

Capítulo 4: Evaluación de daños en carreteras

4.1 Licuación

La licuación es un fenómeno por medio del cual los depósitos no arcillosos, principalmente arenas y limos, pierden temporalmente su resistencia y se comportan más bien como un líquido viscoso en lugar de un sólido.

La licuación se genera en un suelo, cuando las ondas sísmicas, principalmente las de corte, distorsionan la estructura del suelo al pasar por él, causando el colapso de los paquetes de granos y aumentando la presión de poros hasta anular las tensiones efectivas.

Las deformaciones de la estructura del suelo generan una transferencia de la carga de los contactos grano a grano en el suelo al agua intersticial. Esta transferencia de la carga incrementa la presión de poros y si el drenaje está restringido, ocurre un incremento transitorio, la presión de poros puede aumentar hasta niveles que se aproximan a la sobrecarga. Con ello, los esfuerzos intergranulares se aproximan a cero y la capa granular se comporta temporalmente como un líquido viscoso, desarrollándose el fenómeno de licuación.

La licuación ocurre en depósitos recientes de arenas y limos en áreas donde existen altos niveles de agua. Generalmente conforme los sedimentos son más jóvenes y sueltos, y más alto el nivel freático, el suelo es más susceptible a la licuación. Dentro de los materiales más susceptibles a la licuación se incluyen los materiales deltáicos con menos de 10.000 años, depósitos de río, llanuras de inundación, depósitos eólicos, zonas costeras y rellenos mal compactados.

Dentro de los factores que afectan al fenómeno de licuación tenemos:

1. Factores sísmicos
 - Magnitud o intensidad del sismo
 - Distancia a la zona de ruptura o fuente sísmica
 - Condiciones del sitio
 - Tipos de ondas generadas
 - Camino de propagación entre la fuente y el sitio
 - Caída de esfuerzos
 - Patrones de radiación
 - Tipo de fallamiento
 - Profundidad de la falla
 - Aceleración pico

2. Factores geológicos y topográficos
 - Modo de deposición
 - Espesor total de los sedimentos consolidados
 - Profundidad del nivel freático
 - Pendiente del terreno
 - Distancia entre la cara libre y altura de ésta (caso de desplazamiento lateral).

3. Factores del suelo
 - Edad del depósito, grado de consolidación y cimentación
 - Distribución granulométrica de las partículas
 - Tamaño medio de las partículas (d_{50})
 - Contenido de limo (partículas < 0.075 mm)
 - Contenido de arcilla (partículas < 0.003 mm)
 - Densidad de las capas granulares y resistencia al corte residual del suelo licuado
 - Espesor, continuidad y profundidad de la zona licuada.

Tipos de fallas del terreno

Existen cuatro tipos principales de fallas generadas por el fenómeno de licuación: desplazamiento o corrimiento lateral, oscilación del terreno, falla por flujo y pérdida de capacidad de soporte. Adicionalmente la licuación puede provocar asentamientos del terreno, flotación de estructuras enterradas y volcanes de arena.

1. Desplazamiento o Corrimiento lateral

Consiste en el desplazamiento lateral de un bloque grande de suelo, como resultado de la licuación de una capa más profunda (ver Fig. 4-1).

El desplazamiento ocurre como respuesta a una combinación de fuerzas gravitacionales e inerciales generadas por un sismo. Los corrimientos laterales generalmente se desarrollan en taludes tendidos (frecuentemente menores de 3 grados) y se mueven hacia una cara libre tal como la depresión de un canal de río. Los desplazamientos horizontales son del orden de varios metros. Este tipo de falla afecta con mayor severidad a tuberías de conducción, fundaciones de edificios, puentes, etc.

2. Oscilación del terreno

Donde el terreno es plano o con muy poca pendiente como para permitir el corrimiento lateral, la licuación en profundidad puede desacoplar las capas de suelos suprayacentes de las capas subyacentes, (Fig. 4-2), permitiendo que el suelo superior se mueva hacia atrás y adelante, hacia arriba y abajo, con la forma de las ondas sísmicas. Estas oscilaciones son acompañadas

por apertura y cerrado de fisuras y consecuentemente daños en estructuras como pavimentos y líneas de tuberías.

3. Falla por flujo

Estas fallas comúnmente desplazan grandes masas de suelo, decenas de metros y en pocos instantes. Estas masas pueden viajar decenas de kilómetros pendiente abajo, a velocidades del orden de 10 km/h.

Estos flujos pueden comprender suelos totalmente licuados o bloques de material intacto conducidos sobre una capa de suelo licuado. Los flujos usualmente se desarrollan en arenas y limos sueltos saturados sobre pendientes mayores de 3 grados. (Fig. 4-3)

4. Pérdida de capacidad de soporte

Cuando un suelo soporta un edificio u otra estructura y sufre licuación y pérdida de resistencia, ocurren grandes deformaciones de la masa de suelo, que pueden producir asentamientos y hasta el volcamiento de la estructura (Fig. 4-4), como sucede generalmente en estructuras de retención. Por el contrario, tanques y pilotes enterrados pueden sufrir subpresión o levantamiento debido a la licuación del suelo.

4.1.1 Probabilidad de licuación.

Para poder evaluar cual es la probabilidad de licuación de una región es necesario conocer las condiciones geológicas del sitio. Los terrenos que poseen mayor potencial de presentar este fenómeno son aquellos suelos poco consolidados producto de la deposición de materiales en épocas geológicas recientes. Por esta razón para el presente estudio se consideran como terrenos con alto potencial de licuación aquellas zonas clasificadas como depósitos aluviales (Qal)¹ y manglares o pantanos (Qa).

La probabilidad de que un sitio experimente licuación esta influenciada principalmente por la susceptibilidad del suelo, la amplitud (por ejemplo la aceleración pico horizontal) y duración del movimiento del terreno (reflejada por la magnitud del sismo) y la profundidad del nivel freático.

Debido a que la susceptibilidad a la licuación se está asignando de acuerdo al tipo de geología, existen sitios que no son susceptibles al fenómeno, por lo que estos deben ser tomados en cuenta por medio de un factor que determina la susceptibilidad relativa de la zona. (Ver Tabla 4-1).

La probabilidad de licuación está determinada por la siguiente relación:

$$P[\text{licuación}] = \frac{P[\text{licuación} \mid \text{PGA} = a]}{K_m * K_w} * 100\%$$

en donde:

- P[licuación] es la probabilidad de ocurrencia de licuación, expresada en términos de porcentaje
- P[licuación | PGA=a] es la condición de probabilidad de licuación para cada categoría de susceptibilidad de acuerdo con el valor de la aceleración pico horizontal (ver Fig. 4-5 y Tabla 4-2).
- K_m factor de corrección para la magnitud del sismo
- K_w factor de corrección para el nivel freático

Como se observa en la Tabla 4-2, para cada categoría de susceptibilidad existe una ecuación diferente que relaciona la aceleración pico horizontal con la probabilidad de licuación, la escogencia de cual de estas relaciones se debe usar depende del valor de la porción de mapa que posee susceptibilidad a la licuación.

Estas relaciones se definieron basados en procedimientos empíricos y estadísticos desarrollados por Liao et. al (1988) que representan la características de resistencia a la penetración en suelos dentro de cada categoría de susceptibilidad (Ref. 19).

Las relaciones de probabilidad de licuación en términos de la aceleración pico horizontal presentadas en la Tabla 4-2, fueron desarrolladas para magnitudes momento de 7.5 y suponiendo que el nivel freático se encontraba a 1.5 m de la superficie, para valores diferentes de estas variables se utilizan los factores de corrección K_m y K_w .

$$K_m = 0.0027M^3 - 0.0267M^2 - 0.2055M + 2.9188$$

$$K_w = 0.022 d_w + 0.93$$

donde M = Magnitud momento del evento sísmico
 d_w = profundidad del nivel freático (en pies).

4.1.2 Zonas con probabilidad de licuación.

Para la aplicación del método antes descrito, se determinó que las zonas que se podían ver influenciadas por el fenómeno de licuación eran aquellas que poseían una geología reciente y constituida por material no consolidado. Por esta razón se utilizaron las zonas que estaban formadas por depósitos aluviales (Qal) y aquellas formadas por manglares y pantanos (Qa).

¹ Clasificación establecida por el Mapa Geológico de Costa Rica. Escala 1: 200000.

La zona con esta clasificación constituye un 12% dentro de la zona de estudio, por lo cual con base en la Tabla 4-1, se determina que la categoría de susceptibilidad es moderada.

Debido a que el sismo que se está analizando posee una $M= 7.5$, no es necesario realizar la corrección con el factor K_m . Por otro lado se supuso que la profundidad del nivel freático se encuentra a una profundidad de 1.5 m, que es la consideración más crítica; por lo que la corrección por el factor K_w tampoco es necesaria.

Haciendo estas consideraciones se obtiene que la probabilidad a la licuación en términos de la aceleración pico horizontal se puede expresar como:

$P[\text{licuación}] = 6.67 a^{-1.0}$ donde a se expresa como fracción de g y la probabilidad se expresa como fracción de uno.

Las aceleraciones pico se obtienen del Mapa 3-3. En el Mapa 4-1., se muestra el procedimiento utilizado para la obtención del mapa de probabilidades de licuación a partir de una serie de mapas base. El resultado final se incluye en el Mapa 4-2, en el que se puede apreciar que las zonas en las que se puede presentar el fenómeno de licuación están principalmente en las regiones costeras y alrededor de la desembocadura del río Tempisque. Algunos poblados que se pueden ver afectados por este fenómeno son Guardia, Filadelfia, Belén, Sámara entre otras.

4.1.3 Deformación permanente del suelo por licuación.

La determinación del desplazamiento permanente del terreno para el caso de falla por corrimiento lateral se obtiene mediante la aplicación de la siguiente relación:

$$E[\text{PGD}_{sc}] = K_{\Delta} * E[\text{PGD}|(\text{PGA}/\text{PL}_{sc}) = a]$$

donde

$E[\text{PGD}|(\text{PGA}/\text{PL}_{sc}) = a]$ es el posible desplazamiento permanente del terreno, en cm, para cierta categoría de susceptibilidad bajo un nivel especificado de sacudida normalizada del terreno ($\text{PGA}/\text{PGA}(t)$)

$\text{PGA}(t)$ es la aceleración necesaria para inducir la licuación (Tabla 4-3)

K_{Δ} Factor de corrección del desplazamiento.

$K_{\Delta} = 0.0086M^3 - 0.0914M^2 + 0.469M - 0.9835$ donde M es la magnitud momento (Seed & Idriss, 1982).

Esta relación para corrimiento lateral del terreno fue desarrollada por la combinación del Índice de Severidad a la Licuación presentada por Youd y Perkins (1987) con las relaciones de atenuación del movimiento del terreno desarrolladas por Sadigh y otros (1986).

La deformación permanente del terreno corresponde a la deformación esperada en el relleno del material sobre el que se apoya la carretera, y se utiliza como un parámetro indirecto para determinar la severidad de daños que ocurren sobre la estructura de la vía.

4.1.4 Deformaciones en la zona de Guanacaste.

Como se expresó en la sección 4.3, la categoría de susceptibilidad para la zona de estudio se puede considerar como moderada, por lo cual el valor de la aceleración necesaria para inducir la licuación ($PGA(t)$) es de 0.15 g.

Utilizando la Fig. 4-6 y las relaciones entre aceleración pico y aceleración necesaria para inducir la licuación ($PGA(t)$) para cada rango de aceleraciones del Mapa 3-3, se obtiene el desplazamiento que se presenta en cada zona .

Estos desplazamientos deben corregirse mediante el factor K_A que para una magnitud de 7.5 su valor es de 1.021.

Con esta información se puede obtener un mapa con deformaciones permanentes del terreno para cada zona con cierta probabilidad de licuación (ver Mapa 4-3). Esta información posteriormente servirá para determinar la posibilidad de que tanto carreteras como puentes puedan presentar daños debido a deformaciones del terreno.

4.2 Deslizamientos

Un sismo induce un deslizamiento cuando las fuerzas que actúan sobre la masa de tierra presentan temporalmente un factor de seguridad por debajo de 1.0. La aceleración pico horizontal para la cual la masa de suelo se desliza es llamada aceleración crítica. El valor de esta aceleración es determinada por medio de análisis de estabilidad pseudo-estáticos o por medio de relaciones empíricas basadas en el comportamiento de las masas de terreno durante sismos pasados.

En este método, las deformaciones son calculadas utilizando los resultados obtenidos por Newmark (1965). La masa de suelo se supone como un bloque rígido. Las deformaciones ocurren durante los períodos en los cuales la aceleración inducida por el sismo sobrepasa la aceleración crítica de la masa deslizante. Por otro lado, el movimiento de estas masas depende de la duración y número de ciclos producto de la sacudida que se da en el terreno. Como la

duración y número de ciclos se incrementan con la magnitud del evento, las deformaciones se incrementan con magnitudes de sismo mayores.

Para poder realizar un análisis de riesgo de deslizamiento es necesario conocer las características geológicas de la región. La susceptibilidad esta caracterizada por el grupo geológico, el ángulo de la pendiente y la aceleración crítica. La aceleración requerida para que una masa se deslice es una función de la geología, inclinación, condiciones de humedad, tipo de deslizamiento. Sin embargo, actualmente no existe ninguna metodología simplificada para determinar la aceleración crítica que tome en cuenta todos estos factores.

Para este trabajo se utilizará la metodología propuesta por Wilson y Keefer (1985, Ref. 19), en la cual la susceptibilidad al deslizamiento se mide en una escala que va desde I hasta X, en donde I es la categoría que posee la menor susceptibilidad. Las condiciones de sitio se clasifican utilizando tres grupos con características geológicas semejantes y tomando en cuenta la profundidad del nivel freático, como se presenta en la Tabla 4-4. En esta metodología para considerar las condiciones de humedad de la masa de terreno se divide en dos categorías: la primera considera una condición seca cuando el nivel freático se encuentra por debajo del nivel de deslizamiento y la segunda representa una condición húmeda donde el nivel freático se encuentra por encima de el nivel de deslizamiento.

La aceleración crítica es estimada a partir de la susceptibilidad, tal como se muestra en la Tabla 4-5.

4.2.1 Desplazamientos permanentes del terreno por deslizamiento

El desplazamiento permanente del terreno se puede determinar mediante la utilización de la expresión:

$$E[PDG] = E[d / a_s] * a_s * n$$

en donde

E[PDG]	deformación permanente del terreno, en cm.
E[d / a_s]	factor de desplazamiento esperado, en cm (Fig. 4-7)
a _s	aceleración inducida (en términos de g)
n	número de ciclos, representado por la ecuación: $n = 0.3419M^3 - 5.5214M^2 + 33.6154M - 70.7692$,

donde M corresponde a la magnitud momento del sismo.

La aceleración pico inducida dentro de la masa que se desliza (a_s) representa el promedio de las aceleraciones a las que se somete la masa de terreno. Para deslizamientos no muy grandes ni profundos, la aceleración inducida a_s no posee una diferencia significativa con respecto a la

aceleración superficial del terreno. Por tanto, se puede considerar igual a la aceleración pronosticada por medio de relaciones de atenuación.

Para determinar el desplazamiento que sufrirá el terreno se utilizan los resultados de Makdisi y Seed (1978), en los que se determina el valor de desplazamiento (d/a_s) a partir de la relación entre aceleración crítica y aceleración pronosticada (a_c/a_s), tal como se muestra en la Fig. 4-7.

4.2.2 Determinación de deformaciones en la zona de Guanacaste.

Para determinar las deformaciones del terreno por deslizamientos es necesario agrupar las formaciones geológicas existentes en la zona de estudio en tres categorías como se definen en la Tabla 4-4. Esta clasificación se realizó por medio de las características estratigráficas generales de cada una de las formaciones geológicas (estas características se resumen en el Anexo C).

Por medio del mapa geológico y el mapa de pendientes se determina la susceptibilidad de que se presenten deslizamientos para cada zona. La asignación del grado de susceptibilidad se realiza por medio de la Tabla 4-4, para lo cual se supuso una condición húmeda del terreno por ser el caso más desfavorable.

Luego por medio de la Tabla 4-5 se determina el valor de la aceleración crítica (a_c) para cada uno de los grados de susceptibilidad obtenidos en el paso anterior. Todos estos pasos se realizaron por medio del Sistema de Información Geográfica.

Para determinar la deformación del terreno es necesario conocer el número de ciclos (n), el cual para una magnitud de 7.5 tiene un valor de 15.

Otra variable que se debe determinar es el factor de desplazamiento $E[d/a_s]$ que se obtiene mediante la Fig. 4-7 y la relación entre aceleración crítica (a_c) y la aceleración inducida (a_s) para cada aceleración según el Mapa 3-3. En el Mapa 4-4 se muestra el procedimiento empleado a través del Sistema de Información Geográfica para determinar las deformaciones por deslizamiento; el resultado es un mapa que contiene información acerca de las deformaciones permanentes del terreno generadas por efecto de los deslizamientos (Mapa 4-5) que al igual que el mapa de deformaciones por licuación (Mapa 4-3), más adelante ayudarán a determinar daños esperados en carreteras y puentes.

4.3 Determinación de daños en carreteras

Las carreteras como componentes de un sistema vial, poseen una gran importancia debido a que unen las diferentes poblaciones y además son la única vía terrestre por medio de la cual se puede hacer llegar las provisiones a cada población en caso de atención de una emergencia. Los daños en este componente de la infraestructura vial debido a factores sísmicos (como

pueden ser licuación del terreno soportante o la obstrucción por material deslizado), pueden provocar que algunas poblaciones queden aisladas.

Debido a su importancia, es necesario conocer el tipo de daño que pueden sufrir las carreteras, para buscar otras rutas o medios alternos con los que se puedan atender las necesidades de las poblaciones en el momento en que la emergencia se presente.

En este trabajo se utilizará una metodología por medio de la cual se puede estimar el daño que sufrirán las carreteras dependiendo de las deformaciones permanentes del terreno que se presenten a raíz de los fenómenos de licuación y deslizamiento durante un evento sísmico. (Ref. 19)

Para poder aplicar esta metodología se requiere de la siguiente información: ubicación geográfica de la infraestructura, la clasificación de las carreteras y la deformación permanente del terreno, ya sea por efectos de la licuación o por deslizamientos.

La ubicación geográfica se puede obtener con la utilización de los mapas de la región, esta información se procesa a través de un Sistema de Información Geográfica con el cual se obtiene en forma digital la ubicación de cada punto de la carretera.

La clasificación de vías se realiza tomando en cuenta dos categorías:

- Carreteras mayores: son aquellas que poseen cuatro o más carriles. Esta categoría corresponde a carreteras interestatales o estatales, las cuales tienen un diseño estructural que considera *cargas de guerra*, de acuerdo con las cargas que considera el AASHTO.
- Carreteras urbanas: son aquellas que unen ciudades y que poseen dos o menos carriles.

La información de la deformación permanente del terreno se obtiene por medio de mapas para los cuales se ha determinado esta variable, ya sea por efecto de la licuación o por deslizamiento. (Ver Mapas 4-3 y 4-5).

Para determinar el daño que puede sufrir un determinado tramo de carretera se utilizan curvas de fragilidad, tal como la de la Fig. 4-8, las cuales se basan en la probabilidad de exceder diferentes estados de daño causados por la falla del terreno (deformación permanente del terreno).

Los daños para el caso de carreteras se dividen en cuatro categorías:

- Sin daño (ds1): La carretera no sufre ningún tipo de daño
- Daño menor (ds2): La carretera sufre un asentamiento del orden de algunos centímetros o un corrimiento lateral del terreno.

- Daño moderado (ds3) : La carretera sufre asentamientos moderados del orden de varios centímetros o un corrimiento lateral del terreno.
- Daño general (ds4): Se dan en la carretera asentamientos mayores del terreno.

En la Tabla 4-6, se presentan los valores de deformación permanente del terreno para los cuales se presenta cada categoría de daño mencionada.

4.4 Daños esperados en las carreteras de Guanacaste.

De acuerdo con la clasificación de carreteras señalada en la sección 4.3, todas las carreteras de la zona de estudio se clasifican como carreteras urbanas (HRD2), por ser de dos o menos carriles. Las rutas principales se muestran en el Mapa 4-6.

Para poder determinar el daño esperado en las carreteras es necesario conocer las deformaciones permanentes del terreno para la zona de estudio, las cuales se derivaron en las secciones 4.1.4 y 4.2.2 para licuación y deslizamiento respectivamente. En los Mapas 4-3 y 4-5 se pueden observar los resultados obtenidos.

Con base en estos mapas de deformación del terreno y un mapa con la ubicación de las carreteras se determinó los daños esperados en cada tramo de carretera mediante la aplicación de la Tabla 4-6, en donde se asigna una cierta categoría de daño para un rango determinado de deformaciones. Los resultados se incluyen en el Mapa 4-7, que presenta la distribución de daños en la región.

Del Mapa 4-7 se observa que para las condiciones de sismo supuestas la carretera interamericana no sufriría ningún tipo de daño; además, la ruta 17 que va de Barranca a Puntarenas sufriría un daño leve, que corresponde a corrimientos laterales menores y asentamientos pequeños.

Otras rutas como por ejemplo la ruta 21 que comunica las poblaciones de Liberia, Guardia, Filadelfia, Santa Cruz, Nicoya, Carmona hasta Playa Naranjo , tendrá bastantes daños pues en algunos tramos se presenta un daño moderado y otros daños generales, por lo que el flujo de tránsito por esta ruta se verá muy afectado. Por otro lado, la ruta 160 en el tramo que va desde Playa Naranjo hasta Nosara tendrá daños moderados en casi todo el trayecto, como también el tramo entre Limonal y Puerto Alegre sobre la ruta 18 y otras rutas como 151 y 912.

Algunas otras carreteras que tendrán tramos con daños moderados o generales serán la ruta 150 que comunica Nicoya con Sámara, la vía 158 que va desde Mansión hasta Puerto Carrillo, la 163 de Jicaral a San Francisco, y otras rutas menores como: 902, 901, 903, 915.

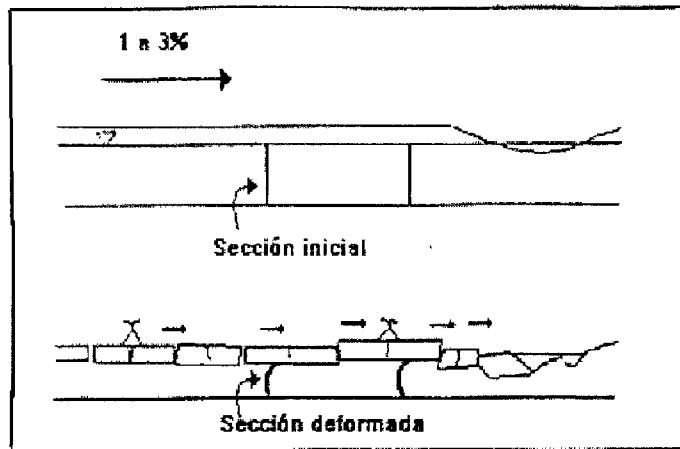


Fig. 4-1: Falla por desplazamiento lateral (Ref. 11)

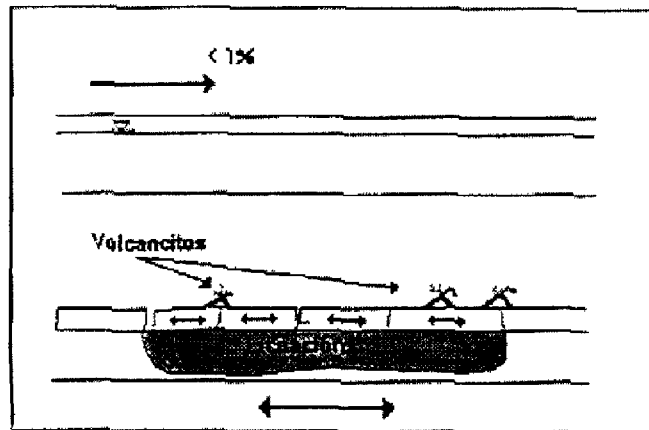


Fig. 4-2 Falla por oscilación del terreno (Ref. 11)

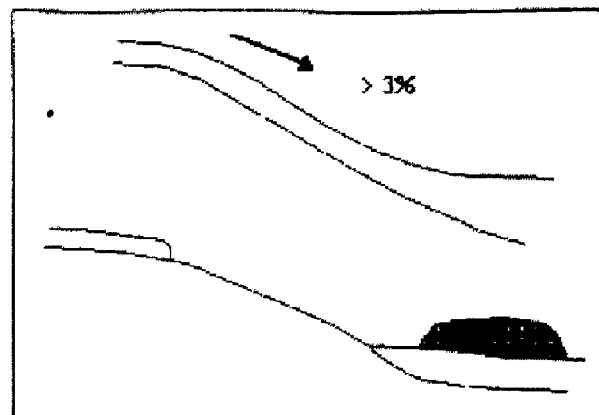


Fig. 4-3: Falla por flujo (Ref. 11)

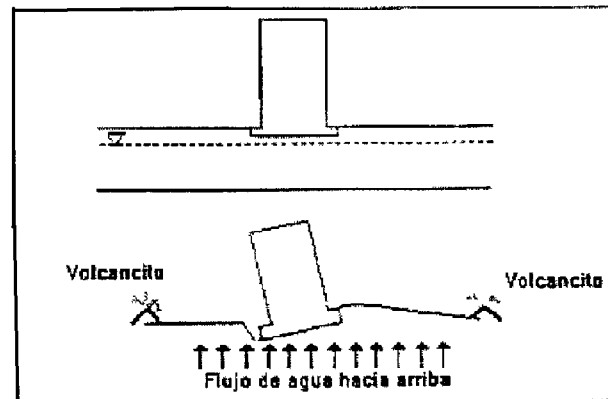


Fig. 4-4: Falla por pérdida de capacidad soportante (Ref. 11)

Tabla 4-1: Porción del mapa susceptible a la licuación. (Ref. 19)

Susceptibilidad Relativa	Porción del mapa con probabilidad de licuación
Muy alto	0.25
Alto	0.20
Moderado	0.10
Bajo	0.05
Muy bajo	0.02
Ninguno	0.00

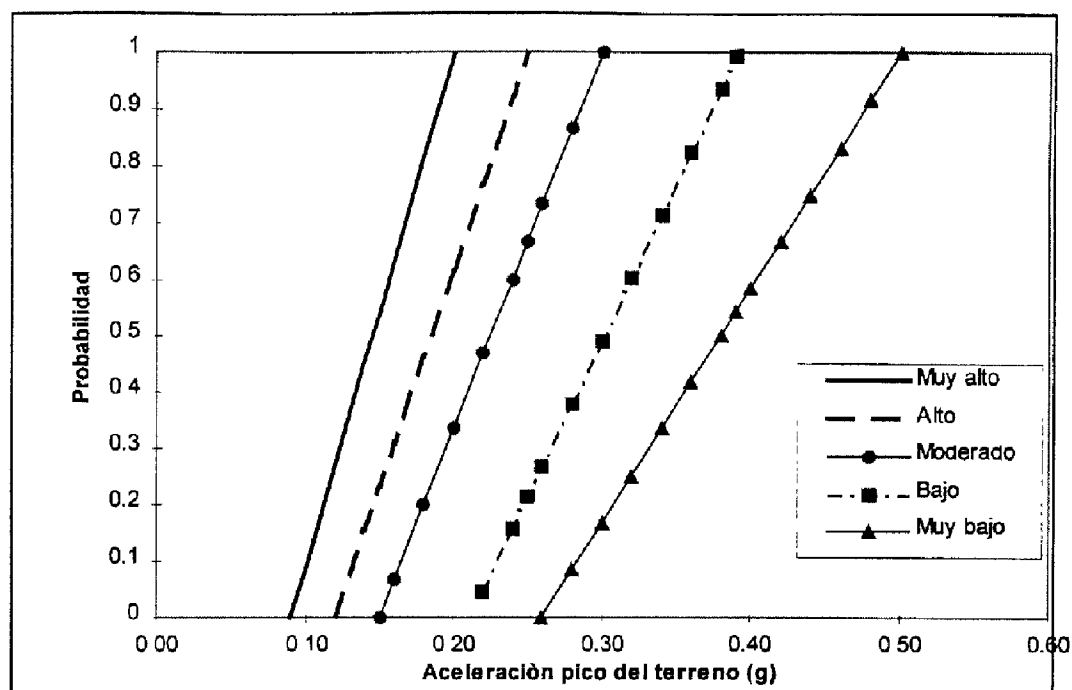


Fig. 4-5: Relaciones entre probabilidad de licuación y categoría de susceptibilidad (Liao, et. Al., 1988) (Ref. R19)

Tabla 4-2: Relaciones de probabilidad de licuación para cada categoría de susceptibilidad. (Ref. 19)

Categoría de susceptibilidad	P[licuación PGA=a]
Muy alto	9.09 a - 0.82
Alto	7.67 a - 0.92
Moderado	6.67 a - 1.0
Bajo	5.57 a - 1.18
Muy bajo	4.16 a - 1.08
Ninguno	0.0

Donde "a" es la aceleración pico horizontal en términos de % g, y P[licuación | PGA=a] expresada como fracción de 1.

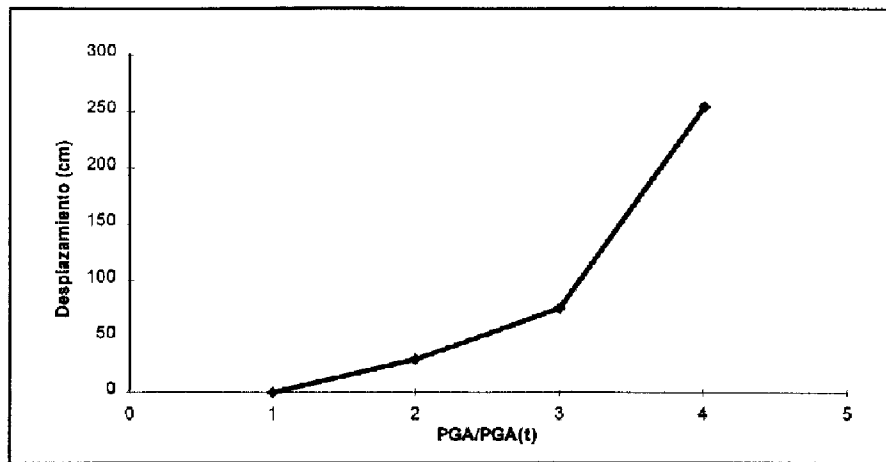


Figura 4-6: Relaciones para desplazamientos por corrimiento lateral (después de Youd y Perkins, 1978; Sadigh, et. a.,1986). (Ref. 19)

Tabla 4-3: Aceleración del terreno (PGA(t)) que corresponde a cero probabilidad de licuación . (Ref. 19)

Categoría de Susceptibilidad	PGA(t)
Muy alto	0.09g
Alto	0.12g
Moderado	0.15g
Bajo	0.21g
Muy bajo	0.26g
Ninguno	---

Tabla 4-4: Grupos geológicos para la determinación de la probabilidad de deslizamiento.
(Ref. 19)

Grupo geológico		Ángulo de la pendiente, en grados					
		0 - 10	10 - 15	10 - 20	20 - 30	30 - 40	> 40
(a) Seco (nivel freático por debajo del nivel de deslizamiento)							
A	Rocas fuertemente cementadas (rocas cristalinas y areniscas bien cementadas)	Nada	Nada	I	II	IV	VI
B	Rocas pobremente cementadas y suelos (suelos arenosos y areniscas pobremente cementadas)	Nada	III	IV	V	VI	VII
C	Rocas arcillosas (rellenos pobremente compactados, deslizamientos existentes, suelos arcillosos)	V	VI	VII	IX	IX	IX
(b) Húmedo (nivel freático por encima del nivel de deslizamiento)							
A	Rocas fuertemente cementadas (rocas cristalinas y areniscas bien cementadas)	Nada	III	VI	VII	VIII	VIII
B	Rocas pobremente cementadas y suelos (suelos arenosos y areniscas pobremente cementadas,)	V	VIII	IX	IX	IX	X
C	Rocas arcillosas (rellenos pobremente compactados, deslizamientos existentes, suelos arcillosos)	VII	IX	X	X	X	X

Tabla 4-5: Aceleración crítica (a_c) para cada categoría de susceptibilidad. (Ref. 19)

Categoría de Susceptibilidad	Ninguna	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Aceleración crítica (g)	Ninguna	0.60	0.50	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

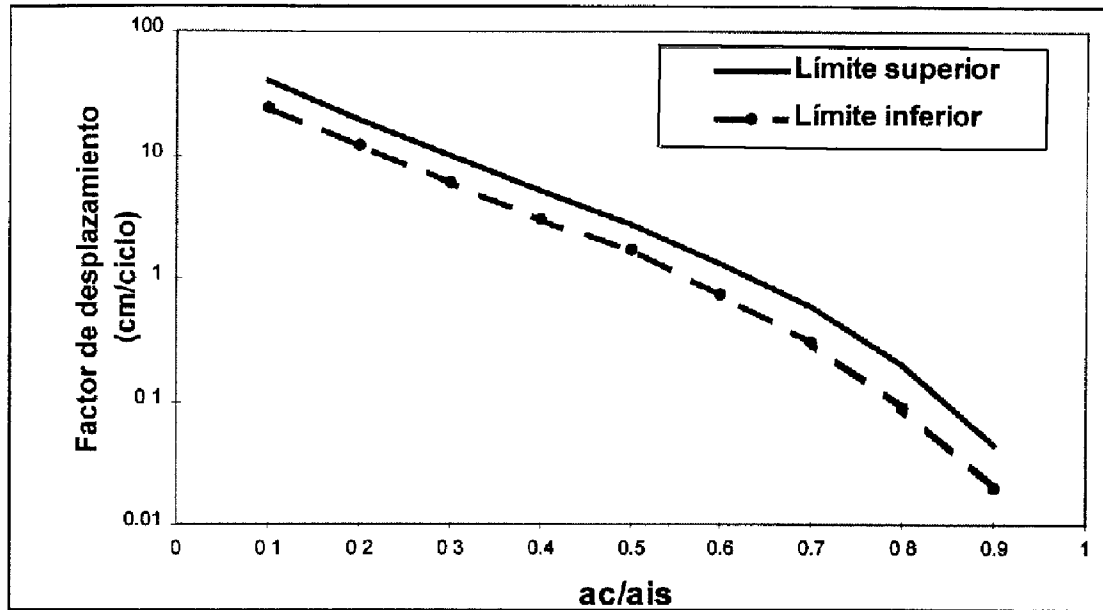


Fig. 4-7: Relación entre el factor de desplazamiento y la razón entre aceleración crítica y la aceleración inducida. (Ref. 19)

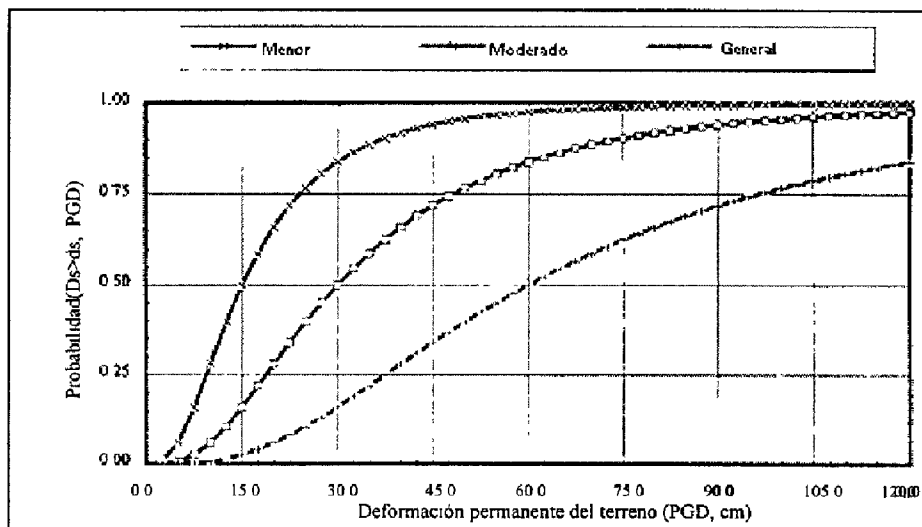


Fig. 4-8: Curvas de fragilidad para varios daños en carreteras urbanas. (Ref. 19)
(El detalle de las curvas de fragilidad de carreteras se encuentran en el Anexo D)

**Tabla 4-6: Categorías de daño como función de la deformación permanente del terreno.
(Ref. 19)**

Componente	Estado de daño	Deformación permanente del terreno
Carreteras mayores (HRD1)	Menor	30 cm
	Moderado	60 cm
	Completo	150 cm
Carreteras urbanas (HRD2)	Menor	15 cm
	Moderado	30 cm
	Completo	60 cm