

881215

23

# UNIVERSIDAD ANAHUAC

ESCUELA DE INGENIERIA

Con estudios Incorporados a la Universidad Nacional Autónoma de México



## LIGUACION DE ARENAS

TESIS CON  
FALLA LE ORIGEN

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
I N G E N I E R O C I V I L  
P R E S E N T A  
JOSE ESQUINCA SANTAULARIA  
MEXICO, D. F. 1990



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 está 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.

# LICUACION DE ARENAS

## I N D I C E

### CAPITULO I

#### INTRODUCCION A LA LICUACION DE ARENAS

I.1	SINOPSIS	2
I.2	EL FENOMENO DE LA LICUACION	4
I.2.1	Clasificación de Depósitos	5
I.3	DESCRIPCION DE LAS FALLAS ATRIBUIBLES AL FENOMENO DE LA LICUACION	12
I.4	ANTECEDENTES DE LA LICUACION ATRAVES DE LA HISTORIA	14
I.5	EL TERREMOTO DE NIIGATA	18

### CAPITULO II

#### IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LICUACION EN MEXICO

II.1	IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LICUACION EN MEXICO	31
------	---	----

### CAPITULO III

#### NATURALEZA DE LOS TERREMOTOS

III.	LA NATURALEZA DE LOS TERREMOTOS	36
III.1	MECANISMO DE LOS TERREMOTOS	36
III.1.1	Profundidad de Foco	37
III.1.2	Intensidad de los Terremotos	39
III.1.3	Magnitud y Energía de los Terremotos	40
III.2	CARACTERISTICAS IMPORTANTES DE LOS SISMOS EN EL ESTUDIO DE LICUACION DE ARENAS	42

### CAPITULO IV

#### FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA LICUACION

IV.	FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL FENOMENO DE LICUACION	45
IV.1	TIPO DE SUELO	46

IV.2	COMPACIDAD RELATIVA	48
IV.3	CARACTERISTICAS GRANULOMETRICAS	50
IV.4	ESTADO DE ESFUERZOS EFECTIVOS	52
IV.5	CARACTERISTICAS DEL SISMO	52
IV.6	GEOLOGIA	55
IV.7	CARACTERISTICAS E IMPORTANCIA DE LA OBRA	57

CIPITULO V  
METODOS PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUACION

V.1	PRUEBAS DE PENETRACION	61
V.1.1	Penetración Estándar	61
V.1.2	Penetración Estática	63
*	Comentarios	64
V.2	METODOS PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUACION	66
V.2.1	Criterio del WES (Waterways Experimental Station)	67
V.2.2	Criterio de Florin e Ivanov	68
V.2.3	Criterio de Kishida	71
V.2.4	Criterio de Oshaki	72
V.2.5	Método de Seed e Idriss	72
V.2.5.1	Comentarios al Método de Seed e Idriss	73
V.3	EVALUACION EXPERIMENTAL DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LICUACION DE SUELOS.	74
V.3.1	Cámara Triaxial	75
V.3.2	Aparato de Corte Simple	79

CAPITULO VI  
CONCLUSIONES

VI.1	CONCLUSIONES	83
------	--------------	----

CAPITULO VII	GRAFICAS	89
--------------	----------	----

BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS	97
----------------------------	----

## CAPITULO I

### INTRODUCCION A LA LICUACION DE ARENAS

- I.1 SINOPSIS
- I.2 EL FENOMENO DE LA LICUACION
  - I.2.1 Clasificación de Depósitos
- I.3 DESCRIPCION DE LAS FALLAS ATRIBUIBLES AL FENOMENO DE LA LICUACION
- I.4 ANTECEDENTES DE LA LICUACION ATRAVES DE LA HISTORIA
- I.5 EL TERREMOTO DE NIIGATA

## I. INTRODUCCION A LA LICUACION DE ARENAS

### I.I Sinópsis

La evolución constante del medio físico de la tierra, se presenta algunas veces en forma imperceptible a la naturaleza del hombre, aunque no siempre, pero estos constantes cambios siempre vienen seguidos de una sucesión de fenómenos físicos.

La tierra, tal como la vemos hoy en día, está sufriendo variaciones en sus superficie, y estos cambios son un ajuste a las nuevas condiciones, en un medio mutable, en un intento por establecer un equilibrio. La naturaleza es compleja y un cambio hacia el equilibrio, establece una situación que requiere todavía otros cambios. Todo cambio es por así definirlo, una expresión de energía, la cual se le presenta a la tierra como su herramienta para realizar tal proceso evolutivo; y tal energía se presenta através del deslizamiento de las rocas, el movimiento del agua y es consecuencia directa de los terremotos o sacudimientos sísmicos.

A estos cambios, podemos asociarlos como una sucesión de daños potenciales al ser humano, ya que debido al constante crecimiento de las áreas urbanas, vías de comunicación, plantas industriales, puertos y otras obras civiles, son frecuentemente obligadas a realizarse en terrenos con peligrosas deficiencias geológicas inherentes a su propia naturaleza; por lo que se ven afectadas con dicha sucesión de fenómenos físicos que traen consigo graves consecuencias como son:

- a) Daños materiales
- b) Pérdidas humanas
- c) Pérdidas económicas
- d) Daño al medio ambiente

El interés de este trabajo, es el enfoque de un fenómeno físico que tanto ha preocupado a la mecánica de suelos, que es la "licuación de arenas", que es un resultado directo de los constantes cambios del medio físico terrestre, suscitados através de los desprendimientos de energía.

Para entender mejor el fenómeno de la licuación de arenas, es necesario tener presente qué es la licuación de un suelo, sus antecedentes y conocer bien el fenómeno que lo provoca; por lo que a continuación se analizan estos factores que son significativos en el estudio de la licuación.

## 1.2 El Fenómeno de Licuación

Como introducción al estudio de la licuación de arenas, es importante tener como base inicial que la licuación ocurre generalmente en los depósitos de arena en estado suelto y que sólo se puede producir al ser sometido el terreno a carga repetida, ya sea inducida por sismos, explosiones o vibraciones de maquinaria, lo que provoca la pérdida parcial o total de resistencia al esfuerzo constante del suelo.

Otra definición aplicable a la licuación es la pérdida temporal de resistencia al corte que éste puede sufrir debido a un incremento de presión en el agua intersticial por cargas cíclicas, o por un incremento monotónico de esfuerzos, como es el caso de los taludes inestables.



Es necesario tener presente los tipos de depósitos existentes, así como sus propiedades y características físicas, ya que cuando se analiza un depósito de arena, es necesario contar con todos los datos posibles para el mismo; por lo que a continuación se presenta una clasificación de depósitos.

#### I.2.1 Clasificación de Depósitos

- A) Pedimonte
- B) Lacustres
- C) Aluviales
- D) Eólicos
- E) Glaciales
- F) Volcánicos

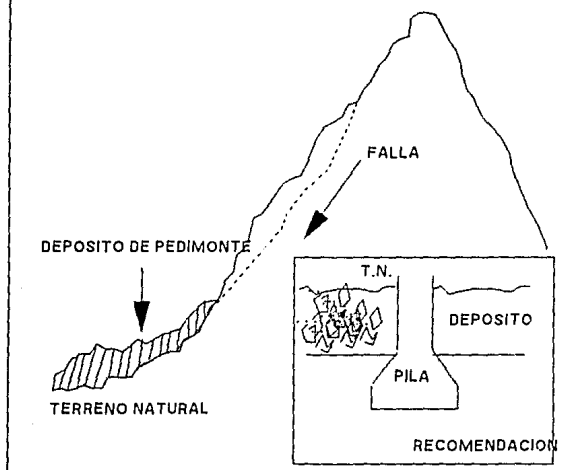
##### A) Depósitos de Pedimonte

Se localizan al pie de las montañas; el depósito en sí va a ser de material heterogéneo.

La obtención de sus propiedades físicas y mecánicas en general, no tienen sentido, porque no tienen una estratigrafía regular (carece de estratigrafía) y el tipo de material cambia fuertemente de un sitio a otro.

## DEPOSITOS DE PEDIMONTE

EL DESPRENDIMIENTO DEL SUELO POR ACCION DE LA GRAVEDAD Y OTRAS FUERZAS QUE ACTUAN EN LA ESTRUCTURA INTERNA DEL SUELO CAUSAN ESTOS DEPOSITOS AL PIE DEL MONTE



### I.1 EJEMPLO DE DEPOSITOS DE PEDIMONTE

## B) Depósitos Lacustres

Se originan en aguas tranquilas, como lagos y lagunas, se forman en estratos al disminuir la velocidad del río al entrar a los lagos o lagunas.

En general son estratos de partículas finas: limos (polvo de roca) y de arcillas.

Estas últimas están cargadas eléctricamente repeliéndose entre ellas (movimiento Browniano) y además por su tamaño ( $< 2\mu$ ) y forma (plana), no se pueden sedimentar, por lo que están en suspensión.

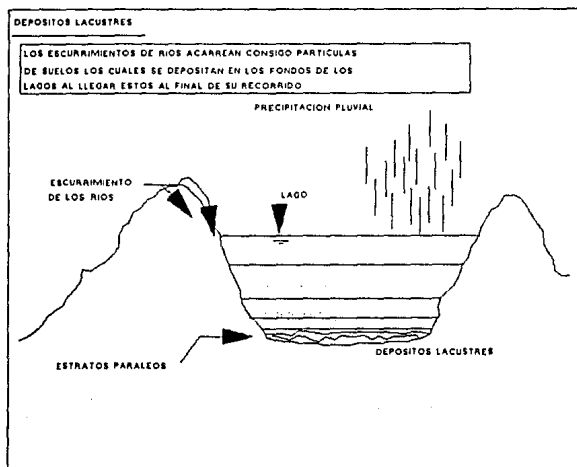
Para sedimentarse, tienen que formarse los flóculos para la cual necesitan un floculante, estas estructuras ya sedimentadas (estratos) presentan gran contenido de agua y gran oquedad.

$$W = \begin{cases} 400 \% \text{ ó, } e = 10 \\ 600 \end{cases}$$

Los estratos son paralelos entre sí.

Por la gran oquedad, es un suelo muy compresible, es un suelo poco resistente por el alto contenido de agua y es impermeable porque los huecos o poros son muy pequeños.

Debido a la impermeabilidad, se provoca un retardamiento de expulsión de agua libre; tiene un comportamiento viscoso debido a la presencia de agua absorbida. Los tamaños de las partículas son uniformes.



## I.2 EJEMPLO DE DEPOSITOS LACUSTRES

### C) Depósitos Aluviales

Estos depósitos se originan por la acción de acarreo que tienen los ríos, en general son sedimentos que presentan gran variedad de tamaños; las partículas finas pueden cementar a las partículas gruesas, con lo cual le da mayor resistencia, llegando a formarse un aglomerado.

Si el porcentaje de finos es pequeño pero hay variedad de tamaños y los granos se encuentran empacados, no presentan problemas de resistencia ni compresibilidad.

### D) Depósitos Eólicos

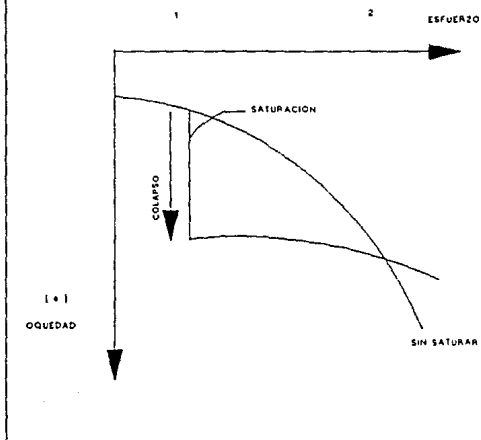
Son sedimentos transportados por el aire, su granulometría es uniforme. La estructura no es la más estable, pero se mantiene con algún cementante (carbonato de calcio, arcilla, limos plásticos), en algunas ocasiones, el agua diluye el cementante y el depósito se caracteriza por ser suelto, perdiendo su resistencia al corte y al depósito se le denomina colapsable. Como se puede observar en la figura no. I.3 el siguiente ejemplo de los suelos eólicos.

## DEPOSITO EOLICO

UN EJEMPLO DE UN DEPOSITO EOLICO, EN LA REPUBLICA

SE ENCUENTRAN LOCALIZADOS AL NORTE, SON "ESTABLES" SIN

LA PRESENCIA DE AGUA, DESPUES DE LA SATURACION SON ESTABLES



### I.3 EJEMPLO DEPOSITOS EOLICOS

#### E) Depósitos\_Glaciales

Son aquellos depósitos provocados por el movimiento de las grandes masas de hielo, son partículas que han sido atrapadas como resultado directo del desprendimiento de un suelo congelado bajo la acción de las bajas temperaturas que actúan sobre el agua como una fuerza devastadora de erosión y que como características principales de estos depósitos es que en su mayoría son arcillas y limos plásticos que al ser depositados por el efecto del deshielo, forman suelos muy cohesivos.

#### F) Depósitos\_Volcánicos

Provocados por el derrame de lava de los volcanes en forma violenta y de los grandes movimientos del subsuelo en busca de fisuras para el desprendimiento de energía.

### I.3. Descripción de las Fallas Atribuibles al Fenómeno de la Licuación.

Las fallas atribuibles al fenómeno de la licuación, se pueden definir como masivas, debido a que involucran volúmenes de material muy importantes y los cuales afectan zonas muy extensas. Inclusive este fenómeno sería la explicación del mecanismo que se atribuya a los restos de algunas de las fallas prehistóricas más largas y de los deslizamientos más recientes, de miles o de millones de metros cúbicos de material, y que se han desplazado distancias de cerca de 20 Km. También dando razón a las fallas submarinas y a las subsecuentes corrientes turbias de avalanchas y del fluir de los depósitos.

Las fallas atribuibles a la licuación no presentan planos de deslizamientos definidos y en general, estas fallas son de naturaleza y características catastróficas y se presentan en lapsos de minutos hasta de unas cuantas horas.



El fenómeno de la licuación también provoca que en la superficie del suelo surjan "volcanes" de lodo con extensivas inundaciones del suelo por exudación o transpiración del agua, daños estructurales del subsuelo, movimientos laterales de las estructuras resistentes del suelo, y así como de explosiones de arena que brotan de las fisuras del suelo provocadas como resultado directo de la enorme cantidad de energía producida y desprendida durante el desarrollo de la licuación.

La información del estudio de la naturaleza y alcance del fenómeno de la licuación no hubiese sido posible de no tener un registro histórico de los sucesos de la licuación publicados en la literatura, con el objeto de identificar en ellas, características sobresalientes; siendo necesario enfatizar que la licuación no es un fenómeno común; por lo que a continuación se presentan parte de dichos registros para su análisis.

#### I.4. Antecedentes de la Licuación a Través de la Historia.

Se debe entender que el fenómeno de la licuación no era entendido como tal, ni conocido, no fué sino a partir de mediados de este siglo, que debido al rápido desarrollo en el campo de la mecánica de suelos, los investigadores se empezaron a interesar en este fenómeno y al quererle dar una interpretación lógica y poder plantear con confianza la valorización de la sismicidad de un sitio susceptible a la licuación para poder llegar a recomendaciones de diseño que eviten catástrofes atribuibles a la licuación de arenas.

Los antecedentes de licuación son innumerables por lo que sólo se citan los que a nivel investigación se consideran que proporcionan datos muy importantes.

Durante y después del sismo de Assaim del 12 de Junio de 1897, un gran número de chorros de agua fueron expulsados por las fisuras del suelo, llevando consigo arena, turba y pedazos de carbón.

La eyección de arena y agua empezó durante el sismo y continuó durante 20 a 30 minutos después de que el sacudimiento de la tierra había cesado. En muchos lugares, los canales de drenaje que se localizaban entre 4 y 6 metros de profundidad, tenían sus fondos flexionados hacia arriba. En otros lugares, las casas sufrieron tal asentamiento, que los techos sobresalían del suelo unos dos metros para casa de dos niveles.

El terremoto de San Francisco del 18 de Abril de 1906, causó un fenómeno similar. Agua y arena fueron expulsados a varios metros de altura, en el cual dicho proceso tuvo un período de duración de 10 a 12 minutos después del sismo. En algunos lugares el material expulsado, fué reconocido como parte del estrato que se sabía se encontraba a unos 25 metros de profundidad.

Otros efectos similares, fueron notificados - el 1° de Septiembre de 1923, durante y después del terremoto de Kwanto en Japón. En las planicies,

numerosas fisuras y volcanes de lodo aparecieron - eyectando agua y arena de una forma intermitente, la acción podía parar, después continuar segundos más tarde y así durante largo tiempo posterior al sismo. En un campo de arroz, cerca del río Sagami, siete pilotes verticales de madera de 460 cm de altura x 60 cm de diámetro, repentinamente emergieron sobre el nivel del suelo.

Sucesivamente, sacudimientos posteriores, causaron que estos pilotes emergieran más, alcanzando finalmente una altura de 110 cm sobre el nivel del suelo. Es interesante notar que esos pilotes eran desconocidos para la gente local cuando sobrevino - el sismo.

Después fué descubierto que estos pertenecieron a un puente construído en 1182 sobre el viejo curso del río Sagami, y desde entonces el río había cambiado su curso y el puente fué abandonado en 600 años antes del terremoto de 1923.

El 15 de Enero de 1934, en Bihar Nepal, durante un terremoto, cientos de litros de agua, empezaron

a brotar del suelo, acompañada de arena y turba, la cual alcanzaba una altura de 2 metro. Todo esto - continuó durante 30 minutos, provocando que el agua inundara vastas áreas.

Muchos de los daños causados en edificios por el terremoto de Chile de Mayo de 1960, fueron causados por la pérdida parcial o total de la capacidad de carga, inducida por licuación.

Las casa fueron destruídas por el excesivo - asentamiento de las cimentaciones, las cuales se podían valuar en diferencias de hasta 50 cm.

Otro de los temblores significativos es el de Jaltipan, Estado de Veracruz (México), en el año de 1959. Ocurrieron daños en las cimentaciones de tres edificios del astillero naval y varias secciones de un muelle cercano en el río Coatzacoalcos. Se observaron asentamientos súbitos del orden de 1 metro en las columnas del astillero y las paredes del taller mecánico, así como desplazamientos relativos - entre las secciones del muelle. Se concluyó que las

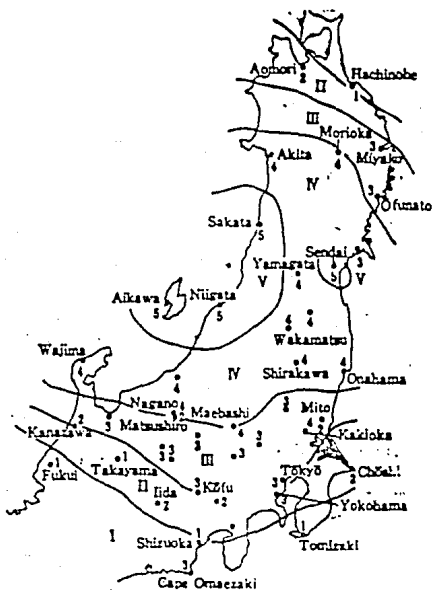
causas de la falla de la cimentación, fueron por licuación de los estratos areno-limosos, fenómeno inducido por la acción sísmica.

Después de haber descrito algunas de las fallas más importantes producidas por el fenómeno de la licuación, es necesario hacer hincapié en la descripción de una de las fallas más clásicas de la literatura sobre el fenómeno en estudio; que por su importancia se tratan a continuación en un apartado especial.

### 1.5 El Terremoto de Niigata.

A las 13:26 Hrs. del 16 de Junio de 1964, las prefecturas de Niigata y Yamagata se vieron afectadas por un terremoto cuyo hipocentro fué localizado a 3 Km al suroeste de la isla de Awashima y con una profundidad de 40 Km. La magnitud del terremoto, fué de 7.5 en la escala de Richter, alcanzando en dichas prefecturas una intensidad sísmica máxima.

Como resultado del terremoto, la isla de Awa-shima fué levantada literalmente, mientras el lado opuesto de orilla en la parte principal de la tierra se hundía, observándose la formación de varias fallas en el fondo del mar.



I.4 MAPA DE INTENSIDAD ISOSISMICA DE NIIGATA DURANTE EL TERREMOTO DE 1964.





El daño directo del terremoto fué especialmente severo en la ciudad de Niigata.

En la ciudad se encontraba una larga área formada de arena aluvial, depositada por el río de Shinano; el cual no se encontraba bien compactado y cementado. El nivel de aguas freáticas era superficial.

Este es un depósito profundo de espesor de 150 metros o más. Los primeros seis metros están en estado muy suelto  $N < 5$  (en donde N es el número de golpes de la prueba de penetración estándar), entre los 6 y 15 metros de profundidad, se encuentra en estado suelto a medio; es decir,  $10 < N < 30$ , y a continuación la arena es compacta  $N > 30$ . Entre los estratos de arena hay capas delgadas de limo y suelo orgánico suave de baja permeabilidad. La arena tenía una granulometría muy uniforme, de diámetros menores al orden de 1 mm y mayores de 0.07 mm con coeficiente de uniformidad 3.

Después del terremoto, unos minutos más tarde aparecieron cráteres de arena que expelían arena y agua como surtidores y la altura que alcanzaron al ser expulsados fué de aproximadamente de 1.5 metros a 2.0 m. El material expulsado del subsuelo fué - identificado como perteneciente a los estratos que se encontraban localizados entre los 5 y 7 metros - de profundidad. Después de la erupción se encontró que el suelo alrededor del chorro se hundía gradual mente, aunque en algunos lugares no se cumplió con esta observación.

A continuación, se presenta un análisis enfocado particularmente a cada uno de los sucesos y da ños potenciales sufridos a la infraestructura de Niigata.

(A) Ríos

Los daños potenciales provocados por los ríos fueron observados a lo largo de los ríos Mogami, - Agano, Tsusen y Shinano a unos 5Km de la playa. La mayoría de estos daños sucedieron en estructuras de obras de riego.

La estructura de concreto construida sobre una cimentación poco profunda o somera a base de pilotes, sufrieron graves daños, mientras que estructuras hechas sobre cajones de cimentación o zapatas bastante grandes, no sufrieron daño alguno.

(B) Puertos y Bahías

El puerto de Niigata estuvo sujeto a grandes daños ocasionados por el terremoto. Este puerto está compuesto por los muelles de Yamanoshita y el prefectural. Sus muelles sufrieron deslizamientos horizontales durante la aparición del tsunami a causa de la pérdida de resistencia del suelo (arena fina). Otro de los problemas que se señala como causante de daños de los muelles, era la inconsistencia del diseño en ambos muelles; ya que cada uno fué hecho bajo distintas consideraciones.

(C) Trenes

Los daños fueron enormes en las líneas de Echigo y Vetsu, debido al dislocamiento de los rieles,

al asentamiento de los terraplenes y de la subrasente de las vías ferroviarias, y además de los daños sufridos en todas las obras secundarias a lo largo de dichas líneas como son puentes y túneles.

La flexión de los rieles, derrubamientos del balasto y de los terraplenes se observaron en numerosos lugares de la ciudad de Niigata. Y en especial en una larga afea de falla, que se presentó en un terraplén cerca del epicentro; aquí un terraplén de 7 metros de alto y de 150 metros de longitud, se derrumbó en una dirección y el material se comportó como una lengua que fluyó hasta alcanzar una distancia de 115 metros.

#### (D) Carreteras

Las carreteras alrededor de la ciudad de Niigata, fueron las más dañadas, debido a que pasaban por encima del suelo blando. En el caso de los pavimentos asfálticos, las terracerías fueron expuestas directamente al aire debido a las largas fallas, durrumbamientos y levantamientos que en él se presentaron. Mientras que en las carreteras con super

ficie de rodamiento de concreto hidráulico, las losas fueron removidas y separadas a través de sus juntas, debido de igual manera, a los desplazamientos horizontales a los cuales estaba sujeto, a los derrumbamientos y levantamientos que se produjeron por el efecto sísmico. También sucedieron importantes cambios topográficos a gran escala en la ciudad. Algunas secciones fueron desalineadas tanto horizontal como verticalmente.

Con respecto a los puentes, el paso a desnivel Sasaguchi que formaba parte de la estación Niigata, fueron seriamente dañados.

El único que fué capaz de soportar el tráfico inmediatamente después del terremoto, fué el puente Bandai.

(E) Abastecimiento de Agua y Alcantarillas

La ciudad de Niigata contaba con sus plantas de tratamiento y purificación, las cuales estaban situadas en un suelo firme; por lo cual no registraron daños. En cambio los oleoductos de transmisión

y distribución, que se encontraban en un suelo blando, ardieron en la ciudad, además fueron sujetos a enormes daños, ya que de una longitud de 470 km de línea de distribución, se determinó que el daño alcanzó el 68% de su desarrollo.

El tipo de tubería, en la mayoría de los casos, era ordinariamente hecha de acero y en algunos otros contaba con algunas juntas mecánicas especiales. Los daños iban creciendo en el siguiente orden desde - separación de juntas, rompimiento de tuberías especiales hasta el rompimiento de las válvulas de control. En comparación con el rompimiento de tuberías se registraron mayor número de separaciones. También se observó que las juntas mecánicas presentaron mayor resistencia a la calculada.

Las tuberías de asbesto-cemento de diámetros del orden de 150 mm o mayores, fué común que sufrieran la separación entre sus juntas, mientras que las de diámetro menor, del orden de los 100 mm o menor, se rompieron.

Los alcantarillados de la ciudad de Niigata, también presentaban altos daños y en las áreas próximas a los ríos Shinano y Tsuen, perdieron su capacidad total de drenaje. Un tanque para purificación de aguas, enterrado, emergió del suelo.

Las bombas de drenaje, instaladas a lo largo de los márgenes de los ríos, fueron inclinadas hacia los lados de descarga de los ríos y las cajas de sedimentación, destruidas y fragmentadas.

En general, el sistema de alcantarillas de la ciudad de Niigata, se vió violentamente afectado por la separación de las tuberías en sus juntas, debido a las fallas que se presentaron en el terreno.

(F) Edificios

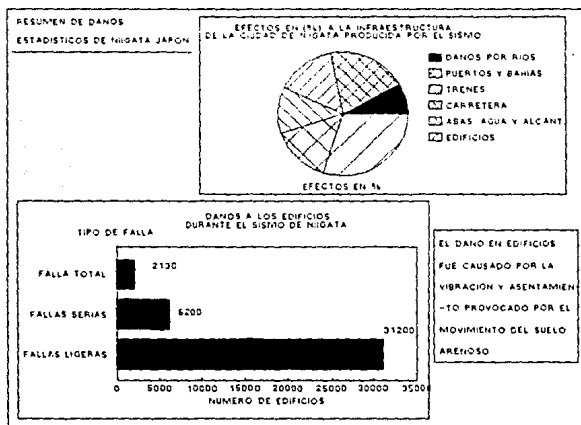
Dos a tres minutos después del inicio y cerca del final del terremoto, el suelo alrededor de algunos edificios tronó; abriéndose y presentándose fallas. Un minuto más tarde, el agua fluyó alrededor

de los edificios a través de las fisuras producidas en el terreno, y conforme transcurrían los minutos, gradualmente se fueron colapsando diversas estructuras, asentándose, sufriendo desplomes o incluso el levantamiento y resurgimiento de otras. Las fallas de los edificios, se presentaban como si se hubiesen hundido en un líquido espeso. No se encontraron superficies de deslizamiento, ni abultamientos de suelo alrededor de las estructuras. Se estima que en este sismo, 2,130 edificios presentaban falla total, 6,200 estaban seriamente dañados y 31,200 tenían daños ligeros.

El daño en los edificios, fué consecuencia de la vibración y el asentamiento provocado por el movimiento del suelo arenoso.



En el área entre Murakamin y Tsuruoka, en el cual se tenía suelo resistente, los daños eran debidos a la vibración; y varias fallas suaves diagonales, fueron encontradas en el concreto reforzado de los edificios; pero éstas eran limitadas a aquellos que se encontraban en suelos arenosos. En áreas de suelo bien consolidadas, no se presentaron daños.



I.6 GRAFICAS DE LOS DAÑOS EN NIIGATA A CAUSA DEL FENOMENO DE LICUACION.

## CAPITULO II

### IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LA LICUACION EN MEXICO.

#### II.I IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LA LICUACION EN MEXICO

## II.1 Importancia del Estudio de la Licuación en México

México es un país que ha logrado desarrollar una capacidad adecuada en casi todos los campos de la ingeniería civil. La orografía que tiene el territorio, la errática distribución de lluvias, la alta actividad sísmica y las condiciones del subsuelo en la República Mexicana, entre otros factores, han obligado a crear una capacidad que le coloca a la altura de los países desarrollados en los campos del proyecto y construcción.

Parte de la República Mexicana, se encuentra en región de alta sismicidad, en la que existen depósitos de arena firme, y uniforme y, de ahí, que esté latente el fenómeno de la licuación con todas sus características, que la mecánica de suelos debe evaluarse cuando se trata de cimentar sobre suelos con estructura abierta o suelta, lo que implica un mejoramiento, es decir una densificación o compactación; dándole así una importancia al término "mejoramiento", siendo válido a usarse en este caso, ya

en un suelo en estado denso, se comporta mejor (en la medida que es menos comprensible o deformable y más resistente) que se está en estado suelto.

La decisión de mejorar un suelo no es fácil - de tomar, los parámetros económicos y técnicos que deben estudiarse y sopesarse, son diversos, y varios de ellos son poco o mal conocidos.

El fenómeno de licuación de arenas en Mexico, ha inducido la tarea de perfeccionar los métodos de mejoramiento por medio de fuerzas, estáticas o dinámicas, aplicadas de tal manera que la energía suministrada sea económica, sea concentrada y no dispersa, y además sea concentrable en magnitud y sentido, de manera que produzca, en gran número y en breve - plazo, reacomodos y acciones internas en la estructura del suelo; encaminadas a que ésta se densifique y se haga por consiguiente, menos compresible, más resistente y menos susceptible a licuarse.

En México se pretende mejorar grandes volúmenes de suelo con beneficios al crecimiento de nuestra infraestructura. Otro factor importante del estudio del fenómeno de licuación de arenas en México, es que ha permitido la valorización de los riesgos asociados con el sacudimiento sísmico. La valoración del riesgo, incluye el análisis de sismicidad del área, la susceptibilidad de los subsuelos a licuarse y las consecuencias probables del fenómeno.

Como se indicó anteriormente, el fenómeno de licuación es un fenómeno poco común. Las investigaciones de este fenómeno en Mexico, ha sido una herramienta muy importante aplicada al estudio de los suelos marinos, empleada en el análisis y diseño de estructuras cimentadas en estos suelos.

El fenómeno de la licuación en suelos marinos, ha tenido una importancia en México debido a los antecedentes de las instalaciones fuera de la costa,

para el aprovechamiento de los recursos petroleros y que ha sido motivo de preocupación para los ingenieros y constructores; ya que el fenómeno de licuación se debe tener presente en su realización.

## CAPITULO III

### NATURALEZA DE LOS TERREMOTOS

- III NATURALEZA DE LOS TERREMOTOS
- III.1 MECANISMO DE LOS TERREMOTOS
  - III.1.1 Profundidad de Foco
  - III.1.2 Intensidad de los Terremotos
  - III.1.3 Magnitud y Energía de los Terremotos
- III.2 CARACTERISTICAS IMPORTANTES DE LOS SISMS  
EN EL ESTUDIO DE LA LICUACION DE ARENAS

### III. LA NATURALEZA DE LOS TERREMOTOS

Para entender la licuación es necesario estar familiarizado con el fenómeno natural que lo induce; que es el sismo.

#### III.1 Mecánismo de los Terremotos

Los terremotos son movimientos de la corteza terrestre provocados por derrumbes, desplazamiento relativo entre masas de rocas y por el vulcanismo. En el primer caso, los sismos son locales o microsismos, estos también pueden ser originados por explosiones.

Por la importancia de la extensión que afectan, se tratarán las dos últimas causas.

El desplazamiento relativo entre masas de rocas que han sido distorsionadas más allá del límite de su resistencia. Debido a las altas presiones a que se encuentran las rocas dentro de la corteza, - éstas cambian gradualmente de forma, hasta que alcanzan violentamente su punto de ruptura, quedando en posiciones forzadas que exigen posteriormente un



nuevo ajuste. Este ajuste que sigue a la ruptura, se llama rebote elástico y que parece ser el mecanismo de falla fundamentalmente para los terremotos a cualquier profundidad, a juzgar por el sistema de ondas que produce. Y esta transmisión de energía - induce la licuación.

La clase de energía liberada por un terremoto, depende del tipo de roca y del tamaño de la masa - rocosa en la que almacena energía.

### III.1.1 Profundidad de Foco

El término foco designa el origen de las ondas que producen el terremoto. El fenómeno completo es el sismo. Las ondas que constituyen un terremoto, se registran por instrumentos en algún punto, las trayectorias indican que tienen una única fuente de origen.

El foco de un terremoto se encuentra a cierta profundidad bajo la superficie terrestre. La moción del foco, se llama epicentro; que proviene de la palabra epi, "encima" y centro.

En orden de su profundidad a los focos, se les clasifica como:

- 1) Someros (a 60 Km de profundidad a partir de la superficie).
- 2) Intermedios (entre 60 y 320 Km).
- 3) Profundos (de los 320 Km en adelante).

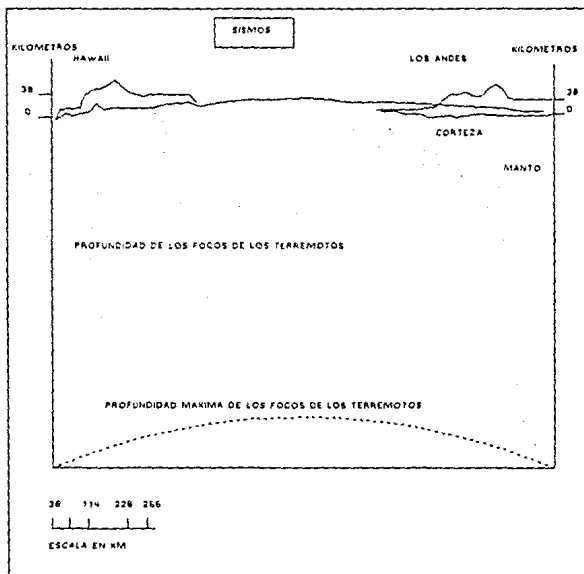


FIG III.1 FOCOS DE TERREMOTOS DEBAJO DEL HAWAII Y DEL AMERICA DEL SUR.

### III.1.2 Intensidad de los Terremotos.

Determinar la magnitud de un sismo siempre ha constituido un problema. En Italia 1874 y en Suiza 1878, se desarrollaron escalas arbitrarias que culminaron, en la escala Rossi-Forel (M.S. de Rossi, Director del observatorio de Geodinámica en Rocca di Papa, cerca de Roma, y F.A. Forel, de Lausana, miembro de la Sociedad Helvética de Ciencias Naturales para el estudio de los terremotos en Suiza), la cual fué utilizada en todo el mundo.

INTENSIDAD DE TERREMOTOS	
I	REGISTRABLE SOLO POR INSTRUMENTOS
II	SENTIDO POR REDUCIDO NUMERO DE PERSONAS EN REPOSO
III	SENTIDO POR PERSONAS EN REPOSO, AFRECIABLE LA DURACION Y EL SENTIDO
IV	DESPLAZAMIENTOS DE OBJETOS MOVIBLES, AGRETAMIENTO DE PISOS.
V	SENTIDO GENERALMENTE POR TODOS
VI	DESPERTAR DE AQUELLOS QUE DUERMEN, PERTURBACION VISIBLE DE ARBOLES
VII	CAIDA DEL RECUBRIMIENTO DE MUROS, SIN QUE SE DANEN LOS EDIFICIOS
VIII	CAIDA DE CHIMENEAS, GRIETAS EN PAREDES DE EDIFICIOS
IX	DESTRUCCION PARCIAL O TOTAL DE EDIFICIOS
X	GRAN DESASTRE.

SECUENCIA DE DEFORMACIONES EN UN SISMO

TABLA III.2 DE INTENSIDADES DE UN TERREMOTO, SEGUN ROSSI-FOREL.

En el mapa de intensidad isosísmica del terremoto de Niigata (1964), se puede observar que ésta va desde I hasta V de intensidad en la escala de Rossi-Forel, alcanzando en su caso en las prefecturas de Aikawa, Sakata, Yamagata y Niigata, sus niveles más altos. Y este terremoto podemos clasificarlo debido a la profundidad a la que fué localizado como un sismo de foco somero.

### II.1.3 Magnitud y Energía de los Terremotos

La escala de Richter mide la magnitud y energía de un sismo y está basada en registros instrumentales, debido a que la anterior escala era muy insatisfactoria. En ésta, se le asigna a cada terremoto un número llamado magnitud de terremoto, que es un índice de la energía de choque de su foco.

Las distribuciones de los terremotos en estudios estadísticos que toman en cuenta la energía liberada como las profundidades de foco, estiman que los terremotos tienen lugar en las zonas más activas,

que es alrededor de los bordes del Océano Pacífico, y que representan poco más del 80% de la energía - total liberada en todo el mundo. La mayor actividad sísmica se localiza en el Japón, occidente de México, Melanesia y las Filipinas.

\*Escala de Richter

<u>Terremotos</u>	<u>Magnitud</u>
Grande	7.7 - 8.6
Importante	7.0 - 7.7
Destructivos potencialmente	6.0 - 7.0
Importante, daños pequeños	5.0 - 6.0
Perceptibles	4.0 - 5.0
Suelen ser a veces imprecin-	3.0 - 4.0
dibles	2.5 - 3.0

En el terremoto de Niigata, la intensidad sísmica registrada, fué de 7.5, lo que lo clasifica - como un sismo importante y destructivo potencialmente, según la escala de Richter. Pero según los expertos, fué más devastador el efecto de la licuación de arenas inducido por la energía del sismo. Ya que el daño no fué propiamente directo por terremoto -

sino fué en la mayoría de sus casos, la pérdida de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo, en donde se encontraba actuando la mayoría de la cimentación de los edificios. Y es un hecho que los movimientos del suelo persistían aun después de finalizado el terremoto. Esto indica que en función de la profundidad del depósito licuado, depende la transmisión de las vibraciones del terreno sobre el revestimiento de los depósitos.

### III.2 Características Importantes de los Sismos en el Estudio de la Licuación de Arenas

En resumen, para el estudio de la licuación, partiremos de las siguientes premisas como datos - para la resolución del efecto sismo-licuación.

La forma más usual de definir un sismo, es mediante el registro de las aceleraciones que produce y su evolución con el tiempo. En la siguiente figura, se presenta un registro típico de aceleraciones.

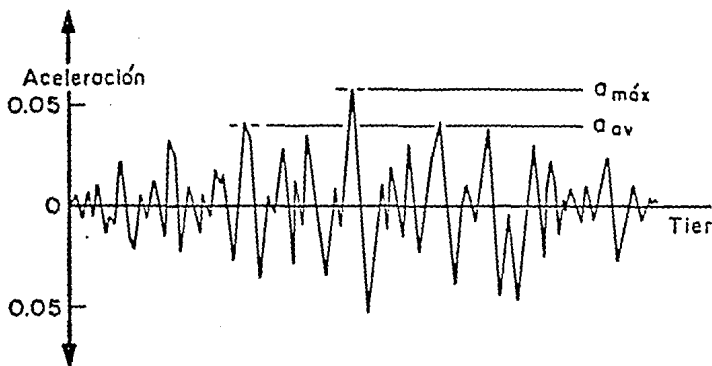


FIG. III.3 REGISTRO TIPICO DE ACELERACIONES.

En general las deformaciones que sufre el suelo provocadas por un sismo, ocurren por propagación - hacia arriba de las ondas de corte provenientes de la roca subyacente. En la transmisión de las ondas de corte através del estrato del suelo, es significativo el período dominante de las aceleraciones provocadas por el sismo y su relación respecto al período natural del estrato.

## CAPITULO IV

### FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA LICUACION

- IV      FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL FENOMENO  
          DE LICUACION
- IV.1    TIPO DE SUELO
- IV.2    COMPACIDAD RELATIVA
- IV.3    CARACTERISTICAS GRANULOMETRICAS
- IV.4    ESTADO DE ESFUERZOS EFECTIVOS
- IV.5    CARACTERISTICAS DEL SISMO
- IV.6    GEOLOGIA
- IV.7    CARACTERISTICAS E IMPORTANCIA DE LA OBRA



#### IV. FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL FENOMENO DE LICUACION

Basicamente hay dos enfoques diferentes para analizar la susceptibilidad a licuación de un depósito de arena. El primero consiste en comparar con las características del manto del suelo, las de aquellos depósitos que han presentado el fenómeno, - haciendo uso de correlaciones empíricas como se muestra en la siguiente figura.

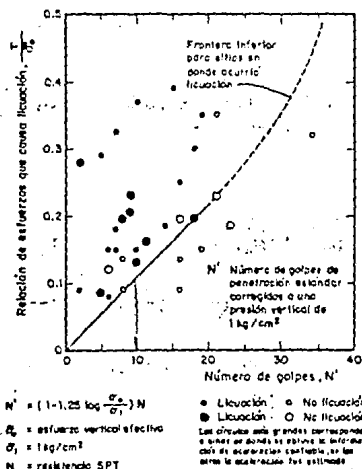


FIG IV.1 CORRELACION ENTRE RELACION DE ESFUERZOS - Y RESISTENCIA A LA PENETRACION ESTANDAR DE DEPOSITOS DE ARENA EN DONDE HA OCURRIDO LICUACION.

El segundo enfoque se fundamenta en el comportamiento de muestras de arenas reconstituidas o - inalteradas en ensayos de laboratorio.

Los factores más importantes en el análisis - de la licuación son:

- Tipo de suelo (características del material y del depósito)
- Compacidad relativa
- Características granulométricas
- Estado de esfuerzos efectivos
- Características de los sismos (sismicidad local)
- Geología
- Características e importancia de la obra

A continuación se detallan cada uno de estos factores:

#### IV.1 Tipo de Suelo

Las pruebas de laboratorio y observación del comportamiento de los suelos durante sismos, muestran que los suelos más susceptibles a la licuación son

las arenas limosas; ya que los suelos arcillosos son poco susceptibles a las cargas repetidas. Se ha -  
mostrado que sometiendo especímenes de suelos arcillosos a 200 deformaciones cíclicas, menores que la mitad de la deformación de falla en condiciones estáticas, la resistencia al corte se reduce sólo en 20% respecto a la estática.

#### A) Características del Material y del depósito

Con referencia al tipo de suelo, se pueden resumir como características más notables:

$0.1 < D_{50} < 0.5$  mm

$C_u < 7$  (coeficiente de uniformidad)

% de finos

$< 15 - 20$  %

El índice de plasticidad de la fracción fina es determinante en la susceptibilidad a licuarse - del suelo. Mientras más plástico menos susceptible.

La granulometría del depósito y sus condiciones de frontera deben considerarse en el análisis, ya que un estrato de arena confinado por capas de suelos impermeables no puede disipar rápidamente los incrementos de presión de poro, a diferencia de uno que está confinado. Así mismo, el espesor del estrato determina el tiempo o rapidez con que la presión de poro puede ser disipada.

Por otra parte, la mayoría de los suelos que se han licuado, se encontraban en estado medio a muy suelto; es decir, que los resultados de las pruebas de penetración estándar (STP), indicaba un número de golpes menor de 15 a 20, en general. Cabe hacer notar que se menciona la prueba de penetración porque esos son los resultados de que se dispone con todas las limitaciones que implica, en cuanto a equipo y ejecución del sondeo.

#### IV.2 Compacidad Relativa

El fenómeno de licuación se ha presentado sólo en suelos que tienen una compacidad relativa menor

de 75%. Experimentalmente, se ha comprobado que los suelos de mayor compacidad relativa sometidos a cargas cíclicas, son los que muestran menor tendencia a disminuir su volumen y por tanto a inducir presión en el agua intersticial. Por otra parte, se ha observado que el esfuerzo cíclico necesario para producir licuación, es proporcional a la compacidad relativa.

La determinación de la compacidad relativa, presenta varias dificultades. No existen pruebas de laboratorio estandarizadas para determinar valores de las relaciones de vacíos máxima y mínima, ( $e_{max}$  y  $e_{mín}$ ). Además, para definir la relación de vacíos natural, es necesario contar con muestras inalteradas de difícil obtención en el caso de suelos granulares.

Generalmente, la compacidad relativa se determina por procedimientos indirectos. El más usual, consiste en usar la correlación existente entre el número de golpes de la penetración estándar y la

compacidad relativa para diferentes presiones de sobrecarga. Esta correlación es puramente empírica y está sujeta a errores debidos principalmente a diferencias en el equipo y el procedimiento empleado para la ejecución de la prueba que varía de un operador a otro. El método de perforación empleado, afecta también los resultados. Empleando ademe metálico y agua como fluido de perforación, el número de golpes de la prueba de penetración puede ser de hasta 2.5 veces mayor que cuando se emplean barras helicoidales y lodo.

#### IV.3 Características Granulométricas

Las distribuciones y la forma de las partículas influyen en la susceptibilidad a la licuación de los suelos. Los tamaños que más propician la licuación, se muestran a continuación en la siguiente figura - que muestra los suelos susceptibles a licuación.

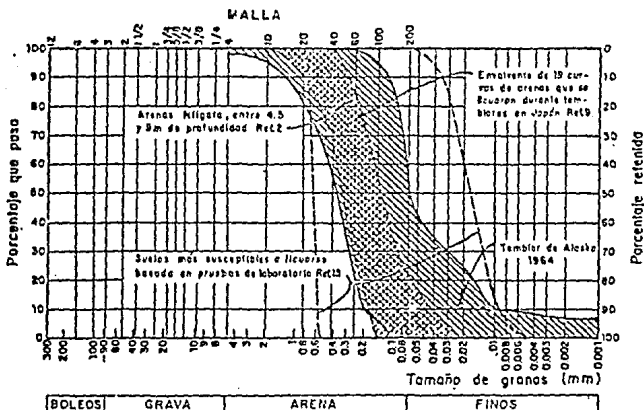


FIG. IV.2 SUELOS SUSCEPTIBLES A LICUACION

Esta información fué obtenida a partir de experiencias tanto de campo, como de laboratorio.

La forma de los granos, influye poco en la susceptibilidad a la licuación. Lee y Fitton, ensayaron 10 arenas diferentes con curvas granulométricas y - compacidad relativa similares, encontrando una diferencia máxima de 12% en los esfuerzos cortantes necesarios para producir licuación.

#### IV.4 Estado de Esfuerzos Efectivos

El ensayo de suelos bajo cargas cíclicas en prueba triaxial y en corte simple, muestra que el - esfuerzo necesario para provocar licuación, crece al aumentar el esfuerzo de confinamiento o vertical respectivo. En pruebas triaxiales con incremento - monotónico de esfuerzos en condiciones no drenadas, se ha observado que, aumentando la presión de confi namiento, para una misma relación de vacíos e, aumenta la posibilidad de pérdida de resistencia total por incremento de presión intersticial.

Las condiciones de las pruebas de carga cíclica, se asemejan a las que ocurren durante un sismo, en tanto que las pruebas con incremento monotónico de esfuerzos son aplicables a la falla de taludes.

#### IV.5 Características del Sismo

La magnitud de la aceleración inducida por un sismo en un estrato licuable, define la de los esfuerzos cortantes que sufrirá el suelo.



El número de ciclos de carga o de deformación (s) significativa, depende por otra parte de las características del sismo. Como puede verse en la figura 1, las aceleraciones producidas no son uniformes. Un ciclo se considera significativo cuando el valor de la máxima aceleración observada en el ciclo corresponde a esfuerzos importantes.

#### A) Sismicidad Local

El conocimiento de la sismicidad local, nos permite determinar la magnitud y la aceleración del sismo de diseño para el período de recurrencia, elegido así como la distancia epicentral probable. Este período, se determina en función de la vida útil, importancia y características de la obra y de las implicaciones que tendría una falla de la estructura.

En la tabla 1, se muestran los datos relevantes de algunos de los sismos que han provocado licuación. En términos generales, se puede decir que los sismos son poco profundos (profundidad focal menor de 60 km), de una magnitud igual o mayor de 6.5

(Richter), una distancia epicentral de 100 Km ó menor, una aceleración máxima entre 0.1 y 0.3 de la aceleración de la gravedad y una duración entre 5 y 200 seg.

Sismo	Magnitud (Richter)	Distancia al epicentro km	Aceleración $g$	Duración seg	Profundidad focal km
Jáltipan, Ver México (1959)	6.5	35	0.07 a 0.200	-	20
Chiapa de Corzo, Chis (1975)	4.8 a 5.6	<10	0.3	5	2.5-5
Miligata, Japón (1964)	7.5	55	0.15 a 0.19	-	40
Alaska, EUA (1964)	8.5	128	?	270 a 420	-

FIG. IV.3 TABLA 1, CARACTERISTICAS DE ALGUNOS SISMOS QUE HAN PROVOCADO LICUACION.

#### IV.6 Geología

Los suelos naturales susceptibles a licuación son, geológicamente hablando, arenas o limos aluviales de depositación reciente, en estado muy suelto; abanicos aluviales, planicies de inundación, terrazas y diques naturales de aluvión fino.

Algunos rellenos artificiales no compactados hechos con materiales de granulometría similares a las descritas antes, y varias presas construídas - por el método de relleno hidráulico, han sido severamente dañadas bajo la acción sísmica. Otros suelos susceptibles, son los depósitos de minas (jales), formados de arena fina y limos poco plásticos.

Se sabe que la edad del depósito influye en la susceptibilidad a licuarse. Este hecho ha sido demostrado en pruebas de laboratorio. Una muestra de arena formada y probada el mismo día, exhibe una resistencia a carga cíclica menor que otro espécimen preparado y dejado bajo la misma presión confinante y ensayado un mes después.

También se ha comprobado que si una muestra - de arena es sometida a cargas cíclicas de una magnitud muy pequeña, que provoquen apenas un cambio perceptible en la relación de vacíos e, es más resistente a cargas cíclicas de mayor intensidad, que otra muestra no excitada previamente.

La historia de formación del depósito influye en la estructura de la arena, como también ha sido comprobado en el laboratorio. Es decir, dos muestras de arena de igual e, formadas en el laboratorio con dos métodos distintos, probadas en condiciones similares, exhiben un comportamiento cíclico y estático diferentes, con variaciones que pueden ser tan grandes como un 100% en su resistencia a carga cíclica; en prueba estática una puede comportarse de manera contractiva y la otra dilatante.

Hay depósitos de arenas cuyos granos se encuentran cementados entre sí por oxidación, carbongos u otros agentes. Estos depósitos pueden ser más resistentes a cargas cíclicas. Aun cuando es posi-

ble tener estructuras más abiertas y que exhiben un mayor número de golpes en prueba de penetración - estándar que aquellos depósitos no cementados; por tanto, bajo una carga muy intensa, fallan de manera más perjudicial.

La localización de fallas menores potencialmente activas cerca del sitio, no debe ser soslayada, ya que son generadoras de sismos, aunque superficiales, y de baja magnitud, producen efectos adversos cerca de su epicentro.

#### IV. 7 Características e Importancia de la Obra

Como ya se mencionó, este factor determina el grado de detalle con el que deben estudiarse los factores antes señalados. Aun más, influye de manera definitiva en el tratamiento a seguir para mejorar el suelo, en caso de que el depósito fuera encontrado susceptible a licuarse. No debe olvidarse una alternativa válida al problema que es abandonar el sitio, y otra es a través de soluciones de cimentación.

Las implicaciones de fallas de estructuras, - no deben medirse sólo en términos económicos sino también de vidas humanas. Por lo general, las escuelas y hospitales son estructuras poco costosas - comparadas con una presa o planta industrial, pero su falla es inadmisible.

Hay experimentos sencillos que a continuación se ilustrarán. Considérese una probeta con agua - hasta cierto nivel, si ahora se vacía una arena fina en la probeta, de tal manera que quede en estado - suelto y completamente saturado, sin que exista tirante de agua sobre ella; al terminar la operación, se tendrá un conjunto con la apariencia de un suelo estable. En efecto, sobre la frontera superior puede colocarse un peso de cierta importancia, sin que se produzca deformación perceptible; pero si en estas condiciones, se introduce bruscamente una varilla, extrayéndola inmediatamente, se podrá observar que el peso antes soportado se hunde materialmente en la arena, quedando alojado en el interior de la masa.

Al introducir la varilla y extraerla brusca-  
mente, se ha producido un desplazamiento brusco, -  
que ocasionó el derrumbe en la estructura de la  
arena suelta; esto fué causa de la licuación momen-  
tanea de, por lo menos, en la parte en que se apo-  
yaba el peso.

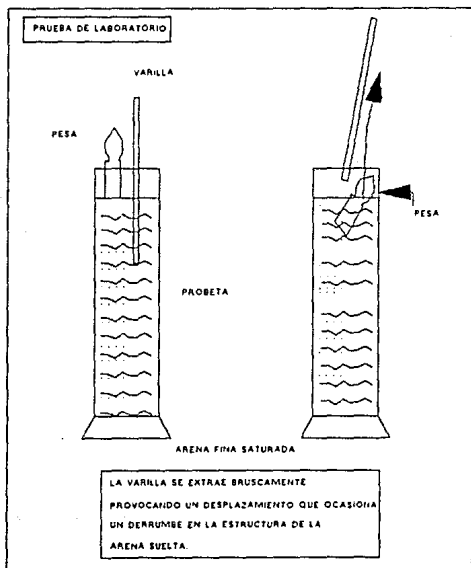


FIG. IV.4 EXPERIMENTO PARA REPRODUCIR CONDICIONES DE LICUACION EN ARENAS.

## CAPITULO V

### METODOS PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUACION

- V. METODO PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUACION
  - V.1 PRUEBAS DE PENETRACION
    - V.1.1 Penetración Estándar
    - V.1.2 Penetración Estática
    - \*Comentarios
  - V.2 METODOS PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUACION
    - V.2.1 Criterio de WES (Waterways Experimental Station)
    - V.2.2 Criterio de Florin e Ivanov
    - V.2.3 Criterio de Kishida
    - V.2.4 Criterio de Oshaki
    - V.2.5 Método de Seed e Idriss
    - V.2.5.1 Comentarios al Método de Seed e Idriss
  - V.3 EVALUACION EXPERIMENTAL DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUACION DE SUELOS.
    - V.3.1 Cámara Triaxial
    - V.3.2 Aparato Corte Simple



## V. METODO PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUACION

### V.1 Pruebas de Penetración

En la exploración preliminar de un sitio o en proyectos de bajo costo, el ingeniero se ve obligado a predecir el comportamiento mecánico de suelos arenosos saturados poco compactos, con sólo la información que pueda obtener de la prueba de penetración estándar.

Debido a esto, se discuten a continuación brevemente, las incertidumbres y ventajas de las pruebas de penetración estándar y de penetración estática para interpretar indirectamente el comportamiento mecánico del suelo.

#### V.1.1 Penetración Estándar

La prueba de penetración estándar, es una prueba índice de la resistencia al corte. Aplicada en arenas, queda sujeta a algunas variables que pueden afectar significativamente el número de golpes (N)

necesarios para hincar el muestreador. Las más frecuentes son:

- a) La variación del nivel del agua.
- b) Las maniobras rápidas de meter y sacar las barras de perforación; equivalen a un bombeo del agua del sondeo y con ello se genera succión en el suelo, reduciéndose así la compacidad de las arenas.
- c) El empleo de brocas de chiflón sin control de la presión de inyección de agua altera, erosiona - el suelo por ensayarse.
- d) El empleo de barras pesadas tiende a reducir el número de golpes.
- e) La fricción entre el cable con el que se levanta el martinete golpeador y la polea que se utiliza, así como el excesivo número de vueltas del cable en el malacate de fricción, reduce la energía - con que golpea el martinete.
- f) Generalmente por descuido, la altura de caída del martinete no se conserva constante.
- g) Es frecuente encontrar que ni el muestreador ni el martinete cumplan con las especificaciones - establecidas.

### V.1.2 Penetración Estática

La prueba de penetración estática empleando un cono tipo eléctrico para medir los esfuerzos de punta  $q_c$  y de fricción  $f_s$  que se desarrollan durante su hincado, está prácticamente exenta de errores de operación. Sin embargo, se está en proceso de lo grar su estandarización. Las variables más signifi cativas por controlar son: a) La rugosidad y geome tría del cono. b) La velocidad de hincado del ins trumen to, que generalmente es de 2 cm/seg<sup>2</sup> y c) La sensibilidad de las celdas instrumentadas con las que se determinan los esfuerzos de hincado, que deben elegirse de suerte que las mediciones sean con fiables.

Comparativamente con la penetración estándar, las mediciones con cono eléctrico sólo tienen la - desventaja de que no se recuperan muestras de suelo, y que por ello se deben complementar con muestreos directos. Sin embargo, por su alta eficiencia y fa cilidad de operación se ha transformado en una herra miento muy útil para la exploración.

### \*Comentarios

No resulta fácil comparar los resultados de las pruebas de penetración mencionadas, porque las condiciones que se le impone al suelo en los dos ca sos son muy diferentes: la de penetración estándar es una prueba de impacto en condiciones no drenadas, en tanto que la de cono estática, es una prueba de - deformación controlada. Por otra parte, el sismo - genera ondas de carga con el tiempo y el suelo arenoso reacciona; lleva a concluir que las pruebas de penetración estándar o estática, sólo pueden ser in dicativas del comportamiento mecánico de arenas sometidas a un sismo.

Una limitación importante para utilizar, (por ahora), el cono para juzgar la susceptibilidad a la licuación de un depósito de arena, radica en que la información publicada sólo se ha correlacionado con los resultados de la prueba de penetración estándar.

Aparentemente este problema puede subsanarse si se conocen las relaciones que existen entre el número de golpes,  $N$ , y la resistencia de punta,  $q_c$ , para diversos tipos de suelo.

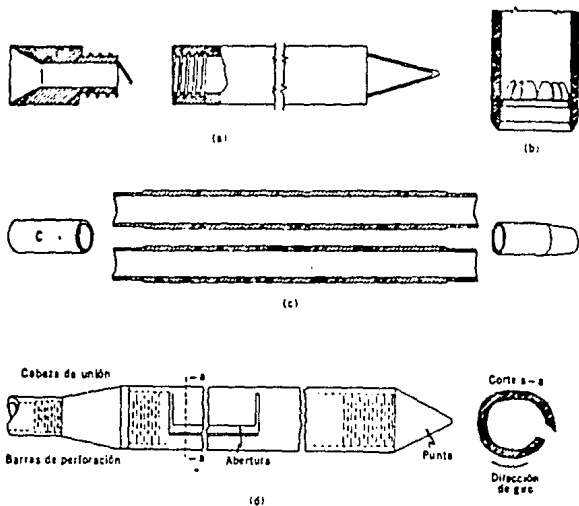


FIG. V.1 TIPOS DE MUESTREADORES.

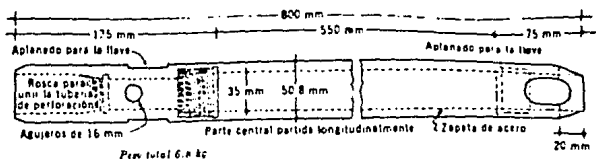


FIG. V.2 PENETROMETRO ESTANDAR.

## V.2 Métodos para Evaluar la Susceptibilidad a la Licuación

Se han desarrollado métodos que permiten estimar la susceptibilidad a la licuación de los suelos, fundados en experiencias de laboratorio consistentes en someter especímenes a cargas cíclicas, y en la información obtenida de sitios en los que ha ocurrido licuación. Los métodos que tienen mayor aceptación son:

Criterio WES (Waterways Experimental Station)

Criterio de Florin e Ivanov

Criterio de Kishida

Criterio de Oshaki

Criterio de Seed e Idriss

Los criterios del WES y de Florin e Ivanov, - son aplicables al caso de licuación espontánea debida al incremento de presión de poro por aumento monótonico de los esfuerzos o deformaciones.

Los criterios de Kishida y Oshaki, fueron desarrollados con base en la información obtenida en

sitios particulares en los que ocurrió, o no, licuación durante un sismo. Su aplicabilidad está, por tanto, limitada a temblores y zonas de estratigrafía similares a las del lugar en que fueron obtenidas.

El criterio de Seed e Idriss, consiste en comparar la resistencia obtenida en pruebas de laboratorio con los esfuerzos provocados por el sismo en los diversos estratos del sitio en estudio.

A continuación se presenta brevemente cada uno de estos criterios.

#### V.2.1 Criterio del Wes (Waterways Experimental Station)

Este criterio fué desarrollado para analizar la estabilidad de terraplenes a lo largo del Río Mississippi, en el que se producen flujos de material producidos por incremento de la presión de poro, - originada por cambios del nivel del río. Este fenómeno ha recibido el nombre de licuación espontanea.

Las conclusiones del estudio, permiten señalar que un sitio es potencialmente inestable cuando se satisfacen las siguientes condiciones:

- El espesor del estrato de arena licuable, es al menos de 7.5 metros.
- La relación del espesor del estrato suprayacente, no licuable, al espesor del estrato licuable, es menor que 0.85.
- El porcentaje de finos (que pasa la malla 200), es menor de 10%.

#### V.2.2 Criterio de Florin e Ivanov

Este criterio, desarrollado en Rusia, permite estimar la susceptibilidad a la licuación de suelos por medio de pruebas de campo. Se investigan los 10 metros superiores de suelo haciendo explotar sucesivamente tres cargas de dinamita de 5 kg, colocadas a una profundidad media de 4.5 metros y determinando después de cada explosión, el asentamiento medio de la superficie dentro de un radio de 4.5 m. La cantidad y profundidad a la que se coloca el explosivo se eligen de forma que no haya expulsión de suelo.



Si el asentamiento promedio es menor que 8 a 10 cm, y la relación de asentamientos entre explosiones sucesivas es menor que 0.6, se puede afirmar que ese suelo no es susceptible a la licuación.

Otros criterios desarrollados por investigadores, ha hecho pruebas in-situ con explosivos para obtener y determinar si el material es, o no, licuable. Se ha llegado a conclusiones respecto al comportamiento del material, pero no se han obtenido criterios aplicables a otros suelos. A continuación se presentan dos de estos casos tipo.

Kummeneje y Eide investigaron la licuación de arenas finas marinas en estado suelto. En uno de los sitios analizados, se efectuaron numerosas pruebas antes, durante y después de provocar explosiones con una carga de dinamita de 2.4 kg, colocada a 7 metros de profundidad. Se observó que en un círculo de 3 metros de radio aproximadamente, el terreno se reblandeció y que, fuera de esa zona, se compactó. Los incrementos de presión de poro debidos a la

explosión, fueron hasta del 85% de la presión de -  
sobrecarga a una distancia de 5.5 metros de la ex--  
plosión. Los máximos asentamientos observados fue--  
ron de 40 cm después de 7 detonaciones. Con los da--  
tos anteriores, los autores concluyeron que el mate--  
rial no era licuable.

Alberro y Lesser analizaron la posibilidad de  
licuación del aluvi6n existente en el sitio en el -  
que se construiría la presa "La Villita", simulando  
la acci6n de un temblor por medio de explosiones a  
3 y 5 metros de profundidad, en dos trincheras para--  
lelas distantes a 28 metros. Con el material, pro--  
ducto de la excavaci6n de las trincheras, se cons--  
truy6 un terrapl6n sobre el terreno natural entre -  
hileras de explosivos. Se observaron los asentamien--  
tos producidos por las explosiones y el comportamien--  
to en general. Los hundimientos máximos fueron del  
orden de los 3 cm. De los resultados obtenidos, se  
concluy6 que el material no era licuable.

### V.2.3 Criterio de Kishida

Este criterio está basado en el análisis de las condiciones del suelo de 3 sitios en que ocurrió licuación, bajo sismos de misma magnitud, ya que puede ocurrir licuación si el nivel freático está cerca de la superficie, si las características granulométricas satisfacen las relaciones:

$2\text{mm} > D_{50} > 0.074 \text{ mm}$ ;  $C_u < 10$  y además cumplen con las siguientes condiciones:

- El espesor del estrato del suelo no licuable, sobre del estrato licuable, es menor que 8 metros.
- La relación de los espesores del estrato no licuable al licuable es menor de 1.

Kishida también concluye que los suelos no son susceptibles a la licuación si:

- La presión efectiva de confinamiento es superior a  $2 \text{ kg/cm}^2$ .
- La compacidad relativa es inferior a 75%.

#### V.2.4 Criterio de Oshaki

Este criterio establece que los suelos con nivel freático cercano a la superficie, pueden licuarse si se presentan las siguientes características granulométricas:

$$2 \text{ mm} > D_{60} > 0.2 \text{ mm} ; D_{10} < 0.1 \text{ mm}$$

Adicionalmente, establece que estos suelos, tendrán poca probabilidad de licuarse si el número de golpes  $N_{sp}$  en la prueba de penetración estándar es mayor que  $2z$ , en que  $z$  es la profundidad en metros.

#### V.2.5 Método de Seed e Idriss

Este método consiste en comparar los esfuerzos inducidos por el sismo en los estratos licuables con los que puede resistir el suelo sin que ocurra licuación. Para determinar los esfuerzos inducidos in-situ, debe contarse con el acelerograma del sismo de diseño, la estatigrafía y las propiedades índice

y mecánicas de los suelos. Seed e Idriss, proponen un procedimiento simplificado para estimar la magnitud de los esfuerzos que originan los sismos. La magnitud de los esfuerzos que pueda provocar licuación en el suelo, se obtiene a partir de pruebas de laboratorio, tanto triaxiales como de corte simple, con esfuerzos repetidos o bien estimados con gráficas de diseño obtenidas por Seed e Idriss. La comparación de los esfuerzos inducidos por el sismo con los que provocan licuación del suelo, permite juzgar la susceptibilidad de un suelo a sufrir este fenómeno.

#### V.2.5.1 Comentarios al Método Seed e Idriss

Este método permite un análisis más racional de la susceptibilidad a la licuación de los suelos. Tiene, sin embargo, limitaciones que se resumen a continuación:

a) Compacidad relativa. La confiabilidad de la prueba de penetración estándar para determinar la compacidad relativa in-situ es dudosa. Es conocida por otra parte la influencia que ejercen los detalles de ejecución de la prueba de penetración estándar sobre el resultado de la misma.

b) El esfuerzo cortante medio que se supone produce el mismo efecto que los esfuerzos inducidos por el temblor en un número dado de ciclos, es considerado por los autores igual a  $0.65 T_{\text{máx}}$ . Esta suposición merece investigarse con más detalle con procedimientos más definidos.

c) Esfuerzos generados por un sismo en el terreno. Los métodos para conocer los esfuerzos generados por un sismo, suponen que la rigidez y el amortiguamiento del suelo permanecen constantes con el tiempo, - (durante el transcurso del temblor). La presión de poro, producida por el temblor en el estrato en estudio, hace que disminuyan los esfuerzos efectivos y es probable que disminuya la rigidez y aumente el - amortiguamiento por ese efecto.

### V.3 Evaluación Experimental de la Susceptibilidad a al Licuación de Suelos.

Se han desarrollado procedimientos experimentales para someter a especímenes de suelo a la acción de cargas cíclicas y observar, en particular, el

incremento de la presión del agua intersticial y la evolución de las deformaciones. Los dispositivos - hasta ahora más utilizados son: La cámara triaxial y el aparato de corte simple.

En este tipo de pruebas, varios factores afectan a los resultados obtenidos, en particular el procedimiento de formación del espécimen y la representatividad del mismo, la frecuencia y duración de las vibraciones a que se somete y las características - del aparato.

#### V.3.1 Cámara Triaxial

Esta prueba consiste en someter a un espécimen cilíndrico a la acción de esfuerzos desviadores cíclicos de compresión y extensión, manteniendo la presión de confinamiento o confinante constante. Los mecanismos de carga para producir la carga cíclica, son neumáticos, eléctricos o mecánicos. Durante el desarrollo de la prueba, se miden los incrementos - de presión del agua intersticial que se presentan al

aplicar los ciclos de carga y el esfuerzo desviador que en un número de ciclos de carga  $n$ , produce la licuación.

Los resultados obtenidos con estas pruebas dependen de las condiciones iniciales del suelo, en particular, de su compacidad relativa y de los iniciales actuantes. Durante el desarrollo de las pruebas en condiciones no drenadas, se observa que la presión del agua intersticial va aumentando en cada ciclo de carga. Cuando esta presión llega a ser igual a la presión confinante, el material pierde su resistencia y sufre deformaciones considerables bajo los esfuerzos aplicados.

Este tipo de prueba es el más simple de llevar a cabo, entre los mencionados anteriormente, sin embargo, el estado de esfuerzos y deformaciones logrado, no se asemeja al que ocurre durante un temblor por varias razones:

- Las direcciones de esfuerzos principalmente en el campo, cambian constantemente durante un sismo. En



la cámara triaxial, solo es posible simular rotaciones bruscas de dichas direcciones de  $90^\circ$ .

- Las deformaciones que experimenta el material in-situ, se asemejan a las observadas bajo sollicitación de corte simple.

- En el terreno, el esfuerzo promedio en el plano en que ocurre la deformación permanece constante, en cambio, en la prueba triaxial, este esfuerzo va ría durante la aplicación del esfuerzo desviador. Es posible ejecutar pruebas cíclicas triaxiales con esfuerzo octaédrico constante, pero esto complica su ejecución.

- En el campo, un elemento de suelo está bajo con diciones de reposo. El esfuerzo horizontal es igual al esfuerzo vertical multiplicado por un coeficiente K de reposo en general menor que 1. En la prueba triaxial, K es inicialmente igual a 1.

A partir de la información obtenida en este tipo de prueba, es posible trazar una gráfica de la relación entre el esfuerzo cortante máximo cíclico

y la presión confinante, actuando sobre la muestra, contra el número de ciclos necesarios para producir licuación en el material, para una compacidad relativa y una granulometría dadas.

Las gráficas de las figuras V.3 y V.4, son un compendio de los resultados obtenidos por diversos autores.

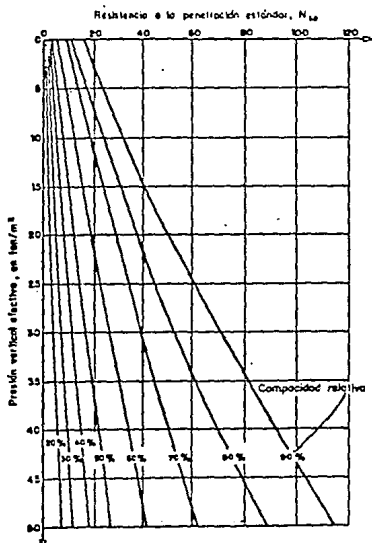


FIG. V.3 RELACION ENTRE LA RESISTENCIA A LA PENETRACION, COMPACIDAD RELATIVA Y PRESION VERTICAL.

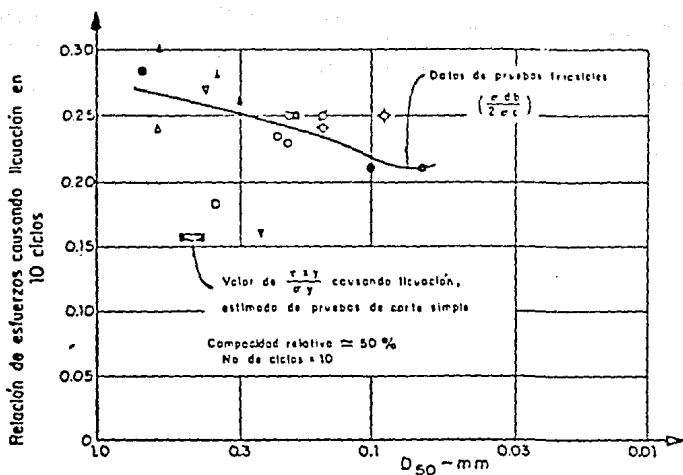


FIG. V.4 CONDICIONES DE ESFUERZO CAUSANDO LICUACION DE ARENAS EN 10 CICLOS.

### V.3.2 Aparato de Corte Simple.

El espécimen probado en este aparato, es una pastilla de forma rectangular en planta, solicitada por un esfuerzo cortante cíclico horizontal. La condición de corte simple se obtiene por inclinación de dos de las paredes de la caja en la que se encuentra confinado el espécimen.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

El esfuerzo vertical aplicado y la dirección de aplicación del esfuerzo cortante cíclico, se man tienen constantes durante la prueba. Las únicas - pruebas de este tipo, reportadas en la literatura, son las de Peacock y Sedd y de Finn.

El esfuerzo cortante que en un número  $n$  de ciclos produce la licuación del material, depende del estado inicial del suelo, particularmente de la com pacidad reactiva y del estado de esfuerzos iniciales actuantes.

El proceso de carga se realiza en condiciones no drenadas y se observa el incremento de la presión en el agua intersticial provocado por cada ciclo de carga, hasta que el material pierda su resistencia y sufra deformaciones considerables bajo los esfuer zos aplicados.

La prueba de corte simple es difícil de reali zar y, sobre todo, los aparatos necesarios son com plicados. Sin embargo, las condiciones de esfuerzos

y deformaciones conseguidos en este tipo de prueba, son más semejantes a los existentes en el campo y - permiten llegar a conclusiones más confiables respecto al comportamiento del material.

A partir de la información obtenida en esta - prueba, se puede trazar en una gráfica la relación entre el esfuerzo cortante cíclico y la presión vertical actuando sobre la muestra, contra el número - de ciclos necesarios para producir licuación el material con una compacidad relativa y una granulometría dadas.

## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES

#### VI.1 CONCLUSIONES

## VI.1 CONCLUSIONES

En nuestro país, el ingeniero civil que se enfrenta a un suelo susceptible a licuación, debe contar con las herramientas que le permitan detectar si existe tal problema. La información general sísmica y geológica de la República Mexicana, así como su conocimiento de la estatigrafía del sitio, le permiten reconocer si puede suceder el fenómeno.

Como una conclusión particular al fenómeno de licuación de arenas, es la aplicación de la vibrocompactación que tiene un 90 % de efectividad cuando se aplica principalmente a suelos granulares, sueltos y con alto contenido de agua, o mejor aún saturados.

La vibrocompactación consiste en el uso de equipos vibratorios para compactar suelos arenosos, ya que han probado ser una solución eficaz.

La manera de atacar un problema en el cual se tiene la duda de la existencia probable del fenómeno sería resumido de la siguiente manera:

- a) Estudio del suelo:
  - Tipo de suelo
  - Compacidad relativa
  - Análisis granulométrico
  - Prueba de penetración estándar
  - Estado de esfuerzos efectivos
  - Contenido de agua y nivel freático
  
- b) Aplicación de métodos para la determinación de la susceptibilidad a la licuación del suelo en estudio.
  
- c) Sismicidad local
  
- d) Geología
  
- e) Característica e importancia de la obra
  
- f) Aplicación de la vibrocompactación
  - Profundidad del suelo a compactar
  - Compactación requerida

El objetivo principal de este trabajo, fué definir la naturaleza y el alcance de la licuación que se presenta tanto en el campo, como en el laboratorio; por lo que podemos conceptualizar a la licuación, como el fenómeno que es causado por la disminución rápida de la resistencia al esfuerzo cortante



hasta valores nulos o practicamente nulos, por un aumento igualmente rápido de la presión neutral, que ocurre cuando el suelo queda sujeto a una sollicitación brusca de estilo dinámico. Por lo que la estructura granular del material sufre un derrumbe instantaneo que afecta masas grandes de suelo, por lo que el agua se vé obligada a tomar bruscamente presiones adicionales muy por encima de la hidrostática, que nulifica la presión efectiva; el conjunto se comporta realmente como una suspensión densa y este comportamiento dá nombre al fenómeno.

Algunos autores han tratado de estudiar la posibilidad del fenómeno de licuación comparando la relación de vacíos de la arena en cuestión con su valor crítico, pero en realidad no se ha encontrado ninguna razón para que exista tal relación, aun cuando el valor crítico no es bien conocido. La licuación de arenas ha sido tema de muchos investigadores y la literatura es muy variada, pero aun así todavía una definición que comprenda el fenómeno no existe y una metodología para su estudio todavía no ha logrado ser definida.

Se han presentado los métodos empíricos y semiempíricos para evaluar la susceptibilidad a la licuación de los suelos y algunos comentarios sobre su validez y aplicabilidad.

Los criterios empíricos de WES, Kishida y Oshaki, son de aplicación relativamente simple y en una etapa preeliminar, puede ser de utilidad para estimar si es posible que, en determinada zona, ocurra el fenómeno de licuación.

El método semi-empírico de Seed e Idriss, permite evaluar, aproximadamente, todas las variables que intervienen en el problema de licuación debido a sismos.

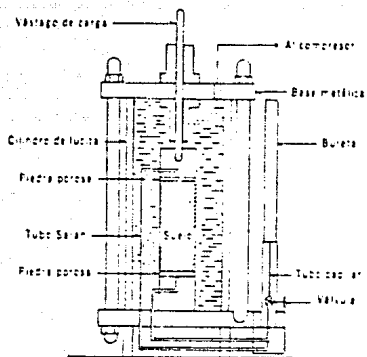
Debe mencionarse que, aún en caso de no presentarse licuación, la transmisión de ondas de cortante através de un estrato de suelo, tiene consecuencias en el comportamiento de las estructuras.

Es obligación del ingeniero civil, realizar todas las pruebas y estudios del suelo sobre el cual

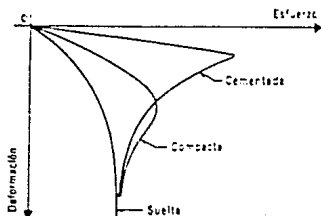
se va a edificar, y estar familiarizado con este -  
fenómeno cuyos daños potenciales son de magnitud de  
vastadora y saber jugar con los parámetros económi-  
cos para la realización completa del proyecto, con-  
siguiendo así una garantía de seguridad al factor -  
humano.

## CAPITULO VII

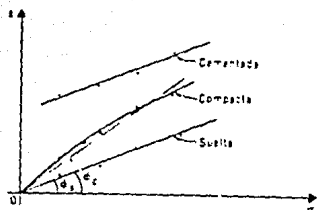
## G R A F I C A S



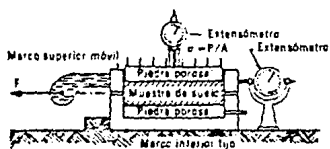
VII.1 ESQUEMA DE LA CAMARA DE COMPRESION TRIAXIAL



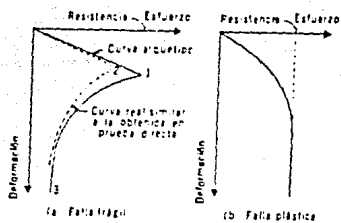
VII.2 GRAFICA ESFUERZO-DEFORMACION PARA UNA ARENA EN ESTADO SUELTO; COMPACTADO Y CEMENTADO, BAJO LA MISMA PRESION.



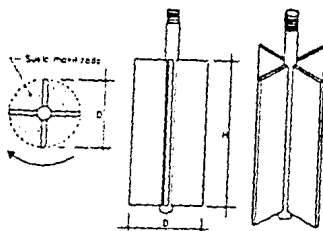
VII. 3 LINEAS DE RESISTENCIA PARA UNA ARENA EN ESTADO SUELTO, COMPACTO Y CEMENTADO.



VII.4 ESQUEMA DEL APARATO DE RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE.



### VII.5 TIPOS DE FALLAS CONSIDERADOS EN LOS SUELOS



### VII.6 APARATO DE VELETA PARA DETERMINACIONES DE RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE.

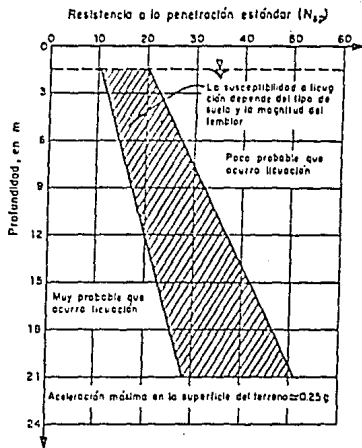
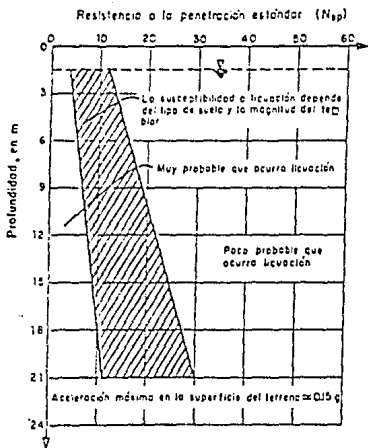
PROCEDIMIENTO	CONDICIONES PARA QUE EL SUELO SEA LICUABLE
WES (1952)	$H > 7.625\text{m}$ ; $h/H < 0.85$ ; % de finos $< 10$
Kishida *	$2\text{mm} > D_{50} > 0.074\text{mm}$ ; $C_u < 10$ ; $h < 8\text{m}$ ; $h/H < 1$
Oshaki	$2\text{mm} > D_{60} > 0.20\text{mm}$ ; $C_u < 5$ ; % de finos $< 10$ ;

- H Espesor del estrato con posibilidad de licuación
- h Espesor del estrato suprayacente
- $C_u$  Coeficiente de uniformidad
- $N_{sp}$  Resistencia a la penetración estándar
- z Profundidad en metros
- \* El suelo no es licuable; si la presión confinante excede  $2 \text{ kg/cm}^2$ , y/o la compacidad relativa es mayor que 75%
- $D_x$  Diámetro de partícula tal, que el x por ciento del material es menor en peso.

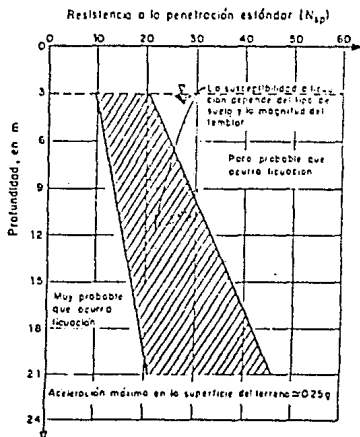
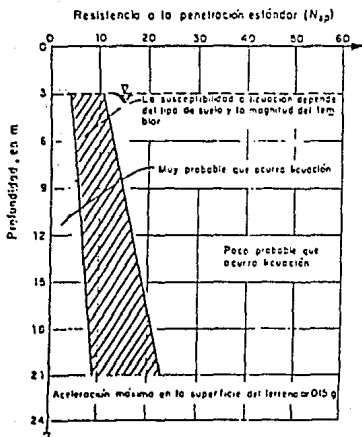
Tabla 1. Criterios empíricos para determinar la susceptibilidad a la licuación de los suelos.

VII.7 TABLA DE CRITERIOS EMPIRICOS PARA DETERMINAR LA SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUACION DE LOS SUELOS.

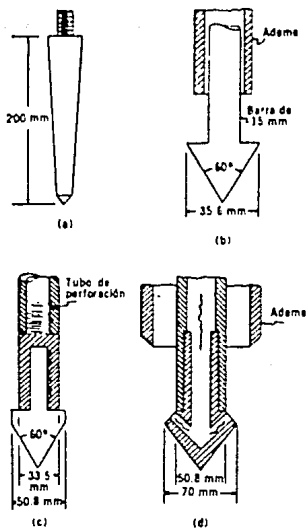




VII.8 GRAFICAS PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUACION DE ARENAS CON EL NIVEL FREATICO A UNA PROFUNDIDAD APROXIMADA DE 1.5 METROS.



VII.9 GRÁFICAS PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUACION DE ARENAS CON EL NIVEL FREÁTICO A UNA PROFUNDIDAD DE APROXIMADAMENTE 3 METROS.



#### VI.1.10 PENETROMETROS CONICOS

- a) Tipo danés
- b) Tipo holandés
- c) Tipo para ensaye dinámico
- d) Tipo de inyección

B I B L I O G R A F I A

Y

R E F E R E N C I A S

B I B L I O G R A F I A

Y

R E F E R E N C I A S

1. Damage to the Ground and Earth Structures by the Niigata Earthquake of June 16, 1964.  
Soils and Foundations, Vol. VI, Enero de 1966, N-1, pp 14 a la 30.  
Autor: Kawakami F. y Asada A.
2. A Review of the Soil Studies.  
Potamology Investigations Report N°12-5, Vicksburg, Miss. Junio de 1965.  
Autor: Waterways Experimental Station
3. Mecánica de Suelos.  
Tomo I, Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Tercera Edición, México 1974.  
Autores: Juárez Badillo y Rico Rodríguez.
4. Mejoramiento Masivo de Suelos.  
Reunión Técnica 16 de Noviembre de 1979. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A. C.  
Autor: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos
5. On Liquefaction phenomena, by Professor A. Casagrande: Report of Lecture.  
Geotechnique Vol. XXI N°3 Sept. 1971, pp 197 - 202.  
Autores: Green P.A y Ferguson P.A.S.
6. Vocabulario de Mecánica de Suelos.  
Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C. e Instituto de Ingeniería UNAM, Junio de 1977.
7. Simposio Internacional de Mecánica de Suelos Marinos, Volumen I, México 1980.  
Autor: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C.
8. Behavior of a Sandy Uniform Soil During the Jalisco Earthquake, México.

Proceedings, Fifth International Conference on  
Soil Mechanics and Foundations Engineering.  
Paris, France, 1961.

Autor. Marsal R. J.

9. Standard Penetration Test. Its Uses and Abuses.  
Journal of Soil Mech. and Found. Division.  
ASCE. VOL. 92, Mayo de 1966. p-105.

Autor: Parson J.D.

10. Factors Affecting the Cyclic Loading Strength  
of Soils.

Special Technical Publication N°450. Symposium  
on Vibration Effects of Earthquakes on Soils -  
and Foundations, ASTM, pp. 71-95.

Autor: Lee K.L. y Fitton, S.A.

11. Fundamentos de Geología Física.

Editorial Limusa, Sexta Reimpresión 1982.

Autor: Leet y Judson

12. Investigation of Loose Sand by Blasting.

Proceedings, Fifth Intern. Conf. on Soil Mech.  
and Found. Engineering. Paris 1961, Vol. I, pp.  
491-497.

Autores: Kummeneje O. y Eide O.

13. El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones -  
en el Área Urbana del Valle de México.

Simposio del 10 de marzo de 1978. Sociedad -  
Mexicana de Mecánica de Suelos.

14. Influence of Soil Conditions on Ground Motions  
During Earthquakes.

Journal of the Soil Mech. and Found. Div., ASCE,  
Vol. 95, SM1, Enero 1969, pp. 99-137.

Autores: Seed H.B. y Idriss, I.M.

15. The fourth Terzaghi Lecture: Landslide During  
Earthquakes Due to Liquefaction.

Journal of the Soil Mechanics and Foundations  
ASCE. Vol. 94, N°SM5, Sept. de 1968. pp 1053-1122

Autor: Seed H.B.

16. Liquefaction of Saturated Sandy Soils.  
Proceedings 5th International Conf. On Soil -  
Mechanics and Foundation Engineering, Paris -  
1961, Vol 1, pp 111.  
Autor: Florin e Ivanov
17. Characteristics of Liquefied Sand During Mino,  
Owari, Tohnamakai and Fukui Earthquakes.  
Soils and Foundations Vol. 9, N°1, Marzo de -  
1969, pp 75-92  
Autor: Kishida, H.
18. Analysis of Soil Liquefaction: Niigata Earth--  
quake.  
Journal of the Soils Mechanics and Foundations  
Division, ASCE, Vol. 93, N°SM3, Mayo de 1967,  
pp. 83-103.  
Autor: Seed H.B. y Idriss, I.M.
19. Sand Liquefaction in Triaxial and Simple Shear  
Test.  
Journal of the Soil Mech. Div. ASCE, Vol. 97,  
SM4, pp. 639-659.  
Autores: Finn W.D., Pickering D.S. y Bransby P.L.