

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



***MAPA DE LICUACION DE SUELOS
DE LA CIUDAD DE CHIMBOTE***

TESIS

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL.

RICARDO ENRIQUE SILVA CUENTAS

Lima - Perú
2000

INDICE

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	5
CAPITULO 2: EL FENÓMENO DE LICUACIÓN DE SUELOS	8
2.1 DEFINICIÓN DEL FENÓMENO DE LICUACIÓN.....	8
2.1.1 CAUSAS QUE ORIGINAN EL FENÓMENO DE LICUACIÓN.....	8
2.1.2 EFECTOS DAÑINOS QUE PRODUCE LA LICUACIÓN.....	10
2.1.3 DAÑOS OCURRIDOS EN SISMOS PASADOS POR EFECTOS DE LICUACIÓN.....	13
2.2 DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DE LICUACIÓN.....	18
2.2.1 FLUJO POR LICUACIÓN.....	20
2.2.2 MOVILIDAD CÍCLICA.....	22
2.3 IDENTIFICACIÓN DE SUELOS SUSCEPTIBLES A LICUACIÓN.....	23
2.4 CRITERIOS PARA PREVENIR Y REDUCIR LOS DAÑOS POR LICUACIÓN.....	24
CAPITULO 3: MÉTODOS EMPLEADOS PARA EVALUAR LA LICUACIÓN DE SUELOS	26
3.1 GRADOS DE EVALUACIÓN DE LICUACIÓN.....	26
3.1.1 GRADO 1.....	26
3.1.1.1 EVALUACIÓN DE LA MAYOR ÁREA SUSCEPTIBLE A LICUACIÓN.....	26
3.1.1.2 SUSCEPTIBILIDAD DE LICUACIÓN BASADO EN INFORMACIÓN EXISTENTE.....	29
3.1.2 GRADO 2.....	31
3.1.2.1 EJEMPLO DE ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN BASADOS EN INVESTIGACIONES GEOLÓGICAS O GEOMORFOLÓGICAS SOBRE LUGARES ESPECÍFICOS.....	34

3.1.3	GRADO 3.....	38
3.1.3.1	EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE LICUACIÓN BASADO EN DATOS GEOTÉCNICOS.....	38
3.1.3.2	EFFECTOS DE DAÑO EN LA SEVERIDAD DE LICUACIÓN.....	38
3.1.3.3	EJEMPLOS DE EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE LICUACIÓN.....	39
3.1.3.4	EJEMPLOS DE EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DAÑO POR LICUACIÓN.....	40
3.2	PROCEDIMIENTO GENERAL DE EVALUACIÓN DE LICUACIÓN.....	41
3.3	MÉTODOS SIMPLIFICADOS PARA LA EVALUACIÓN DE LICUACIÓN.....	43
3.3.1	MÉTODO DE SEED E IDRISSE.....	43
3.3.2	MÉTODO DE TOKIMATSU Y YOSHIMI.....	45
3.3.3	MÉTODO DE IWASAKI Y TATSUOKA.....	49
3.4	CORRECCIONES PARA LA EVALUACIÓN DE LICUACIÓN.....	50
3.4.1	CORRECCIÓN POR MAGNITUD DEL SISMO.....	51
3.4.2	CORRECCIÓN POR PRESIÓN DE SOBRECARGA.....	52
3.4.3	CORRECCIÓN POR CORTE ESTÁTICO.....	54
3.4.4	CORRECCIÓN POR ENERGÍA.....	55
3.5	MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DEL DAÑO DEBIDO A LA LICUACIÓN.....	58
3.5.1	MÉTODO DE IWASAKI Y TOKIMATSU.....	58
3.5.2	MÉTODO DE ISHIHARA.....	60

CAPITULO 4: DESARROLLO DEL SOFTWARE LICUA-PRO 62

4.1	LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN	62
4.2	DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL.....	63
4.3	PROCEDIMIENTO EN LA EJECUCIÓN DEL PROGRAMA.....	65
4.3.1	INGRESO DE DATOS DEL PROYECTO.....	65

4.3.2	EVALUACIÓN DE LICUACIÓN.....	67
4.3.3	CORRECCIONES PARA LA EVALUACIÓN DE LICUACIÓN.....	67
4.3.4	EVALUACIÓN DEL DAÑO INDUCIDO POR LICUACIÓN.....	68
4.3.5	GENERACIÓN DEL REPORTE.....	68
4.4	RESULTADOS.....	69

CAPITULO 5: EVALUACIÓN DE LICUACIÓN EN LA CIUDAD DE CHIMBOTE

5.1	GENERALIDADES.....	70
5.2	GEOLOGÍA.....	70
5.2.1	VOLCÁNICO CASMA.....	71
5.2.2	EL INTRUSIVO.....	71
5.2.3	EL CUATERNARIO.....	71
5.3	SISMICIDAD.....	71
5.4	MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA.....	75
5.5	ANÁLISIS PRELIMINAR DE LICUACIÓN SEGÚN LOS GRADOS DE EVALUACIÓN.....	77
5.5.1	GRADO 1.....	77
5.5.2	GRADO 2.....	78
5.5.3	GRADO 3.....	78
5.6	EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN.....	80
5.6.1	SISMO DE DISEÑO.....	80
5.6.2	MÉTODO DE EVALUACIÓN APLICADO.....	81
5.6.3	PROCESAMIENTO.....	81
5.6.4	RESULTADOS.....	82
5.6.5	INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	82
5.7	EVALUACIÓN DEL DAÑO INDUCIDO POR LICUACIÓN.....	85
5.7.1	SISMO DE DISEÑO.....	85

5.7.2	MÉTODO DE EVALUACIÓN APLICADO.....	85
5.7.3	PROCESAMIENTO.....	86
5.7.4	RESULTADOS.....	86
5.7.5	INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	86

CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1	CONCLUSIONES.....	90
6.2	RECOMENDACIONES.....	93

BIBLIOGRAFÍA	95
---------------------	-----------

REFERENCIAS “ONLINE”

ANEXOS

PLANOS

P-01	PLANO GEOLÓGICO
P-02	PLANO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA
P-03	PLANO EFECTOS DE LICUACIÓN
P-04	PLANO DE UBICACIÓN DE SONDAJES
P-05	PLANO DE EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN
P-06	PLANO DE EVALUACIÓN DEL DAÑO POR LICUACIÓN

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El terremoto del 31 de mayo de 1970 produjo manifestaciones superficiales del fenómeno de licuación en los depósitos de suelo arenosos y sueltos de la ciudad de Chimbote, tales como fisuramientos, desplazamientos laterales, efusiones de lodo y arena, abovedamientos, etc.; provocando como consecuencia daños materiales y pérdidas humanas. En terremotos pasados, la licuación de suelos ha sido la mayor causa que origina daño tanto en la estructura de los suelos, como en las construcciones que sobre estos se han edificado, de tal forma que para futuros terremotos la ocurrencia de este fenómeno es una amenaza potencial para la integridad

de estructuras e instalaciones ubicadas sobre el área propensa a sufrir licuación. En este caso la evaluación del potencial de licuación de los suelos es una de las importantes consideraciones para conducir trabajos de microzonificación sísmica, principalmente en áreas urbanas.

La evaluación del potencial de licuación nos proporciona información de carácter general acerca de la ocurrencia del fenómeno de licuación en los depósitos de suelo propensos al mismo. Sin embargo, el propósito de la ingeniería, y principalmente de los estudios de microzonificación, no es sólo poder determinar si en un área específica ocurrirá o no licuación, es importante también saber si en esta área se presentará daño superficial inducido por la ocurrencia de licuación en los estratos inferiores.

Debido a lo anteriormente señalado, los objetivos de este trabajo de investigación han sido los siguientes: realizar la evaluación del potencial de licuación de los suelos de la ciudad, en base a la información disponible y actualizada hasta el año 1999, tomando como base la información recopilada en la investigación llevada a cabo en 1991; y realizar la evaluación del daño en la superficie del terreno inducido por licuación como consecuencia de la ocurrencia de éste fenómeno en los suelos sub-superficiales de los depósitos. Como resultado en este estudio se han elaborado mapas del potencial de licuación y del daño superficial inducido por este fenómeno, para dos diferentes sismos de diseño, con la finalidad de mitigar los futuros daños en la ciudad de Chimbote que pueden ser producidos por un sismo severo.

En el presente trabajo de investigación, en el segundo capítulo, se procede a describir el fenómeno de licuación de suelos. Abarcando la definición del fenómeno, las causas que originan su ocurrencia, los efectos dañinos que produce este fenómeno, también se detalla los daños ocurridos en sismos anteriores por efectos de licuación. El término de licuación realmente se ha usado para describir una cantidad de fenómenos relacionados, los cuales pueden dividirse en dos principales categorías: flujo por licuación y movilidad cíclica los cuales también son descritos. En este segundo capítulo se clasifica a los suelos susceptibles a sufrir licuación, proporcionando algunos criterios para prevenir y reducir los daños inducidos por este fenómeno.

En el capítulo 3 se describen los métodos de evaluación de licuación utilizados en este estudio. Se detallan las correcciones aplicables a dichos métodos por los siguientes efectos: magnitud del sismo, presión de sobrecarga, esfuerzo de corte estático y energía liberada en el ensayo de penetración estándar. Seguidamente se describe los métodos o criterios empleados para evaluar el daño ocasionado por el fenómeno de licuación existentes en la literatura.

El capítulo 4 presenta el desarrollo del programa de cómputo LICUA PRO, que es el software aplicado en el presente trabajo de investigación para la evaluación del potencial de licuación, realización de las correcciones pertinentes y para la evaluación del daño inducido por licuación.

El capítulo 5 trata sobre la geología, sismicidad y microzonificación sísmica de la ciudad de Chimbote. La evaluación del potencial de licuación de los suelos de la ciudad de Chimbote ha sido realizada utilizando los métodos simplificados descritos en el capítulo 3; utilizando datos del ensayo de penetración estándar, debido a que se posee gran cantidad de información de este tipo de ensayos disponibles de la ciudad de Chimbote para correlacionarlos con la resistencia del suelo a la licuación. Se presenta también los parámetros de evaluación del potencial de licuación utilizados en el presente trabajo de investigación. En primer lugar se menciona el sismo de diseño seleccionado, luego el método de evaluación, procesamiento y finalmente se presentan los resultados obtenidos del proceso de evaluación. De la misma forma se presenta, en este capítulo, los parámetros empleados para la evaluación del daño inducido por licuación según los métodos descritos en el capítulo 3.

Finalmente en el capítulo 6 se menciona las conclusiones y recomendaciones derivadas del presente trabajo de investigación.

CAPÍTULO 2

EL FENÓMENO DE LICUACIÓN DE SUELOS

2.1 DEFINICIÓN DEL FENÓMENO DE LICUACIÓN

La licuación o licuefacción se define como "la transformación de un material granular de un estado sólido a un estado licuado como consecuencia del incremento de la presión de agua de poros" (Youd, 1973).

La causa más dramática de daños a edificaciones y obras civiles durante un terremoto es el fenómeno licuación; es un proceso en el cual el suelo cambia de un material firme a un material viscoso semi-líquido y bajo las condiciones similares a la arena movediza. La licuación ocurre cuando suelos arenosos son sometidos a vibración, por lo tanto es común durante los terremotos; cuando un estrato de suelo se licua y empieza a fluir, no puede soportar por más tiempo el peso de cualquier suelo o estructura encima de él, debido a esto, podrá existir deslizamiento si las condiciones de gravedad o pendientes están presentes, los edificios se pueden hundir en el terreno o inclinarse excesivamente como ha quedado demostrado en los terremotos de Niigata, Japón en 1964 y en Turnagain Heights, Anchorage, Alaska; donde la superficie que licuó y deslizó durante el terremoto del viernes santo de 1964, alcanzó una extensión de 2 Km de largo por 300 m de ancho.

2.1.1 Causas que originan el Fenómeno de Licuación

Entre las causas que originan el fenómeno de licuación están:

La Magnitud del Movimiento Sísmico

La magnitud de las sacudidas está relacionada con la magnitud de los esfuerzos y deformaciones inducidas en el terreno por este movimiento. Dependiendo de la distancia hipocentral, la magnitud del movimiento producirá cierto valor de aceleración máxima en la roca basal, la cual sufrirá amplificación, dependiendo de las condiciones locales del suelo, hasta llegar a la superficie, de esta manera la propagación de las ondas de corte durante un sismo a través del esqueleto del suelo, producirá un complicado registro de esfuerzos de corte en función del tiempo,

causando así diversos esfuerzos y deformaciones en la masa de suelo cuya magnitud dependerá de la magnitud del sismo.

Duración del Movimiento Sísmico

El movimiento sísmico que causará licuación será tan fuerte y a la vez tan corto (5–30 seg.) que impedirá la disipación de la presión intersticial predominando la condición no drenada, este movimiento deberá ser lo suficientemente duradero para producir el desarrollo total de esta presión intersticial hasta igualar al esfuerzo total, produciendo licuación.

Entre los parámetros que permiten la ocurrencia de licuación están:

La Granulometría del suelo

Los suelos más susceptibles a sufrir licuación son aquellos que poseen una granulometría uniforme, siendo las arenas finas uniformes las que son más propensas a licuar que las arenas gruesas uniformes. Además, según Seed (1986) y Tokimatsu (1983), las arenas limosas poseen mayor resistencia a sufrir licuación con respecto a las arenas limpias o con escaso contenido de finos. El problema de licuación será más serio si el suelo tiene un coeficiente de uniformidad mayor o igual a 2.

La Densidad Relativa

Durante un sismo dado, una arena suelta puede sufrir licuación mientras que este mismo suelo en un estado más compacto puede no sufrir el fenómeno. Podremos obtener el valor de la densidad relativa con la siguiente fórmula:

$$Dr (\%) = \frac{e_{\max} - e_{\text{nat}}}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100$$

donde :

Dr = Densidad Relativa

e_{nat} = relación de vacíos en el estado natural del suelo

e_{\min} = relación de vacíos en el estado más compacto del suelo

e = relación de vacíos en el estado más suelto del suelo

También podemos hallarla de la siguiente forma:

$$Dr(\%) = \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{d \max}} \right) \times \left(\frac{\gamma_d - \gamma_{d \min}}{\gamma_{d \max} - \gamma_{d \min}} \right) \times 100$$

donde :

Dr = Densidad Relativa

$\gamma_{d \min}$ = peso específico del suelo en su estado más suelto

$\gamma_{d \text{ nat}}$ = peso específico del suelo en su estado natural

$\gamma_{d \max}$ = peso específico del suelo en su estado más compacto

Una arena con un valor de “N” de resistencia a la penetración estándar de 40 golpes/pie (Dr de 70 - 80%) puede mostrar evidencia de licuación en la forma de volcanes de arena pero no es probable que experimente más del 10% de deformación por corte bajo la influencia de la vibración sísmica, aun después de que se hayan desarrollado altas presiones de poros. En contraste con ello, arenas con valor de “N” de 20 golpes/pie (Dr de 30 - 60%), pueden desarrollar relaciones de presiones de poro de 100% y experimentar muy grandes deformaciones por corte del orden del 25 - 30%, bajo la acción de los esfuerzos de corte aplicados (Seed y otros, 1985).

Profundidad del Nivel Freático

Es una condición necesaria para que se produzca licuación. La presión de poros o presión intersticial, producida por el agua que ocupa los vacíos existentes entre las partículas del material debido a la posición del nivel freático, se incrementa por efecto de la vibración producida en el movimiento sísmico. Por consiguiente, la ubicación del nivel freático cuando se produzca un sismo en un depósito arenoso, será de mucha importancia porque regirá la condición de saturación y por lo tanto influirá también en el esfuerzo efectivo, el cual tendrá un valor relativamente alto en el depósito de arena cuando el nivel freático se encuentre más profundo, habiendo menos posibilidades que se produzca licuación.

2.1.2 Efectos Dañinos que Produce la Licuación

Youd (1978), propone tres tipos de falla del terreno asociados al fenómeno de licuación de suelos:

Desplazamiento Lateral

Es el tipo más común de falla del terreno por licuación de suelos. Este tipo de falla involucra el movimiento lateral de capas superficiales como resultado de la licuación y la pérdida transitoria de la resistencia de capas interiores. El desplazamiento lateral ocurre generalmente en terrenos relativamente llanos (con pendientes comprendidas entre el 0,5 y 5 %). En condiciones normales el desplazamiento lateral tiene un rango de pocos metros, y en condiciones anormales pueden ocurrir desplazamientos laterales de varios metros acompañados de grietas en el terreno y desplazamientos diferenciales verticales. Los desplazamientos laterales muy a menudo distorsionan las cimentaciones de edificios, dañan las tuberías de desagües y otras estructuras a lo largo de la zona afectada. El daño ocasionado por este tipo de falla no es siempre espectacular y raras veces catastrófico, sin embargo es muy destructor. En el terremoto de Alaska (1964) se dañaron 266 puentes hasta el punto de requerir reemplazo o gran reparación. Este tipo de falla es particularmente destructiva para las tuberías. Por ejemplo, casi todas las roturas de tuberías en la ciudad de San Francisco durante el sismo de 1906 ocurrieron en áreas de desplazamiento lateral; cuando surgieron incendios en la ciudad, no se pudo contar con agua de las tuberías para extinguir el fuego. Existen técnicas de estabilización contra fallas de desplazamiento lateral, pero son caras y sólo únicamente justificables en lugares críticos. Las técnicas de estabilización incluyen la remoción, compactación, inyección, drenaje o la utilización de contrafuertes.

Falla de Flujo

Son las fallas del terreno más catastróficas causadas por el fenómeno de licuación. Los flujos pueden movilizarse a grandes distancias (decenas de metros) a velocidades altas (decenas de Km/h). Los flujos pueden involucrar suelo completamente licuado o bloques de suelo firme viajando sobre una capa de suelo licuado. Este tipo de falla se desarrolla generalmente en arenas saturadas, sueltas, con pendiente del terreno mayor que 5%.

Muchas de las mayores y más dañinas fallas de flujo se han desarrollado bajo agua en áreas costeras. Por ejemplo las fallas de flujo submarinas que afectaron grandes secciones de los puertos de Seaward, Whittier y Valdez en Alaska. Estas fallas adicionalmente generaron grandes olas que causaron daños adicionales y pérdidas de

vidas. La falla en Valdez durante el terremoto de Alaska (1964), involucró 75 millones de m³ de sedimentos deltaicos y ocasionó la destrucción del puerto. Esta falla ocasionó desplazamientos laterales de 5 m en la población detrás del puerto, ocasionando daños adicionales. No se han desarrollado medidas prácticas para estabilizar fallas de flujo similares a las presentadas. En el caso de Valdez, se trasladó a la población a 6 Km al Noroeste, a terreno más estable.

En tierra firme, las fallas de flujo han sido más catastróficas aunque menos frecuentes que los flujos submarinos. Durante el terremoto de Kansu, China (1920) se produjeron varias fallas de flujo cuyo tamaño fue de hasta 1,6 Km de largo y ancho. Se cree que la presión del aire, en vez de la presión de poros generó dichas fallas. No existen técnicas prácticas para prevenir este tipo de falla.

Las fallas de flujo pequeñas durante los terremotos son comunes en terrenos montañosos húmedos y arenosos. Por ejemplo, en los depósitos de arena eólica de San Francisco en el sismo de 1906 y en los depósitos volcánicos de Tokachioki, Japón y Chile.

Pérdida de la Capacidad Portante

Cuando el suelo que soporta una edificación se licúa y pierde su resistencia, pueden ocurrir grandes deformaciones en el suelo, que ocasionan que la edificación se asiente, se incline o sumerja. Aunque esta es una falla espectacular, es la menos común producida por licuación. Quizás la falla por pérdida de capacidad portante más publicitada ha sido la de los edificios Kawagishi-cho durante el terremoto de Niigata, Japón (1964). Estos edificios rotaron hasta 60° y se hundieron en la arena licuada. El subsuelo en dicha zona consiste de 15 m de arena suelta ($N < 20$) suprayaciendo arenas más densas. El nivel freático se sitúa a 1m por debajo de la superficie. Aparentemente la licuación inicialmente se desarrolló en las partes media e inferior del depósito de arena suelta, después se propagó hacia la superficie debilitando el suelo de cimentación. El daño estructural de las edificaciones no fue grave.

2.1.3 Daños Ocurredos en Sismos Pasados por Efectos de Licuación

A continuación se presenta un recuento de daños sufridos en sismos pasados; debido a los efectos del fenómeno de licuación:

Sismo de Niigata en Japón, en 1964:

El sismo de Niigata del 16 de Junio de 1964 tuvo una magnitud de 7.5 en escala de Richter y ocasionó daño severo a muchas estructuras en Niigata. La destrucción se observó en aquellos edificios que fueron cimentados sobre depósitos de suelo suelto saturado. Según el reporte del terremoto, se destruyeron 2000 casas y se perdieron 28 vidas. Un tsunami provocado por movimiento en la base del mar asociado con la ruptura de la falla, destruyó totalmente el puerto de Niigata. Ver foto N° 1.



Foto N° 1 : Destrucción del puerto de Niigata, Japón (1964)

El sismo de Niigata, junto con el sismo de Alaska también en 1964, han reportado fenómenos de licuación y sus efectos devastadores han provocado la atención de ingenieros y sismólogos. Una gran falla en el terreno ocurrida cerca de la orilla del río Shinano donde los edificios de departamentos de Kawagishi – cho sufrieron fallas en la capacidad de soporte y se inclinaron severamente. A pesar de la excesiva inclinación, los edificios sufrieron poco daño estructural, ver foto N° 2. Volcanes de arena y fisuras en el terreno fueron observados en varios lugares en Niigata, ver foto N° 3. El desplazamiento lateral ocasionó un movimiento lateral en la cimentación del puente Showa, tanto que los tramos entre los apoyos fueron sacados de lugar y por lo tanto trajo consigo el colapso, ver foto N° 4.



Foto N° 2 : Los edificios de departamentos de Kawagishi – cho, sufrieron fallas en la capacidad de soporte, 1964.



Foto N° 3 : Volcanes de arena y fisuras en el terreno, fueron observados en varios lugares de Niigata, 1964.



Foto N° 4 : Colapso del puente Showa por desplazamiento lateral. Niigata, 1964.

Sismo de Alaska en U.S.A., 1964.

El área de la Costa Sur de Alaska ha experimentado muchos terremotos. El Viernes Santo, 27 de Marzo de 1964, un gran terremoto de magnitud $M_s=9.2$ golpeó Prince William Sound y causó severos daños en forma de desprendimiento de tierra y licuación, como se observa en la foto N° 5. Este evento sísmico duró 3 minutos aproximadamente y fue sentido en un área de 500 000 millas cuadradas. Un fuerte tsunami aumentó la cantidad de daño en el muelle, ocasionó muertes durante cinco horas después del sismo en la Ciudad Creciente, California.



Foto N° 5 : El Viernes Santo , 27 de Marzo de 1964, un gran terremoto de magnitud $M_s=9.2$ golpeó Prince William Sound y causó severos daños en forma de desprendimiento de tierra y licuación

Sismo de Loma Prieta en U.S.A. (1989)

El sismo del 17 de Octubre de 1989 en Loma Prieta ($M_s=7.1$) ocasionó severos daños no sólo en la vecindad del epicentro cerca de Santa Cruz, sino también en áreas más distantes hacia el Norte, alrededor de San Francisco y Oakland.

La licuación de suelo ocasionó daño importante en las instalaciones marnas, estructuras y líneas de tuberías enterradas ubicadas en el área de la Bahía donde los suelos arenosos, sueltos, saturados fueron susceptibles a la licuación. Los numerosos volcanes de arena, ver fotos N° 6 y N° 7, que fueron observados eran la evidencia de la ocurrencia de licuación.

La licuación se observó en varios lugares, incluyendo el aeropuerto de Oakland, las zonas que se encuentran a lo largo del río Salinas y la estación de aterrizaje marítima Moss.



Foto N° 6 y N° 7 : Numerosos volcanes de arena fueron observados en varios lugares como evidencia de la ocurrencia de licuación como el aeropuerto de Oakland, en las zonas que se encuentran a lo largo del río Salinas y la estación de aterrizaje marítima Moss.

Sismo de KOBE en Japón (1995)

El sismo Grande de Hanshin de 1995 ($M_s=6.9$), que comúnmente se le llama terremoto de Kobe, fue uno de los más devastadores sismos que golpearon a Japón dejando más de 5,500 muertos y otros 26,000 heridos. La pérdida económica se ha estimado cerca de 200 billones de dólares. La proximidad del epicentro a la región altamente poblada, ayudan a explicar la gran pérdida de vidas y el alto nivel de destrucción. El colapso espectacular de la autopista Hanshin, ver foto N° 8; ilustra los efectos de las altas cargas inducidas por el terremoto. Los movimientos fuertes del terreno condujeron al colapso de la autopista Hanshin, así mismo la licuación ocasionó

daño severo al puerto de la ciudad, tal como se puede observar en las fotos N° 9, 10 y 11.



Foto N° 8



Foto N° 9



Foto N° 10



Foto N° 11

Sismo en Chimbote, Perú (1970)

A las 3:23 p.m.(hora local) del 31 de Mayo de 1970 ocurrió un terremoto con magnitud $M_s=7.8$ y profundidad focal de 45 Km, con epicentro aproximadamente a 50 Km de la costa del Perú, al Oeste de la ciudad de Chimbote. El sismo activó un acelerógrafo en Lima, cuya aceleración máxima corregida fue de 0.11g. En Chimbote no se registraron aceleraciones; sin embargo la máxima intensidad del sismo se calculó en grado IX en la escala de intensidades Mercalli Modificada.

Ericksen et al., (1970) y Plafker et al., (1971) indicaron que en Casma, Puerto Casma y en zonas cercanas al litoral de Chimbote, se produjo desplazamiento lateral del terreno causado por licuación de depósitos deltaicos y de playa, ocasionando grietas en el terreno que derrumbaron las estructuras que las cruzaron. La zona central de Chimbote fue evidentemente un área de licuación de suelos, así como de compactación diferencial de la cimentación.

Carrillo (1970), indicó descensos en los terraplenes de acceso de casi todos los puentes de la Carretera Panamericana y asentamientos en las plataformas del Terminal Marítimo de Chimbote. También presentó evidencias del fenómeno de licuación en los depósitos de arenas saturadas de la calle Elías Aguirre, en Chimbote.

Morimoto et al., (1971), describieron la ocurrencia de licuación de suelos y prepararon un mapa de distribución de grietas en el terreno y volcanes de arena en Chimbote. En la zona pantanosa se produjo licuación generalizada, con grietas debido a compactación diferencial; y en la zona aluvial, licuación subsuperficial con grietas y volcanes de arena. En las fotos N° 12,13, 14 y 15 se ilustran algunos de los daños ocurridos en Chimbote debido a los efectos de licuación.



Foto N° 12: Volcanes de arena con grietas **Foto N° 13 :** Resquebrajamiento del terreno abiertas en la llanura aluvial del Río en llanura aluvial del Río Lacramarca. Lacramarca.

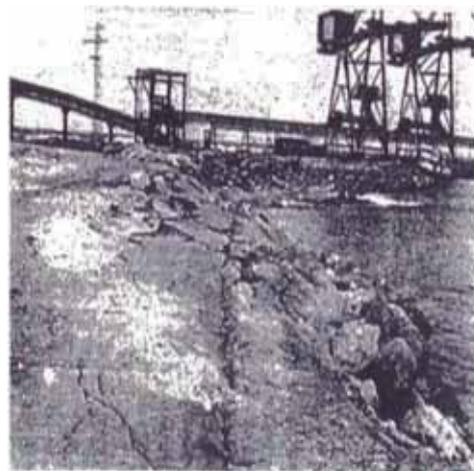


Foto N° 14 : Agrietamiento del terreno en la llanura aluvial del Río Lacramarca. **Foto N° 15:** Daño en el Puerto de Chimbote. Derrumbe del camino pavimentado.

2.2 DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DE LICUACIÓN

Para comprender el fenómeno de licuación es importante reconocer las condiciones que existen en un depósito de suelo antes de un sismo. Un depósito de suelo consiste de un grupo de partículas individuales de suelo. Si nosotros observamos cercanamente a estas partículas, ver figura N° 1.1 y 1.2, podemos observar que cada partícula está en contacto con un número de partículas vecinas. Las partículas de suelo apoyadas producen fuerzas de contacto entre ellas, estas fuerzas son las que mantienen en su lugar a las partículas individuales y dan al suelo su resistencia.



Figura N° 1.1 :Representación de partículas en un depósito de suelo. La altura de la columna en azul a la derecha representa el nivel de la presión de agua de poros en el suelo.

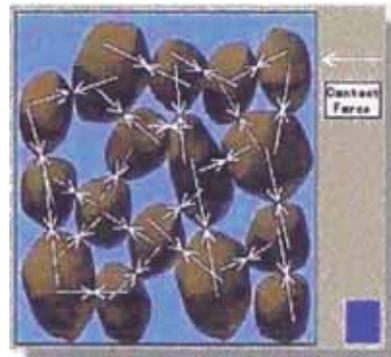


Figura N° 1.2 : La longitud de las flechas representa el tamaño de las fuerzas de contacto entre las partículas individuales del suelo. Las fuerzas de contacto son grandes cuando la presión de agua de poros es baja.

La licuación ocurre cuando la estructura de una arena suelta saturada se altera deteriorándose debido a la aplicación de una carga violenta. Al deteriorarse la estructura, las partículas que se encuentran empaquetadas comienzan a moverse libremente con la finalidad de conformar una estructura más densa. En un sismo, sin embargo, no hay tiempo suficiente para que el agua contenida en los poros del suelo sea expulsada. Esto está acompañado de un incremento en la presión de agua la cual reduce la fuerza de contacto entre las partículas individuales del suelo, tanto que el depósito de suelo comienza a ablandarse y a ser poco resistente.

En la figura N° 1.2.c, se observa como las fuerzas de contacto son pequeñas debido a las altas presiones de agua. En un caso extremo, la presión de agua de poros puede llegar a ser tan alta que muchas partículas de suelo pierden contacto una con la otra, en

tales casos, el suelo tendrá muy poca resistencia, y se comportará más como un líquido que como un sólido.



Figura N° 1.2.c : Las fuerzas de contacto pequeñas son debido a las altas presiones de agua.

La licuación es un fenómeno en el cual la resistencia y rigidez de un suelo son reducidas por vibración sísmica u otra carga de aplicación violenta. La licuación y otros fenómenos relacionados han sido responsables de la gran cantidad de daños durante la historia sísmica alrededor de todo el mundo.

La licuación ocurre en suelos saturados, esto es, suelos en los cuales el espacio entre las partículas individuales está completamente lleno de agua. Antes de un terremoto, la presión de agua es relativamente baja. Sin embargo, la sacudida del sismo puede ocasionar el incremento de la presión de poros hasta el punto donde las partículas del suelo puedan moverse fácilmente una respecto a la otra. El sacudimiento sísmico frecuentemente ocasiona el incremento de la presión de agua, pero actividades relacionadas con la construcción, tales como las voladuras, pueden también ocasionar el incremento de la presión de agua.

Cuando ocurre la licuación, la resistencia del suelo decrece y es reducida la capacidad del depósito para soportar las cimentaciones de edificios y puentes.

El suelo licuado también ejerce alta presión sobre muros de contención y destruye estructuras en la superficie del terreno. El incremento de la presión de agua puede también causar deslizamiento del terreno y causar el colapso en presas. La presa de San Fernando sufrió un deslizamiento durante el terremoto de San Fernando en 1971, ver foto N° 16. Afortunadamente no se produjo el colapso, con lo cual se previno un

desastre potencial por inundación de las grandes áreas pobladas aguas debajo de la presa.



Foto N° 16 : Deslizamiento en la presa de San Fernando, sismo de 1971.

2.2.1 Flujo por Licuación

El término de licuación realmente se ha usado para describir una cantidad de fenómenos relacionados, los cuales pueden dividirse en dos principales categorías: Flujo por licuación y Movilidad cíclica.

El flujo por licuación es un fenómeno en el cual el equilibrio estático es destruido por cargas estáticas o dinámicas en un depósito de suelo con baja resistencia residual. La resistencia residual es la resistencia que posee el suelo después de haber licuado. Cargas estáticas, por ejemplo, pueden estar aplicadas por nuevos edificios sobre una ladera en pendiente que ejerce fuerzas adicionales en el suelo por debajo de la cimentación. Los sismos, voladuras, y el hincado de pilotes son ejemplos de cargas dinámicas que pueden producir flujo por licuación.

Una analogía puede verse en la foto N° 17, donde la estabilidad estática de un saltador de esquí al comienzo se perturba cuando el saltador empuja sobre sí mismo desde el lugar de inicio. Después de esta perturbación relativamente pequeña, se transmite una fuerza estática originada por gravedad, siendo mayor que la fuerza resistente a la fricción entre el esquí y la nieve, ocasionando que el esquiador acelere bajo la rampa.



Foto N° 17 : Analogía entre un saltador de esquí y el flujo por licuación.

La forma como el saltador de esquí llega al estado inestable es análoga a la perturbación estática o dinámica que provoca el flujo por licuación; en ambos casos, una perturbación relativamente pequeña procede a una inestabilidad originada por gravedad, la cual produce grandes y rápidos movimientos.

Las fallas debido al flujo por licuación son comúnmente caracterizados por grandes y rápidos movimientos los cuales pueden producir efectos desastrosos, como los experimentados por los edificios de departamentos de Kawagishi – cho, los cuales sufrieron una gran falla en la capacidad de soporte durante el terremoto de Niigata en 1964, ver foto N° 2.

El desprendimiento de tierra del “Turnagain Heights“, en el terremoto de Alaska de 1964, el cual fue provocado por la licuación de lentes de arenas en un área deslizada de 52,6 Ha, es ejemplo de flujo por licuación, como se ilustra en la foto N° 5. La presa Sheffield sufrió una falla por flujo provocado por el sismo de Santa Barbara en 1925, (ver foto N° 18). Una sección de 90 m (de los 220 m de longitud de la presa) se desplazó más de 30 m. La presa consistía principalmente de arenas limosas y limos arenosos compactados sobre el relleno (Seed, 1968).



Foto N° 18 : Falla de la presa Sheffield durante el terremoto de Santa Barbara en 1925.

Como estos casos históricos de falla por flujo, se pueden involucrar el flujo de volúmenes considerables de material que experimentan grandes movimientos, los que son producidos por esfuerzos de corte estáticos. Para provocar flujo por licuación sólo se necesita en algunos casos una perturbación muy pequeña.

2.2.2 Movilidad Cíclica

La Movilidad Cíclica es un fenómeno de licuación provocado por una carga cíclica, ocurre en depósitos de suelo con esfuerzos de corte estáticos menores que la resistencia del suelo. Las deformaciones debido a la movilidad cíclica se incrementan porque los esfuerzos estáticos y dinámicos subsisten durante un terremoto. El desplazamiento lateral, es un resultado común de la movilidad cíclica, puede ocurrir sobre terrenos suavemente inclinados y en terrenos llanos cercados por ríos y lagunas. El sismo de Guatemala en 1976 ocasionó un desplazamiento lateral a lo largo del río de Motagua.

Sobre el nivel del terreno, debido a la alta presión de agua de poros ocasionada por licuación, puede ser que el agua de poros fluya rápidamente a la superficie. Este flujo puede ocurrir durante la ocurrencia del sismo como también después de éste. Si el flujo de agua de poros asciende lo suficientemente rápido, puede llevar partículas de arena hasta la superficie donde se depositan formando volcanes de arena o ebulliciones de arena. Estos aspectos pueden observarse frecuentemente en lugares que han sido afectados por licuación, como el ilustrado en la foto N° 19.



Foto N° 19 : Volcán de arena en el campo, a lo largo de Hwy 98 durante el terremoto de El Centro en 1979.

2.3 IDENTIFICACIÓN DE SUELOS SUSCEPTIBLES A LICUACIÓN

Los suelos susceptibles a licuar son aquellos en los que los contactos entre los granos son comparativamente escasos, lo que propicia que se pierdan casi totalmente durante el flujo propiamente dicho. Consecuentemente, el fenómeno de licuación afecta a los suelos sedimentarios naturales o a los depósitos artificiales, que son los que presentan aquel tipo de estructura; en efecto, el tamaño de los granos, su uniformidad y la baja velocidad de sedimentación en aguas tranquilas, son factores que se conjugan para formar estructuras muy sueltas.

Los suelos arenosos son potencialmente licuables, mientras que suelos limosos o arcillosos no lo son. Para ser más específicos, diversos estudios han sido desarrollados por Ishihara, Sodekawa y Tanaka (1978), para esclarecer la posibilidad de ocurrencia de licuación en arenas limosas o limos arenosos en términos de su contenido de finos. Sin embargo, la información acerca de las características granulométricas no siempre está disponible para permitir la clasificación de los suelos sobre esta base. De ser éste el caso, la clasificación de suelos potencialmente licuables o no licuables debe hacerse sobre la base de los nombres de los suelos observados en cada registro de sondaje en particular (Ishihara,1978). La designación del tipo de suelo para la identificación se muestra en la tabla N° 1.1.

Tabla N° 1.1: Clasificación de suelos licuables y no licuables según la denominación.

	Tipo de Suelo
Suelos licuables	Arena, arena fina, arena media, arena limosa, arena con parte de arcilla, arena con conchuelas fracturadas, arena con plantas descompuestas, arena con parte de grava.
Suelos no licuables	Suelo superficial, relleno superficial, arcilla, limo, lodo, suelo descompuesto, grava.

2.4 CRITERIOS PARA PREVENIR Y REDUCIR LOS DAÑOS POR LICUACIÓN

Criterio Histórico

Las observaciones de los terremotos más recientes proporcionan mucha información sobre la susceptibilidad de licuación en ciertos tipos de terrenos. Terrenos que han licuado pueden licuar nuevamente en futuros terremotos. Si se deseara construir una obra de ingeniería, se debe de averiguar si el lugar es susceptible a la licuación; investigando terremotos anteriores, y ver si ellos causaron licuación en dicho lugar. La información también puede estar disponible en forma de mapas de áreas donde la licuación ha ocurrido en el pasado y/o se espera que ocurra en el futuro.

Criterio Geológico

El tipo de proceso geológico que ha creado un depósito de suelo tiene una gran influencia en su susceptibilidad a la licuación. Depósitos de suelos saturados que han sido creados por sedimentación en ríos y lagos (depósitos fluvial o aluvial), deposición de escombros o material corroído (depósito coluvial), o los depósitos formados por la acción del viento (depósito eólico) pueden ser muy susceptibles a sufrir licuación. Estos procesos clasifican a las partículas dentro de los tamaños de grano uniforme y los deposita en estado suelto los cuales tienden a densificarse por vibración sísmica. La tendencia a densificar conduce al incremento de la presión de agua de poros y a la reducción de la resistencia. Los depósitos de terreno artificiales, particularmente aquellos creados por el proceso de relleno hidráulico, también pueden ser susceptibles a la licuación.

Criterio Composicional

La susceptibilidad de licuación depende del tipo de suelo. Terrenos arcillosos pueden exhibir similar comportamiento que los suelos licuables, pero no licúan de la misma forma que los suelos arenosos.

Suelos compuestos de partículas que son todas del mismo tamaño son más susceptibles a la licuación que los suelos con una gama amplia de tamaños de partículas. En un suelo con diferentes tamaños de partículas, las partículas pequeñas tienden a rellenar los vacíos generados entre las partículas más grandes por esto se

reduce la tendencia a la densificación y al desarrollo de la presión de agua de poros cuando exista vibración.

Los procesos geológicos descritos anteriormente producen partículas redondeadas. La fricción entre partículas angulares es mayor que entre partículas redondeadas, un depósito de suelo con partículas angulares es normalmente más resistente y menos susceptible a la licuación. Históricamente se consideraba que las arenas eran el único tipo de suelo susceptible a licuación, pero también se ha observado licuación en gravas y limos. Suelos de granos finos son susceptibles a este tipo de comportamiento si es que satisfacen el criterio de Wang (1979), mostrado en las siguientes condiciones:

- % Finos (0,005 mm) \leq 15%
- Límite Líquido (LL): $LL \leq 35\%$
- Contenido de Humedad Natural = 0,9 LL

Criterio de Estado

El “estado” inicial de un suelo es definido por su densidad y esfuerzo efectivo en el momento que está sujeto a la carga rápida. En un nivel de esfuerzo efectivo dado, los suelos más sueltos son más susceptibles a la licuación que los suelos densos. Para una densidad dada, suelos con alto esfuerzo efectivo son generalmente más susceptibles a licuación que los suelos con bajo esfuerzo efectivo. Existen factores que se pueden incorporar en el estado del depósito de suelo que son de importancia a la susceptibilidad a la licuación. A una presión de confinamiento constante, la resistencia a la licuación aumenta con la densidad relativa, D_r , y a densidad relativa constante, la resistencia a la licuación se incrementa con el aumento de la presión de confinamiento. Varias investigaciones (Castro, 1969; Kramer y Seed, 1988) han demostrado que pre-existiendo esfuerzo de corte estático en un depósito de suelo es crítico para la susceptibilidad de licuación estática del suelo. Si el esfuerzo de corte inicial es alto, grande será el potencial de licuación y pequeña la perturbación necesaria para que el suelo licúe.

CAPÍTULO 3

MÉTODOS EMPLEADOS PARA EVALUAR LA LICUACIÓN DE SUELOS

3.1 GRADOS DE EVALUACIÓN DE LICUACIÓN

En terremotos pasados, la licuación de suelos ha sido la mayor causa que origina daño tanto en la estructura del suelo como en las construcciones que sobre éste se han edificado, de tal forma que para futuros terremotos es una amenaza potencial para la integridad de estructuras e instalaciones ubicadas sobre el área propensa a sufrir licuación. En este caso la evaluación del potencial de licuación del terreno es una de las importantes consideraciones para conducir trabajos de microzonificación sísmica. Hablaremos de tres grados de evaluación del potencial de licuación para microzonificación, los cuales se presentan de acuerdo al incremento de sofisticación en la precisión del procedimiento y a sus resultados.

Para evaluar el potencial de licuación, la clasificación geomorfológica del terreno se realiza comúnmente como un prerrequisito previo porque existen datos básicos de fácil disponibilidad.

3.1.1 Grado 1

Es el nivel más rápido de zonificación, es de bajo costo; podría estar basado en la inspección e interpretación de la información existente que es rápidamente aprovechable, tales como la publicación de reportes y otros datos recopilados.

3.1.1.1 Evaluación de la mayor área susceptible a Licuación

Criterio “Magnitud – Máxima Distancia”

Si las actividades sísmicas de un área son conocidas por datos históricos, la máxima de área susceptible a licuación puede ser estimada por la magnitud del terremoto en la escala de Richter. Varias investigaciones han analizado distribuciones de la ocurrencia de

licuación durante terremotos pasados, uno de ellos es el ploteo de la distancia desde el epicentro hasta la mayor distancia licuada, R , en función de la magnitud del sismo. Kuribayashi y Tatsuoka (1975), basándose en 44 terremotos históricos de Japón, llegaron a obtener la siguiente expresión:

$$\text{Log } R = 0.77 \times M - 3.6$$

Youd (1977), Davis y Berrill (1983; 1984) y Seed et al.,(1984) añadieron varios datos, para terremotos de otras partes del mundo. Wakamatsu (1991) contribuyó a complementarlo con otros datos de 67 terremotos japoneses ocurridos en un lapso de 106 años incluyendo los 44 terremotos estudiados por Kuribayashi y Tatsuoka. La figura 3.1 muestra el gráfico de la máxima distancia que ha sufrido licuación desde el epicentro como una función de la magnitud del sismo M en la escala de Richter para 67 datos japoneses y 25 no japoneses, obteniéndose la siguiente expresión:

$$\text{Log } R = 2.22 \log (4.22 M - 19.0)$$

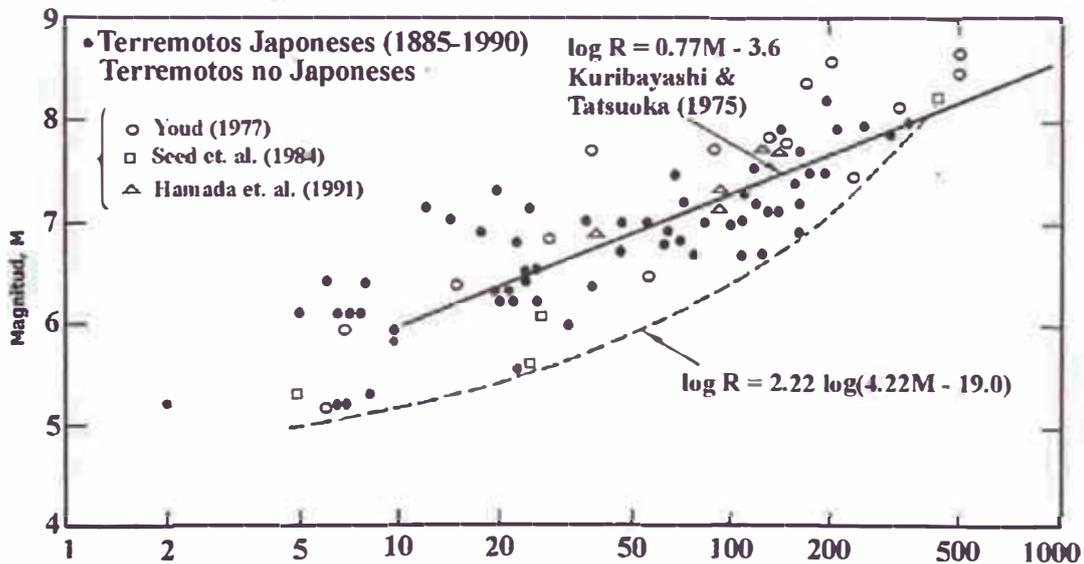


Figura 3.1 : Distancia epicentral hasta el lugar licuado más lejano

Basado en esta relación, la mayor área susceptible a licuación puede ser estimada para una magnitud de sismo dado. Aunque la distancia epicentral, R , puede generalmente ser deducida en forma más precisa que R_f , que es la distancia desde la fuente de energía

sísmica. La última distancia es más adecuada para sismos de gran magnitud. Para definir el límite fuente-distancia, Youd y Perkins (1978) graficaron la distancia horizontal desde la fuente de energía sísmica a la más lejana ubicación con significativos efectos de licuación, la cual es definida como el lugar de mayor daño con un desplazamiento del orden de 100 mm ó más (ver figura 2.2). La fuente de energía sísmica fue definida como la proyección superficial de la falla por rotura causada por el desplazamiento horizontal y fallas normales, y por levantamiento de la zona tectónica de la corteza causada por las fallas de tracción. El epicentro se aproxima normalmente a la proyección superficial de la fuente de energía para los eventos de magnitudes más bajas ($M < 5.5$).

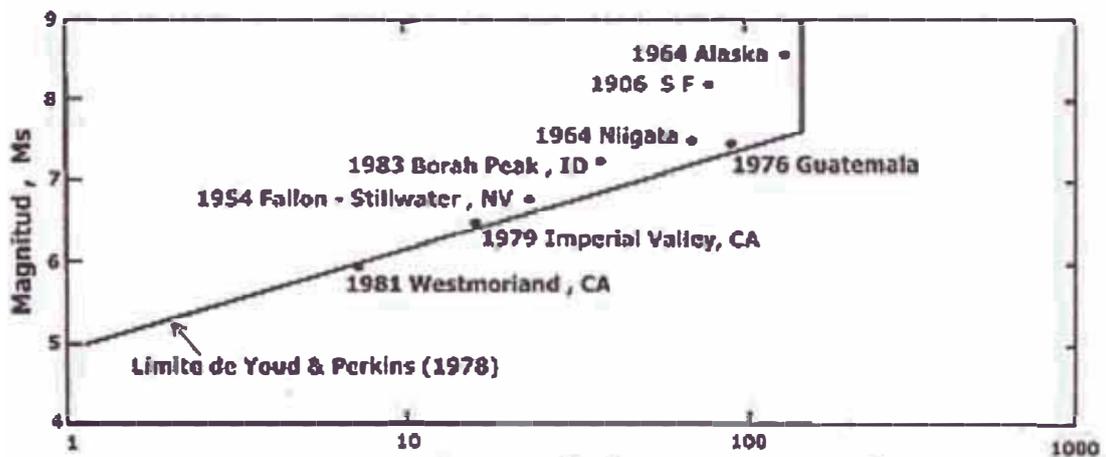


Figura 3.2 : Distancia desde la fuente de energía sísmica hasta el lugar más lejano con efectos de licuación significantes, en Km.

Criterio de “Intensidad”

Basándose en la información de la intensidad sísmica, Kuribayashi y Tatsuoka (1975) y Wakamatsu (1991) examinaron lugares donde había ocurrido licuación y demostraron que la licuación ha sido generalmente inducida por vibraciones sísmicas con una intensidad mayor que 5 en términos de la Escala de la Agencia Meteorológica del Japón (JMA), o mayor que 8 en términos de la escala de Mercalli Modificada (MM); la correlación de estas escalas se muestra en la figura 3.3

MERCALI MODIFICADO	ROSSI FOREL	JMA	MERCALI CANCANI SIEBERG	MEDVEDEV SPONHEUER KARKK
I	I		II	I
II	II		III	II
III	III	I	IV	III
IV	IV	II	V	IV
V	V	III	VI	V
VI	VI	IV	VII	VI
VII	VII		VIII	VII
VIII	VIII	V	IX	VIII
IX	IX		X	IX
X		VI	XI	X
XI	X		XII	XI
XII		VII		XII

Figura 3.3 : Escalas de intensidades sísmicas y su equivalencia (Reiter, 1990)

3.1.1.2 Susceptibilidad de Licuación basado en Información existente

Criterio Geológico y Geomorfológico

Kuribayashi y Tatsuoka (1975), Youd (1984), Yasuda y Thono (1988), Wakamatsu (1991), han indicado que la licuación es probable que ocurra varias veces en el mismo sitio. Por esto, los lugares que figuran en los mapas que hayan sufrido procesos de licuación en el pasado pueden ser consideradas como posibles áreas redundantes susceptibles al fenómeno de licuación para futuros terremotos. Si se estableciera cierta correlación entre los daños sufridos en licuaciones pasadas y las diferentes unidades geológicas y geomorfológicas presentadas, el área susceptible a licuación puede deducirse por medio de esta correlación. Tal intento ha sido realizado por Iwasaki, quien examinó terremotos japoneses de varias décadas y ha desarrollado este criterio, el que se muestra en la tabla 3.1. La figura 3.4 es un ejemplo de mapeo basado en esta correlación. El Instituto de Investigación de Obras Públicas del Japón ha recopilado mapas del potencial de licuación que usan el criterio mostrado en la tabla 3.1.

Tabla 3.1
Criterio para establecer el Potencial de Licuación

GRADO	TOPOGRAFIA	POTENCIAL DE LICUACIÓN
A	Lecho de ríos actuales, lecho de ríos antiguos, pantanos, terreno recuperado	Probable Licuación
B	Deltas, dique natural, dunas de arena, zona de inundación, playa otras llanuras	Posible Licuación
C	Terraza, colina, montaña.	No es Probable la licuación.



Figura 3.4 : Mapa de Microzonificación del Potencial de Licuación estimada a partir de la información geológica y geomorfológica (Iwasaki et al.,1982)

El Índice de Severidad de Licuación (LSI)

La evaluación de los efectos de licuación en los terremotos pasados han mostrado que tanto la severidad del daño como la abundancia de los efectos devastadores, rápidamente disminuyen con la distancia creciente desde la fuente de energía sísmica. Para cuantificar y analizar la atenuación de severidad de efectos de licuación, Youd y Perkins (1987) han introducido el concepto de Índice de Severidad de Licuación (LSI), donde LSI se define como el máximo desplazamiento por expansiones laterales del terreno licuable, suavemente inclinado, como depósitos fluviales y deltaicos del Holoceno tardío.

El LSI es calculado dividiendo por 25 los máximos desplazamientos horizontales por expansiones laterales medidos en milímetros. Youd y Perkins (1987) graficaron LSI versus la distancia horizontal desde la fuente de energía del sismo para varios terremotos de U.S.A. occidental y analizaron estadísticamente los datos para definir límites y desarrollar una ecuación de regresión para los datos mostrados en la figura 3.5. Esos límites pueden usarse como funciones de atenuación de LSI, y necesariamente en los modelos analíticos de riesgo para generar mapas de probabilidad de LSI esperado.

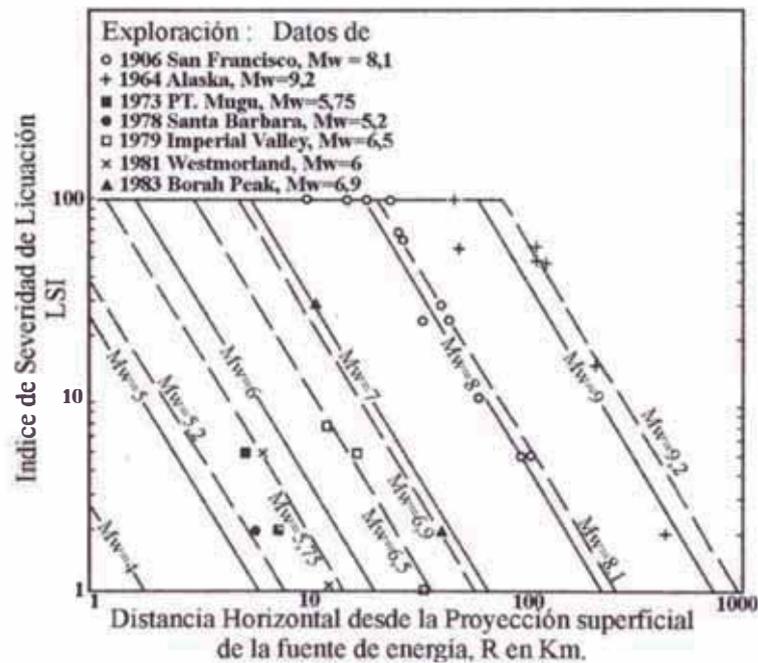


Figura 3.5 : Índice de Severidad de Licuación (LSI), curvas para los Estados Unidos vs la distancia desde la fuente de energía sísmica, (Youd y Perkins, 1987).

3.1.2 Grado 2

El nivel de confiabilidad de los mapas desarrollados en el grado 1 podría mejorarse apreciablemente a un costo moderado mediante la recopilación de información y de datos adicionales. A causa de la carencia de unicidad en la relación del criterio geológico en las propiedades geotécnicas, los mapas de susceptibilidad basados en criterios geológicos generalmente no proporcionan información definitiva para evaluaciones específicas del lugar. Es por eso que investigaciones adicionales se requieren para tales evaluaciones.

Estas investigaciones incluyen:

- (1) interpretación de fotografías aéreas para definir las unidades geomorfológicas y geológicas detalladas,
- (2) estudio del área para clasificar unidades pertinentes a la susceptibilidad de licuación,
- (3) análisis de fotografías aéreas tomadas inmediatamente después de sucesos importantes de inundación para delinear zonas de acumulación de sedimentos e inundación, y
- (4) entrevista a residentes locales para desarrollar mejor información histórica sobre ocurrencias de licuación durante sismos pasados.

Criterio Geológico para la Evaluación del Potencial de Licuación

Las tablas 3.2 y 3.3 muestran ejemplos de mapas de licuación por configuraciones geológicas y geomorfológicas para identificar áreas con alta potencialidad de licuación. Estos criterios indican que los sedimentos generalmente ganan resistencia a la licuación conforme se incrementa su edad y que los procesos fluviales y eólicos ayudan a esto, y los suelos granulares sedimentarios en estado relativamente suelto, generando por eso condiciones de alta susceptibilidad de licuación (Youd, 1991). Estos factores geológicos y geomorfológicos directamente o indirectamente influyen en las propiedades geotécnicas que controlan la susceptibilidad de licuación del sedimento natural; tales como la densidad relativa, distribución del tamaño del grano, grado de saturación y grado de cementación. Por esto, de esta asociación general entre los factores geológicos y propiedades geotécnicas, los criterios geológicos son generalmente confiables pero no son los únicos que predicen la susceptibilidad de licuación (Youd, 1991). Así la mejor manera para evaluar la susceptibilidad de licuación es hacer uso de la correlación específica del lugar entre ocurrencias pasadas de licuación y configuraciones geológicas y/o geomorfológicas.

Considerando mapas detallados de distribución de lugares con licuaciones pasadas deberían ser recopilados principalmente por entrevistas a los residentes locales y

recolección de documentos locales sobre daños de terremotos. A partir de estos mapas, la distribución de lugares de licuación se correlacionan con unidades geomorfológicas para desarrollar un mapa de susceptibilidad para el área. Éstos, localmente desarrollaron relaciones geológicas y geomorfológicas, son muy efectivos para evaluar la susceptibilidad de licuación en el área.

Tabla 3.2 : Susceptibilidad Estimada de Licuacion para depósitos Sedimentarios durante movimientos fuertes. (Youd Y Perkins, 1978)

Tipo de Depósito	Distribución General de suelos no cohesivos en depósitos	Probabilidad que los Sedimentos no Cohesivos Saturados, podrían ser susceptibles a la Licuación (por la edad del depósito)			
		< 500 años	Holoceno	Pleistoceno	Pre Pleistoceno
(a) Depósitos Continentales					
Cauce de Río	Localmente variable	Muy alto	Alto	Bajo	Muy Bajo
Llanura de inundación	Localmente variable	Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo
Abanico y Llanura Aluvial	Extenso	Moderado	Bajo	Bajo	Muy Bajo
Terrazas Marinas y llanuras	Extenso	---	Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo
Delta y abanico deltaico	Extenso	Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo
Lacustre y playa	Variable	Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo
Coluvial	Variable	Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo
Talud detrítico	Extenso	Bajo	Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo
Dunas	Extenso	Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo
Loes	Variable	Alto	Alto	Alto	Desconocido
Morena Glacial	Variable	Bajo	Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo
Tufo	Raro	Bajo	Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo
Tefra	Extenso	Alto	Alto	?	?
Suelos Residuales	Raro	Bajo	Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo
Sebka	Localmente variable	Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo
(b) Zona Costera					
Delta	Extenso	Muy alto	Alto	Bajo	Muy Bajo
Estuarino	Localmente variable	Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo
Playa Ola grande	Extenso	Moderado	Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo
Playa Ola chica	Extenso	Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo
Lagunar	Localmente variable	Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo
Costa	Localmente variable	Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo
(c) Artificial					
Relleno no compactado	Variable	Muy alto	----	----	---
Relleno compactado	Variable	Bajo	----	----	---

Tabla 3.3 : Susceptibilidad Estimada de Licuación de Unidades Geomorfológicas sujetas a Movimientos del terreno con Intensidad 5 (JMA) o 8 (MM)

Condiciones Geomorfológicas		Potencial de Licuación
Clasificación	Condiciones Específicas	
Llanura del Valle	compuesto de gravas o cantos rodados	No es probable
	compuesto de suelos arenosos	Posible
Abanico Aluvial	gradiente vertical es mayor que 0,5%	No es probable
	gradiente vertical es menor que 0,5%	Posible
Dique Natural	en la parte superior	Posible
	a orillas	Probable
Pantano		Posible
Cauce de río abandonado		Probable
Laguna antigua		Probable
Lecho de río seco	conformado por gravas	No es probable
	conformado por suelo arenoso	Probable
Delta		Posible
Banco	de arena	Posible
	de grava	No es probable
Duna de arena	Parte superior de la duna	No es probable
	Ladera baja de la duna	Probable
Playa	Playa	No es probable
	Playa artificial	Probable
Terreno bajo de Diques		Probable
Terreno ganado por drenaje		Posible
Terreno ganado por relleno		Probable
Muelle		Probable
Relleno	Relleno en la zona límite entre las dunas de arena y la hondonada	Probable
	Relleno colindante a un precipicio	Probable
	Relleno en pantano	Probable
	Relleno en terreno ganado por drenaje	Probable
	Otro tipo de relleno	Posible

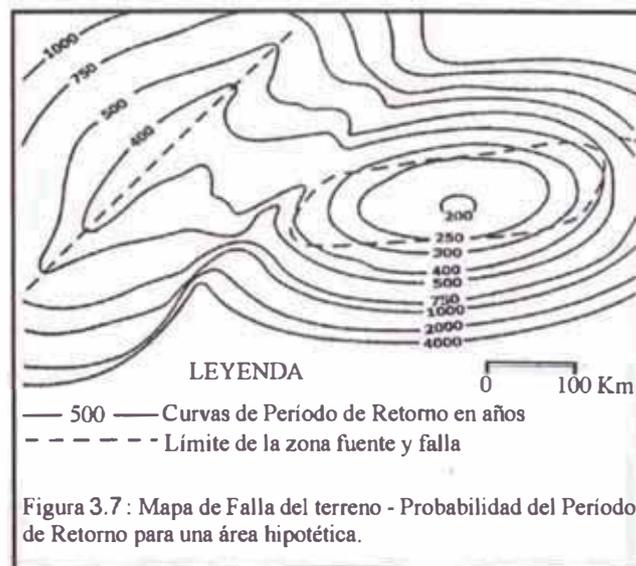
3.1.2.1 Ejemplo de Estimación del Potencial de Licuación basados en Investigaciones Geológicas o Geomorfológicas sobre lugares específicos

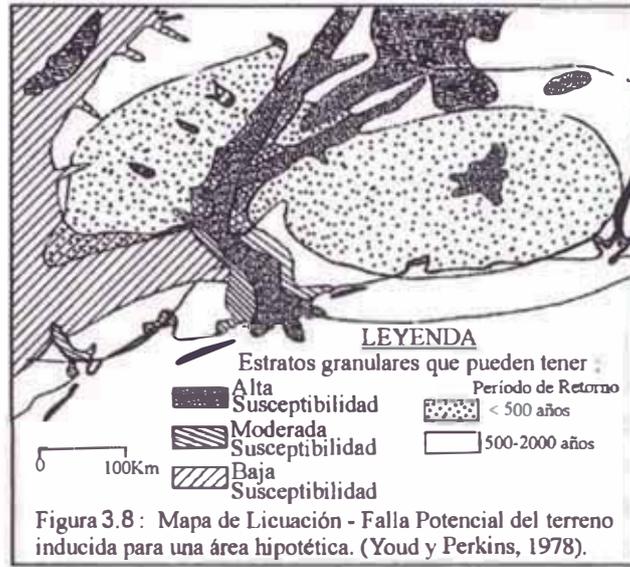
Mapas de Youd y Pekins (1987)

Un mapa del potencial de falla del terreno inducida por licuación fue realizado por Youd y Pekins (1987) para un área hipotética como se muestra en la figura 3.8. El procedimiento usado para desarrollar el mapa requiere la recopilación de 2 mapas, un mapa de susceptibilidad de licuación como se muestra en la figura 3.6 y un mapa de probabilidad de licuación como se muestra en la figura 3.7. El mapa de susceptibilidad de licuación se realiza en base al mapa geológico en referencia a la tabla 3.2 y se delinea el

área donde es probable que existan materiales licuables. El mapa de probabilidad se realiza en base a intervalos de recurrencia de vibraciones sísmicas intensas, lo suficiente para generar licuación en esa área. Estos mapas son luego superpuestos para construir un mapa del Potencial de Licuación mostrado en la figura 3.8.

Usando estas técnicas, los mapas de susceptibilidad de licuación han sido preparados y publicados para la ciudad de Santa Cruz (Dupré, 1975) , Monterrey Norte y la ciudad de Sur de Santa Cruz (Dupré y Tinsley, 1980) y para Monterrey (Dupré 1990) en una escala de 1:24,000 o 1:62,500.





Mapas de Kotoda

Técnicas basadas en la geomorfología y la historia han sido usadas por Kotoda et Al. (1988) para definir unidades susceptibles para tres áreas ubicadas en regiones de alto riesgo sísmico en el Japón. Las descripciones de los efectos de licuación generados a partir de reportes de daños por terremotos pasados fueron recolectados, y se recopilaron mapas detallados mostrando las localidades con ocurrencia histórica de licuación.

Algunas veces, los mapas geomorfológicos de clasificación del terreno fueron desarrollados en escala de 1:25,000 o 1:50,000, sobre la base del análisis de fotografías aéreas, datos de perforación y estudios de campo. Durante la clasificación geomorfológica se toman en cuenta los siguientes detalles para estimar la correlación del potencial de licuación y las unidades geomorfológicas y propiedades geotécnicas: la identificación de cauces de ríos anteriores, fecha aproximada, materiales y método de recuperación; y condiciones de aguas subterráneas. Luego, algunas correlaciones entre la ocurrencia de licuación, configuración geomorfológica e intensidad sísmica fueron examinados para definir la susceptibilidad de licuación para cada unidad geomorfológica del área considerada. Usando estos procedimientos, los mapas de susceptibilidad de licuación se recopilaron y publicaron para el Shonai Plain, Prefectura de Yamagata, Japón (Oya et al., 1982) y Kise River Basin, Prefectura de Shizuoka, Japón (Oya et al., 1985) a escala de 1:50,000 y 1:25,000, respectivamente (ver figura 3.9).

3.1.3 GRADO 3

Combinando las medidas geotécnicas con los métodos descritos en los grados 1 y 2, una alta precisión y nivel detallado de zonificación podría ser realizado para cada unidad geológica y geomorfológica. Estas zonificaciones requieren investigaciones específicas adicionales tales como sondajes y muestras de suelos para análisis de la resistencia de licuación asistido por computadora. Tales análisis son usualmente ejecutados sobre un área específica, las pruebas realizadas o los análisis hechos son muy confiables si son suficientes los pozos perforados para los mapas de zonificación. Los reportes de Ingeniería Geotécnica podrían ser coleccionadas por las agencias gubernamentales y compañías privadas para proveer datos de pruebas de laboratorio y campo; para desarrollar mapas más detallados.

3.1.3.1 Evaluación de la Susceptibilidad de Licuación basado en Datos Geotécnicos

El análisis para evaluar el potencial de licuación podrían realizarse basados en procedimientos simplificados desarrollados por Seed e Idriss (1971), Seed et al., (1985), Iwasaki et al., (1978), Tokimatsu y Yoshimi (1983), Iai et al.,(1989), la Asociación de Caminos del Japón (1980, 1991), entre otros. Entre estos métodos se procederá a describir más adelante los tres primeros que son mayormente usados en la práctica de ingeniería.

3.1.3.2 Efectos de Daño en la Severidad de Licuación

El propósito de la ingeniería no es sólo conocer la ocurrencia de licuación que es de primordial importancia si no también conocer la severidad de los efectos de daño que están por ser definidos cuantitativamente. Seguidamente se mencionan dos criterios para la severidad de licuación basado en investigaciones geotécnicas, para más adelante ser descritos.

- Criterio del Estrato Superficialmente no licuable
- Índice del Potencial de Licuación

3.1.3.4 Ejemplos de Evaluación de los efectos de daño por licuación

Ishihara y Ogawa (1978) recopilaron un mapa del potencial de licuación para la parte de Tokyo Lowland basado en tres criterios que incluye el del estrato superficial no licuable, el primero de ellos identifica si existen estratos de arena en el perfil del suelo, y luego examina si los suelos arenosos son lo suficientemente sueltos para inducir licuación para una aceleración pico superficial de 0.25g basado en el criterio del valor N crítico del SPT. Finalmente, el espesor del suelo superficial no licuable se comparó con el espesor de arena licuable subyacente para decidir si existe o no daño por efecto de licuación en la superficie del terreno. Como resultado de ésto el área se clasificó en tres categorías según se muestra en la figura 3.11.



Figura 3.11 : Probabilidad de Ocurrencia de Licuación en el centro de la ciudad de Tokyo. (Ishihara y Ogawa, 1978)

Iwasaki et al., (1982) elaboraron el mapa de susceptibilidad de licuación mostrado en la figura 3.12 para la Prefectura de Shizuoka a una escala de 1:50,000 por cálculo del PL

para cada uno de los 4,000 sondeos perforados para una aceleración pico, Amax de 300 gal.



Figura 3.12: Mapa de Zonificación de Licuación para la Prefectura de Shizuoka, Japón. Basado en el Índice de Potencial de Licuación, PL (Iwasaki et al., 1982)

Ellos promediaron el cálculo de los PL dentro de celdas cada Km² en que la Prefectura fue dividida. Para aquellas celdas en que no tenían datos de sondeos, el PL se estimó a partir de los valores calculados en celdas adyacentes. Las celdas con un PL promedio mayor de 15 se categorizaron como susceptibles al daño por licuación para aceleraciones críticas de 300 gals o menos.

3.2 PROCEDIMIENTO GENERAL DE EVALUACIÓN DE LICUACIÓN

Existen básicamente dos formas disponibles para evaluar el potencial de licuación de suelos de una arena saturada sometida a un sacudimiento sísmico.

- La primera manera es usando los métodos de evaluación de esfuerzos cíclicos, que probablemente serán desarrollados en el terreno por un terremoto de diseño propuesto; y una comparación de estos esfuerzos con aquellos observados para causar licuación en muestras representativas del depósito en un ensayo de laboratorio apropiado, que proporcione una adecuada simulación de las condiciones del terreno o que puedan proporcionar resultados que permitan una evaluación del comportamiento del suelo bajo condiciones de campo.

- Usando métodos basados en observaciones de campo del comportamiento de depósitos de arena en terremotos anteriores, que impliquen el uso de algunas características in-situ para determinar probables semejanzas o diferencias entre estos lugares y otros propuestos, con respecto a su comportamiento potencial.

Usualmente se considera que estos métodos son completamente diferentes, puesto que el segundo método está basado en correlaciones empíricas de algunas características o comportamiento observado in-situ, mientras que el primero se basa totalmente en un análisis de condiciones de esfuerzo y el uso de procedimientos de ensayo de laboratorio.

Sin embargo, debido a la forma en la cual se expresan con frecuencia los datos de comportamiento de campo, ambos métodos implican las mismas aproximaciones básicas y difieren solo en la manera en la cual se determinan las características de la licuación en el campo. Así por ejemplo, se ha encontrado que un parámetro conveniente para expresar las características de licuación cíclica de una arena bajo las condiciones de campo es la relación de esfuerzos cíclicos; es decir, la relación de esfuerzos de corte τ_d , desarrollados sobre superficies horizontales de la arena como resultado de la carga cíclica o sísmica y el esfuerzo efectivo inicial vertical σ_o , actuando sobre el estrato de arena antes de ser aplicados los esfuerzos cíclicos. Este parámetro tiene la ventaja de tomar en cuenta la profundidad del estrato de suelo en consideración, la profundidad del nivel freático y la intensidad del terremoto u otros fenómenos de la carga cíclica (Seed y otros, 1981).

Diversos autores (Seed e Idriss, 1971, Iwasaki y Tatsuoka, 1978, Tokimatsu y Yoshimi, 1983), han propuesto esencialmente la siguiente ecuación para calcular la relación de esfuerzos cíclicos desarrollados en el campo debido a la ocurrencia de un terremoto

$$\frac{\tau_d}{\sigma_v} = C \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma_v} \cdot r_d$$

donde :

τ_d = esfuerzo de corte promedio inducido por el terremoto

a_{max} = aceleración máxima en la superficie del terreno

g = aceleración de la gravedad

σ_v = esfuerzo total vertical sobre el estrato de arena en consideración

$\bar{\sigma}_v$ = esfuerzo efectivo vertical del estrato de arena en consideración

r_d = factor de reducción del esfuerzo, con valor de 1 en la superficie

C = factor que relaciona la amplitud del esfuerzo de corte promedio al valor máximo

3.3 MÉTODOS SIMPLIFICADOS PARA LA EVALUACIÓN DE LICUACIÓN

3.3.1 Método de Seed e Idriss

A causa del terremoto de Niigata (Japón, 1964); los investigadores Seed e Idriss estudiaron el fenómeno de licuación de suelos en 1966. Basados en los estudios de laboratorio en arenas limpias sometidas a ensayos triaxiales cíclicos, de acuerdo a los resultados, dichos investigadores propusieron un método simple para poder estimar la resistencia a la licuación de arenas. En un comienzo el método empleaba la densidad relativa (derivada del ensayo SPT), como parámetro principal del suelo en la determinación de la resistencia a la licuación. Pero luego en 1983, basados en datos de campo en lugares donde había o no había ocurrido licuación, en terremotos de Estados Unidos, Japón, China, Guatemala, Argentina y otros países. Se estableció nuevos criterios para evaluar la licuación de arenas limpias y arenas limosas.

En 1986, Seed y De Alba complementaron este método, presentando un nuevo criterio donde se establece la importancia del contenido de finos en la resistencia a la licuación de las arenas.

Seed e Idriss propusieron que la relación de esfuerzo cíclico de un suelo durante un terremoto, a una determinada profundidad puede ser evaluada mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{\tau_d}{\sigma_o} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_o}{\bar{\sigma}_o} r_d$$

donde :

τ_d = esfuerzo de corte promedio inducido por el terremoto

a_{max} = aceleración máxima en la superficie del terreno

g = aceleración de la gravedad

σ_o = esfuerzo total vertical a la profundidad considerada

$\bar{\sigma}_o$ = esfuerzo efectivo vertical a la profundidad considerada

r_d = factor de reducción del esfuerzo, que decrece:

de 1 → en la superficie

a 0.9 → a 10 m de profundidad

La resistencia a la penetración del suelo usada en las correlaciones es la resistencia a la penetración normalizada $(N_1)_{60}$, bajo un esfuerzo efectivo vertical de 1 Kg/cm² y corregida a un 60% de energía del ensayo SPT. El valor de $(N_1)_{60}$ puede ser determinado por medio de la fórmula:

$$(N_1)_{60} = C_n N_{60}$$

donde :

$N_{60} = N \times \frac{ER}{60}$ corrección por energía, ver sección 3.4.4

N = Valor N del SPT , en golpes por pie

ER = Relación de Energía usada en la investigación, ver tabla 3.9

C_n = factor de corrección para un esfuerzo efectivo de 1 Kg/cm²

Liao y Whitman en 1985, propusieron la siguiente relación para evaluar C_n :

$$C_n = \sqrt{\frac{1}{\bar{\sigma}_o}} < 2 ; \bar{\sigma}_o \text{ en Kg/cm}^2$$

La figura 3.13 muestra la relación entre $\tau_1 / \bar{\sigma}_o$, y el valor de N_1 , propuesto a partir de un estudio extensivo para desarrollar las correlaciones del método simplificado. En esta

figura las correlaciones están dadas para arenas con diversos contenidos de finos y para un sismo de 7.5 de magnitud. La relación mostrada puede ser fácilmente extendida a terremotos de diferentes magnitudes multiplicando la relación de esfuerzos cíclicos calculados por los factores de corrección que se presentan en el capítulo 3.4.

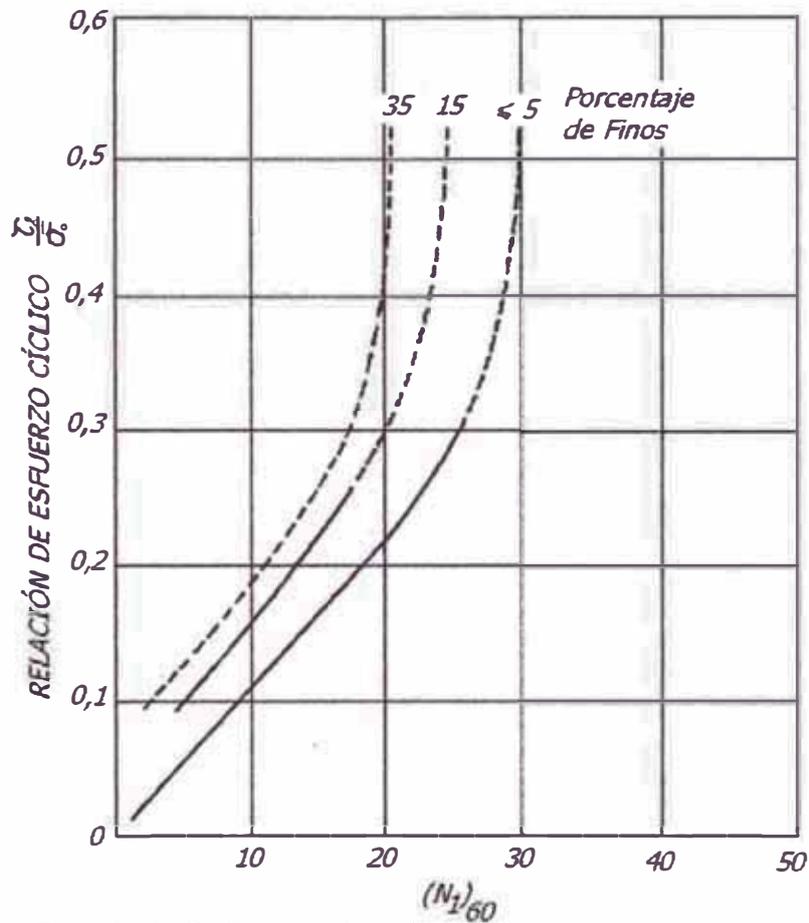


Figura 3.13 : Gráfico de la Relación de Esfuerzos para causar licuación vs valores N_1 para arenas limosas para terremotos de $M=7-1/2$ (Seed et al., 1984)

3.3.2 Método de Tokimatsu y Yoshimi.

Basados en resultados de numerosos ensayos de laboratorio de licuación de arenas saturadas, Tokimatsu y Yoshimi (1983), indicaron que los efectos de movimientos sísmicos que causan licuación, pueden ser representados por dos parámetros: la aceleración horizontal del terreno y el número de ciclos equivalentes de movimientos fuertes. Esta conclusión es incorporada en la siguiente ecuación para la relación del esfuerzo de corte dinámico para una profundidad determinada:

$$\frac{\tau_d}{\sigma_o} = \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_o}{\sigma_o} r_d \cdot r_n$$

donde :

τ_d = amplitud de los ciclos de esfuerzo de corte uniforme, equivalente a un registro tiempo – historia de esfuerzo de corte sísmico

a_{max} = aceleración máxima en la superficie del terreno

σ_o = esfuerzo efectivo vertical inicial

g = aceleración de la gravedad

σ_o = esfuerzo total vertical inicial

r_d y r_n = factores de corrección en términos de la profundidad y la magnitud del terremoto, como sigue :

r_d = $1 - 0.015 z$ (según Iwasaki et al., 1978)

r_n = $0.1 (M - 1)$

donde :

z = profundidad en m

M = magnitud del terremoto

El factor r_n se introduce para facilitar la comparación del comportamiento de campo durante terremotos de diferentes magnitudes, sobre la base del número de ciclos uniformes equivalentes que producen los mismos, como se indica en la tabla N° 3.4.

Tabla N° 3.4 : N° Ciclos Representativos de Terremotos de diferentes magnitudes.

Magnitud	Número de Ciclos representativos en 0.65 max
8 1/2	26
7 1/2	15
6 3/4	10
6	5-6
5 1/4	2-3

Los valores de la resistencia a la penetración, o valores N corregidos (N_a) para una profundidad dada, se obtienen como sigue:

$$N_a = (N_1)_{75} + \Delta N_f$$

donde :

$$(N_1)_{75} = C_n N_{75}$$

Además:

$$N_{75} = N \times \frac{ER}{75} \dots \dots \dots \text{corrección por energía, ver sección 3.4.4}$$

N = Valor N del SPT , en golpes por pie

ER = Relación de Energía usada en la investigación, ver tabla 3.9

C_n = factor de corrección para un esfuerzo efectivo de 1 Kg/cm²

$$C_n = \sqrt{\frac{1}{\sigma_o}} < 2 \quad ; \quad \sigma_o \text{ en Kg/cm}^2$$

ΔN_f = valor de N adicional que se incrementa proporcionalmente con el contenido de finos de la arena, fig. 3.14

La relación de esfuerzo de corte ($\tau_e / \bar{\sigma}_v$) está dada por la figura 3.15. En este gráfico se evalúa la relación de resistencia a la licuación en función de los valores N corregidos y para tres niveles de deformación por corte 2%, 5%, 10%.

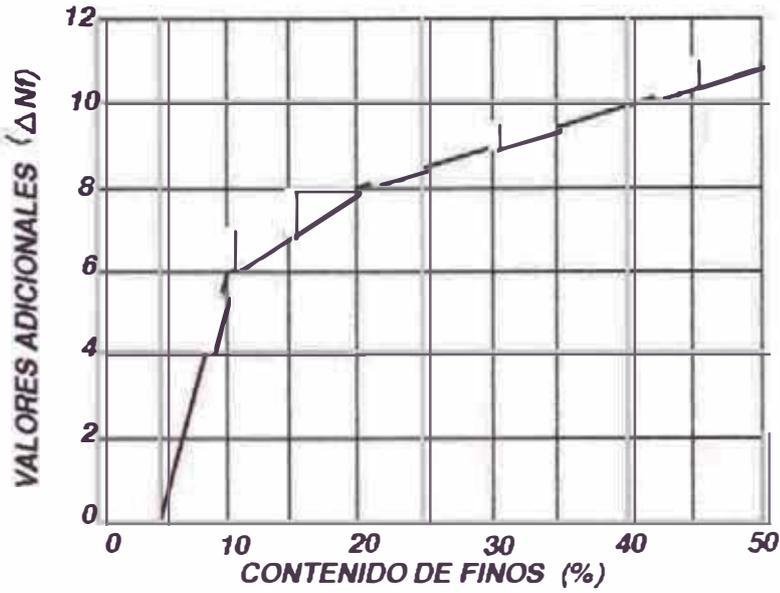


Figura 3.14 : Relación entre valores N adicionales y Contenido de Finos (Tokimatsu y Yoshimi, 1983)

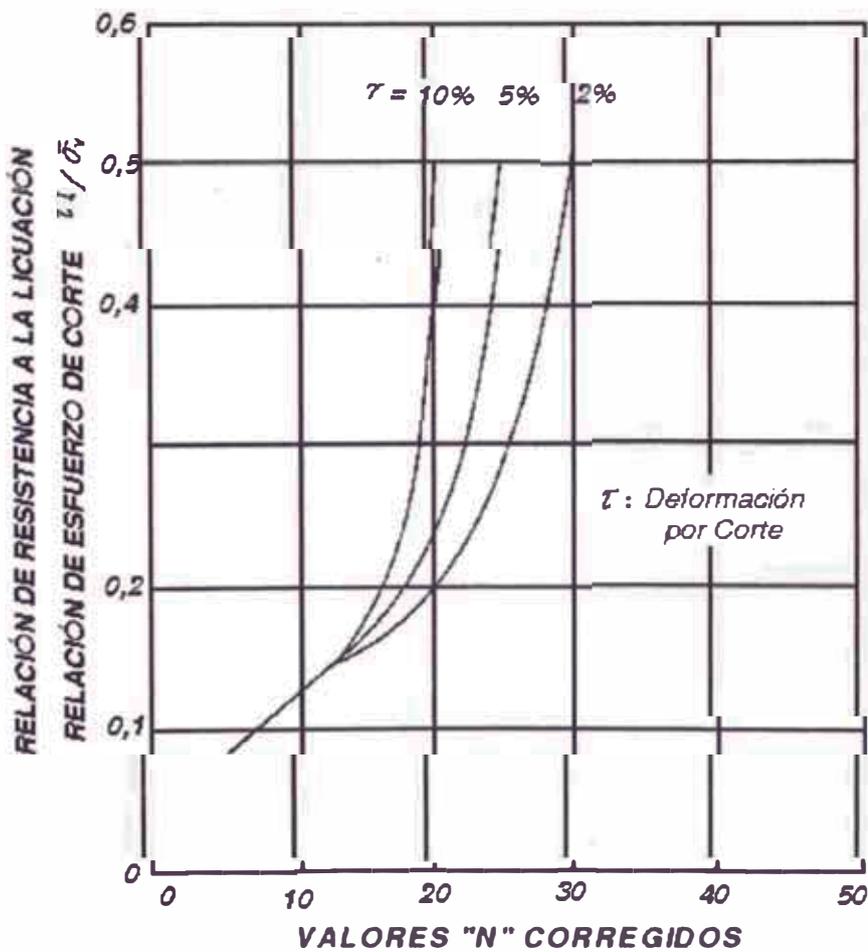


Figura 3.15 : Gráfico de la Relación de la resistencia a la licuación vs Valores N corregidos (Tokimatsu y Yoshimi, 1983)

3.3.3 Método de Iwasaki y Tatsuoka

Basándose en el trabajo realizado por Seed e Idriss (1971), la carga dinámica inducida en elemento de suelo por un movimiento sísmico puede ser estimada mediante:

$$\frac{\tau_d}{\sigma_v} = \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma_v} r_d$$

donde :

τ_d = esfuerzo de corte promedio inducido por el terremoto

a_{max} = aceleración máxima en la superficie del terreno

g = aceleración máxima en la superficie del terreno

σ_v = esfuerzo total vertical a la profundidad considerada

σ_v = esfuerzo efectivo vertical a la profundidad considerada

r_d = factor de reducción del esfuerzo de corte dinámico para tomar en cuenta la deformación elástica del terreno

Basado en un gran número de análisis de respuesta sísmica del terreno Iwasaki et al., (1978) propusieron la siguiente relación para “ r_d ”:

$$r_d = 1 - 0.015 z, \quad z = \text{profundidad en metros}$$

Por otro lado Iwasaki et al., (1978) condujeron numerosos ensayos triaxiales cíclicos sobre muestras de arenas no disturbadas. Como resultado concluyeron que la resistencia cíclica no drenada o relación de esfuerzos cíclicos que causará licuación en un elemento de suelo sometido a cargas dinámicas durante un terremoto puede ser evaluada como sigue:

Para $0,02 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 0,6 \text{ mm}$:

$$\frac{\tau_l}{\sigma_v} = 0,0882 \sqrt{\frac{N_{75}}{\sigma_v + 0,7}} + 0,225 \log (0,35 / D_{50})$$

Para $0,6 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 2,0 \text{ mm}$:

$$\frac{\tau_l}{\sigma_v} = 0,0882 \sqrt{\frac{N_{75}}{\sigma_v + 0,7}} - 0,05$$

donde:

= Esfuerzo de corte cíclico que causará licuación

σ_v = esfuerzo efectivo vertical

D_{50} = diámetro promedio de a las partículas en mm.

$N_{75} = N \times \frac{ER}{75}$ corrección por energía, ver sección 3.4.4

N = Valor N del SPT , en golpes por pie

ER = Relación de Energía usada en la investigación, ver tabla 3.9

3.4 CORRECCIONES PARA LA EVALUACIÓN DE LICUACIÓN

El procedimiento comúnmente usado en nuestro medio para la evaluación de licuación en el campo es el procedimiento simplificado propuesto por Seed e Idriss (1971, 1982). Este procedimiento involucra el uso de gráficos que permiten evaluar la licuación. La reciente versión del método fue propuesto por Seed et al., en 1984, tal como fue presentado anteriormente.

En la actualidad, además de los métodos presentados existen otros desarrollados a partir de la resistencia a la penetración normalizada q_c en los ensayos de Cono de Penetración (CPT) como las presentadas por Robertson y Campanella (1985); Robertson (1992) y también a partir de criterios que toman en cuenta la velocidad de onda de corte normalizada V_{s1} (Robertson et. al. 1992).

El gráfico de la figura 3.13 está basado en una magnitud $M_s = 7.5$, una presión efectiva de sobrecarga de 100 KPa y condiciones a nivel de terreno. La última condición implica que no hay esfuerzo de corte estático en planos potenciales de falla. La popularidad del método de Seed et al.,(1984) para la evaluación del potencial de licuación trajo consigo su aplicación para condiciones fuera de las que fue creada. Ha sido aplicada extensamente para terraplenes y presas de relaves y otras cimentaciones. En estos casos, las presiones de

sobrecarga son mucho mayores que 100 KPa y existen esfuerzos de corte estático en los planos de falla potenciales. Muchas investigaciones se realizaron para adaptar la curva de resistencia a la licuación a estas diferentes condiciones y otras magnitudes de sismo. De esta adaptación resultaron correcciones que se aplican a la Relación de Esfuerzos Cíclicos Resistentes (RECR) tomado de la gráfica para un valor $(N1)_{60}$ especificado.

Dichos factores de corrección son:

- K_{σ} → Corrección por efecto de presión de sobrecarga
- K_{α} → Corrección por efecto de esfuerzo de corte estático
- K_m → Corrección por efecto de magnitud del sismo

La Relación de Esfuerzos Cíclicos Resistentes corregida, correspondiente para un $(N1)_{60}$ está dada por:

$$RECR_{corr} = CCRR \times K_{\sigma} \times K_{\alpha} \times K_m$$

Se presenta, además, la corrección por energía que deberá ser aplicada a los valores de N medidos del ensayo de penetración estándar (SPT) antes de evaluar la licuación con los métodos anteriormente mencionados.

3.4.1 Corrección por Magnitud del Sismo (K_m)

Seed e Idriss (1982) desarrollaron factores de escala (ver tabla 3.5) para convertir la Relación de Esfuerzos Cíclicos Resistentes, de magnitud $M_s = 7,5$ correspondiente a un $(N1)_{60}$ dado, a otras magnitudes en base a datos de pruebas de laboratorio conforme al número de ciclos uniformes equivalentes (ver tabla 3.4).

En la tabla 3.6 se muestran los factores de escala presentados por Arango (1996), que son estimaciones más conservadoras comparadas con los propuestos por Seed e Idriss (1982), los cuales son también mostrados en esta tabla.

Tabla 3.5. Factores de Escala de Magnitud, K_m (Seed e Idriss, 1982)

Magnitud	5,5	6,0	6,5	6,75	7,0	7,5	8,0	8,5
Factor de Escala	1,43	1,32	1,19	1,13	1,08	1,0	0,94	0,89

Tabla 3.6. Factores K_m ; propuestos por Seed e Idriss (1982) y Arango (1996)

Magnitud	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
K_m (Seed e Idriss, 1982)	--	1,43	1,32	1,19	1,08	1,0	0,94	0,89
K_m (Arango, 1996)	3,38	2,25	1,75	1,5	1,25	1,0	--	0,75

Idriss (1996), en un estudio de reevaluación de los casos históricos de licuación, recomendó nuevos factores de escala para el Comité del NCEER (National Center for Earthquake Engineering Research) de los Estados Unidos. Estos factores son comparados en la tabla 3.7 con los factores originales de Seed e Idriss (1982).

Tabla 3.7. Factores de Escala de Magnitud tentativas propuestos por Idriss (1996).

Magnitud	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
NCEER (Idriss, 1996)	2,8	2,2	1,76	1,44	1,19	1,0	0,84
Seed e Idriss (1982)	--	1,43	1,32	1,19	1,08	1,0	0,94

Los factores de escala propuestos por Idriss (1996) reducen el riesgo de licuación para magnitudes menores que $M_s = 7,5$ asignando resistencias más grandes a la licuación que los usados en la práctica actual. La reducción del riesgo a licuar es substancial para terremotos con magnitudes menores que $M_s = 6,5$. De otro lado, el riesgo es incrementado ligeramente para los terremotos con magnitudes mayores que $M_s = 7,5$.

3.4.2 Factor de Corrección por Presión de Sobrecarga (K_σ)

El gráfico de resistencia cíclica de la figura 3.13 nos da el valor de la Relación de Esfuerzos Cíclicos Resistentes (RECR) para un terremoto de $M_s = 7,5$ con una presión de sobrecarga efectiva de 100 KPa. (1tsf). En algunas aplicaciones, como en presas de relaves, las presiones de sobrecarga son mucho mayores debido a la elevada altura de algunas estructuras de este tipo, por eso se deben aplicar correcciones a la Relación de Esfuerzos Cíclicos Resistentes.

Las presiones normales afectan la evaluación de licuación en diversas formas. Primero, el valor de N medido es corregido por la presión normal usando un factor de corrección C_n , como indica la siguiente ecuación:

$$N_1 = C_n \times N$$

En la práctica, la opción preferida para determinar el factor de corrección C_n , es la relación propuesta por Liao y Whitman (1985):

$$C_n = \sqrt{\frac{1}{\bar{\sigma}_o}} < 2 ; \bar{\sigma}_o \text{ en Kg/cm}^2$$

Una corrección adicional debe hacerse a la relación de resistencia cíclica crítica asociada con el valor de N corregido por el factor de corrección K_σ , cuyos valores son tomados de una curva promedio propuesta por Seed y Harder (1990), la cual se muestra en la figura 3.16. En el transcurso de los estudios de licuación de arenas en la cimentación de la Presa Duncan en B.C., K_σ fue medido usando ensayos triaxiales cíclicos en muestras moldeadas de arenas obtenidas por congelamiento de la cimentación (Pillai y Byrne, 1994). Estos estudios mostraron que los valores de K_σ son mayores que los sugeridos por Seed y Harder (1990). Después de revisar todos estos datos, el comité del NCEER (1996) ha recomendado la curva que se muestra en la figura 3.16 para tener en cuenta los efectos de sobrecarga en el potencial de licuación.



Figura 3.16 : Factores de Corrección por presión de sobrecarga, por Seed y Harder (1990), por el comité del NCEER (1996).

3.4.3 Factor de Corrección por Corte Estático (K_α)

El gráfico de Seed et al., (1984) para la evaluación de licuación está basado en datos donde el terreno es horizontal o casi horizontal, donde no existen esfuerzos de corte estático inicial en planos potenciales de falla. Cuando el método es usado para evaluar el potencial de licuación en presas de relaves u otros casos en los cuales los planos potenciales de falla pueden tener esfuerzos de corte estático inicial significativos. Los factores de corrección K_α han sido desarrollados para corregir la Relación de Resistencia Cíclica Crítica para los efectos de esfuerzo de corte estático. Los factores K_α actualmente usados en la práctica son los recomendados por Seed y Harder (1990). Ellos están definidos en términos de la relación de esfuerzos de corte estático $\alpha = \tau_h / \sigma'_v$, donde τ_h es el esfuerzo de corte estático inicial del plano de falla y σ'_v es el esfuerzo efectivo normal inicial en los mismos planos, ver figura 3.17.

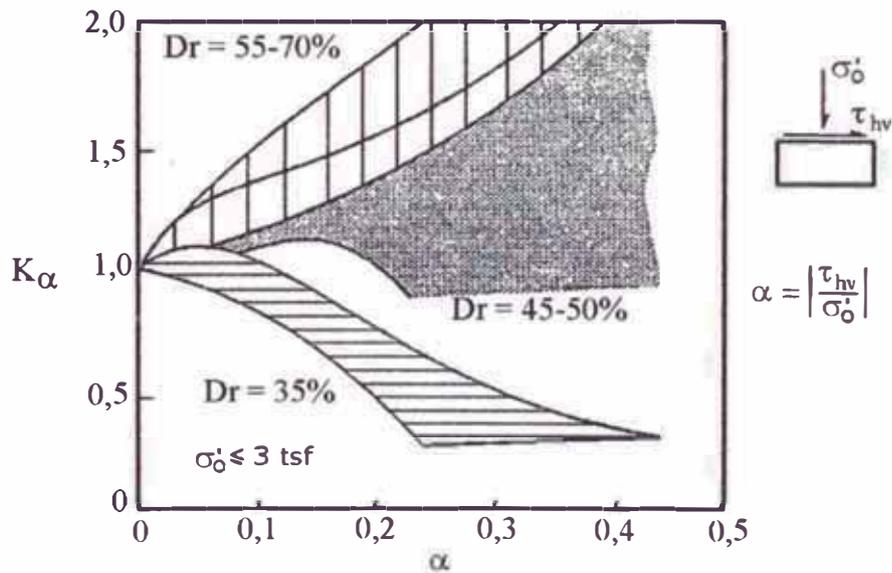


Figura 3.17 : Factores de Corrección para los efectos del esfuerzo de corte estático, (Seed y Harder, 1990).

Boulanger et al., (1991) ha sugerido la versión revisada de la carta de Seed y Harder, el comité del NCEER ha recomendado que la correlación de Boulanger et al., (1991) entre K_α y α sea adoptada en la práctica para presiones efectivas de sobrecarga menores que 300 KPa, ver figura 3.18. Resulta importante resaltar lo siguiente: Cuando la superficie del terreno no es horizontal y existen esfuerzos de corte estáticos en planos horizontales,

es posible calcular la relación de la resistencia cíclica aplicando el factor de corrección K_α anteriormente descrito. Sin embargo, la relación de resistencia cíclica actuante o inducida por el terremoto no podrá ser calculada por alguno de los métodos ya descritos, debido a que las relaciones propuestas por los métodos para efectuar dicho cálculo consideran depósitos horizontales u horizontalmente estratificados. En este caso se tendrá que emplear otro método para calcular la relación de resistencia cíclica inducida por el sismo. Para tal efecto, por ejemplo, es común llevar a cabo análisis de respuesta sísmica por elementos finitos en estructuras geotécnicas con superficie no horizontal.

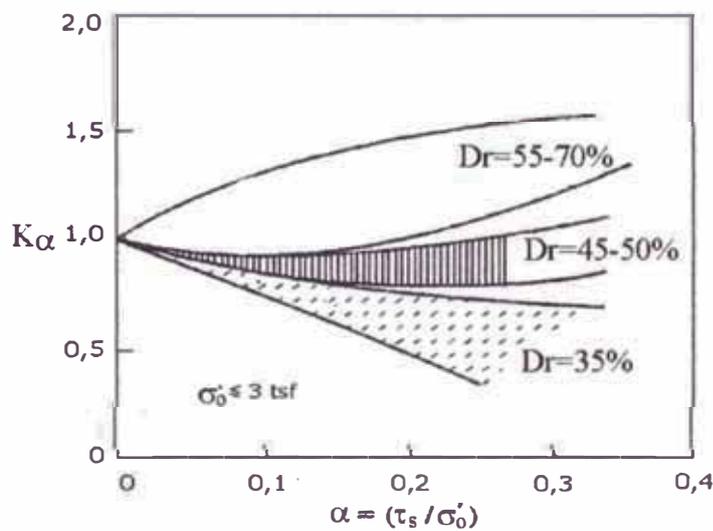


Figura 3.18 : Factores de corrección por efectos del esfuerzo de corte estático (Boulanger et al., 1991)

3.4.4 Factor de Corrección por Energía

El creciente uso de la Resistencia a la Penetración Estándar como un índice de resistencia a la licuación del suelo durante vibración sísmica ha conducido a un creciente interés en el grado de estandarización de este ensayo. Se sabe que la resistencia a la penetración estándar es un dato medido convencionalmente usando diferentes clases de martillos (ver tabla 3.8, figura 3.19), usando diferentes sistemas de entrega de energía con diferentes grados de eficiencia, usando diferentes fluidos en la perforación y usando diferentes tipos de tubos muestreadores en diferentes partes del mundo.

Tabla 3.8 Resumen de Relaciones de Energía de Vara tipo Pilcon, con caída libre del martillo

Investigación	Martillo	Relación de Energía (%)
Decker, Holtz y Kovacs (1984)	Pilcon	55
Douglas et al. (1984)	Pilcon	62
Liang (1983)	Pilcon	58
Promedio global		60

La corrección de los datos de campo podría ser minimizada en gran manera si se opta por una relación de energía del 60% para ser adoptada como el valor estándar. En este caso los datos obtenidos por martillos tipo Safety (de seguridad), los cuales son los más usados en los Estados Unidos, no necesitarán corrección y además, la razón de energía para martillos usados en algunos otros países, ver tabla 3.9, podrían normalizarse con esta energía estándar. En la tabla 3.9 se muestran los factores de corrección por energía para los ensayos SPT en otros países o bajo condiciones especiales. Los factores de corrección para otras condiciones pueden determinarse con la ecuación 1.

Tabla 3.9 : Resumen de las Relaciones de Energía para diferentes procedimientos del SPT

PAÍS	TIPO DE MARTILLO	LIBERACIÓN DEL MARTILLO	ENERGÍA ESTIMADA	FACTOR DE CORRECCIÓN PARA E=60%
Japón	Donut	Caída Libre	78	$78/60=1,30$
	Donut	Soga y Polea con caída especial	67	$67/60=1,12$
EE.UU.	Seguridad	Soga y polea	60	1
	Donut	Soga y Polea	45	$45/60=0,75$
Argentina	Donut	Soga y Polea	45	$45/60=0,75$
China	Donut	Caída libre	60	1
	Donut	Soga y Polea	50	$50/60=0,83$

Luego, los valores de SPT determinados de esta manera serán designados como N_{60} , y determinados de la siguiente relación:

$$N_{60} = N_m \times \frac{ER_m}{60}$$

donde:

N_m = Valor N del SPT para el método usado en la investigación

ER_m = Relación de Energía para el método usado en la investigación

Los valores de N así obtenidos deberán ser utilizados para evaluar la resistencia a la licuación del suelo.

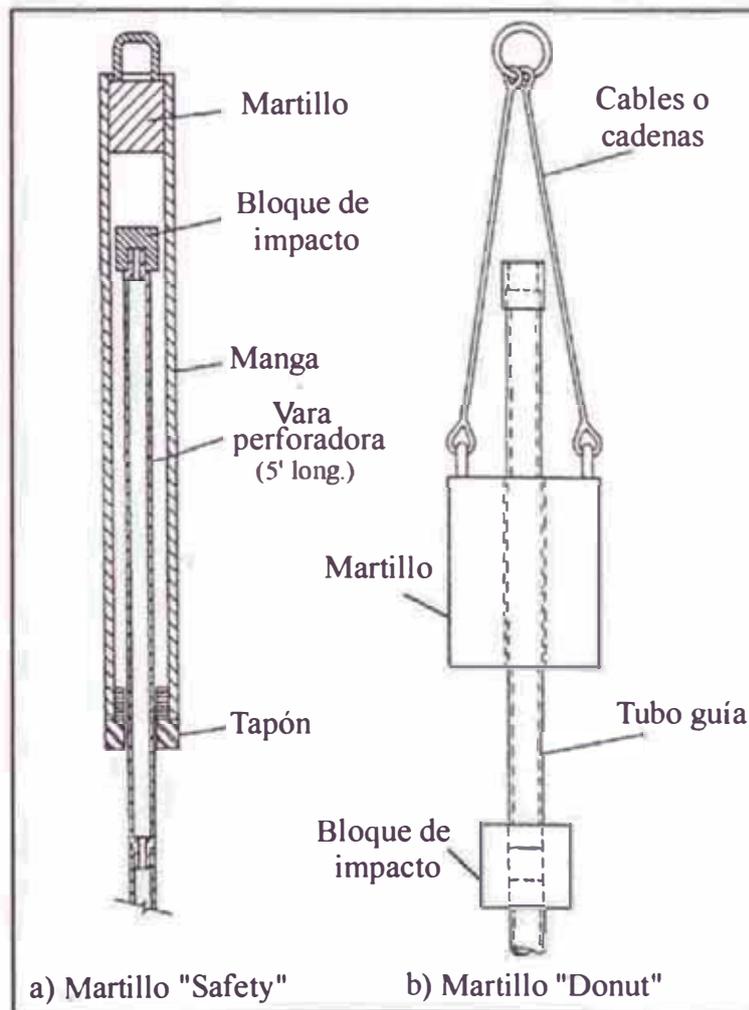


Figura 3.19 : Configuración de martillos SPT (adaptado por Steinberg, 1981).

3.5 MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DEL DAÑO DEBIDO A LA LICUACIÓN

El propósito de la ingeniería no es sólo poder determinar si en un área puede ocurrir licuación, lo cual es de gran importancia, si no también poder definir el grado de severidad en los efectos dañinos causado por este fenómeno. Enseguida, se presenta dos criterios para el estudio de la severidad de licuación basados en investigaciones geotécnicas.

3.5.1 Método de Iwasaki y Tokimatsu o índice del potencial de licuación (P_L)

La capacidad para resistir la licuación en una determinada profundidad de un lugar puede ser evaluada usando el factor de resistencia a la licuación. Debe notarse, sin embargo, que el daño a las estructuras debido a la licuación de suelos es considerablemente afectada por la severidad de la magnitud de licuación. En vista a este hecho Iwasaki, Tokimatsu, Tatsuoka, Tokida y Yasuda propusieron el índice del potencial de licuación (P_L) que estima la magnitud de la severidad de licuación en un lugar determinado para un movimiento sísmico definido por la siguiente ecuación:

$$P_L = \int_0^{20} F(z) \cdot w(z) \cdot dz$$

donde :

$$F(z) = 1 - F_L(z) \quad , \text{ para } F_L(z) < 1.0$$

$$F(z) = 0 \quad , \text{ para } F_L(z) > 1.0$$

$F_L(z) \Rightarrow$ Factor de Relación de Licuación = RECR / RECA a una profundidad z del lugar en estudio, obtenido por algún método de evaluación de licuación detallados en capítulo 3. Además: $w(z) = 10 - 0.5z$ (z : profundidad en metros), ver la figura 3.20. La función $w(z)$ es introducida para considerar la magnitud de la licuación de acuerdo a la profundidad. La forma triangular de $w(z)$ y la profundidad de 20 metros se consideraron a partir de la ocurrencia del fenómeno de licuación durante terremotos pasados.

Para el caso que el valor de $F_L (z) = 0$ para toda la profundidad, P_L toma su máximo valor, $P_L = 100$, mientras que para el caso en que $F_L (z) < 1.0$ para toda la profundidad, P_L toma su mínimo valor, $P_L = 0$. Para otros casos, en general P_L tomará valores entre 0 y 100.

Calculando valores de P_L para 63 lugares donde ocurrió licuación y 22 lugares donde no ocurrió el fenómeno en Japón, se llegó a la siguiente conclusión: en aquellos lugares donde los valores de P_L fueron mayores de 15 , se observaron efectos severos por licuación; por el contrario estos efectos están ausentes en los lugares donde los valores de P_L fueron menores que 5.

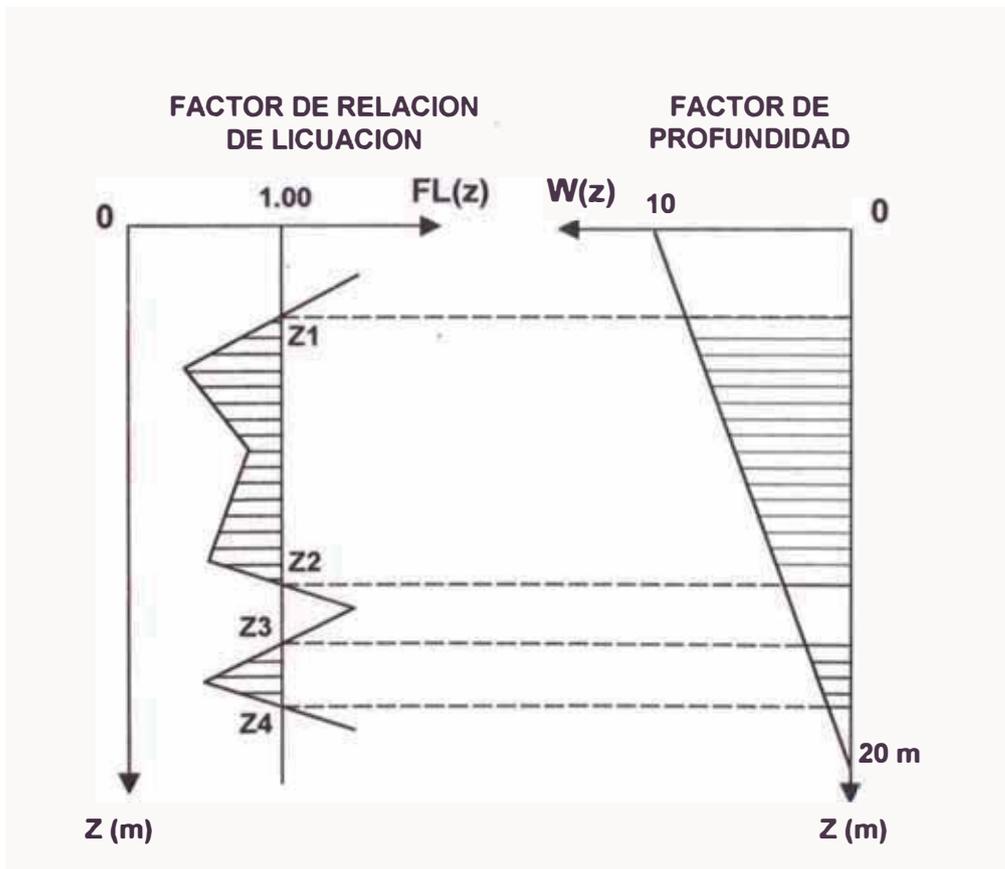


Fig. N° 3.20 : La función $w (z)$ es introducida para considerar la magnitud de la licuación de acuerdo a la profundidad

De acuerdo a la figura anterior se tiene:

$$PL = \int_{z_1}^{z_2} [1 - FL(z)] \cdot W(z) \cdot dz + \int_{z_3}^{z_4} [1 - FL(z)] \cdot W(z) \cdot dz$$

A continuación, se presentan los resultados luego de haber evaluado el índice del potencial de licuación:

RESULTADOS

PL = 0	----->	SUELOS NO LICUABLES
0 < PL ≤ 5	----->	NO HAY EFECTOS DE LICUACION
5 < PL ≤ 15	----->	PUEDE EXISTIR EFECTOS SEVEROS DE LICUACION
15 < PL < 100	----->	EFECTOS SEVEROS DE LICUACION
PL = 100	----->	SUELOS ALTAMENTE LICUABLES

3.5.2 Método de Ishihara o Criterio del Estrato Superficial no Licuable

Cuando se espera que exista licuación en depósitos de suelo como el resultado de análisis de evaluación, el espesor del estrato licuable debe compararse con el espesor del estrato superficial no licuable, usando la figura 3.21 propuesto por Ishihara (1985), para decidir si los efectos de licuación pueden o no causar daño a las estructuras sobre la superficie del terreno. En esta figura, el espesor del estrato superficial no licuable (H1), es definido como la profundidad del nivel freático del terreno si la napa freática está localizada dentro del depósito de arena.

Podría existir un suelo cohesivo no licuable a una profundidad por debajo del nivel freático, entonces en este caso H1 toma el valor del espesor del estrato no licuable, como se muestra en la figura 3.22. Comparando el espesor de H1 con el espesor del estrato licuable (H2) en la figura 3.21, se concluye que existirá daño por licuación si el punto (H1,H2) se ubica por encima de la curva correspondiente a la aceleración superficial del sismo presentadas en la gráfica. De lo contrario se puede decir que no existirá daño por licuación.

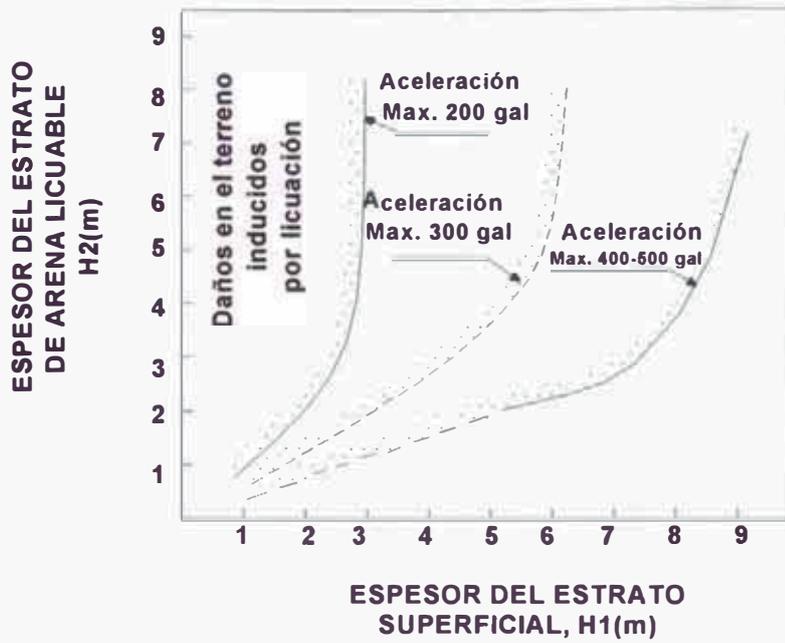


Figura 3.21 : Curvas límite propuestas para identificar el daño inducido por licuación

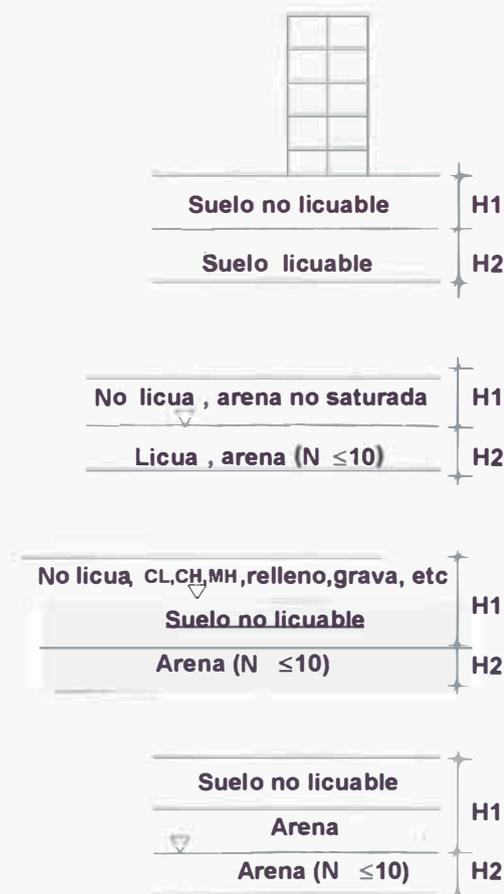


Figura 3.22 : Definiciones del estrato superficial no licuable (H1) y del estrato de arena licuable (H2)

CAPÍTULO 4

DESARROLLO DEL SOFTWARE LICUA PRO

4.1 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN

El presente software “Licua Pro” ha sido elaborado por medio del lenguaje de programación Visual Basic. La palabra "Visual" hace referencia al método que se utiliza para crear la interfaz gráfica de usuario (GUI). En lugar de escribir numerosas líneas de código para describir la apariencia y la ubicación de los elementos de la interfaz, simplemente puede arrastrar y colocar objetos prefabricados en su lugar dentro de la pantalla. La palabra "Basic" hace referencia al lenguaje BASIC (Beginners All-Purpose Symbolic Instruction Code), un lenguaje utilizado por más programadores que ningún otro lenguaje en la historia de la informática o computación. Visual Basic ha evolucionado a partir del lenguaje BASIC original y ahora contiene centenares de instrucciones, funciones y palabras clave, muchas de las cuales están directamente relacionadas con la interfaz gráfica de Windows.

Visual Basic proporciona las herramientas necesarias para crear con facilidad los mismos elementos gráficos que son comunes en la mayor parte de las aplicaciones Windows. Visual Basic es único porque permite diseñar la interfaz, escribir código en BASIC, y después asignar el código a los controles de la aplicación rápida y fácilmente.

La filosofía de programación Visual Basic consiste, primero, en crear objetos como ventanas, iconos y menús y después elaborar procedimientos que sean llamados por cada uno de estos objetos. Esto es diferente del método tradicional de elaboración de un programa, en el cual existen estructuras para controlar el flujo del programa de un procedimiento a otro de manera lógica hasta que el programa termina. Los controles de Visual Basic esperan que sucedan eventos particulares antes de que respondan. Un evento es una acción que es reconocida por un control. Usted escribe

el código para cada control a fin de que algo suceda cuando los usuarios interactúan con el formulario.

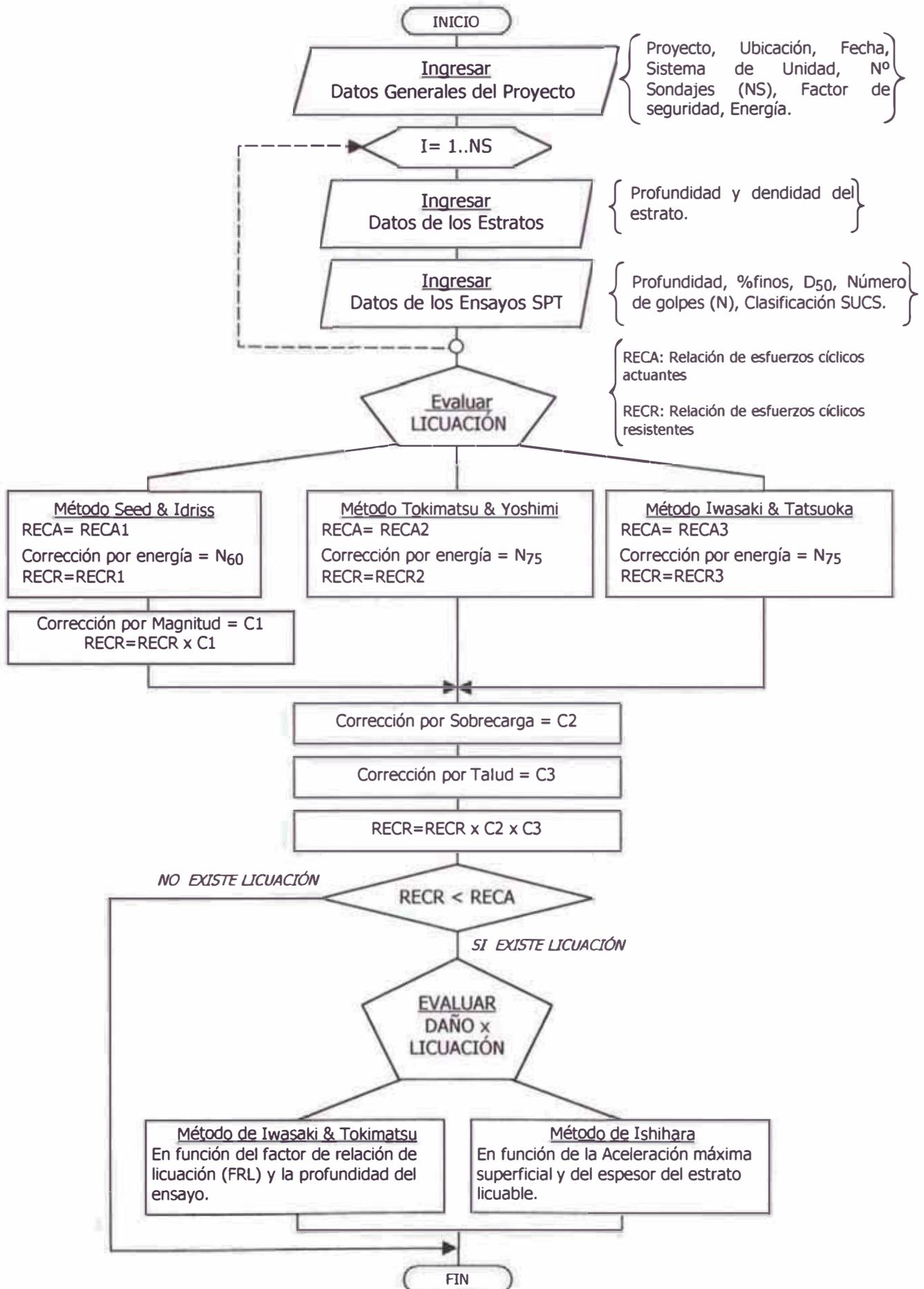
Como este lenguaje es interpretado más que compilado, las aplicaciones están listas para correr tan pronto como se termine de escribir el código. Mientras se está en Visual Basic y corre una aplicación, cada línea de código es interpretada y ejecutada por separado cada vez que aparece. Es esta ejecución individual de cada línea la que puede hacer que un programa interpretado corra con mayor lentitud que un programa compilado. El archivo del programa terminado por lo general también es más grande. Por supuesto después de que el programa es compilado en un archivo ejecutable, ya no es interpretado. La ausencia de un paso de compilación separada, antes de que un programa pueda correr, hace que el desarrollo de una aplicación sea más rápido con un lenguaje interpretado.

4.2 DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL

El presente diagrama de flujo del programa “Licua Pro”, en forma general, consta de una etapa de ingreso de datos y otra de ejecución de métodos que evalúan tanto el fenómeno de licuación como el daño inducido por éste.

Inicialmente, como podemos observar en el diagrama, ingresamos los datos generales del proyecto; luego procedemos a llenar datos de los estratos y de los ensayos de penetración estándar recopilados en el proyecto. A continuación el programa se encarga de evaluar la licuación en cada profundidad en la cual se ha realizado el ensayo SPT, uno escoge el método de evaluación. En cada método se aprecia que antes de hallar la Relación de Esfuerzos Cíclicos Resistentes (RECR) debemos de realizar una corrección por energía al número de golpes (N) del ensayo de SPT, en el CISMID se trabaja con equipos que liberan una energía del 60% a la hora de realizar el ensayo SPT. Para mayor información revisar el capítulo 3.3 y 3.4. Luego de evaluar la licuación se procede a realizar las correcciones por talud y sobrecarga, ver capítulo 3.4. Finalmente evaluamos el daño inducido por el fenómeno de licuación mediante el método de Ishihara o por el método de Iwasaki y Tokimatsu. Se presenta a continuación el diagrama de flujo de “Licua Pro”:

“LICUA PRO”



4.3 PROCEDIMIENTO EN LA EJECUCIÓN DEL PROGRAMA.

4.3.1 Ingreso de Datos del Proyecto

Se puede crear un nuevo proyecto o abrir un proyecto existente almacenado en un archivo. Se activa la ventana del proyecto mostrando la ficha General.

En la Ficha General:

En la ficha General se ingresan los datos generales del proyecto como: nombre, ubicación, fecha, número de sondaje, factor de seguridad, energía y se escoge el sistema de unidad. Para que estos valores se guarden en la memoria haga click en el botón Aceptar, la ventana cambiará de nombre de la manera: "Proyecto: (nombre del proyecto) - (fecha)" y se activarán dos fichas más: la ficha Esfuerzo Cíclico y la ficha Sondajes.

En la Ficha Esfuerzo Cíclico:

Los datos de esta ficha se utilizan con el fin de encontrar el valor de la relación de esfuerzos cíclicos actuantes (RECA). En esta ficha aparecen dos opciones: "por método de licuación", e "ingreso por teclado".

- Por método de Licuación: El valor del RECA se halla usando los métodos tradicionales de evaluación de licuación; para esto se ingresan los valores del sismo: Valor de la magnitud y la aceleración máxima. Haciendo click en al botón Aceptar, se graban los valores.

- Ingreso por teclado: Además de los valores del Sismo, se ingresan directamente los valores del RECA:

Primero se escribe el número de datos del sondaje activo en la casilla "Número de datos" y presionar Enter.

El cursor se colocará en el campo "profundidad" donde se ingresa dicho valor, al presionar Enter el cursor pasa al siguiente campo donde se ingresa el valor de RECA. Haga click en el botón OK. Repita este proceso hasta llegar completar la cantidad especificada.

La opción de ingreso por teclado es necesaria cuando el problema analizado involucra superficies no horizontales, donde los valores de RECA tendrán que ser calculados por algún método específico.

Al terminar, pasamos al siguiente sondaje para llenar sus datos correspondientes. Al final de todos los sondajes active la ficha Sondajes.

En la Ficha Sondajes

Esta Ficha se usa para llenar los datos obtenidos en el ensayo de penetración estándar (SPT). En el campo denominación, se coloca el nombre respectivo del sondaje activo. El nivel Freático, se ingresa en el casillero "N.F."; si no se encuentra el nivel freático, se colocará un asterisco (*) en su lugar.

En el campo "Nº de Estratos" se ingresa la cantidad de estratos encontrados en el presente sondaje. Al aceptar el valor se activa el cuadro "Estratos:", en el cual se procederá a llenar sus valores: La profundidad del estrato se ingresa en el campo "profundidad (m)" y la densidad, en el sistema de unidad elegido en la "ficha datos". Al aceptar, los valores se muestran automáticamente en la tabla inferior. Repita este proceso hasta completar todos los estratos.

En el caso que se quieran corregir algún dato de la tabla, se busca el estrato con los botones a la izquierda de la tabla y se modifica el valor a corregir, aceptando el cambio con el botón "OK". Al terminar con el último estrato el cursor se colocará en el campo "Nº de Ensayos SPT". En el campo "Nº de Ensayos SPT" se ingresa el número de ensayos realizados en el presente sondaje. Se acepta el valor y se activa el cuadro "Ensayos SPT", en el cual se procederá a llenar sus valores:

La profundidad del ensayo se ingresa en el campo "prof. (m)", el porcentaje de finos en el campo "%Finos", el diámetro 50 en el campo "D50(mm)", el Nº de golpes por pie, en el campo "N (golpe/pie)" y la clasificación SUCS de la muestra en dicha profundidad. Los valores se actualizan en la tabla inferior. Repita este proceso hasta completar todos los ensayos. Terminado el sondaje actual, pase al sondaje siguiente

e ingrese sus valores. Al llenar todos los datos del proyecto, puede grabar la información en un archivo para recuperarlo en próximas sesiones; también puede grabar sus valores en un archivo mientras está en el proceso de llenado y continuarlos en otra sesión. Con esto se completa la entrada de datos. Enseguida podemos evaluar la licuación.

4.3.2 Evaluación de licuación

El programa Licua Pro evalúa la licuación por medio de tres métodos:

- Seed & Idriss
- Tokimatsu & Yoshimi
- Iwasaki & Tatsuoka

Para evaluar la licuación se escoge un método desde el menú “Métodos” o desde el Navegador (La ventana que nos permite desplazarnos entre las diversas zonas de la ventana del Proyecto). Se muestra la los resultados en la ventana del Proyecto: Esfuerzo total, esfuerzo efectivo, RECR (Relación de Esfuerzos Cíclicos Resistentes), corrección por sobrecarga e inclinación, RECR corregido, RECA (Relación de Esfuerzos Cíclicos Actuales), FRL (Factor de Relación de Licuación) y la condición que indica si existe o no la Licuación en cada ensayo.

4.3.3 Correcciones para la evaluación de licuación

Luego de evaluar la licuación se procede a corregir la RECR por:

- Magnitud del sismo
- Sobrecarga
- Ángulo de inclinación

La corrección por magnitud sólo afecta al método de Seed & Idriss. Se selecciona “Magnitud del sismo” del menú “Corrección” y se abre una ventana. En dicha ventana, en la cual se muestran tres métodos: Seed & Idriss, NCEER (1996) y Arango (1996). Se escoge uno y se cierra la ventana.

Al seleccionar la corrección por Sobrecarga se presenta una ventana con dos botones: Seed & Harder y NCEER (1996), se escoge uno para todos los sondajes y luego se cierra la ventana.

La corrección por ángulo de inclinación muestra en su ventana un campo para ingresar el valor alfa, al aceptar, se escoge la corrección de acuerdo a su densidad relativa, haciendo click con el ratón en el gráfico de la derecha. Los valores de agregan a la tabla y se repite este proceso hasta llenar la tabla del sondaje activo. Terminado el sondaje se pasa al siguiente, completando sus valores hasta el último sondaje.

4.3.4 Evaluación del daño inducido por licuación

El programa evalúa el daño inducido por licuación mediante dos métodos:

- Iwasaki & Tokimatsu
- Ishihara

Para evaluar el daño se selecciona un método desde el menú “Métodos” o desde el Navegador. Si se escoge el método Iwasaki & Tokimatsu, muestra el índice del potencial de licuación (PL) y de acuerdo a su valor muestra un mensaje del estado del daño. Escogiendo el método de Ishihara, se ingresan los valores de H1 (estrato no licuable) y H2 (estrato licuable) de acuerdo con el gráfico de la izquierda. Al “Procesar” los valores, se dibuja las curvas y presenta el resultado si existe o no daño.

4.3.5 Generación del reporte

Licua Pro! permite imprimir el reporte con los datos y los resultados en tablas separadas por sondajes. Se selecciona un método para la evaluación de licuación y un método para la evaluación del daño. También permite exportar el reporte a un procesador de textos.

Para imprimir el reporte se seleccionan los métodos y la impresora dentro de la opción “Imprimir...” del menú “Archivo”. Se puede visualizar el documento a imprimir en la pantalla de la computadora con la opción “Presentación preliminar”. También existe la posibilidad de editar el reporte mediante un procesador de textos como Microsoft Word. Licua Pro!, desde la opción “Exportar...” del menú “Archivo”, genera un documento con el programa de importación y un archivo con los datos del proyecto. El documento se abre desde el procesador de palabras y se carga el archivo de datos, Microsoft Word se encarga de diagramar el proyecto, pudiendo editarlo según requerimiento del usuario.

4.4 RESULTADOS

Después de procesados los datos del proyecto mediante el programa Licua Pro! , obtenemos un reporte tanto de la evaluación de licuación como el daño inducido por él. En el anexo II se presenta diferentes reportes que han sido efectuados con la información obtenida para el desarrollo de la presente investigación; se trabajó con los perfiles recopilados que se muestran en el anexo I y con los perfiles de los ensayos SPT de la referencia I.

CAPÍTULO 5

EVALUACIÓN DE LICUACIÓN EN LA CIUDAD DE CHIMBOTE

5.1 GENERALIDADES

El fenómeno de licuación de suelos puede ser definido de una forma concisa como el cambio físico que experimenta una masa de suelo al pasar de su estado sólido a un estado fluido; para que ocurra esta transformación deben estar presentes ciertos factores que involucran características propias del suelo y también las características sísmicas de la región.

Podemos decir que en muchos de los depósitos de suelo de la ciudad de Chimbote convergen varios de los factores que condicionan la ocurrencia de licuación, por lo cual se les reconoce como suelos potencialmente licuables, estando en riesgo de colapsar las estructuras que sobre él se han cimentado. Con la ocurrencia de este fenómeno se produce la pérdida de resistencia al corte del suelo con el consiguiente hundimiento de las estructuras en caso que no se hayan tomado las medidas preventivas en el diseño y construcción de sus cimentaciones.

En este capítulo se presenta la evaluación de licuación de suelos en Chimbote, para lo cual se hará una descripción breve acerca de la Geología, Sismicidad y Microzonificación Sísmica del área de Chimbote.

5.2 GEOLOGÍA

La ciudad de Chimbote presenta tres unidades estratigráficas que son representadas principalmente por rocas volcánicas, por rocas intrusivas y materiales cuaternarios (Pérez Verástegui, 1970).

5.2.1 Volcánico Casma

Es una secuencia mixta volcánica sedimentaria (derrames andesíticos y riolíticos). En la ciudad de Chimbote el volcánico se encuentra expuesto principalmente en el extremo norte por los cerros Chimbote y Tambo Real y en el extremo Sur-Este por los cerros Península y División. La edad de los depósitos anteriores ha sido ubicada a fines del período Jurásico y Cretácico Superior.

5.2.2 El Intrusivo

Este segundo tipo de afloramiento existente en la zona se encuentra representado por formaciones de granodiorita, cuya coloración oscila entre gris oscuro a gris claro, su grano varía entre medio y grueso; teniendo su mejor exposición en el lado Este de la ciudad, en las colinas de las Pampas de Chimbote.

5.2.3 El Cuaternario

Esta última acumulación geológica está formada por extensos depósitos de arena eólica, formando muchas veces colinas de poca elevación. Se observa la presencia de materiales aluviales y fluviales formando depósitos a lo largo del lecho antiguo del Río Lacramarca, así como en el extremo Norte de la ciudad, conocidos como El Cascajal, La Mora, etc.

En el plano P-01 se presenta el mapa Geológico de Chimbote.

5.3 SISMICIDAD

El Perú está comprendido entre una de las regiones de más alta actividad sísmica que hay en la Tierra, forma parte del Cinturón Circumpacífico.

Siendo los principales rasgos tectónicos de la región occidental de Sudamérica: La Cordillera de los Andes y la fosa oceánica Perú-Chile, están relacionados con la alta actividad sísmica y otros fenómenos telúricos de la región, como consecuencia de la interacción de dos placas convergentes cuya resultante más saltante precisamente es el

proceso orogénico contemporáneo constituido por los Andes. La teoría que postula esta relación es la Tectónica de Placas o Tectónica Global (Isacks et. al. 1968). La idea básica de esta teoría consiste en que la envoltura más superficial más sólida de la Tierra llamada Litósfera (aprox.100 Km), se encuentra dividida en varias placas rígidas que crecen a lo largo de estrechas cadenas meso-oceánicas casi lineales; estas placas rígidas son transportadas sobre otra envoltura menos rígida llamada Atnósfera, son comprimidas o destruidas en los límites de interacción por compresión, ésto ocurre donde la corteza terrestre es comprimida en cadenas montañosas o donde existen fosas marinas (Berrocal et. al.,1975).

El mecanismo básico que causa el movimiento de las placas no se conoce, pero se dice que es debido a corrientes de convección o movimientos del mismo manto plástico y caliente de la tierra y también a los efectos gravitacionales y de rotación de la Tierra.

Los bordes de las placas raramente coinciden con los márgenes continentales, pudiendo ser de tres tipos:

- Según cordilleras axiales, donde las placas divergen una de otra y donde se genera un nuevo suelo oceánico.
- Según las fallas de transformación, a lo largo de las placas que se deslizan una respecto a la otra.
- Según zonas de subducción, en donde las placas convergen y una de ellas se sumerge bajo el borde de la suprayacente.

Se ha observado que la mayor parte de la actividad tectónica en el mundo se concentra a lo largo de los bordes de estas placas. El frotamiento mutuo de estas placas es lo que produce los terremotos, por lo que la localización de éstos delimitará los bordes de las placas.

El margen continental occidental de Sudamérica, donde la Placa Oceánica de Nazca está siendo subducida por debajo de la Placa Continental Sudamericana, es uno de los bordes de placa mayores de la Tierra.

La Placa Sudamericana crece de la cadena meso-oceánica del Atlántico, avanzando hacia el Nor-Oeste con una velocidad de 2 a 3 cm por año y se encuentra con la Placa de Nazca en su extremo occidental, constituido por la Costa Sudamericana del Pacífico. En cambio, la Placa de Nazca crece de la cadena meso-oceánica del Pacífico Oriental y avanza hacia el Este con una velocidad aproximada de 5 a 10 cm por año, subyaciendo debajo de la Placa Sudamericana con una velocidad de convergencia de 7 a 12 cm por año (Berrocal et. al., 1975).

Como resultado del encuentro de la Placa Sudamericana y la subducción de la Placa de Nazca han sido formadas la Cadena Andina y la Fosa Perú-Chile en diferentes etapas evolutivas. El continuo interaccionar de estas dos placas dan origen a la mayor actividad sísmica de la región occidental de nuestro continente. La Placa de Nazca se sumerge por debajo de la frontera Perú-Brasil y Nor-Oeste de Argentina. La distribución espacial de los hipocentros confirma la subducción de la Placa de Nazca, aun cuando existe controversia debido a la ausencia de actividad sísmica entre los 300 y 500 Km de profundidad (Berrocal et. al., 1975).

En el Perú la gran mayoría de los sismos han sido de origen tectónico y no volcánico, como por ejemplo el ocurrido el 31 de Mayo de 1970, terremoto que se constituyó en el más destructor de la historia sísmica peruana y tuvo su epicentro a 70 Km de la zona de Chimbote, la cual fue la más afectada.

Se establecido que el riesgo sísmico en el Perú es mayor en los valles de los ríos, ya que la población se encuentra en la costa y en los valles que desaguan las vertientes occidentales de los Andes.

Entre las principales fechas de eventos sísmicos que han ocurrido en nuestra zona en estudio y lugares aledaños son:

- El 9 de julio de 1619, afectó las ciudades de Trujillo y Piura donde se registraron grandes daños materiales y numerosas víctimas.
- El 14 de febrero de 1658, afectó a la ciudad de Trujillo ocasionando daños materiales en su totalidad y numerosas víctimas.
- El 06 de enero de 1725, afectó a las ciudades de Trujillo y Callejón de Huaylas.
- El 16 de noviembre de 1907, afectó a las ciudades de Casma y Tarma ocasionando daños moderados.
- El 20 de mayo de 1917, afectó levemente a la ciudad de Trujillo, en Casma ocasionó daños moderados y en Chimbote se sintió fuertemente ocasionando daños materiales.
- El 21 de junio de 1937, con una intensidad de VI en la escala de Mercalli Modificado y una magnitud de 6.75 ocasionó diversos daños en Trujillo, Chimbote, Casma, Salaverry y Lambayeque; leves en Cajamarca y Cutervo.
- El 23 de junio de 1951, afectó al Callejón de Huaylas ocasionando daños moderados.
- El 19 de Agosto de 1955, afectó a las ciudades de Trujillo y Chimbote, ocasionando daños moderados.
- El 18 de Febrero de 1956, con una intensidad de VII en la escala de Mercalli Modificado en las ciudades de Carhuaz y Callejón de Huaylas ocasionando daños considerables.
- El 29 de octubre de 1956, con una intensidad de VI en la escala de Mercalli Modificado en las ciudades de Huánuco y Tingo María ocasionando daños moderados. Se sintió en Chimbote y en Lima.
- El 24 de setiembre de 1963, con una intensidad de VI a VII y con una magnitud de 6.75, en Ancash fallaron las construcciones de adobe, derrumbes en gran escala enterrando los canales de regadío e interrumpiendo los caminos, etc.
- El 31 de mayo de 1970, alcanzó intensidades máximas de VII MM; fue un terremoto catastrófico en las localidades de Chimbote y Huaraz.
- El 21 de agosto de 1985, que afectó las ciudades de Chimbote y Chiclayo, alcanzando una intensidad promedio de V MM.
- El 10 de octubre de 1987, con intensidades máximas de IV y V MM, sentido en las ciudades de Chimbote y Santiago de Chuco, causando daños leves.

Por lo tanto, la posibilidad de ocurrencia de un terremoto severo en el área de la ciudad de Chimbote se mantiene vigente, es por esto que es necesario tomar las medidas preventivas para evitar desastres, en caso que se produjese un sismo severo que cause el fenómeno de licuación de suelos.

5.4 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

Los efectos destructivos tanto en el terreno como en las construcciones debido a los movimientos sísmicos, están en función a la magnitud y a la distancia epicentral del terremoto producido; la heterogeneidad local en la distribución de los daños en una determinada área es debido a las condiciones locales del suelo, es decir, su topografía (Morimoto, 1971). Esto se conoce como efecto de microzona, es decir, que en determinadas áreas de una ciudad, con características de suelos y geología desfavorables, la intensidad sísmica se incrementa, y por lo tanto, los daños serán claramente mayores que en áreas aledañas con mejores condiciones naturales (Alva et. al., 1990).

Se deben realizar construcciones resistentes al sismo, sobretodo en las regiones sísmicamente activas para proteger a las edificaciones de los efectos destructivos que se puedan presentar. El coeficiente de diseño básico de la fuerza sísmica está principalmente determinado por dos factores:

- La actividad sísmica
- Las condiciones locales del suelo

El coeficiente de diseño para edificaciones puede ser modificado de acuerdo a los usos que se les den y a sus características estructurales. El factor concerniente a la actividad sísmica podría determinarse estadísticamente basándose en la actividad sísmica de registros anteriores. Actualmente el Perú ha sido dividido en tres regiones, en cada una de las cuales se han sido propuestos valores diferentes de los factores sísmicos regionales.

Se ha establecido durante terremotos destructivos en el pasado, que el daño ocasionado a las estructuras en un área limitada tiene muchas irregularidades locales. Esto indica que la fuerza sísmica actuante sobre una estructura está afectada en gran medida por su topografía y condiciones del subsuelo del lugar. Por lo tanto si el efecto de las condiciones locales del suelo serán tomados en consideración, debería realizarse un mapa de zonificación detallada en un área determinada. Para establecer la más razonable utilización del terreno en el planeamiento de una ciudad, se recomienda realizar una microzonificación en el área, desde el punto de vista de la ingeniería antisísmica (Morimoto, 1971).

En el sismo del 31 de mayo de 1970, la ciudad de Chimbote fue severamente afectada, ocasionando pérdidas de vidas humanas como grandes daños en las edificaciones; tanto de concreto armado, albañilería, adobe y estructuras de acero; por lo tanto, la reconstrucción de la ciudad era una necesaria prioridad. Antes de iniciar el planeamiento de la ciudad, se tuvo que realizar la microzonificación sísmica de Chimbote, ésta tarea fue encomendada a un grupo de investigadores enviados por el Gobierno Japonés.

El mapa de microzonificación sísmica fue realizado en base a la geología, ensayos de penetración estándar, evaluación de daños durante el sismo de 1970, medición de microtrépidaciones y réplicas, ensayos de refracción sísmica y análisis de amplificación. Sobre la base de estas investigaciones, el área en estudio fue dividida en cuatro zonas, desde el punto de vista de utilización del terreno y cuyas características generales se describen a continuación:

Zona I: El subsuelo consiste de gravas densas o rocas, el nivel freático está a más de 10 metros de profundidad. Las elevaciones topográficas son mayores de 10 msnm. Existen pocas posibilidades de asentamiento en edificios o subsidencia del terreno. Se esperan mayores fuerzas sísmicas, debido a la interacción suelo-estructura.

Zona II: Esta zona está cubierta por arena suelta a semidensa, con varios metros de potencia. Por debajo existen arenas densas y cementadas. En la mayor parte el nivel

freático se encuentra a 5 m de profundidad. No se esperan asentamientos en edificios de hasta 2 pisos, excepto en los bordes exteriores de las dunas. Se recomienda cimentar los edificios mayores de 2 pisos con pilotes en el área densa. La construcción en las dunas requerirá vibroflotación.

Zona III: El subsuelo consiste de arena cubierta con capa delgada de suelo agrícola. Las gravas se encuentran por debajo de los 10 m . El nivel freático se encuentra a poca profundidad. La arena fina suelta que se encuentra a distintas profundidades se licuará durante un sismo. Sin embargo , debido a su profundidad, no ocurrirá asentamientos apreciables en los edificios, excepto casos especiales.

Zona IV: Esta zona tiene un nivel freático muy alto, la mayor parte está cubierta de agua o pantanos. La elevación promedio de la zona es menor de 5 msnm. El subsuelo consiste de arenas saturadas cubiertas de capas delgadas de limo orgánico. El daño a las edificaciones será principalmente por asentamiento y parcialmente por amplificación. En algunos lugares la arena se licuará hasta la superficie ante la ocurrencia de un sismo severo. Se recomienda cimentar por pilotes hasta la arena densa, o mejorar el terreno con vibroflotación.

En el plano P-02 se presenta la microzonificación sísmica de la ciudad de Chimbote (Morimoto et al.,1971).

5.5 ANÁLISIS PRELIMINAR DE LICUACIÓN SEGÚN LOS GRADOS DE EVALUACIÓN

Según los grados de evaluación de licuación desarrollados en el capítulo 2, se puede concluir lo siguiente:

5.5.1 Grado 1

Es un grado de rápida zonificación al ser de bajo costo, se basa en la interpretación de la información existente recopilada. Haciendo uso de la estimación de la susceptibilidad de licuación basado en el criterio geológico y geomorfológico, y teniendo en cuenta que el

fenómeno de licuación es probable que ocurra varias veces en un mismo lugar; hacemos uso del plano P-01: “Plano Geológico de la Ciudad de Chimbote” y del plano P-03 “Plano de Efectos de Licuación de Chimbote, 1970”, para establecer la siguiente tabla de correlación propuesta por Iwasaki et al., 1982.

Grado	Topografía	Potencial de Licuación	Zonas de Chimbote
A	Lecho de ríos actuales, lecho de ríos antiguos, pantanos, terrenos recuperados	Probable Licuación	Zonas cercanas al río Lacramarca
B	Deltas, dique natural, dunas de arena, zona de inundación, playa.	Posible Licuación	Zonas inundadas del río Lacramarca
C	Terraza, colina montaña.	No es Probable la Licuación	Parte Sur de la Bahía de Chimbote

5.5.2 Grado 2

A causa de la carencia de unicidad en la relación del criterio geológico con las propiedades geotécnicas, los mapas de susceptibilidad basados en criterios geológicos generalmente no proporcionan información definitiva para evaluaciones específicas del lugar. Es por eso que investigaciones adicionales se requieren para tales evaluaciones como la interpretación de fotografías aéreas para definir las unidades geomorfológicas y geológicas detalladas, estudio del área para clasificar unidades pertinentes a la susceptibilidad de licuación. La mejor manera de evaluar la susceptibilidad de licuación es hacer uso de las correlaciones pasadas de licuación versus la configuración geológica y geomorfológicas. En el capítulo 3, mediante la tabla 3.2 “Susceptibilidad estimada de licuación para depósitos sedimentarios durante movimientos fuertes (Youd y Perkins, 1978)”, podemos deducir que Chimbote al encontrarse en la zona costera con una extensa distribución de suelos no cohesivos, presenta susceptibilidad de ocurrencia de licuación de moderado a alto, como se muestra en la siguiente tabla:

Tipo de Depósito	Distribución General de suelos no cohesivos en depósitos	Probabilidad que los Sedimentos no Cohesivos Saturados, podrían ser susceptibles a la Licuación (por la edad del depósito)			
		< 500 años	Holoceno	Pleistoceno	Pre Pleistoceno
Zona Costera					
Delta	Extenso	Muy alto	Alto	Bajo	Muy Bajo
Estuarino	Localmente variable	Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo
Costa	Localmente variable	Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo

También podemos hacer uso de la tabla 3.3 “Susceptibilidad estimada de licuación de Unidades Geomorfológicas sujetas a movimientos del terreno con intensidad de 8 MM” del capítulo 3, presentando algunas condiciones geomorfológicas que se encuentran en Chimbote, de la siguiente manera:

Condiciones Geomorfológicas		Potencial de Licuación
Clasificación	Condiciones Específicas	
Abanico Aluvial	gradiente vertical es mayor que 0,5%	No es probable
	gradiente vertical es menor que 0,5%	Posible
Dique Natural	en la parte superior	Posible
	a orillas	Probable
Pantano		Posible
Delta		Posible
Duna de arena	Parte superior de la duna	No es probable
	Ladera baja de la duna	Probable
Playa	Playa	No es probable
	Playa artificial	Probable
Muelle		Probable

5.5.3 Grado 3

Este grado de evaluación es un nivel detallado de zonificación, en este tipo de zonificación se requiere de investigaciones específicas adicionales tales como sondajes y muestras de suelos para analizar su resistencia a la licuación en el laboratorio. Los resultados son muy confiables si el número de pozos perforados son lo suficientes y representativos. Para el caso del presente trabajo es posible utilizar este grado de evaluación debido a la disponibilidad de la información técnica de la ciudad de Chimbote, se ha trabajado con datos de la siguiente información:

56 sondajes SPT, consultores varios (1990).

11 sondajes SPT, CISMID- UNI (1990).

9 sondajes CPT, CISMID- UNI (1990).

38 sondajes SPT, consultores varios (1999).

Estos sondajes pueden ser localizados en el Plano de Ubicación de Sondajes (P-04).

5.6 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN

El potencial de licuación de la arenas saturadas de la ciudad de Chimbote ha sido realizada utilizando los métodos simplificados descritos en el capítulo 2; utilizando datos del ensayo de penetración estándar debido a que se posee gran cantidad de datos de campo para correlacionarlos con la resistencia del suelo a la licuación, así como gran cantidad de ensayos SPT disponibles de la ciudad de Chimbote; Parra, D. (1991). A continuación se presenta los parámetros de evaluación del potencial de licuación de la Ciudad de Chimbote utilizados en en el presente trabajo de investigación. En primer lugar se menciona el sismo de diseño seleccionado, luego el método de evaluación, el procesamiento y los resultados del proceso de evaluación.

5.6.1 Sismo de Diseño

La región peruana es un segmento del cinturón circumpacífico, donde además de la alta sismicidad existente en la costa peruana, se aprecia una gran actividad sísmica en la denominada zona subandina, localizada en la selva alta. Por otro lado, la gran parte de los eventos sísmicos ocurridos en el país son producto de la interacción de las placas Sudamericana y de Nazca, en forma de subducción de esta última, determinando diferentes características sísmicas entre el litoral y el interior del país. Para el presente trabajo de investigación se optó con elegir la magnitud del sismo de diseño de:

$M_s=7,5$ ----- $a = 0,15g$, en un primer análisis; y luego

$M_s=7,5$ ----- $a = 0,30g$ en el segundo caso

M_s = magnitud expresada en ondas de superficie

a = aceleración máxima en la superficie del terreno en gals.

g = aceleración de la gravedad en gals.

Estos parámetros del sismo de diseño se eligieron con la finalidad de hacer una comparación con la investigación realizada en la ciudad de Chimbote por el MSc. Denys Parra Murrugarra para optar el título de Ingeniero Civil.

Es importante indicar que la ocurrencia de un terremoto de cierta magnitud inducirá aceleraciones de diferente amplitud en las diferentes áreas de la ciudad, dependiendo de las condiciones locales del suelo, tal como se ha evidenciado en diversos terremotos ocurridos en todo el planeta. Por lo tanto, los parámetros del sismo de diseño anteriormente indicados han sido establecidos para uniformizar las condiciones de los depósitos de suelo con fines de análisis y evaluación de licuación, lo cual constituye una técnica muy común utilizada en proyectos de zonificación.

5.6.2 Método de Evaluación Aplicado

La evaluación del potencial de licuación se ha basado principalmente en los datos de campo obtenidos de los sondajes SPT recopilados, utilizando para ello el método simplificado de Seed e Idriss, el cual se encuentra descrito en el capítulo 2 del presente trabajo. Este método es uno de los más utilizados en el campo de la ingeniería geotécnica, por lo tanto es el más recomendable.

5.6.3 Procesamiento

Los métodos simplificados para la evaluación de la licuación han sido codificados en el lenguaje de programación Visual Basic, la cual emplea el entorno windows, que hace más fácil el manejo del software para el usuario. Se evaluó la licuación en la ciudad de Chimbote con sismos de 0.15g y 0.30g de aceleración máxima superficial y de $M_s = 7,5$ para todos los sondajes SPT recopilados en este estudio. En forma general se puede indicar que se evaluó tanto la relación de esfuerzos cíclicos actuantes como los resistentes,

para que finalmente se comparen en el Factor de Relación de Licuación FRL el cual se expresa de la siguiente manera:

$$FRL = \frac{\tau_d / \bar{\sigma}_v}{\tau_l / \bar{\sigma}_v}$$

donde :

$\tau_d / \bar{\sigma}_v$ = Relación de esfuerzos cíclicos resistentes

$\tau_l / \bar{\sigma}_v$ = Relación de esfuerzos cíclicos actuantes

Si $FRL > 1$, no se producirá licuación

Si $FRL \leq 1$, se producirá licuación

5.6.4 Resultados

Con los datos de la información recopilada y los sismos de diseño se procedió a ejecutar el programa Licua Pro para evaluar el potencial de licuación de suelos utilizando el método de Seed e Idriss (1983). Los resultados de esta evaluación se presentan la tabla 5.1 donde se detalla para cada uno de ellos la existencia o no existencia del fenómeno de licuación.

Se presenta en el plano P-05 la zonificación de la ciudad de Chimbote considerando el potencial de licuación de los depósitos de suelo existentes en el área y que ha sido elaborado a partir de la evaluación efectuada y resumida en la tabla 5.1.

5.6.5 Interpretación de Resultados

Se observa que para el sismo de diseño con una aceleración máxima superficial de 0,15g, la zona propensa a sufrir licuación es la parte central de la Bahía de Chimbote, abarcando el pueblo joven de San Juan y el mercado mayorista y parte de los pueblos Jóvenes de Miraflores Alto, Miraflores 1ª zona, Miraflores III zona y de la urbanización El Trapecio. Esta zona, según el plano geológico, corresponde a los depósitos aluviales del río Lacramarca; suelo arenoso cubierto por una delgada capa de tierra agrícola, gravas por debajo de los 10 m de profundidad; el nivel freático se encuentra a poca profundidad.

Tabla 5.1 : Resultados de la evaluación de Licuación en los sondeos recopilados, con Ms = 7,5 en la escala de Richter, utilizando el software Licua Pro.

S : SI EXISTE LICUACIÓN
 N : NO EXISTE LICUACIÓN
 P : PROBABLE EXISTENCIA DE LICUACIÓN

N°	SONDAJE	Denominación	UBICACIÓN	LICUACIÓN	
				a _{max} superficial	
				0.15g	0.30g
1	SS1-1	SU-1	Entre Av. Enrique Meiggs y Jr. Ayacucho	S	S
2	SS1-2	SU-2	Entre Av. Enrique Meiggs y Jr. Ayacucho	N	N
3	SS2	SU-3	Frente a PetroPerú (Urb. El Trapecio)	N	S
4	SS3	SU-4	Entre Jr. Miguel Grau y Pje. Los Laureles (Miraflores Alto)	P	S
5	SS4	SU-5	Entre Jr. Ladislao Espinar y Jr. Leoncio Prado (El Acero)	N	N
6	SS5-1	SU-6	Entre Jr. Ladislao Espinar y Jr. Roque Saenz Peña	N	N
7	SS5-2	SU-7	Entre Jr. Ladislao Espinar y Jr. Roque Saenz Peña	N	P
8	S1-CH	SU-8	Río Lacramarca, altura A.H. Villa España	S	S
9	S2-CH	SU-9	Río Lacramarca y Cerro Tres Cabezas (Reservorio)	S	S
10	S3-CH	SU-10	Av. Huánuco y Prol. Ladislao Espinar (A.H. Miraflores Alto)	N	S
11	S4-CH	SU-11	Prol. Leoncio Prado y Jr. Ica (A.H. Miraflores 1° Zona)	N	S
12	S5-CH	SU-12	Entre PetroPerú y Urb. Trapecio (Cámara de bombeo)	P	S
13	S6-CH	SU-13	Av. Los Pescadores, altura de la pesquera Salaverry	N	P
14	S7-CH	SU-14	Jr. José Balta, alt. De la Mza. 8 (Urb. 21 abril - Zona A)	N	N
15	S8-CH	SU-15	Prol. Haya de la Torre, C.E.Sta. Rosa (Urb. La Caleta)	N	P
16	S9-CH	SU-16	Altura de la Laguna de Oxidación (A.H. Villa María)	N	S
17	S10-CH	SU-17	Altura de la Laguna de Oxidación (A.H. Villa María)	N	N
18	S11-CH	SU-18	Entre Av. Costanera y Jr. San Martín (A.H. La Libertad)	N	S
19	S12-CH	SU-19	Planta de Tratamiento del Dist. Nuevo Chimbote	N	N
20	S13-CH	SU-20	Planta de Tratamiento del Dist. Nuevo Chimbote	N	N
21	S14-CH	SU-21	Entre Av. Costanera y Jr. Junín (A.H. Florida Baja)	N	P
22	S15-CH	SU-22	Entre Av. Costanera y Av. Huánuco (A.H. Florida Baja)	N	N
23	S16-CH	SU-23	Av. Malecón Grau (Cámara de cambio)	N	P
24	S17-CH	SU-24	Av. Malecón Grau (Jr. Libertad y Jr. Lambayaque)	N	P
25	S18-CH	SU-25	Av. Expedientes entre Jr. Tumbes (Plaza Grau)	P	P
26	S19-CH	SU-26	Av. Malecón Grau (Jr. Carlos de los Heros)	S	P
27	S20-CH	SU-27	Av. Malecón Grau (Muelle)	S	S
28	S21-CH	SU-28	Entre Malecón Grau y la Av. Industrial	S	S
29	S22-CH	SU-29	Entre Av. Manuel Ruiz y Av. Pardo (Casco Urbano)	N	N
30	S23-CH	SU-30	Entre Jr. San Pedro y Jr. 28 de julio (A.H. Florida Baja)	N	S
31	S24-CH	SU-31	Av. Meigs cuadra 15 (A.H. Florida Baja)	N	P
32	S25-CH	SU-32	Av. Camino Real Mza. 12 (Altura Jr. San Pedro)	S	S
33	S26-CH	SU-33	Entre Av. Enrique Meiggs y Jr. San Martín	N	N
34	S27-CH	SU-34	Urb. Trapecio Mza. U (Panamericana)	N	N
35	S28-CH	SU-35	Av. Los Pescadores F (Zona Industrial)	N	S
36	S29-CH	SU-36	A.H. Villa María (Laguna de Oxidación)	N	S
37	S30-CH	SU-37	Urb. El Carmen Mza. 24 (A.H. El Porvenir)	N	N
38	S31-CH	SU-38	Jr. Garcilazo de la Vega y Av. Enrique Palacios	N	N
39	S-1	S-1	U.del Santa, Urb. Buenos Aires	N	N
40	S-2	S-2	U.San Pedro, Urb.Los Pinos	N	N
41	S-3	S-3	Colegio Erasmo Roca, La Caleta	N	S
42	S-4	S-4	Colegio José Olaya, Miraflores Alto	S	S
43	S-5	S-5	Colegio César Vallejo , 1° de Mayo	N	N
44	S-6	S-6	Colegio La Libertad, La Libertad	N	S
45	S-7	S-7	Colegio Inmaculada, Bolívar Bajo	N	N
46	S-8	S-8	Pozo N° 5 , 21 de Abril	N	N
47	S-9	S-9	Pronadret, Miramar Bajo	N	N
48	S-10	S-10	Col.Alcides Carrión, Miraflores Bajo	N	S
49	S-11	S-11	Colegio Fe y Alegría, San Juan	P	S
50	SA-1	SA-1	Iglesia Mormón, Florida Alta	N	N
51	SA-2	SA-2	Iglesia Mormón, Florida Alta	N	S
52	SA-3	SA-3	Iglesia Mormón, Florida Alta	N	S
53	SA-4	SA-4	Banco Industrial, Casco Urbano	N	S
54	SA-5	SA-5	Banco Internacional, Casco Urbano	N	S

55	SA-6	SA-6	Banco Internacional, Casco Urbano	N	S
56	SA-7	SA-7	Centro de Salud, El Progreso	N	N
57	SA-8	SA-8	Centro de Salud, El Progreso	N	N
58	SA-9	SA-9	Biblioteca, U. del Santa	N	N
59	SA-10	SA-10	Biblioteca, U. del Santa	N	N
60	SA-11	SA-11	Sistema Portuario, La Caleta	S	S
61	SA-12	SA-12	Sistema Portuario, Trapecio Sur	S	S
62	SA-13	SA-13	Sistema Portuario, Trapecio Sur	S	S
63	SA-14	SA-14	Sistema Portuario, Trapecio Sur	S	S
64	SA-15	SA-15	Caja de Ah. de Lima, Casco Urbano	N	N
65	SA-16	SA-16	Caja de Ah. de Lima, Casco Urbano	N	N
66	SA-17	SA-17	Caja de Ah. de Lima, Casco Urbano	N	S
67	SA-18	SA-18	Banco CCC, Casco Urbano	N	S
68	SA-19	SA-19	Sider Perú, Zona Este Verde	N	N
69	SA-20	SA-20	Sider Perú, Zona Este Verde	N	N
70	SA-21	SA-21	Sider Perú, Zona Este Verde	N	S
71	SA-22	SA-22	Sider Perú, Zona Este Verde	N	S
72	SA-23	SA-23	Sider Perú, Zona Este Verde	N	N
73	SA-24	SA-24	Sider Perú, Zona Este Verde	N	S
74	SA-25	SA-25	Sider Perú, Zona Este Verde	N	N
75	SA-26	SA-26	Sider Perú, Zona Este Azul	N	S
76	SA-27	SA-27	Sider Perú, Zona Este Azul	N	S
77	SA-28	SA-28	Sider Perú, Zona Este Azul	N	N
78	SA-29	SA-29	Sider Perú, Zona Este Azul	N	P
79	SA-30	SA-30	Sider Perú, Zona Este Azul	N	S
80	SA-31	SA-31	Sider Perú, Zona Este Azul	N	S
81	SA-32	SA-32	Sider Perú, Zona Este Azul	N	S
82	SA-33	SA-33	Sider Perú, Zona Este Azul	N	S
83	SA-34	SA-34	Sider Perú, Zona Este Azul	N	S
84	SA-35	SA-35	Alimentos Americanos, Gran Trapecio	N	S
85	SA-36	SA-36	Alimentos Americanos, Gran Trapecio	N	S
86	SA-37	SA-37	Mercado Mayorista, Alto Perú	S	S
87	SA-38	SA-38	Mercado Mayorista, Alto Perú	S	S
88	SA-39	SA-39	Mercado Mayorista, Alto Perú	S	S
89	SA-40	SA-40	Mercado Mayorista, Alto Perú	N	S
90	SA-41	SA-41	Mercado Mayorista, Alto Perú	S	S
91	SA-42	SA-42	Mercado Mayorista, Alto Perú	N	S
92	SA-43	SA-43	Mercado Mayorista, Alto Perú	S	S
93	SA-44	SA-44	Mercado Mayorista, Alto Perú	S	S
94	SA-45	SA-45	Mercado Mayorista, Alto Perú	S	S
95	SA-46	SA-46	Mercado Mayorista, Alto Perú	S	S
96	SA-47	SA-47	Mercado Mayorista, Alto Perú	S	S
97	SA-48	SA-48	Mercado Mayorista, Alto Perú	S	S
98	SA-49	SA-49	Mercado Mayorista, Alto Perú	S	S
99	SA-50	SA-50	Mercado Mayorista, Alto Perú	S	S
100	SA-51	SA-51	Mercado Mayorista, Alto Perú	N	N
101	SA-52	SA-52	Mercado Mayorista, Alto Perú	S	S
102	SA-53	SA-53	Mercado Mayorista, Alto Perú	S	S
103	SA-54	SA-54	Mercado Mayorista, Alto Perú	N	S
104	SA-55	SA-55	Mercado Mayorista, Alto Perú	S	S
105	SA-56	SA-56	Mercado Mayorista, Alto Perú	S	S
106	SA-57	SA-57	Sider Perú, Zona Marrón	N	N
107	SA-58	SA-58	Sider Perú, Zona Marrón	N	N
108	SA-59	SA-59	Sider Perú, Zona Marrón	N	N
109	SA-60	SA-60	Sider Perú, Zona Marrón	N	N
110	SA-61	SA-61	Sider Perú, Zona Marrón	N	N
111	SA-62	SA-62	Sider Perú, Zona Marrón	N	N
112	P-1	P-1	Villa María	N	S
113	P-2	P-2	Campo Ferial	N	S
114	P-3	P-3	Miramar Bajo	S	S
115	P-4	P-4	Mercado Mayorista	N	S
116	P-5	P-5	Miraflores, 3° Zona	S	S
117	P-6	P-6	Florida Alta	N	S
118	P-7	P-7	Urb. Trapecio	S	S
119	P-8	P-8	Miramar Bajo	P	S
120	P-9	P-9	Dos de Mayo	P	S

Para un sismo de diseño con aceleración de 0,30g se observa que el área propensa a sufrir licuación, se extiende considerablemente tanto por el norte como por el sur; al NorOeste alcanza hasta la zona del vivero forestal y gran parte del casco urbano. En estas zonas podemos encontrar el nivel freático muy alto, encontrándonos con algunas zonas pantanosas donde el subsuelo es de arena cubierta por una capa delgada de limo.

Por el sur los efectos de licuación llegan aproximadamente a la zona industrial “27 de Octubre”, donde se encuentran depósitos de arenas eólicas recientes, arenas sueltas o semidensas, de varios metros de espesor.

5.7 EVALUACIÓN DEL DAÑO INDUCIDO POR LICUACIÓN

La evaluación del potencial de licuación anteriormente llevado a cabo nos proporciona información de carácter general acerca de la ocurrencia del fenómeno de licuación en los depósitos de suelo propensos al mismo. Sin embargo, el propósito de la ingeniería no es sólo poder determinar si en un área específica ocurrirá o no licuación, es importante también saber si en esta área se presentará daño superficial inducido por la ocurrencia de licuación en los estratos inferiores. En lo posible se tendrá que definir el grado de severidad en los efectos destructivos causado por este fenómeno

5.7.1 Sismo de Diseño

Al igual que en la evaluación del potencial de licuación visto anteriormente, se seguirá utilizando el mismo sismo de diseño, con sus parámetros respectivos: de $M_s = 7.5$ y con aceleraciones máximas superficiales de 0.15g y 0,30g.

5.7.2 Método de Evaluación Aplicado

En el presente trabajo, para evaluar el daño inducido por el fenómeno de licuación en la ciudad de Chimbote se empleará el criterio del estrato superficial no licuable, conocido también como el método de Ishihara (1985). El software LICUA PRO nos permite visualizar los estratos licuables y no licuables después de haber evaluado el potencial de licuación.

5.7.3 Procesamiento

Para esto se usa la gráfica de la figura 3.22 del capítulo 3; comparando el estrato no licuable superficial (H1) con el estrato licuable subyacente (H2) teniendo en cuenta la aceleración máxima superficial del terreno; si el espesor del estrato licuable (la ordenada de la gráfica, en el punto H1,H2) está por encima de la gráfica respectiva a la aceleración, entonces se concluye que existirá daño inducido por licuación, de lo contrario no existirá daño por licuación. La evaluación fue llevada a cabo para cada sondaje recopilado en el presente trabajo de investigación.

5.7.4 Resultados

Una vez conocido el área susceptible a licuar, procedemos a realizar la evaluación del daño inducido por este fenómeno mediante el método o criterio del estrato superficial no licuable, desarrollado por Ishihara (1985), mediante “Licua Pro” podemos evaluar el daño inducido tan sólo digitando el valor del espesor del estrato superficial no licuable (H1) y el valor del espesor del estrato licuable (H2). Los resultados de dicha evaluación los podemos encontrar en la tabla 5.2.

Como resultado final de la evaluación del daño inducido por licuación se presenta el plano P-06 y se propone que sea tomado en cuenta con fines de planes futuros de mitigación que deben llevarse a cabo en el área de la ciudad de Chimbote, con el objetivo de disminuir los daños potenciales que podrían causar terremotos severos.

5.7.5 Interpretación de Resultados

Para una aceleración de 0,15g del terremoto de diseño, observamos que el área de daño corresponde a un 25% aproximadamente del área de licuación, concentrándose en la zona del mercado mayorista, en el A.H. 10 de Setiembre, en la zona de Miraflores Reubicación y el A.H. Ramal Playa. Por otro lado, para un sismo con aceleración de 0,30g, se observa que el área de daño equivale aproximadamente a un 60% del área de licuación respectivo a dicha aceleración, extendiéndose por el Nor-Oeste hacia el vivero forestal, por el centro hacia el mercado mayorista y sus alrededores, así como también gran parte del casco urbano y proximidades del río Lacramarca.

Se puede concluir que para un sismo de diseño de $M_s=7.5$ y las máximas aceleraciones superficiales consideradas en el análisis, las estructuras cimentadas en los suelos de las zonas anteriormente mencionadas pueden sufrir daño, para lo cual se deberán tomar medidas preventivas que un terremoto severo puede provocar.

Finalmente se puede concluir que los efectos destructivos del terremoto del 31 de mayo de 1970 y las diferentes evidencias de la ocurrencia de licuación en diferentes lugares de Chimbte, han sido verificados en este trabajo, tal como se puede observar apartir de la comparación de los resultados de este estudio (Plano P-06) y el plano de efectos superficiales de licuación (Plano P-03).

Tabla 5.2: Resultados de la evaluación del daño inducido por licuación en los sondeos recopilados, con Ms = 7,5 en la escala de Richter, utilizando el software Licua Pro.

S : SI EXISTE DAÑO

N : NO EXISTE DAÑO

P : PROBABLE EXISTENCIA DE DAÑO

N°	SONDAJE	Denominación	UBICACIÓN	DAÑO	
				a _{max} superficial	
				0.15g	0.30g
1	SS1-1	SU-1	Entre Av. Enrique Meiggs y Jr. Ayacucho	S	S
2	SS1-2	SU-2	Entre Av. Enrique Meiggs y Jr. Ayacucho	N	N
3	SS2	SU-3	Frente a PetroPerú (Urb. El Trapecio)	N	N
4	SS3	SU-4	Entre Jr. Miguel Grau y Pje. Los Laureles (Miraflores Alto)	P	S
5	SS4	SU-5	Entre Jr. Ladislao Espinar y Jr. Leoncio Prado (El Acero)	N	N
6	SS5-1	SU-6	Entre Jr. Ladislao Espinar y Jr. Roque Saenz Peña	N	N
7	SS5-2	SU-7	Entre Jr. Ladislao Espinar y Jr. Roque Saenz Peña	N	P
8	S1-CH	SU-8	Río Lacramarca, altura A.H. Villa España	P	S
9	S2-CH	SU-9	Río Lacramarca y Cerro Tres Cabezas (Reservorio)	P	S
10	S3-CH	SU-10	Av. Huánuco y Prol. Ladislao Espinar (A.H. Miraflores Alto)	N	S
11	S4-CH	SU-11	Prol. Leoncio Prado y Jr. Ica (A.H. Miraflores 1° Zona)	N	P
12	S5-CH	SU-12	Entre PetroPerú y Urb. Trapecio (Cámara de bombeo)	N	S
13	S6-CH	SU-13	Av. Los Pescadores, altura de la pesquera Salaverry	N	N
14	S7-CH	SU-14	Jr. José Balta, alt. De la Mza. 8 (Urb. 21 abril - Zona A)	N	N
15	S8-CH	SU-15	Prol. Haya de la Torre, C.E.Sta. Rosa (Urb. La Caleta)	N	N
16	S9-CH	SU-16	Altura de la Laguna de Oxidación (A.H. Villa María)	N	S
17	S10-CH	SU-17	Altura de la Laguna de Oxidación (A.H. Villa María)	N	N
18	S11-CH	SU-18	Entre Av. Costanera y Jr. San Martín (A.H. La Libertad)	N	S
19	S12-CH	SU-19	Planta de Tratamiento del Dist. Nuevo Chimbote	N	N
20	S13-CH	SU-20	Planta de Tratamiento del Dist. Nuevo Chimbote	N	N
21	S14-CH	SU-21	Entre Av. Costanera y Jr. Junín (A.H. Florida Baja)	N	N
22	S15-CH	SU-22	Entre Av. Costanera y Av. Huánuco (A.H. Florida Baja)	N	N
23	S16-CH	SU-23	Av. Malecón Grau (Cámara de cambio)	N	N
24	S17-CH	SU-24	Av. Malecón Grau (Jr. Libertad y Jr. Lambayaque)	N	N
25	S18-CH	SU-25	Av. Expedientes entre Jr. Tumbes (Plaza Grau)	N	N
26	S19-CH	SU-26	Av. Malecón Grau (Jr. Carlos de los Heros)	N	N
27	S20-CH	SU-27	Av. Malecón Grau (Muelle)	N	S
28	S21-CH	SU-28	Entre Malecón Grau y la Av. Industrial	N	S
29	S22-CH	SU-29	Entre Av. Manuel Ruiz y Av. Pardo (Casco Urbano)	N	N
30	S23-CH	SU-30	Entre Jr. San Pedro y Jr. 28 de julio (A.H. Florida Baja)	N	S
31	S24-CH	SU-31	Av. Meigs cuadra 15 (A.H. Florida Baja)	N	N
32	S25-CH	SU-32	Av. Camino Real Mza. 12 (Altura Jr. San Pedro)	P	S
33	S26-CH	SU-33	Entre Av. Enrique Meiggs y Jr. San Martín	N	N
34	S27-CH	SU-34	Urb. Trapecio Mza. U (Panamericana)	N	N
35	S28-CH	SU-35	Av. Los Pescadores F (Zona Industrial)	N	S
36	S29-CH	SU-36	A.H. Villa María (Laguna de Oxidación)	N	N
37	S30-CH	SU-37	Urb. El Carmen Mza. 24 (A.H. El Porvenir)	N	N
38	S31-CH	SU-38	Jr. Garcilazo de la Vega y Av. Enrique Palacios	N	N
39	S-1	S-1	U. del Santa, Urb. Buenos Aires	N	N
40	S-2	S-2	U. San Pedro, Urb. Los Pinos	N	N
41	S-3	S-3	Colegio Erasmo Roca, La Caleta	N	S
42	S-4	S-4	Colegio José Olaya, Miraflores Alto	N	S
43	S-5	S-5	Colegio César Vallejo, 1° de Mayo	N	N
44	S-6	S-6	Colegio La Libertad, La Libertad	N	N
45	S-7	S-7	Colegio Inmaculada, Bolívar Bajo	N	N
46	S-8	S-8	Pozo N° 5, 21 de Abril	N	N
47	S-9	S-9	Pronadret, Miramar Bajo	N	N
48	S-10	S-10	Col. Alcides Carrión, Miraflores Bajo	N	S
49	S-11	S-11	Colegio Fe y Alegría, San Juan	N	S
50	SA-1	SA-1	Iglesia Mormón, Florida Alta	N	N
51	SA-2	SA-2	Iglesia Mormón, Florida Alta	N	S
52	SA-3	SA-3	Iglesia Mormón, Florida Alta	N	S
53	SA-4	SA-4	Banco Industrial, Casco Urbano	N	N
54	SA-5	SA-5	Banco Internacional, Casco Urbano	N	P

55	SA-6	SA-6	Banco Internacional, Casco Urbano	N	N
56	SA-7	SA-7	Centro de Salud, El Progreso	N	N
57	SA-8	SA-8	Centro de Salud, El Progreso	N	N
58	SA-9	SA-9	Biblioteca, U. del Santa	N	N
59	SA-10	SA-10	Biblioteca, U. del Santa	N	N
60	SA-11	SA-11	Sistema Portuario, La Caleta	S	S
61	SA-12	SA-12	Sistema Portuario, Trapecio Sur	S	S
62	SA-13	SA-13	Sistema Portuario, Trapecio Sur	S	S
63	SA-14	SA-14	Sistema Portuario, Trapecio Sur	S	S
64	SA-15	SA-15	Caja de Ah. de Lima, Casco Urbano	N	N
65	SA-16	SA-16	Caja de Ah. de Lima, Casco Urbano	N	N
66	SA-17	SA-17	Caja de Ah. de Lima, Casco Urbano	N	P
67	SA-18	SA-18	Banco CCC, Casco Urbano	N	N
68	SA-19	SA-19	Sider Perú, Zona Este Verde	N	N
69	SA-20	SA-20	Sider Perú, Zona Este Verde	N	N
70	SA-21	SA-21	Sider Perú, Zona Este Verde	N	S
71	SA-22	SA-22	Sider Perú, Zona Este Verde	N	S
72	SA-23	SA-23	Sider Perú, Zona Este Verde	N	N
73	SA-24	SA-24	Sider Perú, Zona Este Verde	N	S
74	SA-25	SA-25	Sider Perú, Zona Este Verde	N	N
75	SA-26	SA-26	Sider Perú, Zona Este Azul	N	P
76	SA-27	SA-27	Sider Perú, Zona Este Azul	N	S
77	SA-28	SA-28	Sider Perú, Zona Este Azul	N	N
78	SA-29	SA-29	Sider Perú, Zona Este Azul	N	N
79	SA-30	SA-30	Sider Perú, Zona Este Azul	N	N
80	SA-31	SA-31	Sider Perú, Zona Este Azul	N	P
81	SA-32	SA-32	Sider Perú, Zona Este Azul	N	N
82	SA-33	SA-33	Sider Perú, Zona Este Azul	N	S
83	SA-34	SA-34	Sider Perú, Zona Este Azul	N	S
84	SA-35	SA-35	Alimentos Americanos, Gran Trapecio	N	S
85	SA-36	SA-36	Alimentos Americanos, Gran Trapecio	N	S
86	SA-37	SA-37	Mercado Mayorista, Alto Perú	N	S
87	SA-38	SA-38	Mercado Mayorista, Alto Perú	S	S
88	SA-39	SA-39	Mercado Mayorista, Alto Perú	P	S
89	SA-40	SA-40	Mercado Mayorista, Alto Perú	N	N
90	SA-41	SA-41	Mercado Mayorista, Alto Perú	S	S
91	SA-42	SA-42	Mercado Mayorista, Alto Perú	N	S
92	SA-43	SA-43	Mercado Mayorista, Alto Perú	P	S
93	SA-44	SA-44	Mercado Mayorista, Alto Perú	N	P
94	SA-45	SA-45	Mercado Mayorista, Alto Perú	P	S
95	SA-46	SA-46	Mercado Mayorista, Alto Perú	N	S
96	SA-47	SA-47	Mercado Mayorista, Alto Perú	P	S
97	SA-48	SA-48	Mercado Mayorista, Alto Perú	S	S
98	SA-49	SA-49	Mercado Mayorista, Alto Perú	P	S
99	SA-50	SA-50	Mercado Mayorista, Alto Perú	P	S
100	SA-51	SA-51	Mercado Mayorista, Alto Perú	N	N
101	SA-52	SA-52	Mercado Mayorista, Alto Perú	S	S
102	SA-53	SA-53	Mercado Mayorista, Alto Perú	N	S
103	SA-54	SA-54	Mercado Mayorista, Alto Perú	N	S
104	SA-55	SA-55	Mercado Mayorista, Alto Perú	N	S
105	SA-56	SA-56	Mercado Mayorista, Alto Perú	P	S
106	SA-57	SA-57	Sider Perú, Zona Marrón	N	N
107	SA-58	SA-58	Sider Perú, Zona Marrón	N	N
108	SA-59	SA-59	Sider Perú, Zona Marrón	N	N
109	SA-60	SA-60	Sider Perú, Zona Marrón	N	N
110	SA-61	SA-61	Sider Perú, Zona Marrón	N	N
111	SA-62	SA-62	Sider Perú, Zona Marrón	N	N
112	P-1	P-1	Villa María	N	S
113	P-2	P-2	Campo Ferial	N	N
114	P-3	P-3	Miramar Bajo	S	S
115	P-4	P-4	Mercado Mayorista	N	P
116	P-5	P-5	Miraflores, 3º Zona	P	S
117	P-6	P-6	Florida Alta	N	S
118	P-7	P-7	Urb. Trapecio	P	S
119	P-8	P-8	Miramar Bajo	N	S
120	P-9	P-9	Dos de Mayo	N	S

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

La ciudad de Chimbote se encuentra sobre la planicie aluvial del río Lacramarca y sobre arenas eólicas al sur de la ciudad. Los depósitos están constituidos principalmente por arenas finas limpias y arenas finas limosas, mal graduadas, saturadas debido a la presencia de nivel freático cerca de la superficie del terreno natural. La compacidad de los depósitos es suelta a semicompacta en los estratos superiores, aumentando la compacidad con la profundidad. Estas condiciones asociadas a la sismicidad de la zona, convierten a los depósitos de suelo de Chimbote como potencialmente licuables.

Con el terremoto del 31 de mayo de 1970 se produjeron evidencias de la ocurrencia de licuación en grandes áreas de Chimbote, como se puede apreciar en el plano P-03, tales como asentamientos, desplazamientos laterales, grietas, eyección de lodos y arenas; estas manifestaciones confirman las características potencialmente licuables de los depósitos arenosos de la ciudad de Chimbote, teniendo en cuenta que en dichas zonas es probable que ocurra licuación nuevamente.

Para identificar depósitos potencialmente licuables es necesario evaluar toda la información disponible y confiable de la cual los aspectos más importantes son: el tipo de suelo, la estratificación del depósito, nivel freático y la densidad de la arena.

Tomando en cuenta algunas consideraciones de riesgo sísmico en el Perú se ha elegido convenientemente los valores de aceleraciones de 0,15g y 0,30g para una magnitud de sismo de diseño de 7,5 para la evaluación del potencial de licuación como para la evaluación del daño inducido por este fenómeno.

Se ha considerado que la energía liberada en el ensayo de penetración estandar corresponde a un 60%, en todos los ensayos recopilados. La corrección por energía en

nuestros casos sólo afecta en los métodos simplificados japoneses de Tokimatsu y Yoshimi e Iwasaki y Tatsuoka, las cuales trabajan con una energía liberada del 75%.

La evaluación del potencial de licuación no posee correcciones de magnitud porque trabajamos con una magnitud de sismo de diseño de 7,5. Tampoco se ha considerado correcciones por inclinación ya que Chimbote se encuentra en una planicie.

Para la evaluación del potencial de licuación se desarrolló el programa Licua Pro en base al programa DLICUA elaborado por el Ing. Denys Parra Murrugarra, incorporándosele correcciones por energía liberada en el ensayo SPT, por magnitud del sismo, por inclinación y por sobrecarga. También se ha incluido los criterios que evalúan el daño inducido por el fenómeno de licuación como el método del espesor del estrato superficial no licuable (Ishihara, 1985) y el método del índice del potencial de licuación propuesto por Iwasaki y Tokimatsu.

Mediante “Licua Pro” se evaluó el daño inducido por licuación tan sólo digitando el valor del espesor del estrato superficial no licuable (H1) y el valor del espesor del estrato licuable (H2), según el método de Ishihara (1985). Los resultados de dicha evaluación los podemos encontrar en la tabla 4.2, en la cual se observa que en algunos sondeos existe daño inducido por licuación y en otros sólo existe licuación sin causar daño superficial; se elaboró el Plano del Daño Inducido por Licuación (P-06).

El plano P-06 es el resultado final de la evaluación del daño inducido por licuación, este plano se propone tomarlo en cuenta en futuros planes de mitigación que debe de llevarse a cabo en el área de la ciudad de Chimbote, con el objetivo de disminuir los daños potenciales que podrían causar terremotos severos.

El presente Software Licua Pro desarrollado a través de Visual Basic, es de fácil aprendizaje pues posee una ayuda incorporada que nos permitirá solucionar cualquier duda, ya que se explica con detalles cada método empleado tanto en la evaluación de licuación como del daño producido por este fenómeno. Al poseer entorno Windows nos permite corregir los datos equívocos inmediatamente. Incluso se puede cambiar los datos iniciales del sismo de diseño, para ver en pantalla el incremento de daño, o

saber a partir de que aceleración y /o magnitud de sismo pueda ocurrir dicho daño. El programa también posee una opción para exportar a Word para poder editar los resultados.

En la tabla 4.1 se presenta la evaluación del potencial de licuación por el método simplificado de Seed e Idriss con el programa de Licua Pro se detalla para cada uno los sondajes recopilados si existe o no el fenómeno de licuación. Esta evaluación a servido para la elaboración del plano “Potencial de Licuación” (P-05).

En el plano del Potencial de Licuación se observa que para una aceleración máxima superficial de 0,15g de un terremoto de diseño de $M_s=7,5$, la zona propensa a sufrir licuación es la parte central de la Bahía de Chimbote, abarcando el pueblo joven de San Juan, el mercado mayorista, parte de los pueblos Jóvenes de Miraflores Alto, Miraflores 1ª zona, Miraflores III zona y de la urbanización El Trapecio. Esta zona, según el plano geológico, corresponde a los depósitos aluviales del río Lacramarca; suelo arenoso cubierto por una delgada capa de tierra agrícola, gravas por debajo de los 10 m de profundidad; el nivel freático se encuentra a poca profundidad. Para un sismo de diseño con aceleración de 0,30g se observa que el área propensa a sufrir licuación, se extiende considerablemente tanto por el norte como por el sur; al NorOeste alcanza hasta la zona del vivero forestal y gran parte del casco urbano. En estas zonas podemos encontrar el nivel freático muy alto, encontrándonos con frecuentes zonas pantanosas donde el subsuelo es de arena cubierta por una capa delgada de limo. Por el sur llega aproximadamente a la zona industrial “27 de Octubre”, donde se observa las arenas eólicas recientes, arenas sueltas o semidensas, de varios metros de espesor.

Según los resultados del Daño Inducido por Licuación se observa que para una aceleración de 0,15g del terremoto de diseño, el área de daño corresponde en relación a un 25% aproximadamente del área de licuación, concentrándose en la zona del mercado mayorista en el A.H. 10 de setiembre, en la zona de Miraflores Reubicación y el A.H. Ramal Playa. Y para un sismo con aceleración de 0,30g, se observa que el área de daño equivale aproximadamente a un 60% del área de licuación respectivo a dicha aceleración, extendiéndose por el Nor-Oeste hasta el vivero forestal, por el centro

hasta el mercado mayorista y sus alrededores, también gran parte del casco urbano y proximidades del río Lacramarca; con lo cual se puede concluir que en esta zona es posible que las estructuras sufran daño.

Para un sismo de diseño con magnitud $M_s=7.5$ y las máximas aceleraciones superficiales consideradas en el análisis, se considera que las estructuras cimentadas en los suelos de las zonas anteriormente mencionadas pueden sufrir daño, para lo cual se deberán tomar medidas preventivas para mitigar los efectos destructivos que un terremoto severo puede provocar.

Existe una excelente correlación entre la geología y la microzonificación sísmica con la zona de ocurrencia del fenómeno de licuación, las mismas que corresponden a las zonas III y IV y parcialmente la zona II al sur de la ciudad de Chimbote.

Finalmente se puede concluir que los efectos destructivos del terremoto del 31 de mayo de 1970 y las diferentes evidencias de la ocurrencia de licuación en diferentes lugares de Chimbote, han sido verificados en este trabajo, tal como se puede observar a partir de la comparación de los resultados de este estudio (Plano P-06) y el plano de efectos superficiales de licuación (Plano P-03).

6.2. RECOMENDACIONES

Hay básicamente 3 posibilidades para reducir los peligros de licuación cuando se diseña y construye nuevos edificios u otras estructuras como puentes, túneles y carreteras.

Evitar suelos susceptibles a licuación

La primera posibilidad, es evitar la construcción sobre los suelos susceptibles a licuación. Se recomienda utilizar las metodologías simplificadas para evaluar el potencial de licuación.

Construir Estructuras Resistentes a Licuación

Si es necesario construir sobre el suelo susceptible a licuación porque hay restricciones de espacio, ubicación desfavorable, u otras razones; puede ser posible hacer las estructuras resistentes a licuación por diseño de los elementos de cimentación para resistir los efectos de licuación, siendo necesario proyectar las cimentaciones mediante pilotes o realizar plateas de cimentación.

Mejorar el Suelo

La tercera opción involucra la mitigación del peligro de licuación mejorando la resistencia, densidad, y/o características del drenaje del suelo. Esto puede hacerse usando una variedad de técnicas de mejoramiento del suelo, como por ejemplo el mejoramiento de la compacidad del depósito mediante métodos conocidos como vibroflotación o pilotes de grava. En el caso de Chimbote no es posible plantear el abatimiento del nivel freático por drenaje para disminuir el potencial de licuación, debido a las condiciones topográficas de la ciudad, donde carece de desniveles adecuados para evacuar las aguas.

En proyectos de edificaciones en zonas propensas a sufrir daño por licuación se debe realizar estudios de suelos con ensayos SPT, ya que no es suficiente las excavaciones de calicatas porque no nos brindan los parámetros suficientes para evaluar el potencial de licuación. Ésta recomendación es muy importante y nunca debe de dejar de hacerse para evitar daños en la construcción y pérdidas de recursos.

Se debe incrementar los estudios de licuación en aquellas áreas que tienen mayor potencial, ejecutando mayor número de sondajes con ensayo estándar de penetración para evaluar con mayor precisión la ocurrencia de licuación y su correspondiente daño si existiese. Así tanto el mapa del potencial de licuación y el mapa del daño inducido se van mejorando y reconfigurando conforme se incremente el número de sondajes.

BIBLIOGRAFÍA

- ALVA, J., ISHIYAMA, Y., FUKUMOTO, Sh., KUMAGAI, Y., KUROIWA, J. Y TORRES, R. (1990). “El terremoto de Loma Prieta (San Francisco) del 17 de Octubre de 1989”, Universidad Nacional de Ingeniería, FIC-CISMID, Lima, Perú.
- ALVA, J. (1991). El Fenómeno de Licuación de Suelos y los casos ocurridos en el Perú, Conferencia presentada en Memorias del Seminario Taller de Dinámica de Suelos, CISMID-UNI, Lima, Perú.
- ATALA, C. (1992). Ensayo de Penetración Estandar (SPT), Conferencia presentada en el Seminario Taller de Mecánica de Suelos y Exploración Geotécnica, CISMID-UNI, Lima, Perú.
- CARRILLO A. (1970). “Algunas Apreciaciones del Comportamiento del Suelo en la Zona del Sismo de Ancash”, II Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Lima, Perú.
- CARRASCO, J. (1997). Visual Basic 5.0, Curso libre dictado en el Area de Capacitación del Centro de Extensión y Proyección Social (CEPS-UNI), Lima, Perú.
- DAVIS, R. & BERRIL, J. (1983). “Discussion of “Comparison of Liquefaction Theory with Field Observations”, *Geotechnique*, Vol. 34, N° 4, pp. 627-629.
- DECKER, M., HOLTZ, R. & KOVACS, W. (1984). “Energy Transfer of SPT Hammers”.
- DOUGLAS, B. & STRUTZNSKY, A. (1984). “SPT Hammer Energy Measurements and Piezocone”, Ertec Western, Inc., Report to U.S. Geological Survey.
- DUPRE, W.R. (1975). “Mapa Geológico y Potencial de Licuación para Depósitos Cuaternarios en la Ciudad de Santa Cruz”, California, U.S., geol. Survey, Misc. Field Studies Map MF-648.
- DUPRE, W.R. & TINSLEY, J.C., (1980). “Mapa Geológico y Potencial de Licuación del Norte de Monterey y del Sur de la Ciudad de Santa Cruz”, California, U.S. geol. Survey, Misc. Field Studies Map MF-1199.
- DUPRE, W.R. (1990). “Mapa Geológico y Susceptibilidad de Licuación de Depósitos Cuaternario en Monterey, Seaside, Spreckles y Valle del Carmel”, Ciudad de Monterey California, , U.S. geol. Survey, Misc. Field Studies Map MF-2096.
- ERICKSEN, G., PLAFKER, G. & FERNANDEZ-CONCHA, (1970). “Preliminary Report on the Geological Events Associated with the May 31, 1970 Perú Earthquake”, U.S. Geological Survey Circular 639.
- HENOSTROZA, G. (1997). Microsoft Visual Basic, Curso libre dictado en el Area de Capacitación del Centro de Extensión y Proyección Social (CEPS-UNI), Lima, Perú.
- HUAMAN, C. (1998). Análisis de Deformaciones Laterales Permanentes en Suelos Licuados, Conferencia presentada en el Seminario Internacional sobre Estabilidad Física de Depósitos de Relave, CISMID – UNI, Lima, Perú.

- IAI, S., TSUCHIDA, H., KOIZUMI, K. (1989). "Criterios de Licuación basados en Estudios de Campo con Estaciones Sismográficas", Suelos y Cimentaciones, Vol.29, N° 2, pp. 52-68.
- ISHIHARA, K. (1985). "Stability of Natural Deposits during Earthquake, Proc., of 11th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Vol. 1, pp. 321-376.
- ISHIHARA, K. (1986). Estabilidad de Depósitos Naturales durante terremotos, Universidad de Tokio, Japón.
- IWASAKI, T. , TATSUOKA, F. , TOKIDA, K. , y YASUDA, S. (1978). "Un Método Práctico para el estudio del Potencial de Licuación de Suelos basado en Casos estudiados en Japón", Proc. 2nd Conferencia Internacional de Microzonificación, Vol.2, pp.885-896.
- IWASAKI, T., TOKIDA, K., TATSUOKA, F., WATANABE, S., YASUDA, S. & SATO, H., (1982). "Microzonificación del Potencial de Licuación de Suelos usando Métodos Simplificados", Proc., 3rd Conf. Int. de Microzonificación, Vol.3, pp. 1319-1330.
- IWASAKI, T. (1986). "Soil Liquefaction Studies in Japan State of the Art", International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering".
- JAPAN WORKING GROUP FOR TC-4 COMMITTEE. (1992). Seismic Zoning on Geotechnical Hazards – DRAFT, Japón.
- KOTODA, K., WAKAMATSU, K. & OYA, M. (1988). "Mapa del Potencial de Licuación basado en la Clasificación Geomorfológica del Terreno", Proc., 9th Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, Tokyo, Vol.3, pp. 195-200.
- KRAMER, S. & SEED, B. (1988), "Initiation of Soil Liquefaction Under Static Loading Conditions", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 114, N° 4, pp. 412-430.
- KURIBAYASHI, E. & TATSUOKA, F.(1975). "Revisión del Comportamiento de Suelos Licuables durante Terremotos en Japón", Suelos y Cimentaciones, Vol. 15, N° 4, pp. 81-92.
- LIANG, N. (1983). "An Examination of the Standard Penetration Test with Comparisons to Other In Situ Tests", Senior Thesis, University of British Columbia.
- MORIMOTO, R., KOIZUMI, Y., MATSUDA, T., HAKUNO, M. & YAMAGUCHI, I. (1971). "Seismic Microzoning of Chimbote Area, Perú", Overseas Technical Cooperation Agency, Government of Japan.
- OYA, M., KOTODA, K., WAKAMATSU, K. & KUBO, S. (1982). "Mapa de Clasificación Geomorfológica del terreno de la Planicie de Shonai", Sakata, Ministerio de Construcción, Japón.
- OYA, M., KATO, Y., KOTODA, K., WAKAMATSU, K., TAKAGI, I., MATSUBARA, A. & IIDA. (1985). "Mapa de Clasificación Geomorfológica del terreno del Río Kise", Ministerio de Construcción, Japón.
- PARRA, D. (1991). Evaluación del Potencial de Licuación de Suelos de la Ciudad de Chimbote, Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero Civil, Lima, Perú.

- ROBERTSON, P. & CAMPANELLA, R. (1985). "Evaluación del Potencial de Arenas usando el CPT", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 111, N° 3, pp. 384-403.
- SEED, H. & IDRIS, I. (1971). "Procedimientos Simplificados para Evaluar el Potencial de Licuación de Suelos", *J. SMFD, ASCE*, Vol.97, N° 9, pp.1249-1273.
- SEED, H. , IDRIS, I. & ARANGO, I. (1983). "Evaluación del Potencial de Licuación usando datos de campo", *Journal of the Geotechnical Engineering*, Vol. 109, N°3, pp. 458-481.
- SEED, H., TOKIMATSU, K., HARDER L. & CHUNG, R. (1984). "Influencia del Procedimiento SPT en la Evaluación de la Resistencia a la Licuación de Suelos", *J.GED, ASCE*, Vol.111, N° 12, pp. 1425-1445.
- SEED, H. & DE ALBA, P. (1986). "Use of SPT and CPT Test for Evaluating the Liquefaction Resistance of Sands", *Use of Insitu Test in Geotechnical Engineering, ASCE*, pp. 281-302.
- TOKIMATSU, K. & YOSHIMI, Y. (1983). "Correlación Empírica para la Licuación de Suelos basados en valores de N-SPT y Contenido de Finos", *Suelos y Cimentaciones* Vol.30, N° 3, pp.153-158.
- VALENCIA, H. (1997). *Visual Basic – Edición Empresarial, Curso libre dictado en el Area de Capacitación del Centro de Extensión y Proyección Social (CEPS-UNI), Lima, Perú.*
- WAKAMATSU, K. (1991). "Maps for Historic Liquefaction Sites in Japan", *Tokai University Press, Japan*, 341pp.
- YASUDA Y THONO (1988). "Lugares Licuables causado por el Terremoto Nihonkai-Chubu", *Suelos y Cimentaciones*, Vol. 28, N° 2, pp. 61-72.
- YOUD, T. L., (1973), *Liquefaction: Earthquake Information Bulletin*, v. 5, N° 6, pp. 11-17.
- YOUD, T. L., NICHOLS, D., HELLEY, E., LAJOIE, K. (1975). "Estudios de Licuación Potencial para la Zonificación Sísmica de la Bahía de San Francisco", *Geological Survey Professional Paper 941-a*, pp. A68-a74.
- YOUD, T.L., (1977), *Discussion of "Seismic response and liquefaction of sands"*, By W.D. Liam Finn, P.M. Byrne, and G.R. Martin: *American Society of Civil Engineers, Journal of the Geotechnical Division*, v. 103, no. GT7, p. 827-829.
- YOUD, T.L., (1978), *Major Cause of Earthquake Damage is Ground Failure: Civil Engineering*, v. 48, no. 4, p. 47-51.
- YOUD, T. L. & PERKINS, D.M. (1978). "Mapa de Licuación inducida por Falla Potencial del Terreno", *J. GED, ASCE* , Vol.104, N°4, pp. 433-446.
- YOUD, T. L. (1984). "Recurrencia de la Licuación en algunos Lugares", *Proc., 8th Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, San Francisco, California*, Vol.3, pp. 231-238.

- YOUUD, T. L. & PERKINS, D.M. (1987). “Mapeo del Indice de Severidad de Licuación”, J.GED, ASCE, Vol.113, N° 11, pp. 1374-1392.
- YOUUD, T. L. & PERKINS, D.M. (1987). “Mapa de Susceptibilidad de Licuación de la Ciudad de San Mateo, California, U.S. Geol. Survey Misc. Investigaciones, Mapa I-1257-G.
- YOUUD, T. L. (1991). “Mapa de Licuación Inducida por Terremotos para Zonificación Sísmica”, Proc., 4th Conferencia Internacional de Zonificación Sísmica, Vol.1, pp. 111-148.

REFERENCIAS “ONLINE”

<http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/what/what1.html>

<http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/what/what2.html>

<http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/when/when1.html>

<http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/where/where1.html>

<http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/why/why1.html>

<http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/why/why2.html>

<http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/how/how1.html>

<http://www.abag.ca.gov/bayarea/eqmaps/liquefac/bayaliqs.gif>