

**Análisis del
comportamiento de
licuación por flujo de
la arena del depósito
cuaternario de Paipa
(Boyacá)**

**Behavioral analysis of
liquefaction due to sand
flow in the quaternary
deposit of paipa**

**Análise do
comportamento de
liquefação por fluxo
de areia do depósito
quaternário de Paipa.**

Para citar este artículo / To reference this article / Para
citar este artigo: Torres Rincón, A. L. (2016). Análisis
del comportamiento de licuación por flujo de la arena
del depósito cuaternario de Paipa (Boyacá). *Ingenio
Magno*, 7(2), 102-115.

Astrid Lorena Torres-Rincón

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,
Maestría en Geotecnia
astrid.torres@uptc.edu.co

Fecha de Recepción: 12 de Abril de 2016
Fecha de Aceptación: 27 de Junio de 2016

Resumen

La licuación es el proceso mediante el cual un suelo saturado y sin cohesión pasa de ser un material firme a comportarse como un material viscoso, debido a la aplicación de cargas estáticas o dinámicas. Cuando el suelo entra en estado de licuación, no soporta una carga aplicada, tras lo cual se producen deslizamientos, flujos, hundimiento e inclinación de edificaciones, etc. Aunque se han realizado numerosas investigaciones al respecto, aún existen muchas incógnitas por resolver sobre el comportamiento de suelos granulares ante la aplicación de cargas estáticas. Para el desarrollo de esta investigación se realizaron ensayos triaxiales de tipo consolidado no drenado a arena proveniente del depósito cuaternario de Paipa, con el fin de determinar los parámetros de licuación por flujo del material ante la aplicación de una carga monotónica. El material se puede caracterizar como una arena limosa, bien gradada, con contenido de finos cercano al 30%. Las muestras ensayadas fueron construidas a través de los métodos de apisonamiento húmedo y de sedimentación en agua, de acuerdo con la composición granulométrica del material y con diferentes valores de densidad relativa. Finalmente, se evaluó el comportamiento del material para determinar las líneas de estado crítico y de transformación de fase.

Palabras clave: arena, licuación, monotónico, parámetros, triaxial.

Abstract

Liquefaction is the process by which saturated land, without cohesion, changes from a solid material to one that behaves like a viscous material, due to the application of static or dynamic loads. When the land enters into a state of liquefaction it does not withstand the applied load, producing slipping, flows, sinking or tilting of structures, among others. The study of this phenomenon and the damage it causes, began after the earthquake in Niigata (Japan), in 1964. Many experiments regarding this have been conducted, however, there are still many unknowns to be resolved regarding the behavior of granular land under the application of static loads.

In order to carry out this experiment, we performed Consolidated Undrained triaxial tests, on sand from the Quaternary deposit in the city of Paipa, seeking to determine the parameters of liquefaction due to material flow, under the application of a monotonic load. The material was characterized, defined as a silty sand, well graded, with fine grains content close to 30%. The samples tested were constructed using the methods wet tamping and sedimentation in water, according to the grain-size composition of the material and with different relative density values. Finally, the behavior of the material was evaluated, determining the lines of critical state and of transformation phase. The sand studied showed the predominance of a delaying tendency, in its behavior, providing evidence of a low level of susceptibility to liquefaction.

Keywords: sand, liquefaction, monotonic, parameters, triaxial

Resumo

A liquefação é o processo mediante o qual um solo saturado, sem coesão, passa de ser um material firme e a comportar-se como um material viscoso, devido à aplicação de cargas estáticas ou dinâmicas. Quando o solo entra em estado de liquefação não suporta uma carga aplicada, produzindo, assim, deslizamentos, fluxos, afundamento ou inclinação de edificações, entre outros. O estudo deste fenômeno e os danos causados iniciaram-se depois

do terremoto de Niigata (Japão), no ano de 1964. Foram feitas muitas pesquisas sobre o tema, no entanto, ainda existem muitas incógnitas por resolver sobre o comportamento dos solos granulares, diante da aplicação de cargas estáticas.

Para o desenvolvimento da presente pesquisa, foram realizados ensaios triaxiais do tipo “Consolidado não Drenado”, a areia proveniente do depósito quaternário do município de Paipa, buscando determinar os parâmetros de liquefação pelo fluxo do material, diante da aplicação de uma carga monotônica. Caracterizou-se o material, definindo-o como uma areia viscosa, bem gradada, com conteúdo de finos próximo ao 30%. As amostras testadas foram construídas utilizando os métodos de calcamento úmido e de sedimentação em água, de acordo com a composição granulométrica do material e com os diferentes valores de densidade relativa. Finalmente, avaliou-se o comportamento do material, determinando as linhas de estado crítico e de transformação de fase. A areia estudada mostrou a predominância de uma tendência dilatante em seu comportamento, evidenciando um baixo grau de susceptibilidade à liquefação.

Palavras Chave: areia, liquefação, monotónico, parâmetros, triaxial

1. Introducción

En el campo de la ingeniería civil, el suelo es uno de los materiales más utilizados, bien sea en la construcción o como soporte de las estructuras construidas. Se define como un material heterogéneo de agregados minerales no cementados, y de acuerdo con su composición, clasificación y propiedades, presenta diferente comportamiento ante la aplicación de una carga.

Uno de los principales temas de investigación en el campo de la geotecnia, en el marco de la mecánica y la dinámica de suelos, ha sido el estudio de las propiedades físicas de este y de las condiciones bajo las cuales pierde significativamente su resistencia, tras lo cual se producen fallas que pueden ser significativas y generar pérdidas importantes. En el caso de suelos no cohesivos, como las arenas, uno de los fenómenos principales que lleva a la falla del material es la licuación.

El estudio de los parámetros de licuación del suelo se inició dada la gravedad de los daños presentados en sismos pasados, como el de México (1959), Chile (1960), Alaska y Niigata (1964). Arenas como la de Ottawa y

Toyoura se encuentran dentro de las más estudiadas en el ámbito mundial.

En el país, la arena de El Guamo es un material representativo de este tipo de estudios; se ha utilizado para determinar parámetros de licuación mediante ensayos de laboratorio y para la elaboración de modelos constitutivos, a partir de lo cual se han definido parámetros importantes de este material.

A continuación se describe la metodología utilizada para la determinación de los parámetros de licuación por flujo de la arena proveniente del depósito cuaternario del municipio de Paipa (Boyacá), mediante la ejecución de ensayos de compresión triaxial de tipo consolidado no drenado, con el fin de evaluar la susceptibilidad a la licuación por flujo del material.

2. El fenómeno de licuación

Es el proceso de pérdida de resistencia del suelo al ser sometido a una carga. “En campo es típicamente asociado con el aumento de presión de poros que a su vez disminuye el esfuerzo efectivo principal, reduciendo

la resistencia al corte del suelo” (Andrade, 2009), debido a la tendencia de este tipo de suelos a densificarse bajo la aplicación de una carga. El comportamiento del suelo licuado se asemeja al de un fluido. Dependiendo del tipo de carga aplicado, el fenómeno de licuación se divide en *licuación por flujo* y *movilidad cíclica*.

La licuación por flujo se presenta bajo la aplicación de una carga estática, cuando el esfuerzo de corte requerido para el equilibrio estático del suelo es mayor que su fuerza de corte en estado licuado. Las fallas de flujo por licuación son las más catastróficas y se caracterizan por originarse repentinamente y producir rápidos movimientos de suelo, que presentan altas deformaciones y se movilizan a grandes distancias (Krammer, 1996).

En la figura 1 se muestra la típica trayectoria de esfuerzos de una arena sometida a compresión triaxial no drenada bajo carga monotónica y cíclica. Sobre la línea punteada, que representa la resistencia última del

suelo, se encuentra la zona susceptible de desarrollar falla de flujo, dado que allí existe una fuerza de corte estático inicial mayor a la resistencia última del suelo.

Por otro lado, la movilidad cíclica hace referencia a la deformación progresiva de suelos saturados bajo cargas cíclicas a un contenido de agua constante. Se produce cuando el esfuerzo de corte estático es menor que la fuerza de corte del suelo licuado. En la figura 1, la zona susceptible de movilidad cíclica es la que se encuentra por debajo de la resistencia última del suelo (línea punteada).

Para que se presente este fenómeno, es necesario imponer una carga cíclica, la cual en cada ciclo de carga genera un aumento en la presión de poros y disminución en la presión de confinamiento; cuando esta disminuye hasta acercarse a cero, las trayectorias de esfuerzo se acercan a la línea de transformación de fase y las deformaciones aumentan drásticamente.

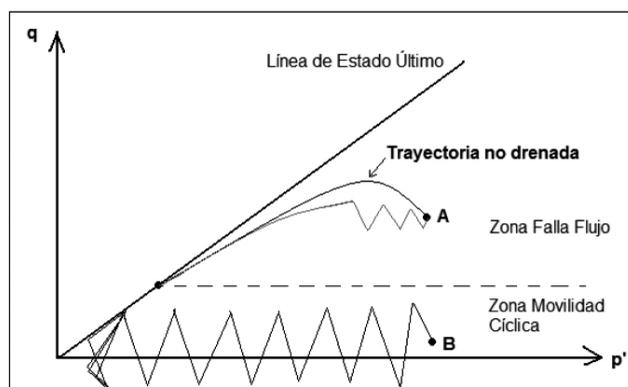


Figura 1. Trayectoria de esfuerzos de la arena bajo compresión triaxial

Fuente: Asenjo (2010).

A. Licuación de la arena bajo carga monotónica

El estudio de la licuación monotónica o estática ha contribuido a la comprensión de la licuación sísmica inducida, pues permite identificar las condiciones

de esfuerzo efectivo a partir de las cuales inicia el fenómeno de licuación. Los siguientes son algunos de los parámetros que enmarcan el comportamiento mecánico de las arenas bajo carga monotónica.

1) Estado crítico

Es la condición que presenta una muestra de arena cuando, al cortarse de manera continua, fluye sin presentar cambios de volumen o esfuerzo. El estado crítico es alcanzado a una deformación mayor al 10%, y allí el movimiento de los granos básicamente es rotacional (Solaque y Lizcano, 2008).

Su comportamiento se describe por la línea de estado crítico (CSL), también denominada línea de falla, la cual representa todas las posibles combinaciones de relación de vacíos y presión de confinamiento para un suelo en este estado; es usada para identificar las condiciones en las cuales un suelo puede o no ser susceptible a licuación por flujo (Idriss y Boulanger, 2008).

2) Transformación de fase

Marca la transición de la tendencia contractiva de la muestra a una tendencia dilatante. La unión de los puntos de transformación de fase para un mismo suelo, bajo diferentes presiones de confinamiento efectivo, marca la línea de transformación de fase (PTL). “Cuando la muestra alcanza la línea de transformación de fase, las tendencias de dilatancia toman el control y la ruta de esfuerzo sigue la falla de la arena” (Georgiannou, Tsomokos y Stavrou, 2008).

3) Estado cuasiestable

Corresponde al estado del suelo en el que el esfuerzo desviador (q) alcanza el menor valor durante el corte no drenado. El estado cuasiestable y el punto de transformación de fase de un suelo se alcanzan al obtener valores de resistencia al corte muy similares en la trayectoria de esfuerzos; sin embargo, resultados de investigaciones, como las realizadas por Yang y Dai (2011) y Murthy (2007), han demostrado que estos son dos estados del suelo distintos y se alcanzan a diferentes valores de deformación axial.

4) Inestabilidad

Hace referencia a una deformación descontrolada que ocurre debido a que la muestra no es capaz de soportar la carga aplicada. Luego del inicio de la inestabilidad, el suelo puede colapsar o fluir súbitamente (Chu y Leong, 2001).

El estado de inestabilidad no drenada marca el inicio de la licuación. La línea de inestabilidad conecta los picos de las rutas de esfuerzo efectivo de un suelo bajo diferentes presiones de confinamiento y el origen. La pendiente es menor que la de la línea de transformación de fase y se presenta aproximadamente para el 0,5% de la deformación axial.

3. Materiales y métodos de ensayo

La fase experimental del proyecto se centra en la ejecución de los ensayos de compresión triaxial de tipo consolidado no drenado (CU), para lo cual se toma como referencia la Norma ASTM D4767-11. Las etapas del ensayo son saturación, consolidación y falla, sin permitir drenaje en la etapa de falla de la muestra y a una velocidad de aplicación de carga media.

Antes de dar inicio a la ejecución de los ensayos de compresión triaxial, se determinaron las propiedades físicas del material por estudiar, con el fin de conocer sus principales características para la construcción de las muestras.

A. Propiedades físicas del material

El material estudiado corresponde a una arena limosa proveniente de Paipa. Su curva de distribución granulométrica se presenta en la figura 2, y a partir de ella se obtienen los diámetros característicos del suelo y sus propiedades granulométricas, que se relacionan en la tabla 1.

Se determinó una gravedad específica de la arena $G_s = 2,51$, cuyo valor es influenciado por la alta presencia

de finos en el material. La relación de vacíos máxima del material [1], determinada utilizando el método de Santamarina, es de $e_{max} = 0,98$. El método de Santamarina, descrito por Jiménez (2011), consiste en tomar una probeta de 1000 ml de capacidad y depositar

una fracción de suelo seco de 1000 g (Ws); luego se adiciona agua hasta la línea máxima de aforo de la probeta y se deja el material sumergido durante 24 horas, con el fin de eliminar el contenido de aire.

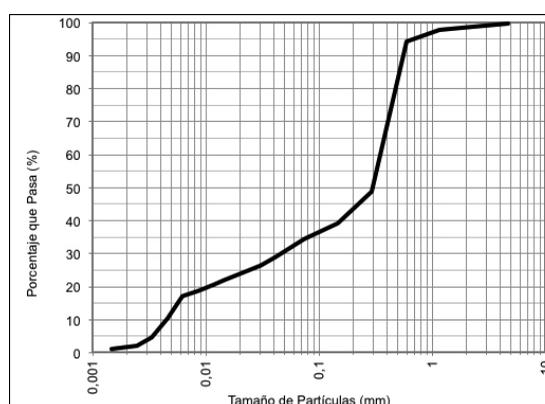


Figura. 2. Curva granulométrica de la arena

Tabla 1. Propiedades granulométricas de la arena limosa

Propiedad	Símbolo	Definición	Valor
Pasa tamiz 200			29,5
Pasa tamiz 4			99,8
Diámetro de 10%	d10		0,0048
Diámetro de 30%	d30		0,05
Diámetro promedio	d50		0,25 mm
Diámetro de 60%	d60		0,31 mm
Coefficiente de curvatura	Cc	d_{60}/d_{10}	64,6
Coefficiente de uniformidad	Cu	$\frac{(d_{30})^2}{(d_{60} d_{10})}$	1,68

Una vez saturado el material, se toma la probeta, se tapa su parte superior y se invierte en repetidas ocasiones, para así dispersar el material. La probeta se pone en una superficie plana de manera tal que el material se sedimente. Finalmente se mide la altura del material, a partir de lo cual se calcula el volumen máximo ocupado por el suelo (Vt). Además, dado que la arena estudiada presenta un importante contenido de finos, las lecturas fueron tomadas 24 horas después de realizar la dispersión del material.

La relación de vacíos mínima del material (ecuación [1]) corresponde a $e_{min} = 0,21$. Esta se determinó utilizando el método descrito en la norma INVE-136, el cual consiste en tomar un recipiente de volumen conocido y llenar del molde en cinco capas aproximadamente iguales de suelo. A cada una de ellas se les aplica 50 golpes con un martillo con características específicas. Una vez compactada la totalidad del material, se retira el collar y se enrasa cuidadosamente, para tomar el peso del molde y el suelo.

$$e = \frac{V_t G_s \gamma_w}{W_s} - 1 \quad [1]$$

Donde V_t es el volumen de suelo, G_s es la gravedad específica, γ_w es el peso específico del agua y W_s es el peso del suelo.

Mediante el método de deposición seca en embudo se calculó un ángulo de reposo del material de 39° . Finalmente, utilizando el método propuesto por Krumbein y Sloss (1963), se realizó el análisis morfológico de las partículas, por medio de imágenes microscópicas de las partículas retenidas en los tamices 200, 100, 50 y 30. De acuerdo con el método, se define la redondez mediante la ecuación [2]. En la figura 3 se presenta el análisis morfológico de las partículas retenidas en el tamiz 30.

$$\text{Redondez} = \frac{\sum r_i / N}{r_{max}} \quad [2]$$

Donde r_i es el radio de las circunferencias dibujadas en los bordes de la partícula, N es el número de circunferencias dibujadas en estos bordes y r_{max} es el radio del círculo máximo que pueda dibujarse en la partícula.

Para el caso del material estudiado, se determinó que predominan las partículas de forma subredondeada, con un contenido de 54%, en tanto las subangulares tienen un 41%.

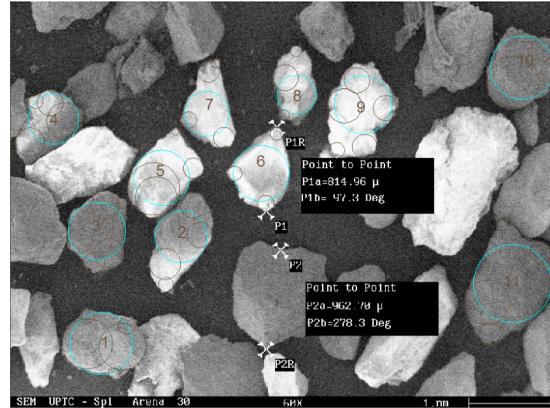


Figura 3. Análisis morfológico de las partículas retenidas en el tamiz 30

B. Métodos de preparación de la muestra

Para la ejecución de los ensayos de compresión triaxial fueron construidas dieciséis (16) muestras, mediante los métodos de apisonamiento húmedo y sedimentación en agua (Gómez, 2010). Se utilizó un muestreador partido, que permite obtener especímenes con dimensiones aproximadas de 10 cm de altura y 5 cm de diámetro, y un martillo de 4,98 cm de diámetro con una altura de caída libre de 17,76 cm y 3254,4 g de masa. El equipo descrito se presenta en la figura 4.

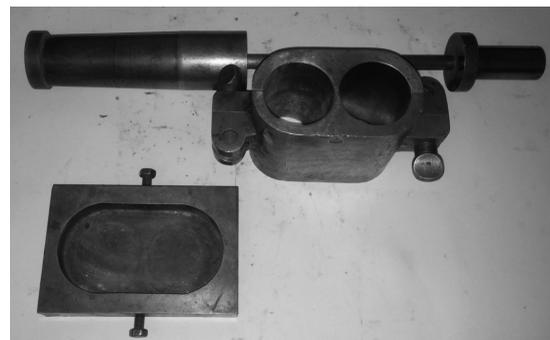


Figura 4. Equipo utilizado para la construcción de las muestras

1) Método de apisonamiento húmedo (WT)

En este método, descrito por Bishop y Henkel (1976), el suelo es tamizado y se divide por tamaños de partículas. La cantidad de suelo por utilizar se calcula en función de la granulometría. Una vez separadas las cantidades adecuadas de cada tamaño de partícula, se mezclan hasta obtener una muestra homogénea. El suelo se divide en un número x de partes (en este caso cinco), y a cada una de ellas se le agrega la cantidad de agua necesaria para obtener el 8% de humedad.

Se inicia el depósito de la primera capa de la muestra y se compacta utilizando el martillo, hasta que esta ocupe un espacio aproximado de 1/5 de la altura del molde o 2 cm. El número de golpes depende de la densidad de la muestra que se desee obtener.

2) Método de sedimentación en agua (WS)

Se tamiza el suelo y se divide por tamaños de partículas, de la misma manera en que se realiza para el método de apisonamiento húmedo. En este caso, la muestra se depositó en diez capas.

Inicialmente se pesa y se deposita la cantidad de agua requerida para que el material se sature, se toma una de las partes del suelo previamente pesadas y con la ayuda de un embudo se deja caer el material de manera controlada, en forma de círculos y desde una altura aproximada de 3 mm sobre la capa superior de agua o material.

Si al depositar el suelo, ocupa un espacio superior a 1/10 de la altura total del molde, esta se compacta hasta ocupar la altura deseada, utilizando el martillo. Este procedimiento se repite para cada una de las capas de suelo, y al depositar la capa final se enraza.

4. Resultados y discusión

Durante el desarrollo de la investigación, se realizaron nueve (9) ensayos de compresión triaxial monotónicos, con deformación controlada. Las muestras fueron

elaboradas utilizando los métodos descritos en las secciones III-B-1 y III-B-2; se mantuvieron las mismas condiciones de gradación del material y se varió su densidad relativa.

En la tabla 2 se presenta el resumen de los ensayos de compresión triaxial realizados y las características de las muestras utilizadas. Los resultados obtenidos en los ensayos de compresión triaxial monotónica fueron representados gráficamente en los planos $q-p'$, $q-\epsilon$ y $\Delta\mu-\epsilon$.

Tabla 2. Resumen de ensayos triaxiales

Ensayo	e	Dr	s3	Método de preparación de la muestra
M1	0,84	18,3	100	WT
M2	0,65	40,5	400	WT
M3	0,48	64,4	200	WT
M4	0,48	64,4	400	WT
M5	0,31	86,5	200	WT
M6	0,32	86,4	400	WT
M7	0,47	66,2	100	WS
M8	0,47	65,4	200	WS
M9	0,47	64,8	400	WS
D1	0,46	67,5	400	WT

Las gráficas obtenidas luego del proceso de falla de la muestra M2, elaborada mediante apisonamiento húmedo, se presentan en la figura 5. En el plano esfuerzo-deformación ($q-\epsilon$) se evidencia un aumento en el esfuerzo desviador, hasta una deformación

aproximada del 5%, con un incremento cercano a 144 kPa, cada 1% de deformación.

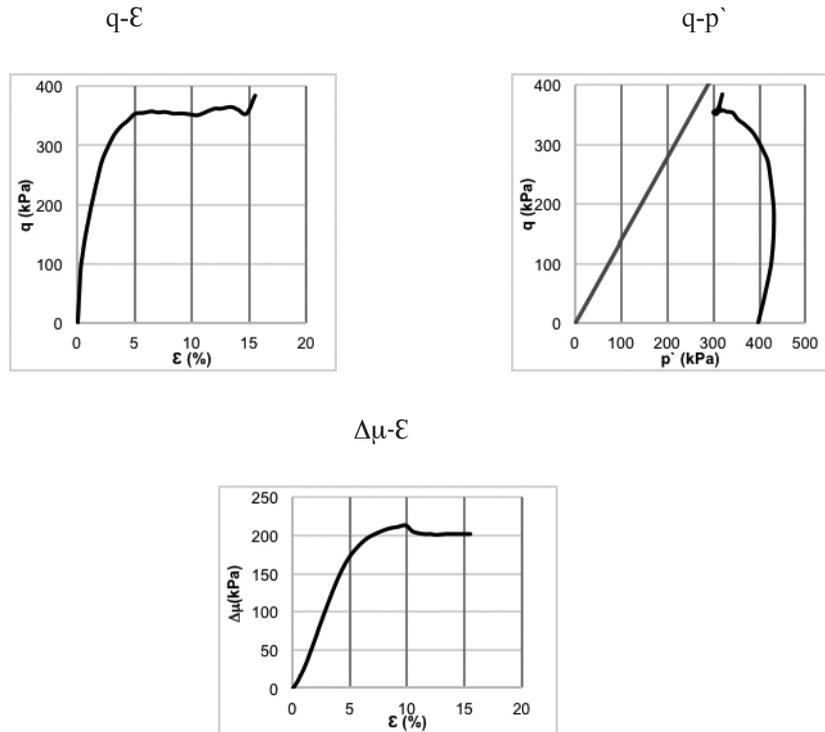


Figura 5. Ensayo triaxial monotónico M2 (apisonamiento húmedo)

En la trayectoria de esfuerzos $q-p'$, la muestra presenta una disminución en el esfuerzo promedio (p'), lo cual indica que se presenta una tendencia dilatante desde el inicio del proceso de falla hasta alcanzar una deformación aproximada del 1,2%. En este punto se contrae, y comienza nuevamente a dilatar al llegar al 9,8% de la deformación axial. En este punto, el valor alcanzado de esfuerzo desviador (q) es de 352 kPa y el esfuerzo promedio (p') es de 300 kPa.

La presión de poros aumenta con la deformación axial de la muestra y presenta un incremento drástico hasta alcanzar una deformación aproximada del 7% y se estabiliza en un valor aproximado de 200 kPa.

En la figura 6 se representan los resultados obtenidos del ensayo realizado a la muestra M8, la cual fue construida utilizando el método de sedimentación en agua. La muestra desarrolla inicialmente una tendencia dilatante, la cual, al alcanzar el 1,7% de la deformación, cambia a contractiva. Luego inicia nuevamente a dilatarse a partir de una deformación equivalente al 6%. Lo anterior se evidencia en el plano esfuerzo-deformación ($q-\epsilon$).

La presión de poros aumenta hasta alcanzar un pico de 163 kPa, a una deformación axial del 10%, que coincide con el punto de transformación de fase. En esta, la muestra pasa de presentar una tendencia contractiva a dilatante; punto en el cual los valores alcanzados de esfuerzo desviador (q) y esfuerzo promedio (p') corresponden a 400 y 380 kPa, respectivamente.

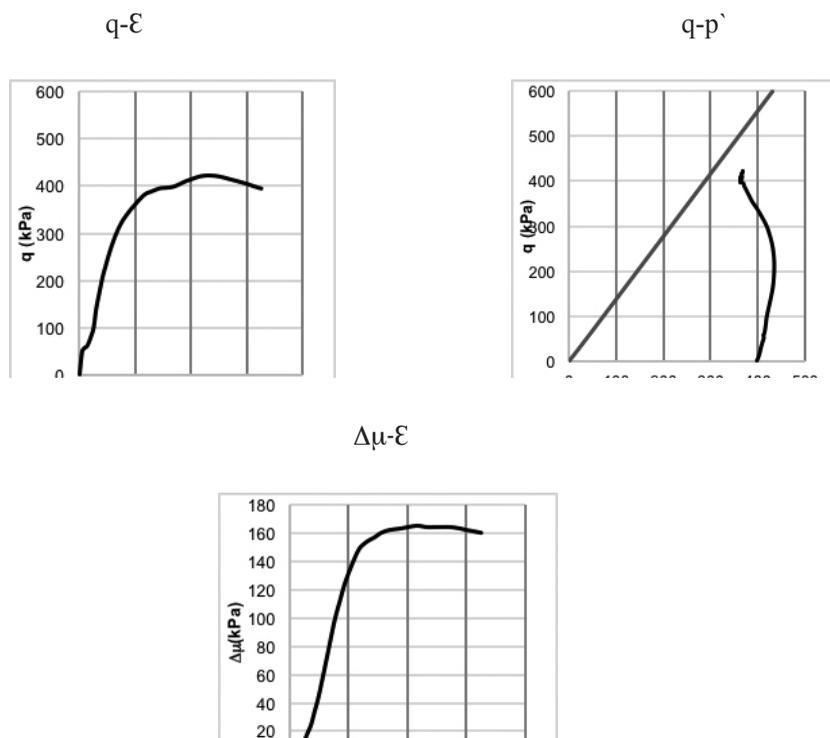


Figura 6. Ensayo triaxial monotónico M8 (sedimentación en agua)

A. Comportamiento de licuación por flujo de la arena limosa de Paipa

En la figura 7 se presentan las gráficas de ensayos realizados a las muestras construidas mediante el mismo método de preparación, con valores de relación de vacíos similares y bajo diferente presión de confinamiento efectivo.

En las gráficas se observa que se presenta el efecto de barotropía descrito por Gómez (2010), que consiste en el aumento del esfuerzo desviador máximo que resiste la muestra, a medida que se incrementa la presión de confinamiento (σ_3). Adicionalmente, se evidencia que las muestras densas presentan un endurecimiento mayor que el de las muestras sueltas.

Para el caso de las muestras preparadas con el método de sedimentación en agua, el endurecimiento se produce

con una pendiente menor; sin embargo, se tienden a alcanzar los mismos valores máximos de esfuerzo desviador.

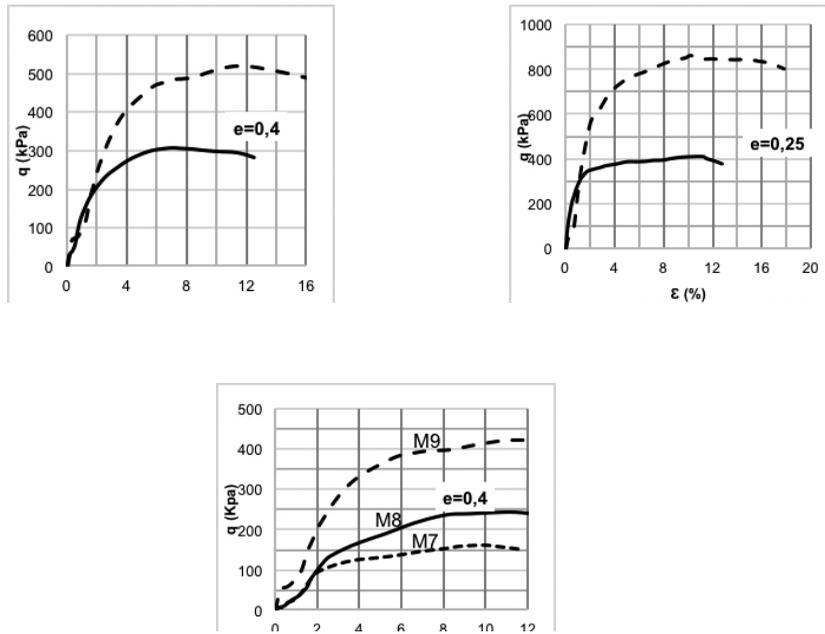


Figura 7. Curvas $q - \epsilon$

Las gráficas de las muestras analizadas, en el plano $\epsilon - \Delta\mu$, se presentan en la figura 8. El comportamiento de las muestras que presentan la misma relación de vacíos ($e = 0,4$) es similar.

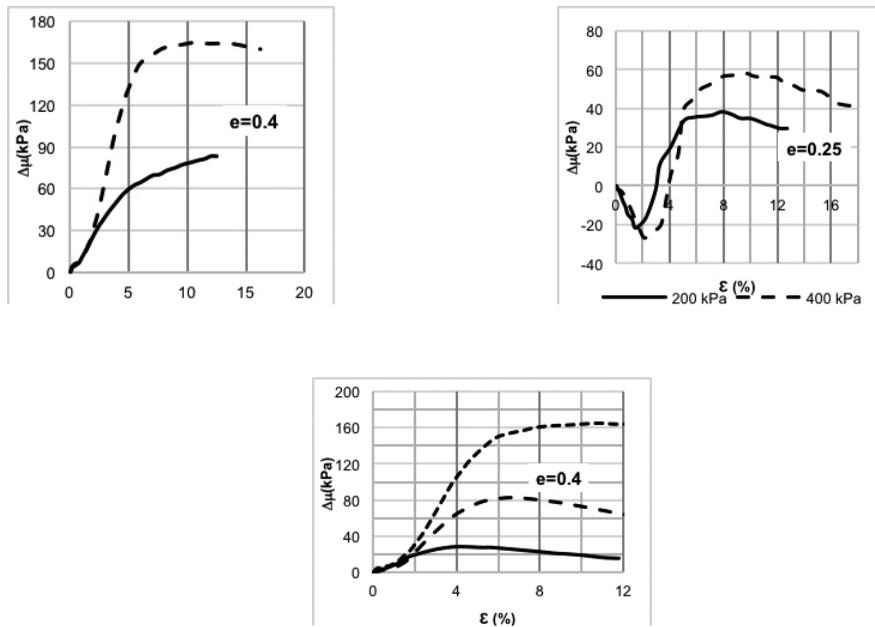


Figura 8. Curvas $\epsilon - \Delta\mu$

Las muestras preparadas con el método de apisonamiento húmedo presentan un incremento de la presión de poros, con una pendiente mayor que la de las muestras preparadas por sedimentación en agua; sin embargo, como en el caso del plano $\varepsilon - q$, la tendencia de las muestras es a alcanzar valores similares de presión de poros.

Las muestras M5 y M6 inicialmente presentan valores negativos de presión de poros, los cuales indican una posible sobreconsolidación de las muestras. Estas son las de mayor densidad ensayadas, dado su alto porcentaje de contenido de finos.

Con el fin de construir la línea de estado crítico del material, se graficaron los nueve ensayos realizados en el plano $q-p'$ (figura 9). La línea punteada representa la línea de estado crítico del material (CSL), que parte del origen y mantiene una pendiente $M = 1,4$, la cual fue correlacionada con el ángulo de fricción crítico del material (ecuación [3]):

$$\text{sen} \phi_c = \frac{3M}{6 + M} \quad [3]$$

El valor obtenido para el ángulo de fricción crítico del material es de $34,6^\circ$.

Con una menor pendiente, en el gráfico se observa la línea de transformación de fase (PTL), cuya pendiente corresponde a $M = 1,24$, la cual representa el estado en el que la muestra cambia su tendencia contractiva a dilatante.

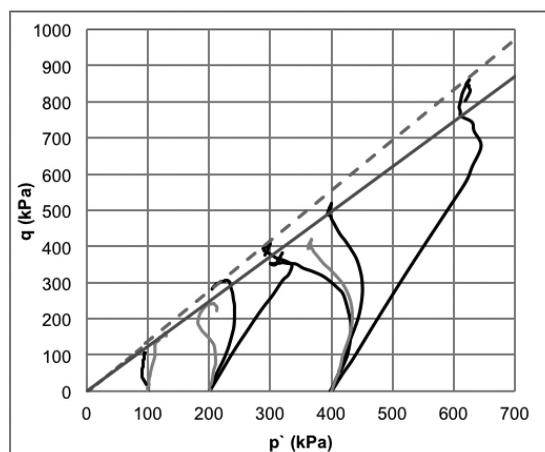


Figura 9. Parámetros de licuación de la arena limosa

B. Determinación del grado de vulnerabilidad a licuación de la arena limosa

Con el fin de determinar el grado de vulnerabilidad a la licuación del material estudiado, se utilizó el método propuesto por Verdugo e Ichihara (1996), que plantea un análisis del comportamiento de consolidación isotrópica del material, en condiciones densa y suelta, en comparación con la línea obtenida de estado crítico (CSL). Esto permite identificar zonas contractivas y dilatantes, que son características del material y reflejan ciertos factores que influyen en la susceptibilidad a presentar el fenómeno de licuación por flujo.

En la figura 10 se presenta el análisis del grado de vulnerabilidad a la licuación de la arena limosa. Para la construcción de las líneas de consolidación máxima y mínima, fueron realizados ensayos de consolidación unidimensional a muestras construidas en condiciones densa y suelta, respectivamente. La línea de estado estable se obtuvo mediante los resultados de los ensayos triaxiales, para las muestras M4, M5 y M6, elaboradas con el método de apisonamiento húmedo (WT).

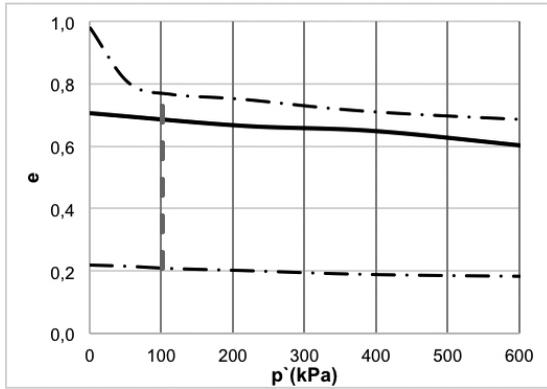


Figura. 10. Vulnerabilidad a la licuación del material

De acuerdo con lo anterior, se construyeron las curvas de consolidación isotrópica máxima y mínima y la línea de estado estable del material. Para un esfuerzo de 100 kPa, se obtuvieron los siguientes resultados: $e_{\max 1} = 0,78$, $e_{\min 1} = 0,21$ y $e_{ss 1} = 0,68$. Así, se calcula la relación contractiva del material (ecuación [4]) y se obtiene un valor de $R_c = 0,17$.

$$R_c = \frac{(e_{\max})_1 - (e_{ss})_1}{(e_{\max})_1 - (e_{\min})_1} \quad [4]$$

El área contractiva (A_c), que corresponde a la superficie comprendida entre la línea de consolidación máxima y la línea de estado estable, es menor que el área dilatante (A_d), lo cual es coherente con el resultado obtenido de R_c , que indica un bajo grado de vulnerabilidad a la licuación.

5. Conclusiones

Para estudiar el comportamiento de licuación por flujo en suelos arenosos se debe realizar el análisis del comportamiento no drenado, por cuanto en este se presenta un aumento de exceso de presión de poros, lo cual produce una reducción de los esfuerzos efectivos del suelo. Este es el principio fundamental del fenómeno de licuación, que puede llegar a producir el colapso de la estructura o la generación de asentamientos importantes.

La arena limosa estudiada es un material bien gradado, con mala distribución de los tamaños de partícula, al presentar valores de coeficiente de uniformidad y coeficiente de curvatura de 1,68 y 64,6, respectivamente. El contenido de finos del material es cercano al 30%, lo cual indica que, respecto a las características granulométricas del material, este presenta baja susceptibilidad a la licuación.

Otros factores que dependen de la fábrica del suelo, de su condición *in situ* y de la manipulación de las muestras en el laboratorio influyen en la determinación del comportamiento del material. Entre ellos se encuentran la presión de confinamiento, la relación de vacíos, la presencia de aire y el método de preparación de la muestra.

Para el caso del estudio realizado, uno de los factores determinantes en la respuesta de la arena limosa, ante las condiciones impuestas en los ensayos de compresión triaxial de tipo monotónico, fue su alto contenido de finos, el cual aumenta la densidad del material y, en consecuencia, disminuye su potencial de licuación.

Durante el proceso de falla de la totalidad de las muestras se presentó un aumento drástico del esfuerzo desviador, al alcanzar una deformación aproximada del 2%, seguido de un incremento en menor proporción.

El incremento de presión de poros durante la falla se presentó al alcanzar el 5% de la deformación axial, aproximadamente, y a partir de este valor se estabilizó. Las muestras 5 y 6, que inicialmente presentan valores negativos, tienen también un incremento súbito al mismo porcentaje de deformación.

Al graficar las trayectorias de esfuerzos obtenidas de los doce ensayos de compresión triaxial monotónica analizados, se determinó la línea de estado crítico y se obtuvo un ángulo de $\phi = 34,6^\circ$, un valor cercano

al ángulo de reposo de material $\phi = 39^\circ$. El valor del ángulo de la línea de transformación de fase obtenida fue de $\phi = 31^\circ$.

Ninguna de las muestras presentó disminución del esfuerzo desviador en la trayectoria de esfuerzos $q - p'$; por esta razón no fue posible determinar la línea de inestabilidad de la arena limosa estudiada. De acuerdo con lo anterior, se deduce que el material estudiado presenta baja susceptibilidad a licuación por flujo.

El comportamiento del material estudiado muestra una tendencia dilatante predominante, lo cual se evidencia en el análisis realizado mediante el método planteado por Verdugo e Ishihara (1996). Se observa que el área contractiva es mucho menor que el área dilatante del material, lo que indica que es baja la susceptibilidad de la arena limosa de Paipa a presentar el fenómeno de licuación por flujo.

6. Referencias

Andrade, J. E. (2009). A predictive framework for liquefaction instability. *Geotechnique*, 59, 673-682.

Asenjo, R. H. (2010). *Resistencia cíclica en una arena de relaves* (tesis de Ingeniería Civil). Santiago de Chile: Universidad de Chile.

Bishop, A. y Henkel, D. J. (1976). *The measurement of soil properties in the triaxial test*. Gran Bretaña: Edward Arnold.

Chu, J. y Leong, W. K. (2001) Pre-failure strain softening and pre-failure instability of sand: a comparative study. *Geotechnique*, 51, 311-321.

Georgiannou, V. N, Tsomokos, A. y Stavrou, K. (2008). Monotonic and cyclic behavior of sand under torsional loading. *Geotechnique*, 58, 113-124.

Gómez Vergara, E. J. (2010). *Cambios de transformación de fase y atractores en materiales granulares* (tesis de maestría en Ingeniería Civil). Bogotá: Universidad de los Andes.

Idriss, I. M y Boulanger, R. W. (2008). *Soil liquefaction during earthquakes*. Oakland: Instituto de Investigaciones de Ingeniería Sísmica.

Jiménez, O. J. (2011). *Análisis del comportamiento de licuación por flujo en la arena del Guamo* (tesis de maestría en Ingeniería). Bogotá: Universidad de los Andes.

Krammer, S. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Washington: Prentice Hall.

Krumbein, W. C. y Sloss L. L. (1963). *Stratigraphy and sedimentation*. San Francisco: W. H. Freeman & Co.

Murthy, T. G. (2007). Undrained monotonic response of clean and silty sands. *Geotechnique*, 57, 273-288.

Solaque, D. P. y Lizcano, A. (2008). Angulo de fricción crítico y ángulo de reposo en la arena del Guamo. *Épsilon*, 11, 7-20.

Verdugo, R. e Ishihara, K. (1996). The steady state of sandy soils. *Soils and Foundations*, 36, 81-91.

Yang, J. y Dai, B.B (2011) Is the quasi-steady state a real behavior a micromechanical perspective. *Géotechnique*, 61, 175-183.