



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Bogotá

Maestría en Ingeniería Civil
ÉNFASIS EN GEOTECNIA

Evaluación del comportamiento cíclico ante licuación de arenas con inclusión de gas,
generado a partir de oxidación de materia orgánica, bajo condiciones de movilidad
cíclica

Estudiantes:

Juan Sebastian Tituaña Puente
Daniel Fernando Amarillo Soto

Trabajo para obtener el título de Magíster en Ingeniería Civil

Asesor:

JOAN M. LARRAHONDO, Ph.D.

Co-asesor:

Dr.-Ing. Luis Felipe Prada Sarmiento

Bogotá, Colombia

Abril de 2019

Agradecimientos

Juan Tituaña agradece a,

Agradezco a mi familia que me apoyó incondicionalmente en mi decisión de viajar y prepararme profesionalmente.

También, un agradecimiento especial a mis profesores Joan Manuel Larrahondo y Felipe Prada, por guiarme en este proceso. No sólo me prepararon en lo profesional, también en lo humano; al darme herramientas para saber proceder con honestidad, ética y excelencia en todos los aspectos de la vida.

Daniel Amarrillo agradece a,

Quiero agradecer primero que todo a Dios por iluminarnos cada día y darnos las fuerzas necesarias para superar los obstáculos y dificultades que se nos presentaron a lo largo de este proceso.

A mis padres, Martha y Marcos Javier, quienes siempre han tenido las palabras exactas para hacerme seguir adelante con mis metas. A mi hermano Javier, quien ha sido pilar importante a lo largo de mi vida. A mi pareja Patricia quien siempre me ha dado el apoyo para cumplir mis metas.

Este agradecimiento lo extendemos especialmente a nuestro director Joan Manuel Larrahondo y codirector Luis Felipe Prada, quienes, con su apoyo incondicional, paciencia y dedicación nos orientaron desde el inicio del proyecto, gracias infinitas por la confianza.

Agradecimientos conjuntos,

Al ingeniero Yesid Alexander Alvarado y a su grupo de trabajo, especialmente a Oscar Rodríguez y Fernando. A los técnicos de laboratorio, especialmente a Manuel y Leonardo quienes nos brindaron su apoyo incondicional en todas las instancias de la investigación; compartiendo sus conocimientos y experiencias con nosotros.

Resumen

Desde el año de 1964 se ha venido estudiando el proceso de licuación en arenas y las formas para mitigar el potencial de licuación de dichos suelos. Grozic et al (1999) empieza a investigar el comportamiento de arenas sueltas con inclusión de gas ante licuación, a partir de esta investigación, se han desarrollado métodos para la generación de gas en muestras de arena como: inyección de CO₂, electrólisis, biogás, etc. En el año 2017 con la investigación de Cristancho et al. (2017) se desarrolló un método para la generación de gas por medio de una reacción química que consiste en la oxidación de materia orgánica, la cual libera CO₂. Este método fue utilizado en esta investigación para producir ensayos triaxiales cíclicos con gas; se ejecutaron 3 ensayos triaxiales cíclicos a muestras saturadas y 3 ensayos triaxiales cíclicos a muestras con gas, el objetivo fue comprar el número de ciclos que se requiere para iniciar el proceso de licuación. Los resultados de los ensayos muestran que al desaturar el material ligeramente mediante la técnica de oxidación de materia orgánica hay un aumento significativo en el número de ciclos que se requiere para iniciar el proceso de licuación, además se evidenció, que una pequeña cantidad de materia orgánica puede generar una cantidad significativa de gas al mezclarse con peróxido de hidrógeno. Otro hallazgo muestra que la materia orgánica no se la puede eliminar completamente; a pesar de que la arena fue sometida a un tratamiento de lavado con peróxido de hidrógeno a una concentración del 30% y calcinada a 420°C; únicamente se logró eliminar aproximadamente el 90% de material orgánica.

Abstract

Since 1964, the liquefaction process has been studied in sands and ways to mitigate the liquefaction potential of these soils. Grozic et al (1999) begins to investigate liquefaction behavior of loose gassy sands. Based on this research, methods have been developed for gas generation in sand samples such as: CO₂ injection, electrolysis, biogas, etc. Framework by Cristancho et al. (2017) developed a method for gas generation that consist in a chemical reaction due to the oxidation of organic matter, which produce CO₂. This method was used in this investigation to produce cyclic triaxial gas test. Three cyclic triaxial tests were performed on saturated samples and three cyclic triaxial tests on gas samples, the objective was compared the number of cycles required to trigger the liquefaction process. The tests results show that when the material is desaturated slightly, there is a significant increase in the number of cycles required to trigger the liquefaction process. It also showed that a small amount of organic matter can generate a significant amount of gas when mixed with hydrogen peroxide. Another finding shows that organic matter cannot be eliminated completely; although the sand was subjected to a washing treatment with hydrogen peroxide at a concentration of 30% and calcined at 420 ° C; only 90% of organic material was removed.

Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Justificación.....	1
1.2	Planteamiento del problema.....	2
1.3	Hipótesis.....	3
1.4	Pregunta de investigación.....	3
1.5	Objetivo general.....	3
1.6	Objetivos específicos.....	3
2	MARCOS DE REFERENCIA.....	4
2.1	Marco de antecedentes.....	4
2.2	Marco conceptual y teórico.....	6
2.2.1	Teoría del estado crítico.....	6
2.2.2	Licuación de arenas.....	7
2.2.2.1	Factores físicos que inciden en la licuación.....	7
2.2.2.2	Licuación por flujo.....	8
2.2.2.3	Movilidad cíclica.....	9
2.2.3	Patrones de falla por licuación.....	10
2.2.3.1	Desencadenamiento del proceso de licuación.....	11
2.2.4	Suelos Gaseosos.....	11
2.2.5	Oxidación de Materia Orgánica con Peróxido de Hidrógeno.....	13
2.2.6	Modelos de cuantificación de gas.....	14
2.3	Reconstrucción de muestras de arena en ensayos triaxiales.....	14
2.3.1	Métodos de preparación de muestras.....	15
2.3.2	Discusión de los métodos de preparación de muestras de arena.....	16
3	MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	17
3.1	Materiales.....	17
3.1.1	Arena del Guamo.....	17
3.1.1.1	Geología de la arena del Guamo – Tolima.....	17
3.1.1.2	Características físicas de la arena del Guamo.....	18
3.1.1.3	Características químicas de la arena del Guamo.....	22
3.2	Equipos y herramientas.....	24
3.2.1	Muestreador para fabricación de muestras de arena.....	24
3.2.2	Bomba de Vacío.....	25
3.2.3	Equipo Triaxial Cíclico.....	25
3.2.4	SSM-5000A Solid Sample Combustion Unit.....	27
3.3	Metodología para la ejecución de ensayos triaxiales.....	28

3.3.1	Metodología para la ejecución del ensayo triaxial CU bajo condiciones de carga monotónicas	28
3.3.1.1	Preparación de muestra arena:	28
3.3.1.2	Saturación de la muestra	31
3.3.1.3	Fase de consolidación	32
3.3.1.4	Fase de corte	33
3.3.2	Metodología para la ejecución de ensayos triaxiales cíclicos a muestras saturadas.....	33
3.3.2.1	Preparación de la muestra.....	33
3.3.2.2	Saturación de la muestra.....	36
3.3.2.3	Consolidación de la muestra.....	36
3.3.2.4	Etapas de corte	37
3.3.3	Metodología para la ejecución de ensayos triaxiales cíclicos con muestras desaturadas con gas	37
3.3.3.1	Etapas de circulación del peróxido de hidrogeno.....	37
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
4.1	Resultados y análisis de los ensayos triaxiales CU.....	39
4.1.1	Determinación de los parámetros del estado crítico.....	39
4.1.2	Comparación de resultados con otras investigaciones	41
4.2	Análisis de los ensayos y triaxiales cíclicos a muestras saturada	41
4.2.1	Patrones de falla de muestras de arena en condiciones cíclicas	41
4.2.2	Comparación de resultados con otras investigaciones	43
4.2.3	Resultados de los ensayos triaxiales cíclicos a muestras saturadas.....	43
4.3	Análisis de los ensayos triaxiales cíclicos a muestras con gas	46
4.3.1	Generación de gas	46
4.3.1.1	Calibración en la producción de gas.....	46
4.3.1.2	Resultados del gas producidos en los ensayos triaxiales	50
4.3.2	Resultados de los ensayos triaxiales cíclicos en muestras con gas.....	51
4.3.2.1	Comparación de resultados con otras investigaciones	54
5	CONCLUSIONES.....	56
6	TRABAJO FUTURO	58
7	REFERENCIAS	59

Índice de figuras

Figura 1. Fundamentos del estado crítico. Niemunis (2015).	6
Figura 2. Comportamiento monótono no drenado de una arena con densidad relativa constante. Kramer (1997).	9
Figura 3. Influencia de la densidad relativa en la respuesta no drenada de materiales granulares. Kramer (1997).	9
Figura 4. Movilidad cíclica cuando la trayectoria de esfuerzos no cruza la línea de transformación de fase. Kramer (1997).	10
Figura 5. Movilidad cíclica cuando la trayectoria de esfuerzo cruza la línea de transformación de fase. Ishihara et al. (1975).	10
Figura 6. Patrones de deformación observados y mecanismos de falla: (a) falla de flujo; (b) movilidad cíclica; (c) acumulación de deformación plástica; (d) falla por flujo seguido de movilidad cíclica; (e) falla de flujo seguido de acumulación de deformación plástica. Fuente Sze et al. (2014).	11
Figura 7. Comparación conceptual entre dos fábricas de suelo con gas Thomas (1987).	12
Figura 8. Resistencia cíclica para diferentes métodos de preparación de muestras para ensayos triaxiales cíclicos Sze et al. (2014).	15
Figura 9. Bolsa de 10 Kg de Arena del Guamo Tolima DIRIMPEX SAS, Bogotá.	17
Figura 10. Tamices seleccionados.	18
Figura 11. Determinación de la gravedad específica (Gs) con picnómetros.	19
Figura 12. Determinación de relación de vacíos máxima.	20
Figura 13. Relación de vacíos mínima.	20
Figura 14. Curva granulométrica arena del Guamo-Tolima.	21
Figura 15. Equipo para determinar Carbono Orgánico Total.	22
Figura 16. Esquema de dimensiones del Molde.	24
Figura 17. Esquema de dimensiones del Apisonador.	24
Figura 18. Bomba de Vacío y Trampa de agua.	25
Figura 19. Elementos del Equipo Triaxial.	25
Figura 20. Equipo SSM-5000A Solid Sample Combustion Unit.	27
Figura 21. Instalación de membrana sobre el pedestal del equipo triaxial.	28
Figura 22. Instalación del molde sobre el pedestal del equipo.	29
Figura 23. Aplicación de succión y tensión de la membrana.	29
Figura 24. Retiro del molde.	30
Figura 25. Percolación.	31
Figura 26. Fase de saturación.	32
Figura 27. Fase de consolidación.	32
Figura 28. Tratamiento con Peróxido de Hidrógeno al 30% en la Arena.	33
Figura 29. Cabezal con accesorio de plástico.	34
Figura 30. Desplazamiento de pistón.	34
Figura 31. Generación de succión de la celda de carga con cabezal.	35
Figura 32. Contacto entre la celda de carga y cabezal.	35
Figura 33. Adherencia entre el cabezal y la celda de carga.	35
Figura 34. Curvas de ensayos cíclicos de prueba.	36
Figura 35. Esquema de circulación del peróxido de hidrógeno.	38
Figura 36. Resultados de la caracterización mecánica.	40
Figura 37. Tipo de falla por flujo.	42
Figura 38. Tipo de falla por movilidad cíclica.	42
Figura 39. Tipo de fallas asociados a procesos de licuación Witchmann (2005).	43
Figura 40. Parámetro de estado.	44

Figura 41. Resultados del ensayo cíclico a la muestra GUAM_3C.....	44
Figura 42. Resultados del ensayo cíclico a la muestra GUAM_4.	45
Figura 43. Resultados del ensayo cíclico a la muestra GUAM_4C.....	45
Figura 44. Resumen de ensayos cíclicos.....	46
Figura 45. Gas producido al despresurizar la cámara para muestra preparada con 1% de materia orgánica más peróxido de hidrógeno al 4% de concentración.....	47
Figura 46. Gas producido al despresurizar la cámara para muestra preparada con arena previamente tratada con peróxido de hidrógeno y calcinada más peróxido de hidrógeno al 4% de concentración.	47
Figura 47. Tiempo y cantidad de gas generado para muestra preparada con arena previamente tratada con peróxido de hidrógeno y calcinada más peróxido de hidrógeno al 4% de concentración.....	48
Figura 48. Cambio de volumen total de la muestra (Vega Posada,2014).....	49
Figura 49. Cambio de volumen de agua en la muestra.	50
Figura 50. Resultados del ensayo cíclico a la muestra con gas GUAM_5C_Gs.....	52
Figura 51. Resultados del ensayo cíclico a la muestra con gas GUAM_6C_Gs.....	52
Figura 52. Resultados del ensayo cíclico a la muestra con gas GUAM_7C_Gs.....	53
Figura 53. Resultados del ensayo cíclico a la muestra con gas GUAM_8C_Gs.....	53
Figura 54. Resultados de ensayos triaxiales a muestras con gas Pietruszczak et al, (2003).	54
Figura 55. Resultados de ensayos cíclicos con gas Wang et al. (2017).....	55
Figura 56. Gráfico para determinar relación entre el número de ciclos para alcanzar la movilidad cíclica y el grado de saturación.	56

Índice de tablas

Tabla 1. Resultados de ensayos de caracterización física	21
Tabla 2. Datos para la curva granulométrica.....	21
Tabla 3. Parámetros de la curva granulométrica.....	22
Tabla 4. Contenido de materia orgánica de la Arena del Guamo	23
Tabla 5. Resultados obtenidos de los ensayos triaxiales CU	39
Tabla 6. Parámetros del estado crítico de la arena del Guamo.....	39
Tabla 7. Resultados de los parámetros del estado crítico de la arena del Guamo y la arena de Toyoura.	41
Tabla 8. Resultados de los ensayos triaxiales cíclicos	44
Tabla 9. Resultados de los ensayos triaxiales cíclicos	51
Tabla 10. Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos cíclicos de muestras saturadas y con gas.....	56

CAPITULO 1

1 INTRODUCCIÓN

Una de las causas más dramáticas de daños en las estructuras es la ocurrencia de licuación inducidas sísmicamente en depósitos de arena saturada. Las ilustraciones históricas más relevantes de los efectos producidos por la licuación del suelo se evidenciaron en el terremoto de Niigata en 1964, donde se observaron edificios volcados, flotación de tanques enterrados, el colapso de puentes, etc. Estos daños se produjeron por la pérdida de la resistencia al esfuerzo cortante debido a una reducción en el esfuerzo efectivo. Las principales consecuencias normalmente son asentamientos volumétricos y desplazamientos laterales excesivos y la pérdida de capacidad portante del suelo.

El entendimiento de las causas que producen el proceso de licuación de suelos llevó a investigadores a desarrollar métodos activos de mejoramiento de suelo donde se trata de densificarlo o mejorar su drenaje Wiley et al. (2015). Los ejemplos más comunes de alternativas de mitigación de licuación son: vibro-flotación, compactación dinámica, permeación con grout, columnas de jet grouting, columnas de grava, etc.

Otra técnica de mitigación del proceso de licuación realizada en laboratorio es la generación de gas en muestras de arena suelta, cuyos resultados experimentales reportados por Grozic et al. (1999), Wang et al. (2017), Vega et al. (2014) y He et al. (2014) muestran un retardo en el inicio de dicho proceso. Esta técnica únicamente se ha probado en ensayos experimentales de laboratorio y aun no se ha implementado en campo.

1.1 Justificación

En la mecánica de suelos se ha estudiado con detalle a dos tipos de suelos: los suelos saturados y los parcialmente saturados. Las hipótesis que se tiene para los suelos saturados es que el flujo de poros es incompresible mientras que en los suelos parcialmente saturados se considera efectos de succión matricial y osmótica. En el estudio de los suelos gaseosos a diferencia de los suelos saturados se considera que el flujo si es compresible Wang et al. (2017) y no tiene efectos de succión matricial; la compresibilidad del fluido dependerá del grado de saturación del suelo, a menor porcentaje de saturación mayor será la compresibilidad del fluido.

La licuación de suelos es un proceso que ha sido estudiado ampliamente en suelos saturados por Yoshimine et al. (1992), Ishihara (1992), Kramer (1997), Tokimatsu et al. (1987), Shamoto et al. (1998), Wu et al. (2003), Idriss et al (2008), entre otros. Los estudios realizados para determinar el potencial de licuación de arenas se han realizado con base a evidencias históricas, ensayos cíclicos en cámaras triaxiales, ensayos cíclicos de corte simple y corte directo los cuales podrían arrojar resultados muy conservadores debido a que los depósitos con mayor susceptibilidad a licuarse son los superficiales, y estos muy difícilmente van a encontrarse saturados. Se ha evidenciado que saturar un material granular es sumamente complejo, ya que para eliminar todo el aire o gas existente en los poros del suelo se requiere de presiones sumamente altas para lograr disolver las burbujas de gas ocluidos en los vacíos del suelo.

El estudio del comportamiento de suelos gaseosos puede abrir una gran brecha en el entendimiento del proceso de licuación, como se mencionó anteriormente, las investigaciones muestran que el proceso de licuación se retrasa en suelos gaseosos. Probablemente las metodologías actuales utilizadas para determinar la susceptibilidad de un suelo a licuarse arrojen resultados muy conservadores al no incluir el grado de saturación del suelo. El estudio de suelos gaseosos además puede contribuir al desarrollo de metodologías pasivas de mejoramiento de suelo. Experimentalmente no se han realizado hasta el momento procesos de mejoramiento del suelo con gas in situ, el estudio de este tipo de suelos se encuentra en evolución y el propósito de este trabajo es aportar en el desarrollo de esta rama del conocimiento, no tiene el objetivo de proponer una metodología para la mitigación de licuación en campo.

1.2 Planteamiento del problema

Grozic et al. (1999) realizó estudios para determinar el comportamiento de arenas sueltas con gas. Se ejecutaron ensayos triaxiales monotónicos consolidados no drenados (CU) y se propuso un método para la inclusión de gas por inyección de CO₂. El volumen de gas se calculó a partir de la aplicación de la ley de Henry en conjunto con la ley de Boyle.

Posteriormente, en investigaciones sobre la respuesta de licuación de arenas tratadas con gas realizadas por Wang (2017), Ece et al. (2013), Yegian (2007), He (2013) se observó un retardo en el inicio de la licuación como se había mencionado anteriormente. Las variables que se utilizaron para medir el desencadenamiento de la licuación es el número de ciclos de carga. Los autores citados anteriormente definen el inicio de la licuación cuando el incremento de presión de poros iguala al esfuerzo de confinamiento produciendo momentáneamente un esfuerzo efectivo cero o en el punto que las deformaciones empiezan a crecer sin control.

Las técnicas utilizadas comúnmente para la generación de gas en dichas investigaciones fue la inyección de CO₂, electrólisis y biogás. Las técnicas que emplean el biogás y la inyección de CO₂ utilizaron montajes experimentales similares a Grozic et al. (1999). Mientras que para la técnica de electrólisis se utilizaron montajes experimentales en mesas vibratorias con cajones flexibles Yegian, et al. (2007).

La principal desventaja de los métodos de generación de gas descritos anteriormente es que se requiere de altas presiones de cámara para producir gas en ensayos triaxiales (biogás y CO₂) y en el caso de las mesas vibratorias la instrumentación para medir deformaciones y el incremento de la presión de poros es difícil de implementar (electrólisis). Por tal motivo, en la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá en el año 2015 desarrolló un nuevo método de generación de gas a partir de oxidación de materia orgánica propuesto por Cristancho et al. (2017). Los experimentos se realizaron en un edómetro donde se midió el incremento de volumen en condiciones drenadas después de la reacción química producida por la materia orgánica y el peróxido de hidrógeno. Los resultados mostraron un incremento con respecto al volumen inicial de la muestra hasta de un 25%. Este método de generación de gas no se ha ensayado para determinar la respuesta a licuación de muestras de arena.

Este método de generación de gas a partir de la oxidación de la materia orgánica tiene la ventaja que la generación de gas es inducida químicamente, es decir, el control del volumen del gas producido puede ser controlado por la cantidad de oxidante añadido en la reacción.

Del análisis anterior se deduce la importancia de aportar nuevas investigaciones en el campo de los suelos gaseosos susceptibles a licuarse donde se utilice la metodología de generación de gas a partir de la oxidación de materia orgánica propuesta por Cristancho et al. (2017) a muestras de arena, además de evaluar la evolución de la presión de poros hasta producir momentáneamente un esfuerzo efectivo cero.

1.3 Hipótesis

El número de ciclos de esfuerzo requerido para licuar una arena de baja densidad relativa aumenta al desaturar el suelo mediante gas producido por oxidación de materia orgánica, en comparación con un suelo sin gas.

1.4 Pregunta de investigación

¿Qué efecto tiene la inclusión de gas, producido por oxidación de materia orgánica, en un suelo arenoso licuable, con respecto al número de ciclos de esfuerzo requerido para iniciar la licuación?

1.5 Objetivo general

Determinar la respuesta mecánica ante licuación, de muestras de arena del Guamo con inclusión de gas, generado a partir de oxidación de materia orgánica, bajo condiciones de movilidad cíclica.

1.6 Objetivos específicos

Modificar la metodología del ensayo cíclico de compresión triaxial CU para la producción de gas en muestras de arena, usando la técnica de oxidación de materia orgánica.

Cuantificar el retraso del desencadenamiento del proceso de licuación en muestras de arena con gas, generado a partir de la oxidación de materia orgánica, con respecto a muestras de arena saturada.

CAPITULO 2

2 MARCOS DE REFERENCIA

2.1 Marco de antecedentes

Desde la década de los 60 se han realizado estudios sobre el proceso de licuación en arenas, donde se evidenciaron que los suelos que tienen una alta susceptibilidad a licuarse generalmente son arenas saturadas finas de compacidad baja. Además, se desarrollaron métodos empíricos probabilistas propuestos por Seed et al. (1983), Youd et al. (2001), Idriss et al. (2004), Cetin et al. (2004), Liao et al. (1998), Youd et al. (1997) para determinar el potencial de licuación de un depósito arenoso en términos del factor de seguridad y probabilidad de licuación. Estos métodos se basan en ensayos de campo para su cálculo, principalmente el ensayo de penetración estándar (SPT) y el ensayo de penetración del cono (CPT). Además, se han propuesto métodos para estimar el potencial de licuación con mediciones de velocidad de ondas de corte, este método demostró ser más efectivo cuando existen presencia de finos o inclusiones de grava en la matriz de suelo, de acuerdo con lo propuesto por Kayen et al. (2013).

Posteriormente, se desarrollaron metodologías probabilistas desarrollados por Tokimatsu et al. (1987) Shamoto et al. (1998) Wu et al. (2003) Cetin et al. (2009) para estimar las deformaciones en campo libre, tanto volumétricas y corte en función del factor de seguridad. Otros autores como Yi (2010) adaptaron un procedimiento de cálculo para estimar las deformaciones volumétricas post licuación, con base a los estudios realizados por Ishihara et al. (1992).

Simultáneamente se han planteado modelos constitutivos para predecir el comportamiento mecánico de suelos saturados susceptibles a licuación; un ejemplo es el modelo Hiperbólico Modificado con respuesta de presión de poros desarrollado por Matasovic (1993) el cuál se basó en el modelo propuesto por Konder et al. (1963) y finalmente adaptado por Hashash et al. (2001) para pequeñas deformaciones. Modelos elastoplásticos también han sido desarrollados para predecir el comportamiento mecánicos de arenas ante licuación, como de Dafalias (2007), Byrne et al. (2004), Etc.

El estudio de suelos gaseosos inició en 1982 con Sobkowicz, J.C bajo la hipótesis general que el fluido de los poros del suelo es compresible debido a la presencia de burbujas de gas. En este trabajo se realizó experimentos apoyado en ensayos triaxiales, desarrollando una técnica de generación de gas basada en reemplazar el agua de los poros del suelo por agua con CO₂ disuelto y después someter a la muestra a descargas isotrópicas para que el gas disuelto pase a estar en estado libre. La motivación para la realización de estos estudios resulta de casos históricos de deslizamientos de taludes en lechos marino. Estas fallas se debieron a la descarga de las mareas que generaron que la presión debido a la columna de agua se inferior a la presión de burbuja del gas, provocando una reducción en el esfuerzo efectivo del suelo.

Grozic et al. (1999), estudió el comportamiento de arenas gaseosas sueltas donde se mostraron los resultados de ensayos triaxiales no drenados a carga monotónico en especímenes de arena suelta preparados mediante el uso de inyección de CO₂ disuelto en agua; similar al montaje realizado por Sobkowickz (1982). Esta investigación evidenció que la licuación por flujo tuvo lugar en muestras con una saturación superior a 90% mientras que, para una saturación inferior, la licuación por flujo no se produjo.

Posteriormente en Amaratunga et al. (2009) se ensayaron muestras de arena con gas aplicando descargas no drenadas con esfuerzo desviador constante. Este documento demostró experimentalmente que el gas en forma libre reduce el esfuerzo efectivo en descarga no drenada bajo esfuerzo desviador constante. Además, se verificó que la línea del estado crítico es la misma tanto para arenas con gas como en arenas saturadas.

Evidencia de investigaciones recientes como Vega et al (2014), quienes utilizaron cámaras triaxiales modificadas para realizar ensayos cíclicos a muestras de arena suelta donde el contenido de gas fue controlado mediante descargas isotrópicas (entre mayor fue la descarga mayor cantidad de gas se liberó). El proceso de preparación de las muestras consistió en disolver el gas (generación de gas por inyección de CO₂) en el fluido, luego someter a la muestra a una presión de cámara mayor a la presión de burbuja y saturarla; posteriormente reducir gradualmente la presión de cámara para permitir que las burbujas de gas se liberen.

Otras investigaciones realizadas por Yegian et al. (2007), He et al. (2013), Eseller et al. (2013) ensayaron muestras de arena suelta en mesas vibratorias con cajas laminares instrumentadas. El método de generación de gas que se utilizaron fue la electrólisis y biogás. Los resultados mostraron un retardo en el inicio del proceso la licuación en comparación con suelos saturados.

En 2017 se desarrolló una metodología propuesta por Cristancho et al. (2017) para la generación de gas en arenas a partir de una reacción química producida por la oxidación de la materia orgánica. Los ensayos fueron ejecutados en un edómetro a muestras de arena, donde se reemplazó el agua de los poros por peróxido de hidrógeno causando una reacción química que libera CO₂. El gas generado reemplaza parcialmente el fluido de los poros y produce cambios en la fábrica de este, dando como resultado un incremento en volumen de la muestra, este incremento volumétrico alcanzó hasta un 25% en un gran número de especímenes ensayados.

Por otro lado, también se han desarrollados modelos numéricos que permiten predecir el comportamiento mecánicos ante licuación de suelos granulares con inclusión de gas. Investigaciones desarrolladas como el caso de Pietruszczak et al. (1996) incorpora el tamaño de burbuja y la rigidez de la fase líquido/gaseosa como parámetros relevantes en la modelación constitutiva del material. Posteriormente Pietruszczak et al. (2003), comparó el potencial de licuación de un estrato de arena saturada y con inclusión de gas; las simulaciones mostraron que, al someter a dicho estrato de arena a una demanda sísmica correspondiente al sismo de El Centro licua durante el evento sísmico mientras que con una saturación del 90% no se desencadena el proceso de licuación. Sin embargo, los modelos numéricos planteados tanto para suelos saturados y con inclusión de gas no simulan adecuadamente el comportamiento post licuación del material, es decir, no estiman adecuadamente las deformaciones y resistencia residual del suelo.

2.2 Marco conceptual y teórico

2.2.1 Teoría del estado crítico

El estado crítico se define cuando ocurre un cambio permanente de la forma del material (deformación cortante q) para un determinado esfuerzo y relación de vacío, es decir, se cumple lo siguiente:

$$\frac{dq}{d\epsilon_q} = 0$$

En la Figura 1 se aprecia el comportamiento de un material en estado denso y suelto. Para el caso del material cuya relación de vacíos se encuentra sobre la línea del estado crítico (CSL), en condiciones de corte isocórico para llegar al estado crítico tiene que perder esfuerzo efectivo debido a que no se permite cambio volumétrico, el cual se expresa a través un incremento en la presión de poros. Cuando existe la posibilidad de drenaje, o en una condición isobárica, el material debe perder volumen para alcanzar el estado crítico.

Cuando el material se encuentra en estado denso, o su relación de vacíos inicial está por debajo del estado crítico, en condiciones isocóricas el material debe ganar esfuerzo efectivo para alcanzar el estado crítico, es decir, se debe generar un exceso de presión de poros negativo. Para la condición isobárica el material debe ganar volumen para alcanzar el estado crítico.

Esto se ve reflejado en las trayectorias de esfuerzo, que para el caso isocórico se aprecia que el esfuerzo medio efectivo disminuye cuando la relación de vacíos se encuentra sobre la línea del estado crítico mientras que, en el estado denso, inicialmente disminuye un poco pero después empieza a crecer.

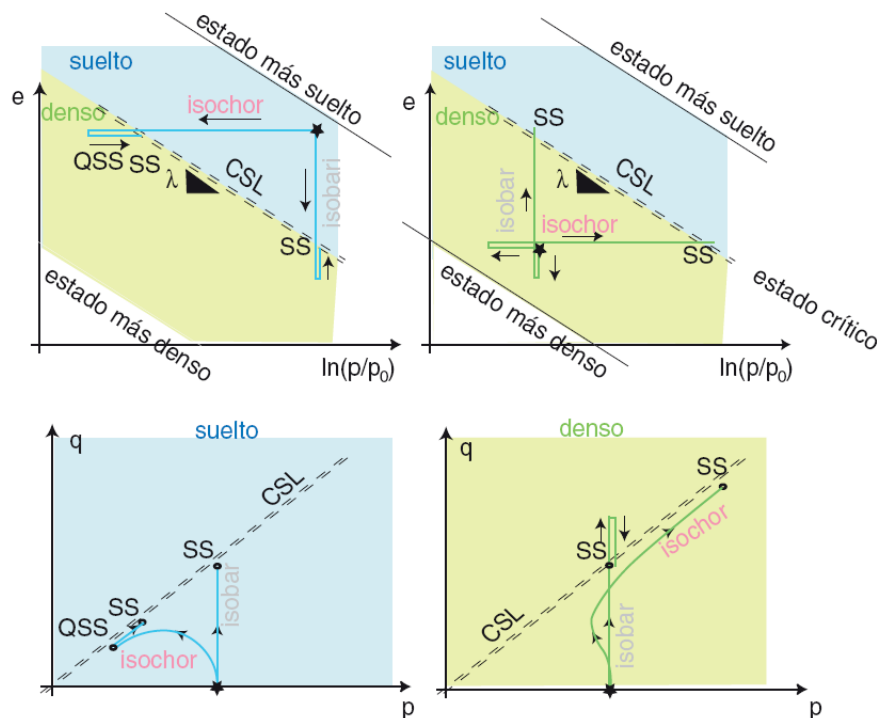


Figura 1. Fundamentos del estado crítico. Niemunis (2015).

Se puede inferir de lo anteriormente explicado que el punto de transición para que un material tenga un determinado comportamiento ya sea contractante o dilatante es la posición que se encuentre con respecto a la relación de vacíos y la curva del estado crítico en el plano $p'-e$. Esto puede ser expresado a través el parámetro de estado de Jefferies (1991), el cual se indica a continuación:

$$\psi = e - e_c$$

Donde,

e: relación de vacíos inicial del material

e_c: relación de vacíos del estado crítico

Cuando el parámetro de estado de Jefferies es mayor a cero el material tendrá un comportamiento contractante, es decir, al momento de aplicación de un esfuerzo de corte en condiciones drenadas el material disminuirá su volumen y en condiciones no drenadas se generará un incremento positivo en la presión de poros. Cuando dicho parámetro de estado ψ es menor a cero, el material tiene un comportamiento dilatante que, en condiciones drenadas, existe un aumento de volumen mientras que, en condiciones no drenadas se produce un exceso negativo de presión de poros.

2.2.2 Licuación de arenas

La licuación es definida tradicionalmente por el proceso de pérdida gradual de resistencia al corte en suelos arenosos, los suelos fluyen como un líquido viscoso a causa de un aumento en la presión de poros, generando a su vez pérdida de resistencia en la masa del suelo, Krammer (1996). Este incremento de presión de poros puede estar asociado al incremento de cargas cíclicas o cargas monotónicas, estos criterios de falla se les denomina Movilidad Cíclica y Licuación por Flujo.

2.2.2.1 Factores físicos que inciden en la licuación

Granulometría del material. Diferentes autores aseguran que 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. Igualmente, 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, Ishihara (1977).

Contenido de finos: Existe una diferencia entre los efectos causados por la licuación entre una arena arcillosa o limosa y una arena limpia. La licuación en una arena limpia generalmente presenta una pérdida permanente de resistencia al esfuerzo cortante que causa grandes deformaciones; las arenas arcillosas o limosas presentan una pérdida de resistencia transitoria que a su vez generan deformaciones mínimas por movilidad cíclica, Sancio et al. (2006). Youd (1998) propuso que todo suelo que fuese clasificado como arcilla según SUCS no sufriría licuación; mientras que los suelos con límite líquido menor a 35%, al ser graficados debajo de la línea A de la gráfica WL vs IP de Casagrande como ML OL, o con un índice plástico menor a 7%, tendrían potencial de licuación

Densidad Relativa. En la aplicación de cargas y en eventos sísmicos, un material granular suelto puede sufrir licuación mientras que este mismo suelo en un estado más compacto puede no evidenciar el fenómeno. Una arena con un valor de densidad relativa de 70 a 80% puede mostrar evidencias 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, aún después de que se hayan desarrollado altas presiones de poros. En contraste con ello, arenas con valor de densidad relativa de 30 a 60%, pueden desarrollar relaciones de presiones de poro de 100% y experimentar deformaciones por corte muy grandes del orden del 25-30%, bajo la acción de los esfuerzos de corte aplicados, Seed et al. (1984).

Contenido de gas: En suelos gaseosos el contenido de gas se ha evidenciado que retrasa sustancialmente el desencadenamiento de la licuación. En las investigaciones realizadas por Grozic et al. (1999), concluyó que desaturando el suelo con gas alcanzando una saturación menor a 90% mejora el comportamiento ante licuación por flujo. En estudios realizados por Vega et al. (2014), Yegian et al. (2007), He et al. (2013), Eseller et al. (2013) mostraron que la respuesta a licuación de suelos arenosos con una desaturación mínima retrasa e inclusive eliminan el inicio de la licuación.

2.2.2.2 Licuación por flujo

Aunque la licuación de suelos está asociada generalmente a los terremotos o cargas cíclicas, varios investigadores han demostrado que el mecanismo de inestabilidad que define tal comportamiento puede ocurrir tanto en condiciones dinámicas y estáticas Castro (1969), Lade (1992), Kramer (1996), Vaid (2000). Ahora se conoce que el comportamiento inestable causado por la licuación está asociado con el llamado proceso de 'licuación por flujo', que ocurre cuando el esfuerzo de corte requerido para el equilibrio estático de una masa de suelo es mayor que la resistencia al corte del suelo en su estado licuable Kramer (1996).

En la Figura 2 se muestra el comportamiento típico de una arena sometida a un ensayo triaxial con carga monotónica no drenada de muestras con la misma densidad relativa, en esta gráfica se muestra la línea punteada denominada línea de transformación de fase, esta línea muestra el punto donde las deformaciones se disparan y producen lo que se conoce como licuación por flujo. Un factor importante que incide en el comportamiento de un material es su densidad relativa. La Figura 3, muestra como una arena sometida a la misma presión de confinamiento genera un cambio en la trayectoria de esfuerzos, a su vez se puede ver, que la muestra A presenta licuación mientras que la muestra B no. Este se produce debido a que la muestra A en estado suelto genera presiones de poros positivas disminuyendo su esfuerzo efectivo mientras que la muestra B genera presiones de poros negativas aumentando el esfuerzo efectivo.

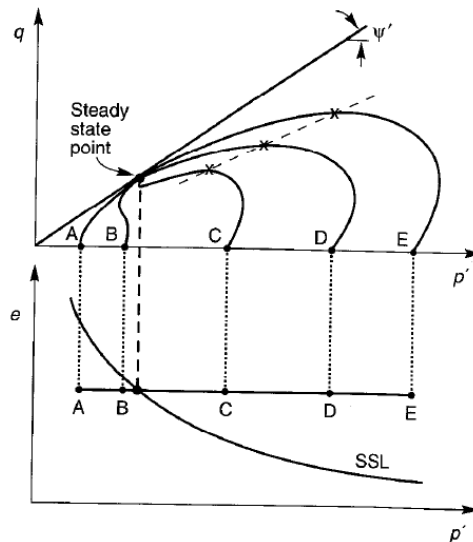


Figura 2. Comportamiento monotónico no drenado de una arena con densidad relativa constante. Kramer (1997).

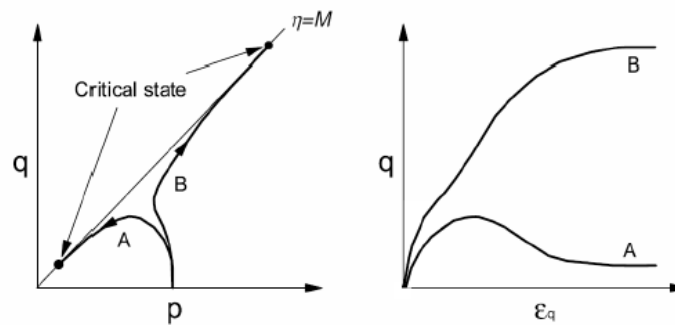


Figura 3. Influencia de la densidad relativa en la respuesta no drenada de materiales granulares. Kramer (1997).

2.2.2.3 Movilidad cíclica

La movilidad cíclica se puede definir como la reducción del esfuerzo medio efectivo p' debido a la acumulación del exceso de presión de poros en condiciones no drenadas por la aplicación de una carga cíclica. Ocasionalmente, el esfuerzo efectivo medio puede llegar a ser aproximadamente cero con valores bajos de esfuerzo desviador q , lo que también se conoce como licuación inicial, Seed (1979). La disminución del esfuerzo efectivo medio genera una disminución tanto en la rigidez, lo que se manifiesta en el incremento de las deformaciones. Dependiendo de la amplitud de las deformaciones de corte, se pueden considerar dos comportamientos. Primero, cuando la trayectoria de esfuerzos no cruza la línea de transformación de fase Ishihara et al. (1975) la acumulación del exceso de presión de poros es suave y se estabiliza en una meseta durante un gran número de ciclos Hazirbaba (2009). No hay cambio repentino ni en la tasa de deformación ni en el exceso de presión de poros. Eventualmente, las deformaciones plásticas acumuladas podrían volverse grandes, sin embargo, no se espera un fenómeno de inestabilidad debido a la suavidad en la acumulación del exceso de presión de poros. Este proceso ocurre generalmente cuando el esfuerzo desviador se encuentra por debajo del punto del estado estacionario.

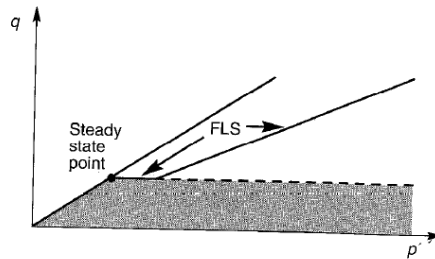


Figura 4. Movilidad cíclica cuando la trayectoria de esfuerzos no cruza la línea de transformación de fase. Kramer (1997)

El segundo comportamiento ocurre cuando la trayectoria de esfuerzos es superior que la línea de transformación de fase Ishihara et al. (1975). En este caso, el esfuerzo medio tiende a aumentar debido a la acumulación de presiones negativas de poros. Por lo tanto, la resistencia en la arena aumenta y la cantidad de deformación por corte está limitada por el efecto de la dilatación del material Bardet et al. (1999). Si se aplica un retroceso en el esfuerzo desviador después de cruzar la línea de transformación de fase, se evita el incremento del esfuerzo medio y esta tiende a disminuir nuevamente. Dependiendo de la carga cíclica aplicada, el aumento - disminución del esfuerzo medio se alcanza periódicamente y, finalmente, se puede observar experimentalmente un comportamiento asintótico reflejado en la forma de una mariposa (véase Figura 5).

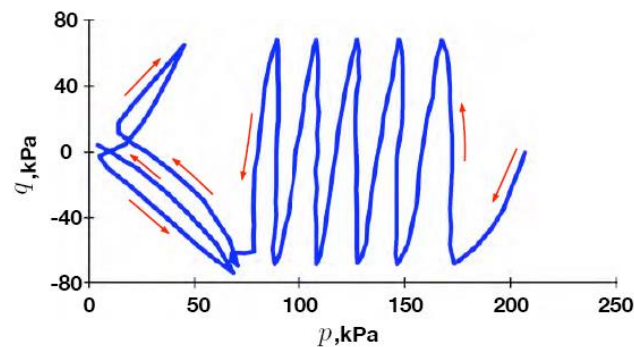


Figura 5. Movilidad cíclica cuando la trayectoria de esfuerzo cruza la línea de transformación de fase. Ishihara et al. (1975).

En ambos casos la muestra no colapsa, en el primer caso cuando la trayectoria de esfuerzo se encuentra por debajo de la línea de transformación de fase, la muestra no colapsa debido a que la acumulación de la presión de poros, así como la acumulación de deformaciones plásticas es muy lenta. En el segundo caso, la muestra no colapsa porque existe la posibilidad de recuperar algo de resistencia cuando la trayectoria de esfuerzos cruza la línea de transformación de fase.

2.2.3 Patrones de falla por licuación

En la Figura 9 se observa los diferentes tipos de fallas que se pueden presentar en condiciones cíclicas. En el caso de falla por flujo se puede apreciar que las deformaciones se disparan repentinamente, lo que produce que la muestra colapse durante el ensayo. Los demás tipos de fallas no producen un colapso del material porque hay una recuperación de cierta resistencia cuando la trayectoria de esfuerzos cruza la línea de transformación de fase.

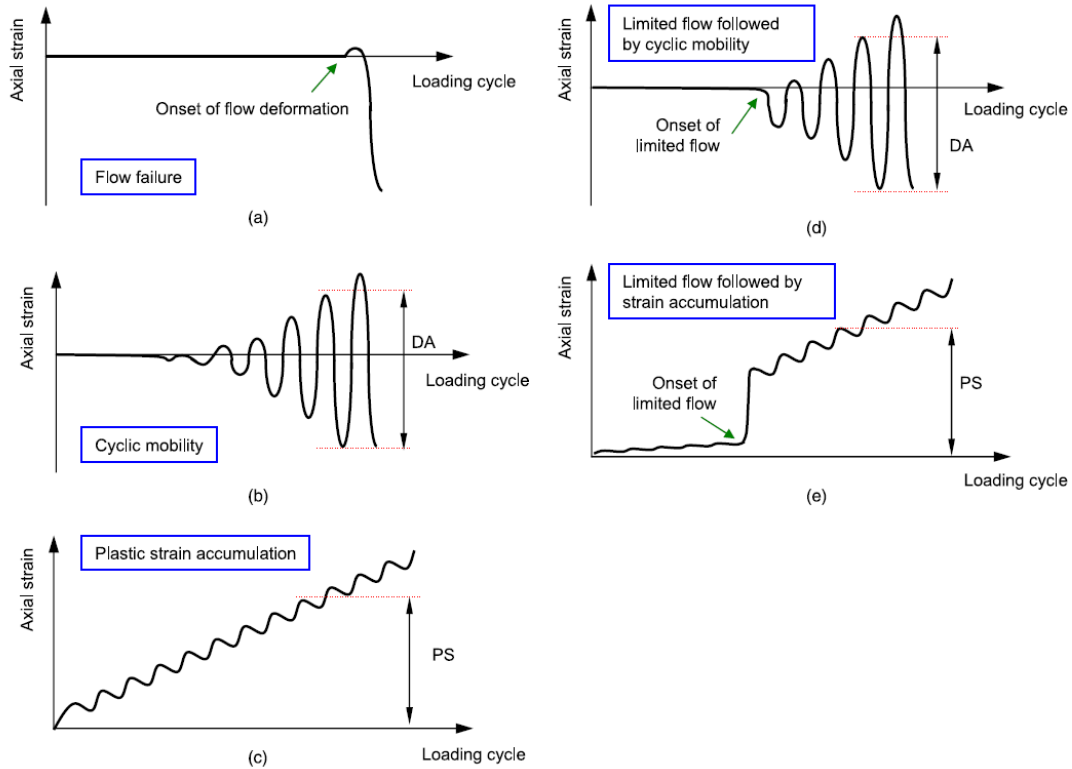


Figura 6. Patrones de deformación observados y mecanismos de falla: (a) falla de flujo; (b) movilidad cíclica; (c) acumulación de deformación plástica; (d) falla por flujo seguido de movilidad cíclica; (e) falla de flujo seguido de acumulación de deformación plástica. Fuente Sze et al. (2014).

2.2.3.1 Desencadenamiento del proceso de licuación

Existen varios criterios para definir el punto cuando el material inicia el proceso de licuación, uno de ellos consiste cuando la trayectoria de esfuerzo cruza la línea de transformación de fase, el material cambia de comportamiento de ablandamiento por deformación a endurecimiento por deformación Ishihara. (1996). Otro criterio se basa en leyes físicas, de acuerdo con Andrade (2009) matemáticamente el proceso de licuación se desencadena cuando el módulo de endurecimiento del material iguala al módulo de endurecimiento crítico.

Finalmente, otro criterio utilizado para definir el desencadenamiento de la licuación es: el punto donde la evolución del exceso de presión de poros alcanza el valor del esfuerzo efectivo de confinamiento (σ_3) bajo carga cíclica Krammer (1996). Este punto en este documento será entendido como el inicio del proceso de licuación, el cual se utilizará para determinar el número de ciclos que se requiere para licuar el material y comparar las diferencias que existen cuando el suelo se encuentre saturado o con gas.

2.2.4 Suelos Gaseosos

De acuerdo con la definición de Sobkowickz (1982), existe una clase particular de suelo cuyo comportamiento mecánico difiere tanto al saturado como al parcialmente saturado. Se caracteriza por la presencia de gas libre en el fluido de los poros. Comúnmente para este tipo de suelos la presión intersticial y la saturación del gas son suficientemente altas como para ignorar las diferencias de presión entre la fase líquida y gaseosa, es decir, no existe efectos de succión matricial.

La estructura (fábrica) de los suelos gaseosos puede variar dependiendo del tamaño relativo entre los granos y las burbujas, Thomas (1987). Así, se presentan dos casos extremos de fábricas posibles de suelo con gas libre (Figura 7): a) burbujas de gas mucho más pequeñas que los poros del suelo y b) burbujas de gas mucho más grandes que las partículas del suelo.

En suelos parcialmente saturados, el comportamiento mecánico varía bajo diversos grados de saturación y depende de la estructura micromecánica de las tres fases: esqueleto del suelo, líquido (agua) y gas (aire). Se pueden distinguir 4 tipos diferentes de microestructura de suelos parcialmente saturados, Wroth et al. (1985): (A) En grados de saturación bajos, la fase gaseosa es continua y los meniscos de líquido se adhieren a la mayoría de los granos minerales del suelo (efectos de succión matricial); (B) en grados más altos de saturación, la fase líquida y gaseosa permanecen continua; (C) a medida que aumenta el grado de saturación, la fase líquida se vuelve continua, mientras que la fase gaseosa se vuelve discontinua en forma de burbujas ocluidas. Existe otra forma de saturación parcial. En este tipo, la fase gaseosa es discontinua en forma de burbujas discretas que están atrapadas en una matriz de suelo completamente saturada. Dicha estructura se forma cuando el gas empuja al esqueleto mineral del suelo, creando vacíos de gas de un tamaño que es mucho más grande que el tamaño de partícula promedio (véase Figura 7). Esta formación es común en los sedimentos marinos y se denominará suelo tipo (D)

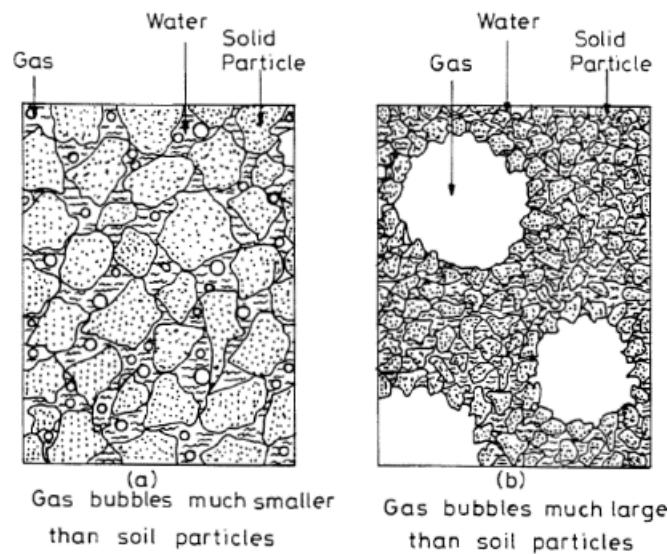


Figura 7. Comparación conceptual entre dos fábricas de suelo con gas Thomas (1987).

En el caso particular de esta investigación para evitar cambios de la fábrica al momento de producir gas y pasar de una condición saturada a una condición de suelo con gas, se buscará que el tamaño de burbujas sea inferior al tamaño del poro para evitar que la presión de gas de las burbujas empuje a los granos del suelo y se produzca un cambio en el esfuerzo efectivo.

2.2.5 Oxidación de Materia Orgánica con Peróxido de Hidrógeno

Definición de materia orgánica

La materia orgánica está elaborada de compuestos orgánicos que provienen de los restos de organismos que alguna vez estuvieron vivos, tales como plantas, animales y sus productos de residuo en el ambiente natural. El suelo recibe una gran cantidad de restos orgánicos por diferentes vías y orígenes. En primer lugar, los de las plantas y animales que llegan al suelo por depósito directo en la superficie o porque quedan atrapados su masa como es el caso de las raíces, la biomasa microbiana y otros organismos que viven normalmente en el suelo

Para esta investigación la materia orgánica será entendida como el contenido de carbono orgánico expresado en porcentaje de su peso. El contenido de carbono orgánico se determinará mediante el ensayo de "Total Organic Carbon" utilizando el equipo SSM-5000A.

Peróxido de hidrógeno

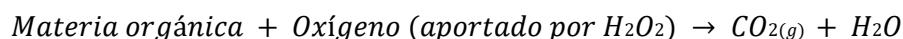
El peróxido de hidrógeno (H_2O_2), también conocido como agua oxigenada, dioxigen, óxido de agua o dioxidano, es un compuesto químico con características de un líquido altamente polar, fuertemente enlazado con el hidrógeno tal como el agua, pero que en general se presenta como un líquido ligeramente más viscoso que ésta. Es conocido por ser un poderoso oxidante.

En esta investigación el peróxido de hidrógeno con una concentración al 30% será utilizado para remover la materia orgánica existente en la arena suministrada y el peróxido de hidrógeno al 3% de concentración será utilizado para la generación de gas en los ensayos triaxiales cíclicos.

Reacción química de oxidación de materia orgánica

Para generar muestras con gas, para el caso de esta investigación se recurrirá al método de la oxidación de la materia orgánica, el cual consiste en diluir peróxido de hidrógeno en material orgánica para generar una reacción química, esta reacción genera dióxido de carbono más agua.

El peróxido de hidrógeno (H_2O_2), aunque no es inflamable, es un agente oxidante potente que puede causar combustión espontánea cuando entra en contacto con materia orgánica Barroso (2014). El peróxido de hidrógeno al contacto con materia orgánica se descompone y libera dióxido de carbono según la siguiente reacción genérica:



En geociencias, el peróxido de hidrógeno en solución 30% se utiliza rutinariamente para remover la materia orgánica de suelo como paso previo al análisis mineralógico por difracción de rayos X para la identificación de minerales de arcilla Moore and Reynolds (1997). Igualmente, el peróxido de hidrógeno diluido al 3% (disponible comercialmente en farmacias) se ha utilizado en estudios geotécnicos experimentales para remover trazas de materia orgánica en arenas Larrahondo, Choo, and Burns (2011).

2.2.6 Modelos de cuantificación de gas

Ley de Boyle

La Ley de Boyle representa la relación entre la presión y el volumen de un gas. La ley de Boyle establece que el volumen de una cantidad fija de gas mantenida a una temperatura constante es inversamente proporcional a la presión.

$$V = k * \frac{1}{P}$$

Donde:

V = Volumen (litros)

k = Constante

P = Presión absoluta (atm)

Ley de Henry

La Ley de Henry es una de las principales relaciones que establece el equilibrio químico entre un líquido y un gas. Dicha ley postula que, para un sistema compuesto por un líquido y un gas entre los cuales existe una interfaz, la cantidad de gas disuelto en el líquido, a temperatura constante, es directamente proporcional a la presión del gas en contacto con dicho líquido:

$$[g] = K_H P_g$$

Donde

$[g]$ = Concentración de gas disuelto en el líquido (mol/L)

K_H = constante de Henry (mol/L – atm)

P_g = presión del gas (atm).

La Ley de Henry también puede expresarse en términos volumétricos. Por ejemplo, para un líquido en contacto con un único gas a una presión fija P:

$$V_g = H V$$

Donde

V_g = volumen de gas disuelto en el líquido

V = volumen del líquido

H = constante de Henry.

Para la anterior expresión, $H = 0.02$ para aire/agua, $H = 0.85$ para CO₂/agua, y $H = 0.25$ para metano/bitumen Sobkowicz (1982).

2.3 Reconstrucción de muestras de arena en ensayos triaxiales

Los experimentos realizados por Sze et al. (2014), Ishihara et al. (1992) muestran que el método utilizado para reconstituir las muestras o la fábrica del suelo desempeña un papel importante en el comportamiento mecánico del material. Dependiendo de la combinación de densidad relativa y esfuerzo de confinamiento, un método de fabricación de muestras puede tener un efecto marcado o pequeño sobre la naturaleza de la respuesta en términos de patrón de deformación y mecanismo de falla.

La respuesta cíclica de una arena preparada bajo diferentes métodos de preparación de muestras tiene una gran importancia, debido a que los tipos de fallas asociados son diferentes bajo las mismas condiciones, específicamente con el número de cíclicos requerido para iniciar el proceso de licuación, Esto se evidencia en la Figura 8, donde se observa que una muestra preparada con la metodología de depositación seca (DD) tiene una mayor resistencia cíclica que una preparada con la técnica de apisonamiento húmedo (MT).

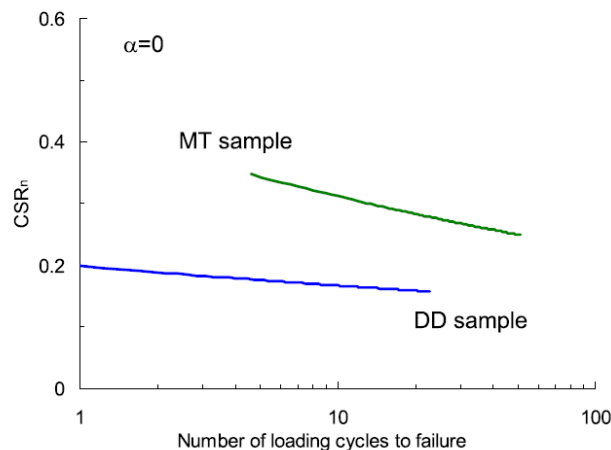


Figura 8. Resistencia cíclica para diferentes métodos de preparación de muestras para ensayos triaxiales cíclicos Sze et al. (2014)

A continuación, se detallan algunos de los métodos que se han desarrollado para reconstituir muestras de arena para ensayos triaxiales. Cada uno de los métodos citados se adapta mejor a las condiciones del material que se desea investigar.

2.3.1 Métodos de preparación de muestras

I. Pluviación (AP)

La pluviación de arena es una técnica que mejor simula la sedimentación en cuanto a la formación de depósitos de arena en la naturaleza, ya sea por el agua o aire. Existen varios factores que controlan dicho comportamiento de las arenas entre ellas se encuentran: la relación de vacíos y la estructura de la arena.

En el método se usa una variación en la altura de caída para crear especímenes de diferentes densidades. De acuerdo con Miura et al. (1982), Vaid (1988) y Rad et al. (1987) sugieren que para conformar un espécimen con densidad uniforme Vaid (1984) la altura de caída debe mantenerse constante con respecto a la parte superior de la muestra a medida que se forma.

Además, también se puede obtener diferentes densidades de arena variando la velocidad con la cual se vierte la arena a través del embudo. Se puede usar diferentes números de agujeros y diferentes tamaños de orificios para controlar la tasa de depositación. A medida que esta tasa disminuye, la densidad de la muestra aumenta, ya que los granos de arena tienen el tiempo adecuado y la energía para lograr una configuración densa. Mientras que con tasas de vertido más rápida y a menor altura de caída tienden a generar arqueamiento de las estructuras de partículas las cuales evitan que la arena alcance densidades más altas.

II. Apisonamiento húmedo

El apisonamiento húmedo se ha utilizado en varios estudios como Ladd (1974), Mulilis et al. (1977), Tatsuoka et al. (1986), Sladen et al. (1987), Ibrahim et al. (1991), Jang et al. (1998) para producir muestras de arenas muy sueltas. Una variación del método es el del envarillado, el cual usa una varilla de punta plana para compactar la muestra. Se debe tener precaución al usar el método con partículas blandas para evitar la rotura de las partículas del conglomerado.

III. Depositación seca

Las muestras preparadas usando esta técnica se forman colocando inicialmente el pico de un embudo en el fondo de un molde. La arena se coloca en el embudo, luego se eleva lentamente a lo largo del eje de simetría de la muestra. Permitiendo que la arena se deposite en un estado de baja energía sin ninguna altura de caída. Esta técnica se usa comúnmente para evaluar arenas limosas, Ishihara (1993), Lade et al. (1997), Yamamuro et al. (1997), Zlatovic et al. (1997), Yamamuro et al. (2001). Para lograr densidades más altas, el molde dividido se golpea suavemente en un patrón simétrico.

2.3.2 Discusión de los métodos de preparación de muestras de arena

Para esta investigación se adoptó un método el cual consiste en una adaptación entre el método de depositación seca y apisonamiento húmedo. Los métodos tradicionales, específicamente el apisonamiento húmedo produce que las capas inferiores tienden a estar más densas que las superiores ya que reciben más cantidad de energía de compactación. Por lo tanto, se decidió que para la preparación de las muestras se iba a tomar una cantidad de arena húmeda y se la iba a depositar con ayuda de un embudo en capas no homogéneas, la primera debería ocupar un 50% del volumen con el 50% del peso total de la muestra y las siguientes dos capas deberían ocupar cada una de ellas el 25% del volumen con el 25% del peso total de la muestra, y así tratar así que la muestra quedara con una densidad más homogénea. Para lograr tal fin se usó un pistón que fue utilizado para hincar el material y lograr tener la distribución de pesos y volúmenes antes mencionados.

CAPITULO 3

3 MATERIALES Y METODOLOGÍA

Para el desarrollo de esta investigación se planteó una secuencia metodológica con el fin de cumplir con los objetivos planteados en este trabajo. Se identificaron dos etapas: La primera consistió en caracterizar mecánica, física y químicamente la arena del Guamo y la segunda etapa en realizar ensayos triaxiales cíclicos a dicho material bajo condiciones saturadas y desaturadas con gas.

3.1 Materiales

3.1.1 Arena del Guamo

Debido a que los objetivos de esta investigación están orientados a definir el comportamiento mecánico de arenas, el material seleccionado es la arena del Guamo-Tolima ya que es un material relativamente homogéneo y de fácil adquisición. Además, ha sido usado en diversas investigaciones en Colombia; una de ellas realizadas por Jiménez Omar titulada “Análisis del comportamiento de licuación por flujo en la arena del Guamo” (2011); dicho material también fue usado en el trabajo investigativo “Estudio experimental de la línea de inestabilidad bajo condiciones anisotrópicas de carga no drenada monotónica” llevada a cabo por Ruiz et al. (2015).

Se adquirió 4 paquetes de 10 Kg (Ver Figura 9) con el proveedor DRIMPEX – Colombia. Esta empresa suministra este material para calibrar ensayos de cono de arena, cumpliendo con la norma INVIAS INV 161-07.



Figura 9. Bolsa de 10 Kg de Arena del Guamo Tolima DIRIMPEX SAS, Bogotá.

3.1.1.1 Geología de la arena del Guamo – Tolima

La arena del Guamo proviene del periodo Cuaternario, su formación es procedente de los abanicos del Guamo los cuales son depósitos de arenas puzolánicas de origen volcánico. Su origen parte de erupciones explosivas del volcán cerro Machín, que generaron depósitos de piroclastos de caída y flujos piroclásticos conformando flujos de lodo que se canalizaron a través del río Coello.

3.1.1.2 Características físicas de la arena del Guamo

Para determinar las características físicas de la arena del Guamo se realizaron ensayos de granulometría, gravedad específica y relación de vacíos máxima y mínima. Estos ensayos fueron realizados conforme lo descrito a continuación.

Granulometría

El ensayo de granulometría se realizó bajo la norma INV E 123-13. Para determinar el porcentaje existente de cada tamaño de partículas se realizaron tres réplicas de ensayos.

Para extraer muestras homogéneas representativas del material se mezcló los 40 Kg de arena del Guamo previamente y se cuarteó. Los tamices escogidos para este ensayo fueron: N°16, N°20, N°30, N°40, N°50, N°60, N°80 y N°100. Se ordenaron los tamices de mayor a menor apertura de arriba hacia abajo; posteriormente se tamizó manualmente en el cual se agitan los tamices con un movimiento lateral y vertical acompañado de vibración y recorriendo circunferencias de forma que la muestra esté en constante movimiento sobre la malla correspondiente. En la norma se insiste en que no se debe girar ni manipular manualmente fragmentos de la muestra a través de los tamices, es decir generar presión alguna sobre la muestra para que pase un determinado tamiz. La agitación debe durar mínimo un minuto en cada tamiz.

Después de tamizar se continuó a pesar lo retenido en cada tamiz. En cuanto a las partículas atrapadas en la malla fueron removidas con un pincel o cepillo con cuidado de no dañar el tamiz y fue agregado al peso del tamiz en el cual fue retenido.



Figura 10. Tamices seleccionados.

Gravedad específica

Se determinó de acuerdo con la norma ASTM D 854. Para esto se realizaron tres ensayos con picnómetro para determinar la gravedad específica (Gs)

Para esto primero se calibró el picnómetro limpiándolo y secándolo, luego se pesó y se registró la masa del elemento vacío. Se procedió a llenar los 3 picnómetros con agua desaireada a temperatura ambiente, se quitó el exceso de agua y se introdujo al picnómetro en un recipiente aislante con tapa por un tiempo de tres horas, o hasta que alcanzara la temperatura ambiente.

Después de secar el picnómetro, se procedió a medir y anotar la masa del frasco, agua y tapón; evitando aumentar la temperatura del elemento; también se tomó la temperatura con la cual se midió los datos anteriores. Estas acciones se repitieron con los tres picnómetros usados para medir la gravedad específica.

Para el ensayo de gravedad específica de la muestra de arena del Guamo se secó con anterioridad en horno, luego se dejó al aire libre hasta que alcanzó temperatura ambiente y se tomó el peso de la muestra seca a usar. A continuación, se sumergió la muestra en agua destilada durante un periodo de 12 horas. En este paso se extrajo el aire por medio de evolución del agua y usando una bomba generando vacío por un tiempo aproximado de 2 horas.

Después del periodo de 12 horas se tomó el peso de la muestra, y la medida de la temperatura a la cual fue tomado el peso.



Figura 11. Determinación de la gravedad específica (Gs) con picnómetros.

Relación de vacíos máxima

Se obtuvo a partir del procedimiento detallado en la norma ASTM D 4254, el cual describe el uso de un molde y un embudo con una altura de caída constante de 13 mm del material. Se realizaron tres ensayos para determinar el parámetro de relación de vacíos máxima.

Es necesario conocer el volumen real del recipiente para lo cual se midió a diferentes niveles el diámetro exterior e interior y la altura.

Se llenó el embudo por completo, evitando la segregación del material. Se situó el embudo en la parte central dentro del molde con la llave cerrada, luego se procedió a abrir la llave y a medida que el material cae libremente se levantó el embudo de tal forma que la altura de caída fuera siempre constante a 13 mm.

Cuando en la parte superior del recipiente se forma un cono de arena el proceso de llenado se concluyó. Después se procedió a enrasar la arena con el molde evitando cualquier tipo de vibración que genere una reacomodación de las partículas de arena. A continuación, se pesó el molde más muestra para determinar la masa del material dentro del molde.



Figura 12. Determinación de relación de vacíos máxima.

Relación de vacíos mínima

Este parámetro se determinó a partir de la norma ASTM D 4253. Se realizaron tres ensayos, tomadas de la homogenización total del material.

Se realizó el mismo procedimiento de llenado para determinar la relación de vacíos máxima; luego se ubicó el molde encima de la mesa vibratoria a una frecuencia de 60 hertz (hz). Antes de poner en funcionamiento la mesa vibratoria se colocaron unas pesas encima de la arena de acuerdo los dispone la norma. Para mantener las pesas encima durante el proceso de vibrado fue necesario colocar la pieza superior del molde, para evitar que se caigan las pesas; después de 8 minutos encima de la mesa vibratoria se detuvo el proceso y se procedió a pesar el molde más la muestra de arena, es decir quitando la parte superior del molde del CBR y las pesas usadas para reacomodar las partículas de arena. También se tomó la diferencia de altura de la muestra antes y después del ensayo para poder realizar los cálculos correspondientes.



Figura 13. Relación de vacíos mínima.

Resultados

En la Tabla 1 se muestran los resultados de los ensayos de gravedad específica y de relación de vacíos máxima y mínima. Para cada uno de los ensayos se realizaron tres réplicas, donde se observa que la media de la gravedad específica es de 2.588, una relación de vacíos máxima de 1.129 y una relación de vacíos mínima de 0.580.

Tabla 1. Resultados de ensayos de caracterización física

Tipo de ensayo	Réplica1	Réplica2	Réplica3	Media
Gravedad específica	2.581	2.577	2.605	2.588
Relación de vacíos máxima	1.129	1.128	1.129	1.129
Relación de vacíos mínima	0.572	0.591	0.578	0.580

Adicionalmente, se realizó la curva granulométrica para tres muestras (véase Tabla 2 y Figura 14) y se determinó los coeficientes de uniformidad (Cu), coeficiente de curvatura (Cc) y el d_{50} , los cuales se muestran en la Tabla 3.

Tabla 2. Datos para la curva granulométrica.

Tamiz		Porcentaje de peso que pasa		
N°	Abertura(mm)	Curva 1	Curva 2	Curva 3
16	1.19	99.7%	99.6%	99.5%
20	0.841	73.9%	71.5%	69.2%
30	0.595	29.2%	28.0%	26.4%
40	0.42	7.7%	7.6%	6.4%
50	0.297	1.8%	1.9%	1.5%
60	0.25	0.9%	0.9%	0.6%
80	0.177	0.2%	0.1%	0.1%
100	0.149	0.1%	0.1%	0.1%
Fondo		0.0%	0.0%	0.0%

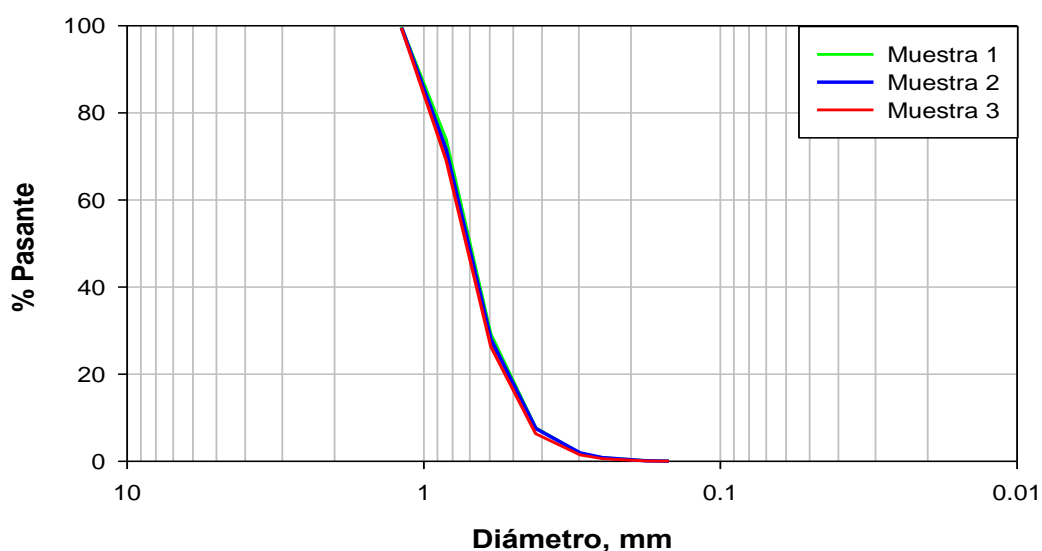


Figura 14. Curva granulométrica arena del Guamo-Tolima

De acuerdo con los resultados de los parámetros de la curva granulométrica, se puede definir que esta arena presenta una mala gradación puesto que el coeficiente de uniformidad C_u es menor a 5, por lo que se puede inferir que su capacidad para ser compactada es pobre. Dado que el coeficiente de curvatura C_c es aproximadamente 1 la curva es prácticamente lineal. La clasificación bajo el sistema unificado clasifica como una arena mal gradada SP.

Tabla 3. Parámetros de la curva granulométrica

C_u	1.89
C_c	0.94
d_{50}	0.7 mm

3.1.1.3 Características químicas de la arena del Guamo

Las características químicas en este trabajo de investigación consisten en determinar el porcentaje de materia orgánica existente. El porcentaje de materia orgánica se entenderá como la cantidad de carbono orgánico expresado en porcentaje del peso total que tiene cada una de las muestras analizadas (véase sección 2.2.5).

El ensayo de TOC fue realizado a las muestras de arena suministrada bajo 3 condiciones: originales, sumergida en peróxido de hidrógeno al 30% de concentración por 5 días y a la arena tratada anteriormente se la llevó a la mufla a una temperatura de 600°C.

Se tomaron tres muestras de arena del Guamo para cada condición mencionada anteriormente y se las ensayó en el equipo SSM-5000A (véase Figura 15) para determinar el carbono total (CT) y el carbono inorgánico (IC).

El contenido de carbono inorgánico (IC) se obtiene mediante la acidificación de la muestra con ácido fosfórico, el cual produce combustión a 200°C, formando CO_2 , esta cantidad es determinada por el equipo. SSM-5000A. La cantidad en peso de materia orgánica se calcula mediante la siguiente expresión:

$$OC = TC - IC$$

Donde

TC: Peso de carbono total

IC: Peso de Carbono Inorgánico

OC: Peso de Carbono orgánico

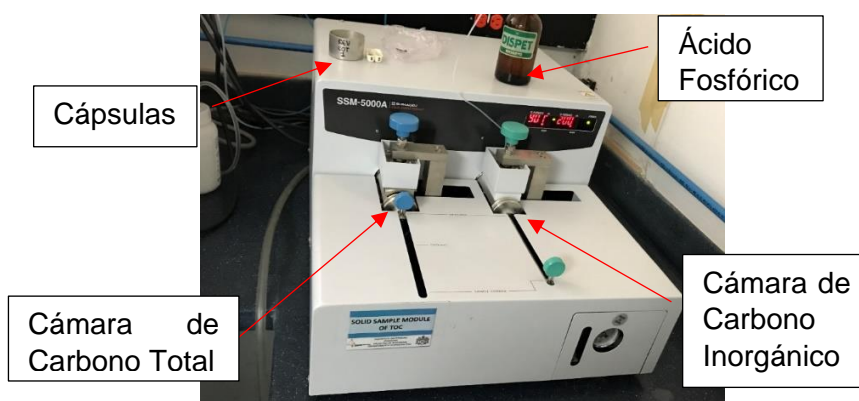


Figura 15. Equipo para determinar Carbono Orgánico Total.

El ensayo consiste en colocar aproximadamente 300 mg de muestra en dos cápsulas; una de ellas se coloca en “la cámara de carbono total” y la otra se coloca en “la cámara de carbono inorgánico” con ácido fosfórico. El equipo posteriormente reporta una cantidad del peso de carbono total y carbono inorgánico y se realiza la diferencia entre ambas cantidades para obtener la cantidad de carbono orgánico de acuerdo con lo explicado anteriormente. El porcentaje de materia orgánica es calculado mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Materia Orgánica} = \frac{W_m}{OC}$$

Donde,

W_m : Peso de la muestra ensayada

OC : peso de carbono orgánico total

En la Tabla 4 se indican los resultados obtenidos de carbono orgánico para cada una de las muestras analizadas bajo las condiciones detalladas anteriormente. Se observa que la arena del Guamo contiene 0.82% de materia orgánica en condiciones originales. Al someter a la muestra a un tratamiento de lavado con peróxido de hidrógeno por 5 días, el porcentaje de materia orgánica disminuyó casi un 50% con respecto al original. Sin embargo, al llevar la arena a un proceso de calcinación a 600°C la materia orgánica remanente fue del orden de 0.18%, es decir, únicamente, se pudo eliminar un 89% de la materia orgánica nativa.

Tabla 4. Contenido de materia orgánica de la Arena del Guamo

Tipo de Muestra	# de muestra	Contenido de carbono orgánico	Media	Desviación estándar
Arena Guamo nativa	M1	0.79%	0.82%	0.08%
	M2	0.76%		
	M3	0.91%		
Arena Guamo tratada con Peróxido de hidrógeno a una concentración del 30%	M1	0.35%	0.34%	0.02%
	M2	0.35%		
	M3	0.32%		
Arena Guamo tratada con Peróxido de hidrógeno a una concentración del 30% y calcinada a una temperatura de 600°C	M1	0.16%	0.18%	0.06%
	M2	0.25%		
	M3	0.15%		

Los resultados muestran que la materia orgánica no es posible eliminarla por completo sin cambiar las propiedades del material, es decir, si sometemos a la muestra a un proceso de calcinación mayor a 600°C podemos llegar a fundir el material o ciertos minerales que lo componen, por tal motivo conservando las mismas propiedades del material, la materia orgánica no se puede eliminar al 100%.

3.2 Equipos y herramientas

3.2.1 Muestreador para fabricación de muestras de arena

Para la reconstitución de muestras de arena para ensayarlas en el equipo triaxial fue necesario diseñar un muestreado que se pueda adaptar al pedestal del equipo. Esta forma de construcción de muestras directamente en el equipo garantiza tener un mejor control sobre su densidad.

Se diseñó y elaboró un molde en acero inoxidable, con pintura anticorrosión, y con un apisonador del mismo material, para poder realizar el montaje de las muestras de arenas sobre el equipo triaxial; el molde permite realizar muestras con una relación 2 a 1, las dimensiones se muestran en la Figura 16 y Figura 17. Este molde consta de dos partes iguales las cuales se unen a partir de 4 tornillos, además tiene dos boquillas en los costados laterales en las cuales permiten generar succión.

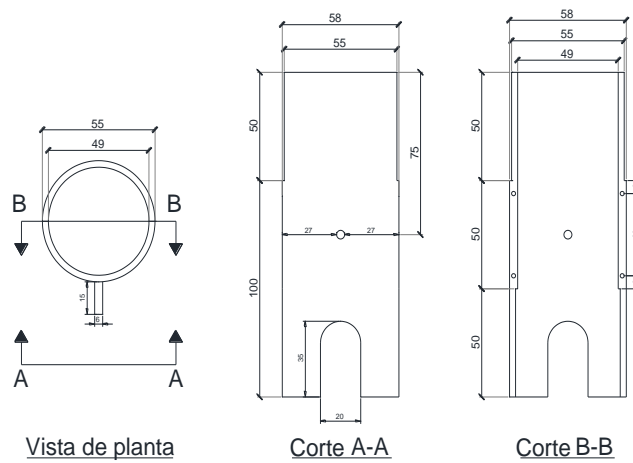


Figura 16. Esquema de dimensiones del Molde

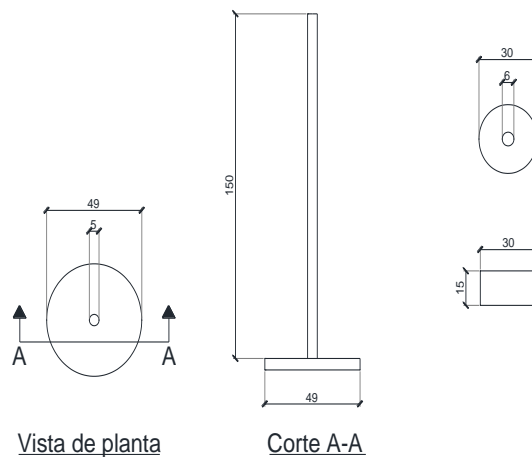


Figura 17. Esquema de dimensiones del Apisonador.

3.2.2 Bomba de Vacío

En Figura 18 se muestra la bomba de vacío utilizada para realizar los ensayos triaxiales con su respectivo acople (trampa de agua) para realizar el proceso de percolación durante la fase de saturación de la muestra.



Figura 18. Bomba de Vacío y Trampa de agua.

3.2.3 Equipo Triaxial Cíclico

Los elementos fundamentales del equipo triaxial dinámico son mostrados en la Figura 19 tanto el sistema mecánico, como los controladores y sistemas de adquisición de datos. Este es un equipo que combina una celda en el triaxial con actuador dinámico capaz de aplicar cargas de deformación y tensión hasta de 10 Hz.

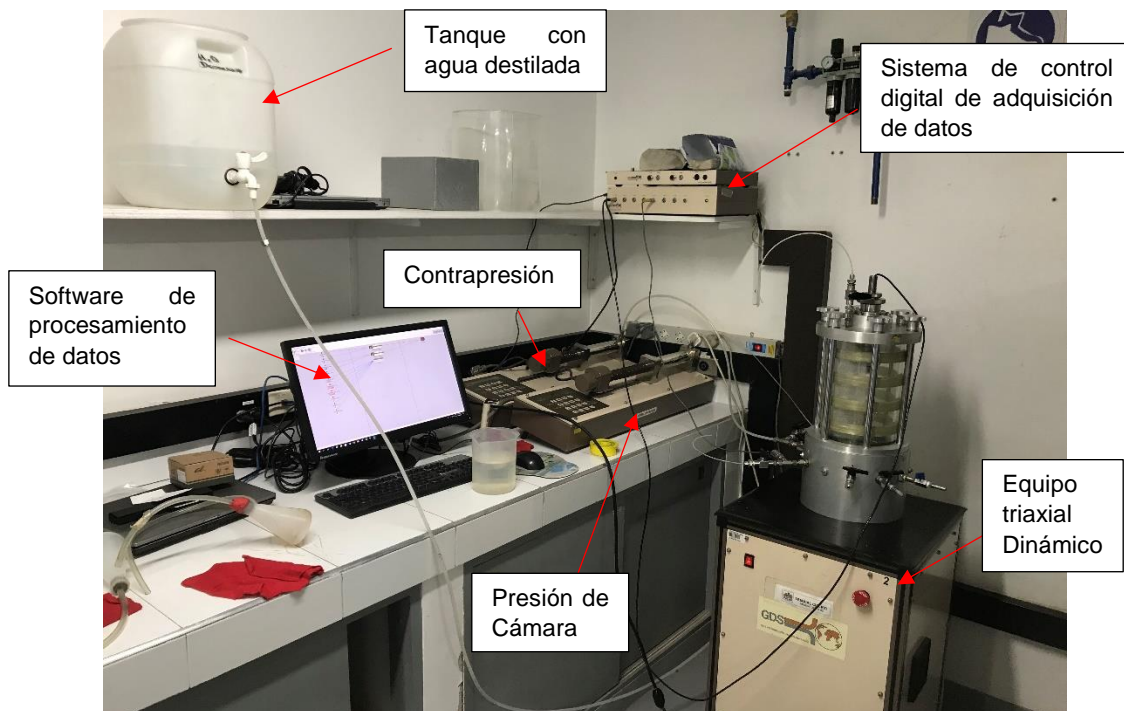


Figura 19. Elementos del Equipo Triaxial.

El sistema de ensayo triaxial dinámico electromecánico (DYNTTS de 2Hz) es la combinación de una cámara triaxial y actuador dinámico que aplica la carga/deformación axial a través de la base del pedestal. Un tornillo sin fin actúa en la base del pedestal, donde está integrado el sistema de motorización. Las especificaciones técnicas:

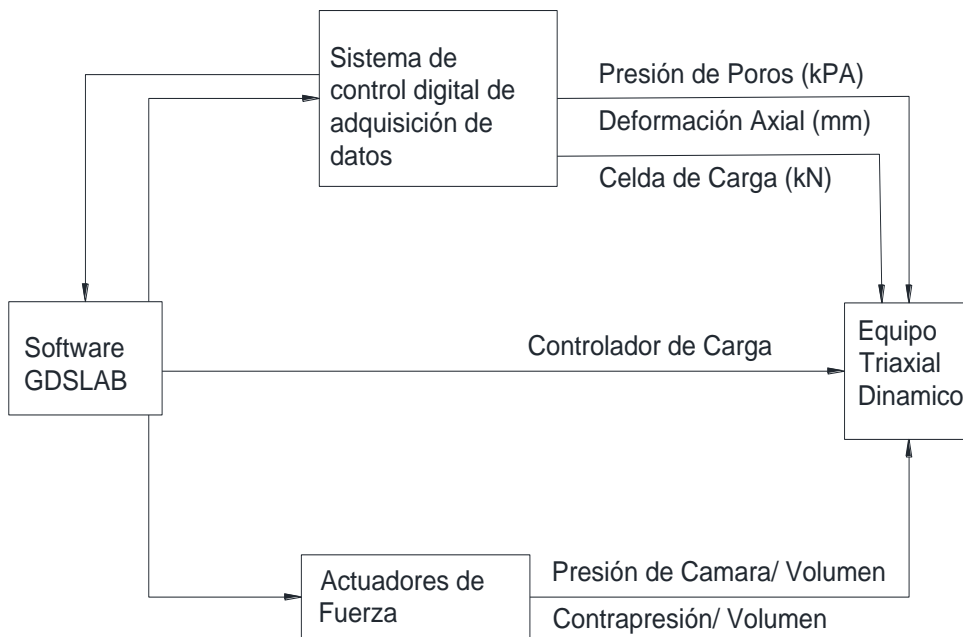
- Rango de desplazamiento: 100 mm
- Precisión del desplazamiento: 35µm en 50 mm (0,07%)
- Resolución del desplazamiento: 0,208 µm
- Precisión de la carga axial: <0,1% F.E
- Resolución de la carga axial: 16 Bit
- Número de puntos de control: 10000 puntos/s
- Número de puntos guardados, máximo: 100 puntos/ciclo
- Puertas de acceso incluidas (12)
- Control electromecánico de gran precisión

Este sistema se controla por ordenador con el programa GDSLAB y adquisición de datos. Los datos de ensayos son guardados y presentados en tiempo real, cualquiera que sea el número de ciclos de ensayo. El sistema operativo es windows XP, windows Vista o windows 7; los requerimientos mínimos del computador son 1.7 GHz Pentium III, 512 MB RAM. Unas características particulares del sistema son:

- Varias estaciones de ensayo a partir de un PC
- Ejecución de ensayos múltiples
- Modificación de los ejes de los gráficos durante el ensayo
- Modificación de los datos numéricos el ensayo
- Flexibilidad en la configuración del hardware
- Configuración gráfica e intuitiva del hardware, incluidos los sensores

Además, consta de dos actuadores uno para el control de la presión lateral en la cámara y el otro para el control de la presión y el cambio de volumen. Los controladores son GDS avanzado de Presión/Volumen (ADVDPC) es una bomba de tornillo, controlada por microprocesador que permite controlar y medir la presión del fluido y el cambio de volumen, este controlador puede usarse con agua, aceite o aire. La modalidad de funcionamiento es autónoma, se puede usar tanto como una fuente genérica de presión hidráulica, como de dispositivo de medida del cambio de volumen, el cambio de volumen se mide con una resolución de 1 mm³. Las especificaciones técnicas son:

- Rango de presión: 0,05- 0,01 - 0,2 - 0,4 - 0,8 - 1 – 2 – 3 – 4 – 8 – 16 – 20 – 32 – 64 – 128 – 150 MPa
- Capacidad volumétrica (nominal): 1000 cc
- Resolución de la medida y control: con ± 12 mm³ de latigazo hasta 16 MPa y ± 5 mm³ >16 MPa
- Dimensiones: 860x230x220 mm
- Peso: 20 Kg
- Alimentación: 92-265 VAC, 48-440Hz, 65W máx, monofásica con toma de tierra, fusible 2Ax2
- Panel de control: teclado membrana, con 16 teclas, Funciones (entre otras): tara de la presión, indicación de la presión, tara del volumen, indicación del volumen, llenado, vaciado, test, validación, etc.
- Visor integrado (LCD): 40 caracteres, 1 línea



3.2.4 SSM-5000A Solid Sample Combustion Unit

Para determinar el contenido de carbono orgánico (TOC) de las muestras analizadas, se utilizó el equipo SSM-5000A Solid Sample Combustion Unit. La combinación de este equipo con un analizador de laboratorio TOC-L/TOC-V (ver Figura 20) permite el análisis de muestras sólidas y muestras acuosas, incluyendo suelos, lodos y sedimentos. Este equipo permite determinar la cantidad de carbono total y carbono inorgánico.



Figura 20. Equipo SSM-5000A Solid Sample Combustion Unit

3.3 Metodología para la ejecución de ensayos triaxiales

3.3.1 Metodología para la ejecución del ensayo triaxial CU bajo condiciones de carga monotónicas

Para determinar las características mecánicas de la arena del Guamo, se realizaron cuatro ensayos triaxiales bajo carga monotónica CU. El objetivo de realizar dichos ensayos es determinar la línea del estado crítico en los planos $e-p'$ y $p'-q$.

Para empezar la caracterización mecánica se intentó en primer lugar tomar especímenes con una compactación suelta, medianamente densa y densa. Para obtener al menos 3 puntos en la línea del estado crítico en el plano $p'-q$.

Para la ejecución de los ensayos triaxiales monotónicos CU se siguieron los siguientes pasos:

3.3.1.1 Preparación de muestra arena:

Para la preparación de muestras de arena se siguió el siguiente proceso:

- i. El proceso de preparación de la muestra inició seleccionando la relación de vacíos con la cual se trabajó. Después se añadió aproximadamente 3.8% de agua del peso total de la muestra, para humedecer la arena y finalmente se depositó el material húmedo en tres capas en el recipiente. La primera capa debe contener el 50% del peso cuyo contenido debe ocupar el 50% del volumen del recipiente, las siguientes capas están conformadas por el 25% del peso del material las cuales deben ocupar el 25% del volumen del recipiente.
- ii. Se colocó la membrana y es ajustada con los anillos de caucho (o-rings) en el pedestal del equipo triaxial como se muestra en la Figura 21. Para generar una mejor adherencia entre la membrana y el pedestal del triaxial se le colocó aceite de silicón en la parte superior del pistón. Además, se colocó dentro de la membrana la piedra porosa y el papel filtro en la base superior del pedestal; se debe revisar que la piedra porosa no dañe la membrana.

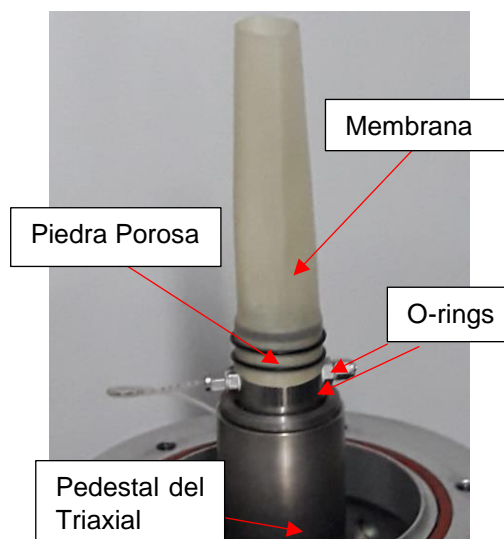


Figura 21. Instalación de membrana sobre el pedestal del equipo triaxial.

- iii. Se ubicó el molde sobre el pedestal cuidando de no romper la membrana. Posteriormente se ajustó el molde con los tornillos y después se ubicó el papel filtro entre el molde y las membranas en la parte donde se encuentran las boquillas de succión. Finalmente, se colocaron los o-rings en la parte superior del molde, tal como se muestra en la Figura 22.

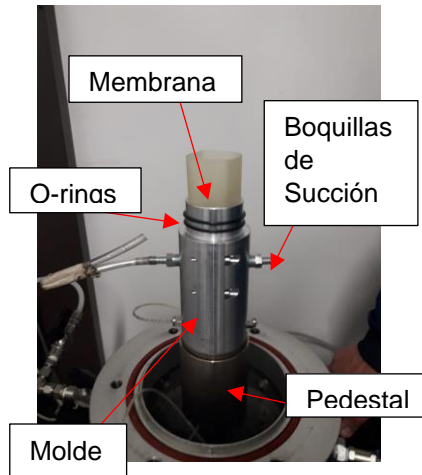


Figura 22. Instalación del molde sobre el pedestal del equipo.

- iv. Se estiró la membrana sobre el molde y se acomodó de tal manera que la membrana no quede plegada ni con arrugas, posteriormente se generó succión con la bomba de vacío por una de las boquillas del molde y se estiró la membrana por los bordes del molde dejando los o-rings por debajo de la membrana, como se muestra en la Figura 23. Finalmente, se vertió la arena dentro del molde en tres capas como se indica en el paso 1, después se procedió a ubicar en la parte superior el papel filtro y la piedra porosa evitando que la piedra porosa genere reacomodamiento de las partículas y por ende disminución en el volumen.

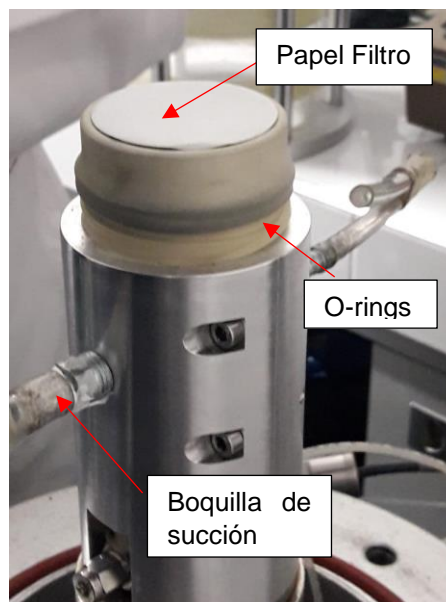


Figura 23. Aplicación de succión y tensión de la membrana.

- v. Se colocó el cabezal sobre el molde y se subió la membrana hacia el cabezal; se procedió a asegurar la membrana al cabezal por medio de los o-rings que impide la pérdida de presión dentro de la muestra. Después se continuó conectando los acoples que van en el cabezal y la manguera. Posteriormente, se conectó otra bomba de vacío a la válvula de medición de presión de poros y se generó succión, en este punto se revisa que dentro de la muestra no se presente pérdida de presión; si se observa disminución en la presión de la muestra se debe desmontar y volver a realizar los pasos anteriores ya que la membrana puede tener estar rota. Si no se observa pérdida de presión en la muestra se apagan las dos bombas de vacío y se desmonta el molde evitando golpear la muestra. La muestra, por medio de la succión generada se mantendrá erguida ver Figura 24. Finalmente, se toman las dimensiones de las muestras tanto el diámetro como la altura para posteriores.

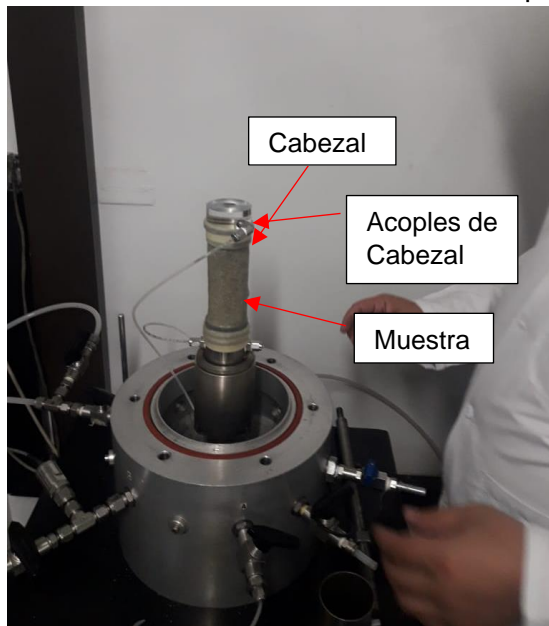


Figura 24. Retiro del molde.

- vi. Se revisó que la base del equipo triaxial donde va apoyada la cámara y el caucho de sellado no estén sucios o con material que impida un sellado total entre la cámara y el equipo. Se ubicó la cámara de confinamiento sobre su soporte y se ajustaron los tornillos de la cámara de a dos en diagonal hasta garantizar que no se presente escape de agua. Posteriormente se procedió a realizar el llenado total de la cámara con agua destilada, evitando que quede dentro de la cámara burbujas de aire. A continuación, se aplicaba una presión de cámara de 20 kPa para que la muestra conserve su forma de fabricación. Seguido a esto se realizó la fase de percolación, que consiste en hacer fluir agua destilada a lo largo de la muestra ya sea de abajo hacia arriba o de arriba hacia abajo, por medio de una bomba de vacío. Para este proceso se colocó un recipiente de agua destilada y se sumergió la manguera que sale de la presión de poros por la válvula de la contrapresión y finalmente la bomba de vacío se instaló como se muestra en la Figura 25.

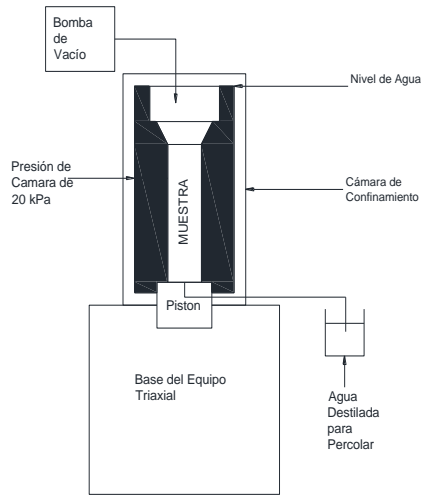


Figura 25. Percolación.

3.3.1.2 Saturación de la muestra

Esta fase consistió en incrementar la presión de cámara y la contrapresión con el fin de remover las burbujas ocluidas dentro de los poros. Para evitar que la muestra se perturbe por incrementos y reducciones en el esfuerzo efectivo durante el chequeo del parámetro B de Skempton. Se recomienda realizar una rampa de saturación con una diferencia entre la presión de cámara y contrapresión de 20 kPa llegando a presiones entre 350 kPa a 400 kPa.

Después de dicho proceso se realizó el chequeo del parámetro B de Skempton hasta alcanzar un valor mínimo de 97%. Si no se ha alcanzado el valor deseado del parámetro B se debe realizar rampas de saturación adicionales en periodos de 20 minutos hasta alcanzar el valor de B objetivo.



Figura 26. Fase de saturación

3.3.1.3 Fase de consolidación

Una vez que la muestra es saturada se lleva a un esfuerzo efectivo determinado y se abren las válvulas para dejar drenar el exceso de presión de poros y permitir la consolidación. Esta fase es muy rápida debido a la alta permeabilidad de la arena, puede tomar un máximo de 10 minutos.

En esta etapa se mide el cambio de volumen de la muestra a través del controlador de la contrapresión que registra el volumen de agua que sale de muestra. Como se muestra en la Figura 27.

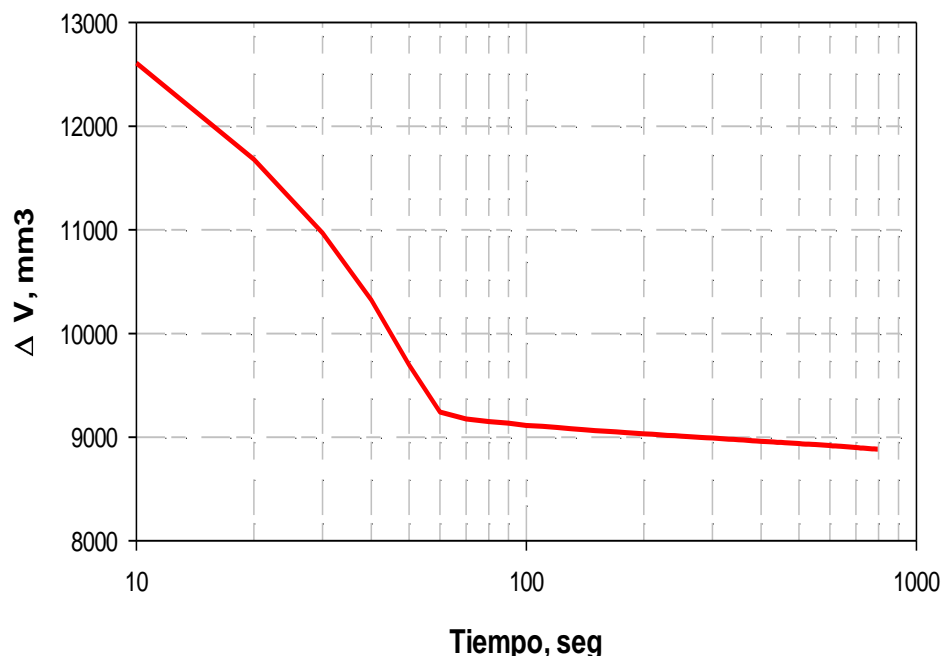


Figura 27. Fase de consolidación.

3.3.1.4 Fase de corte

En esta fase se realizaron los siguientes pasos:

- a. Se realizó el contacto entre la celda de carga con el cabezal de la muestra, se debe realizar manualmente subiendo el pistón hasta que el cabezal de la muestra se encuentre muy cerca de la celda de carga sin generar contacto entre estas para no generar perturbación en la muestra. Después se ordenó al equipo llevar a una carga muy pequeña de aproximadamente 0.004 kN. En ese momento en la curva de cambio de volumen con respecto al tiempo se observó una variación del volumen muy leve. Una vez que se haya ejecutado el procedimiento descrito colocar en cero el controlador de desplazamiento vertical.
- b. El siguiente paso consistió en realizar una trayectoria drenada muy pequeña hasta alcanzar una carga de 0.01 kN. Esto se realiza para que el equipo tenga un mejor control de esfuerzos durante la etapa inicial del ensayo.
- c. Se ejecutó el módulo incorporado en el software del equipo de ensayo triaxial CU. Se dispuso que se lleve el ensayo hasta alcanzar una deformación unitario del 30% a una velocidad de 0.01 mm/min.

3.3.2 Metodología para la ejecución de ensayos triaxiales cíclicos a muestras saturadas

Para la ejecución de los ensayos cíclicos sobre muestras saturadas primero se seleccionó la relación de vacíos que permitiera que la arena tenga un comportamiento contractante, es decir, que genere un incremento positivo en la presión de poros.

3.3.2.1 Preparación de la muestra

Los ensayos cíclicos con arena siguieron los siguientes pasos:

- i. Tratar la arena con peróxido de hidrógeno e ignición en mufla para eliminar la materia orgánica. En este paso primero se colocó toda la arena a ensayar en un recipiente de plástico y se inunda con peróxido de hidrógeno a una concentración del 30% y se deja por aproximadamente 5 días, ver Figura 28. Durante ese periodo diariamente se revolvió el material hasta observar que no se formen burbujas de gas. Finalmente, se retiró el peróxido de hidrógeno utilizando agua destilada lavando el material algunas veces hasta se encontró completamente libre de peróxido de hidrógeno, esto puede tardar aproximadamente 2 días. Para secarlo y garantizar una mayor eficiencia en la eliminación de materia orgánica se lleva el material a un horno a una temperatura de 600 °C.

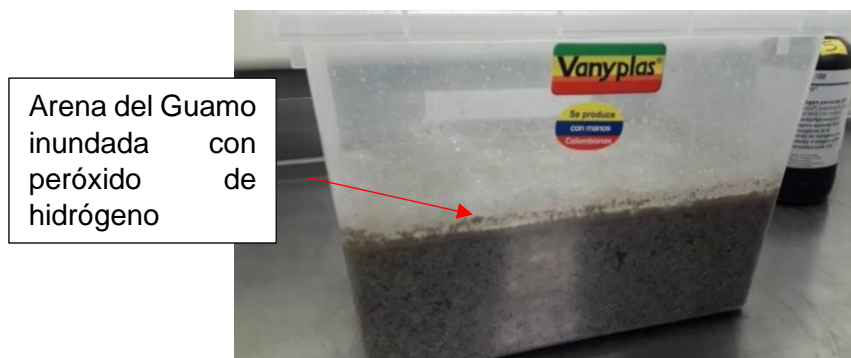


Figura 28. Tratamiento con Peróxido de Hidrógeno al 30% en la Arena.

- ii. Se siguieron los pasos I, II, III y IV de la sección 3.3.1.1
- iii. Se continuó el paso V de la sección 3.3.1.1 con la variante que ahora el cabezal debe incluirse un accesorio de plástico que tiene como fin producir una succión para que este quede adherido a la celda de carga, este accesorio es sujetado al cabezal por medio de un par de o-rings; se verifica que el pistón tenga su longitud mínima para que al momento de colocar la cámara no genere alguna presión sobre la muestra y modifique su volumen.

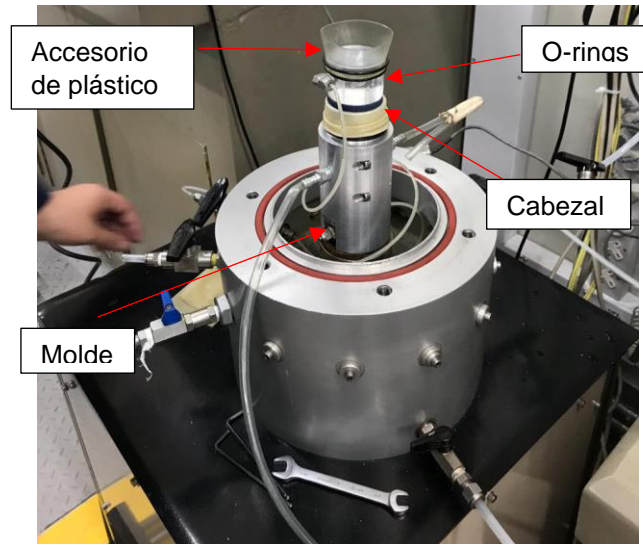
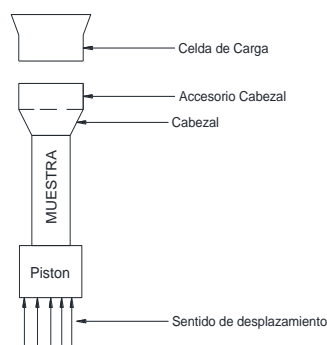


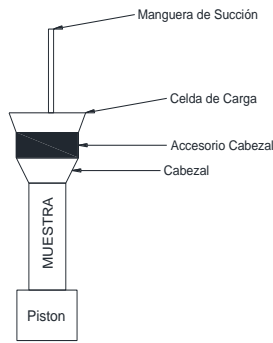
Figura 29. Cabezal con accesorio de plástico.

- iv. Antes de instalar la cámara se revisó que la celda de carga de la cámara se encuentre cubierta de aceite de silicón para generar una mejor adherencia entre el accesorio de plástico del cabezal y la celda de carga. Después se continuó con la instalación de la cámara sobre el equipo del triaxial y se procedió a ajustar los tornillos de la cámara para evitar salida de agua. A continuación, se puso en contacto el cabezal y la celda de carga sin agua, ver Figura 30, realizando un desplazamiento del pistón hasta que el acople haga contacto con la celda de carga, ver Figura 31. Cuando se haya realizado el contacto como se indica en el paso de la sección 3.3.1.4 se procede a realizar la succión por la manguera que se encuentra en la parte superior de la cámara ver Figura 33 y Figura 31, esto con el fin de garantizar la adherencia entre el cabezal y la celda de carga para general tensión durante el ensayo cíclico.



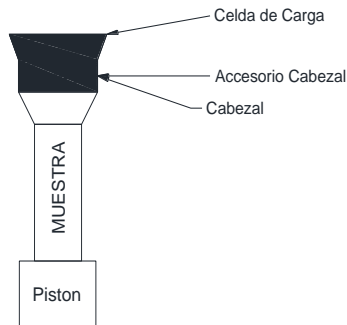
PASO I

Figura 30. Desplazamiento de pistón



PASO II

Figura 31. Generación de succión de la celda de carga con cabezal



PASO III

Figura 32. Contacto entre la celda de carga y cabezal

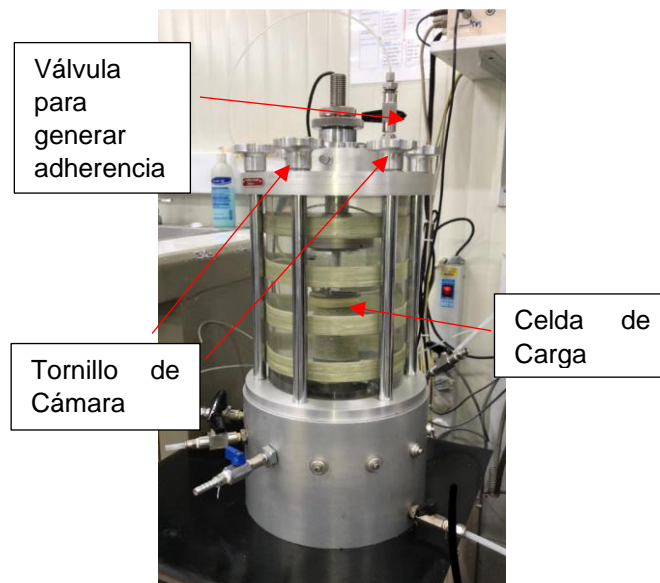


Figura 33. Adherencia entre el cabezal y la celda de carga.

v. Se siguen el paso VI de la sección 3.3.1.1.

3.3.2.2 Saturación de la muestra

Este paso para el caso de un ensayo cíclico es similar al descrito en la sección 3.3.1.2 con la variante que ahora la aplicación del esfuerzo axial (σ_1) es controlado por medio del pistón y ya no por la presión de cámara. Es decir, en la sección 3.3.1.2 para realizar las rampas de saturación se colocaba la presión de cámara y contrapresión únicamente, ahora se debe controlar la presión de cámara que genera un esfuerzo radial a la muestra y un esfuerzo axial para así garantizar un esfuerzo isotrópico alrededor de toda la muestra. Las rampas de saturación siguen la misma filosofía explicadas anteriormente.

Este proceso de saturación fue complicado realizar, y fue necesario ejecutar muchos ensayos para poder llegar a tener muestras en estado isotrópico, En la Figura 34, se observan curvas cuyo comportamiento no era replicable a ningún ensayo reportado en la literatura. El problema fue que el control de esfuerzos del equipo no es bueno, ya que, al inyectar agua a la muestra, el equipo lo asocia como un cambio de volumen y recalcula el área transversal de la muestra lo que le produce que coloque esfuerzos muy grandes, en muchos casos la muestra terminaba dañada durante el ensayo. Esto se solucionó mediante la aplicación de fuerzas, se mantuvo una fuerza de cero, al incrementar el esfuerzo radial, la muestra se tensionaba, entonces para mantener en cero la fuerza, el equipo subía el pistón para controlar que la fuerza siempre se mantenga nula.

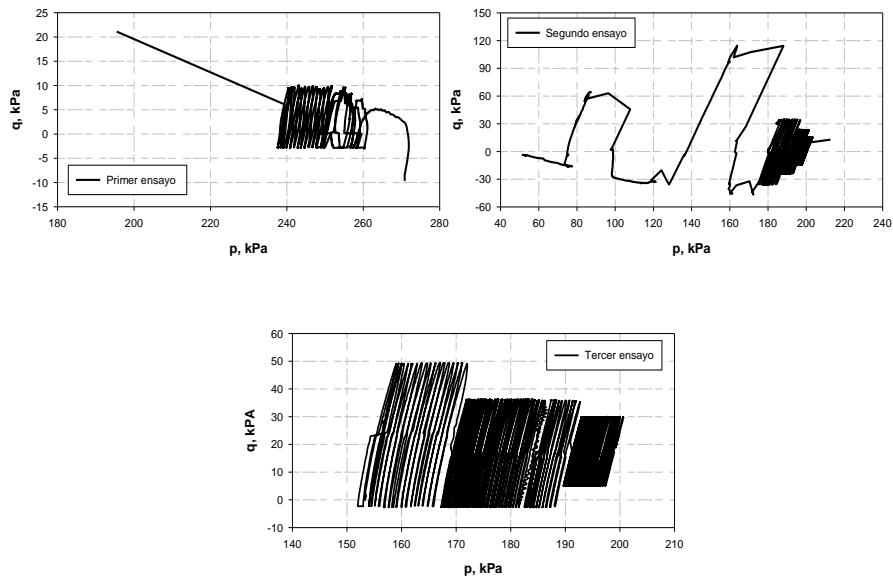


Figura 34. Curvas de ensayos cíclicos de prueba

3.3.2.3 Consolidación de la muestra

Se sigue el mismo proceso descrito en la sección 3.3.1.3 pero ahora el esfuerzo radial es controlado por la presión de cámara y el esfuerzo axial es controlado por el pistón, en la sección mencionada anteriormente, tanto el esfuerzo axial como el radial eran controlados por la presión de cámara.

3.3.2.4 Etapa de corte

Para esta etapa se debe seleccionar el esfuerzo desviador cíclico, el cual debe ser inferior a la línea de inestabilidad para una presión de confinamiento determinada. Para los 3 ensayos se utilizaron presiones de confinamiento de 100 kPa debido a que el fenómeno de licuación se produce en estratos superficiales de suelos. La frecuencia que se utilizará para todos los ensayos cíclicos será de 0.1 Hz, es importante recalcar que esta frecuencia fue seleccionada a partir de la capacidad de respuesta del equipo, a una mayor frecuencia las lecturas comienzan a ser inestables. También es importante aclarar que la frecuencia con la que se realiza el ensayo cíclico no afecta el comportamiento mecánico de la muestra ya que al ser un material granular no tiene efectos de viscosidad como ocurre en el caso de las arcillas, donde su respuesta mecánica a diferentes tasas de velocidades de deformación tiene un efecto importante.

3.3.3 Metodología para la ejecución de ensayos triaxiales cíclicos con muestras desaturadas con gas

Para la ejecución de los ensayos cíclicos con muestras desaturadas con gas, primero se procedió a generar muestras con la misma relación de vacíos que los ensayos cíclicos con muestras saturadas.

Para esto realizaron los mismos pasos de preparación de muestras, montaje del ensayo y etapas de saturación y consolidación que son descritos en la sección 3.3.2.

3.3.3.1 Etapa de circulación del peróxido de hidrógeno

Esta etapa se realizó debido a que inicialmente no se puede inundar la muestra con solución de agua destilada mezclada con peróxido de hidrógeno ya que la reacción empezaría de manera inmediata y el objetivo es empezar a generar el gas después de la etapa de consolidación. Primero es necesario saturar la muestra y consolidar para tener control de las dimensiones del espécimen. Después de esos pasos se inicia el proceso de reacción química que es producida por la oxidación de la materia orgánica. Para reemplazar el volumen de agua de los poros por una solución de agua destilada con peróxido de hidrógeno se siguió el proceso que se describe a continuación.

En esta etapa se realizó un proceso de circulación, el cual consistió en inyectar agua por medio de una bomba de presión, generando una diferencia de presiones entre la parte superior de la muestra con la inferior de 5 kPa (ver Figura 35), esto genera un flujo de solución que circula a través de los poros de la muestra de abajo hacia arriba, los componentes de la solución es agua destilada mezclada con peróxido de hidrógeno, la concentración de peróxido de hidrógeno fue de aproximadamente el 1% del volumen total de solución. Se circuló un volumen de vacíos de la muestra. Cuando este volumen terminó de circular, se procedió a desconectar la bomba de presión y se cerró la válvula por donde estaba ingresando la solución. Después se dejó que reaccionara el peróxido de hidrógeno con la muestra por un tiempo de 50 horas, tiempo necesario para que la reacción del peróxido de hidrógeno con la muestra finalice por completo, momento donde no se observa salida de agua de la muestra al controlador de la presión interna (backpressure). Después se procedió a realizar la etapa de corte indicada en la sección 3.3.2.4.

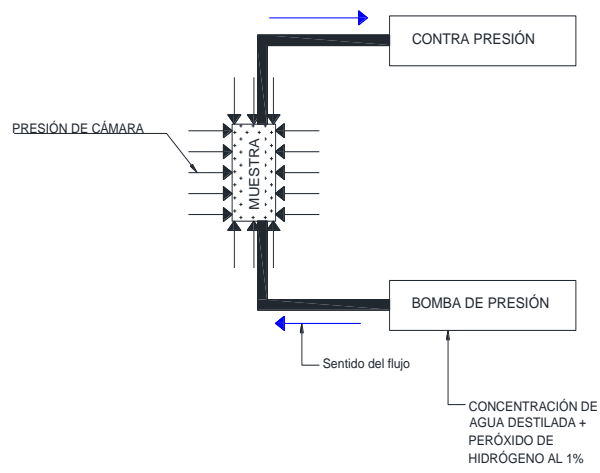


Figura 35. Esquema de circulación del peróxido de hidrógeno.

CAPITULO 4

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados y análisis de los ensayos triaxiales CU

La caracterización mecánica consiste para este trabajo de investigación en determinar las líneas del estado crítico en los planos p' - q y p' - e . Donde (p) es el esfuerzo efectivo medio promedio de Cambridge, (q) es el esfuerzo desviador y (e) es la relación de vacíos.

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3}$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

Para determinar la línea del estado crítico se realizaron 4 ensayos triaxiales a compresión monotónica consolidados no drenados. Los resultados finales de los ensayos se muestran en la Tabla 5 y Figura 36.

Tabla 5. Resultados obtenidos de los ensayos triaxiales CU

Ensayo	Relación de vacíos de fabricación	Relación de vacíos después de consolidación	Esfuerzo efectivo promedio inicial p' , kPa	Esfuerzo efectivo p' crítico, kPa	q crítico, kPa
ec_M_1	0.881	0.775	600	55	70
ec_M_2	0.884	0.792	300	41	52
ec_M_3	0.949	0.922	100	6	7
ec_M_4	0.836	0.786	300	37	53

4.1.1 Determinación de los parámetros del estado crítico

De acuerdo con los valores del estado crítico mostrados en la Tabla 5 se calculó la pendiente del estado crítico (M) en el espacio p' - q y para determinar la ecuación de la línea del estado crítico en el espacio p - e se recurrió a la ecuación Dafalias (2007), que se muestra a continuación.

$$ec(p) = e_{co} - \lambda \left(\frac{p}{p_{ATM}} \right)^\xi$$

Los parámetros de la ecuación de Dafalias fueron ajustados por el método de los mínimos cuadrados a la ecuación objetivo, utilizando los valores mostrados en la Tabla 5 la relación de vacíos crítica inicial e_{co} se lo determinó con base a la relación máxima de vacíos. Los parámetros se muestran a continuación:

Tabla 6. Parámetros del estado crítico de la arena del Guamo

M	1.30
ϕ	32
e_{co}	1.12
λ	0.413
ξ	0.254

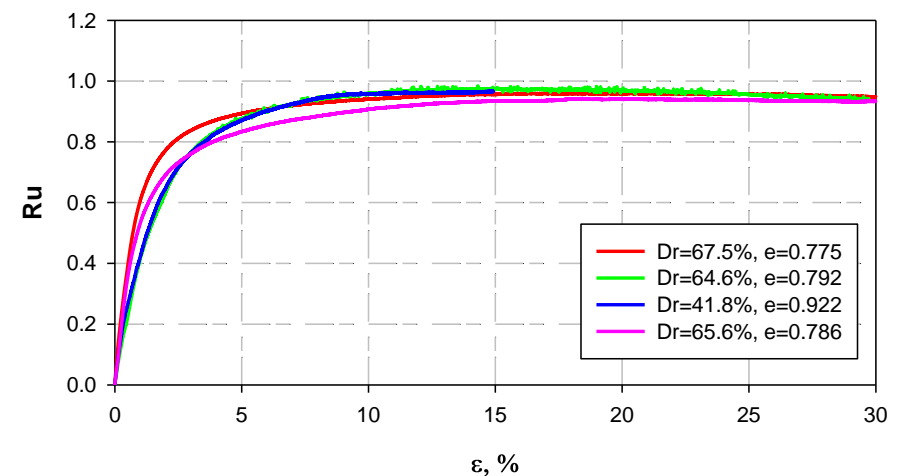
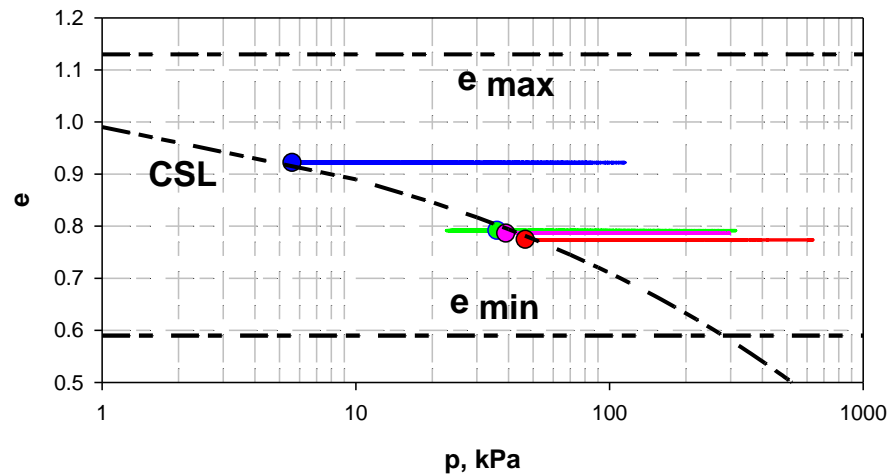
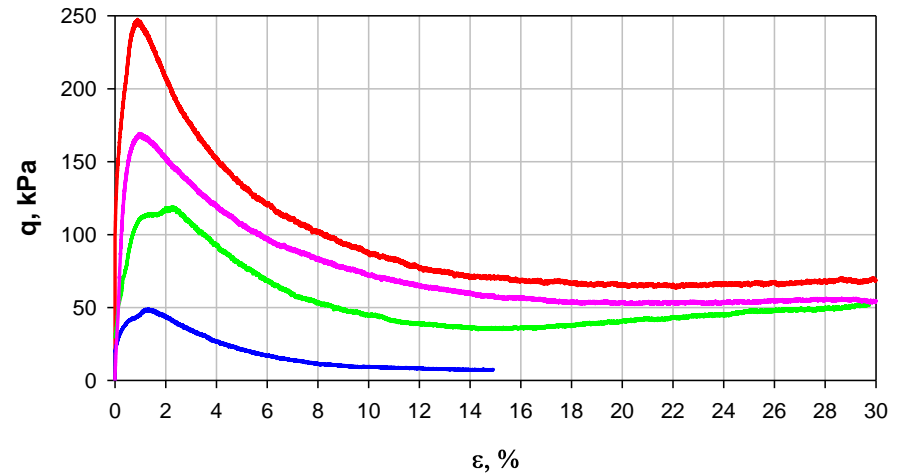
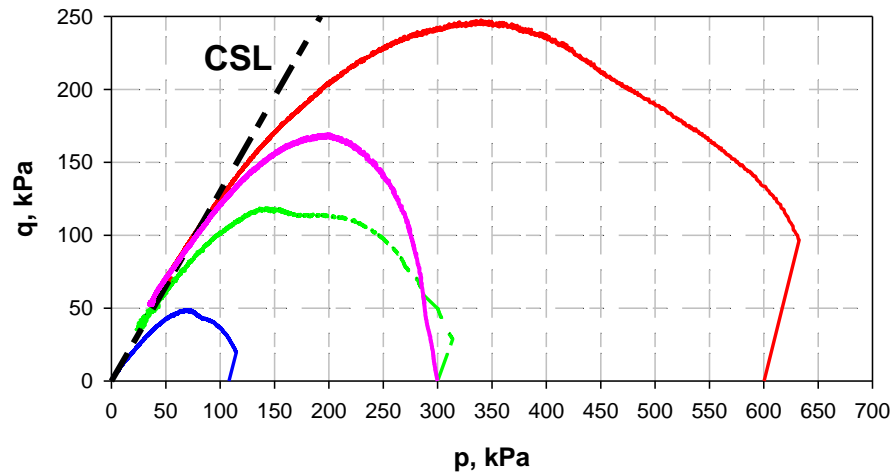


Figura 36. Resultados de la caracterización mecánica.

4.1.2 Comparación de resultados con otras investigaciones

Los análisis realizados para la arena del Guamo para determinar los parámetros del estado crítico sugieren que dado que el coeficiente de curvatura y tamaño medio de partículas son mayores que en la arena de Toyoura. Se puede inferir que la arena del Guamo tiene mala gradación en comparación con la arena de Toyoura, lo que produce que la línea del estado crítico tenga una mayor pendiente en el espacio $\log(p)$ - e ; la gradación provoca que en este tipo de materiales no pueden compactarse bien, es decir, lograr una condición densa es más difícil que en un material de buena gradación.

Como se aprecia en la Tabla 7 los parámetros λ y ξ que controla la pendiente de la curva del estado crítico en el espacio $\log(p)$ - e . En el caso de la arena del Guamo son mucho más grandes que en la arena de Toyoura y esto se debe a su gradación y al tamaño de partículas, lo que impide que las partículas se organicen en empaquetamientos densos, es probable que en la arena de Toyoura al presentar tamaño de partículas menores y una mejor gradación la capacidad del material a tener arreglos de partículas más densos sea más probable que en la arena del Guamo.

Tabla 7. Resultados de los parámetros del estado crítico de la arena del Guamo y la arena de Toyoura.

Parámetros del estado crítico	Arena del Guamo	Arena de Toyoura
M	1.30	1.25
ϕ	32.30°	31.14°
eco	1.12	0.934
λ	0.413	0.019
ξ	0.254	0.700

4.2 Análisis de los ensayos y triaxiales cíclicos a muestras saturada

4.2.1 Patrones de falla de muestras de arena en condiciones cíclicas

En este trabajo de investigación el objetivo principal es determinar el comportamiento de la evolución de la presión de poros para muestras saturadas y muestras desaturadas con gas y así determinar su respuesta mecánica ante la aplicación de una carga cíclica.

Por lo tanto, para lograr los objetivos propuestos se requiere realizar muestras que presenten los siguientes tipos de falla: movilidad cíclica, falla por flujo seguido de movilidad cíclica y falla por flujo seguido por acumulación plástica de deformación (véase sección 2.2.3 de este documento).

Estos tipos de fallas están asociados a un proceso de movilidad cíclica y no a una falla tipo flujo que ocasiona que el material sea inestable, es decir colapse. Como se explicó en la sección 2.2.2 la movilidad cíclica no produce que el material colapse, ya que, al pasar la línea de transformación de fase, este material puede adquirir cierto grado de resistencia residual.

Para lograr el tipo de fallas antes mencionadas se requiere que el espécimen tenga una densidad relativa mediamente densa. Las muestras con densidades muy sueltas tienden a fallar por flujo, es decir, la muestra falla por inestabilidad, las deformaciones por tensión crecen sin control.

Esto se puede evidenciar en la Figura 37 y Figura 38, la falla por flujo se logró cuando la relación de vacíos fue de 0.921(muestra suelta) mientras que la falla por movilidad cíclica se consiguió cuando la relación de vacíos se encuentra en el orden de 0.77 (muestra densa), respectivamente.

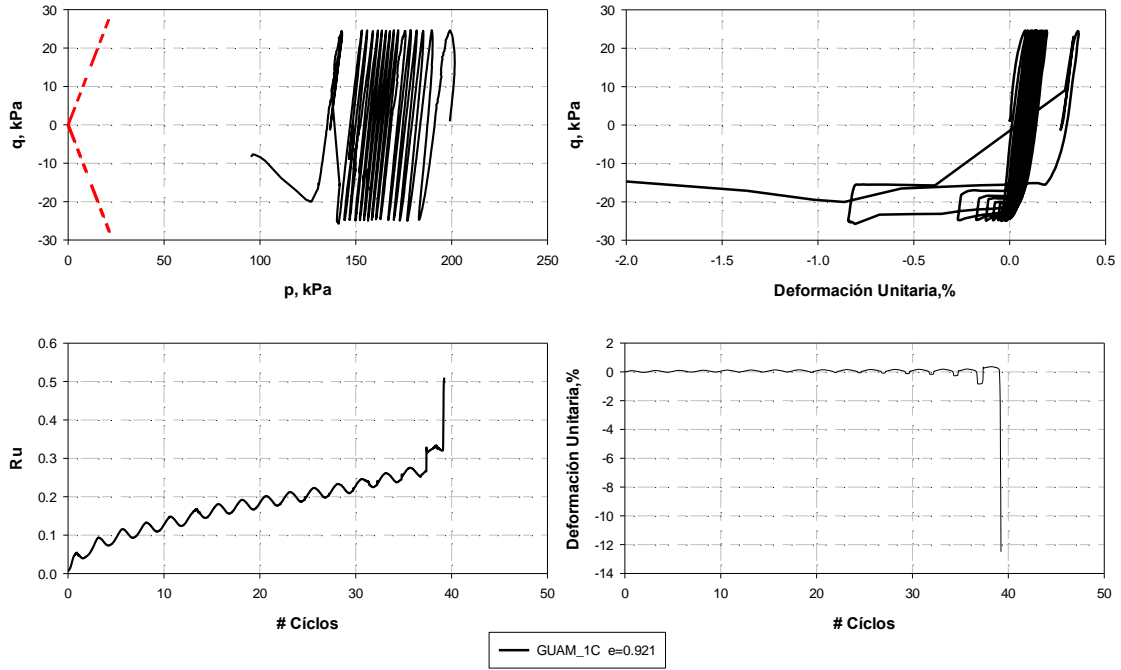


Figura 37. Tipo de falla por flujo

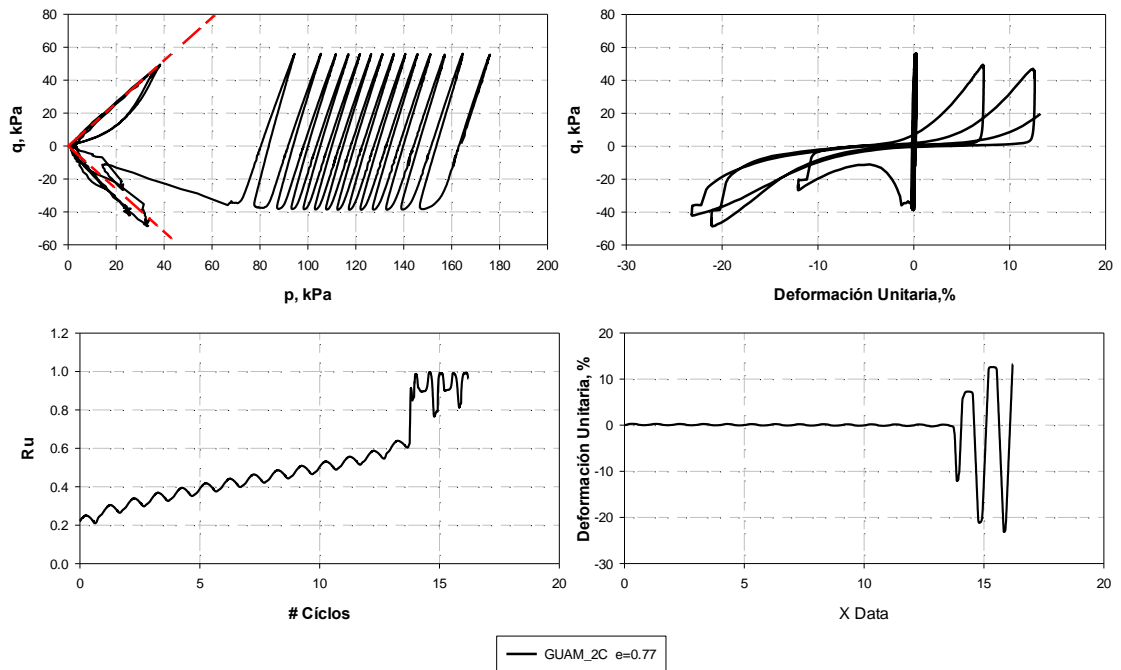


Figura 38. Tipo de falla por movilidad cíclica.

Por lo tanto, para lograr el objetivo de poder alcanzar el tipo de falla propuesto se tomó un valor medio de relación de vacíos entre 0.77 y 0.921, el cual, se encuentra en el orden de 0.84. Finalmente, la relación de las muestras después de la consolidación fue del orden de 0.82.

4.2.2 Comparación de resultados con otras investigaciones

Los resultados obtenidos de los ensayos realizados (véase Figura 38, Figura 37) muestran que son consistentes a los tipos de fallas por licuación que han sido reportado en la literatura, Witchmann (2005). Como se observa en Figura 39, en el ensayo TCUI1 corresponde a una muestra de densidad relativa del 27%, la cual presenta una falla asociada con inestabilidad (véase sección 2.2.2), mientras que el ensayo TCUI7 correspondiente a una muestra de densidad relativa de 67%, falla por movilidad cíclica.

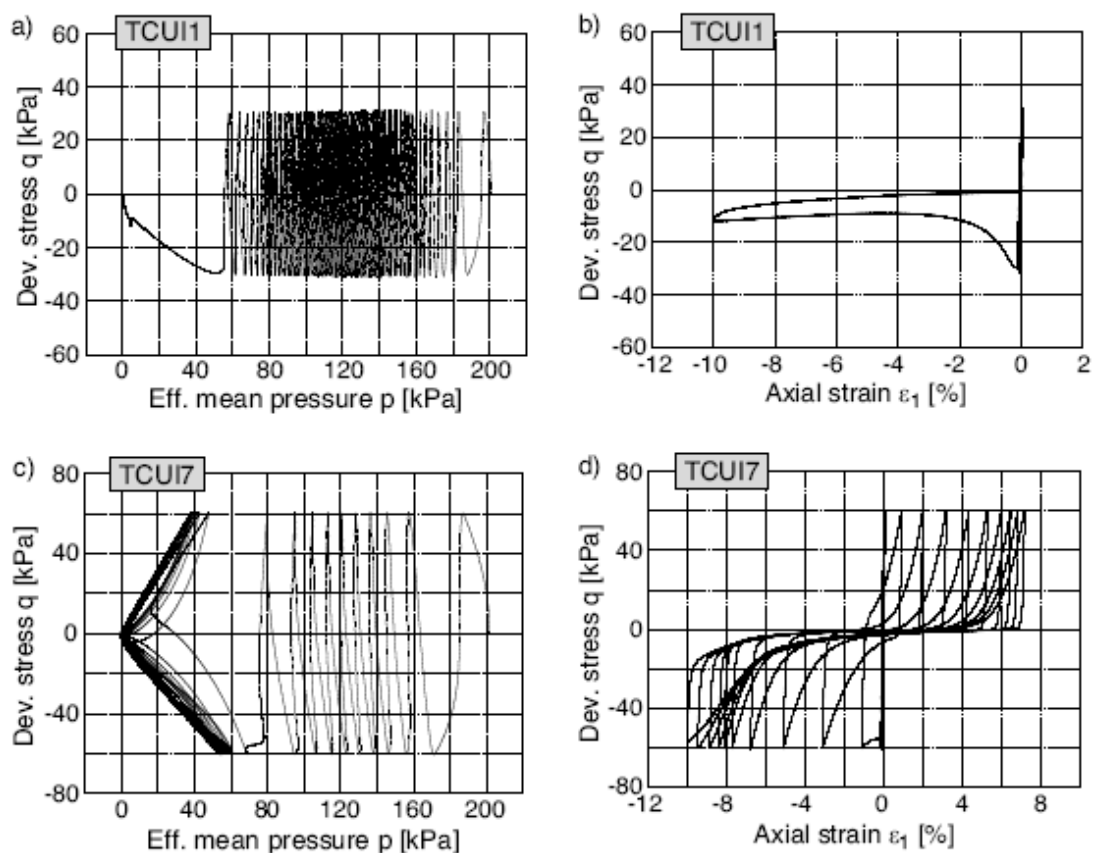


Figura 39. Tipo de fallas asociados a procesos de licuación Witchmann (2005).

4.2.3 Resultados de los ensayos triaxiales cíclicos a muestras saturadas

Se realizaron 3 ensayos cíclicos a muestras con relación de vacíos similares, correspondientes a una densidad relativa equivalente a mediamente densa. Esta relación de vacíos fue seleccionada para lograr que las muestras tengan una falla por movilidad cíclica y no fallen por un proceso de inestabilidad. En la Figura 40, se observa que la relación de vacíos seleccionada presenta un comportamiento contractante debido a que el parámetro de estado es de aproximadamente 0.20 (véase sección 2.2.1), además se aprecia que la muestra presenta una falla por movilidad cíclica.

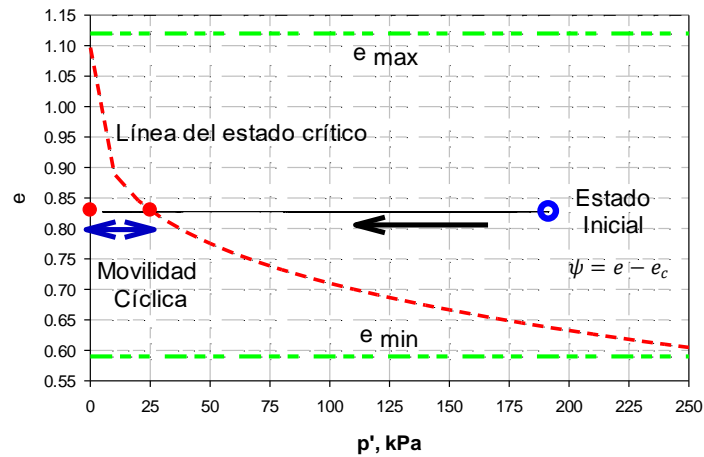


Figura 40. Parámetro de estado.

Se intentó replicar el ensayo 3 veces para verificar que los resultados sean repetibles y compararlos con los ensayos cíclicos con gas bajo las mismas condiciones. EL resumen de los resultados se muestran en la Tabla 8 (véase Figura 41, Figura 42y Figura 43), la relación de vacíos (e) antes del corte tiene una media de 0.818 y una desviación estándar de 0.004, lo cual indica que la muestra fue repetible en los 3 ensayos realizados.

Tabla 8. Resultados de los ensayos triaxiales cíclicos

Muestra	Saturación	Relación de vacíos Antes del corte	Esfuerzo efectivo medio p , kPa	# ciclos para alcanzar movilidad cíclica
GUAM_3C	100%	0.822	200	28
GUAM_4C	100%	0.818	200	18
GUAM_5C	100%	0.814	200	28

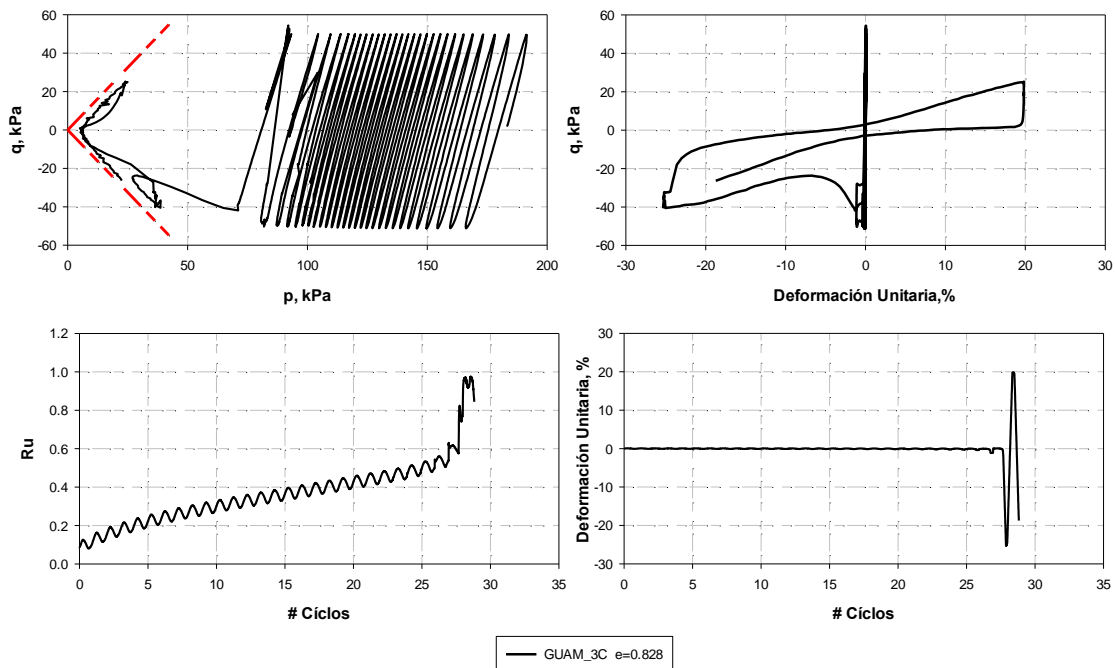


Figura 41. Resultados del ensayo cíclico a la muestra GUAM_3C.

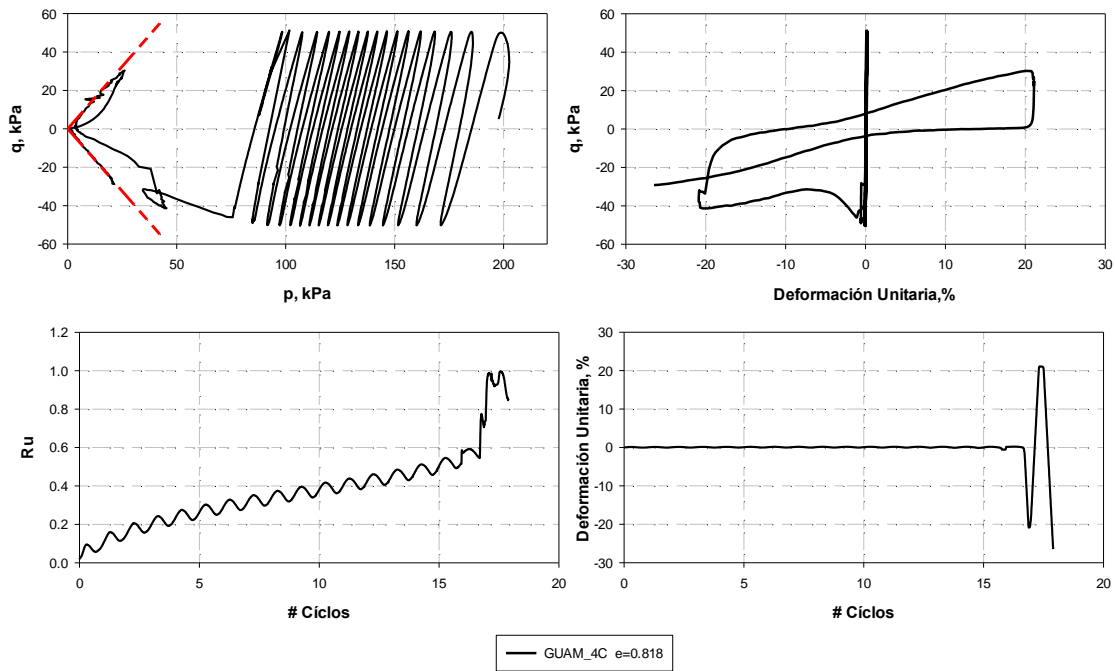


Figura 42. Resultados del ensayo cíclico a la muestra GUAM_4.

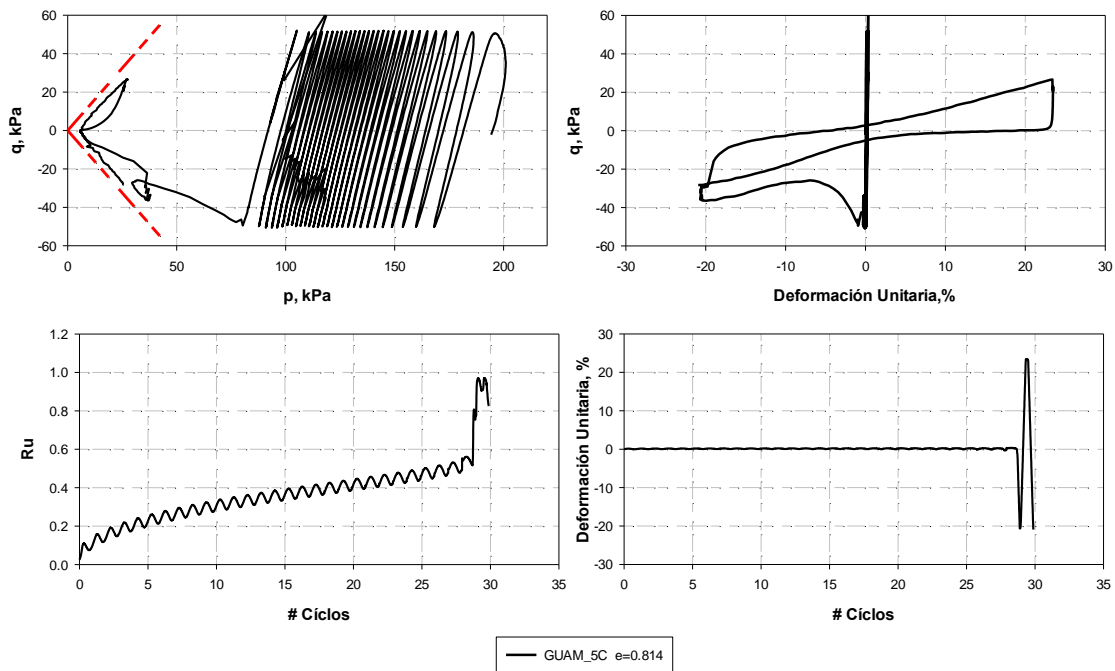


Figura 43. Resultados del ensayo cíclico a la muestra GUAM_4C.

Para establecer el número de ciclos para alcanzar la movilidad cíclica se consideró el punto donde la presión de poros se incrementa rápidamente hasta alcanzar la presión efectiva de confinamiento, véase sección 2.2.3. En dos de las tres muestras esta condición se alcanzó a los 28 ciclos.

En la Figura 44 se muestran los resultados de los 3 ensayos cíclicos realizados, los cuales presentan relativamente un mismo comportamiento en término de trayectoria de esfuerzos y deformaciones. En términos del número de cíclicos requeridos para iniciar el proceso de licuación se observar que las muestras GUAM_3C y GUAM_5C muestran un comportamiento similar, mientras que la muestra GUAM_4C alcanza la movilidad cíclica mucho antes, esto se puede dar debido a que este tipo de muestras son muy susceptibles a cambiar la fábrica con cualquier vibración.

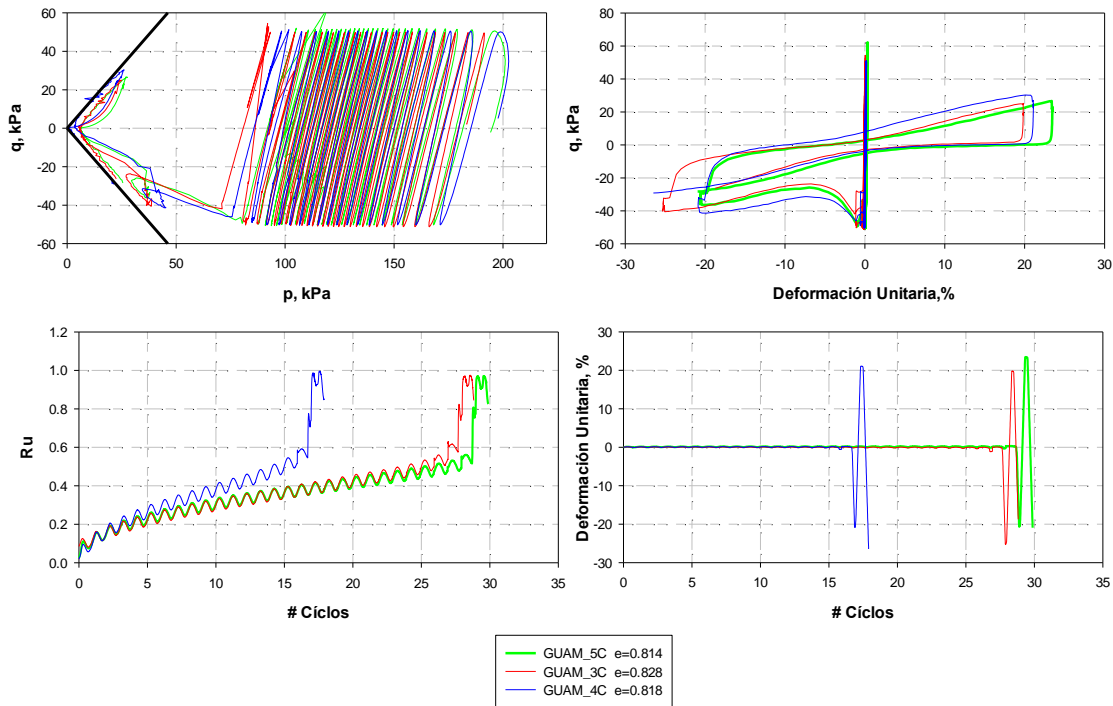


Figura 44. Resumen de ensayos cíclicos.

4.3 Análisis de los ensayos triaxiales cíclicos a muestras con gas

4.3.1 Generación de gas

4.3.1.1 Calibración en la producción de gas

Para arrancar con la ejecución de los ensayos, fue necesario calibrar la cantidad de gas producida por la reacción química producto de la oxidación de la materia orgánica con el peróxido de hidrógeno.

Se realizaron 3 ensayos, los primeros dos ensayos no se pudieron concluir debido a que la cantidad de gas generada fue excesiva y los equipos tienen la limitación del recorrido del émbolo, con estos dos ensayos el émbolo recorrió a su límite y el ensayo finalizó.

Al primer ensayo, a la muestra de arena se adicionó un total de 1% del fertilizante. Se preparó la muestra conforme a la sección 3.3.3 pero al culminar con el proceso de circulación del peróxido de hidrógeno, la cantidad de volumen de agua desplazada fue muy grande y la capacidad del émbolo del controlador de la contrapresión llegó a su límite y el ensayo terminó.

En la Figura 45 se puede apreciar la cantidad de gas generado cuando se preparó una muestra, adicionando 1% de materia orgánica más una concentración de peróxido de

hidrógeno al 4%, el cual, para propósitos del ensayo no era un volumen de gas que requeríamos para desaturar la muestra a valores de saturación entre el 85% al 95%.



Figura 45. Gas producido al despresurizar la cámara para muestra preparada con 1% de materia orgánica más peróxido de hidrógeno al 4% de concentración.

Razón por la cual, fue necesario empezar a calibrar la cantidad de peróxido de hidrógeno para producir una cantidad mucho menor de gas, entonces se procedió a ensayar a la muestra de arena tratada previamente con peróxido de hidrógeno y calcina (0.18% de cantidad de materia orgánica) sin añadirla fertilizante y se disminuyó la concentración de peróxido de hidrógeno, pasando del 4% a aproximadamente el 1%. Los resultados fueron aceptables, se empezó a generar una cantidad aproximada de 10 cm³ de gas bajo una presión de poros de 830 kPa y un esfuerzo total de cámara de 850 kPa. Esta presión de cámara y presión de poros fueron seleccionados debido a que bajo esas presiones la muestra alcanzaba valores de B de Skempton mayores de 96%, antes de la circulación de la solución de peróxido de hidrógeno con agua destilada. En la Figura 46 se puede apreciar que la cantidad de gas producido es considerable; a pesar de que la cantidad de materia orgánica y la concentración de oxidante son bajas.



Figura 46. Gas producido al despresurizar la cámara para muestra preparada con arena previamente tratada con peróxido de hidrógeno y calcinada más peróxido de hidrógeno al 4% de concentración.

Una vez que se logró determinar cómo obtener cantidades de gas en el orden de 10 cm^3 , se identificó que la reacción tardaba aproximadamente 50 horas, esto se aprecia en la curva que muestra la variación de agua desplazada dentro de la muestra cuando esta se vuelve asintótica. Como se observa en la Figura 47, el cambio de volumen de la muestra está asociado con el cambio de volumen de la cámara y la cantidad de gas libre está asociado con el volumen de agua desplazado medido con el controlador de la contrapresión. Para poder calcular la cantidad de gas producida y al no tener instrumentación para poder medir el cambio del volumen total de la muestra se adoptaron ciertos supuestos.

El cambio de volumen total de la muestra, se quiso asociarlo al cambio de volumen de la cámara, como se mencionó anteriormente. Los cambios de volumen registrados en la cámara no son precisos, por lo cual no se tiene certeza en esta investigación de ese resultado. De acuerdo con Vega et al. (2014), usando instrumentación para medir el cambio de volumen total, utilizando una doble cámara, se podía registrar los cambios de nivel de agua entre la cámara interna y externa. Este cambio de niveles era medido por un transductor diferencial de presión que lo asociaba con cambios de volumen en la muestra, a medida que se generaba gas, se podía apreciar que existía expulsión de agua de la muestra, pero el volumen total de la misma no cambió (véase Figura 48). El grado final de saturación, se calculó asumiendo que la cantidad de agua desplazada durante la desaturación de la muestra era equivalente a la cantidad de gas liberado y atrapado en la muestra.

Como se mencionó anteriormente, el cambio de volumen total de la muestra asociado con el cambio de volumen de la cámara no es preciso, sin embargo, el cambio total de volumen registrado fue muy leve. En la Figura 47, se puede observar que la variación de volumen de agua dentro de la cámara es aproximadamente 1 cm^3 al final de la reacción y con base los trabajos de Vega et al. (2014), y a pesar de que en la investigación mencionada se utilizó un sistema diferente para generar gas, el principio es el mismo. Por lo tanto, en esta investigación se adoptará el supuesto que no existe un cambio de volumen de la muestra durante el proceso de generación de gas.

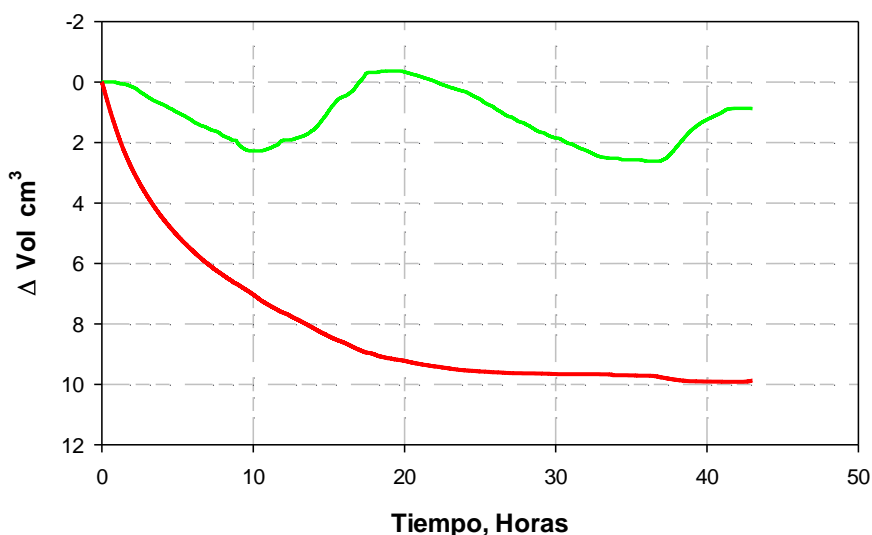


Figura 47. Tiempo y cantidad de gas generado para muestra preparada con arena previamente tratada con peróxido de hidrógeno y calcinada más peróxido de hidrógeno al 4% de concentración

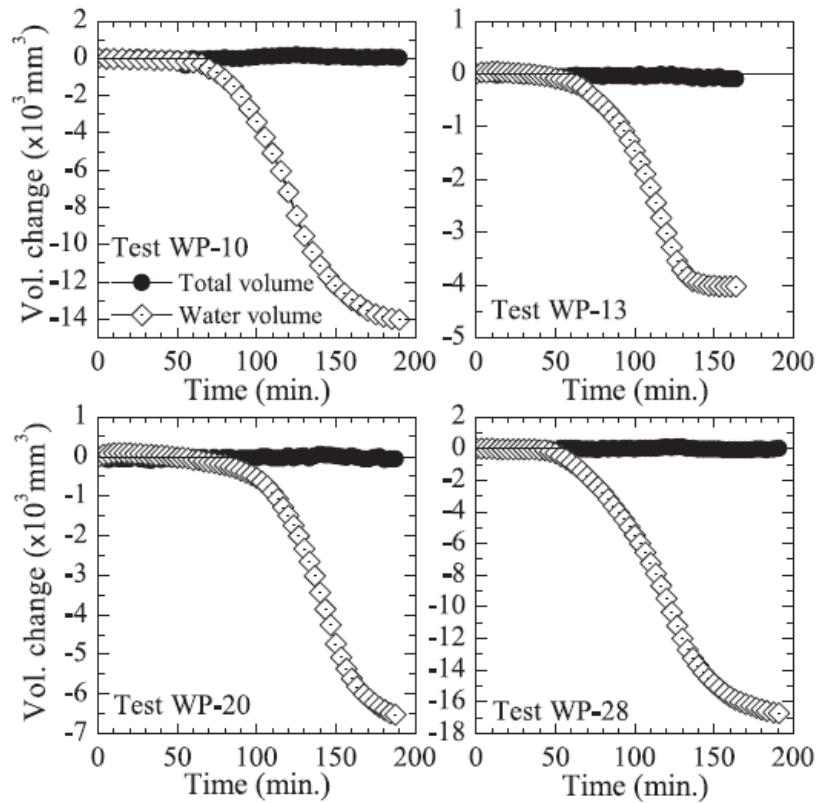


Figura 48. Cambio de volumen total de la muestra (Vega Posada,2014).

Con el supuesto adoptado y explicado anteriormente la cantidad de gas producido por la oxidación de la materia orgánica, se lo calcula aplicando simultáneamente la ley de Boyle y Henry como se muestra a continuación

Ley de Boyle

$$PV_{gas\ libre} = K$$

Ley de Henry

$$V_{gas\ disuelto} = HVw$$

Condición inicial: muestra saturada

$$P(HVw) = K$$

Donde,

P: Presión de poros

HVw: cantidad disuelta de gas en el fluido

K: constante

Condición final: Al final del proceso de la oxidación de la materia orgánica

$$P * (H * V_{W_0}) = P(V_{gas} + H * V_{W_f})$$

$$(H * V_{W_0}) = (V_{gas} + H * V_{W_f})$$

$$(H * \Delta V_w) = V_{gas}$$

Se puede concluir que la cantidad de gas en estado libre se puede calcular como la diferencia entre el agua desplazada por el gas multiplicado por la constante de Henry.

4.3.1.2 Resultados del gas producidos en los ensayos triaxiales

En la Figura 49, se puede observar el cambio del volumen de agua de los poros, tanto para las muestras GUAM_5C_Gs y GUAM_6C_Gs y para la muestra que se utilizó para calibrar la producción de gas. Se puede apreciar que la muestra GUAM_5C_Gs la reacción química desplazó una cantidad de aproximadamente 12 cm³ mientras que la muestra GUAM_6C_Gs únicamente desplazó alrededor de 4 cm³. Esta diferenciación en la producción de gas se produjo porque la arena utilizada para la ejecución del ensayo GUAM_6C_Gs se recicló del ensayo anterior, es decir, hubo una cantidad de materia orgánica que se consumió en el ensayo anterior y por tal razón el agua desplazada de los poros de la muestra fue inferior.

Para las muestras GUAM_7C y GUAM_8C se observa que hasta las 20 horas existe un desplazamiento de agua de la muestra y después empieza a ocurrir lo contrario, se empieza a inyectar volumen de agua a la muestra para poder mantener la presión constante. Esto se debe a que el CO₂ es un gas muy volátil y es posible que el gas se haya filtrado a la cámara. Esto puede ocurrir debido a que en el proceso de elaboración de la muestra se utilizó silicona con base a petróleo, la cual puede debilitar la estructura de la membrana de látex.

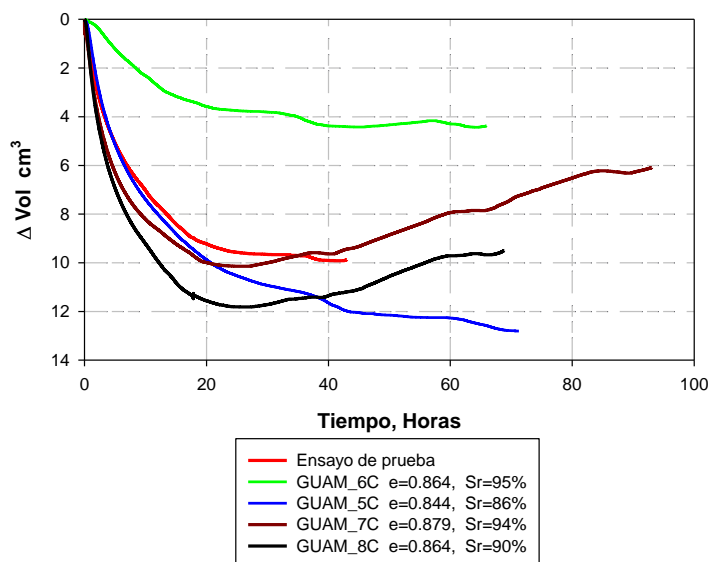


Figura 49. Cambio de volumen de agua en la muestra.

Factores que inciden en la producción de gas

Los factores que influyen en la producción de gas son los siguientes:

- Cantidad de materia orgánica
- Concentración de peróxido de hidrógeno
- Volumen de vacíos.

En la Figura 49 se puede apreciar que al comparar la producción de gas entre la muestra GUAM_5C_Gs y la muestra de prueba, hay una diferencia aproximada de 2.5 cm³. A pesar que las dos muestras están sometidas a la misma presión de poros presentan diferencias, esto se debe a que la muestra de prueba estaba sometida a un esfuerzo efectivo de 20 kPa mientras que la otra muestra a un esfuerzo efectivo de 200 kPa. Es decir, la muestra GUAM_5C_Gs se encontraba con un menor volumen de vacíos que la de su similar.

Para una determinada presión y un volumen de agua se puede disolver una cantidad determinada de gas, la muestra que tenía un esfuerzo efectivo de 20 kPa tenía un mayor volumen de vacíos, por lo que podía disolver un poco más de gas que la muestra que tenía 200 kPa de esfuerzo efectivo ya que esta tenía menos volumen de vacíos. Por lo tanto, la cantidad de gas que no se pudo disolver porque ahora existe menos volumen de agua en los poros se transformó en gas libre. Otro factor que evidentemente afecta la producción de gas es la cantidad de materia orgánica y concentración de peróxido de hidrógeno. Esto fue evidente al comparar las muestras GUAM_5C_Gs y la GUAM_6C_Gs, las dos muestras se encontraban al mismo esfuerzo efectivo y se circuló la misma concentración de peróxido de hidrógeno pero la diferencia fue que para ejecutar el ensayo de la muestra GUAM_6C_Gs se tomó el material de la anterior, es decir, la anterior muestra ya oxidó una cantidad de materia orgánica durante la ejecución de su ensayo, al reutilizar el material la generación de gas producido fue mucho menor, ya que existía menos cantidad de materia orgánica al momento de ejecutar el ensayo GUAM_6C_Gs.

4.3.2 Resultados de los ensayos triaxiales cíclicos en muestras con gas

Se ejecutaron 4 ensayos de cíclicos con gas, las muestras fueron preparadas de tal forma de replicar la misma relación de vacíos que en de condición saturada.

Los resultados de los ensayos (véase Tabla 9, Figura 50, Figura 51, Figura 52 y Figura 53) muestran que se pudo lograr repetitividad en la preparación de las muestras de arena, ya que se consiguió relaciones de vacíos similares a las de los ensayos cíclicos de muestras saturadas. Sin embargo, no se pudo lograr repetitividad en la generación de gas, se observan que se llegó a saturaciones en el rango de 86% al 95%.

Tabla 9. Resultados de los ensayos triaxiales cíclicos

Muestra	Saturación	Relación de vacíos Antes del corte	Esfuerzo efectivo medio p, kPa	# ciclos para alcanzar movilidad cíclica
GUAM_5C_Gs	86%	0.844	200	320
GUAM_6C_Gs	95%	0.864	200	60
GUAM_7C_Gs	94%	0.879	200	120
GUAM_8C_Gs	90%	0.864	200	120

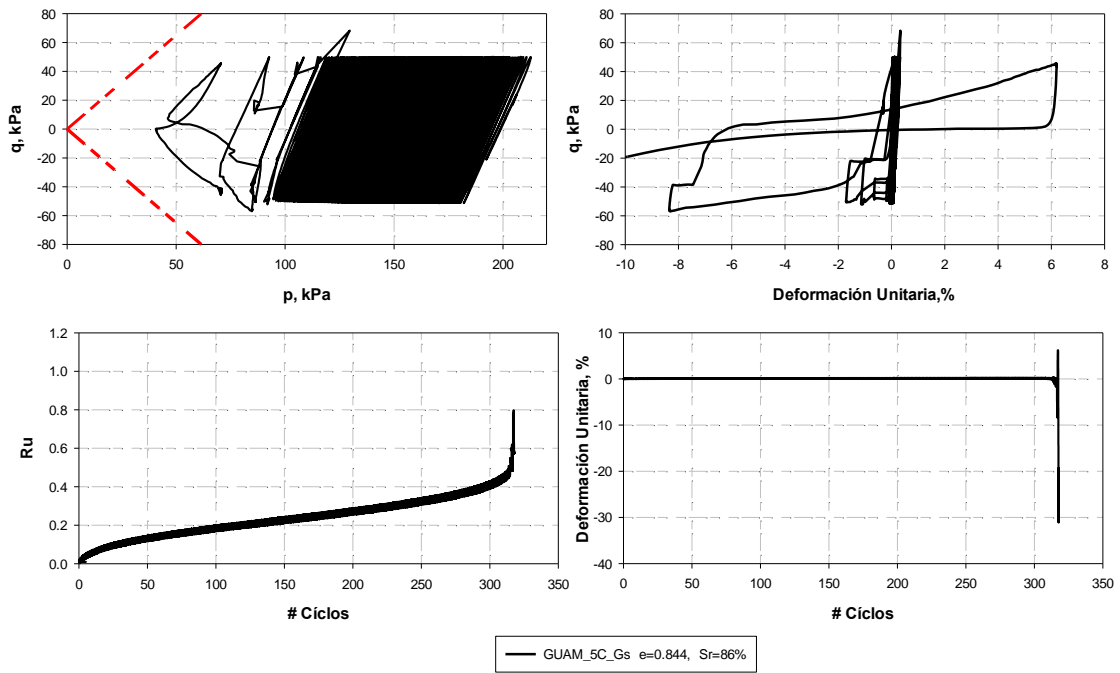


Figura 50. Resultados del ensayo cíclico a la muestra con gas GUAM_5C_Gs.

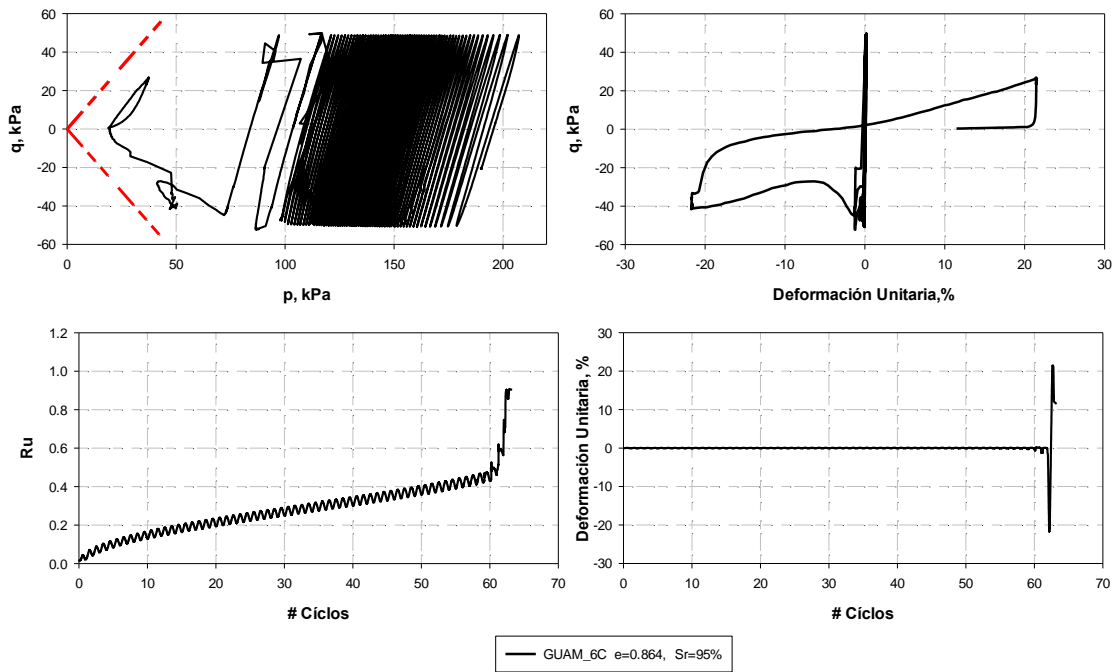


Figura 51. Resultados del ensayo cíclico a la muestra con gas GUAM_6C_Gs.

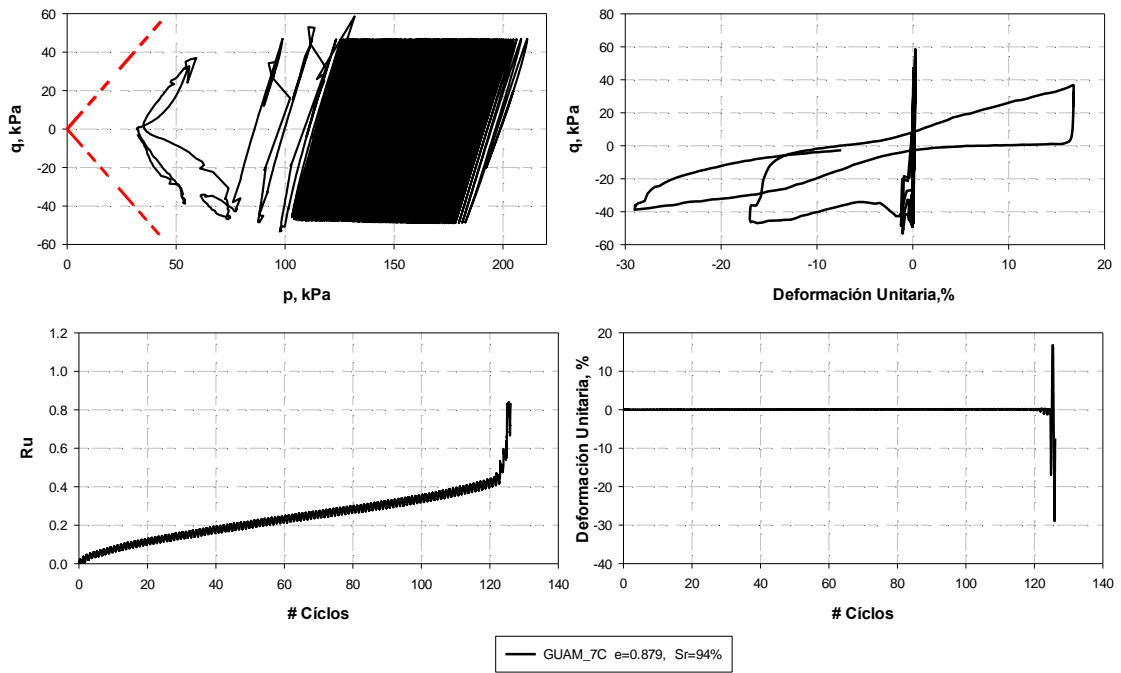


Figura 52. Resultados del ensayo cíclico a la muestra con gas GUAM_7C_Gs.

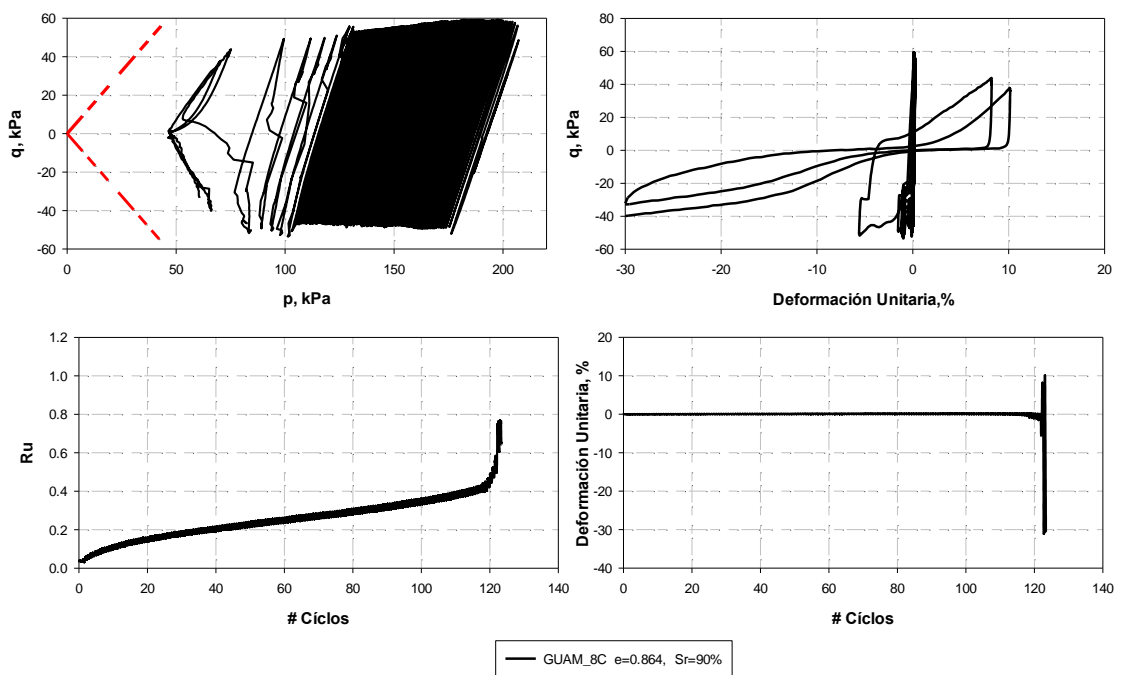


Figura 53. Resultados del ensayo cíclico a la muestra con gas GUAM_8C_Gs.

Otro factor que se pueden apreciar en los resultados de los ensayos triaxiales cíclicos con gas mostrados anteriormente es que en ningún caso se llega a un esfuerzo efectivo cero, es decir, la presión de poros no alcanzó el valor de la presión de confinamiento. De acuerdo con Vega et al. (2014) se debe a que en las mangueras que llegan al transductor de presión de poros se encuentran con microburbujas de CO_2 y esto produce una medición equivocada en la presión de poros.

Además, se puede apreciar que el tipo de fallas evidenciadas están más asociadas a procesos de inestabilidad producto de la acumulación de deformaciones plásticas. Estas deformaciones se produjeron debido al gran número de ciclos que fueron sometidas. El número de ciclos requeridos para desencadenar el proceso de licuación es cuando se observó que las deformaciones empiezan a descontrolarse y se empieza a generar un proceso inestable.

Los resultados en función del número de ciclos para iniciar la licuación en muestras con gas se observan en la Tabla 9. Con una pequeña disminución en la saturación del 100% al 95%, el número de ciclos para alcanzar la licuación prácticamente se duplican con respecto a las muestras saturadas. Y cuando la saturación alcanza un valor del 85% el número de ciclos que se requiere para alcanzar la licuación fue de 11 veces más que su similar saturado.

Se puede concluir que incluso una pequeña cantidad de gas puede retrasar el proceso de licuación en un 100%. Ya para licuar materiales con un 85% de saturación se requieren de muchos ciclos de carga por lo cual, durante la ocurrencia de un sismo prácticamente un material desaturado más allá del 90%, tendría una probabilidad muy baja de descender a la licuación.

4.3.2.1 Comparación de resultados con otras investigaciones

De acuerdo con Pietruszczak et al, (2003), los resultados de los ensayos triaxiales a carga monotónica realizado a muestras con un grado de saturación del 96%, la respuesta es similar a la de una muestra saturada. En particular, el exceso de presión de poros aumenta hasta 140 kPa, y el esfuerzo desviador máximo alcanza 200 kPa al 1% de la deformación axial. La muestra con el grado de saturación de 87%, sostiene un esfuerzo desviador de 300 kPa al 4% de la deformación axial. En este caso, el exceso de presión de poro es de 80 kPa, que es mucho menor que en la prueba anterior.

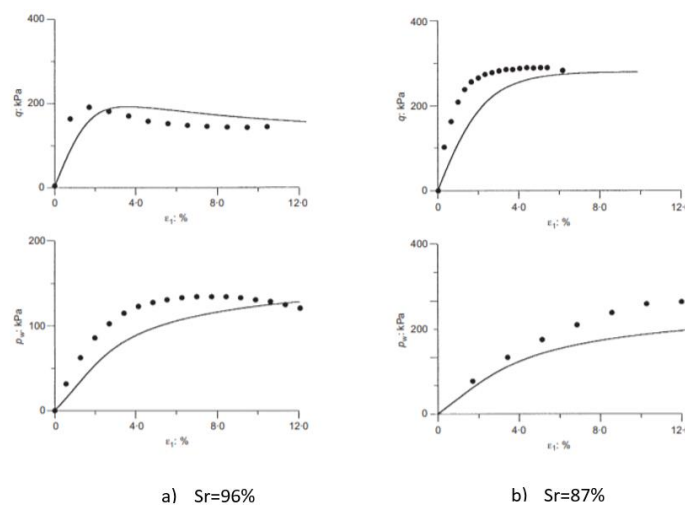


Figura 54. Resultados de ensayos triaxiales a muestras con gas Pietruszczak et al, (2003).

De acuerdo con los resultados reportados por Pietruszczak et al, (2003) se deduce que a medida que el material se encuentra con una saturación más baja aumenta su resistencia y deformación, esto se debe a que el aire al ser compresible permite un cambio volumétrico en una condición sin drenar (aumenta su esfuerzo efectivo), por lo tanto, la evolución de la presión de poros es más lenta. Es decir que en condiciones cíclicas al aumentar la resistencia y al requerir de una mayor deformación axial para alcanzar el máximo incremento en la presión de poros, el inicio del proceso de licuación se retrasa. Esto se evidenció en los ensayos triaxiales cíclicos a muestras con gas (véase Figura 50, Figura 51, Figura 52 y Figura 53), los resultados muestran que a menor grado de saturación bajo la misma demanda de esfuerzo desviador cíclico, la resistencia aumenta, es decir, el inicio del proceso de licuación requiere un mayor número de ciclos.

En la Figura 55 se muestran los resultados obtenidos por Wang et al. (2017). Se observa que (Figura 55a) una muestra saturada sometida a un ensayo triaxial CU falla por licuación a los 12 ciclos. En la Figura 55b se observa a una muestra con gas con una saturación inicial de 92.3%, la cual falla por licuación aproximadamente a los 40 ciclos. Estos resultados son consistentes con los mostrados en la Figura 50, Figura 51, Figura 52 y Figura 53 las cuales fallan por licuación a los 360, 60, 120 y 120, respectivamente y al estar saturadas completamente fallan a las 28 ciclos, es decir, el número de ciclos requeridos para iniciar el proceso de licuación aumenta considerablemente a una menor saturación inicial.

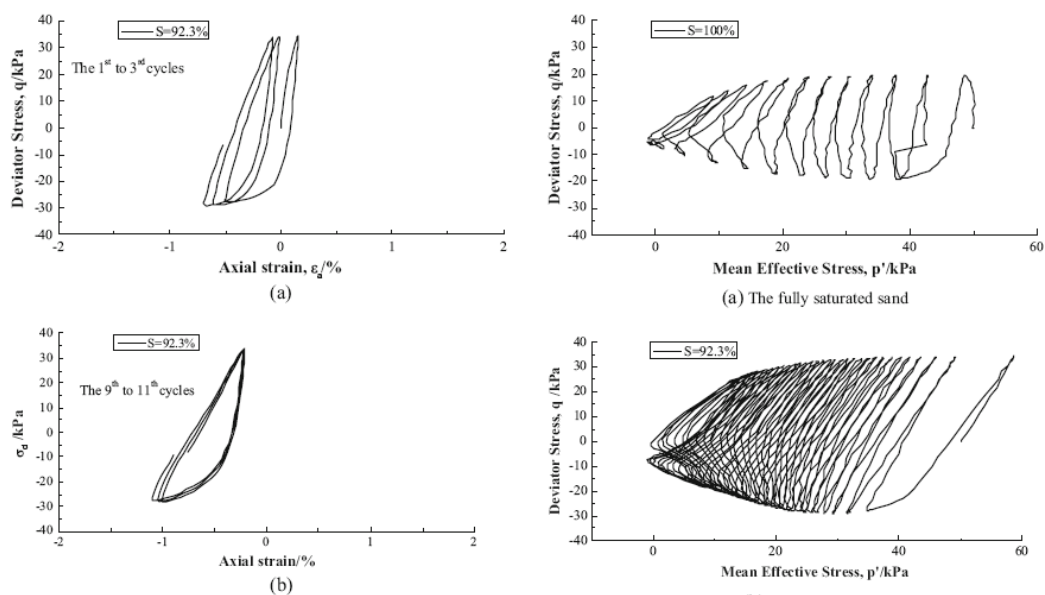


Figura 55. Resultados de ensayos cíclicos con gas Wang et al. (2017).

CAPITULO 5

5 CONCLUSIONES

En la Tabla 10 se muestran los resultados de todos los ensayos realizados tanto para muestras saturadas y con gas. Se aprecia que el número de ciclos que se requieren para iniciar el proceso de licuación en muestras desaturadas son mucho mayores que en muestras saturadas. Con bajas cantidades de gas libre presente en los poros de las muestras, al pasar del 100% de saturación al 95%, el número de ciclos prácticamente se duplican, pasando de 28 a 60 ciclos, respectivamente, para iniciar la licuación. Con desaturaciones mayores el número de ciclos puede ser hasta 12 veces más grande. Por lo tanto, se concluye que la hipótesis planteada en este trabajo se cumple.

Tabla 10. Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos cíclicos de muestras saturadas y con gas

Muestra	Saturación	Relación de vacíos Antes del corte	Esfuerzo efectivo medio p, kPa	# ciclos para alcanzar movilidad cíclica
GUAM_5C_Gs	85%	0.844	200	320
GUAM_6C_Gs	95%	0.864	200	60
GUAM_7C_Gs	94%	0.879	200	120
GUAM_8C_Gs	90%	0.864	200	120
GUAM_3C	100%	0.822	200	28
GUAM_4C	100%	0.818	200	18
GUAM_5C	100%	0.814	200	28

De acuerdo con un ajuste realizado para determinar una función entre el número de ciclos y la saturación, se concluye que se tiene un comportamiento exponencial, es decir, entre más desaturado se encuentre el material se requerirá más ciclos para iniciar la licuación. La función se muestra a continuación.

$$S_r = 1.0058e^{-5E-04(\#ciclos)}$$

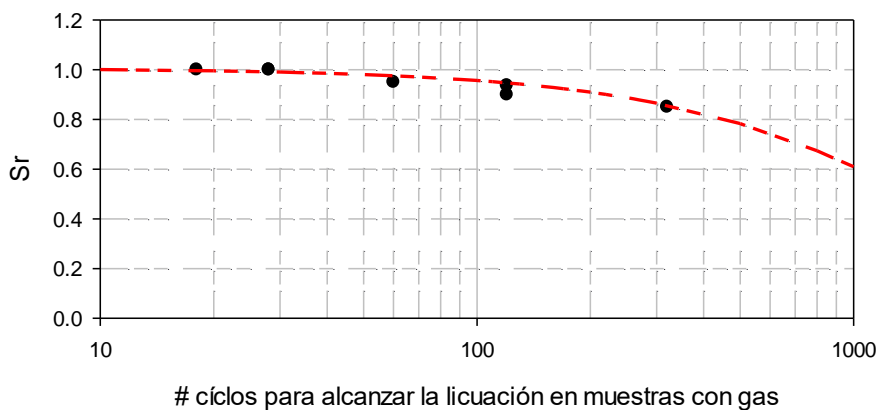


Figura 56. Gráfico para determinar relación entre el número de ciclos para alcanzar la movilidad cíclica y el grado de saturación.

El exceso de presión de poros en las pruebas de compresión triaxial se redujo en función del grado de saturación. Por lo tanto, se concluye que la respuesta de la presión de poros en pruebas triaxiales cíclicas en muestras saturadas es mucho más severa que en muestras con gas, incluso induciendo pequeñas cantidades de gas.

La presencia de incluso una pequeña cantidad de gas aumenta en gran medida la resistencia cíclica del suelo, independientemente de su densidad. Las muestras de arena media que contengan gas desarrollarán deformaciones axiales mucho más pequeñas durante las cargas cíclicas que las de sus contrapartes saturadas

Por lo antes mencionado, se concluye que, en muestras medianamente densas saturadas, el patrón de falla corresponde a movilidad cíclica, debido a que no se genera un proceso de inestabilidad que haga que la muestra colapse. Para el caso de muestras desaturadas con gas el exceso de presión de poros no alcanzó la presión de confinamiento, es decir, no se tiene una condición transitoria de esfuerzo efectivo cero; el tipo de falla asociada es más cercana a un proceso de inestabilidad por la acumulación de deformaciones plásticas debido a la gran cantidad de ciclos de carga a la que fueron sometidas.

Por otro lado, al realizar la preparación de las muestras para someterles a ensayos de compresión triaxial a muestras saturadas se utilizó la arena del Guamo nativa, sin tratamiento para eliminar la materia orgánica. Para las muestras destinadas a la ejecución de ensayos triaxiales con producción de gas, se utilizó la arena del Guamo tratada con peróxido de hidrógeno al 30% y calcinada a 600°C. Como se puede apreciar en la Tabla 10 la relación de vacíos resultante antes de iniciar el proceso de corte para muestras saturadas fue del orden de 0.82 mientras que para las muestras con gas la relación de vacíos se encuentra en el orden de 0.87 a pesar de haber utilizado la misma cantidad de peso seco para la elaboración de los diferentes especímenes. Por lo mencionado, se concluye que la gravedad específica del material varía durante el proceso de eliminación de materia orgánica, es decir, sus propiedades mecánicas podrían verse afectadas, sin embargo, esto requiere ser comprobado con ensayos de refracción de rayos x y mineralogía para determinar qué es lo que ocurre con el material cuando pierde materia orgánica.

Con base a los ensayos realizados, se concluye que la producción de gas está en función de la cantidad de materia orgánica, concentración de peróxido inyectado a la muestra y relación de vacíos. Como se explicó anteriormente para un determinado volumen de agua se puede disolver una única cantidad de gas para una determinada presión parcial. Sin embargo, no se estudió la composición de la materia orgánica para determinar cuánto gas puede producir cuando esta se oxida con la materia orgánica presente en el material.

CAPITULO 6

6 TRABAJO FUTURO

En esta investigación, no se determinaron características físicas de la arena del Guamo, como forma de las partículas, redondez, etc. Además de determinar su composición mineralógica. Se sugiere hacer un análisis más exhaustivo para lograr caracterizar mejor dichos aspectos, puesto que es importante para tener un mejor entendimiento de su comportamiento mecánico.

Dentro de la caracterización química, no es solo necesario conocer el contenido de materia orgánica del material estudiado, es necesario también conocer la composición de la materia orgánica. Ya que caracterizando la materia orgánica del material se puede estimar de forma más aproximada su comportamiento cuando esta se oxida con el peróxido de hidrógeno. En esta investigación se calibró empíricamente la producción de gas, por lo que se considera como una parte fundamental del trabajo futuro caracterizar la materia orgánica del material,

Es importante también investigar sobre el impacto que produce la preparación de la muestra, se ha evidenciado que usando una u otra técnica la respuesta mecánica del material es diferente. En esta investigación no se usó un método tradicional de preparación de muestra, por lo que se considera una parte fundamental del trabajo futuro determinar cómo es la distribución de la relación de vacíos de las muestras construidas bajo este método realizándoles tomografías y poder comparar con los métodos tradicionales de cual método genera una mejor distribución de la densidad en los granos.

Dentro de la ejecución de ensayos cíclicos se plantea como parte del trabajo futuro instrumentar el equipo triaxial para poder monitorear los cambios de volúmenes, no solo al momento de producir gas, sino también al momento de realizar los procesos de saturación con el método de contrapresión. También, realizar muestreadores que se adapten para utilizar Benders Elementes para la medición de ondas compresionales y de corte para poder estimar indirectamente la saturación del material.

Otro factor muy importante pendiente es la construcción de pedestales y cabezales con piedras porosas ya incorporadas en los mismos para tratar de generar superficies más lisas y reducir los efectos de las condiciones de fronteras al ejecutar los ensayos triaxiales a carga monotónica y cíclica.

Para la ejecución de ensayos con gas es importante seleccionar membranas adecuadas para evitar que el gas se fugue, esto fue una de las causas por las cuales no se pudo generar repetitividad en los ensayos con gas ya que el CO₂ probablemente migró a la cámara. Como parte de trabajos futuros es buscar que tipo de membranas son las más adecuadas para este tipo de ensayos.

Dentro de los resultados obtenidos, se observó que el patrón de falla fue diferente para muestras saturadas y desaturadas. En las muestras saturadas si se logró que el exceso de presión de poros sea igual al esfuerzo medio efectivo, es decir, el inicio de la licuación estuvo asociado con el aumento de la presión de poros. En muestras desaturadas con gas el inicio de la licuación estuvo asociado a un proceso de inestabilidad, por lo que se considera como parte del trabajo futuro determinar que factor provoca ese detonante de falla evidenciado en estos ensayos.

CAPITULO 7

7 REFERENCIAS

Amaratunga, A. and Grozic, J. (2009). On the undrained unloading behaviour of gassy sands. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(11), pp.1267-1276.

Boulanger, R. W., and Idriss, I. M. (2004). "State normalization of penetration resistances and the effect of overburden stress on liquefaction resistance." *Proc., 11th Intl. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, and 3rd Intl. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering*, Doolin et al., eds, Stallion Press, Vol. 2, pp. 484-491.

Bouferra, R., Benseddiq, N., & Shahrour, I. (2007). Saturation and preloading effects on the cyclic behavior of sand. *International Journal Of Geomechanics*, 7(5).

Camacho-Tauta, J. F., Molina Gómez, F. A., Reyes Ortiz, O. J. (2014). Preparación de especímenes de arena para ensayos triaxiales mediante un método controlado de compactación. *Rev. Cient. Gen. José María Córdova*, 12(14). pp. 185-196.

Carraro, J. y Prezzi, M. (2008). A New Slurry-Based Method of reparation of Specimens of Sand Containing Fines. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 31, No. 1, pp.2-11.

Cetin, K. O., and Bilge, H. T. (2012) "Performance-based assessment of magnitude (duration) scaling factors." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 138(3), 324–334.

Cetin, K. O., Bilge, H. T., Wu, J., Kammerer, A. M., and Seed, R. B. (2009). "Probabilistic Model for the Assessment of Cyclically Induced Reconsolidation (Volumetric) Settlements." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 135(3), 387–398.

Cristancho-Torres, E. and Larrahondo, J. (2017). Gassy sands: volume change induced by organic matter oxidation. *Géotechnique Letters*, 7(2), pp.174-178.

Chunyang, L., & Jiting, X. (2015). Experimental Study on the Effects of Initial Conditions on Liquefaction of Saturated and Unsaturated Sand. *International Journal of Geomechanics*, 15(6), 1.

Della, N., Arab, A. & Belkhatir, M. *Acta Mech* (2011) 218: 175.
<https://doi.org/10.1007/s00707-010-0410-x>.

Du, S., & Chian, S. C. (2018). Excess pore pressure generation in sand under non-uniform cyclic strain triaxial testing. *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*,

Eseller-Bayat, E., Yegian, M., Alshawabkeh, A. and Gokyer, S. (2013). Liquefaction Response of Partially Saturated Sands. II: Empirical Model. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(6), pp.872-879.

Grozic, J., Imam, S., Robertson, P. and Morgenstern, N. (2005). Constitutive modeling of gassy sand behaviour. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(3), pp.812-829.

Grozic, J., Robertson, P. and Morgenstern, N. (1999). The behavior of loose gassy sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(3), pp.482-492.

Gonzales, C. y Romo, M. (2011). Formación de grandes volúmenes de arena mediante pluvitación. *Geotechnical Conference*.

H. Y., S., & J., Y. (2014). Failure Modes of Sand in Undrained Cyclic Loading: Impact of Sample Preparation. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, (1), 152.

He, J. and Chu, J. (2014). Undrained Responses of Microbially Desaturated Sand under Monotonic Loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(5), p.04014003.

HE, J., CHU, J. and IVANOV, V. (2013). Mitigation of liquefaction of saturated sand using biogas. *Géotechnique*, 63(4), pp.267-275.

Idriss, I. M., and Boulanger, R. W. (2008). Soil liquefaction during earthquakes. Monograph MNO12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, 261 pp.

Ishihara, K. (1977), "Simple Method of Analysis for Liquefaction of Sand Deposits During Earthquakes", *Soils and Foundations*, Vol. 17, No. 3, September 1977, pp. 1-17.

Ishihara, K., and Yoshimine, M. _1992_. "Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes." *Soils Found.*, 32(1), 173–188.

Jiménez, O. (2011). Análisis del comportamiento de licuación por flujo en la arena del Guamo. (Tesis de Maestría). Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J Raghunandan, M., Juneja, A. y Hsiung, B. (2012).

M. E. Raghunandan, A. Juneja, and B. C. Benson Hsiung. Preparation of reconstituted sand samples in the laboratory. *International Journal of Geotechnical Engineering*, No. 6, pp.125-131.

Seed, H. B., Idriss, I. M. (1982), "Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes", *Earthquake Engineering Research Institute Monograph Series*.

Seed, H. B., Idriss, I. M., Arango, I. (1983), "Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 109, No. 3, pp. 458-482.

Shamoto, Y., Zhang, J., and Tokimatsu, K. (1998). "New charts for predicting large residual postliquefaction ground deformation." *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, 17_7–8_, 427–438.

Sobkowicz, J.C. 1982. The mechanics of gassy sediments. Ph.D. thesis, University of Alberta, Edmonton, Alta.

Tique, D. (2016). Estudio experimental de la inestabilidad difusa para la arena del Guamo Tolima. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Vega-Posada, C., Finno, R. and Zapata-Medina, D. (2014). Effect of Gas on the Mechanical Behavior of Medium-Dense Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(11), p.04014063.

Wang, Y., Kong, L., Wang, Y., Wang, M. and Wang, M. (2017). Liquefaction response of loose gassy marine sand sediments under cyclic loading. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*.

Han, J. (2015). Principles and practices of ground improvement. Hoboken NJ: Wiley.

Wu, J., Seed, R. B., and Pestana, J. M. (2003). "Liquefaction triggering and post liquefaction deformation" *Geotechnical Engineering Research Rep. No. UCB/GE-2003/01*, Univ. of California, Berkeley, Calif.

Yegian, M., Eseller-Bayat, E., Alshawabkeh, A. and Ali, S. (2007). Induced-Partial Saturation for Liquefaction Mitigation: Experimental Investigation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(4), pp.372-380.