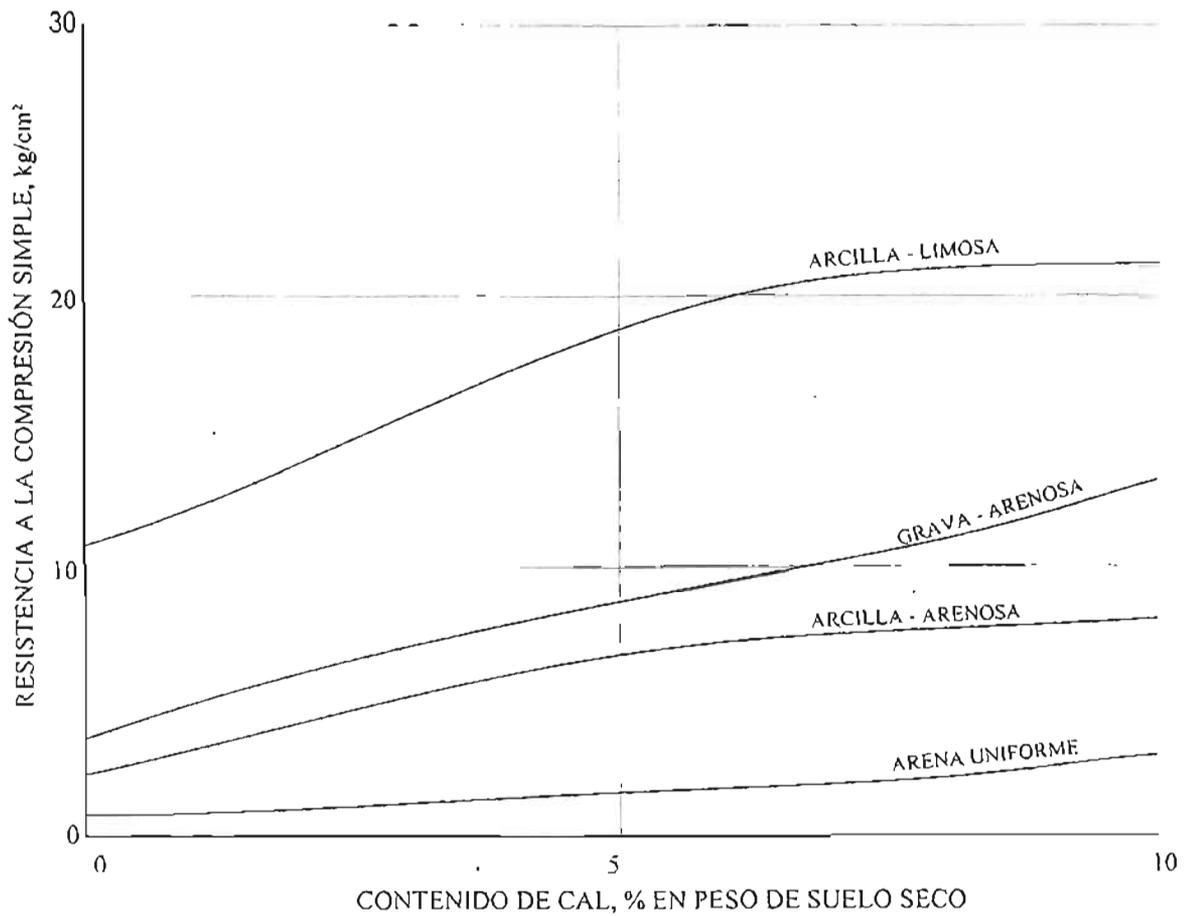


FIGURA 3.3 VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DE ESPECIMENES ESTABILIZADOS CON CAL EN DIVERSOS SUELOS TÍPICOS, CON DIFERENTES NIVELES DE TRATAMIENTO

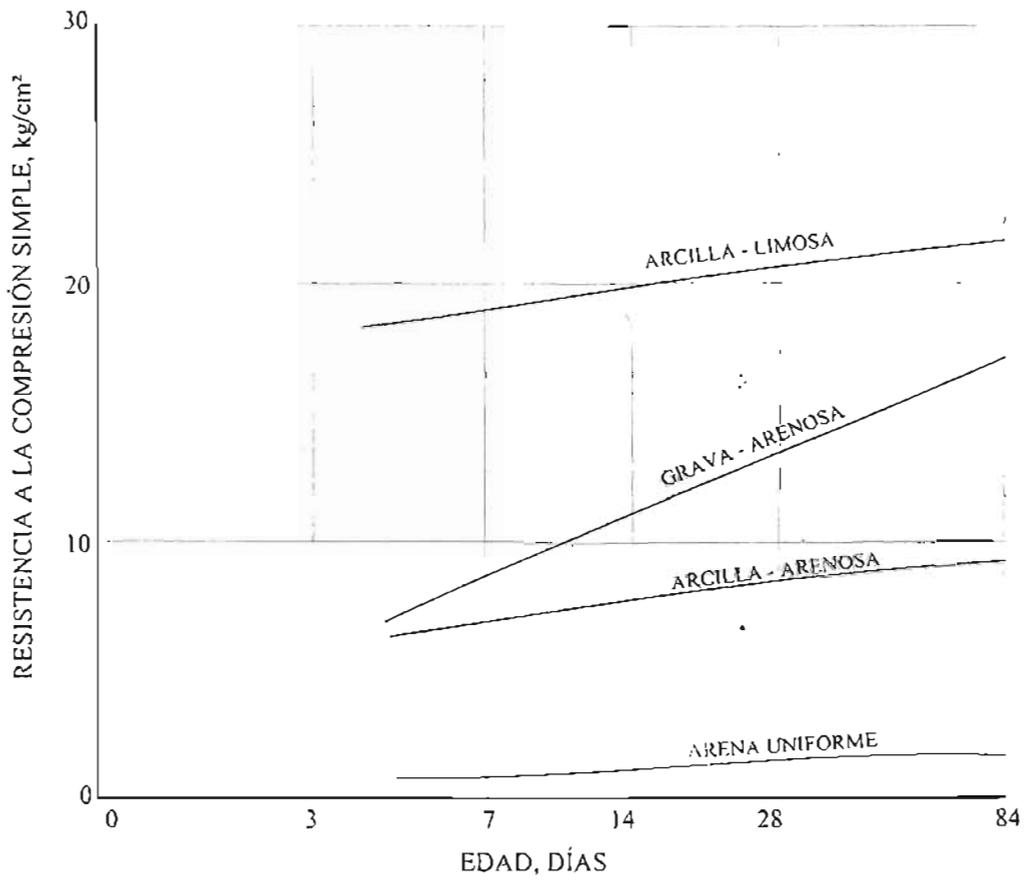


FIGURA 3.4 EFECTOS DE LA EDAD DE UNA MEZCLA DE 5% DE CAL, EN PESO, EN DIFERENTES TIPOS DE SUELOS



Como ya se mencionó anteriormente, cuando la cal es añadida al suelo empiezan a tomar lugar una combinación de reacciones. Estas reacciones están casi completas entre una hora y hora y media y resultan en cambios en la composición química y las propiedades físicas del suelo.

La cal tiene un pH promedio de 12.4 cuando es colocada en agua. Por consiguiente, el pH es un buen indicador del contenido deseable de cal para mezclarlo con el suelo.

La determinación del contenido de cal mediante pruebas de laboratorio toma en cuenta lo anterior y se realiza de la siguiente manera.

El método consiste en preparar varias mezclas a diferentes niveles de tratamiento y determinar el pH de cada mezcla después de una hora. La mezcla que tenga el contenido de cal más bajo, y que haya presentado el menor pH será considerado como el contenido de diseño inicial.

Después de haber estimado el contenido inicial, se debe realizar una prueba de compactación. La prueba debe seguir los mismos procedimientos de preparación que para una muestra de suelo – cemento, excepto el periodo de curado, el cual debe ser mayor de hora y media y menor de dos horas en un contenedor sellado.

La compactación debe completarse en cinco capas, mediante 55 golpes de un martillo de 10 libras, dejado caer desde una altura de 18 pulgadas.

Las pruebas de compresión simple deben realizarse con tres especímenes de los niveles de tratamiento de diseño escogidos. Después de las pruebas se selecciona el mínimo contenido de cal que obtenga la resistencia requerida.

3.4.2 Proceso constructivo.

Los pasos constructivos para la estabilización de capas de suelo con cal son las siguientes:

- Preparación.
- Regado de la cal.
- Mezcla preliminar.
- Mezcla final y pulverización.
- Compactación.
- Curado final.



3.4.2.1 Preparación.

En este paso, la superficie debe ser escarificada hasta la profundidad que marca el proyecto de estabilización. Se pulveriza parcialmente el suelo mediante el uso de maquinaria o a mano.

3.4.2.2 Regado o dispersión de la cal.

En este primer regado, se emplea solamente la mitad de la cal que se va a usar para el tratamiento.

La cal se puede esparcir colocando los bultos en el lugar a tratar, vaciándolos y nivelando el contenido barriéndolo o con rastrillos. También pueden emplearse camiones con aspersores.

Es también común el regado mediante lechada de cal (1 tonelada de cal para 500 galones de agua). La lechada puede ser mezclada en una planta central o en un camión tanque dos horas antes de regarla y distribuida con o sin presión. La distribución de la lechada debe realizarse con una o más pasadas sobre un área determinada hasta el porcentaje específico (basado en contenido de sólidos de cal) sea obtenido¹⁷.

3.4.2.3 Mezclado preliminar.

Durante el periodo comprendido entre la aplicación de la cal hasta que el curado final sea completado, el contenido de humedad debe ser mantenido arriba del contenido óptimo especificado pero no más del 3%. Debido a que el agua es necesaria para ayudar a que ocurran las reacciones químicas, la aplicación continua de esta durante el mezclado es necesaria aún incluso cuando el material esté a la humedad óptima cuando el mezclado inicie.

La mezcla del suelo, el agua y la porción de cal se puede hacer con mezcladores rotatorios. Después del mezclado, se le da a la capa tratada la sección aproximada. Se compacta la mezcla ligeramente para minimizar pérdidas por evaporación, carbonatación de la cal o humedad excesiva debido a lluvias fuertes.

La mezcla debe ser curada hasta por 48 horas para permitir a la cal y al agua romper los floculos de arcilla. Para arcillas extremadamente plásticas, el periodo de curado puede extenderse hasta por 7 días.

3.4.2.4 Mezclado final.

En esta etapa, se debe agregar a la capa tratada el resto de la cal por cualquiera de los métodos antes mencionados. El mezclado debe continuar hasta que todos los floculos se



rompan y pasen por una malla de una pulgada y hasta que al menos el 60% del material pueda pasar la malla no 4.

Se puede añadir agua durante este proceso, si es necesario.

3.4.2.5 Compactación.

La compactación debe comenzar inmediatamente después de terminada la mezcla final y se puede hacer con los métodos y maquinaria tradicionales, considerando a la mezcla de suelo – cal como si se tratara de una capa de suelo sin tratar.

3.4.2.6 Curado y protección de la superficie tratada.

Después de que la capa ha sido terminada, debe protegerse contra el secado por 7 días. La superficie tiene que mantenerse en una condición húmeda mediante riegos continuos, la colocación de materiales húmedos, como paja o tela o mediante la aplicación de materiales bituminosos, que prevendrán la pérdida de agua.

La cal también puede ser usada como un aditivo preliminar para reducir el Índice de Plasticidad o alterar la granulometría de un suelo antes de añadir en agente estabilizador principal (como cemento o asfalto).

Para suelos no plásticos y materiales con bajo Índice de plasticidad en los cuales la cal sola generalmente no es satisfactoria para la estabilización, se puede añadir ceniza volátil u otro agente para producir la reacción necesaria.

3.5 Estabilización de suelos por modificación de la granulometría.

La estabilidad y resistencia de un suelo depende de la distribución de los diferentes tamaños de partículas, su forma, el peso volumétrico, la fricción interna y la cohesión, siendo la distribución granulométrica uno de los factores de mayor influencia.

Cuando un suelo tiene suficiente material fino para llenar los huecos que dejan las partículas más grandes, obtendrá su resistencia del contacto directo entre el material grueso, pero la presencia de los finos hará que tenga una mejor distribución de esfuerzos; es decir, entre más alta sea la densidad del suelo, mayor será la resistencia y estabilidad.

En la Figura 3.5, se muestran tres tipos de suelos: sin material fino, donde el contacto se hace grano a grano; con finos suficientes para tener una alta densidad, que presenta un mayor peso específico; y un suelo con gran cantidad de finos, en el que no existe contacto entre las partículas más grandes debido a que se encuentran dentro de una matriz de suelos



finos. Las propiedades de resistencia, hidráulicas y de compactación son diferentes en los tres casos, siendo el segundo caso el que tiene las mejores propiedades y características.

El objetivo del método de estabilización de suelos con el mezclado de diferentes granulometrías es obtener una resistencia mecánica deseada mediante la mezcla y posterior compactación de suelos disponibles. Esto es, en pocas palabras, añadir a un suelo la porción de material cuyo contenido es deficiente para el incremento en su densidad. Por ejemplo, si un suelo es muy grueso, al mezclarlo con un suelo muy fino, se formará una mezcla con una granulometría más uniforme, lo que resulta en una mejor densidad, ya que las partículas finas llenarán los vacíos. Otros objetivos que se buscan alcanzar con este tipo de mezclas son: incrementar el drenaje en el suelo, reducir cambios volumétricos y controlar los efectos indeseables asociados con arcillas.

Su empleo es más común en el tratamiento y mejoramiento de las propiedades mecánicas de suelos que se van a emplear en la construcción de la estructura de pavimentos. Este método puede emplearse para preparar suelos que sirvan como sub – bases, bases y para el cuerpo del terraplén

Se pueden encontrar muchas situaciones en las que se puede observar la utilidad de este método. Una de esas situaciones puede ocurrir cuando la superficie es una arena suelta que es incapaz de dar soporte a vehículos. Si cerca existe un suelo que le de una cohesión adecuada para que la mezcla tenga una buena estabilidad, se puede llevar y mezclar en proporciones adecuadas con la arena existente para mejorar la superficie de rodamiento.

Para suelos con baja capacidad de carga debido a exceso de arcillas, limos o arenas muy finas, pueden mezclarse con materiales granulares, como arenas o gravas para mejorarlos marcadamente; en este caso, el material grueso aporta la fricción interna necesaria para incrementar la resistencia.

Se tiene entonces que las dos fracciones que forman una mezcla de suelos actúan diferente en la resistencia. La función principal de la porción que queda retenida en la malla No. 200 es proporcionar fricción interna, mientras que la porción de suelo que pasa la malla No. 200 funciona como relleno para el resto de la masa de suelo y aporta cohesión¹³.

Para lograr una buena mezcla de suelos, se admiten arcillas y limos en bajos porcentajes, ya que si se saturan pueden provocar lubricaciones, expansiones y reducciones importantes en la resistencia. En general, a medida que la presencia de agua sea mayor, se intenta que la mezcla tenga una plasticidad baja; por consiguiente, no se admite material fino de alta plasticidad, y se busca que el material utilizado en estabilizaciones tenga un límite líquido que no exceda del 25%. Para el material grueso, lo único que se busca es que sean duros, durables y con partículas angulares.

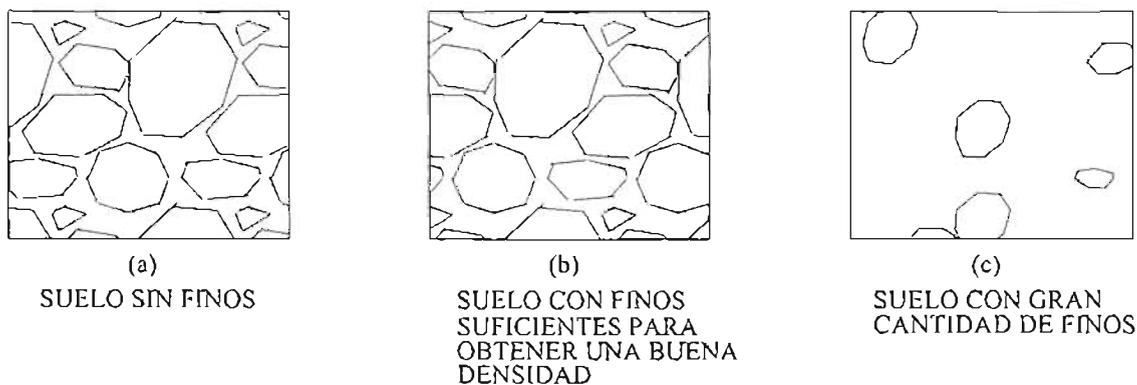


FIGURA 3.5 ESQUEMATIZACIÓN DE SUELOS CON DIFERENTES GRANULOMETRÍAS

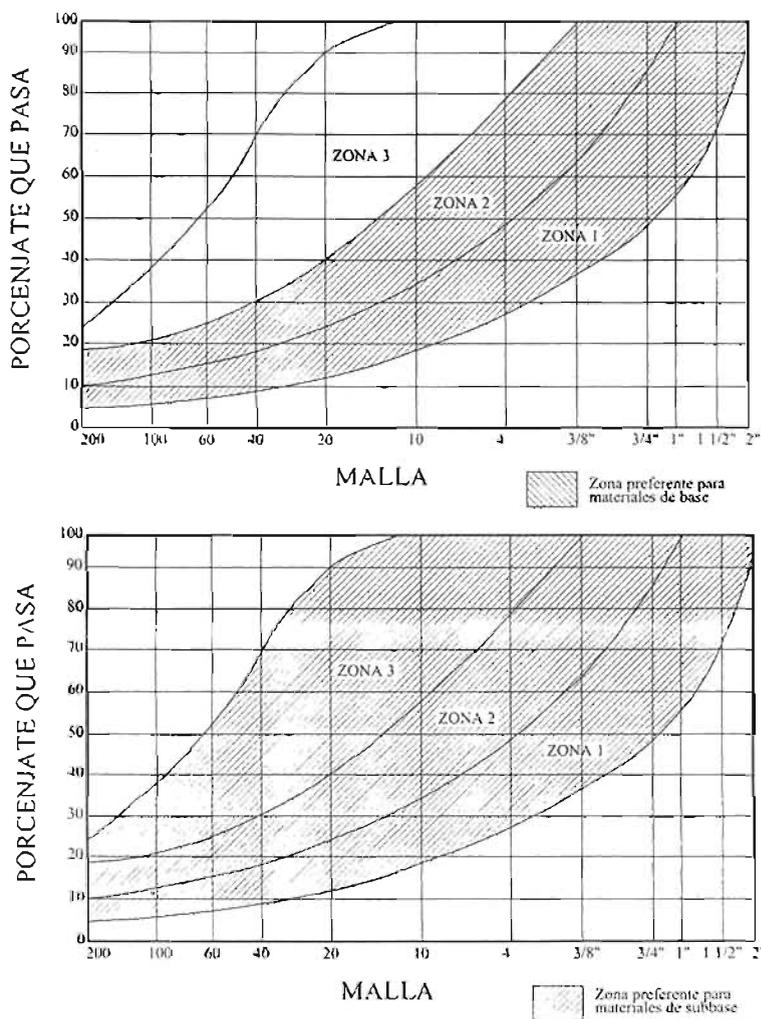


FIGURA 3.6 ZONAS GRANULOMÉTRICAS ESPECIFICADAS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE BASES Y SUBBASES



3.5.1 Diseño de la mezcla.

Los dos factores más importantes a tomar en cuenta en el diseño de mezclas de suelos, son, como ya se mencionó, la granulometría y la plasticidad resultante en los finos incluidos en la mezcla final, las cuales deben ser tomadas en cuenta en el diseño y verificadas cuidadosamente en campo.

3.5.1.1 Granulometría.

Las especificaciones de granulometría para los materiales empleados en bases y sub – bases se muestran en la gráfica de la figura 3.6. En estas especificaciones se prefiere a los materiales que caen dentro de la zona 1 y que tengan aproximadamente la misma curvatura que la de las líneas que limitan dicha zona. De esta manera, el problema del método es determinar las proporciones de los dos o más materiales que han de emplearse para producir una mezcla que tenga una buena granulometría como la mostrada. En algunos casos, es posible que la mezcla deba de realizarse con más de dos suelos para obtener buenos resultados. Debe recordarse, también, que la esencia del método es emplear suelos locales.

Para el diseño de la granulometría existen dos métodos, uno analítico y uno gráfico.

Para el método analítico por tanteos se emplea la fórmula:

$$P = a(A) + b(B) + c(C) \dots\dots\dots 1$$

donde:

P es el porcentaje que pasa por cierta malla de los materiales α , β ya mezclados.

A,B,C son los porcentajes que pasan por la malla seleccionada para P de cada material α , β sin mezclarse.

a, b, c son los porcentajes de cada suelo que entraran en la combinación.

De la fórmula 1, se pueden obtener los siguientes despejes:

$$a = \frac{P - B}{A - B} \dots\dots\dots 2$$

$$b = \frac{P - A}{B - A}$$



a y b indican el porcentaje que deberá aportar cada material a la mezcla para que pase "P" por la malla de diseño elegida.

Para el diseño por este método, se debe seleccionar una malla y los porcentajes que pasan por ella de cada uno de los suelos que van a ser empleados. De la tabla 3.7, que muestra los valores numéricos de los límites que marcan las especificaciones, se va a tomar el valor medio de la malla elegida como malla de diseño.

TABLA 3.7 PORCENTAJES REQUERIDOS PARA SUELOS A EMPLEAR COMO MATERIALES DE BASE Y SUB-BASE

Malla	Porcentaje recomendado
1"	100
¾"	70 - 100
½"	80 - 100
3/8"	70 - 90
No. 4	50 - 70
No. 8	35 - 50
No. 30	18 - 29
No. 40	15 - 30
No. 50	13 - 23
No. 100	8 - 16
No. 200	4 - 10

Para el empleo de cualquiera de las formulas marcadas con 2 los valores de A y B, se obtienen de las curvas granulométricas de los materiales que van a emplearse y el valor de "P" se obtiene de la tabla 3.7. La suma de los porcentajes "a" y "b", da el total de la mezcla. Si se calculó el valor de "a", se resta a 100 y se obtendrá el porcentaje que deberá aportar el suelo β a la mezcla, es decir el porcentaje "b".

Los porcentajes obtenidos de "a" y "b", deberán multiplicarse por todos los valores de la granulometría de ambos suelos, sumarse y verificar que la mezcla final tenga unos porcentajes que caigan dentro de los marcados por las especificaciones.

Este fue un primer tanteo, si el porcentaje de alguna malla no cumple con las especificaciones, se pueden modificar los porcentajes de aportación de cada suelo a la mezcla final, recordando siempre que cada suelo va a dar a la mezcla finos y gruesos, pero tratando siempre de que uno de más finos y que el otro aporte la fracción gruesa¹⁷.

El proporcionamiento gráfico se emplea cuando los suelos tienen curvas granulométricas que se cruzan o es difícil realizar la mezcla óptima mediante examen visual. Este método



requiere de la construcción de una cuadrícula, como la que se muestra en la gráfica de la Figura 3.7.

La escala es la misma para los cuatro lados. El método consiste en los siguientes pasos:

1. En la escala vertical, se divide de 0 al 100, iniciando de abajo hacia arriba.
2. En la escala horizontal, en la parte inferior, se inicia con el 0 a la izquierda; en la parte superior, se inicia la escala con el cero a la derecha.
3. En la escala vertical, se marcan los porcentajes que pasan por cada malla para los dos suelos.
4. Se unen los porcentajes para cada malla (No. 30 con No. 30, No. 200 con la No. 200, etc.).
5. Se marcan en las rectas trazadas anteriormente los límites establecidos por las especificaciones.
6. Los límites del área sombreada en la gráfica corresponden al límite superior de la malla No. 200 (15%) y al límite inferior para la malla No. 40 (15%). Los porcentajes necesarios de cada suelo se pueden leer si se traza una línea vertical, el porcentaje para el suelo 1 se lee en la parte superior y el porcentaje del suelo 2 en la parte inferior. Cualquier línea trazada dentro del área dará un proporcionamiento de los dos materiales de manera que se tendrá la granulometría requerida por las especificaciones.

Tanto el método gráfico como el analítico presentan ventajas y desventajas. El método gráfico elimina la necesidad de un mezclado preciso, sin embargo se vuelve muy complicado cuando en la estabilización van a utilizarse más de dos suelos.

El método analítico permite una mezcla más precisa, como la que proporciona una mezcladora en campo.

3.5.1.2 Plasticidad de la mezcla

La naturaleza y cantidad de la fracción fina debe ser cuidadosamente controlada, debido a que cantidades elevadas de ella resultan en un inaceptable cambio de volumen, en el contenido de humedad y otras propiedades indeseables. La cantidad de esta fracción de suelo es controlada limitando el porcentaje que pasará la malla No. 200, mientras que las propiedades de las partículas finas son usualmente controladas mediante el control de las características plásticas, evidenciadas por el límite líquido y el índice plástico. La tabla 3.8 muestra las características de plasticidad deseables para una mezcla de suelos. Las características varían, dependiendo de la función que va a tener la capa tratada, pero en general, estos valores son los más recomendados.



TABLA 3.8 VALORES DE PLASTICIDAD IDÓNEOS PARA UNA MEZCLA DE SUELOS

Características de plasticidad	
Límite líquido	≤ 28
Índice de plasticidad	≤ 6

Una vez que se realizó el diseño de la granulometría, se realizan pruebas con diferentes muestras de la mezcla diseñada, se calcula su índice plástico y se compara con el proporcionado por las especificaciones. Si el valor está dentro de lo establecido, entonces la mezcla se acepta como satisfactoria. Si las características plásticas de la primer combinación no están dentro de los límites, deberán hacerse más combinaciones de suelos, hasta encontrar los porcentajes de cada material que cumplan tanto con la granulometría como con las características plásticas.

Para evaluar las características plásticas de una mezcla de suelos y verificar si cumple o no con los requerimientos, se emplea un método gráfico. Los datos necesarios para poder emplear este método son básicamente tres: los porcentajes que cada suelo aportó a la mezcla, el porcentaje del material que pasó la malla No 40 y los índices de plasticidad y límite líquido para cada suelo.

El método consiste en lo siguiente:

1. Se considera una cantidad aleatoria de la mezcla de suelos, en kilogramos o alguna otra unidad de peso.
2. Se considera que porcentaje de cada suelo hay en la mezcla. Se emplean los porcentajes que van a ser empleados en la mezcla y que fueron obtenidos anteriormente en el diseño previo.
3. Se multiplican los porcentajes de cada suelo en la mezcla por la cantidad seleccionada en el paso 1, se obtiene así el peso aportado para la mezcla de cada material.
4. Obtener de la curva granulométrica de cada suelo el porcentaje que pasa la malla No. 40.
5. Con los porcentajes de la fracción de suelo que pasa la malla No 40 y el peso que cada suelo aportó a la mezcla, se procede a calcular el peso de la parte fina para cada suelo, multiplicando el valor obtenido en 3 por los porcentajes de 4.
6. Sumando los valores obtenidos en el paso anterior, se tendrá el total de finos que tiene la muestra.
7. Se toma el suelo con el Índice de plasticidad más alto y se calcula el porcentaje del aporte de este material a la plasticidad de la mezcla con la siguiente fórmula:



$$\text{Porcentaje} = \frac{W}{W_{\text{Total}}} 100$$

Este porcentaje servirá más adelante para reducirlo, si no se cumple con la plasticidad o límite líquido requerido.

La W representa el peso del material fino con el índice de plasticidad más alto en la mezcla, es decir, el valor obtenido en el paso 5.

W_{Total} representa el peso total de las partículas finas de la mezcla.

8. Se construye una gráfica como la mostrada en la gráfica 3 en la que se van a colocar, en la escala horizontal los índices de plasticidad para los dos materiales, con el índice de plasticidad mayor en la parte superior y el menor en la parte inferior. En la escala vertical se marca el porcentaje del material con el contenido de plasticidad más alto que pasa la malla 40.
9. Se unen con una recta los valores de plasticidad para los dos suelos.
10. El índice de plasticidad resultante de la mezcla se puede observar en la escala vertical, en el punto donde se intersectan la recta que une las plasticidades de los suelos y el porcentaje de material que pasa la malla No. 4.

El mismo procedimiento se debe hacer para calcular el límite líquido de la mezcla.

Para conocer la plasticidad resultante en la mezcla también se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$I.P. = \frac{K_1 F_1 I_1 + K_2 F_2 I_2 + \dots + K_n F_n I_n}{K_1 F_1 + K_2 F_2 + \dots + K_n F_n}$$

Donde:

K_1, K_2, K_3 son los porcentajes en que los suelos S_1, S_2, S_n intervienen en la mezcla.

F_1, F_2, F_3 , son los porcentajes de suelo fino que contienen los suelos S_1, S_2, S_n

I_1, I_2, I_3 , son los índices plásticos de los suelos S_1, S_2, S_n

Si la plasticidad está fuera de los requerimientos, un incremento en el porcentaje del suelo con menor plasticidad bajará esta propiedad en la mezcla, hasta que quede dentro de los límites. También existen otros tratamientos para bajar la plasticidad de un suelo, como es añadirles cantidades pequeñas de cal u otros aditivos químicos.

La figura 3.8 muestra la gráfica a emplear para la determinación del índice de plasticidad de la mezcla de suelos.

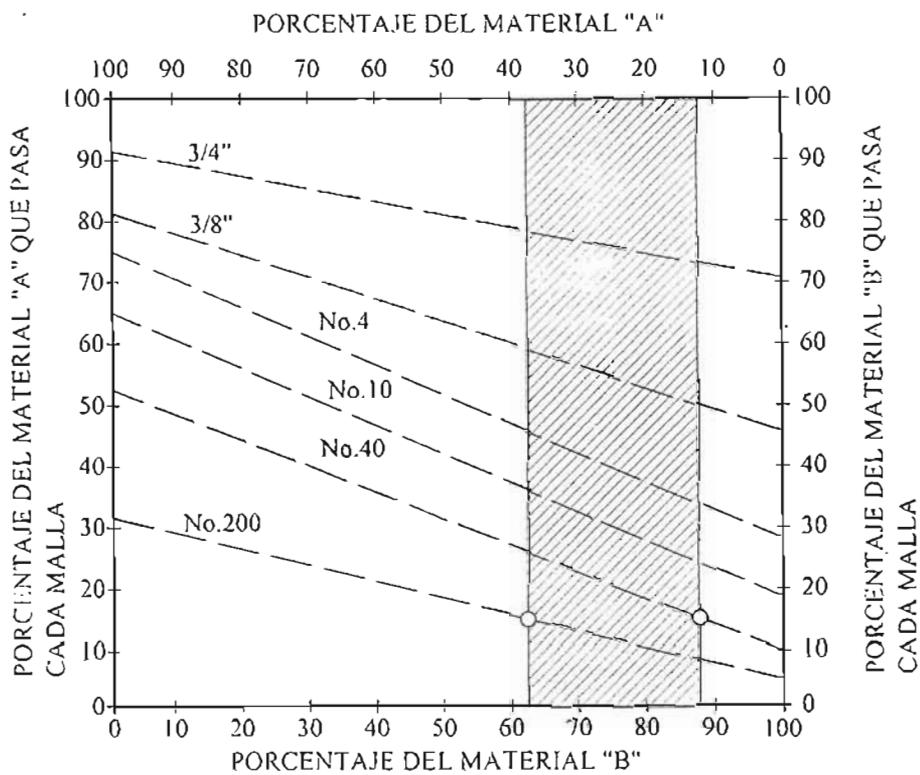


FIGURA 3.7 MÉTODO GRÁFICO PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS DE SUELOS PARA LA MODIFICACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA

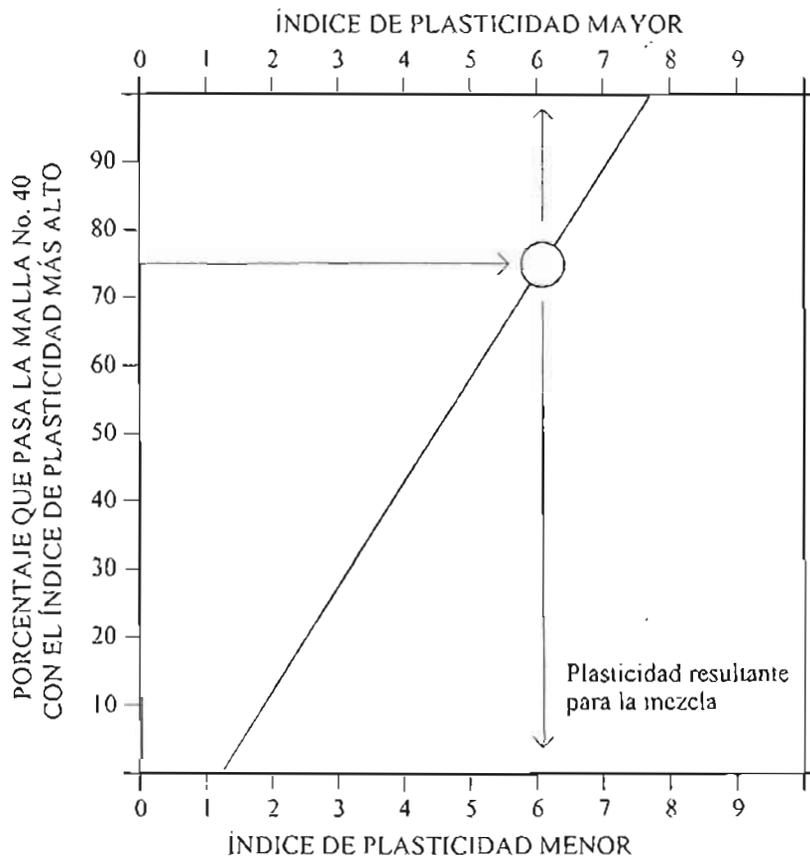


FIGURA 3.8 MÉTODO GRÁFICO PARA LA OBTENCIÓN DE LA PLASTICIDAD DE MEZCLAS DE SUELOS



3.5.2 Procedimiento constructivo.

La construcción de una capa estabilizada mediante la adición de otro suelo o cambio en la granulometría involucra los siguientes pasos:

3.5.2.1 Preparación.

En este paso se incluyen la preparación del área a tratar, la escarificación del suelo e incluso la pulverización de partículas grandes y el ajuste del contenido de agua o humedad del suelo.

El suelo sobre el cual se va a colocar la capa estabilizada deberá estar previamente nivelado y compactado. Se puede colocar una capa de material granular para evitar la ascensión capilar.

3.5.2.2 Adición y disgregación del material importado.

Para la adición del material importado se pueden usar cajas arrastradas por camiones, que van esparciendo el suelo en el área a tratar o bien descargarlo y esparcirlo mediante trabajo manual o con mezcladoras.

3.5.2.3 Mezclado.

Para el mezclado se puede añadir agua, si se requiere, para obtener un contenido de humedad más o menos 2% arriba del óptimo y mezclar los suelos mediante mezcladoras rotatorias, pulverizadoras – mezcladoras, motoconformadoras de cuchillas, escarificadores o arados de discos.

El mezclado debe continuar hasta que el suelo y las partículas agregadas formen una masa uniforme y homogénea.

El mezclado se realiza en parte durante el proceso anterior de adición y disgregación, pero deberá completarse con varias pasadas de la maquinaria antes mencionada.

Durante este proceso, se debe llevar un control minucioso de las características de los materiales y del material resultante de la mezcla.

3.5.2.4 Compactación.

La compactación es la operación con que finaliza el método, y la cual puede llevarse en forma normal, seleccionando el equipo de apropiado, basado en las características de graduación de la mezcla de suelos.



3.6 Estabilización con otros productos químicos.

3.6.1 Ceniza volátil.

La ceniza volátil es un material puzolánico que consiste principalmente de compuestos de aluminio y sílice que, cuando son mezclados con agua y cal forman una masa cementada endurecida capaz de obtener una resistencia a la compresión alta. Son un subproducto de la combustión del carbón y se obtienen en su mayor parte de las plantas térmicas generadoras de electricidad.

Al mezclarse con cal puede ser usado eficientemente para estabilizar muchos suelos de grano mediano a grueso; sin embargo, el índice de plasticidad del suelo a tratar no debe ser mayor de 25. Suelos clasificados por el Sistema Único de Clasificación de Suelos como SW, SP, SP – SC, SW – SC, SW – SM, GW, GP, GP – GC, GP – GM, GW – GM, GC – GM, y SC – SM, pueden ser estabilizados con ceniza volátil.

Se divide en dos grandes categorías, dependiendo del contenido de óxido de calcio (CaO). Estas son:

Clase C.

Esta división tiene un alto contenido de óxido de calcio (15 a 35%). Puede ser usado como único agente estabilizador en suelos gruesos y para controlar la expansión de arcillas. Las características de resistencia de ceniza clase C con menos de 25% de óxido de calcio pueden mejorarse al añadirse cal.

Clase F.

Tiene un porcentaje bajo e insuficiente de óxido de calcio para que ocurra la reacción puzolánica. No es efectiva al ser usado como único estabilizador, sin embargo, cuando se mezcla, ya sea con cemento o con cal, la mezcla se vuelve un efectivo estabilizador. También puede emplearse adecuadamente como relleno para arenas con mala granulometría y así incrementar su densidad.

3.6.1.1 Diseño de la mezcla suelo – ceniza volátil y procedimiento constructivo.

La cantidad de ceniza que debe ser proporcionada puede establecerse en un rango de 9 a 15% del peso de suelo. La proporción requerida debe ser establecida por el ingeniero a cargo del proyecto, usando muestras de suelo y ceniza y realizando pruebas de laboratorio; además, debe tener presente siempre que las características del suelo encontrado en la superficie a tratar afectan la cantidad de ceniza necesaria.



El procedimiento constructivo de una capa suelo – ceniza volátil consta de las mismas etapas que una capa de suelo – cemento o una de suelo – cal. Estas etapas son:

- Preparación, si es necesaria de caminos ya existentes.
- Escarificación y pulverización del suelo. Adición de humedad hasta la profundidad requerida.
- Aplicación de la ceniza.
- Control de la humedad.
- Mezclado con maquinaria o a mano.
- Compactación.
- Curado y protección.

3.6.2 Materiales bituminosos.

La estabilización con material bituminoso se utiliza principalmente en suelos granulares para formar en el suelo una estructura cohesiva e impermeabilizarlo. También se han usado en suelos arcillosos, con el propósito de impermeabilizarlos y así evitar que pierdan resistencia por efecto de un aumento en el contenido de humedad. Este efecto se obtiene en parte debido a la formación de una película delgada alrededor de las partículas que las une e impide que absorban agua y otra parte por el bloqueo de los poros que impide la entrada de agua.

Prácticamente todos los suelos responden a la estabilización con asfalto, incluyendo las arcillas más compresibles y activas. La granulometría de los suelos no es esencial, pero generalmente se deben cumplir con algunos requerimientos, como los que a continuación de detallan:

- El tamaño máximo de la partícula debe ser menor que un tercio del espesor compactado de la capa.
- Más del 50% del material debe ser menor que la malla No. 4.
- 35% del material debe ser más fino que la malla No 4
- El retenido en la malla No. 200 debe estar comprendido entre 10 y 50%.
- El límite líquido de la fracción fina debe ser menor que 40%
- El índice de plasticidad de la fracción fina debe ser menor que 18%.

Para el mejoramiento de las propiedades de los suelos con asfalto se emplean tres tipos de productos:

- Productos bituminosos
- Productos asfálticos, procedentes de la destilación y refinamiento del petróleo.
- Residuos de la destilación de materiales orgánicos, como carbón, ciertos aceites, turbas y madera.



3.6.2.1 Métodos constructivos.

Las mezclas de suelo – asfalto se fabrican dependiendo del objetivo que se desee alcanzar. Puede pretenderse buscar una resistencia máxima, en suelos finos, la que deberá lograrse empleando el contenido óptimo de asfalto.

La selección del tipo y cantidad del material que se va a emplear debe hacerse mediante pruebas de laboratorio que determinen y comparen características de resistencia y estabilidad. En la construcción de vías terrestres, es muy común realizar pruebas para conocer la evolución del Valor Relativo de Soporte en especímenes curados y sujetos a periodos de inmersión en agua. En estos casos, se exige, por lo menos, valores de 80% para el V.R.S. de capas de pavimento.

Para estimar una cantidad de asfalto preliminar puede emplearse la siguiente ecuación:

$$P = \frac{0.2(a) + 0.07(b) + 1.5(c) + 0.20(d)}{100 - S} * 100$$

Donde:

P es el porcentaje preliminar de asfalto por peso seco de suelo.

a es el porcentaje de agregado retenido en la malla no. 50.

b es el porcentaje de agregado que pasa la malla 50 y queda retenido en la malla 100

c es el porcentaje de suelo que pasa la malla 100 y queda retenido en la malla 200.

d es el porcentaje que pasa la malla 200.

S es el porcentaje de solvente.

La adición del asfalto en forma de asfaltos rebajados lleva consigo una proporción de solventes volátiles que son importantes en el comportamiento de la mezcla obtenida. Cuando la cantidad de solventes sobrepasa los valores óptimos se corre el riesgo de abatir la resistencia que se busca para la mezcla.

La secuencia constructiva de una capa suelo – asfalto comprende los siguientes pasos:

- Pulverización del suelo.
- Adición del agua necesaria para un mezclado apropiado.
- Adición del producto asfáltico.
- Mezcla con el suelo.
- Aereación, para obtener un contenido de solventes volátiles apropiado para la compactación.
- Compactación.
- Acabado.



- Aereación y curado.

3.6.3 Combinaciones de agentes estabilizadores.

La ventaja principal de usar combinaciones de agentes estabilizadores es que en la mezcla, uno de ellos compensará la falta de eficacia del otro en tratar un aspecto particular o características de un suelo. Por ejemplo, en suelos arcillosos, la cal es empleada junto con otros estabilizadores, como cemento Pórtland o asfalto para mejorar las características del material. Puesto que el cemento Pórtland o el asfalto no pueden ser mezclados exitosamente con arcillas plásticas, la cal es incorporada al suelo para hacerlo pulverizable o disgregable, permitiendo al cemento o al asfalto un adecuado proceso de mezclado.

3.6.3.1 Cal – cemento.

La cal puede ser usada como un aditivo inicial con cemento o como un estabilizador primario. El propósito principal de la cal es proporcionar trabajabilidad, debido a la reducción de la plasticidad. La cantidad de cal empleada es la mínima que cumpla con los resultados de deseados de plasticidad y trabajabilidad.

3.6.3.2 Cal – asfalto.

La cal es empleada como un aditivo inicial en proyectos donde la estabilización se llevará a cabo con asfalto. Tiene el mismo propósito de proporcionar trabajabilidad al suelo, pero su acción principal es neutralizar los ácidos del agregado que interfieren con la adherencia del asfalto en las partículas de suelo. Generalmente, se usa de 1 a 2 por ciento para cumplir con estos objetivos.

3.6.3.3 Cal – ceniza volátil y cal –ceniza volátil – cemento.

La estabilización de suelos de grano grueso, con pequeñas cantidades o nada de finos puede ser realizada con el uso de cal – ceniza volátil (LF) o cal – ceniza – cemento (LFC). La cal, en combinación de la ceniza volátil puede ser usada satisfactoriamente en suelos gruesos puesto que la ceniza facilita un agente con el cual la cal puede reaccionar. Las dos combinaciones, LF y LFC, pueden ser empleadas en la estabilización de suelos para base y sub – base.

El diseño de la mezcla para una estabilización con LF es un tanto diferente que el empleado para mezclas de cemento o cal.



Para una determinada combinación de materiales (agregados, ceniza volátil y cal), un número grande de factores pueden variar en el proceso de diseño de la mezcla como el porcentaje de LF, el contenido de humedad y la proporción de cal contra ceniza volátil.

Es conocido que características ingenieriles, como la resistencia y la durabilidad están directamente relacionadas con la calidad de la matriz de suelo. En este caso, la matriz de suelo consiste en la ceniza volátil, la cal y los agregados finos que pasan la malla no 4. Básicamente, una resistencia elevada y una durabilidad mejorada son obtenidas cuando la matriz es apta para hacer “flotar” las partículas gruesas del suelo. En efecto, las partículas finas rellenan los huecos entre las partículas gruesas. Para cada suelo grueso, se tiene una cantidad de matriz requerida para llenar efectivamente los vacíos disponibles y se pueda cumplir la condición anterior. La cantidad de matriz requerida para obtener el máximo peso volumétrico seco es referida al contenido óptimo de finos. En mezclas de LF es recomendado que la cantidad de matriz sea aproximadamente 2 por ciento arriba del contenido óptimo de finos. Con este contenido de finos recomendado, se tiene que el comportamiento de la resistencia está muy influenciado por la proporción cal – ceniza, por lo cual, ajustes en esta proporción, darán como resultado diferentes valores de resistencia y durabilidad.

El cemento Pórtland también puede ser usado en combinación con LF para mejorar la resistencia y la durabilidad. Generalmente, se usa aproximadamente de 1 a 2 por ciento. Para encontrar la mejor combinación de los tres elementos, se deben realizar pruebas de resistencia y durabilidad a muestras con diferentes proporciones de los tres elementos.

El procedimiento constructivo para LF y LFC son similares a los empleados para la estabilización con cal. Si la estabilización se realiza con mezclas LFC, la compactación debe realizarse tan pronto como sea posible, debido principalmente a la presencia del cemento.

3.7 Ejemplos prácticos del empleo de la estabilización superficial para el mejoramiento de suelos

3.7.1 Empleo de mezclas suelo – cemento y suelo – cal para el mejoramiento de suelos para la construcción de bases y subbases de pavimentos.

Uno de los problemas de intemperismo ocasionados especialmente por las fuertes temporadas de lluvia que se presentan en estados como Veracruz, Tabasco, y Chiapas y que se aprecia con mayor frecuencia en autopistas son los relacionados con problemas de estabilidad de taludes de cortes. El agua de lluvia, en combinación con cambios en la temperatura puede provocar desde escurrimientos de material sobre la cara del talud hasta fallas de tipo rotacional o de pie.



Debido a las fuertes lluvias presentadas en el 2002 en el estado de Veracruz, se generaron problemas de estabilidad de taludes de cortes en varias autopistas, siendo una de las más afectadas la que comunica a la ciudad de Poza Rica con Tuxpan. En este tramo, específicamente del cadenamiento 241+000 al 241+100 se presentó un hufamiento o levantamiento de las losas de concreto hidráulico del acotamiento y en parte de la autopista, problema provocado por la falla de pie que sufrió el talud de corte, situación presentada específicamente en el sentido México – Tuxpan.

Como parte del proyecto de restitución de las losas de concreto hidráulico se planteó el abatimiento del talud, la construcción de un sistema de subdrenaje en la cuneta y la reconstrucción de las capas del pavimento que se vieron dañadas, como la subbase y las losas de acotamiento (Fig 3.9).

Para este proyecto de estabilización y reconstrucción de losas de pavimento, ubicado en el tramo que va del entronque Tihuatlán a Tuxpan se tiene que los materiales propios de la zona, caracterizados como arcillas de alta plasticidad y con contenidos de humedad elevados no eran adecuados para ser empleados como materiales para la reconstrucción de las diversas capas de las que se compone el pavimento de la autopista (subbase y carpeta de losas de concreto hidráulico) por su bajo V.R.S, ni como materiales a emplear como relleno en el subdrenaje.

Por tal motivo, dentro del proyecto de reconstrucción se consideró el empleo de material del banco de préstamo conocido como “El Cascajo”, caracterizado como una arcilla arenosa de baja plasticidad. Sin embargo, el material no cumplía con los requerimientos establecidos por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes para materiales para bases y subbases, por lo que fue necesario plantear la posibilidad de traer materiales de otros bancos más lejanos, lo que hubiera incrementado el costo del proyecto, o la decisión de mejorar el material mediante algún método y posteriormente emplearlo como material para base o subbase.

Se efectuaron pruebas del tipo Porter y Valor Relativo de Soporte (V.R.S.) al material estabilizado con cemento al 6%, que es un valor dentro de los parámetros establecidos de cantidades en peso para este tipo de material. Los resultados se pueden observar en la figura 3.10, donde se aprecia que el material estabilizado alcanzaba una resistencia adecuada para los dos materiales por separado (cal y cemento), en comparación con los obtenidos sin que se añadiera un agente estabilizador a la muestra. Los valores de V.R.S. obtenidos por en la prueba Porter, arrojaron resultados que fueron concluyentes para el empleo de este material para la construcción de la capa de subbase, previamente estabilizado mediante la adición de cemento o cal. Cabe mencionar que adicionalmente, a la estabilización con cemento y cal, al material se le dio un tratamiento de trituración y mezcla para obtener una granulometría más cercana a las curvas que establece la S.C.T.

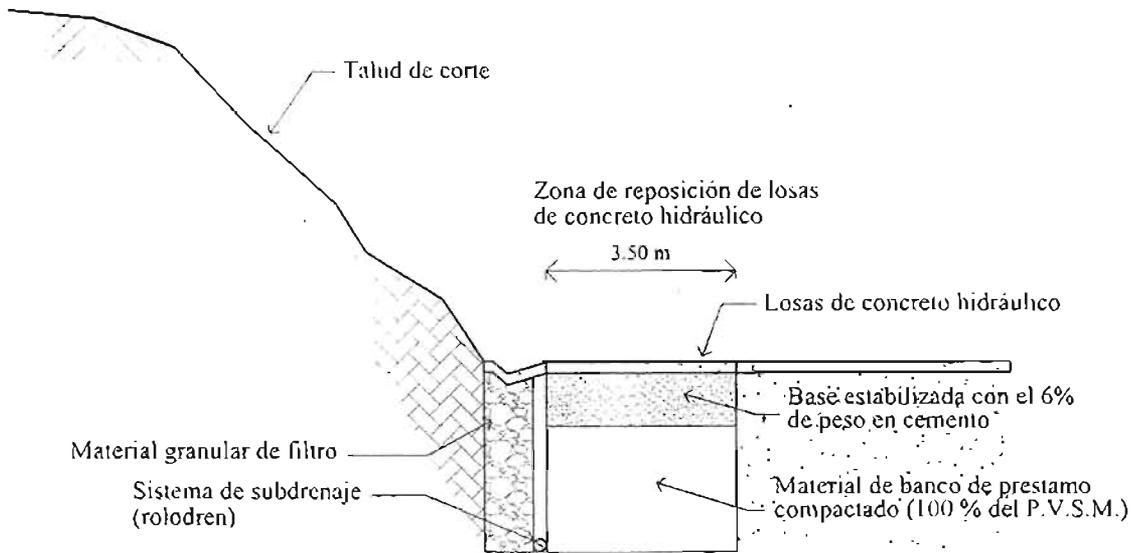


FIGURA 3.9 PROYECTO DE REPOSICIÓN DE LOSAS DE CONCRETO HIDRÁULICO Y DE BASE CON MATERIAL ESTABILIZADO CON CEMENTO. AUTOPISTA MÉXICO - TUXPAN.

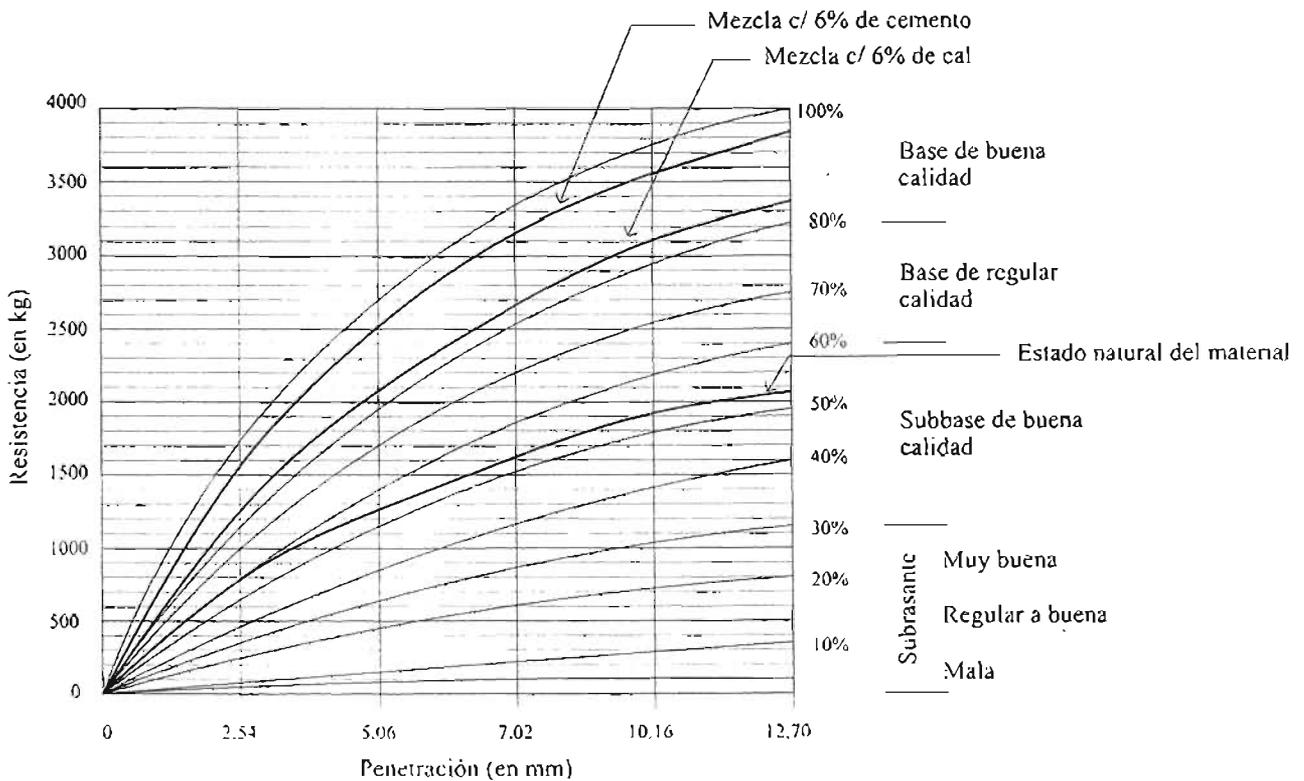


FIGURA 3.10 COMPARACIÓN DEL VALOR RELATIVO DE SOPORTE PARA UN SUELO ESTABILIZADO CON CEMENTO Y CAL, CON EL OBTENIDO DEL SUELO SIN TRATAMIENTO.



3.7.2 Mejoramiento de las arcillas expansivas de Jiutepec, Morelos por medio de la adición de cal.¹⁹

El municipio de Jiutepec se encuentra asentado sobre la formación geológica denominada Chichinautzin, la cual está en su mayor parte constituida por basalto olivínico, con presencia menos abundante de basalto iddingsita y uagita y la andesita de homablenda. Esta formación da origen a estratos como el formado de suelo con material vegetal, que subyace un estrato de suelo arcilloso de consistencia blanda a firme de alta plasticidad con características expansivas.

Los suelos expansivos son arcillas plásticas que, por su alto contenido de minerales arcillosos, son susceptibles a experimentar cambios de volumen al modificar su humedad, caracterizándose por un comportamiento cíclico de expansión y contracción al incrementar y reducir su contenido de agua, respectivamente.¹⁹ La diferencia con los suelos comunes, que también presentan cambios de volumen, radica en que los suelos expansivos llegan a alcanzar niveles que generan daños a las obras construidas sobre ellos, como son edificaciones, obras hidráulicas, caminos, puentes, etc.

Antes de realizar las pruebas de expansión y de compresión simple a las mezclas arcilla – cal fue necesario determinar la cantidad de cal con la que se obtenía la mayor estabilidad (mínima expansión) de la arcilla. Para tal fin se siguió una metodología denominada “punto de fijación”, el cual se obtiene a partir de los límites de Atterberg determinados a mezclas arcilla – cal con distintas proporciones. En este caso, se ensayaron mezclas con el 2, 4, 6 y 8% de cal en peso. De esta manera, el punto de fijación se determina como el porcentaje de cal a partir del cual los límites de Atterberg ya no varían. De esta manera, se demostró que para un valor del 8% los límites de Atterberg ya no sufren cambios considerables con respecto a los obtenidos con el 6%, decidiéndose así realizar las pruebas de expansibilidad y compresión simple a mezclas de arcilla con estos dos porcentajes, comparando los resultados con los obtenidos en la arcilla pura sin presencia de cal.

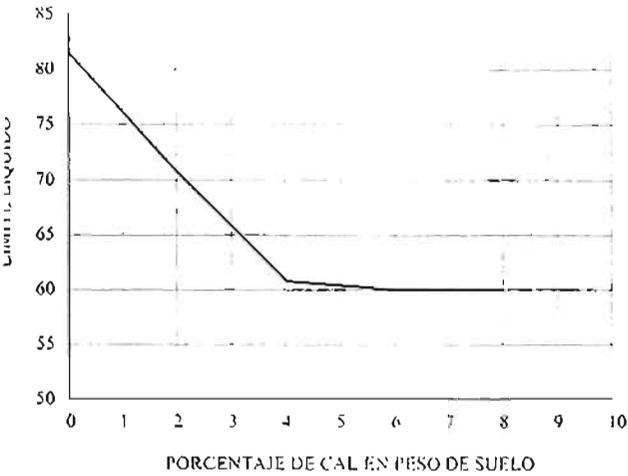
Para verificar la efectividad de la estabilización se realizaron pruebas de expansión a las dos mezclas previamente compactadas, y se compararon con los resultados obtenidos con la arcilla con cal.

Las pruebas de resistencia a la compresión simple a las dos mezclas de arcilla – cal compactadas a sus valores óptimos de contenido de agua y peso volumétrico seco. La primer serie de pruebas se realizó a especímenes labrados y ensayados inmediatamente después de la compactación y la segunda a especímenes compactados y puestos en reposo por 24 horas. De la misma manera que en las pruebas de expansibilidad los resultados fueron comparados con los de especímenes sin cal.

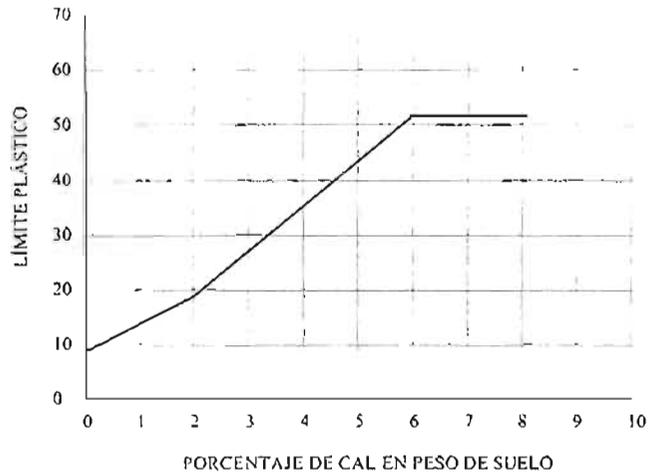


Como se observa en las gráficas de resultados de las pruebas efectuadas a las mezclas arcilla – cal (figuras 3.11), la expansión se reduce de más del 16% al 1%, con reducción de la presión de expansión de casi el 90% de la presión observada en la muestra sin cal.

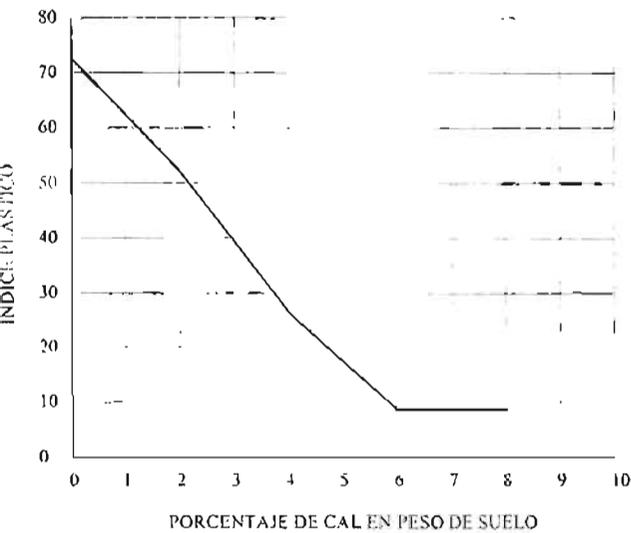
La adición de cal aumenta instantáneamente la resistencia a la compresión simple y al dejar en reposo las muestras por 24 horas la resistencia casi alcanza a duplicarse, con lo cual se demuestra el mejoramiento de la arcilla en lo que a capacidad de carga se refiere.



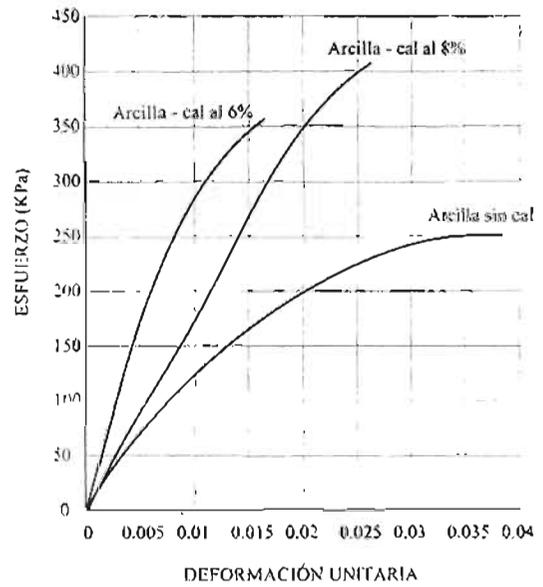
A. REDUCCIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO



B. AUMENTO DEL LÍMITE PLÁSTICO



C. REDUCCIÓN DE LA PLASTICIDAD DE LA ARCILLA



D. AUMENTO DE LA RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE. VARIACIÓN DEL PORCENTAJE DE CAL.

FIGURA 3.11 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE ARCILLAS ESTABILIZADAS MEDIANTE LA ADICIÓN DE CAL.



CAPITULO 4

MÉTODOS DE MEJORAMIENTO PROFUNDO

Los métodos de mejoramiento profundo son empleados para tratar suelos donde se van a desplantar estructuras con descargas grandes o en suelos con problemas de minas o de muy mala calidad en estratos inferiores, como es el caso de sitios donde se tengan estratos arenosos con altos potenciales de licuación.

En este capítulo se muestran tres de esos métodos, la vibroflotación, que se emplea para suelos de grano grueso como arenas o gravas; las inyecciones, que son utilizadas para rellenar oquedades en la masa de suelo o para crear bulbos de inyección empleados en el anclaje y el método de Jet Grouting, empleado para la creación de estructuras similares a pilotes colados en el sitio, en diversos tipos de suelos.

4.1 Vibroflotación

La vibroflotación es el término general para las técnicas de mejoramiento y densificación por medio de sondas largas insertadas en el terreno, seguida por la compactación por vibración mientras estas se van retirando. Las sondas típicamente están colgadas por medio de grúas o mástiles, y se van introduciendo en el suelo, hasta la profundidad deseada usando métodos vibratorios y ayudados con chorros de agua a presión.

También conocida como vibrocompactación, fue desarrollada en Alemania en 1934, por S. Steuermann y W.L. Degen. Su evolución continuó en este país y aproximadamente en 1940 llegó a los Estados Unidos, donde se le dio el nombre de vibroflotación.

Actualmente, se le considera uno de los métodos más importantes para la densificación de depósitos arenosos de gran espesor, aplicable a suelos granulares limpios y con alto contenido de agua, o mejor aún saturados, ya que en materiales con drenaje libre, el agua no presenta un obstáculo en el acomodo de las partículas. En la gráfica de la figura 4.1, se puede observar la zona granulométrica apropiada para el uso de este método.

Aunque el método es casi en su totalidad aplicable a arenas, no es adecuado en aquellas con contenidos muy altos de partículas finas (por ejemplo, con porcentajes mayores del 50% pasando la malla No. 120), pero, aceptando siempre que menos del 25% en peso pase la malla No. 200 (ver figura 4.1).

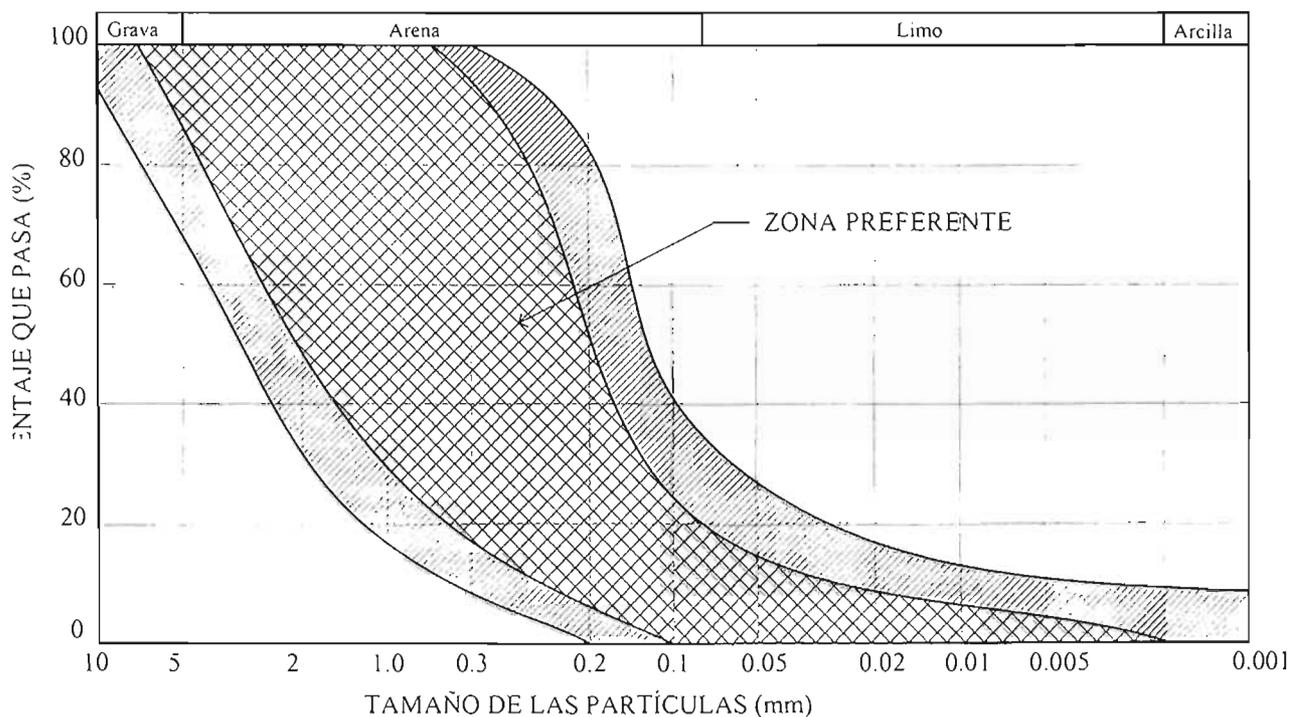


FIGURA 4.1 GRANULOMETRÍA IDÓNEA PARA EL MEJORAMIENTO DE SUELOS CON VIBROFLOTACIÓN

Recientemente, su aplicación no se encuentra restringida únicamente para suelos granulares, sino que la vibroflotación ha sido empleada también para mejorar las condiciones de cimentación en suelos arcillosos blandos o en depósitos orgánicos. El vibrador se hincando formando un pozo vertical, el cual se rellena con grava o piedra triturada a medida que el aparato se va retirando lentamente hacia la superficie. De esta manera, el relleno que se va colocando se compacta con la acción del propio vibrador, formando columnas de grava que funcionan en un principio como pilotes, pero con tendencia a la deformación lateral cuando la carga sobre ellas incrementa, provocando un empuje pasivo en el suelo circundante. La función drenante de estas columnas acelera la consolidación y el incremento de la resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla. Las columnas resultan normalmente con un diámetro comprendido entre 80 cm y 1.30 metros, pero, entre más blando sea el suelo, mayor será el diámetro de las columnas.

El grado de compactación que se logra, va disminuyendo radialmente desde el centro de la columna, siendo máximo en esta zona.

La profundidad de tratamiento puede ser del orden de 20 metros, pero se han reportado profundidades de hasta 30 metros.

El equipo requerido para aplicar esta técnica consiste de tres partes principales: el vibrador, los tubos de extensión y la grúa de soporte. La combinación del vibrador y los tubos de extensión es también llamada "vibroflot". La figura 4.2, muestra un diagrama esquemático del equipo y el proceso de vibroflotación en general y en la figura 4.3 se observa la densificación del subsuelo mediante la adición de material desde la superficie.

El vibrador empleado es parecido a los empleados para vibrar el concreto. Tiene 40 centímetros de diámetro y aproximadamente 183 centímetros de longitud, pesa del orden de 2 toneladas y mediante su masa excéntrica interna puede desarrollar una fuerza horizontal de 10 toneladas a 1800 rpm, desplazándose lateralmente casi 2 centímetros. La rotación de la masa excéntrica induce un movimiento cónico del vibroflot alrededor de la conexión con los tubos de extensión como se muestra gráficamente en la Figura 4.4.

El vibroflot es hincado al terreno por medio de chorros de agua (5 a 6 lts/seg.) a presión (4 a 6 Kg./cm²) que salen de su parte inferior (figuras 4.7a y 4.7b); el exceso de agua en el suelo, provoca una condición momentánea de arena movediza, lo cual facilita la penetración del mecanismo por su propio peso. Al llegar a la profundidad de diseño, los chiflones inferiores se cierran, y empiezan a operar los superiores, que dirigen su flujo hacia abajo, moderando el gasto para hacer que la arena se deposite en el fondo.

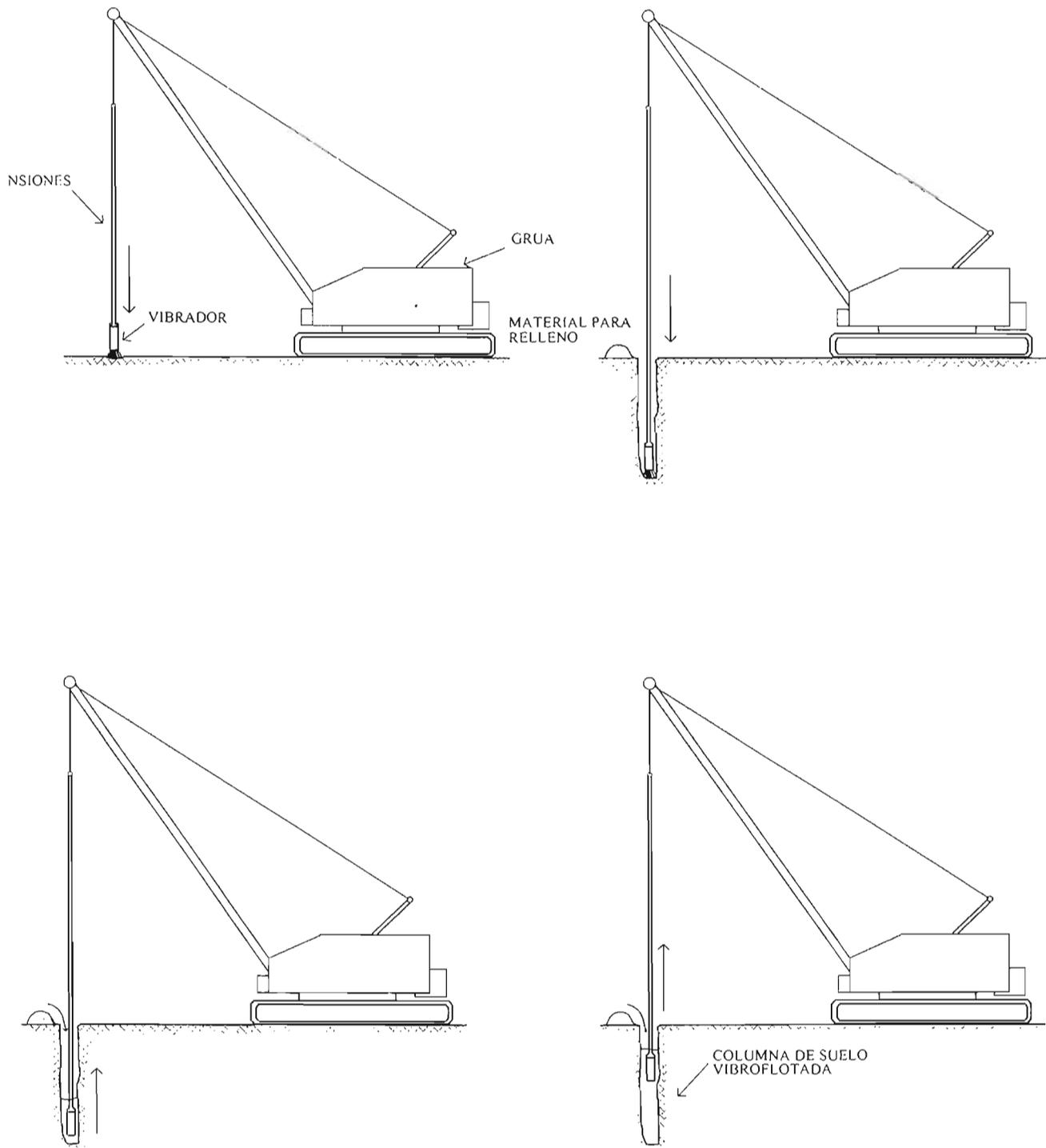


FIGURA 4.2 EQUIPO BÁSICO Y ESQUEMATIZACIÓN DEL PROCEDIMIENTO BÁSICO PARA EL MEJORAMIENTO DE SUELOS MEDIANTE VIBROFLOTACIÓN

El proceso de densificación comienza cuando al vibroflot se le hace funcionar su masa excéntrica e inicia el retorno a la superficie por intervalos de 30 a 40 centímetros, alcanzando en cada etapa la densidad del suelo que se requiere. Simultáneamente, se le va agregando material granular por el borde del cono que se forma debido a la pérdida de volumen por densificación y para reemplazar el suelo barrido por los chiflones. En suelos arenosos limpios debe agregarse material de relleno del orden de 0.3 a 1.9 m³ por metro de profundidad. Con el paso del vibrador operando, al mismo tiempo se van compactando el suelo y el material granular que se usa como relleno. La figura 4.3, muestra la anatomía de una zona densificada.

La interacción del vibroflot y el suelo que lo rodea es muy compleja, especialmente cuando se introducen agua y relleno granular en el orificio durante la vibración. Una ilustración conceptual de esta interacción y los esfuerzos inducidos en la masa de suelo pueden observarse en la figura 4.5. Se muestra, que los impactos horizontales causan un esfuerzo o tensión radial y un esfuerzo lateral en el suelo, resultando en un esfuerzo cortante.

Además, el movimiento de torsión del vibroflot produce un esfuerzo cortante en el suelo. Ambos, el esfuerzo desviador, y el esfuerzo cortante contribuyen al rompimiento de la estructura del suelo, facilitada por el agua, lo que reduce el esfuerzo efectivo de confinamiento del suelo.

Cuando se requiere que grandes áreas sean densificadas por este medio, los puntos de aplicación son alineados en patrones triangulares o en cuadrícula (Figura 4.6). La distancia entre los puntos de compactación varía de 1 a 3 metros, dependiendo del tipo de suelo, tipo del relleno que se va a emplear, tipo de vibrador a emplear y energía, y el nivel de tratamiento deseado.

Como fue descrito por los investigadores Brown en 1977 y D'Appolonia en 1953, para vibradores con motores eléctricos, la corriente que alimenta a este elemento es el mejor indicador del proceso de compactación. Como lo han mencionado, la corriente eléctrica aumenta a medida que el suelo se densifica, debido a que se vuelve más difícil el movimiento para el vibrador. Cuando la corriente llega al máximo especificado para el motor, el vibroflot es movido a la siguiente etapa, ya que se ha alcanzado la compactación deseada. En esta nueva etapa del proceso de densificación, la corriente se desploma ya que el suelo no ejerce mucha resistencia al movimiento del vibroflot, entonces, la compactación en este punto inicia de nuevo.

Resultados del tratamiento aplicado a diversos tipos de suelos pueden ser observados en la tabla 4.6, donde se aprecian valores de resistencia previos al tratamiento y el incremento en la resistencia del terreno en tratamientos realizados a nivel mundial.

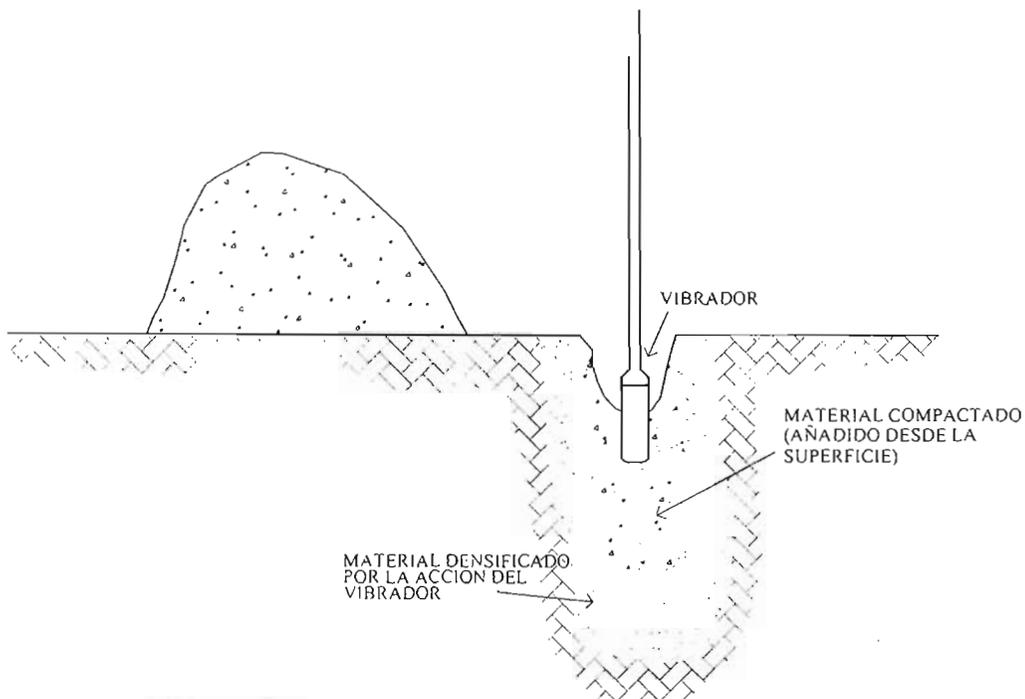
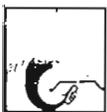


FIGURA 4.3 ZONAS DENSIFICADAS DURANTE EL PROCEDIMIENTO DE VIBROFLOTACIÓN

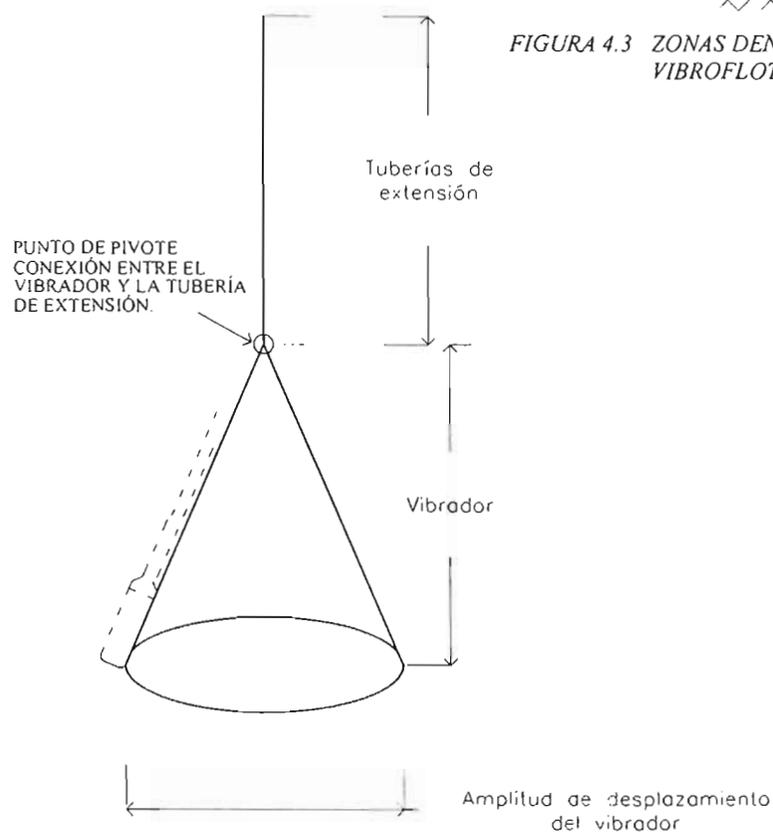


FIGURA 4.4 MOVIMIENTO CÓNICO DEL VIBRADOR DENTRO DE LA MASA DE SUELO

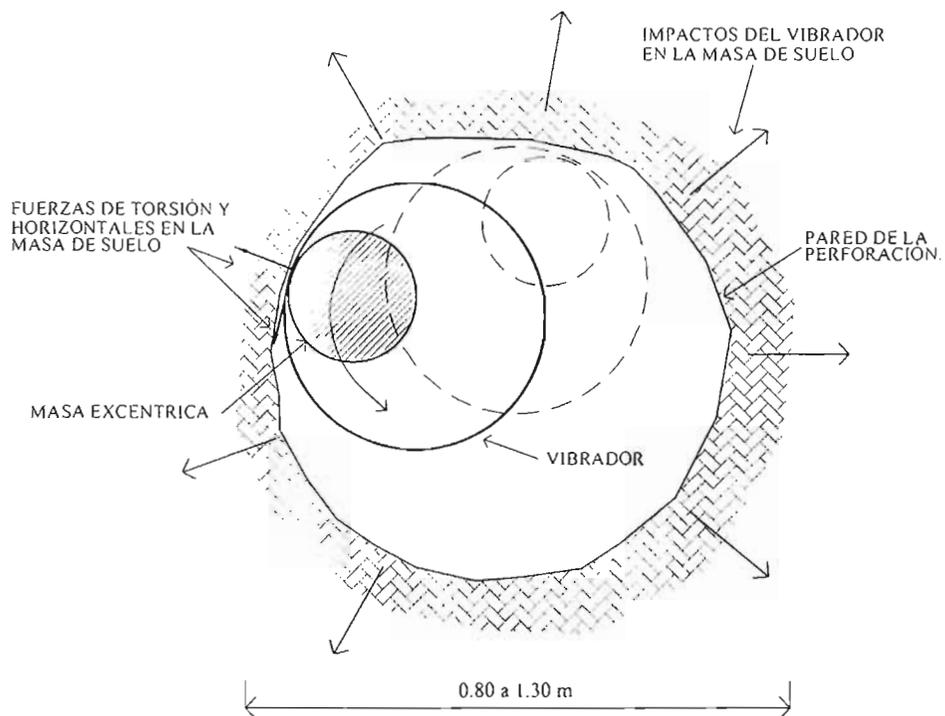


FIGURA 4.5 ACCIÓN DEL VIBROFLOTADOR DENTRO DE LA MASA DE SUELO Y EFECTO DE LAS FUERZAS PRODUCIDAS POR EL EQUIPO. DIÁMETROS COMUNES DE LA COLUMNA DE SUELO DENSIFICADA.

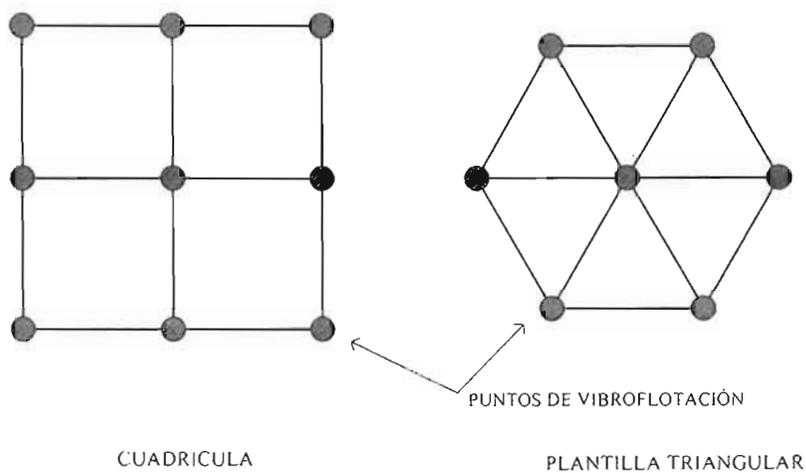
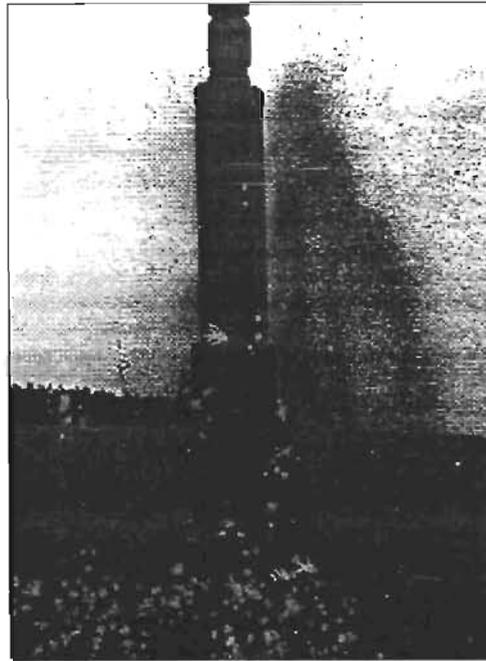


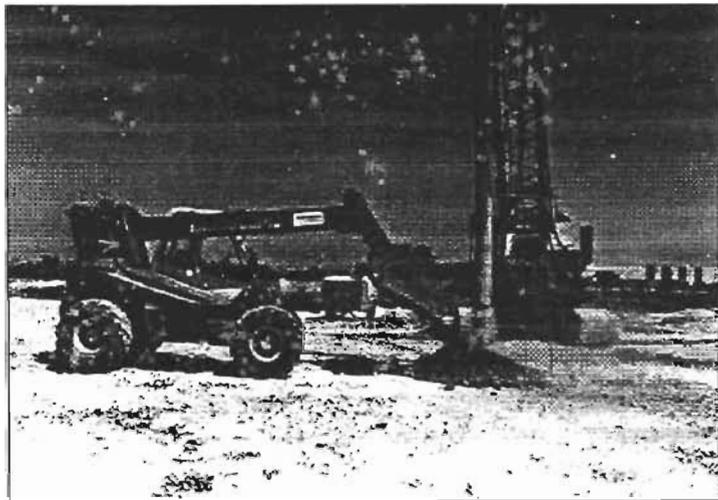
FIGURA 4.6 ACOMODO TÍPICO DE LOS PUNTOS DONDE SE REALIZARÁ EL MEJORAMIENTO CON VIBROFLOTACIÓN



a)



b)



c)

FIGURA 4.7 DIFERENTES MOMENTOS EN EL MEJORAMIENTO DE SUELOS MEDIANTE VIBROFLOTACIÓN
a), b) INICIO DEL HINCADO DEL VIBROFLOTADOR
c) RETIRO DEL EQUIPO Y COLOCACIÓN DE RELLENO DENTRO DE LA PERFORACIÓN INDUCIDA
POR LA ACCIÓN DEL VIBROFLOTADOR



4.2 Jet Grouting.

La técnica de inyección con chorros a presión, o Jet Grouting, fue desarrollada en Japón al principio de los años 70's. Al final de esa década, llegó a Europa, y aproximadamente en 1980 llegó a los Estados Unidos. Al principio, fue desarrollada para su uso en problemas convencionales de ingeniería civil, como en el mejoramiento de las condiciones de soporte en excavaciones. A partir de ese momento, la técnica de Jet Grouting ha sido usada alrededor del mundo no solo como soporte en excavaciones, sino también para controlar el flujo de agua en el suelo, en el apuntamiento de cimentaciones existentes, para el reforzamiento de suelos con probabilidades de licuación y en general para mejorar la resistencia mecánica en suelos que van a servir de apoyo a estructuras.

Algunas de las experiencias obtenidas con esta tecnología se resumen en la tabla 4.1, que muestra el tipo de suelo que se trató, el programa escogido y el motivo por el cual se seleccionó este método.

TABLA 4.1 BREVE HISTORIA DEL MEJORAMIENTO DE SUELOS MEDIANTE JET GROUTING

Lugar	Características del lugar	Razones para seleccionar el método	Programa de construcción
Edificio. Charleston USA. 1991	Arenas finas	Estructuras existentes y área de trabajo limitada	Confinar la arena con una serie de columnas suelo – cemento traslapadas alrededor del perímetro.
Planta industrial. Sacramento CA. 1994	Cimentación a base de pilotes de madera descompuestos en arena suelta y arenas limosas	Estructuras existentes	Encapsular la cimentación anterior para prevenir asentamientos y daños por licuación.
Estación de tránsito. Taiwan. 1993	Capa de grava densa, espesor de 2 a 6 metros. Arenas limosas, sueltas a medianamente densas con espesores entre 8 y 26 metros.	Cercano a edificios residenciales	Columnas de suelo – cemento – silicato de sodio, con una profundidad de 14 metros y espaciadas 2 metros.

El Jet Grouting difiere substancialmente de otras técnicas de inyección en que esta rompe la estructura del suelo completamente por medio de chorros de fluidos a alta presión y mezcla las partículas con un agente cementante para crear una masa homogénea que con el tiempo solidifica. La figura 4.8, muestra todo el proceso de mejoramiento de un suelo por medio de esta técnica.

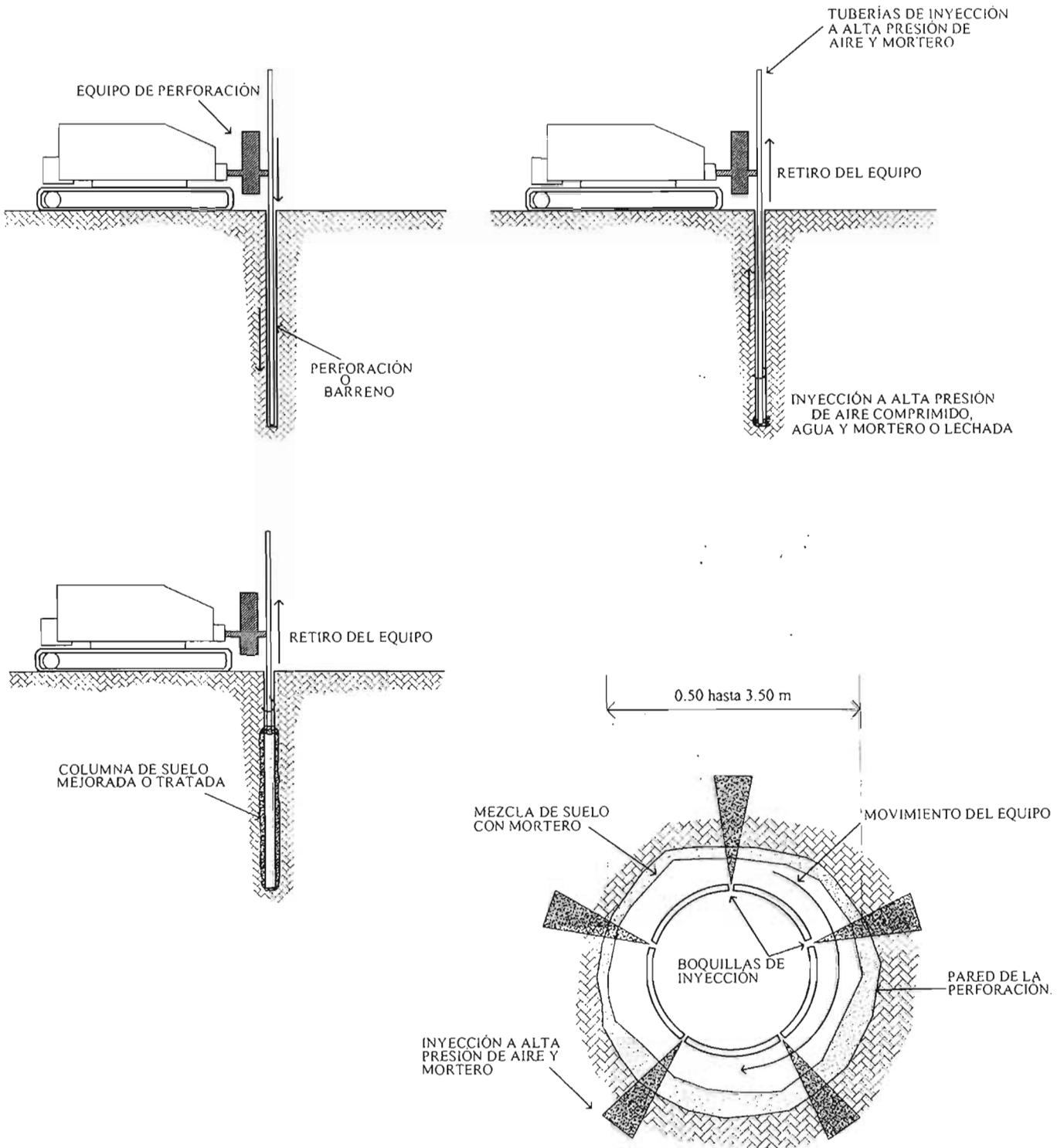


FIGURA 4.8 PROCEDIMIENTO PARA EL TRATAMIENTO DE SUELOS MEDIANTE JET GROUTING Y ACCIÓN DEL EQUIPO DENTRO DE LA MASA DE SUELO

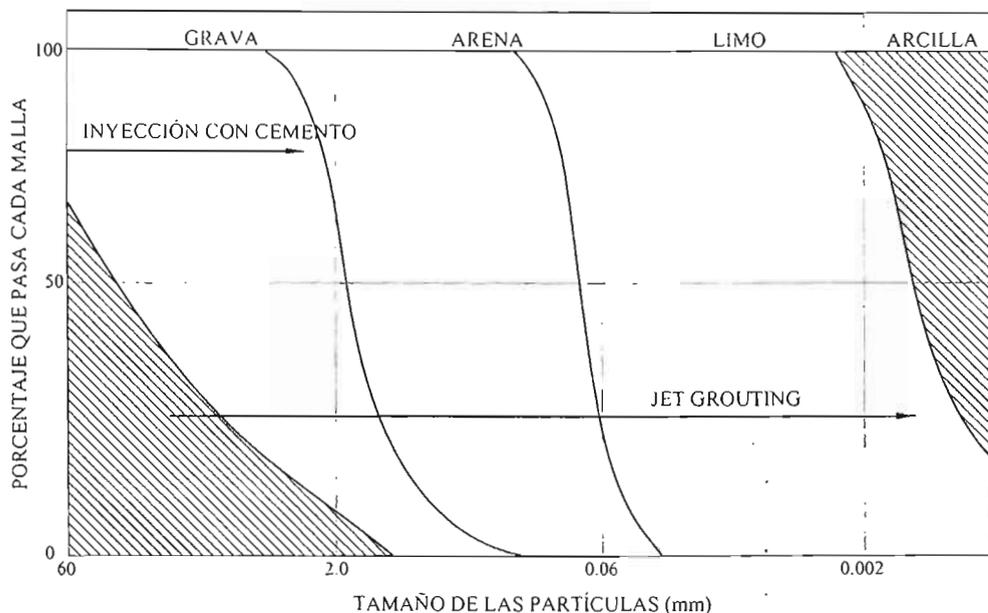


FIGURA 4.9 RANGO DE SUELOS APROPIADO PARA EMPLEO DE JET GROUTING Y COMPARACIÓN CON EL RANGO DE SUELOS APROPIADO PARA EL EMPLEO DE INYECCIÓN DE CEMENTO

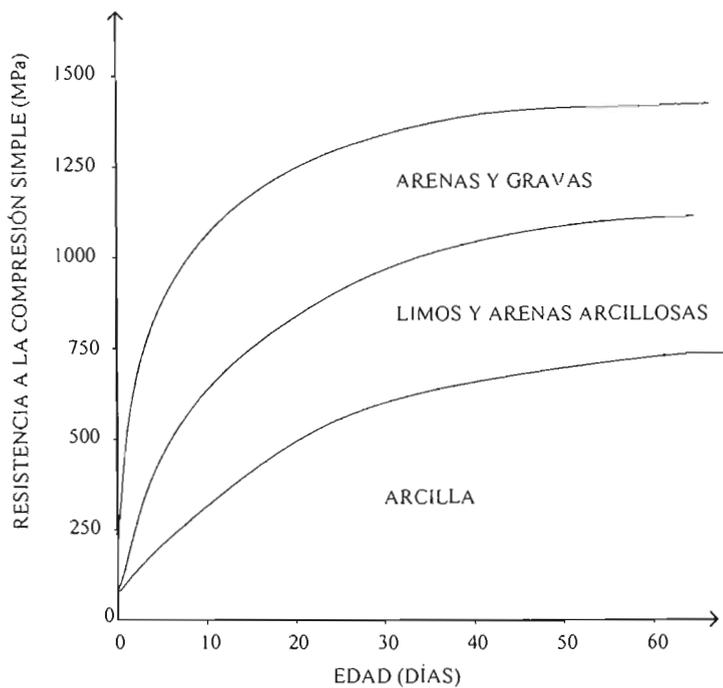


FIGURA 4.10 RESISTENCIAS TÍPICAS DE ESPECIMENES OBTENIDOS DE COLUMNAS DE SUELO - CEMENTO CONSTRUIDAS CON LA TÉCNICA DE JET GROUTING



El detalle de cómo actúa el método sobre la masa de suelo puede observarse en la Figura 4.8b.

La técnica, puede ser usada independientemente del tipo de suelo, permeabilidad, distribución de las partículas de suelo, etc. En teoría, por consiguiente, es posible su aplicación para tratar la mayoría de los suelos, desde arcillas suaves y limos, hasta suelos gruesos, como arenas y grava (figura 4.9), sin embargo, el conocimiento del tipo y condición del suelo es fundamental, ya que estos factores afectan el resultado del tratamiento. En suelos arenosos, la estructura de estos es más fácil de romper que en suelos arcillosos, así, el ancho de la zona tratada será menor en las arcilla que en las arenas. Suelos con partículas grandes, limitan el alcance de la inyección y, en suelos altamente permeables, como gravas mal graduadas, el mortero inyectado puede fluir hacia fuera de la zona que se desea tratar.

La humedad del suelo incrementa la cantidad de agua en la mezcla de suelo – cemento que se forma, resultando en resistencias más bajas, por lo cual, debe considerarse como un factor importante que se debe cuidar, al igual que el agua subterránea, que puede atacar químicamente a la lechada o apartarla de la zona debido a infiltraciones.

La resistencia de las columnas de suelo – cemento dependerá directamente del tipo de suelo. Como se muestra en la gráfica de la figura 4.10, los suelos que reaccionan mejor a este tratamiento, obteniendo resistencias más elevadas, son los suelos gruesos, como las arenas y las gravas.

Aunque con este método es posible inyectar cualquier tipo de lechada, en la práctica, mezclas agua – cemento, o agua – cemento – bentonita, son usadas normalmente. Cuando el suelo tiene muchos vacíos, se puede emplear ceniza volátil como relleno; también, cuando se requiere que el mejoramiento tenga resultados rápidos, se puede añadir a la mezcla silicato de sodio para que sea más rápido el proceso de fraguado.

El Jet Grouting puede realizarse principalmente por medio de tres sistemas, el sencillo o “monofluido” (solamente la lechada que se va a emplear en la inyección); por medio de 3 fluidos o “Kajima” (lechada, aire y agua) y por dos fluidos (aire o agua y mortero), siendo los dos primeros los más empleados.

4.2.1 Sistema de monofluido.

Una bomba de alta presión transmite la lechada a través de una tubería dentro del taladro de perforación hasta una serie de boquillas colocadas justo arriba de la broca. Los chorros a alta presión que salen del equipo, rompen la estructura del suelo y lo mezclan con la lechada, creando una columna de material estabilizado con diámetros de 40 a 120 centímetros.



El equipo a emplear con este método es el siguiente:

- Una bomba que proporcione alta cantidad de flujo a altas presiones (70 Mpa, 300 lt./seg).
- Equipo de perforación y equipo especial para el inyectado, con adaptaciones especiales para la tubería de la lechada. La broca empleada en este método, tiene boquillas u orificios que permiten la salida del mortero. El diámetro y el número de estas puede variar según los resultados deseados.
- Una planta de mezclado con suficiente capacidad para la lechada.

El procedimiento constructivo con este sistema se realiza de la siguiente manera:

El orificio es perforado a la profundidad deseada por equipo rotatorio o de percusión, usando agua, aire comprimido o el mismo mortero como medio para limpiar las paredes del orificio. Cuando se alcanza el nivel deseado, los puertos por donde sale el material de limpieza son cerrados, y el mortero o lechada es bombeada a presiones muy altas (20 a 70 Mpa) a través de las boquillas. Simultáneamente, el taladro rota e inicia lentamente su regreso a la superficie. La velocidad de rotación del taladro puede ser de 10 a 20 rpm, y el ascenso se realiza aproximadamente de 20 a 50 cm/seg. En este momento, la estructura del suelo se rompe y se mezcla, debido a los chorrós de mortero o lechada inyectados a presión. Con el movimiento rotatorio y ascendente del taladro se va formando la columna ya estabilizada que se mencionó anteriormente.

Este es en general el método más versátil, ya que puede ser realizado en cualquier inclinación y en la estabilización de estructuras y túneles donde el espacio es reducido, además de que es más rápido, barato, limpio y menos ruidoso.

4.2.2 Sistema de tres fluidos o Kajima.

La diferencia entre este sistema y el de monofluido es que se emplea un chorro de agua a alta presión antes que el chorro de mortero. La entrada del chorro de agua a través del suelo es ayudada por una aureola de aire comprimido concéntrico alrededor del chorro. El aire comprimido tiene dos funciones, incrementar el radio de influencia del chorro de agua y aligerar la mezcla de suelo y agua en la zona de influencia del chorro, creando un empuje que bombea el exceso de agua y partículas finas a través del espacio anular que existe entre la pared del orificio y el equipo de perforación. Al mismo tiempo, el mortero es inyectado dentro de la mezcla suelo – agua a través de una boquilla colocada justo debajo de la que inyecta la mezcla aire – agua. El mortero es inyectado con una presión de aproximadamente 5 Mpa.

El equipo es casi el mismo que en el sistema de monofluido, pero la diferencia radica en la línea de alimentación de la lechada, ya que se necesitan tres líneas en vez de una: una para la lechada, una para el aire y una para el agua. Se emplean además dos bombas con



diferente potencia, una de flujo alto y alta presión para el chorro de agua (70 Mpa, 300 lt/seg.) y otra de baja presión para el mortero (7 Mpa, 120 lt/seg.).

El proceso de perforación es similar al del sistema anterior, pero el fluido que limpia el orificio es inyectado a través de la boquilla del mortero.

Una vez que se llegó a la profundidad deseada, el aire y el agua son inyectados a través de sus respectivas líneas para romper la estructura del suelo mientras rota el perforador y empieza el empuje del aire, desplazando las partículas finas de suelo y el exceso de agua. El mortero es inyectado y se va apartando el taladro lentamente sin dejar de girar, construyendo de esta manera, la columna de “suelocreto” o suelo – cemento. Las columnas de suelo estabilizado obtenidas con este método pueden llegar a ser hasta de dos metros o más.

El método de tres fluidos es mejor cuando se requiere tratar lugares donde el suelo es difícil de perforar y cuando se requiere un mismo volumen de tratamiento con orificios pequeños. Desgraciadamente es más complejo, y el tratamiento con este sistema resulta en una gran cantidad de material descargado en el orificio. De esta manera, el sistema se vuelve costoso y es difícil de aplicar en áreas restringidas, pero especialmente en zonas donde el suelo tiene baja permeabilidad.

La diferencia fundamental entre los dos métodos es el diámetro resultante de la columna estabilizada, y por consiguiente, el volumen de suelo tratado. Para ambos, unos de los factores de más importancia y que más influyen en el diámetro final de la columna estabilizada es el tiempo en el que es sacado el equipo. Las gráficas de las Figuras 4.11 y 4.12, muestran que para obtener un diámetro grande, la razón en que el equipo empleado se va retirando debe ser bajo. De la misma manera, en cuanto el equipo es apartado rápidamente, el diámetro de las columnas obtenidas será notablemente pequeño. Las diferentes líneas mostradas, indican diferentes presiones de inyectado.

La gráfica de la figura 4.11, muestra la variación en el diámetro de las columnas dependiendo de la velocidad en que es retirado el equipo, pero con diferentes sistemas de inyectado (sencillo, triple) y en la gráfica de la figura 4.12 se observa la variación del diámetro de la columna tratada dependiendo de la velocidad de retiro, pero para diferentes materiales y a diferentes presiones de chorro.

Por último, el número y espaciado de los orificios inyectados son factores importantes que contribuyen al desempeño general del suelo mejorado por Jet Grouting. Cuando las columnas estabilizadas están muy separadas, existirán zonas sin tratar, que presentarán problemas semejantes a los que hubiera si no se realizara la inyección. El espaciamiento ideal entre los orificios debe ser de aproximadamente 60 centímetros (24”) y debe ser medido o considerado de borde a borde.

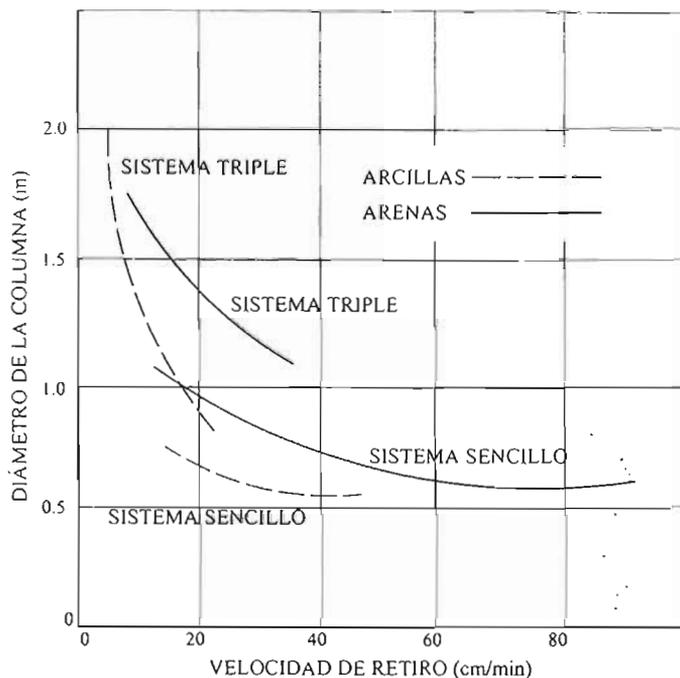


FIGURA 4.11 VARIACIÓN EN EL DIÁMETRO DE LAS COLUMNAS DE JET GROUTING CON LA VELOCIDAD DE RETIRO DEL EQUIPO, EN DIFERENTES TIPOS DE SUELOS

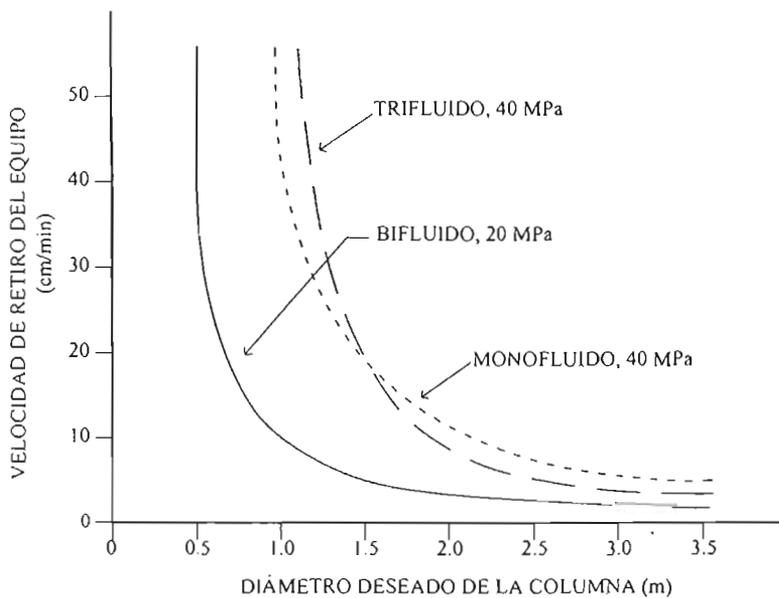


FIGURA 4.12 VARIACIÓN EN EL DIÁMETRO DE LAS COLUMNAS DE JET GROUTING CON LA VELOCIDAD DE RETIRO DEL EQUIPO Y AL SISTEMA DE CHORRO A PRESIÓN EMPLEADO

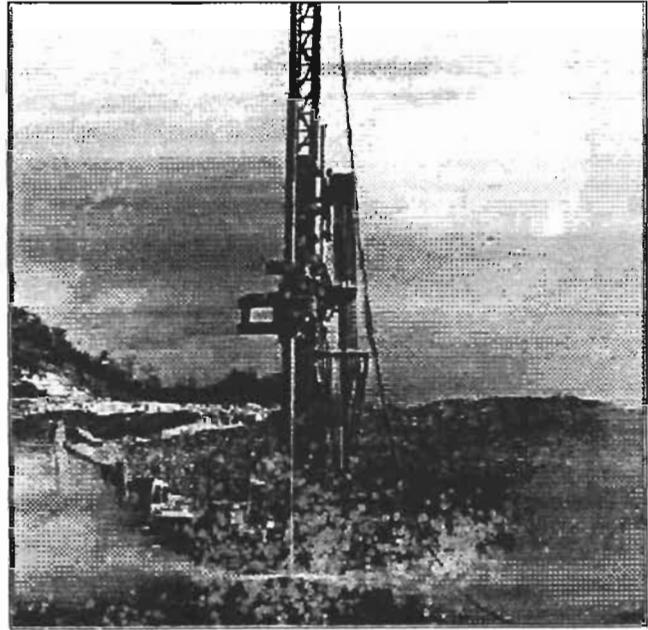
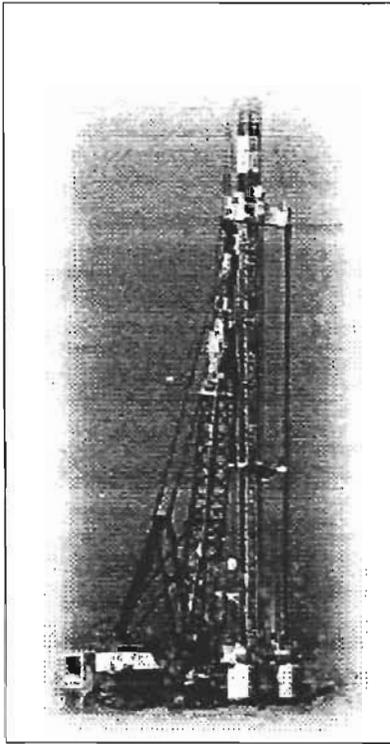


FIGURA 4.13 EQUIPO EMPLEADO EN EL MÉTODO DE JET GROUTING Y COLUMNAS DE SUELO MEJORADO



4.3 Inyecciones.

El método se define como la inyección de materiales fluidos en los vacíos del suelo o de un macizo rocoso, o también simplemente como la inyección empleada para llenar los huecos que existen entre estructuras ya construidas y el suelo sobre el cual se están apoyando, como por ejemplo las juntas en pavimentos de concreto.

Históricamente, la inyección de suelos y rocas en obras de Ingeniería civil, tiene una antigüedad de más de 300 años. En ese entonces, la inyección de cemento, cal y arcillas empezaba a ser usada para reparar muros de mampostería, llenar fisuras de estructuras y sellar fracturas en rocas para evitar el flujo de agua. Inicialmente, la mezcla empleada en este proceso solo constituía de un material que era combinado con un reactivo antes de la inyección. El reactivo era seleccionado o diseñado de acuerdo al tiempo requerido de fraguado de la lechada de inyección, el cual podía ser de minutos hasta horas.

El adelanto en los métodos de inyección se debe en gran parte al desarrollo de la tecnología de mezclado y bombeo. Uno de los avances más importantes lo tuvo H.J. Jootsen, en 1925, cuando bombeó a través de dos tuberías separadas cloruro de sodio y silicato de sodio en arenas finas. El resultado fue la estabilización del suelo por la reacción inmediata de estos químicos dentro de la masa de suelo.

4.3.1 Aplicaciones.

La inyección de lechadas se ha estado practicando desde hace años, pero su aplicación es mayor en tratamiento de rocas que para suelos. Esto es debido a limitaciones prácticas impuestas por la viscosidad y el tamaño de las partículas y su penetración. La figura 4.14 muestra las aplicaciones típicas en obras civiles, como son cortinas de inyecciones, estabilización de excavaciones para túneles, relleno de cavernas o cavidades, etc.

Los métodos descritos en la figura 4.14, como ya se mencionó, se han desarrollado principalmente en roca y pueden, o no, ser aplicables en el tratamiento de suelos.

La inyección de suelos, es usualmente realizada para reducir o detener el movimiento de agua y para incrementar la capacidad de carga del suelo, lo cual conlleva a una disminución de los asentamientos y una mejoría en la resistencia contra la erosión. El término suelo, en este caso, incluye materiales granulares sin consolidar, desde arcillas, limos, arenas finas, medianas y gruesas; hasta gravas finas. La tabla 4.2 muestra la capacidad de inyectabilidad de los suelos, la cual es la habilidad que tiene este para recibir a la lechada, y depende de la permeabilidad del suelo y la viscosidad de la lechada. Suelos con permeabilidades menores a 10^{-6} cm/s no pueden ser tratados con inyecciones, y suelos con permeabilidades mayores que 10^{-1} requieren lechadas en suspensión o lechadas químicas que contengan algún relleno. Los limos y las arcillas son muy difíciles de inyectar, y en muchas ocasiones



imposibles. En esta propiedad existe una relación entre la permeabilidad del suelo y la viscosidad de la lechada. Típicamente, mezclas con altas viscosidades sirven mucho mejor para suelos con permeabilidades altas, mientras que lechadas con una viscosidad baja, son necesarias cuando el suelo tiene una permeabilidad baja.

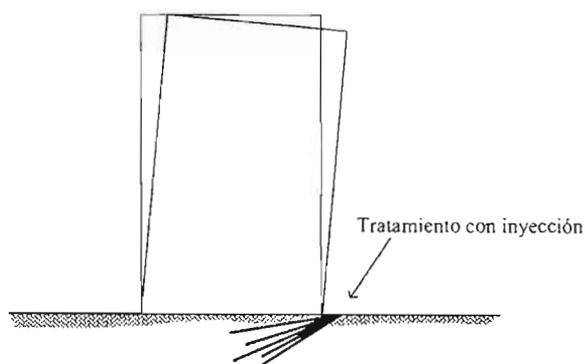
TABLA 4.2 CAPACIDAD DE INYECTABILIDAD DE SUELOS¹.

Permeabilidad del suelo (cm/seg)	Inyectabilidad
$\leq 10^{-6}$	<i>Imposible de inyectar</i>
10^{-3} a 10^{-6}	<i>Inyectable, con dificultad para lechadas con viscosidad menor a 5 cP (centiposes). No inyectable para lechadas con viscosidad mayor a 5 cP (centiposes).</i>
10^{-3} a 10^{-6}	<i>Inyectable con lechadas con viscosidad baja, pero difícil para lechadas con una viscosidad mayor a 10cP (centiposes)</i>
10^{-1} a 10^{-3}	<i>Inyectable con todos los químicos usados en lechadas.</i>
$\geq 10^{-1}$	<i>Requiere lechadas en suspensión o lechadas químicas que contengan un material de relleno</i>

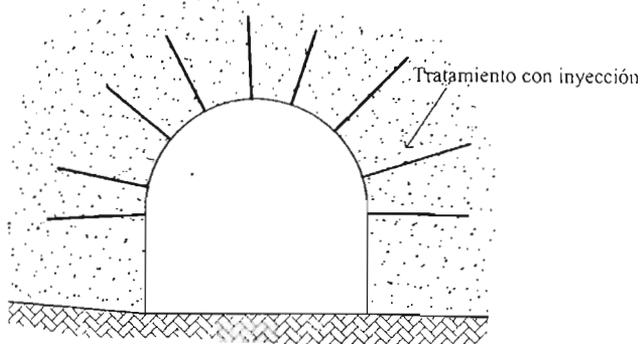
La clasificación granulométrica de los suelos también puede ser un indicativo de que tipo de lechadas se requieren para cada suelo en particular. Como se puede observar en la tabla 4.3, la inyección de arcillas y limos si se puede realizar, pero más que llenar los huecos, la lechada tendrá un efecto de compactación o desplazamiento del material. La tabla 4.4 muestra los tipos de lechadas más comunes empleadas en trabajos relacionados con inyecciones en suelos; la figura 4.15 muestra la comparación de las lechadas y el rango de aplicabilidad, dependiendo del material a inyectar¹⁷.

TABLA 4.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS LECHADAS DE INYECCIÓN SEGÚN EL TIPO DE SUELO¹.

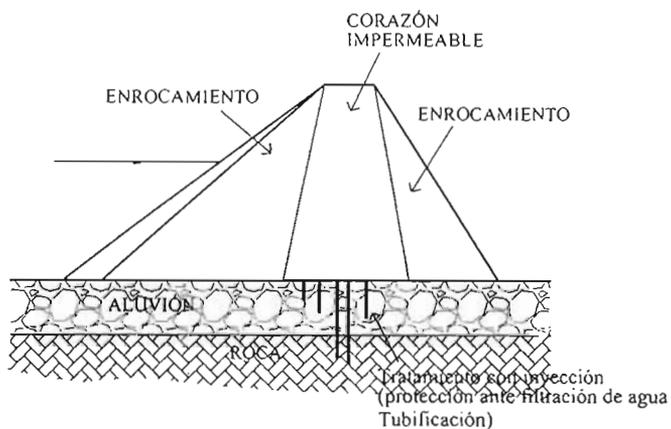
Tipo de suelo	Tratamiento más adecuado
Arcillas y limos finos	<i>La inyección en estos materiales solo puede desplazar los granos por la penetración de la lechada en planos débiles para formar lentes o por la compactación de los materiales al formar bulbos de lechada. Este tipo de lechadas puede realizarse usando cemento o proporcionando cemento con otros sólidos finos</i>
Limos medianos a gruesos y arenas finas	<i>Materiales granulares a través de los cuales se puede mover el agua con relativa facilidad, por lo cual pueden aceptar lechadas químicas con baja viscosidad para rellenar vacíos y formar una masa relativamente consolidada.</i>
Arenas gruesas y gravas.	<i>La inyección de lechadas de cemento de alta viscosidad y altamente fluidas son aceptables para el tratamiento de estos materiales.</i>



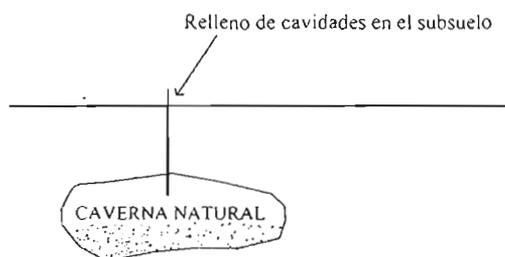
RENIVELACIÓN DE ESTRUCTURA O REFUERZO EN LA CIMENTACIÓN



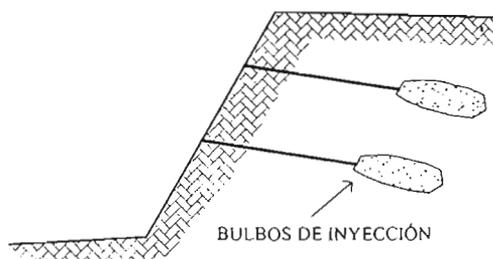
INYECCIÓN PARA LA COLOCACIÓN DEL REFUERZO EN TUNELES Y CONTENCIÓN DE EXCAVACIONES SUBTERRANEAS



CORTINA DE INYECCIONES BAJO UNA PRESA



INYECCIÓN PARA RELLENO DE CAVERNAS SUBTERRÁNEAS O MINAS



INYECCIÓN PARA ANCLAJE EN ESTABILIZACIÓN DE TALUDES DE CORTES

FIGURA 4.14 EMPLEO COMUN DE LAS INYECCIONES EN SUELOS EN OBRAS DE INGENIERÍA CIVIL



ESTADO									
	Suspensiones			Líquidas			Emulsiones Aereadas		
	Inestables		Estables	Productos químicos					
Tipo de mezcla	Cemento	Cemento + Bentonita	Bentonita Defloculada	Gel firme de silicato de sodio	Gel diluido de silicato de sodio	Resinas orgánicas	Espumas cementadas	Espumas orgánicas	
Rango de uso	Fisuras	Arenas y gravas, k (m/s)						Cavidades	Flujo de agua importante
		$> 5 \times 10^{-4}$	$> 10^{-4}$	$> 10^{-4}$	$> 10^{-5}$	$> 10^{-6}$			
Control en proceso	Presión de rechazo	Cantidades limitadas					Llenado		
Costo relativo del producto para llenar vacíos de 1 m ³	4.2 (depositos con $\gamma_d = 1.5$)	1 (cemento 200 kg; bentonita 30 kg)	0.8 - 1	6	2 - 4	10 - 500	1.2	10	

TABLA 4.4 TIPOS PRINCIPALES Y CAMPO DE APLICACIÓN DE MEZCLAS PARA INYECCIÓN EN SUELOS.

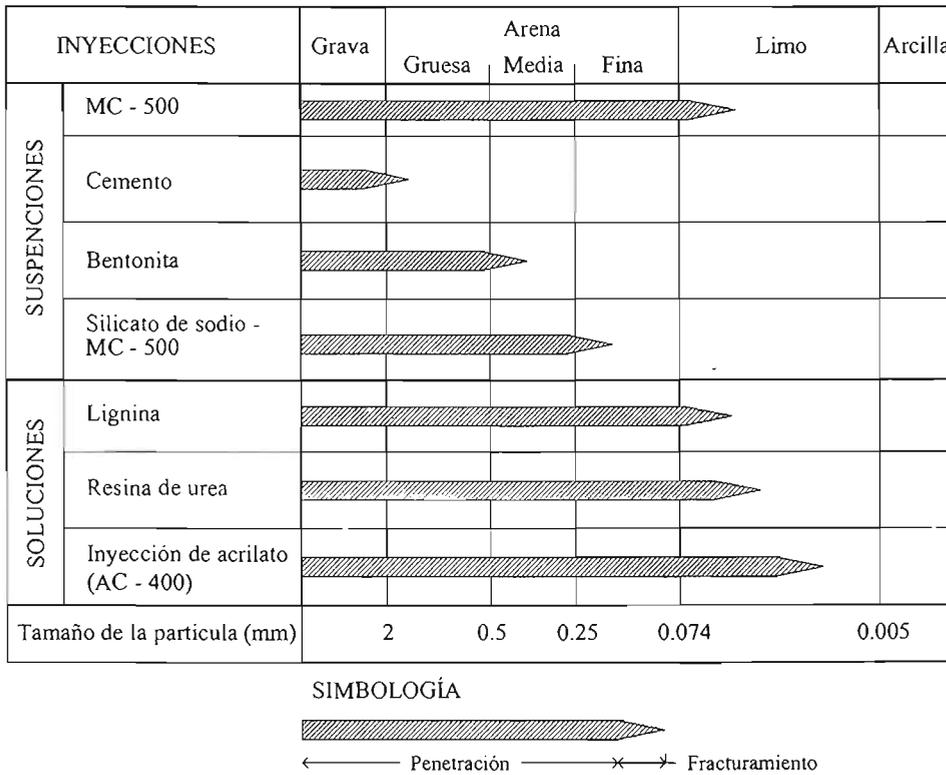


FIGURA 4.15 COMPARACIÓN DE LA PENETRABILIDAD DE DIFERENTES MATERIALES EMPLEADOS EN MEZCLAS DE INYECCIÓN PARA SUELOS.



4.3.2 Limitaciones.

Las limitaciones para la aplicación de este método de mejoramiento de suelos o de rocas, pueden agruparse en dos categorías, las referentes a la naturaleza física de los materiales de inyección y a las propiedades físicas y químicas de los materiales con los que tendrá contacto la lechada. Por otro lado, están las operaciones y métodos involucrados en el proceso y proyecto de inyección.

Dentro de la primer categoría, se deben considerar las siguientes limitaciones:

- a. Tamaños máximos y mínimos de los vacíos del suelo o el macizo rocoso, así como la geometría de estos huecos.
- b. Tamaño de las partículas de cemento, bentonita o cualquier material constitutivo de la mezcla o lechada de inyección.
- c. La presencia de minerales en el agua subterránea, que deben ser considerados al tener un efecto negativo en la resistencia de la lechada, tiempo de fraguado o en la permanencia.
- d. Posible incompatibilidad de los materiales usados en la mezcla.
- e. La presencia de arcilla u otros materiales indeseables en los hoyos de inyección que no pudieron ser removidos con el lavado.
- f. Asentamiento de las partículas de cemento en la mezcla antes de llegar a la profundidad de tratamiento deseada.
- g. La presencia de condiciones climáticas negativas que afectan el programa de inyectado y los materiales empleados.

Las limitaciones relacionadas con las operaciones de campo y métodos empleados incluyen¹:

- a. Levantamientos y daños a cimentaciones de estructuras cercanas debido a altas presiones empleadas.
- b. Uso de equipo de perforación e inyectado inapropiado para las condiciones y características del material a tratar.
- c. Un inapropiado espaciamiento u orientación de los agujeros de inyección.
- d. Fallas relacionadas por manejo de la maquinaria.

4.3.3 Mezclas de inyección.

4.3.3.1 Propiedades.

Dentro de las propiedades más importantes que debe cumplir una lechada de inyección, para que el resultado del proceso sea aceptable, se consideran las enumeradas en la tabla 4.5:



TABLA 4.5 PROPIEDADES QUE DEBEN CUMPLIR LAS MEZCLAS EMPLEADAS EN INYECCIÓN DE SUELOS O ROCAS¹⁷.

Estabilidad	<p>Una mezcla se considera estable si sus partículas permanecen en suspensión en la solución que las contiene hasta que hallan alcanzado su profundidad de destino en el suelo o en la roca. Si ocurre sedimentación de estas partículas tan pronto como se deje de agitar el mezclador, la mezcla será considerada como inestable.</p> <p>Mezclas con solamente cemento se catalogan como inestables, debido a que la separación de las partículas sólidas del líquido es muy alta; la adición de bentonita mejora la estabilidad de inyecciones de cemento si se realiza el proceso de mezclado a alta velocidad.</p>
Tiempo de fraguado.	<p>El tiempo de fraguado es el tiempo requerido para que la mezcla endurezca. Mezclas basadas solamente en cemento tardan en fraguar de 4 a 24 horas, dependiendo de los aditivos que se emplearon. Este tiempo puede ser un factor crítico, ya que para inyecciones con químicos más agresivos, el tiempo en el que las mezclas endurecen es muy rápido, llegando a ser en ocasiones hasta de minutos.</p>
Permanencia.	<p>La permanencia es la resistencia contra la deterioración mecánica debida a ciclos de humedad y secado. Esta, se ve amenazada por el desplazamiento hidráulico o erosión por infiltración a través de vacíos dejados después de un inadecuado inyectado o una contracción y consolidación de la propia inyección.</p>
Toxicidad.	<p>Se refiere a peligros en la salud debidos al manejo de la lechada y sus efectos en el agua subterránea. Desafortunadamente, químicos empleados en lechadas que ofrezcan una alta resistencia y una alta permanencia, casi siempre presentan también grandes riesgos respecto al manejo, contaminación de los mantos acuíferos y contaminación.</p>
Viscosidad.	<p>La viscosidad es la propiedad de un fluido de resistirse al flujo. La unidad de medida común son los centiposes (cP).</p> <p>Esta propiedad es importante ya que determina la habilidad de una lechada a fluir dentro de los espacios de un suelo. De esta manera, la fluidez de una lechada está íntimamente relacionada con la permeabilidad o conductividad hidráulica. Por ejemplo, si se tiene un suelo con una permeabilidad de 10^{-4} cm/seg, la viscosidad de la lechada a emplear deberá ser mayor a 2 cP. Lechadas con viscosidades de 5 cP pueden emplearse para suelos con permeabilidades de 10^{-3} cm/seg.</p> <p>En el lugar donde se llevan a cabo operaciones de inyectado, esta se puede verificar midiendo el tiempo requerido por cierta cantidad de lechada para atravesar un embudo estandarizado. El más popular es el cono Marsh, que da</p>



	<p>un rango aceptable de 32 a 40 segundos. El tiempo que se mide es usualmente el que tardan los primeros 1000 mL.</p>
Tixotropía y reopexia.	<p>La tixotropía es un fenómeno que aparece en ciertas mezclas. Consiste en el aumento de viscosidad al disminuir la velocidad de circulación del fluido; el fenómeno contrario es la reopexia, donde la viscosidad disminuye cuando se incrementa la velocidad.</p> <p>La tixotropía es la más importante, ya que permite que a velocidades altas la lechada penetre y que finalmente al disminuir adquiera una viscosidad suficiente para evitar la decantación de la mezcla.</p> <p>La reopexia, por su parte puede provocar obstrucciones en la tubería durante la inyección.</p>

4.3.3.2 Características de las mezclas.

Además de las propiedades que deben cumplir las mezclas, estas deben de tener las siguientes características.

- La mezcla debe ser capaz de modificar las propiedades del suelo como se desee, usualmente en el incremento de la resistencia y la disminución de la permeabilidad.
- Las mejoras pueden ser temporales, pero generalmente se buscan efectos permanentes.
- La mezcla debe ser capaz de penetrar el medio a tratar, teniendo una granulometría suficientemente fina.
- Es conveniente que la lechada tenga una viscosidad baja para obtener la mejor penetración y facilitar el bombeo. La viscosidad debe permanecer uniforme hasta que ocurra la reacción estabilizadora.
- La lechada debe ser relativamente insensible a las impurezas del agua o del suelo.
- El proceso debe ser irreversible.
- Las mejoras que se obtengan en las propiedades de un suelo no deben de disminuir con el tiempo.
- Los productos químicos no deben ser corrosivos al equipo, tóxicos o explosivos.
- Los materiales y métodos deben de ser lo suficientemente económicos para justificar el uso de la mezcla en sustitución de otros posibles medios para obtener resultados equivalentes.
- Que sean altamente fluidas para que puedan inyectarse bajo la presión proporcionada por una bomba.



4.3.4 Materiales empleados.

Entre los materiales que son empleados para fabricar mezclas de inyección, los más comunes son:

4.3.4.1 Cemento Pórtland.

El uso de los diferentes tipos de cemento Pórtland existentes, dependerá en gran medida del tipo de material en el cual se va a inyectar y sus características y puede subdividirse como sigue.

- a. Tipo I. Es aceptado en la mayoría de los proyectos de inyección mientras no se requieran características especiales como baja viscosidad.
- b. Tipo II. Se usa para que la lechada resiste bien el ataque moderado de sulfatos y para generar un nivel del calor de hidratación más lento.
- c. Tipo III. Se emplea cuando se requiere rápidamente alta resistencia. También se usa cuando se realizan reparaciones de emergencia. El tamaño de sus partículas es pequeño, por lo cual se emplea para inyectar fracturas pequeñas.
- d. Tipo IV. Se considera cuando se va a emplear mucha lechada de inyección, ya que genera menos calor que el tipo II.
- e. Tipo V. se emplea cuando el suelo o el agua subterránea con los que tendrá contacto la lechada tienen gran cantidad de sulfatos.

4.3.4.2 Aleaciones o mezclas.

Cualquier material que no sea agua, agregados finos o cemento hidráulico añadido a la lechada inmediatamente antes o durante el proceso de mezclado para alterar sus propiedades físicas y químicas para obtener una característica deseada durante su estado fluido o plástico es clasificado como una aleación. Los principales materiales usados para estos propósitos son los siguientes¹:

- a. Aceleradores. Se emplean cuando se desea un fraguado rápido. El acelerador más usado de todos es el cloruro de calcio, que se usa en cantidades aproximadas al 2% de la cantidad de cemento usado en la lechada.
- b. Retardadores. Son usados para contrarrestar los efectos de aceleramiento indeseables para altas temperaturas de colocación y para prolongar la colocación de la lechada y retardar el tiempo de fraguado. Los más empleados son los químicos orgánicos.



- c. Fluidificadores. Los fluidificadores en este tipo de mezclas inhiben el endurecimiento temprano, mantienen las partículas finas en suspensión y producen una expansión antes del fraguado que puede ser controlada.

4.3.4.3 Rellenos.

Son materiales empleados en lechadas para reemplazar cantidades de cemento, principalmente por razones económicas cuando se deben emplear grandes cantidades de lechada, por ejemplo, para rellenar grandes huecos, cavidades, etc.

Como relleno, se pueden emplear polvo de roca, arcilla, arena fina, ceniza volátil, limo, y otros minerales finos¹.

4.3.5 Técnicas de Inyección.

Las técnicas de inyección se pueden clasificar de acuerdo al método usado para introducir la lechada al terreno; sin embargo, otros criterios pueden ser usados para diferenciar los métodos de inyección, por ejemplo, por el tipo de material inyectado, las aplicaciones típicas, la secuencia de construcción etc.

Por la forma de entrar de la lechada al suelo o roca, las dos categorías básicas más importantes son:

- a. Inyección por penetración. Puede ser por intrusión (para rocas) o por impregnación (para suelos). en el proceso, se llenan las juntas o fracturas en rocas o poros de un suelo sin alterar la formación y reemplaza las partículas de agua en los vacíos de un suelo. Se debe realizar a baja presión, para evitar fracturas. (Figura 4.16a)
- b. Inyección de compactación o desplazamiento. Se inyecta un mortero en suelos sueltos, que forma bulbos de inyección, los cuales desplazan y densifican el suelo circundante, sin penetrar en los vacíos del suelo. (Figura 4.16c).

El suelo puede ser inyectado considerando al proceso de perforación y al de inyectado como etapas separadas, lo que proporcionaría un mejor control. En este caso, la inyección puede comenzar en cuanto se termina la perforación del orificio. Al momento de tratar un estrato particular del suelo, la correspondiente longitud del orificio es aislada usando empacadores de hule, que van colocados transversalmente en la tubería que cubre la perforación, permitiendo a la lechada salir por esta sección, o si solo se usa un empacador, entre este y el fondo de la excavación¹⁷.

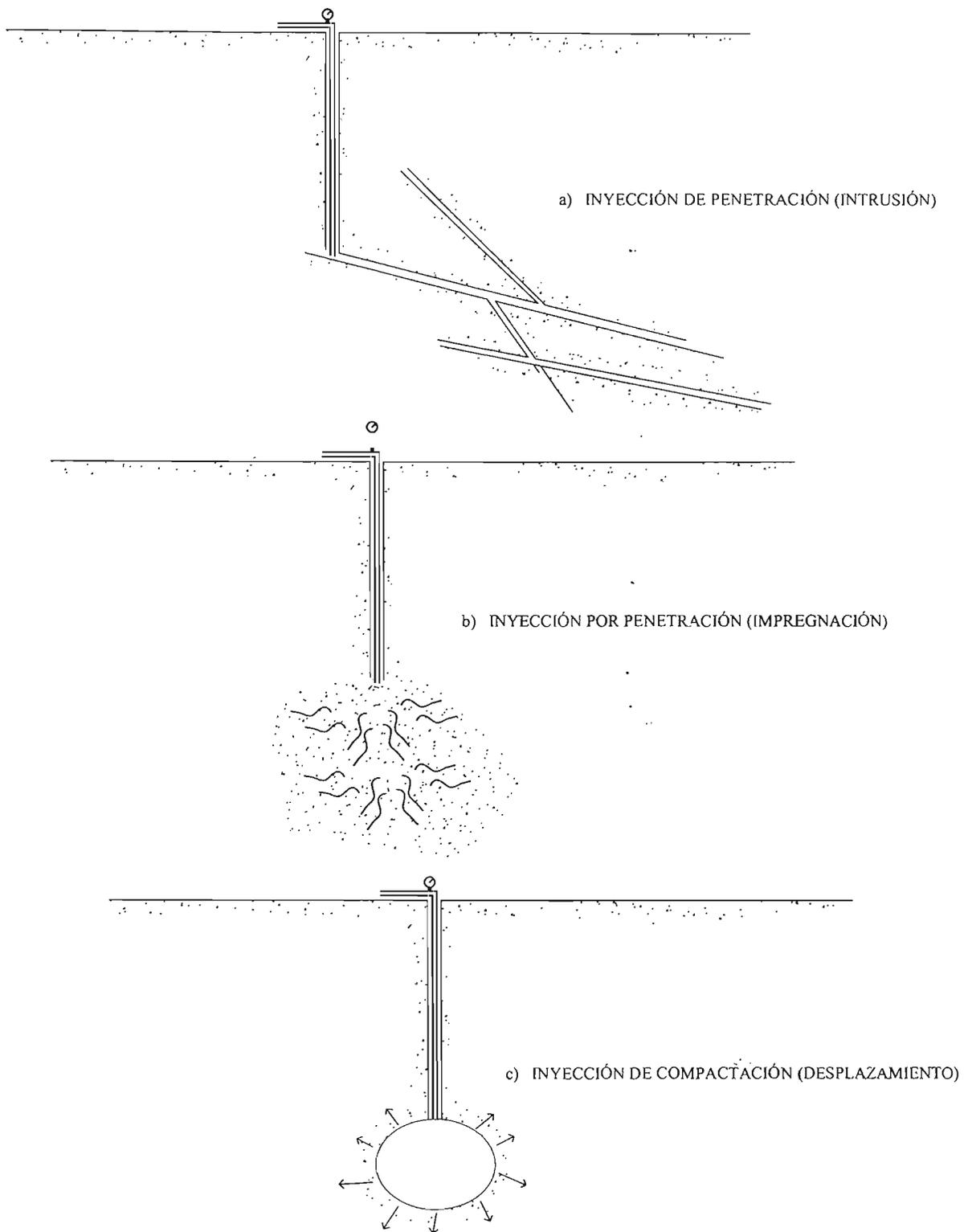


FIGURA 4.16 TIPOS DE INYECCIÓN DEPENDIENDO DEL COMPORTAMIENTO DE LA LECHADA DENTRO DE LA MASA DE SUELO



Para inyectar suelos con esta técnica de etapas, se ha desarrollado el método de tubería encamisada o “tube à manchette”. El procedimiento se puede ver en la figura 4.17 y es el siguiente:

- a. Se realiza el orificio de perforación y se cubre, para evitar que el suelo llene la excavación recién hecha.
- b. Se inserta un tubo de acero o plástico rasurado en intervalos regulares en el orificio. Las ranuras verticales son cubiertas con una funda de hule.
- c. Se quita la cubierta que se colocó anteriormente en el orificio y el espacio que queda entre la pared de la perforación es sellado con una mezcla bentonita – cemento.
- d. Después de que fraguó el sello de bentonita, se inserta la tubería de inyección. La lechada sale entre dos empacadores, permitiendo que salga a través de las ranuras seleccionadas. Al incrementar la presión, la cubierta de hule que cubre las ranuras se rompe y la lechada fluye dentro del suelo.

El dispositivo utilizado en este método de inyección es adecuado para lechadas de cemento, arcilla o lechadas químicas.

Con esta técnica, la inyección puede repetirse en el mismo orificio, usando lechadas con diferente viscosidad o diferentes químicos en secuencias planeadas. Esto permite que el tratamiento con productos químicos costosos sea más económico en suelos con gran cantidad de vacíos, ya que se pueden tratar primero los vacíos más grandes con lechadas menos costosas de arcilla y cemento.

Debido a lo anterior, la flexibilidad de este método es importante para tratamientos donde la permeabilidad del suelo varía significativamente de un punto a otro.

La inyección en etapas puede realizarse en forma descendente o ascendente.

La forma ascendente es un método por medio del cual empacadores o tapones de expansión (también conocidos como obturadores) bloquean porciones preseleccionadas de los orificios de perforación mientras estas están siendo inyectadas (figura 4.18). Las perforaciones se realizan hasta la profundidad de diseño, se realizan pruebas de presión y son inyectadas en zonas sucesivas desde el fondo. Los tapones o empacadores son colocados en el hoyo, en la parte superior del intervalo que va a ser inyectado, bloqueando el resto de la perforación. Al intervalo aislado se le realizan pruebas de presión y es inyectado. La zona más baja de la perforación es inyectada primero. Los tapones son movidos a la siguiente etapa y se repite el proceso. Las presiones de inyección se van reduciendo con cada parada ascendente.



Este método tiene muchas ventajas: las imperfecciones descubiertas por las operaciones de perforación pueden ser aisladas por los tapones de expansión y así darles un tratamiento especial; solo se requiere una perforación para completar el inyectado; el lavado a presión de las paredes y pruebas de filtración pueden hacerse en pequeñas secciones de la perforación, mediante el uso de obturadores dobles, y de esta mejorar la eficiencia de estas operaciones; es innecesario limpiar y volver a perforar los orificios después de la inyección; se requieren menos conexiones y es más económico que otros métodos.

Algunas de las desventajas que presenta esta técnica se presentan cuando la lechada rodea las paradas de inyección o tapones de expansión mediante fracturas verticales o juntas. También, se vuelve difícil la colocación de un sello ajustado con obturadores en rocas fracturadas o rotas, y en rocas cavernosas; el tamaño de los orificios para la inyección está limitado por el tamaño de los obturadores o tapones que se tienen disponibles, además, estos se pierden frecuentemente debido a que quedan pegados en el orificio.

A la técnica de inyección en forma descendente se le conoce también como progresiones descendentes (figura 4.19). Este tipo de inyección se emplea para terrenos no cohesivos de baja resistencia en el cual la perforación se va haciendo en etapas junto con la inyección, ya que si se ejecuta el total de profundidad que se programe en la barrenación, se corre el riesgo de que el barreno se cierre y se pierda.

Este método consiste en dividir la longitud del terreno por inyectar, en un número conveniente de progresiones, tomando en cuenta las características del terreno.

En sí, las etapas son las siguientes:

- Perforación de la primera progresión.
- Lavado del barreno con aire y/o agua, hasta que salga material producto de la excavación.
- Emboquillado del terreno.
- Prueba de presión de agua.
- Inyección de la mezcla.

Para iniciar la segunda progresión se calculará el tiempo de fraguado final de la mezcla inyectada, para que después de transcurrido este tiempo, se repita la operación anterior.

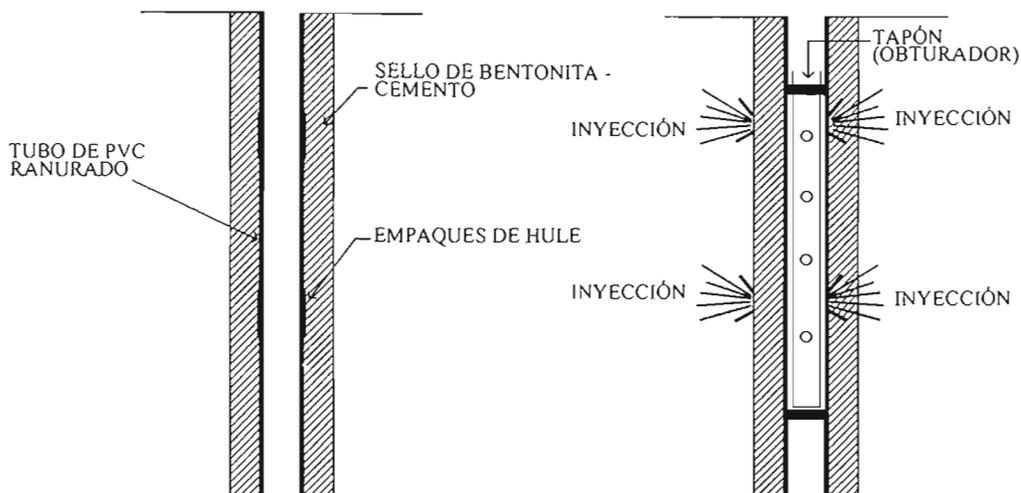


FIGURA 4.17 TÉCNICA DE INYECTADO DE SUELOS "TUBE A MANCHETTE"

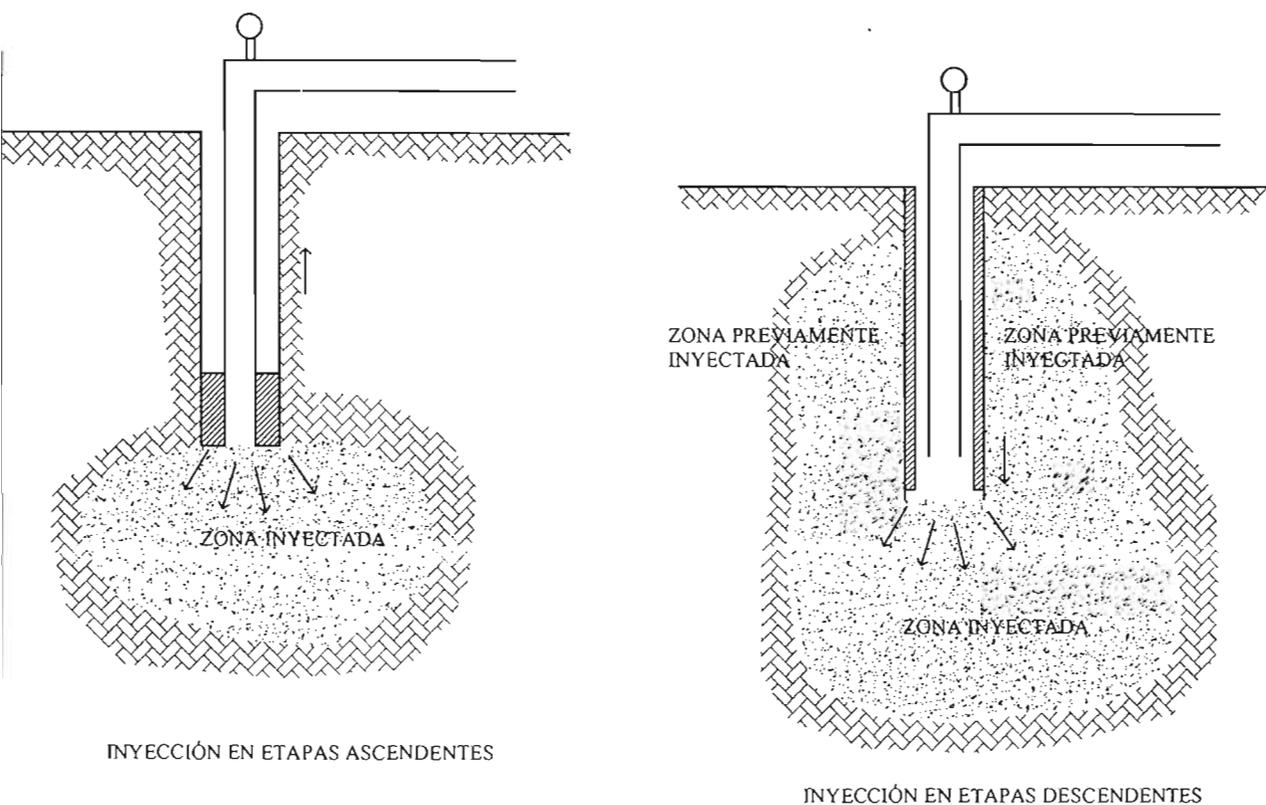


FIGURA 4.18 MÉTODOS DE INYECTADO DE SUELOS, EN ETAPAS ASCENDENTES Y EN ETAPAS DESCENDENTES



Todas las operaciones realizadas con este método, sin importar la profundidad de la zona a tratar son hechas desde la parte superior del orificio, usualmente mediante tuberías pequeñas u obturadores colocados en la superficie. Este método elimina la necesidad de colocar obturadores en las zonas más profundas para detener el avance de la lechada, como en el método ascendente. Tiene una flexibilidad que permite prestar especial atención a las condiciones locales encontradas. Otra de sus ventajas es que los fragmentos producto de la perforación de las zonas más bajas no obstruyen las aberturas inyectables de zonas más altas; además de que se emplea solo un orificio de perforación, lo cual hace más económica la perforación.

La desventaja principal es el peligro de levantar el suelo o la roca superficial cuando se realiza el inyectado sin una carga de confinamiento alta. El levantamiento provoca pérdida de lechada y puede causar daños en la roca subyacente o en estructuras vecinas. Este método, comparado con el método ascendente es más caro, ya que el barrenador debe ser colocado en cada orificio inyectado por lo menos una vez en cada zona, además de que las líneas de inyección deben coincidir. Estos dos factores añaden tiempo y dinero al trabajo.

4.3.6 Equipo de perforación.

La experiencia que con el tiempo se ha ido acumulando en las investigaciones de suelos y rocas debe ser considerada en la selección del tipo o tipos de perforación que van a ser usadas en el programa de inyectado. Actualmente existen dos tipos diferentes, los cuales son por percusión o por rotación.

Con la perforación rotatoria se utiliza un equipo de poder que hace girar una broca capaz de despedazar las formaciones de suelo más compactas o rocas. Se alimenta agua o lodo de perforación a la broca para llevar los pedazos pequeños hasta la superficie. Usualmente se usan brocas de diamante o de metal tratado especialmente para estos casos. Una de las ventajas de la perforación rotatoria es que permite una rápida identificación de intervalos en el suelo o roca donde el fluido empleado en la perforación se pierde, y así detener la perforación e inyectar ese intervalo antes de que la fractura o fracturas se tapen completamente. Otra ventaja es que el orificio puede ser lavado completamente sin quitar el barrenador. Sus principales desventajas es que es más caro que el método por percusión y el material sobrante de la perforación puede introducirse en fracturas debido a la presión del fluido de perforación (agua).

La perforación por percusión se realiza básicamente con un martillo manejado con aire comprimido. El martillo imparte una serie de golpes rápidos y cortos al barreno o broca y al mismo tiempo realiza un movimiento rotatorio. En casos donde la perforación debe pasar por estratos arcillosos o con limos, se pueden inyectar pequeñas cantidades de agua a la ragafa de aire o espumas para remover fácilmente el producto de la perforación. Las ventajas de este método recaen en que es más rápido y tiene una menor tendencia a



introducir a fracturas en la roca pedazos de la excavación, sin embargo, en perforaciones en roca suave, “embarra” las paredes del orificio.

Este método de perforación se realiza principalmente en rocas o en suelos duros.

Las brocas a emplear en cualquiera de los dos métodos depende del tipo de material a inyectar, ya sea suelo o roca y básicamente las recomendaciones se muestran en la tabla 4.6.

TABLA 4.6 APLICABILIDAD DE BROCAS DEPENDIENDO DEL MATERIAL A PERFORAR.

Tipo de broca empleada en la perforación	Uso principal	No recomendado para
Núcleo de diamante	Roca y concreto	Suelos sin consolidar
Obturador o taponador	Roca	Roca extremadamente dura, roca extremadamente suave, suelos sin consolidar y roca fracturada.
Metálica	Roca suave, arcilla dura, suelos cementados	Roca dura y suelos sin consolidar
Broca de dragado	roca suave y suelo	Roca dura
Percusión	Roca y concreto	Suelos sin consolidar

4.3.7 Equipo de inyección.

El equipo de inyección principal puede ser observado en la figura 4.19, y consta de los siguientes elementos:

4.3.7.1 Mezcladoras y dosificadores.

La primer consideración que se debe realizar en la selección de la mezcladora es asegurar que tenga la capacidad deseada y que produzca una mezcla homogénea en un periodo determinado de tiempo. Las mezcladoras más comunes son las de tina, vertical y horizontal, las cuales trabajan con el movimiento de paletas atadas a un eje en movimiento que tienen un acomodo especial de manera que la lechada en el fondo del tanque tenga movimiento constante. Se alimentan fácilmente, se puede observar claramente el proceso de mezclado y se limpian con relativa facilidad. Las tinas horizontales se emplean en trabajos que requieran grandes cantidades de lechada.

Otro tipo de mezcladoras empleadas en inyecciones son las coloidales de alta velocidad. Estas mezcladoras pueden ser de uno o dos cilindros o tambores. Utilizan un bombeo de



centrifugado que hace circular a las mezclas a altas velocidades a través del cilindro durante todo el proceso de mezclado. Producen mezclas más uniformes con mejor penetrabilidad y más fáciles de bombear.

4.3.7.2 Bombas de inyección.

Existen una gran variedad de tipos de bombas disponibles en el mercado para la colocación de la lechada. Los tipos varían según la energía que las hace funcionar, y estas pueden ser de aire, de gasolina o eléctricas. En trabajos de inyección, las más usadas son las de aire, que pueden manejar velocidades variables. Las bombas que ofrecen la característica de una velocidad de bombeo constante funcionan por medio de motores eléctricos o máquinas de combustión interna.

Este equipo debe ser cuidadosamente seleccionado de manera que la bomba sea de fácil incorporación al sistema, que proporcione un control preciso de las presiones de bombeo y una velocidad variable de inyección. Debe ser del tipo que pueda ser reparada fácil y rápidamente durante las operaciones de inyección; debe evitar vibraciones y si se tienen, que estas no sean transmitidas a mangueras, tuberías o al orificio.

Las bombas para concreto se usan ocasionalmente para bombear lechadas de cemento con o sin arena en casos donde la consistencia de estas mezclas tenga una fluidez de moderada o casi la mínima. Se usan en proyectos en donde no se requiera un control minucioso de las presiones, pero se emplean mucho más para el relleno de grandes cavidades, ya que pueden manejar fácilmente agregados de un tamaño máximo de 2.5 cm. y pueden bombear lechadas que contengan fibras de acero u otros materiales.

4.3.7.3 Tanques de almacenamiento.

Cuando se requieren volúmenes grandes de lechada, dos o más mezcladoras alternan sus descargas en tanques de almacenamiento con agitado. Estos tanques tienen por lo menos el doble de capacidad de todo el sistema de mezclado. Los tanques tienen un sistema de mezclado similar al empleado en las mezcladoras de tina.

4.3.7.4 Tuberías.

La tubería que es utilizada para la conducción de la mezcla por lo general es tubería de acero con el diámetro necesario para que pase el gasto con la presión deseada. Otro tipo de tubería es la flexible, que va a ir cerca del obturador para su manejo, esto es, que pueda



adoptar diferentes posiciones sin tener que mover toda la tubería de acero. En ocasiones esta tubería flexible sirve como aliviador de presiones.

Las tuberías de inyección en operación y expuestas a la intemperie deberán protegerse del sol para evitar que aumente la temperatura de las mezclas, ocasionando una aceleración en el fraguado de las mismas; pueden protegerse cubriéndolas con arena húmeda o con papel mojado.

La cámara de aire es un aditamento que se acopla sobre la línea de inyección, cerca de la bomba y tiene como finalidad la de amortiguar la gran fluctuación de presión en cada movimiento del pistón.

4.3.7.5 Obturadores.

Los obturadores o empacadores son requeridos cuando se necesita confinar la inyección de la lechada para tratar cierta parte del subsuelo, para aislar una zona en la que se pierde lechada, para separar etapas de inyectado y para hacer conexiones superficiales. Los tres más comunes son los removibles, los mecánicos y los neumáticos.

4.3.8 Finalización del tratamiento.

En el proceso de inyectado se debe tener presente siempre que este no debe hacerse a la máxima presión. Para verificar si el tratamiento está completo se emplean usualmente dos métodos. El primero consiste en continuar con el inyectado hasta que el orificio no acepte lechada a tres cuartas partes de la máxima presión de inyectado. El otro método requiere que la inyección siga hasta que la perforación acepte lechada en una proporción de 0.03 metros cúbicos o menos en 10 minutos.

Si existe la duda acerca de la finalización del tratamiento en cualquier zona o área, se puede perforar un orificio de inspección. Estos orificios pueden ser perforados para recuperar corazones para examinarlos, o para el estudio del agujero por medio de cámaras de televisión o a simple vista. Sin embargo, una verificación rápida y menos cara puede hacerse al realizar otra perforación y probar la presión en el; si no acepta agua el agujero, la inyección está completada, si por el contrario, el agua se pierde, se deberán realizar inyecciones adicionales.

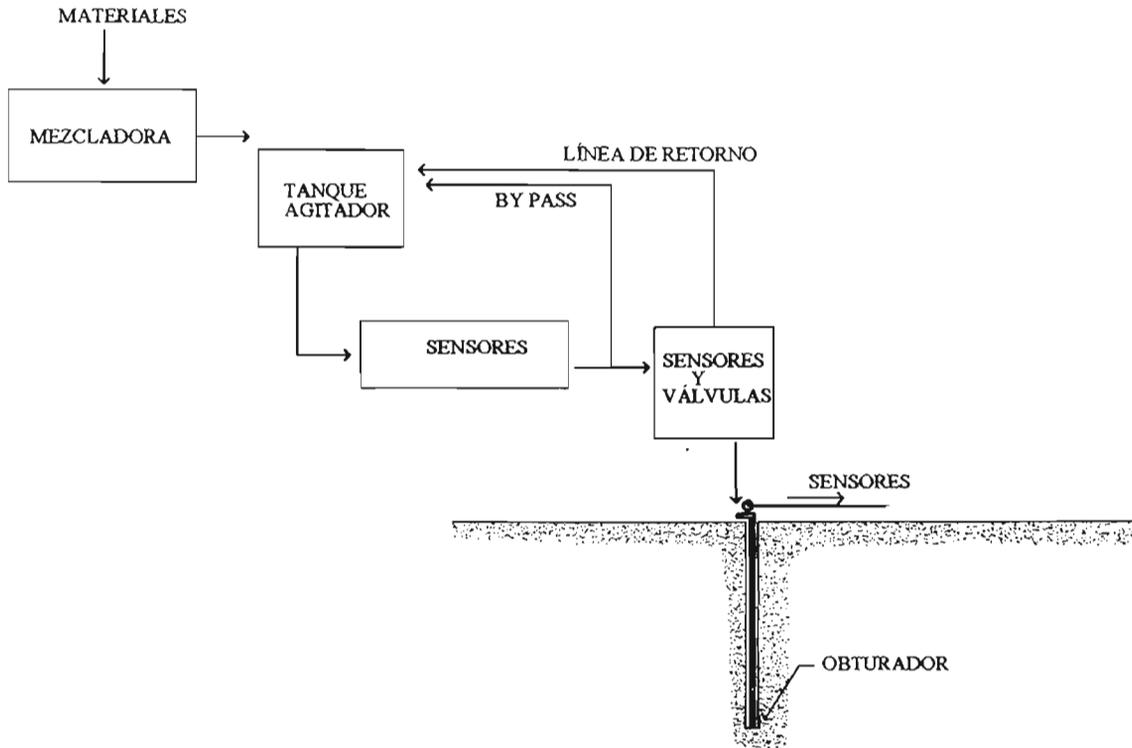


FIGURA 4.19 EQUIPO BÁSICO EMPLEADO EN LA INYECCIÓN EN SUELOS

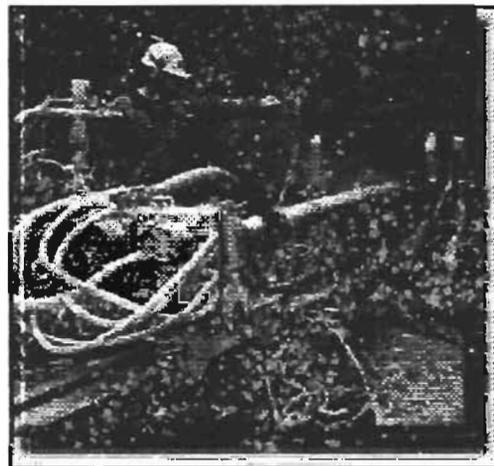
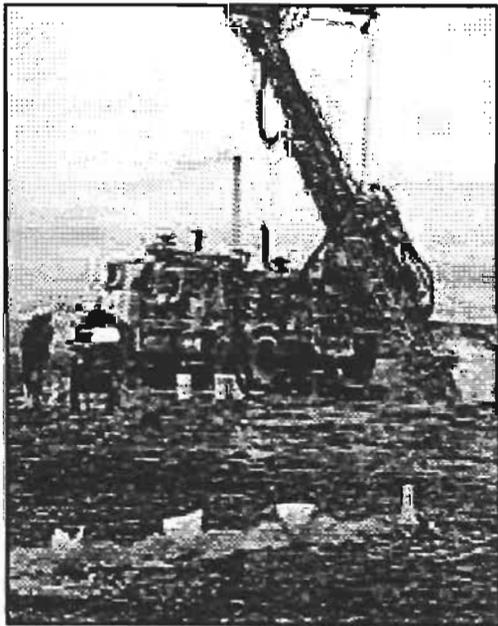


FIGURA 4.20 EQUIPO EMPLEADO EN EL MÉTODO DE INYECCIÓN DE SUELOS Y/O ROCAS



4.4 Aplicaciones prácticas de los métodos de mejoramiento profundo.

4.4.1 Ejemplos de la aplicación de la vibroflotación a nivel mundial.⁹

En la tabla 4.6 se presentan algunas experiencias del método, las cuales abarcan trabajos documentados a partir de 1937, aplicándose en su mayoría en suelos arenosos, o en ocasiones con gravas y poco material fino.

Las profundidades de tratamiento varían entre 3.4 y 12 metros, pero se han tenido casos de tratamiento de estratos arenosos de más de 30 metros de espesor y tratamientos a profundidades mayores de 50 metros. En los casos mostrados en la tabla el valor de comprobación de funcionamiento del método de mejoramiento es la densidad relativa del subsuelo, con valores iniciales del 40%, aumentando en promedio a 83%, con valores mínimos de 70%. Como ya se ha mencionado, la densidad del material es uno de los factores que influyen en la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, sobre todo en el caso de suelos granulares (arenas y gravas).

Para los casos prácticos analizados de la tabla 4.7 se pueden tener las siguientes conclusiones acerca de la utilización del método para la obtención de resultados óptimos:

1. El espaciamiento entre inserciones es de 1.7 a 3.7 metros, con un promedio de 2.2 metros, obteniéndose densidades relativas mayores del 70% si el espaciamiento es menor de 1.80 metros. El procedimiento para determinar el espaciamiento de los puntos de vibrado, a fin de alcanzar la densidad relativa especificada está basado en la curva de densidad relativa contra distancia al punto de vibrado, considerando que pueden superponerse los efectos de compactaciones vecinas.
2. Una distribución triangular da los mismos resultados, sin embargo, es preferible el empleo de la primera porque da un mejor traslape, el cual será menor si los puntos de vibrado están separados más de 2.40 metros.
3. La ubicación del nivel freático no afecta la aplicabilidad del método dado que el equipo empleado introduce suficiente agua en el terreno de la zona por tratar para asegurar la completa saturación del material.



TABLA 4.7 EJEMPLOS DE LA APLICACIÓN DE LA COMPACTACIÓN POR VIBRADO (VIBROFLOTACIÓN).⁹

Proyecto	Tipo de suelo	Prof. (m)	Area (m ²)	Espacio entre puntos (m ²)	Densidad relativa	
					Inicial (%)	Final (%)
Edificio	Arena	7.20	576	2.00	43	80
Silo	Arena y grava	4.60	---	---	63	85 a 95
Presa Enders	Arena bien graduada con 14% de finos	6.10	---	2.40	47	79
Horno y chimenea	Arena y grava	3.7 a 4.9	836	2.1 a 2.4	7 a 58	70 a 100
Planta de fosfato	Arena limpia suelta	3.70	14494	2.30	33	78
Molino de celulosa	Arena fina	4.9 a 6.1	16286	2.0 a 2.4	0 a 40	75 a 92
Hangar	Arena gravosa	6.1 a 9.1	2323	---	0	80
Planta de fuerza	Grava arenosa	5.20	---	---	33 a 80	85 a 95
Dique seco	Relleno bien graduado	3.40	6317	3.00	50	75
Edificio de 2 pisos	Arena suelta	7.00	---	1.90	---	80
Puerto pesquero	Arena suelta	6.0 a 12.0	32000	2.50	---	70
Edificio	Arena fina suelta con inclusiones de arcilla	6.10	---	1.5 a 2.3	---	80

4.4.2 Compactación por vibrado de suelos potencialmente licuables, en la Planta de Nitrógeno Cantarell, en Antonio Cárdenas, Campeche ²¹.

Previo a la construcción de las torres de enfriamiento de la Planta de Nitrógeno Cantarell, se detectó en el área estratos importantes de suelos arenosos sueltos, potencialmente sensibles a experimentar licuación. Dado que estas estructuras se pueden considerar como estructuras extremadamente sensibles a los asentamientos diferenciales, se planteó un mejoramiento de estos estratos mediante la técnica de “compactación por vibrado”.

La estratigrafía del sitio se puede observar en la figura 4.21, donde después del estudio de la substratificación de la capa superficial, se detectaron lentes de arena fina dentro de la misma y por debajo del nivel freático, que en varios sondeos representaba aproximadamente el 60% de su espesor y las cuales eran susceptibles de experimentar



licuación, dada su distribución granulométrica uniforme y su contenido de finos menor al 20%.

Entre las propuestas estudiadas para mejorar el subsuelo de cimentación se consideró efectuar la remoción y recompactación de todo el estrato superficial, o bien efectuar una compactación por vibrado. La primera alternativa implicaba tener que abatir el nivel freático y traer material de bancos de préstamo. Después de realizar el análisis técnico y económico de ambas alternativas se optó por aplicar la segunda opción.

El proceso de compactación por vibrado se realizó hincando y extrayendo un ademe tubular de 1.00 m de diámetro y una longitud de 6.00 m, en los puntos especificados dentro del proyecto de mejoramiento, empleando dos tipos de martillos vibratorios: ICE 812 y un DELMAG, con los cuales se hincaba el ademe en el terreno natural una longitud de 5.00 m, aplicando diferentes patrones de ascenso y descenso y variando además el número de revoluciones por minuto de los motores de los martillos.

Al término de cada hincado se efectuó una medición en campo del asentamiento generado por la vibración en los puntos de aplicación para comparar la influencia en la compactación, de los distintos parámetros usados.

Al terminar las pruebas se efectuaron sondeos de penetración estándar con carácter verificadorio a fin de observar el cambio en el número de golpes con respecto a la condición original (Figura 4.21).

En términos generales, el valor promedio de N se incrementó de 10 a 20 golpes, es decir que ahora el estrato arenoso superficial presenta una compacidad media. Terminada la verificación se procedió a restituir el nivel de proyecto de la superficie del terreno agregando más material de banco, que fue colocado en capas y compactado de conformidad con la especificación correspondiente del estudio geotécnico.

Cabe señalar que a casi 5 años de que se terminó la construcción de las Torres de Enfriamiento, no ha habido ningún problema de asentamientos diferenciales ni problemas relacionados con la resistencia del subsuelo²¹.

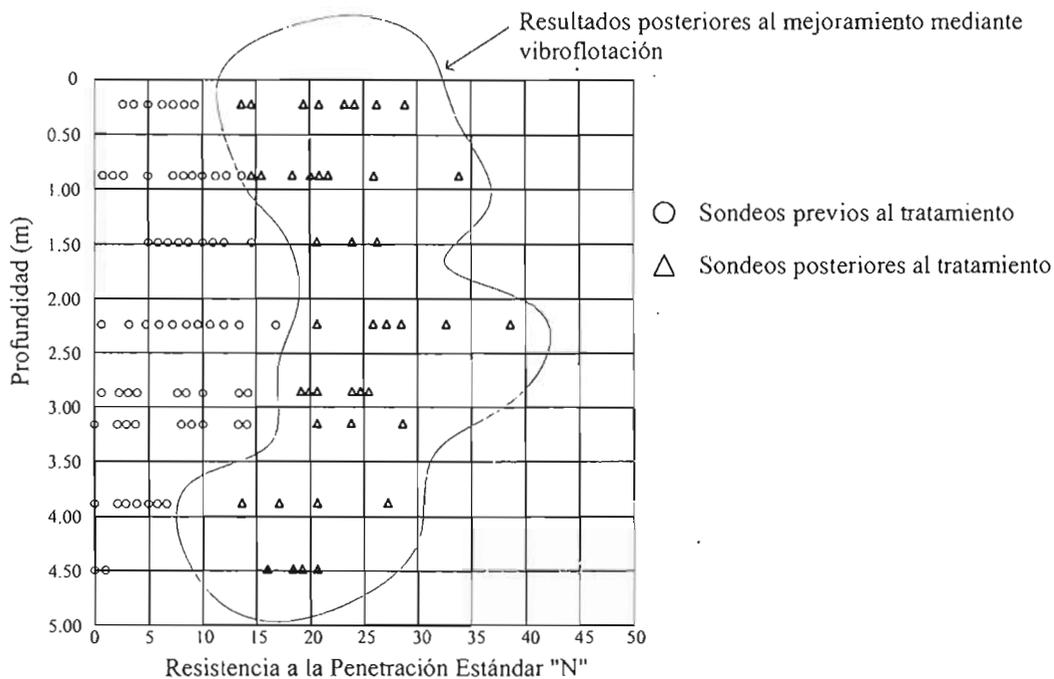
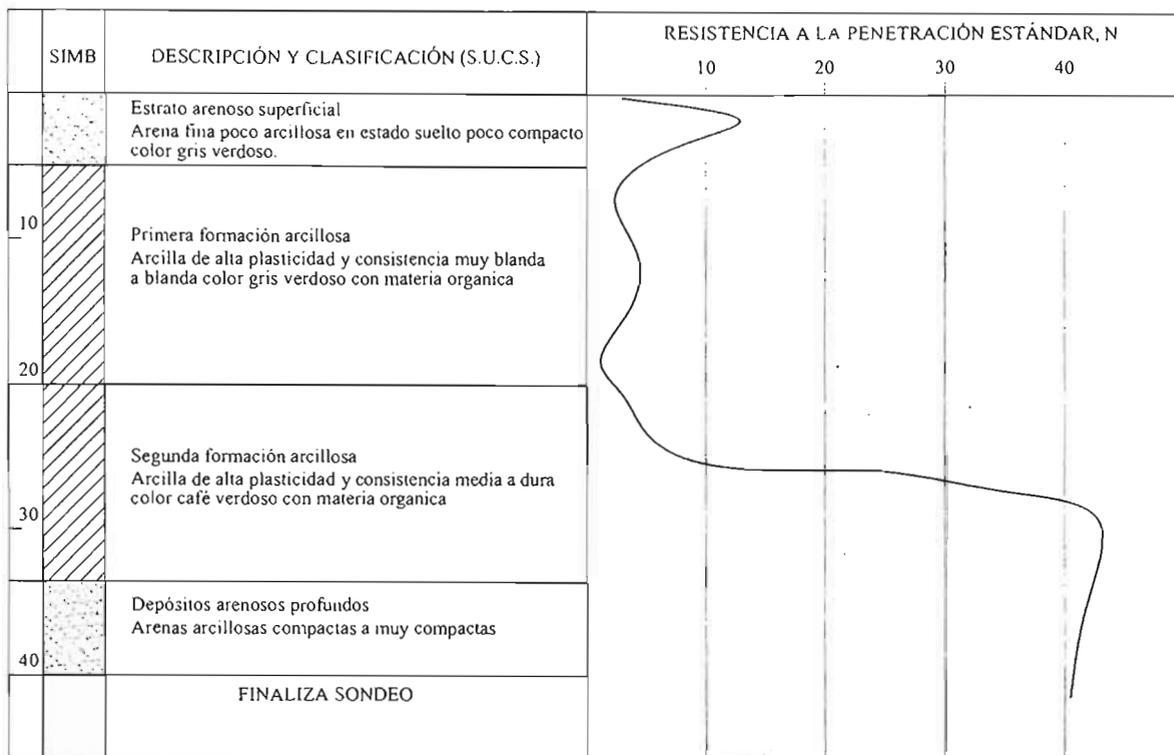


Figura 4.21 ESTRATIGRAFÍA GENERAL Y RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT) DEL ESTRATO SUPERIOR ANTES Y DESPUES DEL TRATAMIENTO MEDIANTE VIBROFLOTACIÓN.



4.4.3 Utilización de “Jet Grouting” en un túnel con frente mixto para la construcción del tramo entre las lumbreras L8 y L del Interceptor Oriente, en la Ciudad de México¹⁸.

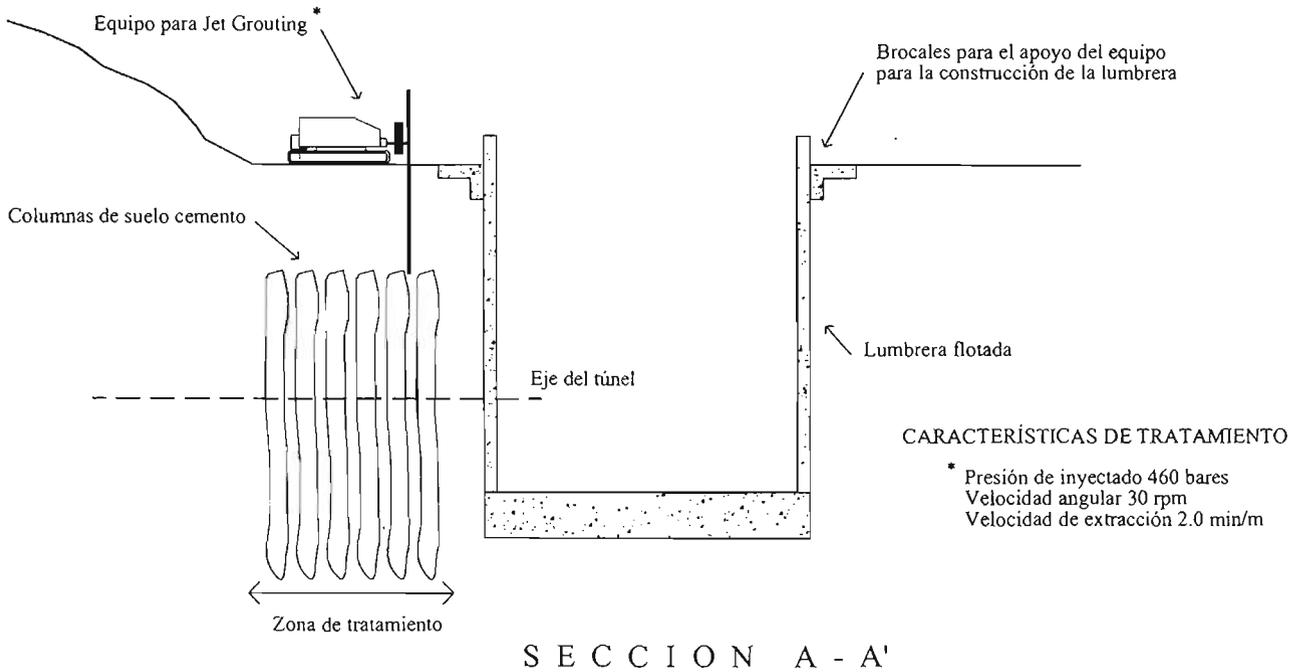
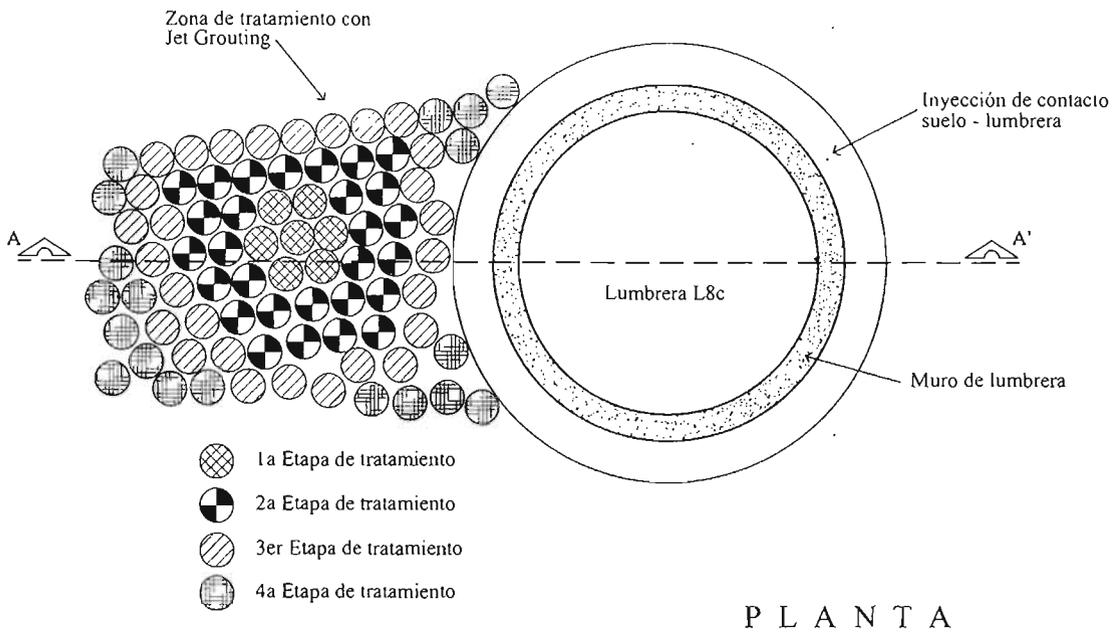
El tramo del Interceptor Oriente entre las Lumbreras L8 y L se compone por un túnel de casi 322 metros de largo con un diámetro interno terminado de 5 metros, localizado a 25 metros de profundidad, el cual vino a ser una conexión final entre la porción del interceptor recientemente excavado en los depósitos lacustres y la porción excavada hace casi 25 años en la formación rocosa de las estribaciones de la sierra del Tepeyac¹⁸.

Para la construcción de este tramo, se contaba con un escudo cuyo frente puede ser presurizado con lodo para estabilizar suelos blandos, teniendo además un perfilador perimetral y una trituradora de piedras en el sistema de circulación de lodos. Se anticipaba la presencia de fragmentos rocosos y suelos duros por lo cual se aceptaba el empleo de dicho equipo, en el entendido que adicionalmente debía resolverse la construcción del pequeño subtramo con frente mixto de roca y suelo mediante tuneleo convencional, previo mejoramiento de los suelos por excavar mediante la técnica de Jet Grouting.

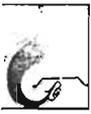
En el perfil geotécnico obtenido se visualizan diferentes frentes de excavación para el túnel, arcilla, arcilla con limo arenoso cementado, limo arenoso cementado y arcilla, limo arenoso y roca y roca franca, que pueden simplificarse en suelos lacustres y roca franca. Para la excavación del túnel en la zona de frente mixto cuya clave estaba formada por suelos y el piso por roca se formó una bóveda de suelo mejorado, aplicando como ya se mencionó la técnica del Jet Grouting, empleando el sistema de un fluido con una presión aplicada en el proceso de inyección de hasta 828 kg/cm² (Figuras 4.22 a 4.25).

Previamente a los trabajos de mejoramiento del suelo para la excavación del túnel se efectuaron pruebas de investigación en el sitio de obra, obteniéndose columnas formadas con diámetros entre 0.63 y 1.10 m, con resistencias a la compresión no confinada, medida a la edad de 30 días del orden de 70 ton/m², que resultó ser 35 veces mayor que la del suelo original, para un contenido de cemento de 400 kg/cm³.

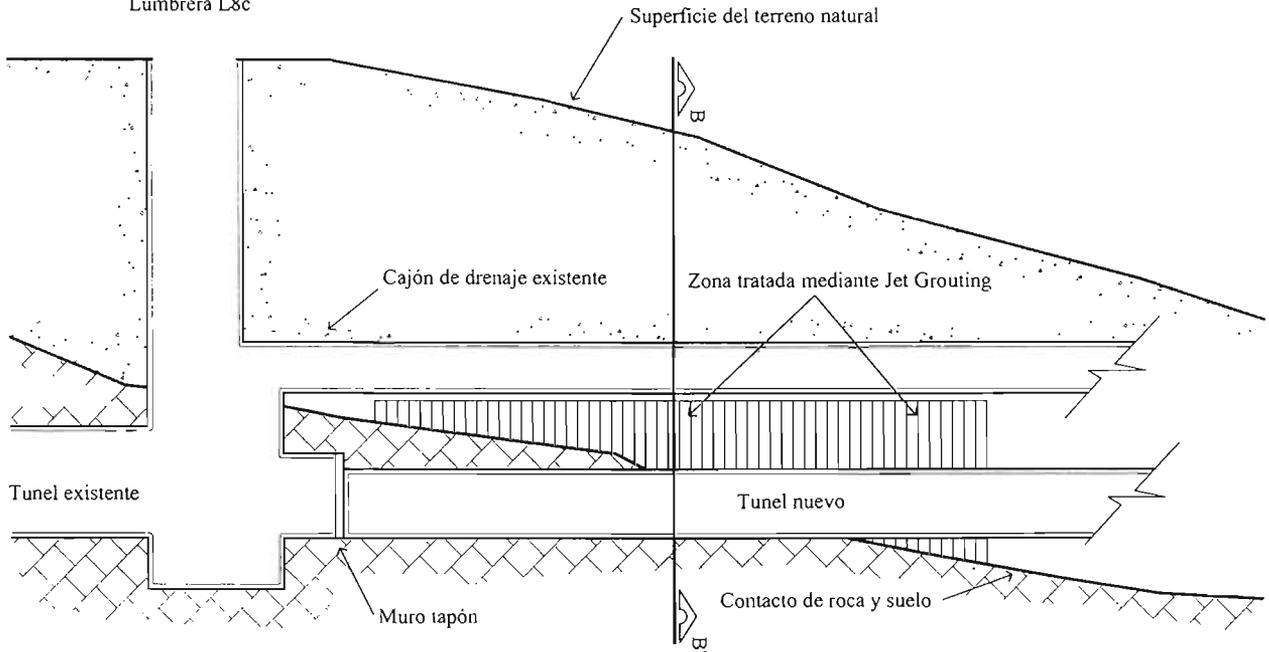
Una vez logrado el mejoramiento del terreno, los trabajos de tuneleo se llevaron a cabo en un tramo de 22 metros y siempre bajo condiciones estables, empleando excavación convencional con equipo similar al usado en la zona de roca, formando posteriormente el soporte inicial del tramo a base de concreto lanzado y marcos de acero.



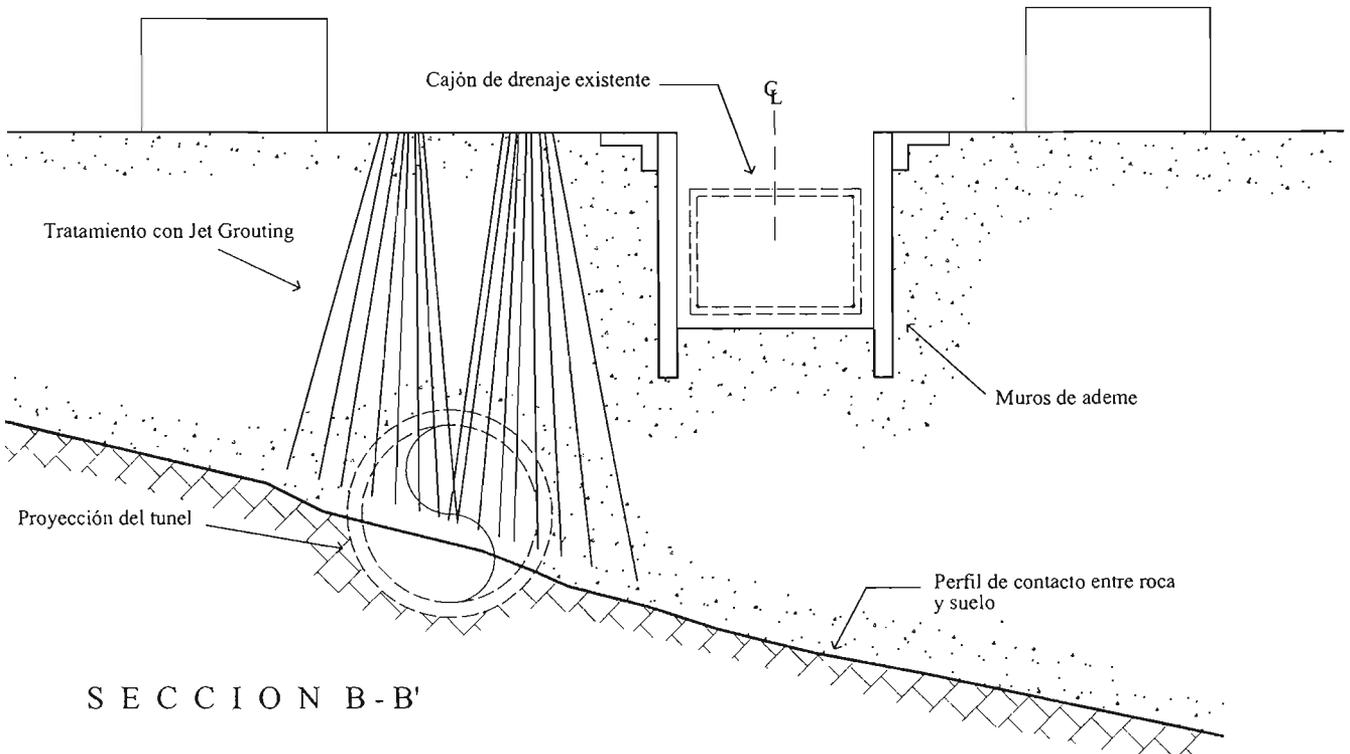
FIGURAS 4.22 Y 4.23 TRATAMIENTO MEDIANTE JET GROUTING PARA LA EXCAVACIÓN DE UN TUNEL EN LA CIUDAD DE MÉXICO. (PLANTA Y SECCIÓN A-A')



Lumbrera L8c



P E R F I L



S E C C I O N B - B'

FIGURA 4.24 Y 4.25 TRATAMIENTO MEDIANTE JET GROUTING PARA LA EXCAVACIÓN DE UN TUNEL EN LA CIUDAD DE MÉXICO. (PERFIL Y SECCIÓN TRANSVERSAL)



4.4.4 Trabajos de subexcavación e inyección de suelos para la restauración de la Catedral Metropolitana ²²

La configuración de hundimientos en la Catedral es muy compleja. En un primer análisis se pueden identificar dos mecanismos principales: un hundimiento generalizado hacia el surponiente, y una "emersión" de la zona central, al norte del crucero.

El primer mecanismo ha producido una configuración de grietas transversales en la cubierta y en los muros laterales, sobre todo en la zona cercana al crucero. Ha producido también una separación entre la fachada sur, con sus pesadas torres, y el resto de la construcción.

El segundo mecanismo ha ocasionado una rotación hacia afuera de las columnas y las naves laterales, así como la abertura de los arcos y las bóvedas. Esto ha dado lugar a un patrón de grietas longitudinales en la cubierta, principalmente, aunque también en el piso y la cimentación. Este segundo mecanismo es muy importante, desde el punto de vista estructural, porque ha dado lugar a grandes desplomes en las columnas.

De la evaluación sobre las condiciones de los edificios de la Catedral, se desprende la necesidad de emprender acciones tendientes a reducir la situación de inseguridad en la estructura y mejorar el funcionamiento del templo. La primera parte del programa de rehabilitación tuvo como objetivo la corrección parcial de las diferencias de nivel, entre distintos puntos de la base de los edificios, mediante la técnica llamada de subexcavación.

La subexcavación consiste en hacer descender de manera lenta y controlada las partes más altas en la base del edificio, mediante la extracción de suelo en los estratos más compresibles debajo de ellas. En el caso de la Catedral, la extracción se hizo con perforaciones radiales de pequeño diámetro, ejecutadas desde lumbreras excavadas hasta la profundidad deseada. Mediante un control cuidadoso de la cantidad de suelo extraído en cada posición, es posible generar asentamientos muy pequeños y precisos en los sitios deseados. Se excavaron 32 lumbreras, a partir del nivel de criptas y una profundidad de 20 m, distribuidas en las zonas donde era necesario generar los hundimientos bajo la Catedral y el Sagrario.

Inmediatamente después de terminar la subexcavación, se tomaron medidas para evitar que los edificios reanudaran las tendencias de hundimiento que presentaban antes del inicio del proceso. Para ello se procuró modificar las propiedades del subsuelo, para lograr una mayor uniformidad de sus hundimientos y no perder rápidamente los avances logrados con la subexcavación. Para este propósito se realizó un programa de inyección con lechada de mortero en los estratos más compresibles del subsuelo. La técnica fue desarrollada con base en experiencias previas de estabilización obtenidas en otros países, así como en los resultados favorables de un proceso de inyección realizado en el Palacio de Bellas Artes en la década de los veinte y en aplicaciones recientes en la FES-Zaragoza de la UNAM.

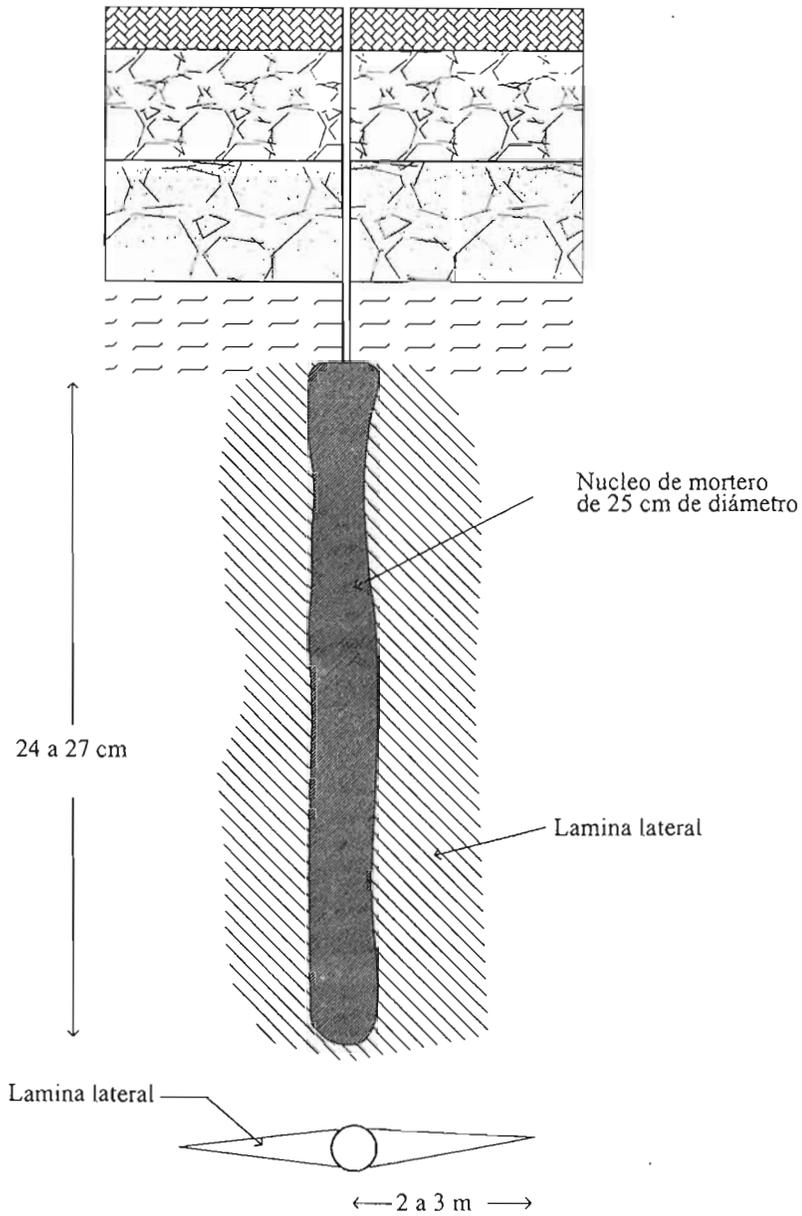


FIGURA 4.26 DETALLE ESQUEMÁTICO DE LAS INYECCIONES EMPLEADAS EN LOS TRABAJOS DE REHABILITACIÓN DE LA CATEDRAL METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO.



En la versión desarrollada para la Catedral, se inyectó inicialmente un micropilote de unos 15 cm de diámetro y a partir de éste unas láminas radiales de 2-3 cm de espesor (ver figura 4.26). Se diseñó un programa para inyectar distintas cantidades de mortero en diferentes zonas, de acuerdo con la medida en que se consideró necesario reducir la deformabilidad de éstas, para lograr un hundimiento uniforme de los edificios. Se programó llegar a esos volúmenes en varias etapas.

Los movimientos que se produjeron en la estructura durante esta etapa, fueron inferiores a los que ocurrieron durante la subexcavación. Por ello los efectos en la estructura fueron mucho menores; las tendencias de deformación se revelaron mucho más lentamente, y las mediciones fueron más irregulares, al ser más afectadas por factores externos como los cambios ambientales. En esta etapa el monitoreo se basó más en las mediciones de los instrumentos automáticos electrónicos, que en las nivelaciones y plomadas. Las modificaciones en los desplomos de las columnas, en esta etapa, han sido poco significativas, al igual que los otros parámetros de la respuesta estructural. Más evidentes han sido las aberturas de los arcos y bóvedas de la nave principal, donde se ha llegado a perder buena parte del cierre que se había logrado durante la subexcavación.

En resumen, hasta el momento la inyección no ha modificado las condiciones de seguridad de la estructura, pero es previsible que, una vez que esta modificación logre totalmente su efecto, los hundimientos diferenciales se estabilicen en patrones mucho menos desfavorables para la estructura, que los presentados anteriormente.

4.4.5 Trabajos de inyección de suelos en las Torres Petronas, Kuala Lumpur, Malasia²⁵.

Oficialmente uno de los edificios más altos del mundo, las torres gemelas Petronas se encuentran cimentadas sobre pilas de fricción de concreto que se extienden hasta una profundidad máxima de 125 metros por debajo del nivel de piso (figura 4.27). Las pilas se encuentran apoyadas en la formación “Kennyhill”, compuesta por suelos residuales y limos que presentan numerosas cavidades formadas por carsticidad, así como lentes de materiales suaves de baja resistencia en zonas localizadas principalmente en el contacto entre la roca y el suelo. Dadas las características del proyecto y las condiciones del subsuelo, así como los asentamientos potenciales que se presentarían, se llevó a cabo un programa de inyección de suelos por compactación. El programa se llevó a cabo a profundidades de 160 metros para llenar los vacíos y mejorar las zonas débiles. Las mediciones efectuadas durante la construcción de la superestructura mostraron que tanto los asentamientos totales como los diferenciales se encontraban por debajo de los máximos evaluados, indicando de esta manera la efectividad del mejoramiento profundo mediante esta técnica.

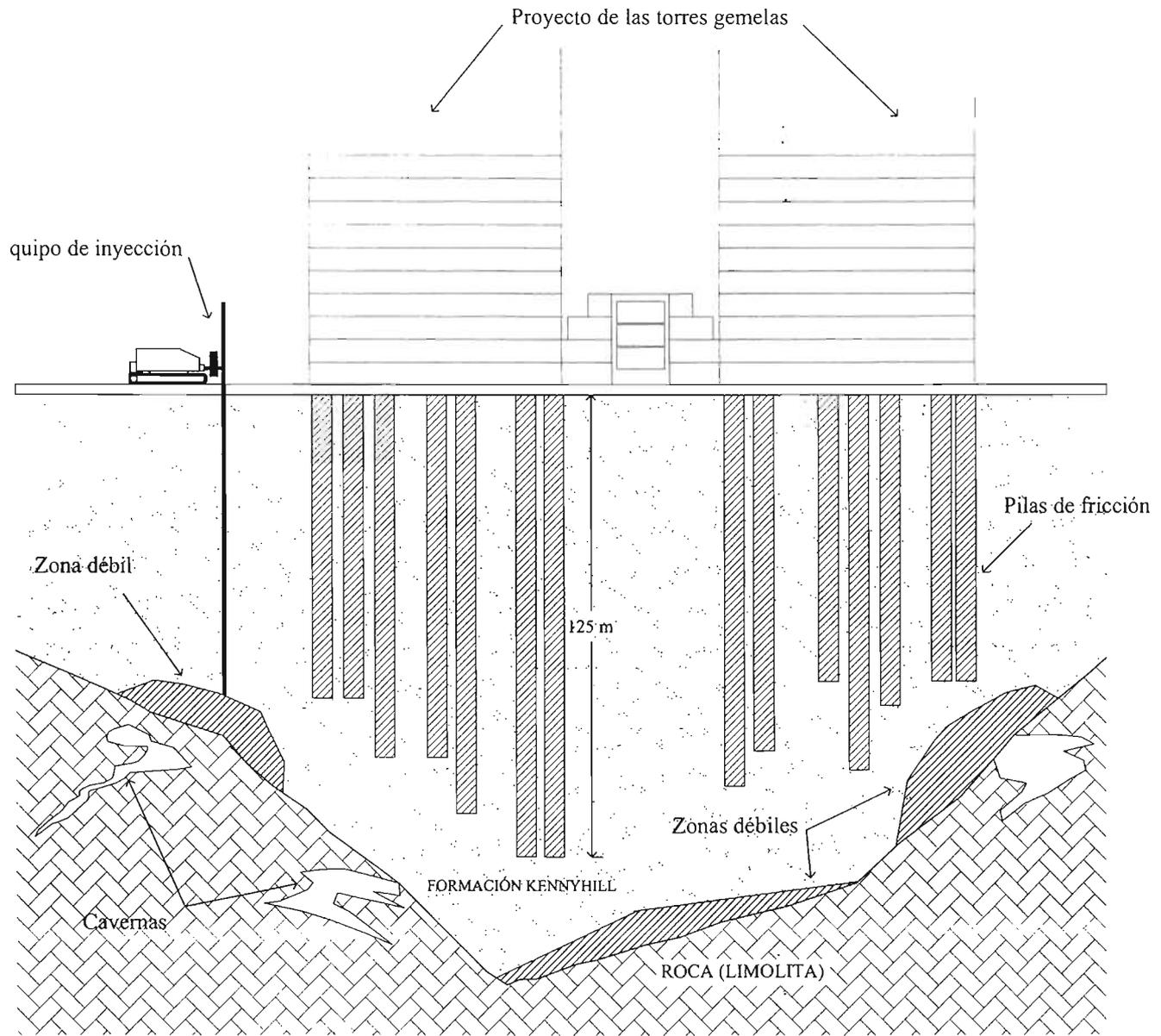


FIGURA 4.27 CONDICIONES GENERALES DEL SUBSUELO PARA EL PROYECTO DE LAS TORRES GEMELAS PETRONAS EN KUALA LAMPUR, MALASIA.



CAPITULO 5

MÉTODOS DE MEJORAMIENTO MECÁNICO.

Otros métodos empleados a nivel mundial para el mejoramiento masivo de suelos son la consolidación de estratos arcillosos por medio de precarga y la compactación agresiva de suelos arenosos por medio de la compactación dinámica o compactación tipo Menard.

Ambos métodos son de difícil aplicación, ya que pueden ser extremadamente caros en el caso de la compactación dinámica o de difícil empleo debido a la falta de espacio y a la necesidad de grandes cantidades de material para el caso de la precarga; por consiguiente su aplicación en México, al igual que otros métodos de mejoramiento de suelos, es relativamente baja. En el presente capítulo, se explican estos métodos, detallando su funcionamiento y el procedimiento necesario para su correcta aplicación.

5.1 Precarga

La precarga o precompresión es una técnica que se utiliza para reducir a un nivel aceptable los asentamientos que se producen después de hacer una construcción sobre suelos compresibles. Este principio se ilustra en la figura 5.1, la cual se refiere de manera particular a la construcción de plantas industriales o carreteras. En la práctica normal de construcción sobre un relleno compactado de una determinada altura, inicialmente se incrementa la altura en una cantidad predeterminada sobre el nivel original. Esta altura adicional de relleno se denomina “sobrecarga” y actúa como si se tratara de la estructura que se planea construir sobre el suelo que se está tratando de mejorar, es decir, produce la consolidación o deformación que provocará la estructura, evitando así deformaciones en la masa de suelo no tolerables que provocarían daños en la misma estructura. La sobrecarga se mantiene hasta que el asentamiento por consolidación del depósito sea igual al que se produciría con la aplicación de la carga del terraplén y la edificación final. Posteriormente, se retira la sobrecarga y así, la estructura tendrá asentamientos mínimos, que estarán dentro de los aceptables. Los asentamientos experimentados por la utilización de esta técnica de mejoramiento por lo común son de 0.3 a 1.0 metros, con valores extremos de 0.05 y 2 metros.

El método de precarga se ha empleado para casi toda clase de construcciones, pero su uso principal es en el mejoramiento de suelos de cimentación para tanques de almacenamiento para petróleo y productos del petróleo, tanques de almacenamiento de agua, terraplenes para caminos, estructuras de varios niveles (hasta 10 niveles), canales y conjuntos habitacionales.

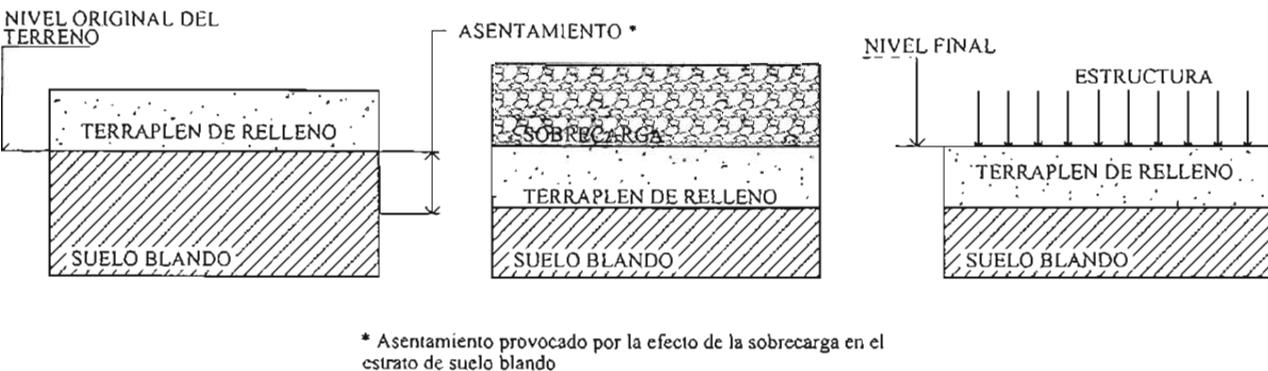


FIGURA 5.1 FUNDAMENTOS DEL MEJORAMIENTO DE SUELOS BLANDOS MEDIANTE PRECARGA

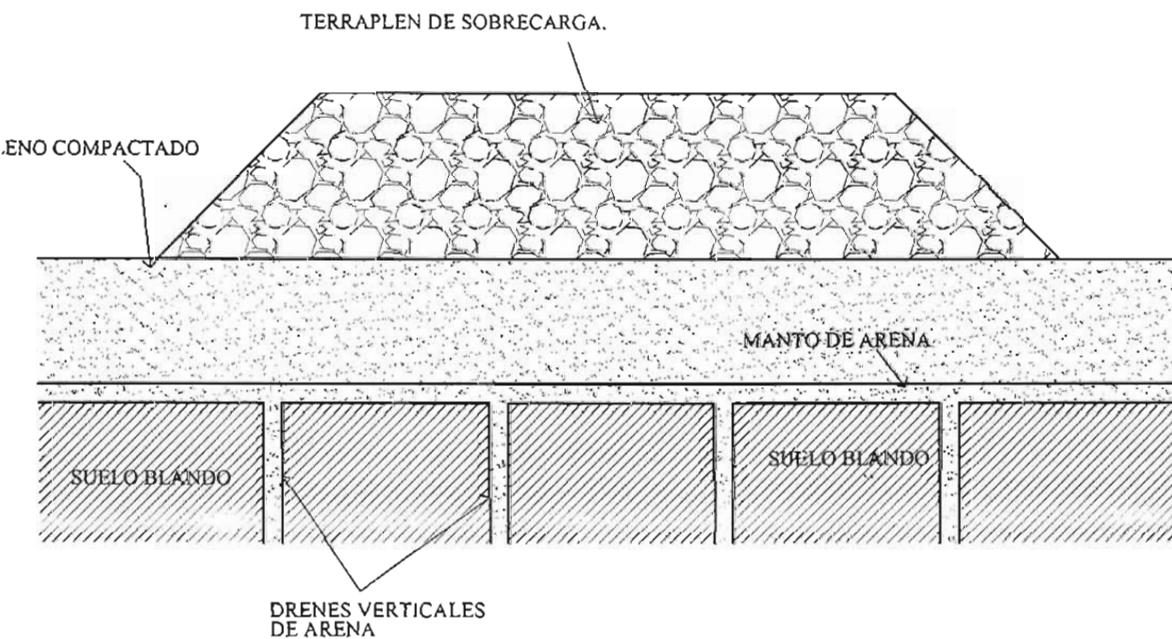


FIGURA 5.2 MEJORAMIENTO DE SUELOS CON PRECARGA, EMPLEANDO DRENES VERTICALES DE ARENA Y RELLENO COMPACTADO



El método más usual para aplicar la precarga es apilando el material de relleno. Después de que se han logrado los resultados esperados, el material se retira y, en ocasiones, se vuelve a utilizar en el mismo proyecto para otra precarga o para la construcción de otros elementos. Una variante es dejar el relleno completo o en parte en la obra, y no retirarlo, por ejemplo, en el caso de terraplenes para carreteras. En ocasiones, el uso de bolsas llenas de agua, bloques de concreto y bultos de material han sido empleados con eficacia con esta técnica. En la mayoría de los casos, la altura del montículo de sobrecarga, construido de relleno de suelo, es de 3 a 8 metros por encima del nivel original, con valores mínimos y máximos reportados de 1.5 y 18 metros respectivamente.

Otro método para precargar es utilizar la estructura final como medio de aplicación de carga. Este método se ha empleado para tanques de agua o algún otro líquido. El tanque se construye antes del mejoramiento del suelo, en seguida se llena gradualmente de agua. El llenado debe hacerse lentamente, para permitir que el suelo se estabilice bajo el peso del volumen previo. Después de que el tanque se ha llenado hasta el tope y la velocidad de asentamiento ha disminuido suficientemente, se extrae el contenido y la base se nivela mediante gatos hidráulicos. El método es adecuado para tanques de almacenamiento construidos con placas flexibles de acero. En este caso, hay ahorro en costo y tiempo necesario para acarrear y retirar el material de relleno. Con este método, se han logrado asentamientos de 0.35 a 1.20 metros para tanques de 35 a 45 metros de diámetro. A esta técnica se le conoce también como prueba hidrostática, y su tiempo de duración puede variar de acuerdo al porcentaje de consolidación que se desee obtener.

El mejoramiento de suelos mediante precarga también puede conseguirse abatiendo el nivel freático. Esto se logra mediante pozos filtrantes, zanjas o bombeo al vacío. A medida que baja el nivel freático, el suelo pierde su sustentación hidráulica y se incrementa su peso volumétrico, densificándose de esta manera.

La combinación de métodos de precargado es muy común, haciendo más rápida y económica la aplicación de esta técnica. En Europa y Japón se ha combinado la aplicación de precargas con el uso de drenes verticales a base de perforaciones rellenas de arena, que tienen como objetivo acelerar el flujo de agua en el proceso de consolidación y reducir el tiempo del mejoramiento (Figura 5.2).

En México, el método de precarga empleado más frecuentemente es construir terraplenes de carga, por su facilidad de ejecución, menor riesgo en fallas de estabilidad, pocas consecuencias en los asentamientos producidos y el uso del material en otras partes de la obra. Las precargas con tierra se proyectan en dos etapas, la primera la constituye un terraplén estructural construido con las normas propias a su fin; la siguiente etapa es propiamente la precarga, que por facilidad y economía se forma con suelos colocados al volteo y bandeados hasta la elevación máxima prevista (Figura 5.1).



La construcción en este caso de un proyecto de precarga inicia con el saneamiento del área de desplante de los mismos terraplenes de precarga hasta profundidades variables de 0.50 a 3.00 metros, teniendo como objetivo la eliminación de suelos superficiales contaminados con material orgánico, procedimiento que se logra a base de retroexcavadoras o dragas de arrastre. Una vez definido el nivel de desplante, se inicia el tendido en capas del material para formar el terraplén estructural, compactándose siguiendo las especificaciones de compactación de suelos. El tendido y compactación del material del terraplén debe continuar hasta llegar al nivel requerido, considerando en este los asentamientos esperados en la precarga, es decir, se debe cubrir con el terraplén los asentamientos que tendrá el terreno debidos a la acción de la sobrecarga. A partir de este momento, se realiza propiamente la precarga, con material colocado al volteo, bandeado con tractores. En el proceso se realiza por medio de etapas intermedias en las cuales se va colocando poco a poco el material, lo que provoca en el suelo un incremento de esfuerzos conforme avanza la construcción. Los asentamientos obtenidos con la colocación de cada etapa, son medidos y comparados con los asentamientos teóricos.

Una vez que se consiguieron los resultados deseados, el material es retirado.

Los asentamientos producidos por cargas al suelo, y en especial por la que aporta la precarga se pueden separar en cuatro conceptos diferentes.

El asentamiento inicial, que se debe al cambio en los esfuerzos cortantes en la masa de suelo y ocurre con rapidez. A medida que el área cargada se asienta, la superficie alrededor de esta se eleva en una cantidad que equilibra el volumen de hundimiento.

La compresión inmediata (también conocida como compresión inicial) se observa en una disminución rápida del volumen de vacíos, y va acompañada de un incremento rápido de los esfuerzos efectivos. Al aumentar la compresión, el grado de saturación se incrementa y cuando alcanza casi el 90%, pueden aumentar las presiones en el agua de los poros. Estas presiones de poro harán que aumenten los esfuerzos efectivos.

La consolidación inmediata es un cambio lento provocado por los esfuerzos de compresión bajo la influencia de las presiones de poro que resisten a una reducción más rápida de volumen. A medida que avanza la consolidación, se disipan las presiones de poro. La consolidación primaria comienza justo después de la compresión inicial y termina, por definición, cuando las presiones de poro son insignificantes.

La consolidación secundaria es causada por la reducción gradual de vacíos bajo esfuerzos efectivos variables. Comienza cuando las presiones de poro se vuelven aproximadamente cero y se supone que dura para siempre. Se debe a la deformación lenta de los contactos entre las partículas de arcilla, que se encuentran bajo la influencia de los esfuerzos cortantes. Se acepta que las arenas y otros suelos granulares no están sujetos a la consolidación primaria y por consiguiente a la secundaria.



Una de las características más especiales de este método es que requiere de mucho espacio, extendiéndose, por lo general, casi 10 metros o más hacia fuera del perímetro de la estructura planeada. Otra condición es la disponibilidad de relleno. Aunque la precarga puede realizarse por los métodos anteriores, el uso de materiales granulares es preferible, ya que pueden tener una aplicación posterior en la obra, es menor el riesgo que se tiene de una falla en la base y en combinación con drenes de arena se obtienen resultados más rápidos.

La duración de la precarga, desde el inicio de la colocación del terraplén hasta el final cuando se retira la sobrecarga, puede variar hasta algunos años. En los sitios donde la respuesta del suelo es bastante rápida, la duración se puede reducir a algunos meses, donde uno de los factores determinantes es el tiempo requerido para poder obtener mediciones confiables del asentamiento. Por otro lado, existen casos en los que la precarga ha necesitado más de tres años.

El tiempo de duración es un factor que debe considerarse cuidadosamente, ya que cuando la precarga se retira antes de tiempo podrían ocurrir asentamientos importantes durante la operación de las estructuras. De la misma manera, si la precarga se coloca demasiado rápido, puede resultar contraproducente, ya que provocaría deformaciones plásticas muy elevadas.

5.1.1 Tipo de suelos que pueden ser tratados con precarga.

El precargado se ha empleado con buenos resultados en virtualmente todo tipo de suelo. Sin embargo, en la mayoría de los casos los suelos han sido arenas sueltas y limos, arcillas limosas blandas, limos orgánicos, o depósitos aluviales erráticos formados por todos estos suelos.

Ha dado resultados satisfactorios ya sea aplicada a suelos que se encuentran ya sea arriba o abajo del nivel freático, con contenidos de agua natural de 20 a 1000% y límites de Attenberg que abarcan el intervalo completo de la tabla de plasticidad. Los depósitos que han dado problemas y con los cuales todavía deben tenerse ciertas precauciones son las capas gruesas de arcilla plástica homogénea de más de 5 metros de espesor⁵.

5.1.2 Efectos de la precarga.

Cuando los suelos son compresibles y se consolidan bajo precarga se incrementa su densidad; de aquí que el proceso sea considerado de “densificación del suelo”.

La consolidación o densificación se manifiesta por el asentamiento de la superficie original del terreno. En general, aunque parte del asentamiento observado se puede deber a un movimiento de los suelos blandos de cimentación hacia fuera o desplazamiento horizontal, la mayor parte refleja la densificación y el mejoramiento del suelo. Durante la densificación, el contenido de agua, la relación de vacíos y el coeficiente de permeabilidad



disminuyen, y se incrementa la resistencia al corte sin drenaje, el módulo de compresibilidad y la resistencia a la penetración.

Otro efecto de la precarga es que aumenta los esfuerzos laterales en el suelo. A medida que se carga la superficie del terreno, el suelo que está directamente debajo tiende a moverse lateralmente, provocando un incremento en los esfuerzos de compresión horizontales.

5.1.3 Consolidación de suelos por medio de vacío.

Es una técnica reciente que consiste en combinar la aplicación de tecnología de creación de vacío con la precarga para consolidar más rápidamente suelos blandos y suelos saturados muy blandos. Esta tecnología puede proporcionar una precarga equivalente a un terraplén de relleno convencional de cerca de 4.5 metros de alto (o una presión de alrededor de 8 a 10 ton/m²).

En lugar de incrementar los esfuerzos efectivos al aumentar los esfuerzos totales en el suelo por medio de sobrecargas convencionales como la construcción de terraplenes, la consolidación por vacío precarga el suelo al reducir la presión de poro mientras mantiene un esfuerzo total constante, sin la presencia de sobrecarga en el terreno ⁶.

El procedimiento constructivo que sigue este método inicia con la instalación de tuberías de transmisión de vacío, tanto verticales como horizontales, así como la construcción de trincheras periféricas. Posteriormente se coloca una membrana hermética e impermeable sobre la superficie y en las trincheras; luego, con bombas de vacío se succionan el aire y el agua del suelo por medio de las tuberías instaladas en los drenes. Puede combinarse con precargas al colocar rellenos de sobrecarga sobre la superficie, o con agua colocada encima de la membrana impermeable. En la Figura 5.3, se muestra un esquema de todos los elementos que constituyen este método para el mejoramiento de suelos.

La eficiencia de esta tecnología ha sido probada en sitios bajo condiciones diferentes, donde ha demostrado ser una solución efectiva para acelerar substancialmente el proceso de consolidación, lo que lleva a ahorros significativos en el costo del proyecto ⁶.

La ventaja práctica más importante de la consolidación por vacíos es que genera en la capa granular colocada sobre el suelo una cohesión aparente, debida al incremento del esfuerzo efectivo y esta puede proporcionar una plataforma de trabajo útil para acelerar la colocación de la sobrecarga. La experiencia con este método indica que después de algunos días de que la bomba de vacíos ha empezado a funcionar, vehículos de construcción pueden maniobrar sobre la membrana y la capa granular.

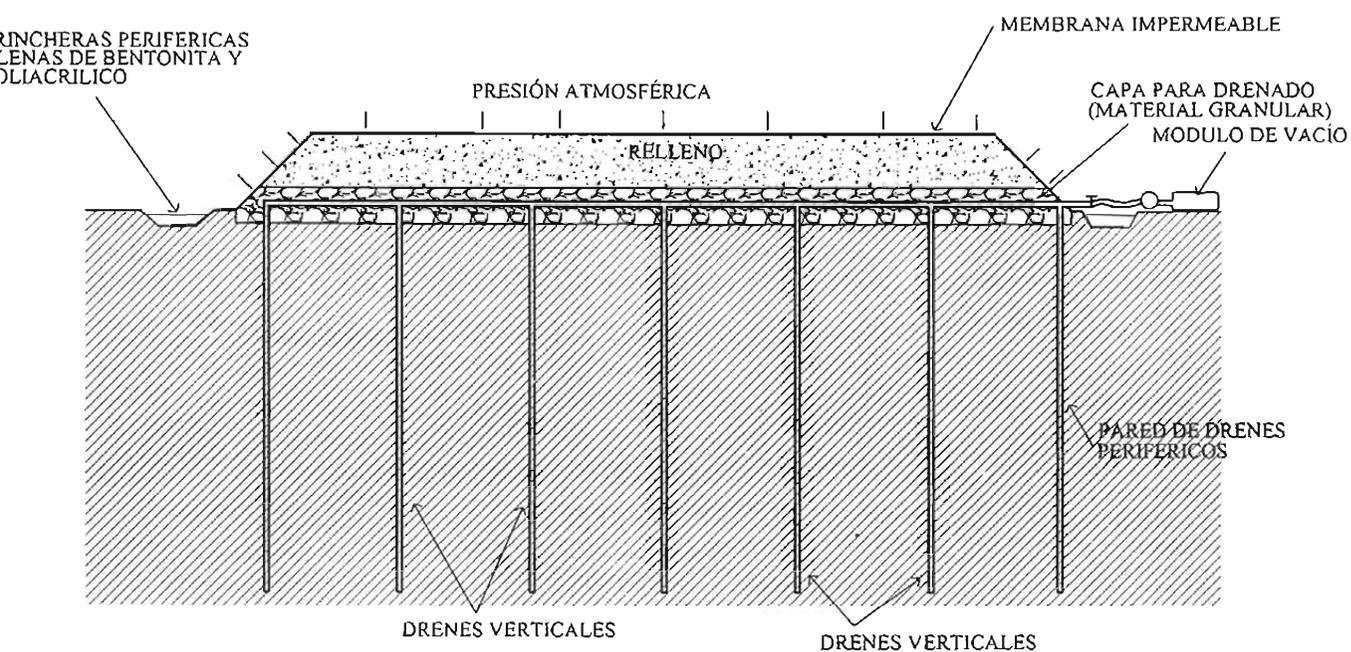


FIGURA 5.3 METODO DE MEJORAMIENTO DE SUELOS MEDIANTE PRECARGA EMPLEANDO LA TÉCNICA DE VACÍO



5.2 Compactación dinámica.

La compactación dinámica es un proceso de mejoramiento de suelos en el cual estos se compactan y aumentan su resistencia para soportar edificios, carreteras y otros ejemplos de construcción pesada. Básicamente consiste en dejar caer martillos muy pesados sobre la superficie de suelos granulares sueltos o suelos cohesivos blandos con el fin de aumentar su densidad y resistencia mecánica, incrementando además la permeabilidad y reduciendo el peligro de licuación.

Aunque el origen de esta técnica se remonta a los romanos, su origen formal como medio para densificar suelos se dio a finales de los 60's, gracias al Ing. Luis Menard, quien la patentó y desarrolló. A este método también se le conoce como apisonado pesado, consolidación dinámica y compactación dinámica profunda¹⁴.

El método es ilustrado en la figura 5.4. El peso que se emplea varía de 10 a 40 toneladas, y se deja caer de una altura variable de 5 a 30 metros. Para levantar el martillo se utiliza una grúa que lo deja caer desde la altura necesaria¹⁴.

La compactación se lleva a cabo siguiendo una malla con un espaciamiento típico, que oscila entre 5 y 15 metros; usualmente se deja caer el peso entre tres y diez veces, repitiéndose en todos los puntos de la malla.

La energía transmitida al suelo por impacto puede ser hasta de 12000 kN-m aunque los valores de energía normalmente son de 1500 a 5000 kN-m. El impacto del martillo en el suelo crea olas u ondas de choque que penetran hasta una profundidad de 10 metros. En suelos no cohesivos, estas ondas crean licuación, inmediatamente seguida de la compactación del suelo; en suelos cohesivos, crean presiones de poro excesivas, las cuales son seguidas por la consolidación del suelo.

La variedad de los suelos que han sido tratados con éxito es sorprendentemente amplia. Se ha logrado un mejoramiento efectivo en suelos que varían desde enrocamientos hasta limos arcillosos y desechos de construcción o basura doméstica. La figura 5.5, muestra la distribución de tamaños de las partículas de suelo en el cual es aplicable el método. En esta figura, los suelos son clasificados en tres grupos o zonas: la zona 1, zona 2 y zona 3. Los suelos que estén dentro de la zona 1, son los más adecuados para la compactación dinámica y los suelos en la zona 3 son los menos adecuados.

Basada en la zona del suelo, la energía requerida para densificarlo se muestra en la tabla 5.1.



W - PESO DEL APISONADOR
H - ALTURA DE CAIDA
D - MAXIMA PROFUNDIDAD
DE MEJORAMIENTO

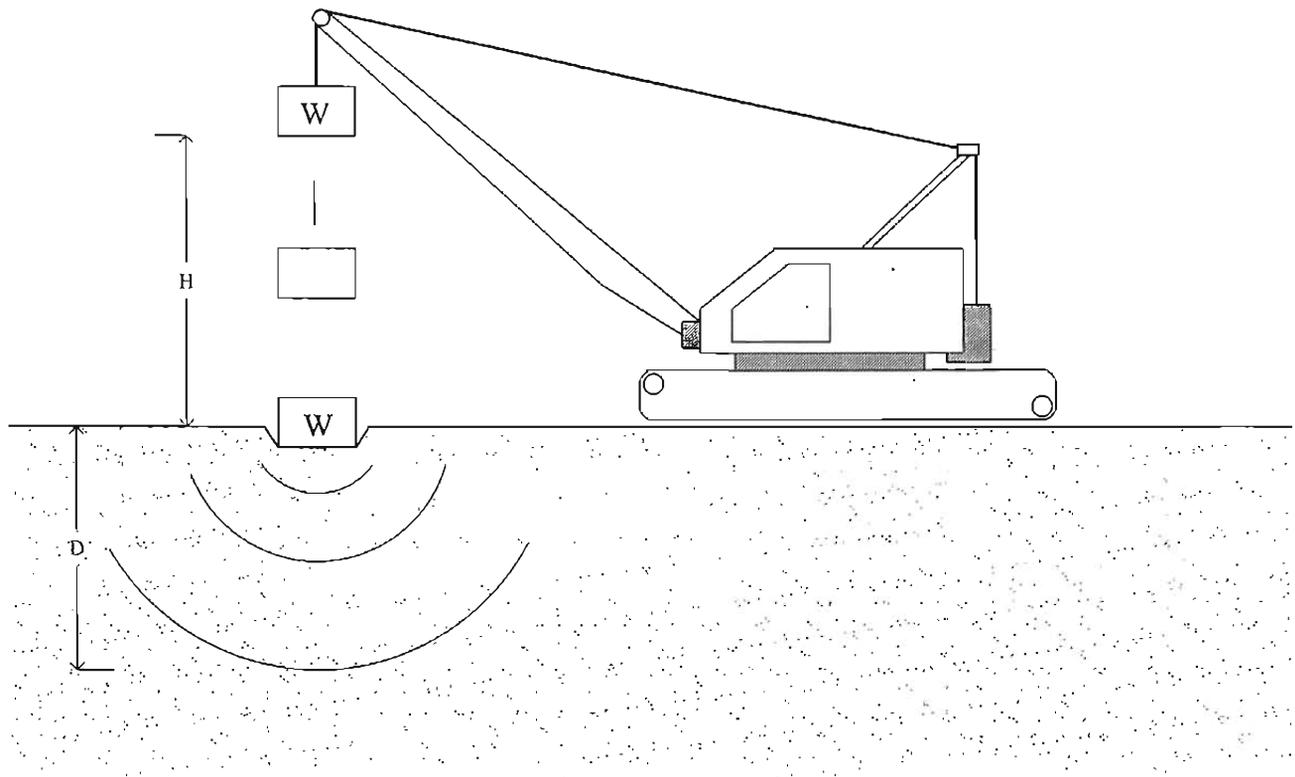


FIGURA 5.4 ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO Y EQUIPO EMPLEADO EN EL MEJORAMIENTO DE SUELOS MEDIANTE COMPACTACIÓN DINÁMICA.



TABLA 5.1 ENERGÍA NECESARIA PARA LA DENSIFICACIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE SUELOS¹⁴.

Tipo de depósito	Energía necesaria (kJ/m ³)
Suelos granulares (zona 1)	200 – 250
Suelos de grano fino (zona 2) y arcillas arriba del nivel freático (zona 3)	250 – 350
Depósitos heterogéneos (tiraderos)	600 – 1100

El suelo presenta tres etapas importantes durante su densificación mediante compactación dinámica, las cuales son:

1. Compresibilidad del suelo saturado debido a la presencia de micro – burbujas.
2. Transición gradual hacia la licuación bajo impactos repetidos.
3. Disipación rápida de la presión de poro debido a la alta permeabilidad que se tiene después de la fisura del suelo.

Las tres etapas anteriores están ilustradas en la figura 5.7, en la cual, cada incremento de energía representa una caída adicional del martillo. Como se puede observar en la figura, la licuación es inducida como resultado del impacto del peso en el suelo; adicionalmente, la capacidad de carga del suelo muestra un incremento aún después de que la presión de poro excesiva se ha disipado. Este fenómeno se conoce como el proceso de envejecimiento y no ocurre solamente en la compactación dinámica, sino que también ocurre en otras técnicas de densificación en las cuales se rompe la estructura del suelo.

El proceso de compactación dinámica parece implicar la fase gaseosa de los suelos llamados saturados. Esto explica el asentamiento inmediato que ocurre al momento del impacto (el cráter que se forma). El gas bajo forma de micro burbujas es primeramente comprimido para luego actuar como un gato de presión y expulsar el agua fuera del suelo. Las observaciones hechas demuestran que la sobrepresión de poros se disipa en mucho menos tiempo que cuando se somete al suelo a una carga estática. Esto puede deberse a las grietas de tensión que se forman en el suelo con cada golpe; mismas que se desarrollan en forma radial desde el punto de impacto, formando conductos de drenaje a través de los cuales circula el agua y ayudan a la disipación de la presión intersticial o de poro. También podría ser cierto que la licuación aumenta la permeabilidad de la estructura del suelo.

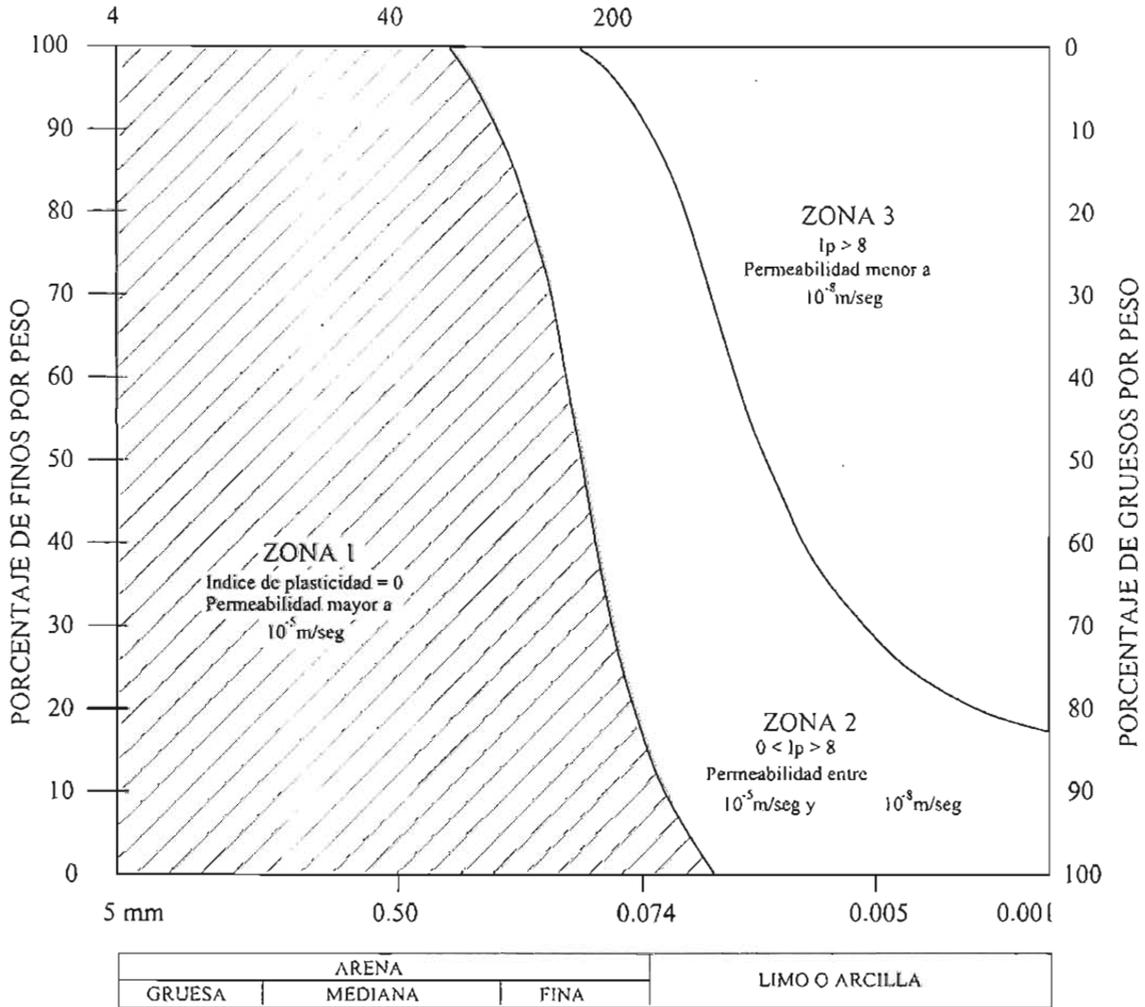


FIGURA 5.5 GRANULOMETRÍA IDÓNEA PARA EL MEJORAMIENTO DE SUELOS CON COMPACTACIÓN DINÁMICA



Por lo que se refiere al fenómeno de licuación dentro de la masa de suelo, el golpe produce varias ondas de impacto en el terreno (figura 5.6). La onda de compresión viaja básicamente a través de la fase líquida y sacude el esqueleto del suelo, aumentando y disminuyendo sucesivamente la presión de poro hasta dislocar el esqueleto. La onda de corte, así como la onda Raleigh viajan a menor velocidad, y subsecuentemente reacomodan los granos dislocados volviéndolos a un estado más denso.

Por consiguiente, ambos tipos de ondas juegan su propio papel, y en los suelos sumergidos las ondas transversales son las ondas densificadoras.

Como ya se mencionó, la compactación dinámica se lleva a cabo en patrones en forma de cuadrícula, con un espaciamiento de 5 a 15 metros entre cada punto de la cuadrícula. El área planeada para compactarse típicamente se extiende más allá de los límites del proyecto con una distancia igual al espesor del depósito que se busca densificar, lo cual es común en la mayoría de los métodos de mejoramiento de suelos.

Como resultado de un número limitado de caídas del apisonador, la densificación del suelo es usualmente realizada en múltiples pasadas. Una pasada es el tratamiento en un solo punto de la malla, es decir, es la caída del martillo un número predeterminado de veces en un solo punto.

Después de cada pasada, el cráter que se forma por el impacto del martillo (figura 5.8) es nivelado o rellenado con material granular antes de la siguiente secuencia de golpes. Debido a las presiones de consolidación el agua en ocasiones inunda los cráteres y su evacuación debe ser favorecida por bombeo u otro método de drenaje. En depósitos finos, a veces es necesario 3 o 4 pasadas, mientras que en muchos casos, solo se necesita una pasada para lograr el objetivo deseado.

La compactación dinámica también se lleva a cabo en etapas progresivas. La primera etapa de densificación emplea grandes masas dejadas caer desde muy alto, con grandes distancias entre los puntos de impacto. Esta primera etapa se realiza para densificar los estratos más profundos, y si se realiza inadecuadamente, por ejemplo, con poco espacio entre los puntos de impacto, puede crear una capa superior más densa que hará más difícil o imposible tratar el material suelto que se encuentra debajo de ella.

Después de completada la fase de “alta energía” usualmente sigue la fase de “baja energía”, la cual consiste en masas más pequeñas dejadas caer desde poca altura (5 a 6 metros) sobre una cuadrícula traslapada. A esta etapa, también se le conoce como “fase de planchado” y se realiza para densificar las capas superficiales (primeros 1.5 metros).

Como se muestra en la figura 5.8, el suelo cercano a la superficie está actualmente suelto hasta la profundidad de los cráteres formados durante la fase de alta energía. La fase de



baja energía o planchado, densifica las capas poco profundas. También se puede observar que la profundidad en la que se tiene el máximo mejoramiento varía de $0.33D$ a $0.5D$.

La máxima profundidad de mejoramiento (D) está dada por la siguiente ecuación:

$$D = n\sqrt{W \cdot H} \quad (1)$$

Donde:

D es la máxima profundidad de mejoramiento.

n es una constante empírica

W es la masa del martillo (en toneladas)

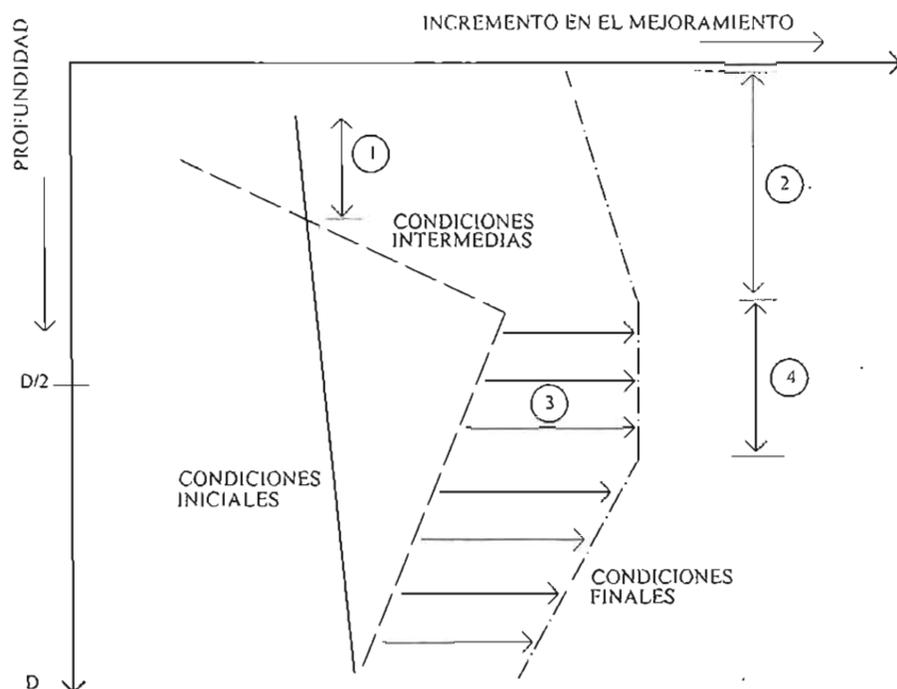
H es la altura de caída (en metros).

En esta expresión, el término WH es proporcional a la energía potencial del apisonador y su caída libre.

La variación en el valor de n es atribuida a la eficiencia del mecanismo de caída de la grúa, la cantidad total de energía aplicada, el tipo de suelo que se va a densificar, la presencia de capas que absorben energía, la presencia de capas duras arriba o debajo de la capa que se busca mejorar y la presión de contacto entre el apisonador y el suelo. Los valores de n varían desde 0.3 a 1.0, dependiendo de los factores anteriores.

El trabajo de investigación ha sido siempre el mayor componente en el desarrollo de esta reciente técnica de tratamiento de suelos, y aún está muy activo sobre varios renglones con el objetivo de ampliar la finalidad de la compactación dinámica en los que se refiere a profundidad y suelos granulares más finos. Esto significa que se está ampliando continuamente la gama de los suelos tratados por este método y por el momento esta es más amplia que la de cualquier otro método antiguo o reciente, y a menudo, con un costo inferior.

Además, debido a la creciente necesidad para tratar capas de suelo cada vez de mayor espesor (hasta de 40 metros), las grúas convencionales, aún modificadas, no son adecuadas, así que el diseño e innovación constante de nuevos equipos, para que los martillos tengan mayor altura de caída (40 metros) y se puedan emplear mayores pesos (se han empleado elementos de hasta 200 toneladas) es importante y obligatorio.



1. Después de las etapas iniciales, las superficiales se aflojan o sueltan a la profundidad del cráter.
2. Los depósitos superficiales se densifican mediante el proceso de "planchado"
3. Incremento de resistencia debido al envejecimiento del suelo.
4. El Máximo mejoramiento usualmente se tiene a una profundidad igual a $D/2$ y $D/3$

FIGURA 5.6 CAMBIOS EN LAS CONDICIONES DE LA MASA DE SUELO CON EL MEJORAMIENTO CON COMPACTACIÓN DINÁMICA

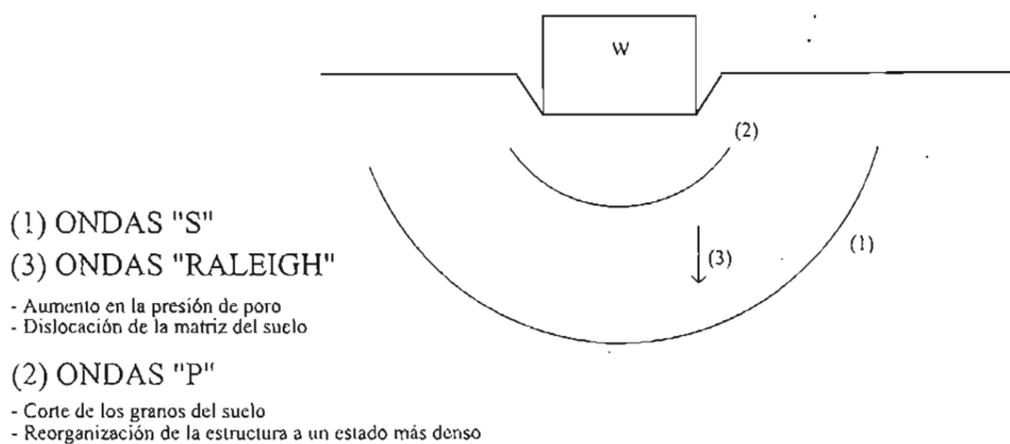


FIGURA 5.7 EFECTO DE LA CAÍDA DEL APISONADOR SOBRE LA MASA DE SUELO Y ONDAS DE CHOQUE RESULTANTES

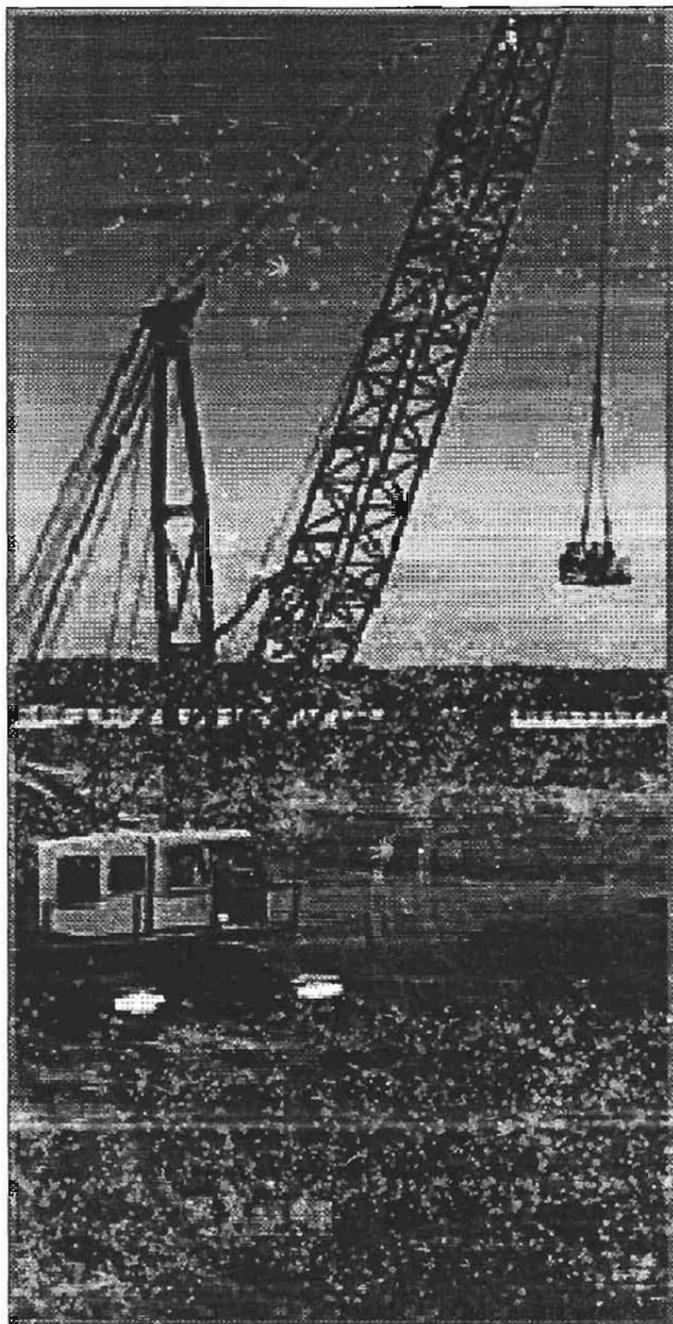


FIGURA 5.8 EFECTO DE LA CAÍDA DEL APIÑONADOR EN EL TERRENO DONDE SE EFECTÚA EL MEJORAMIENTO EMPLEANDO LA COMPACTACIÓN DINÁMICA



5.3 Ejemplos de aplicación práctica de los métodos de mejoramiento mecánico.

5.3.1 Empleo de la precarga para el mejoramiento del subsuelo previo a la construcción de tanques de almacenamiento de crudo de 500 mil barriles. Terminal marítima de Dos Bocas, Tabasco, México¹⁴.

La primera etapa del Proyecto de Dos Bocas de Petróleos Mexicanos (PEMEX), en el Estado de Tabasco consistió en la construcción de una Terminal marítima para la exportación de crudo mediante una monoboya con capacidad de 250 mil toneladas de peso muerto y un puerto de abastecimiento de materiales para la construcción de las obras marítimas del Golfo de Campeche.

Las especificaciones para el diseño de la cimentación de los tanques de almacenamiento requieren el análisis de los asentamientos diferenciales máximos permisibles en el perímetro del tanque, que debe ser inferior al 0.10% de la distorsión entre dos puntos del perímetro (tabla 5.2). Otro mecanismo en importancia para el diseño de la cimentación es la estabilidad de la cimentación durante la construcción y el primer llenado, lo cual es significativo cuando la cimentación está desplantada sobre suelos blandos de alta sensibilidad y cuyas características de resistencia en condiciones no drenadas requieren especial atención para evitar una falla por rotación o deslizamiento durante la operación del tanque.

TABLA 5.2 ASENTAMIENTOS PERMISIBLES, OBSERVADOS Y PROBABLES EN LA CIMENTACIÓN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO.

Tipo de Asentamiento	Permisible según norma PEMEX	Calculados sin tratamiento, considerando estratigrafía a detalle	Observados posteriormente al tratamiento	Probables estimados para después del tratamiento con estratigrafía modificada
Total máximo (cm)	≤ 50	74.00	96	≤ 10
Máximo en el perímetro (cm)	≤ 30	29.4	75	≤ 8
Diferencial máximo en el perímetro (cm)	≤ 0.001	-----	0.0025	≤ 0.001
Diferencial máximo en el diámetro (cm)	≤ 0.005	0.0062	0.001	≤ 0.005



Dadas las características estratigráficas de la zona donde se efectuó la construcción del tanque, en los dos análisis de importancia de la cimentación mencionados anteriormente no se cumplían las normas establecidas para este tipo de estructura. Por tal motivo, se manejaron diferentes alternativas de tratamiento para cumplir con las normas, las cuales fueron: precarga mediante un terraplén; precarga mediante un terraplén y drenes de grava; y precompresión por abatimiento del nivel freático mediante bombeo. Por costo e incertidumbre acerca del funcionamiento del método se decidió el mejoramiento del subsuelo empleando un terraplén de carga.

Las características relevantes de los terraplenes estructurales y de precarga se pueden observar en la figura 5.9, empleando en la construcción arena fina y uniforme proveniente de la dársena mediante draga de arrastre¹⁴.

La máxima velocidad de construcción de la precarga se especificó en 40 cm/día, lo que corresponde a un incremento de esfuerzo diario de 0.066 kg/cm². El criterio aplicado fue distribuir la precarga en 20 incrementos similares.

La figura 5.11 presenta una comparación del perfil estratigráfico en un sondeo efectuado en la zona de construcción del tanque. Se puede observar que la resistencia a la penetración estándar no presenta diferencias notables antes y después del tratamiento, a excepción del estrato potente de arcilla que se encuentra a una profundidad superior a los 13.00 metros. Previo al tratamiento la herramienta penetraba por peso propio, para después del tratamiento presentar valores de resistencia de 10 golpes y una mejora en la consistencia, reportada de media a ligeramente firme. Por lo que respecta a arenas se la secuencia superior existe una ligera tendencia a obtener valores mayores después del tratamiento. En las figuras 5.9 y 5.10 se resumen las características del tratamiento de la precarga y los resultados obtenidos.

Otro resultado relevante del tratamiento es el corto tiempo que requirió la consolidación bajo la precarga, ya que esta se desarrolló prácticamente durante la construcción, ocasionada por las condiciones de drenaje en las fronteras de los estratos arcillosos, que permitieron la disipación rápida de la presión de poro generada por la precarga.

Además, la consolidación acelerada del subsuelo tuvo un efecto benéfico adicional, que fue la mejora de la estabilidad de la cimentación.

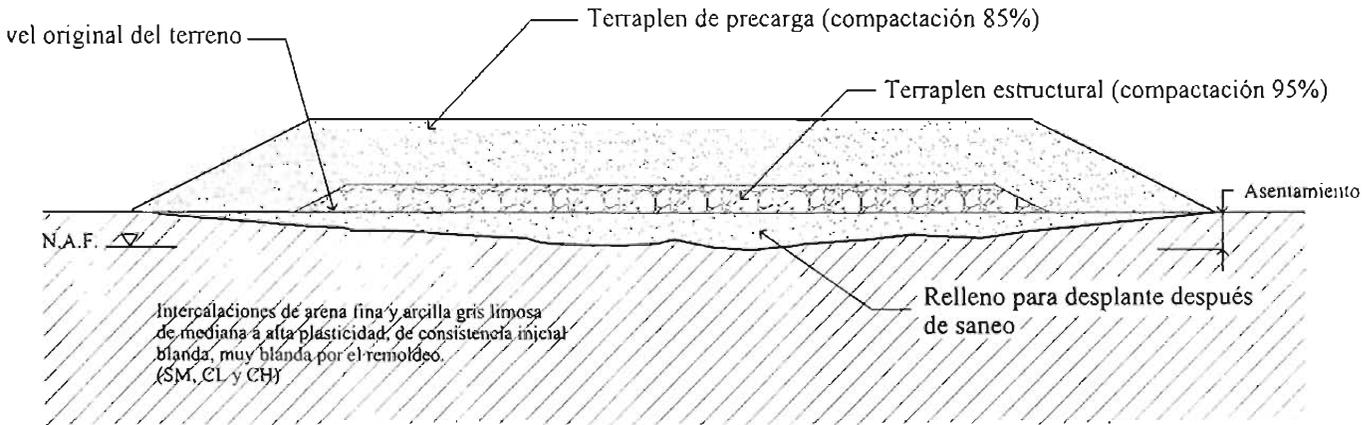


FIGURA 5.9 CARACTERÍSTICAS DE LOS TERRAPLENES ESTRUCTURAL Y DE PRECARGA

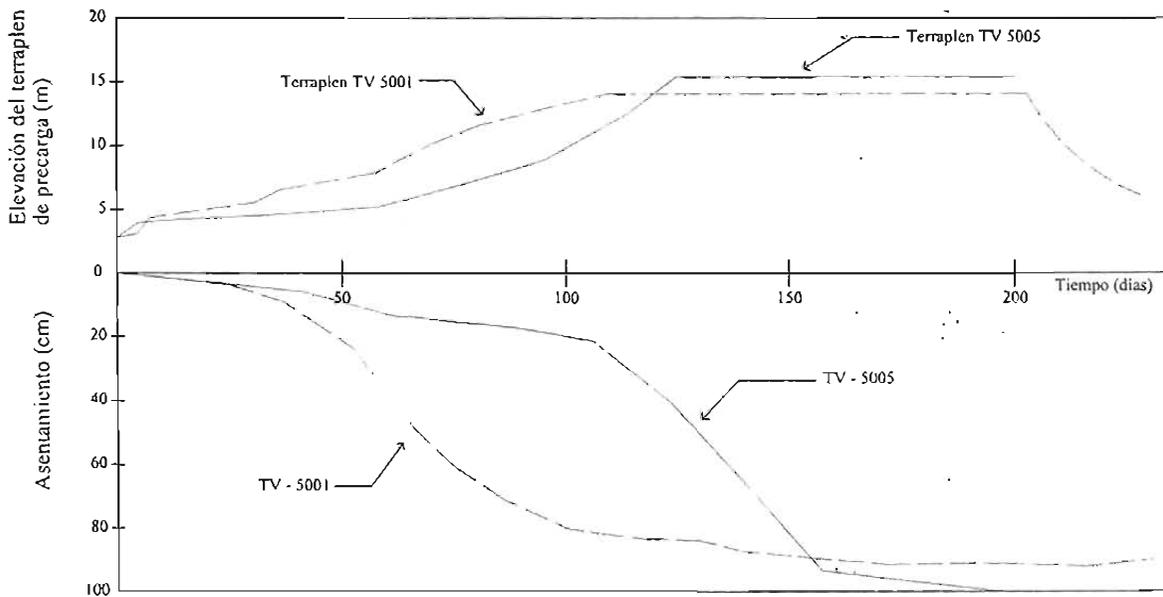


FIGURA 5.10 CURVAS DE PRECARGA Y ASENTAMIENTOS OBTENIDOS PARA LOS TANQUES TV 5005 Y TV 5001

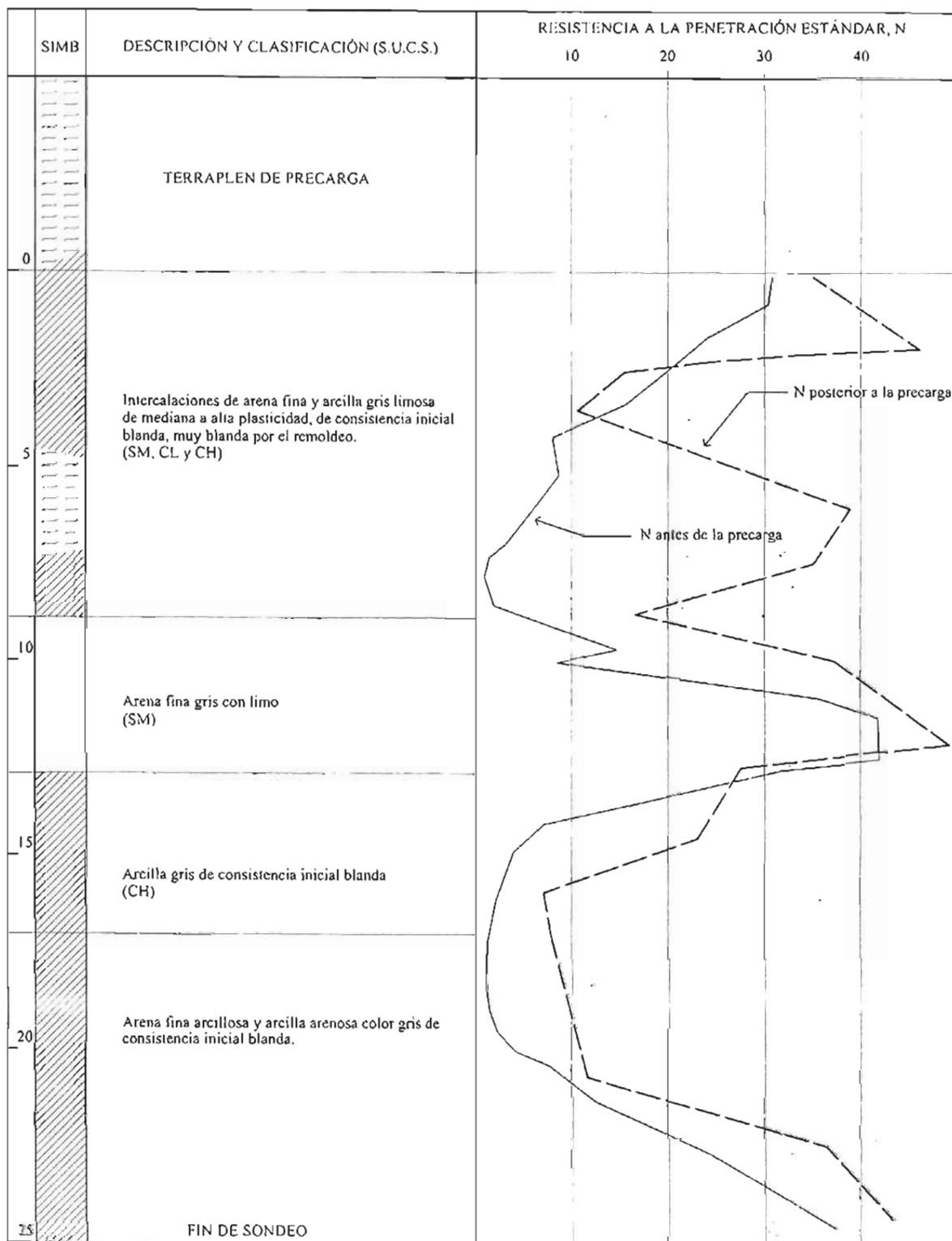


FIGURA 5.11 PERFILES ESTRATIGRÁFICOS ANTES Y DESPUÉS DEL TRATAMIENTO CON PRECARGA PARA EL TANQUE TV-5001



5.3.2 Tratamiento de un relleno de arena en Jacksonville, Florida, USA¹³.

La gran mayoría de los trabajos de mejoramiento de suelos con el método de compactación dinámica o compactación Menard se realizan en el extranjero, y su aplicación en México es prácticamente nula, a excepción de trabajos aislados en costas y zonas con estratos importantes de arena.

El tratamiento de un relleno arenoso en Florida se llevó a cabo en la Isla Blount, dentro de un terreno de prueba de 150 pies cuadrados denominado dentro del proyecto como "O.P.S."

El sitio estaba constituido por residuos de dragado homogéneos colocados directamente sobre un limo orgánico que constituía el pantano original. Inmediatamente antes del tratamiento por compactación dinámica el sitio fue sobreelevado de 5 a 7 pies (1.5 a 2.0 m) con arena fina a mediana, depositada y bandeada con equipo mecánico. En términos generales, la estratigrafía del sitio se puede resumir en la figura 5.12.

El tratamiento con compactación dinámica se realizó por medio de una maza de 18 toneladas de peso y con una caída libre de 75 pies (23 metros). En cada fase se formaron cráteres espaciados de 15 pies (4.5 metros) centro a centro de 275 pies cúbicos (7.5 m³). Finalizado el tratamiento hicieron las siguientes observaciones:

1. Asentamientos inducidos por cada fase de la compactación dinámica, con un promedio de 2.27 pies (70 cm)
2. Control de la presión de poro entre dos fases consecutivas.
3. Aumento de las características geotécnicas del suelo después de la compactación dinámica.

La comprobación del mejoramiento en las características geotécnicas del suelo se dedujo del número de golpes de la prueba SPT (figura 5.12) y de los resultados presiométricos. Los resultados fueron obtenidos de cinco barrenos ejecutados después de efectuada la compactación dinámica; cuatro de estos cinco barrenos estaban localizados en las esquinas de la zona tratada.

Si se comparan estos resultados de la prueba a la penetración estándar con los resultados obtenidos del suelo antes del mejoramiento, se observa que el número de golpes aumentó casi 6 veces a una profundidad de 11.4 metros y casi 2.5 veces a la profundidad de 9.05 metros, donde se tiene una arena limosa, con lo cual se comprueba la eficiencia del método en suelos friccionantes como arenas.

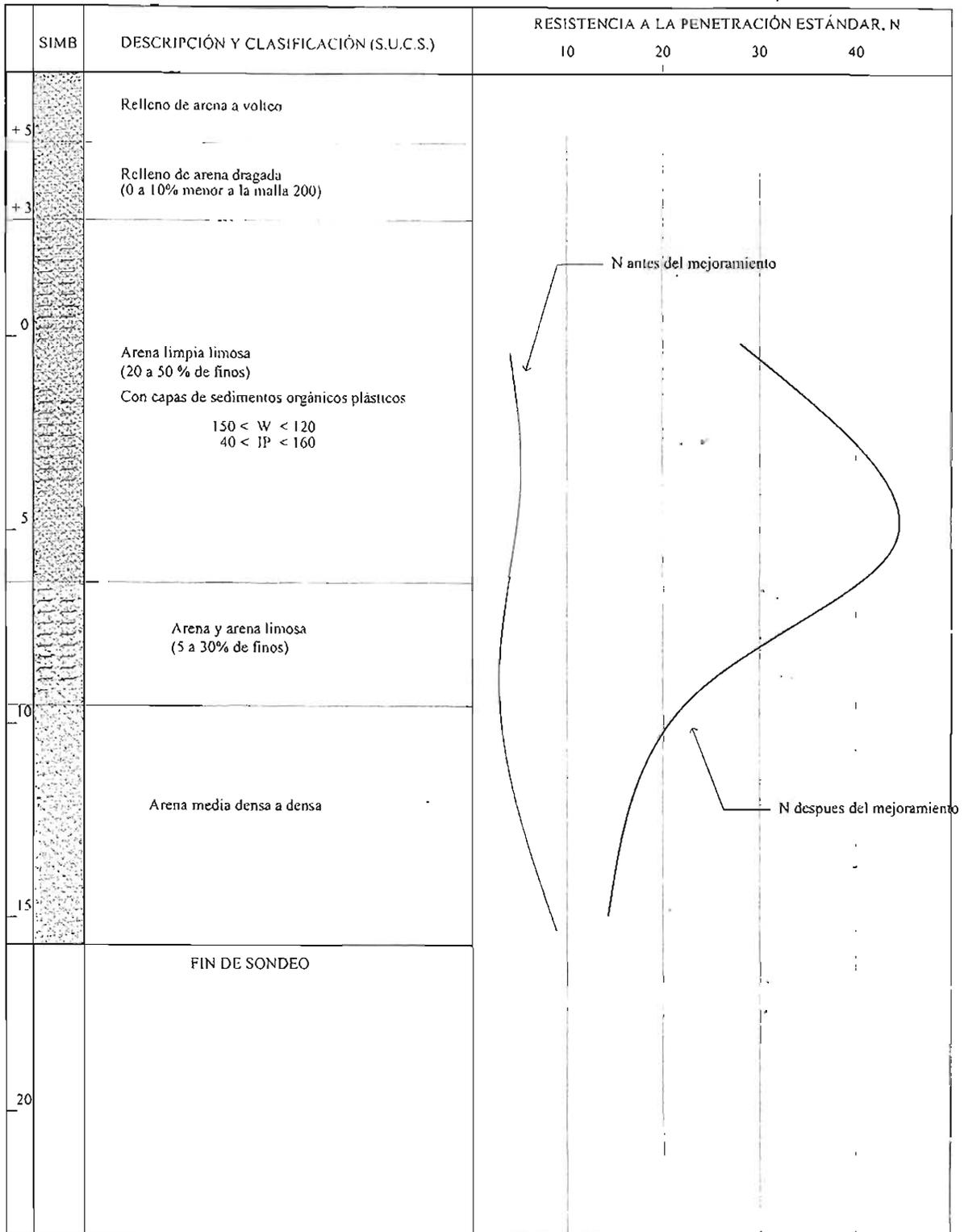


FIGURA 5.12 PERFIL ESTRATIGRÁFICO Y RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN ESTÁNDAR EFECTUADOS ANTES Y DESPUES DEL MEJORAMIENTO MEDIANTE COMPACTACIÓN DINÁMICA



CONCLUSIONES.

El mejoramiento de las propiedades mecánicas de suelos, ya sea superficial o profundo es, en muchas ocasiones, la alternativa más viable cuando se tiene que trabajar con suelos cuyo comportamiento no satisface con las características óptimas en cuanto a resistencia establecidas en normas, especificaciones o reglamentos.

Esta solución para resolver la problemática presentada en suelos, en la mayoría de los casos donde se han aplicado los métodos de mejoramiento, queda por encima de otras alternativas, como puede ser la reubicación del sitio, el empleo de cimentaciones profundas (pilas, pilotes), adquisición y transporte de materiales de bancos lejanos, etc., debido principalmente al avance tecnológico, que permite la realización de proyectos en menos tiempo y con la obtención de mejores resultados.

Para la selección del método de mejoramiento se parte de diferentes puntos elementales, entre los cuales se tienen:

- Proyecto a desarrollar, donde se especifica en que se va a emplear el suelo una vez estabilizado, o las características deseadas del subsuelo para el desplante de estructuras. En este punto se recibe el proyecto tal y como fue conceptualizado, con plantas, secciones, perfiles y especificaciones en cuanto a la calidad que deben cumplir los materiales a emplear. Quedan establecidos los requerimientos en cuanto a seguridad y resistencia que deben cubrir los materiales, los análisis que se deben realizar dependiendo del tipo de estructura y normas y reglamentos que regirán el proyecto y construcción de la obra.
- Características generales del sitio, como son condiciones ambientales, presencia de edificaciones, ubicación de bancos de materiales, conocimiento de la ubicación del nivel de aguas freáticas, etc.
- Condiciones geotécnicas del sitio, las cuales pueden ser conocidas mediante sondeos exploratorios, ya sea por penetración estándar u otros métodos de investigación como cono eléctrico, refracción sísmica, y métodos básicos como la realización de pozos a cielo abierto, con las pruebas básicas necesarias para conocer la granulometría, índices de plasticidad, humedad, peso volumétrico, resistencia y cuando lo requiera el caso, el grado de consolidación y la permeabilidad. La investigación del subsuelo puede ser complementada con cartas geológicas y otros estudios realizados con anterioridad en la zona, que ayuden a detallar aún más la estratigrafía del sitio.

Conociendo bien los puntos anteriores y sabiendo que cada uno de los métodos de mejoramiento tiene un campo de aplicación establecido, donde por la experiencia adquirida



se pueden garantizar resultados adecuados, se puede tener un panorama más detallado para el análisis de cada método y su campo de aplicación y así seleccionar el que sea más viable para las condiciones establecidas, para posteriormente realizar el análisis del costo y revisar su factibilidad.

Sin embargo, muchas veces el costo de un programa de mejoramiento puede ser tan elevado, que se tendría que desechar esta alternativa, ya sea por el volumen a tratar, espesores del subsuelo, profundidad de tratamiento, cantidad de materiales a emplear, tiempo de duración, propiedades geotécnicas naturales del suelo, entre otros factores que incrementan enormemente el costo del proyecto.

De lo mencionado anteriormente, se acepta que el conocimiento completo de las propiedades básicas de los suelos, como la granulometría, los límites de Atterberg, la resistencia, la densidad, la compacidad, el grado de consolidación, entre otras, sea el factor más importante en un proyecto para el mejoramiento de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos ya que en estas características dependerá en gran medida la selección del método a emplear, sin dejar a un lado en ningún momento el costo del proyecto y la duración del mismo.

Para el mejoramiento de suelos que van a ser empleados como material de construcción, como es en el caso de suelos utilizados en la construcción de terracerías, bases y subbases de pavimentos, rellenos para el desplante de estructuras, para la conformación de plataformas de trabajo, entre otros, la decisión del método de mejoramiento está en función de la granulometría, el Valor Relativo de Soporte, límites de Atterberg y humedad. El mejoramiento del suelo en estos casos, se basa principalmente en el aumento a la resistencia al esfuerzo cortante, sin embargo, se tienen otras mejoras en el suelo, como sería el aumento en el valor relativo de soporte, disminución de la plasticidad, mejoramiento en la permeabilidad (más permeable o impermeable), disminución en la expansibilidad y mejoras en la trabajabilidad de los materiales.

En el caso particular cuando el suelo va a ser empleado como material de construcción, los métodos más comunes para mejorar las propiedades mecánicas son los siguientes:

- Estabilización mediante la adición de cemento (suelo – cemento).
- Estabilización mediante la adición de cal (suelo – cal)
- Modificación de la granulometría mediante la mezcla de suelos.
- Estabilización mediante la adición de productos químicos (asfalto, ceniza volátil).

Para la estabilización del suelo con cemento, el rango de suelos en los que se puede aplicar es muy amplio y se tienen resultados satisfactorios si se cumplen con las restricciones establecidas en cuanto a porcentaje de material fino, plasticidad y humedad. Por otro lado,



para el empleo de cal, el rango de suelos, aunque sigue siendo amplio, se puede reducir a arcillas y algunas veces a limos, ya que en estos materiales se presentan mejores resultados, abarcando más de los mencionados en el párrafo anterior.

El método de mejoramiento de suelos a partir de la modificación en la granulometría es empleado principalmente en la construcción de pavimentos, donde se especifica que los materiales a emplear en la construcción deben cumplir con determinadas granulometrías, condiciones de plasticidad y con características de resistencia (V.R.S.). Además de su uso en la construcción de carreteras, es útil en la conformación de rellenos, ya que la cantidad de material fino que contenga un material reducirá o aumentará la permeabilidad, situación que se reflejará en un incremento en las propiedades mecánicas del suelo al propiciar un mejor flujo del agua dentro de la masa de suelo.

Por otro lado, cuando se realiza el proyecto de mejoramiento del subsuelo para obtener un mejor comportamiento del mismo para el caso de la cimentación de estructuras de dimensiones importantes que van a ser desplantadas en sitios con condiciones desfavorables, con problemas relacionados a estratos importantes de arenas uniformes, arcillas muy compresibles, rellenos heterogéneos y cavernas o cavidades, además de que el costo de la reubicación del proyecto es difícil de solventar, la alternativa del mejoramiento de estos estratos queda como una opción con una factibilidad importante. A manera de resumen, los métodos de mejoramiento comúnmente empleados para este tipo de proyectos de mejoramiento son los siguientes:

- Jet Grouting.
- Vibroflotación y vibrosustitución.
- Inyección de suelos.
- Precarga.
- Compactación dinámica.

Para la selección del método que mejores resultados ofrezca, y como ya se mencionó, se debe realizar un estudio a detalle de la estratigrafía del subsuelo, conociendo las propiedades de cada uno de los estratos que conforman el subsuelo. Para el empleo de los métodos de mejoramiento profundo, como la vibroflotación, el jet grouting, y otros mencionados en el presente trabajo, se requiere el conocimiento del tipo de suelo, basado en la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.), el espesor de los estratos, localización del nivel de aguas freáticas y propiedades mecánicas de los materiales, los cuales pueden conocerse por métodos indirectos como el número de golpes en la prueba a la penetración estándar (SPT) u otros métodos como el cono eléctrico o refracción sísmica. El conocimiento de la resistencia del subsuelo permite conocer el estado de este antes del tratamiento, para que posteriormente a pruebas realizadas se conozca la efectividad del método y la mejora resultante en la resistencia. Debido a esto, siempre es recomendable realizar pruebas previas al tratamiento, para que con los resultados obtenidos

posteriormente se puedan modificar o mejorar las especificaciones técnicas del método empleado, así como adecuar o modificar el proyecto.

Para métodos donde se producen asentamientos en el terreno, como la precarga o la consolidación por medio de vacío, es recomendable llevar un control por medio de instrumentación, para llevar un monitoreo de los asentamientos y de incrementos o descensos en la presión intersticial dentro de la masa de suelo, que son provocados por acciones externas. Con el monitoreo de los asentamientos y de la presión dentro de la masa de suelo se pueden efectuar cambios en el proyecto de mejoramiento, que generen mejores resultados a largo plazo.

De igual manera que los métodos empleados para la estabilización de suelos, los empleados para el mejoramiento de estratos profundos cuentan con rangos de aplicación apropiados, basados en la granulometría, plasticidad, permeabilidad y en algunos casos de la localización del nivel freático. Las tablas C1 y C2 anexas muestran los materiales en los que los métodos mencionados en el presente trabajo han presentado buenos resultados.

En resumen, se tiene que estratos constituidos por materiales gruesos, como arenas y gravas pueden ser mejorados mediante el empleo de la vibroflotación, la inyección, ya sea por penetración, o compactación, el jet grouting, y la compactación dinámica, ya que la estructura con la que se forman estos suelos permite que sea modificada mediante agentes externos, como puede ser equipo mecánico o lechadas compuestas por mortero y otras sustancias; asimismo, la permeabilidad de estos materiales, permite una disipación rápida de la presión de poro o intersticial. Lo que funciona para materiales gruesos según el S.U.C.S. no siempre funciona de la misma manera para materiales finos, teniendo que para estos el empleo del jet grouting, la precarga y la compactación dinámica han obtenido buenos resultados.

El empleo de los métodos de mejoramiento de suelos mencionados no solo se refiere a trabajos previos, sino que también pueden considerarse como medio alterno para la recimentación de estructuras (en el caso de la inyección de suelos) y para trabajos auxiliares, como en el empleo del jet grouting como estabilizador de excavaciones subterráneas (por ejemplo para excavaciones de túneles o sistemas de drenaje profundo empleando escudos), para la construcción de pantallas impermeables que impidan el paso del agua, entre otros, quedando de manifiesto su flexibilidad para otros trabajos de ingeniería.

Así, la aplicabilidad de los métodos justifica su estudio detallado, buscando la manera de implementar nuevas tecnologías e incluso combinar métodos para la obtención de mejores resultados, considerando siempre los factores tiempo, costo y resultados obtenidos o esperados.



TABLA C1 PROBLEMAS TÍPICOS OBSERVADOS EN PROYECTOS DE CIMENTACIONES DE ESTRUCTURAS DE TAMAÑO CONSIDERABLE Y MÉTODOS ADECUADOS PARA RESOLVERLOS.

Problema detectado en el subsuelo.	Método recomendado para el mejoramiento de las propiedades mecánicas del subsuelo
Rellenos heterogéneos constituidos por materiales de baja resistencia. Estratigrafía compleja.	Jet grouting, inyección de mortero
Espesores importantes de arenas finas con potencial de licuación elevado.	Vibroflotación, vibrosustitución, jet grouting, compactación dinámica
Lentes de arena fina.	Inyección de mortero, vibroflotación, jet grouting
Presencia de nivel freático, materiales muy permeables con susceptibilidad de problemas relacionados con tubificación	Inyección de mortero, jet grouting
Estratos importantes de arcilla altamente compresible	Precarga, compactación dinámica
Detección de estratos en el subsuelo con valores bajos en la prueba de la resistencia a la penetración estándar (SPT)	Vibroflotación, jet grouting, compactación dinámica, precarga.

TABLA C2 PROBLEMAS TÍPICOS OBSERVADOS EN SUELOS PARA SU EMPLEO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN Y LOS MÉTODOS RECOMENDADOS PARA SU SOLUCIÓN

Problema observado en el suelo.	Método recomendado para el mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo
Granulometría deficiente que no cumple con especificaciones	Modificación de la granulometría mediante la adición de fracciones insuficientes
Valor relativo de soporte bajo o inadecuado	Adición de cemento, cal u otro agente estabilizador
Alta expansibilidad	Adición de cal
Suelos con altos contenidos de agua. Problemas relacionados con agua en excavaciones y desplante de cimentaciones superficiales u otras estructuras.	Adición de cal
Altos valores del índice plástico, límite líquido y límite plástico.	Adición de cal, cemento
Material muy permeable para ser empleado como material de relleno o como material de desplante de estructuras	Adición de material fino, adición de asfalto.



BIBLIOGRAFÍA.

- 1 **Grouting Technology.** Engineering and design. Engineer manual No. 1110-2-3506. US Army Corps of Engineers, Washington D.C. 1984
- 2 **Ground Improvement techniques for liquefaction remediation near existing lifelines.** Ronald D. Andrus, Riley M. Chung. National Institute of Standards and Technology. USA 1995
- 3 **La ingeniería de suelos en las vías terrestres, Vol. 2.** Rico Rodríguez Alfonso, Del castilo hermilo. Editorial Limusa, México, 1984
- 4 **Vacuum Consolidation,** Rev. French Geotechnique, vol 57.
- 5 **Mejoramiento de suelos por precarga.** Stamatopoulos Aris C., Kotzias Panagiotis C. Editorial Limusa, México 1990
- 6 **Estabilización de suelos para obras de ingeniería civil.** Tesis profesional. Zúñiga Caballero Arturo, Rodríguez Guerrero Joaquin. UNAM, Acatlán, 1983
- 7 **Mecánica de suelos y cimentaciones.** Crespo Villalaz Carlos. Editorial Limusa, México, 1993
- 8 **Mecánica de Suelos.** Lambe William T, Whitman Robert B. Editorial Limusa, México 1993
- 9 **Compactación de Terrenos.** Arredondo y Verdú Francisco. Editores Técnicos Asociados, España 1970
- 10 **Mecánica de suelos en la ingeniería práctica.** Terzaghi Kart, Peck Ralph B. Editorial Libreria El Ateneo, Buenos Aires, Argentina, 1986.
- 11 **La Ingeniería de Suelos en las Vías terrestres Vol. 2.** Rico Rodríguez, Del Castillo Hermilo
- 12 **La Ingeniería de Suelos en las Vías terrestres Vol. 1.** Rico Rodríguez, Del Castillo Hermilo
- 13 **Mejoramiento y Estabilización de Suelos.** Fernández Loaiza Carlos. Editorial Limusa, México 1982
- 14 **Mejoramiento masivo de suelos.** Vieitez Utesa Luis. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. México 1980.
- 15 **Soil Stabilization.** Inglés O.G. & Metcalf J.B. Editorial Butterworths, Australia.
- 16 **Soil Improvement for earthquake hazard mitigation.** Roman D. Hryciw. Geotechnical Special Publication No. 49. Publ. American Society of Civil Engineers. USA 1995
- 17 **Engineering principles of ground modification.** Hausmann R. Manfred. McGraw Hill, USA 1990
- 18 **Utilización de jet Grouting en un túnel con frente mixto, de la Ciudad de México.** Fundación ICA, Revista Ingeniería y Desarrollo, México 1999
- 19 **Soil stabilization for pavements.** Joint Departments of the Army and Air Force”, USA, Octubre 1994
- 20 **Mejoramiento de las arcillas expansivas en Jiutepec, Morelos por medio de**



la adición de cal. Bonda Alonso I, Zamora Merino R. Memorias de la XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. México, 2002

Compactación por vibrado en suelos potencialmente licuables, en la planta de nitrógeno Cantarell, en Antonio Cárdenas, Campeche. Sámano Alvarez A.A. Scmitter Martin del Campo J.J. Memorias de la XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. México, 2002



RELACIÓN DE FIGURAS

Figura	Descripción	Hoja
1.1	Curvas granulométricas típicas de diferentes suelos	9
1.2	Esquematación del movimiento de agua dentro de la masa de suelo	9
1.3	Clasificación de suelos de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.)	12
1.4	Teoría de la consolidación de suelos	17
1.5	Curvas de consolidación y de compresibilidad típicas	18
1.6	Comportamiento de suelos ante la acción de sobrecargas aplicadas sobre ellos (compresión simple)	21
1.7	Teoría de la resistencia al esfuerzo cortante obtenida a partir de pruebas de compresión triaxial	21
2.1	Empleo común de geotextiles en obras de ingeniería civil	31
2.2	Empleo del mejoramiento térmico con calor en la estabilización de un terraplén	35
2.3	Diagrama esquemático de la máquina de tratamiento térmico con calor	35
2.4	Mejoramiento térmico de suelos mediante sistema de calentamiento del tipo cerrado colocado en una perforación	36
2.5	Sistema de mejoramiento de suelos mediante la congelación y circulación de salmueras y aplicación en la estabilización de excavaciones	39
2.6	Congelamiento de suelos con nitrógeno líquido. Alternativas de colocación del sistema de tuberías	40
3.1	Variación de la resistencia a la compresión simple de especímenes estabilizados con cemento en diverso suelos típicos	47
3.2	Equipo empleado en el mejoramiento superficial de suelos	52
3.3	Variación de la resistencia a la compresión simple de especímenes estabilizados con cal en diversos suelos típicos, con diferentes niveles de tratamiento	56
3.4	Efectos de la edad en una mezcla de 5% de cal, en peso, en diferentes tipos de suelos	57
3.5	Esquematación de suelos con diferentes granulometrías	62
3.6	Zonas granulométricas especificadas para el diseño y construcción de bases y subbases	62
3.7	Método gráfico para el diseño de mezclas de suelos para la modificación de la granulometría	68
3.8	Método gráfico para la obtención de la plasticidad de mezclas de suelos	69
3.9	Proyecto de reposición de losas de concreto hidráulico y de base con material estabilizado con cemento. Autopista México – Tuxpan.	77
3.10	Comparación del valor relativo de soporte para un suelo estabilizado con cemento y cal, con el obtenido del suelo sin tratamiento.	77
3.11	Resultados del análisis del comportamiento de arcillas estabilizadas mediante la adición de cal	80
4.1	Granulometría idónea para el tratamiento de suelos con vibroflotación	82
4.2	Equipo básico y esquematización del procedimiento básico para el mejoramiento de suelos mediante vibroflotación	84
4.3	Zonas densificadas durante el procedimiento de vibroflotación	86
4.4	Movimiento cónico del vibrador dentro de la masa de suelo	86
4.5	Acción del vibroflotador dentro de la masa de suelo y efecto de las fuerzas producidas por el equipo. Diámetros comunes de la columna de suelo densificado	87



4.6	Acomodo típico de los puntos donde se realizará el mejoramiento con vibroflotación	87
4.7	Diferentes momentos en el mejoramiento de suelos mediante vibroflotación	88
4.8	Procedimiento para el tratamiento de suelos mediante Jet Grouting y acción del equipo dentro de la masa de suelo	90
4.9	Rango de suelos apropiado para el empleo de Jet Grouting y comparación con el rango de suelos apropiado para el empleo de inyección de cemento	91
4.10	Resistencias típicas de especímenes obtenidos de columnas de suelo – cemento construidas con la técnica de Jet Grouting	91
4.11	Variación en el diámetro de las columnas de jet grouting con la velocidad de retiro del equipo, en diferentes tipos de suelos	95
4.12	Variación en el diámetro de las columnas de jet grouting con la velocidad de retiro del equipo y al sistema de chorro a presión empleado.	95
4.13	Equipo empleado en el método de jet grouting y columnas de suelo mejorado	96
4.14	Empleo común de las inyecciones en suelos en obras de ingeniería civil	99
4.15	Comparación de la penetrabilidad de diferentes materiales empleados en mezclas de inyección para suelos	100
4.16	Tipos de inyección dependiendo del comportamiento de la lechada dentro de la masa de suelo	106
4.17	Técnica de inyectado Tubé a Manchette	109
4.18	Métodos de inyectado en etapas ascendentes y en etapas descendentes	109
4.19	Equipo básico empleado en la inyección de suelos	114
4.20	Equipo empleado en el método de inyección de suelos y/o rocas	114
4.21	Estratigrafía y resultados de la prueba SPT para suelos mejorados mediante vibroflotación	118
4.22	Tratamiento mediante jet grouting para la excavación de un túnel en la Ciudad de México (planta)	120
4.23	Tratamiento mediante jet grouting para la excavación de un túnel en la Ciudad de México (sección A – A’)	120
4.24	Tratamiento mediante jet grouting para la excavación de un túnel en la Ciudad de México (perfil)	121
4.25	Tratamiento mediante jet grouting para la excavación de un túnel en la Ciudad de México (sección longitudinal)	121
4.26	Detalle esquemático de las inyecciones empleadas en los trabajos de rehabilitación de la catedral metropolitana de la Ciudad de México	123
4.27	Condiciones generales del subsuelo para el proyecto de las torres gemelas Petronas, en Kuala Lumpur, Malasia	125
5.1	Fundamentos del mejoramiento de suelos blandos mediante precarga	127
5.2	Mejoramiento de suelos con precarga, empleando drenes verticales de arena y relleno compactado	127
5.3	Método de mejoramiento de suelos mediante precarga empleando la técnica de vacío	132
5.4	Esquema del procedimiento y equipo empleado en el mejoramiento de suelos mediante compactación dinámica	134
5.5	Granulometría idónea para el mejoramiento de suelos con compactación dinámica	136
5.6	Cambios en las condiciones en la masa de suelo con el mejoramiento con compactación dinámica	139
5.7	Efecto de la caída del apisonador sobre la masa de suelo y ondas de choque resultantes	139



5.8	Efecto de la caída del apisonador en el terreno donde se efectúa el mejoramiento empleando la compactación dinámica	140
5.9	Características de los terraplenes estructurales y de precarga	143
5.10	Curvas de precarga y asentamientos obtenidos para los tanques TV 5005 y TV 5001	143
5.11	Perfiles estratigráficos antes y después del tratamiento con precarga para el tanque TV - 5001	144
5.12	Perfiles estratigráficos y resultados de las pruebas de resistencia a la penetración estándar efectuados antes y después del mejoramiento mediante compactación dinámica	146



RELACIÓN DE TABLAS

1.1	Clasificación de los suelos según el tamaño de sus partículas.	11
1.2	Coeficientes de permeabilidad típicos de algunos materiales.	14
2.1	Métodos Empleados Para El Mejoramiento De Las Propiedades Mecánicas De Los Suelos	29
3.1	Guía para la selección de aditivos estabilizadores.	43
3.2	Métodos más recomendados según el objetivo que perseguirá la estabilización y el uso que se dará a la capa de suelo.	44
3.3	Requerimientos de granulometría	49
3.4	Rango básico de requerimientos de cemento	50
3.5	Requerimientos de resistencia a la compresión para suelos estabilizados con cemento y cal.	50
3.6	Contenidos de cal usuales para la estabilización de suelos	55
3.7	Porcentajes requeridos para suelos a emplear como materiales de base y sub-base	64
3.8	Valores de plasticidad idóneos para una mezcla de suelos	66
4.1	Breve historia del mejoramiento de suelos mediante jet grouting	89
4.2	Capacidad de inyectabilidad de suelos.	98
4.3	Características de las lechadas de inyección según el tipo de suelo.	98
4.4	Tipos principales y campo de aplicación de mezclas para inyección en suelos	99
4.5	Propiedades que deben cumplir las mezclas empleadas en inyección de suelos o rocas.	102
4.6	Aplicabilidad de brocas dependiendo del material a perforar.	111
4.7	Ejemplos de la aplicación de la compactación por vibrado (vibroflotación).	116
5.1	Energía necesaria para la densificación de diferentes tipos de suelos.	135
5.2	Asentamientos permisibles, observados y probables en la cimentación del tanque de almacenamiento de crudo.	141