

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE UN SUELO COHESIVO
RECONSTITUIDO, BAJO LA REPRODUCCIÓN EN EQUIPO TRIAXIAL
DINÁMICO DE UNA FUENTE SÍSMICA CONOCIDA

GARZÓN TOCORA JOFFRE
GERENA RODRÍGUEZ INGRITH JOHANA



UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ÁREA DE GEOTECNIA
BOGOTÁ
2016

EVALUACIÓN LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE UN SUELO COHESIVO
RECONSTITUIDO, BAJO LA REPRODUCCIÓN EN EQUIPO TRIAXIAL
DINÁMICO DE UNA FUENTE SÍSMICA CONOCIDA

GARZÓN TOCORA JOFFRE
GERENA RODRÍGUEZ INGRITH JOHANA

TRABAJO DE GRADO COMO OPCIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

ASESOR DISCIPLINAR: I. C. EDGAR ALEXANDER PADILLA
COASESOR DISCILINAR: I.C. ESP., MIG, HERMES ARIEL VACCA
ASESOR METODOLÓGICO: LIC. LAURA CALA CRISTANCHO



UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ÁREA DE GEOTECNIA
BOGOTÁ
2016

CONTENIDO

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
2. JUSTIFICACIÓN	3
3. OBJETIVOS	5
3.1. OBJETIVO GENERAL	5
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
4. ANTECEDENTES	6
5. MARCO REFERENCIAL	10
5.1. MARCO CONCEPTUAL	10
5.1.1. PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SUELO	10
5.1.1.1. Módulo de corte del suelo G	11
5.1.1.2. Amortiguamiento ξ	13
5.1.1.3. Módulo de Poisson dinámico del suelo ν_d	15
5.1.1.4. Módulo de elasticidad dinámico E_d	16
5.1.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO	17
5.1.2.1. Efecto de la amplitud de deformación.....	18
5.1.2.2. Frecuencia de la aplicación de la carga.....	19
5.1.2.3. Número de ciclos	20
5.1.2.4. Sollicitación dinámica	20
5.1.2.5. Fuente sismogénica.....	21
5.1.2.6. Efecto de la relación de vacíos	22
5.1.2.7. Efecto del nivel de confinamiento	22
5.1.2.8. Efecto de la relación de sobreconsolidación OCR	22
5.1.2.9. Efecto del índice de plasticidad	23
5.1.3. TRAYECTORIA DE ESFUERZOS	23
5.1.4. NORMALIZACIÓN DE CURVAS.....	28
5.1.4.1. CURVAS DE DEGRADACION TEÓRICAS DE VUCETIC AND DOBRY 31	
5.1.5. ONDAS SINUSOIDALES	34
5.1.6. REGISTRO SISMOLÓGICO MESA DE LOS SANTOS 10 DE MARZO DE 2015	35

5.1.7.	HOJA DE CÁLCULO EERA	37
5.1.8.	TRIAXIAL DINÁMICO	40
5.1.9.	ENSAYO BENDER ELEMENT	41
5.2.	MARCO LEGAL	43
5.3.	MARCO GEOGRÁFICO	45
6.	DISEÑO METODOLÓGICO	49
6.1.	ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN	49
6.2.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	49
6.3.	OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	50
6.4.	FASES DE INVESTIGACIÓN	52
6.5.	MATERIALES Y EQUIPOS	54
6.6.	DISEÑO EXPERIMENTAL	57
6.6.1.	REPRODUCIBILIDAD DE MUESTRAS DE SUELO EN LABORATORIO	57
7.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	60
7.1.	CARACTERIZACIÓN FÍSICA	60
7.1.1.	ENSAYO DE HIDROMETRIA (I.N.V. E – 124 – 07).....	60
7.1.2.	ENSAYO DE AZUL DE METILENO (I.N.V. E – 182 - 13)	61
7.1.3.	ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD (I.N.V. E – 122 – 13)	62
7.1.4.	ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA (I.N.V. E – 128 – 13)	62
7.1.5.	ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS (I.N.V. E - 125 – 13) Y LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS (I.N.V. E - 126 – 13)	63
7.1.6.	ENSAYO NORMAL DE COMPACTACIÓN (I.N.V. E – 141 - 13)	64
7.2.	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA.....	65
7.2.1.	ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA (I.N.V. E – 152 - 13)...	65
7.2.2.	ENSAYO DE CORTE DIRECTO (I.N.V. E – 154 – 13)	67
7.3.	CARACTERIZACIÓN DINÁMICA	69
7.3.1.	BENDER ELEMENT	70
7.3.2.	ENSAYOS TRIAXIALES CÍCLICOS	71
7.4.	EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DINÁMICOS SISMO MESA DE LOS SANTOS, SANTANDER.....	79
7.4.1.	USO DE HOJA ELECTRÓNICA EERA PARA CONOCER DESPLAZAMIENTOS DEL SISMO.....	79
7.4.2.	PRUEBAS TRIAXIALES CÍCLICAS CON SEÑAL DE SISMO.....	81

7.4.3. ANÁLISIS DE PARÁMETROS DINÁMICOS.....	85
8. CONCLUSIONES.....	89
9. RECOMENDACIONES	95
BIBLIOGRAFÍA.....	96
ANEXOS	
ANEXO A. REPRODUCIBILIDAD DE MUESTRAS	
ANEXO B. PROCEDIMIENTO DE MANEJO EQUIPO TRIAXIAL DINÁMICO	
ANEXO C. PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN SOTFWARE BENDER ELEMENT	
ANEXO D. PROCEDIMIENTO PARA INTRODUCIR DESPLAZAMIENTO EN EL EQUIPO	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Degradación del módulo de corte para arcillas de diferente plasticidad ..	6
Figura 2. Influencia del confinamiento e índice de plasticidad	7
Figura 3. Efecto de la densidad relativa en la degradación del módulo cortante con la deformación cortante en arenas.....	8
Figura 4. Efecto de la relación de vacíos en la relación del módulo cortante con la deformación cortante en arenas	8
Figura 5. Cambios en las propiedades del suelo con la deformación de corte y los modelos correspondientes	10
Figura 6. Curva de histéresis deformación de corte y-tensión de corte τ	12
Figura 7. Curva de degradación del módulo	13
Figura 8. Amortiguamiento a partir del ciclo de histéresis esfuerzo-deformación .	14
Figura 9. Reducción del módulo secante y curva de amortiguamiento	15
Figura 10. Ciclos característicos de acciones dinámicas	19
Figura 11. Convención de signos para esfuerzos normales σ y de corte τ	23
Figura 12. Círculo de esfuerzos de Mohr para un elemento sometido a esfuerzo principal mayor y esfuerzo principal menor.....	24
Figura 13. Círculos de esfuerzos de Mohr incluyendo la tensión principal intermedia, σ_2	24
Figura 14. Orientación de los ejes de esfuerzo principales para a) $\tau = 1$ y b) $\tau = 2$	25
Figura 15. Ubicación y definición del punto en que se basa trayectoria de esfuerzos	26
Figura 16. Condiciones de esfuerzo impuestas en elementos de suelo por debajo del nivel de la superficie del terreno por ondas que se propagan verticalmente al cizallamiento en escenarios diferentes	26
Figura 17. Círculos de Mohr, ubicación de polos y orientaciones de ejes de esfuerzos principales	27
Figura 18. Parámetros modelo tipo Masing	29
Figura 19. Puntos de inflexión de las relaciones $G-\gamma$ y $\lambda-\gamma$	30
Figura 20. Variación de los valores mínimos de G y λ , en resultados teóricos.....	31
Figura 21. Sistema de depósito de suelo en capas unidimensional - EERA.....	38
Figura 22. Terminología usada en el análisis de respuesta de sitio - EERA.....	38
Figura 23. Desplazamiento relativo Vs. Tiempo – EERA	39
Figura 24. Uso de Bender Element en el aparato de prueba triaxial.....	42
Figura 25. Variables dependientes.....	50
Figura 26. Variables independientes.....	51

Figura 27. Fases de la investigación	52
Figura 28. Reproducibilidad de muestras.....	58
Figura 29. Carta de clasificación de suelos finos	61
Figura 30. Carta de plasticidad	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Rangos y características de las solicitaciones y pruebas dinámicas	11
Tabla 2. Valores típicos relación de Poisson	16
Tabla 3. Parámetros que afectan el módulo de rigidez y el amortiguamiento	17
Tabla 4. Frecuencias típicas para ensayos triaxiales cíclicos	19
Tabla 5. Número de ciclos equivalentes según la magnitud del sismo.....	20
Tabla 6. Datos sismo Mesa de los Santos Santander (10/03/15).....	35
Tabla 7. Marco Legal.....	43
Tabla 8. Descripción de las zonas de respuesta sísmica	48
Tabla 9. Especificaciones técnicas máquina triaxial.....	55
Tabla 10. Valores azul de metileno	61
Tabla 11. Actividad en arcillas.....	62
Tabla 12. Gravedad específica de minerales	62
Tabla 13. Valor de LL e IP material de ensayo.....	63
Tabla 14. Valores de q_u y C_u material de ensayo	66
Tabla 15. Consistencia de arcillas	66
Tabla 16. Ángulo de fricción ensayo de corte directo	68
Tabla 17. Valores de cohesión para arcillas según su consistencia.....	68
Tabla 18. Resumen propiedades físico-mecánicas	69
Tabla 19. Velocidades de onda ensayo Bender Element	70
Tabla 20. Velocidades de onda ensayo Bender Element	70
Tabla 21. Resumen caracterización dinámica	78
Tabla 22. Resumen propiedades dinámicas sismo	88

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Mapa de intensidades sismo Mesa de los Santos, Santander	36
Imagen 2. Convenciones mapa de intensidades sismo Mesa de los Santos, Santander. (EMS-98)	37
Imagen 3. Ilustración de la prueba bender element (izquierda); Bender element GDS Instruments insertados en un top-cap y el pedestal (derecha) triaxial	42
Imagen 4. Tectónica y sistema de fallas en Colombia	45
Imagen 5. Mapa de estaciones de acelerógrafos	46
Imagen 6. Mapa de Zonificación Geotécnica de la Ciudad de Bogotá	47
Imagen 7. Caolín	54
Imagen 8. Máquina triaxial GDS	55
Imagen 9. Bender Element	56
Imagen 10. Máquina de corte directo	56
Imagen 11. Máquina Versa Tester y máquina universal	57

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Curva de degradación del módulo de corte	32
Gráfica 2. Curva de degradación teórica de amortiguamiento	33
Gráfica 3. Curvas de reducción de módulo de corte y amortiguamiento	33
Gráfica 4. Sine wave- GDS waveform file	34
Gráfica 5. Curva granulométrica	60
Gráfica 6. Límites de consistencia	63
Gráfica 7. Curva de compactación	64
Gráfica 8. Curvas de saturación.....	65
Gráfica 9. Curva esfuerzo- deformación	66
Gráfica 10. Trayectoria de esfuerzos normales.....	67
Gráfica 11. Esfuerzo cortante Vs esfuerzo normal.....	67
Gráfica 12. Etapa de saturación ensayo triaxial	72
Gráfica 13. B Skempton	72
Gráfica 14. Etapa de consolidación ensayo triaxial	73
Gráfica 15. Histéresis Esfuerzo σ_d vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,01KN	74
Gráfica 16. Histéresis Esfuerzo σ_d vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,02KN	74
Gráfica 17. Histéresis Esfuerzo σ_d vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,04KN	75
Gráfica 18. Histéresis Esfuerzo σ_d vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,08KN	75
Gráfica 19. Histéresis Esfuerzo σ_d vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,16KN	76
Gráfica 20. Histéresis Esfuerzo σ_d vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,25KN	76
Gráfica 21. Curva de degradación del módulo de corte para triaxial con señal convencional	77
Gráfica 22. Curva de amortiguamiento para triaxial con señal convencional	78
Gráfica 23. Registro acelerógrafo sentido N-S.....	79
Gráfica 24. Registro sismogénico Mesa de los Santos Aceleración Vs tiempo	80
Gráfica 25. Desplazamiento relativo EERA.....	81

Gráfica 26. Histéresis Esfuerzo σ_d vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,01KN Sismo Mesa de los Santos.....	82
Gráfica 27. Histéresis Esfuerzo σ_d vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,02KN Sismo Mesa de los Santos.....	82
Gráfica 28. Histéresis Esfuerzo σ_d vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,04KN Sismo Mesa de los Santos.....	83
Gráfica 29. Histéresis Esfuerzo σ_d vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,08KN Sismo Mesa de los Santos.....	84
Gráfica 30. Histéresis Esfuerzo σ_d vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,16KN Sismo Mesa de los Santos.....	84
Gráfica 31. Histéresis Esfuerzo σ_d vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,25KN Sismo Mesa de los Santos.....	85
Gráfica 32. Curva de degradación del módulo de corte para triaxial con señal representativa sismo Mesa de los Santos	86
Gráfica 33. Curva de amortiguamiento para triaxial con señal representativa sismo Mesa de los Santos	87
Gráfica 34. Comportamiento del módulo de corte.....	90
Gráfica 35. Porcentaje de degradación del módulo cortante respecto a la caracterización.....	91
Gráfica 36. Porcentaje de degradación del módulo cortante respecto a curvas teóricas	91
Gráfica 37. Comparación curvas obtenidas con curvas teóricas de degradación G/Gmáx	92
Gráfica 38. Comportamiento de la relación de amortiguamiento respecto a la caracterización.....	92
Gráfica 39. Porcentaje de variación de la relación de amortiguamiento respecto a la caracterización	93
Gráfica 40. Porcentaje de variación de la relación de amortiguamiento respecto a curvas teóricas.....	93
Gráfica 41. Comparación curvas obtenidas con curvas teóricas de relación de amortiguamiento	94

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para el diseño de obras civiles es indispensable el conocimiento de los suelos sobre los cuales se va a construir; por esto, se debe tener información no solo de su caracterización física y mecánica en la evaluación de parámetros estáticos, sino también tener conocimiento de su comportamiento dinámico. Evaluar cómo sería el comportamiento de estos, si se llegase a presentar un movimiento telúrico que impacte en gran o mediana escala a la ciudad.

La incidencia de sismos en el comportamiento dinámico de los suelos es para la ingeniería un estudio de vital importancia; estudiar lo que sucede con el suelo en el momento que ocurre el sismo ayuda al análisis de parámetros importantes como el módulo de corte y el amortiguamiento, los cuales son claves en el comportamiento dinámico, además de ser factores de interés en la prevención de daño en las estructuras debido a la pérdida de resistencia del suelo.

Teniendo en cuenta la clasificación hecha en la Norma Sismo Resistente del 2010 (NSR-10)¹ en su título A, tabla A.2.3-2, Bogotá D. C. se encuentra en una zona de amenaza sísmica intermedia, se pueden llegar a presentar aceleraciones pico entre de 0.10g y 0.20g, en donde se concentra la mayor población del país; además de presentarse asentamientos humanos importantes en distintos barrios donde también se encuentran en zonas sujetas a amenazas y/o riesgo. En la ciudad de Bogotá los suelos sobre los cuales se encuentra asentada la población están constituidos principalmente por depósitos de arcilla formados por la desecación de antiguos lagos, tratándose de grandes capas de suelos blandos y compresibles.

Es por esto que se pretende mediante la reproducibilidad de muestras de un suelo cohesivo en el laboratorio, el análisis del comportamiento del módulo cortante G y las demás propiedades ligadas a este parámetro dinámico, cuando son sometidas a una fuente sísmica conocida. Para este caso en particular se tomó como referencia el sismo ocurrido en el municipio de Mesa de los Santos en el departamento de Santander el 10 de marzo del 2015, que tuvo una magnitud de 6.4 en la escala momento.

¹ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente. NSR-10. Bogotá D.C. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010. A.2.3.

Por lo anterior, se presenta la siguiente pregunta de investigación ¿Cuáles son las propiedades dinámicas de un suelo cohesivo reconstituido, bajo la reproducción en equipo triaxial dinámico con una fuente sísmica conocida?

2. JUSTIFICACIÓN

Colombia se encuentra localizado en una zona de convergencia de placas importantes y por ende un número considerable de fallas geológicas que presentan en mayor porcentaje la presencia de un evento telúrico, por lo que uno de los problemas de importancia deberán estar relacionados con los sismos y sus efectos sobre el comportamiento del suelo colombiano, esto incluye cimentaciones y estructuras de cualquier tipo, entre otras. Dentro de estos posibles eventos que pueden ser un problema para la población, la interacción dinámica suelo-estructura traducido en el comportamiento o estabilidad del suelo de cimentación, la naturaleza de sollicitación, condiciones del suelo y el efecto recíproco entre la estructura y el suelo, servirá de fundamento para entender el sismo y su respuesta sísmica a lo que conlleva a un mejor análisis sobre este tipo de eventos.

La interacción dinámica del suelo-estructura analizada por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10)², es considerada normalmente bajo las condiciones ideales del suelo, esta interacción genera diferentes comportamientos dinámicos según la rigidez del suelo, haciendo la interacción mínima o considerable dependiendo el tipo del suelo. En la ciudad de Bogotá existe la presencia de suelos considerados geotécnicamente blandos como es el caso de las arcillas; este tipo de terreno próximo a la superficie produce un aumento considerable de daños generados por sismos, cuando coincide la amplificación de las ondas sísmicas en un rango de periodos de vibración de los materiales con el periodo de vibración de las estructuras. El acercamiento al comportamiento de las arcillas y la magnitud de esa amplificación de la señal están controladas principalmente por las propiedades geotécnicas de los materiales geológicos, especialmente por sus características dinámicas, así como el espesor de las capas y la profundidad a la que se encuentra el sustrato rocoso medido en ensayos in situ y ensayos de laboratorio.

Adicional a lo anterior se permite adelantar la noción de un comportamiento dinámico en suelos blandos, con la implementación de una arcilla reconstituida en laboratorio, un material muy implementado para este tipo de representaciones de suelos que permite constituir un suelo de la ciudad de Bogotá con similares características, y que junto con las propiedades físicas, índice y el comportamiento mecánico tener una referencia del comportamiento dinámico.

² MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente. NSR-10. Bogotá D.C. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010. A.2.3.

El objeto de esta investigación es observar la afectación de las propiedades índice de la muestra de suelo reconstituida en laboratorio ante una sollicitación sismogénica, que representará un alcance futuro en la prevención ante un evento único e irrepetible y dar proximidad en alternativas de solución que podrán garantizar el conocimiento adecuado del suelo. Con ello se pretende valorar y confrontar desde una mirada investigativa la respuesta dinámica de los suelos reconstituidos en laboratorio que se asemejan a suelos arcillosos presentes en la ciudad de Bogotá a través de una evaluación con modelos equivalentes y equipos usados en geotécnica como el triaxial dinámico y Bender Element, que darán a conocer Los factores que influyen en el comportamiento dinámico de dicho suelo reconstituido.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar las propiedades dinámicas de un suelo cohesivo reconstituido bajo la reproducción en equipo triaxial dinámico de una fuente sísmica conocida.

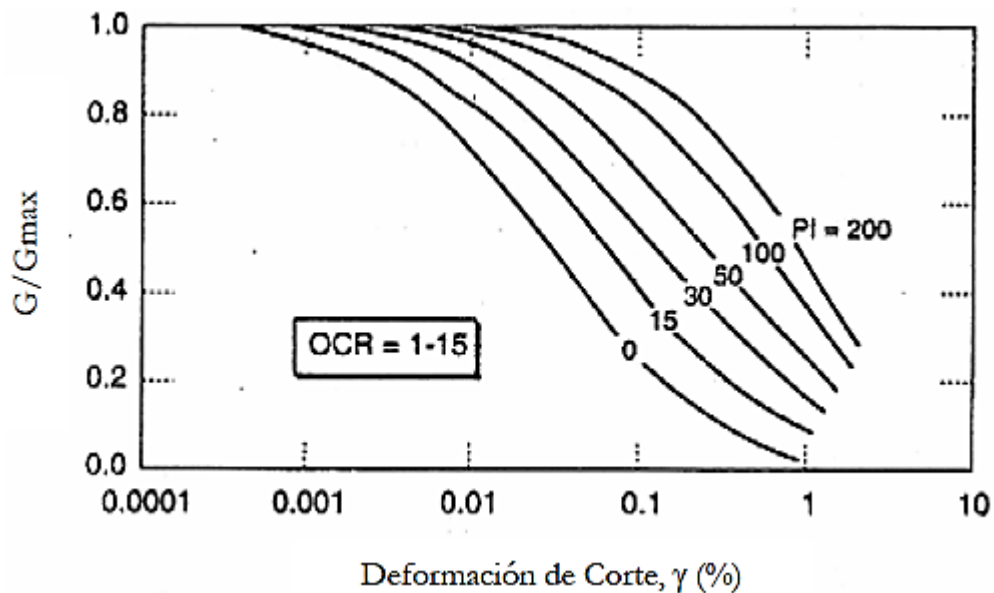
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer las propiedades físico-mecánicas de una muestra de suelo cohesivo reconstituido en laboratorio.
- Determinar las propiedades dinámicas de una muestra reconstituida en el laboratorio compuesta por arcilla caolinita en el equipo triaxial dinámico del laboratorio de la Universidad La Gran Colombia.
- Representar en el equipo triaxial dinámico el registro sismogénico ocurrido en Mesa de Los Santos Santander el 10 de marzo del 2015.
- Analizar el comportamiento dinámico del suelo reconstituido en el laboratorio sometido a una fuente sísmica en equipo triaxial dinámico con características similares de suelos típicos de Bogotá.

4. ANTECEDENTES

El comportamiento dinámico de los suelos ha sido amplia materia de estudio por varios investigadores. Se han realizado varias investigaciones con el fin de poder determinar los factores que influyen en el comportamiento dinámico para arenas y arcillas. Se destacan Vucetic³ 1991, en la respuesta sísmica de distintos suelos se relaciona la degradación del módulo con el índice de plasticidad como se observa en la figura 1, además expone que los suelos altamente plásticos tienen un amortiguamiento bajo y un amplio comportamiento lineal-elástico, estos suelos son susceptibles a presentar resonancia y se pueden amplificar en gran medida en los movimientos sísmicos.

Figura 1. Degradación del módulo de corte para arcillas de diferente plasticidad



Fuente: VUCETIC. et al. Degradación del módulo de cortante para arcillas de diferente plasticidad. 1991.

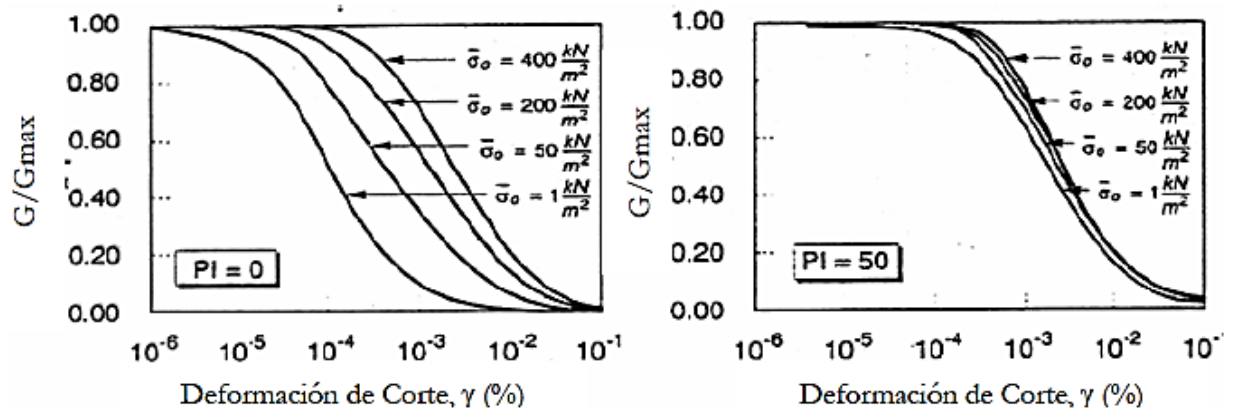
Los suelos con baja plasticidad y saturados como las arenas, exhiben un comportamiento no lineal y considerable amortiguación, una amplificación de movimiento a través de tales suelos por resonancia es casi imposible. La respuesta sísmica de los suelos de plasticidad media, está en algún lugar entre los

³ VUCETIC, M. DOBRY, R. Effect of soil plasticity on cyclic response. Journal of Geotechnical engineering. 1991.

dos casos extremos descritos anteriormente. Estos suelos pueden amplificar el movimiento sísmico, y su capacidad de carga se puede disminuir moderadamente por una carga cíclica continua.

Por otro lado, Ishibashi⁴ en un estudio más complejo, relaciona el grado de consolidación, el estado de esfuerzos y el índice de plasticidad. En donde los suelos más rígidos presentan mayor confinamiento gracias a que el esfuerzo efectivo aumenta a medida que se incrementa la profundidad como se ve en la figura 2. Se evidencia que para las arcillas el incremento de la presión de poros disminuye el módulo de corte y el amortiguamiento para materiales con índices de plasticidad del 50% y no plásticos.

Figura 2. Influencia del confinamiento e índice de plasticidad



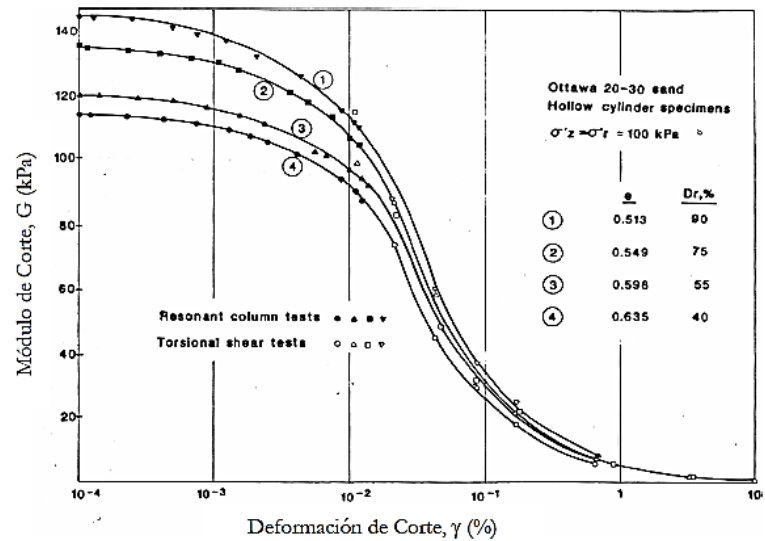
Fuente ISHIBASHI, et al. Influencia del confinamiento e índice de plasticidad. Degradación del módulo cortante. 1993.

Con el fin de estudiar la licuación en las arenas, “arena de Ottawa” Alarcón 1989⁵ en México, evalúa la degradación del módulo de corte G con relación a la variación de la densidad relativa ver figura 3, donde se presenta un aumento de G con el aumento de la densidad relativa D_r y la relación de vacíos (figura 4) probando que el aumento de la relación de vacíos disminuye el módulo de corte.

⁴ ISHIBASHI, I. ZHANG, X. Unified dynamic shear modulus and damping ratios of sand and clay. Soil and foundations. 1993.

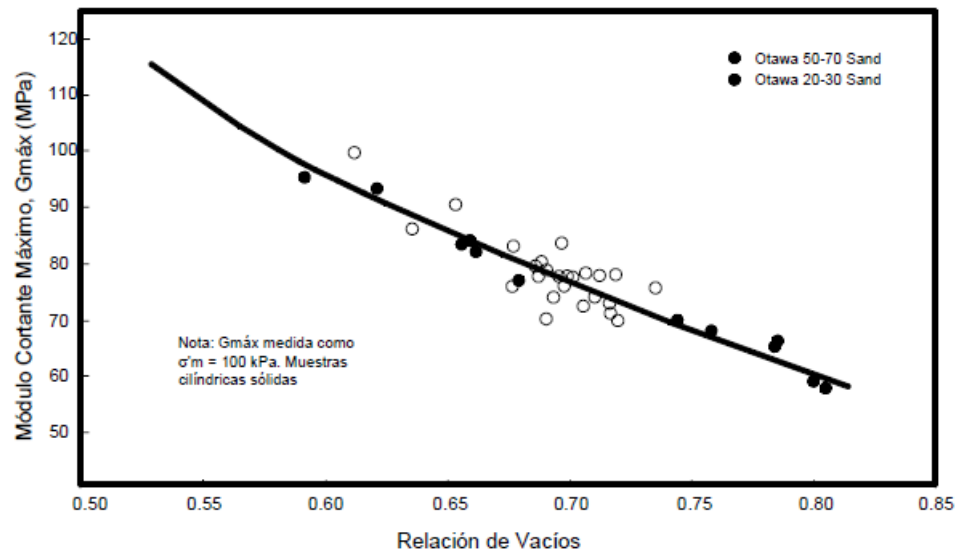
⁵ ALARCÓN, A. et al. Shear modulus and cyclic undrained behavior of sand. Soils and foundations. 1989.

Figura 3. Efecto de la densidad relativa en la degradación del módulo cortante con la deformación cortante en arenas



Fuente: ALARCÓN. et al. Efecto de la densidad relativa en la degradación del módulo cortante con la deformación cortante en arenas. 1989.

Figura 4. Efecto de la relación de vacíos en la relación del módulo cortante con la deformación cortante en arenas



Fuente: ALARCÓN. et al. Efecto de la relación de vacíos en la relación del módulo cortante con la deformación cortante en arenas. 1989.

En la investigación realizada por Fernando Díaz⁶ titulada Modelo de Comportamiento dinámico de Arcillas Blandas en la ciudad universitaria de la Universidad Nacional de Colombia, se adelanta la concepción de un modelo de comportamiento dinámico de arcillas blandas en base a la realización de ensayos de campo y de laboratorios estáticos y dinámicos disponibles para determinar propiedades esfuerzo-deformación. Para este fin caracteriza el subsuelo según los factores que influyen en el comportamiento dinámico, como lo son las propiedades índice, de resistencia y compresibilidad, historial de esfuerzos, esfuerzo de confinamiento, relación de cortante cíclico, número y frecuencia de los ciclos de cargas. Para finalmente presentar un modelo constitutivo no lineal con parámetros que definen el comportamiento dinámico de arcillas blandas presentes en el Campus de la Universidad Nacional.

La metodología empleada para este caso fue realizar una correlación de los factores que influyen en la respuesta dinámica, para resaltar los más relevantes y poder concebir el modelo de comportamiento.

Como resultado de esta investigación, al analizar la influencia de los parámetros del suelo en las propiedades dinámicas concluye que la relación de vacíos es la propiedad más adecuada para correlacionar con los módulos de corte debido a que presenta menores dispersiones, es adimensional lo que lo hace pertinente para correlacionar debido a la similitud de dimensiones.

Plantean un modelo no lineal para arcillas blandas con base en los modelos de Hardin, Stoke y Matasovic; básicamente se resume en determinar la relación de vacíos y el estado de esfuerzos promedio del material para luego calcular parámetros dinámicos G_0 , D_{min} en función de γ_{ref} .

⁶ DIAZ, Fernando. Et al. Modelo de comportamiento dinámico de arcillas blandas. Universidad Nacional de Colombia. 2007. p. 1-17.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1. MARCO CONCEPTUAL

5.1.1. PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SUELO

Las propiedades dinámicas son las que rigen el comportamiento de los suelos, tales son el módulo de corte, el amortiguamiento, la relación de Poisson, el módulo de elasticidad. Para la obtención de estos parámetros, se cuenta con varios métodos de campo y laboratorio.

Es indispensable el conocimiento del nivel de deformación del suelo señalado en la figura 5, para la implementación de un modelo constitutivo adecuado y un mejor estudio de los parámetros dinámicos, gracias a que el comportamiento del suelo varía en función del rango de deformación de corte.

Figura 5. Cambios en las propiedades del suelo con la deformación de corte y los modelos correspondientes

Shear strain	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹
	Small strain	Medium strain		Large strain	Failure	
Elastic						
Elasto-plastic						
Failure						
Effect of load repetition						
Effect of load rate						
Model	Linear elastic model		Viscoelastic model		Load history tracing type model	
Method of response analysis	Linear method		Equivalent linear method		Setp-by-step integration method	

Fuente: RODRÍGUEZ, Montse. Caracterización de la respuesta sísmica de los suelos, Cambios en las propiedades del suelo con la deformación de corte y los modelos correspondientes.

A continuación, en la tabla 1, se presenta la relación entre el procedimiento general de obtención de propiedades dinámicas y su respectivo rango de deformaciones.

Tabla 1. Rangos y características de las solicitaciones y pruebas dinámicas

Ensayo	Intervalo de frecuencia (Hz)	Intervalo de deformación angular (%)	Intervalo de velocidad de deformación angular (1/seg)
Triaxial cíclico	0.2 – 5	$10^{-2} - 5$	$0.8 \times 10^{-4} - 1$
Corte simple cíclico	0.2 – 5	$10^{-2} - 5$	$0.8 \times 10^{-4} - 1$
Torsión cíclica	0.2 – 5	$10^{-2} - 5$	$0.8 \times 10^{-4} - 1$
Columna resonante	50 – 200	$10^{-4} - 10^{-2}$	$2 \times 10^{-4} - 8 \times 10^{-2}$
Refracción sísmica	20 – 100	$10^{-4} - 10^{-3}$	$0.8 \times 10^{-4} - 0.4 \times 10^{-2}$
Cross hole, Down hole	20 – 100	$10^{-4} - 10^{-3}$	$0.8 \times 10^{-4} - 0.4 \times 10^{-2}$
Vibración forzada en bloques	< 50	$10^{-3} - 10^{-1}$	$< 2 \times 10^{-3} - < 2 \times 10^{-1}$
Placa cíclico	< 0.1	$10^{-2} - 5$	$< 0.4 \times 10^{-4} - < 2 \times 10^{-2}$
Vibración forzada en placa atornillada	< 50	$10^{-3} - 10^{-1}$	$< 2 \times 10^{-3} - < 2 \times 10^{-1}$
Maquinas	3 – 50	$10^{-4} - 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-3} - < 2 \times 10^{-3}$
Sismos con foco transcurso	3 – 5	Depende del suelo, solicitaciones de interacción suelo –estructura, degradación por licuación etc.	
Sismos con foco subductivo	10 – 15		
Olas	< 0.2		

Fuente: DÍAZ, J. Rangos y características de los ensayos dinámicos.2006.

5.1.1.1. Módulo de corte del suelo G

Una de las propiedades más relevantes en el análisis dinámico de los suelos es el módulo dinámico de corte o también llamado módulo de rigidez G , definido como una constante que relaciona el esfuerzo de corte y la deformación de corte que experimenta el suelo siendo este una medida de dureza.

Está definido por la expresión:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde,

τ = Esfuerzo cortante

γ = Deformación de corte

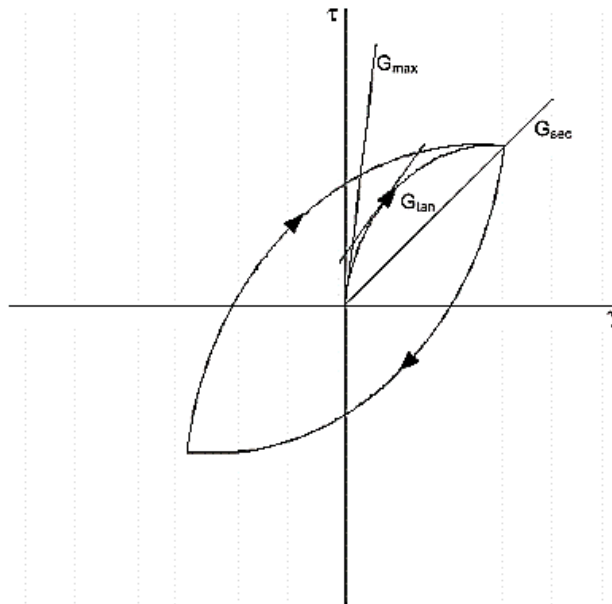
El comportamiento de la gráfica esfuerzo cortante Vs. Deformación de corte describe una trayectoria no lineal más conocida como el ciclo de histéresis esfuerzo-deformación. Se distingue el módulo de corte máximo G_{max} ó G_o como el valor de la pendiente de la recta tangente para deformaciones muy pequeñas y presenta valores altos del módulo de rigidez a cortante en el rango lineal-elástico, el módulo de corte tangente G_{tan} como el valor de la pendiente en un punto de la curva y el módulo de corte secante G_{sec} calculado como la pendiente de la recta secante a la curva⁷. Representado en la figura 6.

Generalmente se suele hacer la representación normalizada de reducción del módulo que está dada por la expresión:

$$G/G_{max} \quad \text{Ec. 2}$$

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad \text{Ec. 3}$$

Figura 6. Curva de histéresis deformación de corte γ -tensión de corte τ

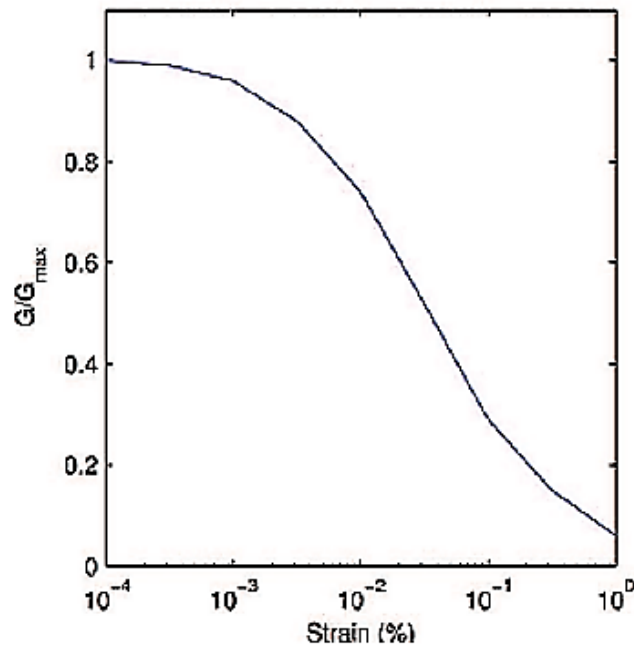


Fuente: RODRÍGUEZ, Montse. Caracterización de la respuesta sísmica de los suelos, aplicación a la ciudad de Barcelona. Curva de histéresis deformación de corte γ -tensión de corte τ .

⁷ RODRÍGUEZ, Montse. Caracterización de la respuesta sísmica de los suelos, aplicación a la ciudad de Barcelona. Universidad de Barcelona. Facultad de geología. 2005. Capítulo 2. p. 12.

En la figura 7, se observa la curva característica de degradación del módulo de corte G .

Figura 7. Curva de degradación del módulo



Fuente: GOMEZ, David. Caracterización sísmica de un emplazamiento. Universidad Politécnica de Madrid. Curva de degradación del módulo. 2015.

5.1.1.2. Amortiguamiento ξ

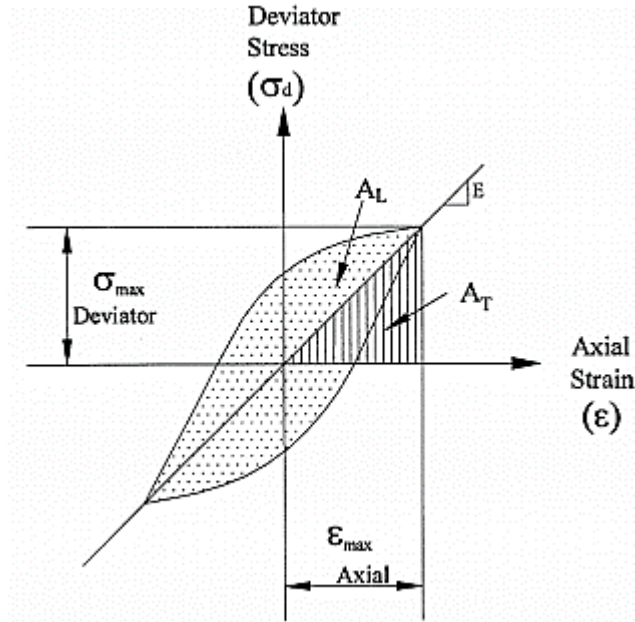
El amortiguamiento es la propiedad de disipación de energía del suelo debida a una perturbación del mismo. Depende de factores como la amplitud de la deformación del que es directamente proporcional y del tiempo.

Se distinguen varios tipos de amortiguamiento: amortiguamiento viscoso, por radiación, y amortiguamiento histerético⁸. El amortiguamiento viscoso se presenta en materiales en donde la energía disipada por cada ciclo de deformación incrementa en relación a la frecuencia. El amortiguamiento por radiación se da cuando la energía disipada es producida por la radiación en las estructuras. El amortiguamiento histerético supone que la energía disipada es independiente de la frecuencia.

⁸ BRAND, José. GONZÁLEZ, Rafael. ORTIZ, Hugo. Métodos de ensayo para la determinación de las principales propiedades dinámicas de los suelos del Salvador. Universidad del Salvador. 2009.

Desde la curva de histéresis esfuerzo- deformación representada en la figura 8, se puede definir el amortiguamiento como una medida de la pérdida de energía y se basa en una relación de áreas de la siguiente manera.

Figura 8. Amortiguamiento a partir del ciclo de histéresis esfuerzo-deformación



Fuente: Curva histerética de esfuerzo deformación para carga axial cíclica. ASTM D3999. Standard test methods for the determination of the modulus and damping properties of soils using the cyclic triaxial apparatus.

$$\xi = \frac{AL}{4*\pi*AT} \quad \text{Ec.4}$$

Donde,

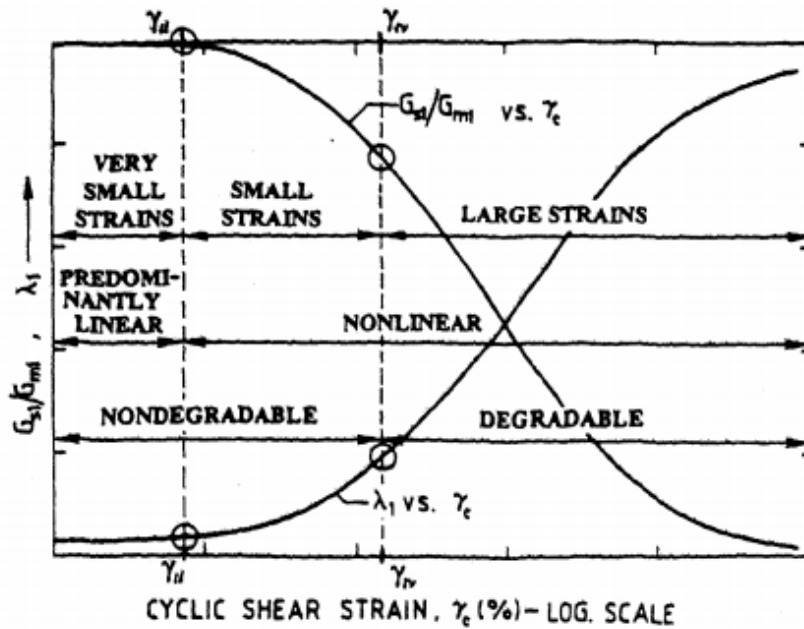
AL: área dentro de la curva

AT: área del triángulo

Tanto el módulo de corte normalizado como el amortiguamiento son los principales parámetros de respuesta cíclica. En el análisis de respuesta sísmica se suele

hacer la representación gráfica del módulo de corte normalizado⁹ G/G_{max} que depende de la amplitud de la deformación cíclica y la razón de amortiguamiento que también es afectado por el rango de deformación. En la figura 9, se puede evidenciar su relación, mientras que el módulo de corte G/G_{max} disminuye con el aumento del grado de deformación, para el caso del amortiguamiento, este aumenta a medida que crece la deformación.

Figura 9. Reducción del módulo secante y curva de amortiguamiento



Fuente: VUCETIC, M. Soil properties and seismic response. Secant modulus reduction and damping curves.

5.1.1.3. Módulo de Poisson dinámico del suelo ν_d

El coeficiente de Poisson es un parámetro dinámico de menor influencia, corresponde a la razón entre la elongación longitudinal y a la deformación transversal y se encuentra relacionado con el módulo de corte G y el módulo de elasticidad E_d mediante la siguiente ecuación.

⁹ VUCETIC, M. Soil properties and seismic response. University of California at Los Angeles. Earthquake Engineering. Tenth

$$\nu = 1 - \frac{E}{2G} \quad \text{Ec.5}$$

Los valores típicos de ν para arcillas, arenas y rocas se muestran en la tabla 2. En condiciones drenadas el valor típico de este parámetro es 0.3 y en condiciones no drenadas toma el valor de 0.5.

Tabla 2. Valores típicos relación de Poisson

Tipo de material	Ratio de Poisson ν
Arcilla	0.4-0.45
Arena	0.30-0.40
Roca	0.15-0.25

Fuente: RODRÍGUEZ, Montse. Caracterización de la respuesta sísmica de los suelos, aplicación a la ciudad de Barcelona. Ratio de Poisson ν asociado a diferentes tipo de material.

5.1.1.4. Módulo de elasticidad dinámico E_d

El módulo de elasticidad estático E_s es la relación entre el esfuerzo y la deformación debida a dicho esfuerzo y existe cuando el suelo se comporta de elásticamente. Para bajos rangos de deformación, los suelos presentan características lineales que se pueden apreciar en la gráfica esfuerzo-deformación. A partir de las velocidades de onda primaria y secundaria V_p Y V_s respectivamente, se pueden obtener el módulo de elasticidad dinámico E_d , que en todo caso, siempre será mayor a E_s , gracias al comportamiento lineal- elástico presente a bajas deformaciones.

5.1.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO

Entre los factores que afectan significativamente en el comportamiento dinámico de los suelos se encuentra la amplitud de las deformaciones γ , la presión de confinamiento σ_c , la relación de vacíos e , el grado de saturación S , como se presenta en la tabla 3, siendo los más relevantes para el módulo de corte en los suelos cohesivos.

Tabla 3. *Parámetros que afectan el módulo de rigidez y el amortiguamiento*

Parámetros	Importancia para el módulo de rigidez (G) ^(a)		Importancia para el amortiguamiento (ξ)	
	Arenas limpias	Suelos cohesivos	Arenas limpias	Suelos cohesivos
Amplitud de formación (γ).	M	M	M	M
Presión de confinamiento (σ_c).	M	M	M	M
Relación de vacíos (e).	M	M	M	M
Numero de ciclos de carga (N).	R ^(b)	R	M	M
Grado de saturación (S).	R	M	m	m
Parámetros de resistencia al corte.	m	m	m	m
Frecuencia de carga (arriba de 0.1 Hz).	R	R	R	R
Características granulares, tamaño, forma, mineralogía.	R	R	R	R
Estructura del suelo.	R	R	R	R
Cambio de volumen debido a la amplitud cortante.	D	R	D	D

Fuente: BRAND, José. GONZÁLEZ, Rafael. ORTIZ, Hugo. *Métodos de ensayo para la determinación de las principales propiedades dinámicas de los suelos del Salvador.*

M = muy importante **m** = menos importante
R = relativamente importante **D** = desconocido.

“En general se pueden agrupar los factores de la siguiente manera: asociados al tipo de suelo, el estado de esfuerzos y los asociados a las cargas aplicadas”¹⁰. Teniendo en cuenta las características de los suelos se destaca el índice de plasticidad, la densidad relativa, la relación de vacíos; los relacionados con el estado de esfuerzos el confinamiento σ'_c , el esfuerzo vertical efectivo σ'_v , el coeficiente de presión de tierras k_o ; con relación a las características de las cargas dinámicas está la amplitud, la frecuencia de aplicación y el número de ciclos.

5.1.2.1. Efecto de la amplitud de deformación

Como se observa en las gráficas anteriormente mostradas, el módulo de corte G se reduce significativamente con el incremento de la deformación de corte γ .

La aceleración de las ondas generadas por los sismos se relaciona con la amplitud de las cargas dinámicas en los suelos, específicamente la aceleración pico ocasionada por el evento telúrico.

En investigaciones realizadas por Seed¹¹ para evaluar la resistencia por licuación, se da una aproximación para hallar la amplitud de la carga relacionando el esfuerzo vertical efectivo y el esfuerzo cortante cíclico como la relación de esfuerzo cortante cíclico CSR .

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_v} = 0,65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) rd \quad \text{Ec. 6}$$

Donde,

a_{max} = Corresponde a la aceleración pico horizontal en la superficie del terreno.

g = La aceleración de la gravedad.

τ_{av} = El esfuerzo cortante.

σ_v = Esfuerzo vertical total.

σ'_v = Esfuerzo vertical efectivo.

rd = Coeficiente de reducción del esfuerzo por flexibilidad del suelo.

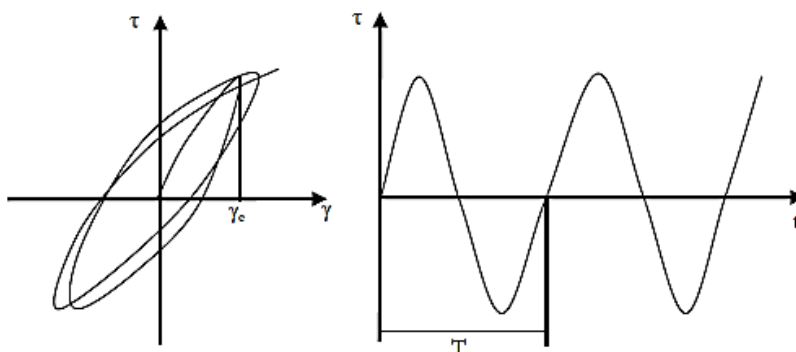
¹⁰ DIAZ, J. Modelo de comportamiento dinámico de arcillas blandas. Universidad Nacional de Colombia. 2007. p. 5.

¹¹ SEED, H. and IDRISS, I. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses. University of California. Berkeley. 1970.

5.1.2.2. Frecuencia de la aplicación de la carga

La frecuencia se define como el tiempo que toma la aplicación de un ciclo de carga, descarga y recarga, ver figura 10. En la tabla 4, se muestra los valores de frecuencias típicas relacionados para ensayos triaxiales.

Figura 10. Ciclos característicos de acciones dinámicas



Fuente: DIAZ, F. Modelo de comportamiento dinámico de arcillas blandas. Ciclos característicos de acciones dinámicas.

La velocidad de deformación cortante de la carga es función de la frecuencia y el nivel de deformación, definido en la siguiente expresión:

$$v_Y = \frac{\gamma_c}{\frac{T}{4}} = 4\gamma_c f \quad \text{Ec. 7}$$

Donde,

v_Y = Nivel de deformación cortante máximo.

T = Ciclo.

f = Frecuencia.

Tabla 4. Frecuencias típicas para ensayos triaxiales cíclicos

Loading type	Typical test frequency
Wave action	0.1 Hz
Wind action	0.1 - 1 Hz
Earthquake	1 Hz
Rail transit	> 1 Hz
Vibrating machinery	≤ 20 Hz

Fuente: GDS INSTRUMENTS. Advanced Dynamic Triaxial Testing System. World leaders in the manufacture of laboratory systems for soil & rock. Technical Specification. p. 3.

5.1.2.3. Número de ciclos

Se habla del número de ciclos de aplicación de la carga, al número de veces por carga y descarga, ver tabla 5. Este número de ciclos se refleja en el exceso de presión de poros y pérdida de la rigidez debida al cambio del esfuerzo efectivo¹².

Tabla 5. Número de ciclos equivalentes según la magnitud del sismo

Magnitud del sismo	Número de ciclos equivalente
7	10
7.5	20
8	30

Fuente. DIAZ, J. Modelo de comportamiento dinámico de arcillas blandas. Número de ciclos equivalentes según la magnitud del sismo.

5.1.2.4. Solicitación dinámica

Las cargas dinámicas en los suelos están asociadas al tiempo de aplicación, estas generan procesos de recuperación del suelo por vibración, y dependen de distintas fuentes.

Se puede hablar de solicitaciones establecidas, donde se tiene conocimiento de la amplitud y la frecuencia además de ser constantes durante su aplicación. Son generadas principalmente por máquinas vibratorias, máquinas de impacto, turbinas. Las solicitaciones accidentales son generadas por vientos, explosiones y sismos. Para nuestro caso de estudio se considera una solicitud dinámica producida por un sismo.

“Los sismos son la principal causa de generación de esfuerzos dinámicos en una estructura y en el suelo en general, por tanto constituyen una de las amenazas más grandes. Las cargas sísmicas son cargas inerciales causadas por movimientos sísmicos, estas pueden ser calculadas teniendo en cuenta las características dinámicas del terreno, de la estructura

¹² DIAZ, J. Modelo de comportamiento dinámico de arcillas blandas. Universidad Nacional de Colombia. 2007. p. 16.

(amortiguamiento masa y rigidez), y las aceleraciones esperadas. Los sismos producen cargas sobre una estructura por medio de la interacción del movimiento del suelo y las características de respuesta de la estructura. Esas cargas resultan de la distorsión en la estructura causada por el movimiento del suelo y la resistencia lateral de ésta. Sus magnitudes dependen de la velocidad y tipo de aceleraciones del suelo, así como de la masa y rigidez de la estructura.”¹³

5.1.2.5. Fuente sismogénica

Para el correcto análisis de la información es importante tener en cuenta el tipo de fuente sismogénica se va a considerar en la aplicación de la carga causada por el sismo de estudio.

5.1.2.5.1. Fuente lejana: entendiéndose como sismos que se generan en las zonas de subducción, con profundidades focales aproximadas a los 60 km, distancias desde el epicentro de entre 400 km a 450 km. los sismos de fuente lejana son relevantes cuando presentan una magnitud superior a 8,0.

5.1.2.5.2. Fuente intermedia: En este tipo de fuentes se generan sismos con una distancia desde el epicentro cercana a los 60 km. No obstante la fuente regional se refiere a sismos superficiales y de baja magnitud, para el caso de Bogotá, estos sismos pueden dar lugar a aceleraciones máximas en el rango de 0,1g a 0,2g.

5.1.2.5.3. Fuente cercana: De acuerdo con la estructura geológica de Bogotá, en la cual no se presentan fallas que permitan sismos con una magnitud superior a 6,0 y teniendo en cuenta que se trata de sismos originados en el nivel superficial (0 a 20 km), los eventos de la fuente cercana se caracterizan por ser de baja magnitud y presentar una rápida atenuación del movimiento. Sin embargo, a nivel local este tipo de sismos pueden llegar a producir niveles de aceleración superiores a 0,2g.

¹³ BRAND, José. GONZÁLEZ, Rafael. ORTIZ, Hugo. Métodos de ensayo para la determinación de las principales propiedades dinámicas de los suelos del Salvador. Universidad del Salvador.2009.

5.1.2.6. Efecto de la relación de vacíos

En la Figura 3, se muestra la variación del módulo cortante contra la deformación cortante para diferentes relaciones de vacíos e , donde la disminución de la relación de vacíos aumenta la relación del módulo cortante G .

5.1.2.7. Efecto del nivel de confinamiento

Evaluar correctamente el nivel de confinamiento es importante en el estudio de los parámetros dinámicos.

El esfuerzo efectivo vertical σ'_v es dado por

$$\sigma'_v = \rho z \quad \text{Ec. 8}$$

Donde,

ρ = Peso específico del suelo

z = Profundidad

El esfuerzo vertical efectivo σ'_v aumenta con la profundidad, tal aumento provoca incremento en el nivel de confinamiento del suelo, comportándose como un material rígido.

5.1.2.8. Efecto de la relación de sobreconsolidación OCR

Vucetic en la Figura 1 muestra que para relaciones de sobreconsolidación del suelo $OCR > 1$, es decir, suelos sobreconsolidados y con alto índice de plasticidad, la relación del módulo es mayor. Por ente suelos más rígidos. Para $OCR = 1$ ó suelos normalmente consolidados G_o tiende a ser constante.

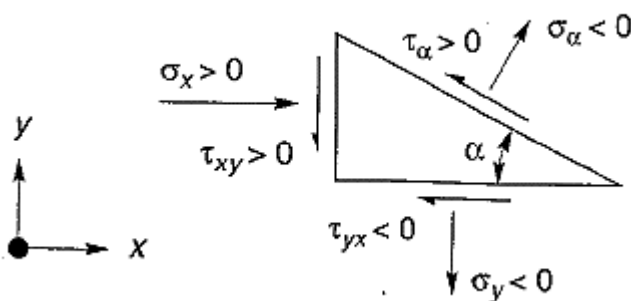
5.1.2.9. Efecto del índice de plasticidad

La Figura 1 se muestra que la variación del índice de plasticidad afecta directamente la relación del módulo cortante G , de este modo, al presentarse un aumento del índice de plasticidad la curva de degradación del módulo se encuentra más hacia la derecha que curvas con menor índice de plasticidad. Por tanto, un alto IP se traduce en que la curva de degradación de G tendrá menor reducción, por consiguiente serán suelos más rígidos con respecto a los suelos con bajos IP.

5.1.3. TRAYECTORIA DE ESFUERZOS

El comportamiento de dinámico de los suelos está ligado al estado de esfuerzos iniciales, las condiciones de esfuerzo en cualquier punto de la masa de suelo son descritos por el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante que actúa en un plano que pasa por dicho punto. En la figura 11, se representa la convención de los esfuerzos normales $\sigma_x - \sigma_y$ y esfuerzos de corte $\tau_{xy} - \tau_{yx}$ actuantes en los planos normales x, y ; y los esfuerzos σ_α y τ_α con relación a un plano inclinado.

Figura 11. Convención de signos para esfuerzos normales σ y de corte τ

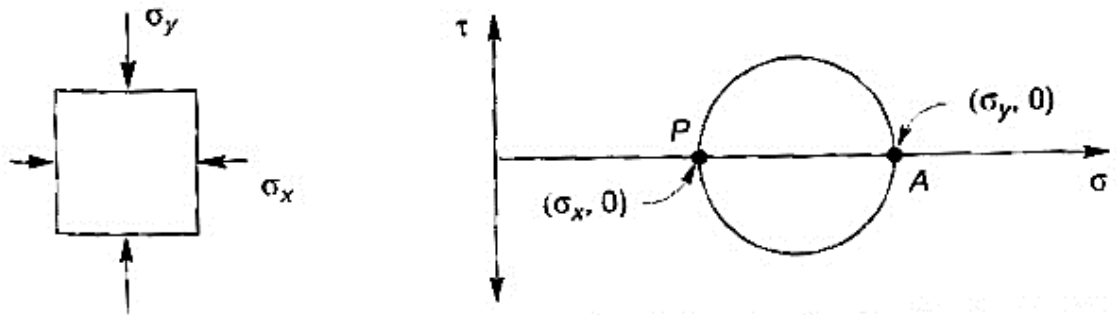


Fuente: KRAMER. S. *Geotechnical Earthquake Engineering*. University of Washington. *Dynamic Soil Properties*. p. 185.

Para determinar los esfuerzos en los planos gráficamente, se usa polo P el círculo de esfuerzos de Mohr, donde el polo P representa τ y σ en un plano paralelo. Considerando el esfuerzo principal mayor σ_y , el esfuerzo principal menor σ_x ,

donde los esfuerzos cortantes con cero. Se conocen las condiciones de esfuerzo en el plano horizontal $\sigma = \sigma_y$, $\tau = 0$ para el punto A. al intersecto con el circulo de Mohr y la horizontal se le conoce como el polo P, como se muestra en la figura 12.

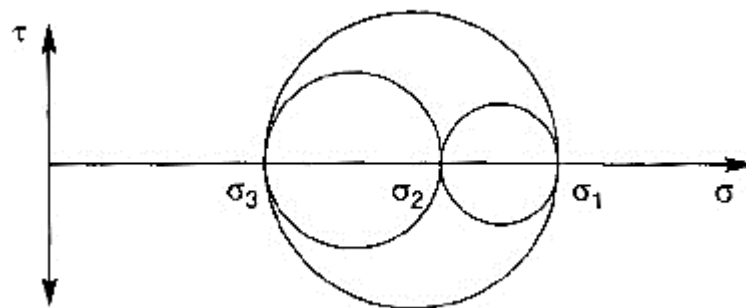
Figura 12. Círculo de esfuerzos de Mohr para un elemento sometido a esfuerzo principal mayor y esfuerzo principal menor



Fuente: KRAMER. S. Geotechnical Earthquake Engineering. University of Washington. Dynamic Soil Properties. p. 186.

Los puntos de la circunferencia de Mohr que cortan los ejes de esfuerzos normales y donde no existen esfuerzos de corte se denominan planos principales de esfuerzo y las tensiones asociadas a estos, esfuerzos principales. Representados en la figura 13, en donde σ_1 es el esfuerzo principal mayor, σ_3 el esfuerzo principal menor y σ_2 como un esfuerzo que toma cualquier valor entre σ_1 y σ_3 .

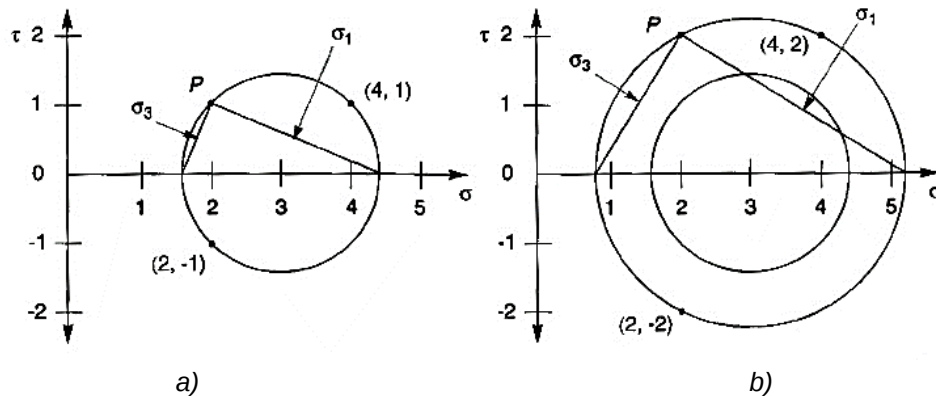
Figura 13. Círculos de esfuerzos de Mohr incluyendo la tensión principal intermedia, σ_2



Fuente: KRAMER. S. Geotechnical Earthquake Engineering. University of Washington. Dynamic Soil Properties. p. 187.

El polo puede usarse para determinar la orientación de los planos principales de esfuerzo. En la figura 14a, se muestra que el esfuerzo principal mayor y el esfuerzo principal menor actúan perpendicularmente entre sí, debido a que las líneas que unen a σ_1 y σ_3 forman un ángulo de 90° . En la figura 14b se representa el estado de esfuerzos para un incremento de $\tau = 1$ a $\tau = 2$ manteniendo constante σ_y y σ_x viendo que el incremento del esfuerzo cortante τ se acompaña de la rotación de los ejes principales.

Figura 14. Orientación de los ejes de esfuerzo principales para a) $\tau = 1$ y b) $\tau = 2$



Fuente: KRAMER. S. *Geotechnical Earthquake Engineering*. University of Washington. *Dynamic Soil Properties*. p. 187.

En ensayos de compresión triaxial las fuerzas actuantes sobre la probeta de ensayo se pueden definir en dos componentes; como la presión isotrópica que es la medida de los esfuerzos principales efectivos $\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$ y teniendo en cuenta que los esfuerzos $\sigma'_2 = \sigma'_3$ se tiene:

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \quad \text{Ec. 9}$$

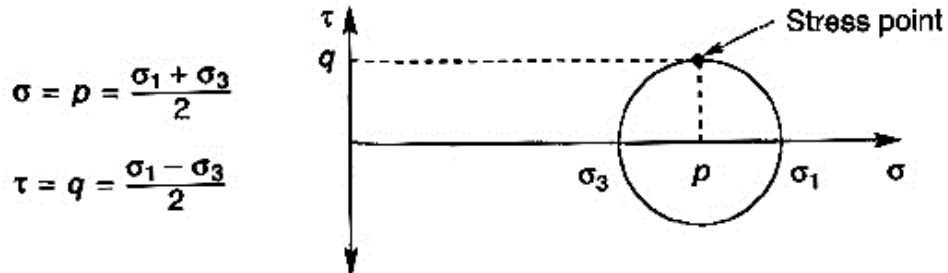
Y el esfuerzo desviador σ_d definido como:

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad \text{Ec. 10}$$

La variación de las condiciones de esfuerzos puede seguir trazando el círculo de Mohr en varias etapas de carga, pero es mucho más sencillo observar la variación del estado de esfuerzos por la variación de un solo punto en el círculo de Mohr, el punto superior del círculo mostrado en la figura 15, la ruta tomada por el punto durante la aplicación de las cargas se llama trayectoria de esfuerzo, hay muchas propiedades del suelo que dependen de esta trayectoria y es una herramienta muy

útil en ingeniería geotécnica y se puede definir gráficamente de acuerdo a la trayectoria de esfuerzos p y q .

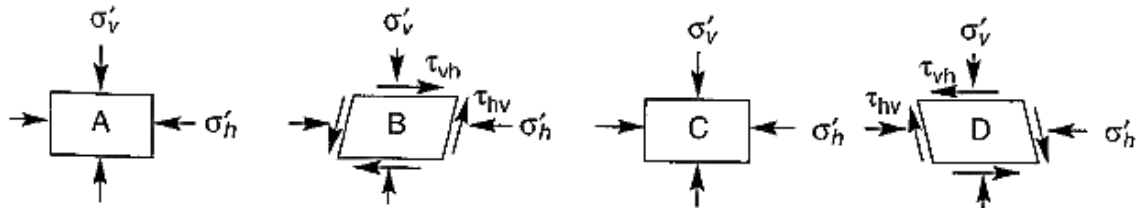
Figura 15. Ubicación y definición del punto en que se basa trayectoria de esfuerzos



Fuente: KRAMER. S. *Geotechnical Earthquake Engineering*. University of Washington. *Dynamic Soil Properties*. p. 188

En realidad las condiciones de carga implican cambios en los esfuerzos horizontales y verticales, en la Figura 16, se representa una sección de suelo sometido verticalmente a la propagación de ondas de corte s , en donde, en la etapa A el elemento se encuentra en condiciones de reposo (figura 17), la onda de corte producirá tensiones tangenciales en los planos horizontales y verticales.

Figura 16. Condiciones de esfuerzo impuestas en elementos de suelo por debajo del nivel de la superficie del terreno por ondas que se propagan verticalmente al cizallamiento en escenarios diferentes

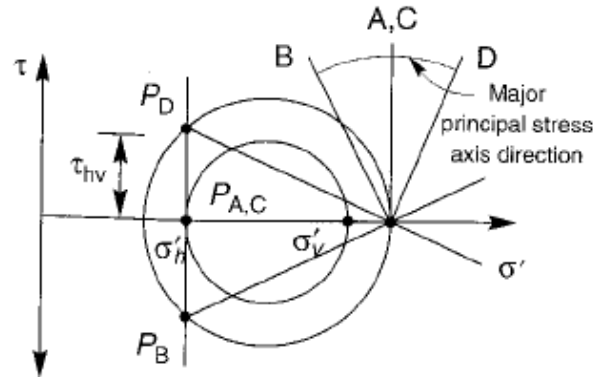


Fuente: KRAMER. S. *Geotechnical Earthquake Engineering*. University of Washington. *Dynamic Soil Properties*. p. 190.

En la Figura 18, se muestra su respectiva trayectoria de esfuerzos para este punto. Teniendo en cuenta que la tensión principal mayor es vertical, el polo del círculo de Mohr está en el punto $\sigma'_h, 0$. La distorsión del elemento que produce esfuerzos tangenciales en los planos horizontales y verticales se muestra en la etapa B de la Figura 16, en donde los esfuerzos verticales y horizontales permanecen constantes y aumentan los esfuerzos de corte en el elemento. La trayectoria de esfuerzos se desplaza verticalmente, al igual que la posición del

polo (figura 17), lo que muestra que los ejes de esfuerzos principales giran desde sus posiciones verticales y horizontales iniciales.

Figura 17. Círculos de Mohr, ubicación de polos y orientaciones de ejes de esfuerzos principales



Fuente: KRAMER. S. *Geotechnical Earthquake Engineering. University of Washington. Dynamic Soil Properties.* p. 190.

Gracias a que los esfuerzos cortantes horizontales son de naturaleza cíclica, y las condiciones de esfuerzo son muy parecidos en la etapa A, la dirección cambiará $\tau_{hv} = \tau_{vh}$ en la etapa C, figura 16. En la etapa D, los esfuerzos de corte actúan en la dirección opuesta y los ejes principales de esfuerzo giran en la dirección opuesta como en la etapa B. De esta forma la carga inducida por ondas de corte s que se propagan verticalmente en el suelo puede ser descrita por la trayectoria de esfuerzos¹⁴.

¹⁴ KRAMER. S. *Geotechnical Earthquake Engineering. University of Washington. Representation of stress conditions by the Mohr circle.* 1996. p. 184-190.

5.1.4. NORMALIZACIÓN DE CURVAS

En la caracterización dinámica de los suelos, los métodos de ensayo están orientados al rango de deformaciones, en la tabla 1, se hace una descripción de los rangos y las características de las sollicitaciones y las pruebas dinámicas para cada nivel de deformación.

Los términos que se definen para el modelo tipo Masing son:

$$G = (G_{\text{mín}} - G_{\text{máx}}) * H(\gamma) G_{\text{máx}} \quad \text{Ec. 11}$$

$$\lambda = (\lambda_{\text{máx}} - \lambda_{\text{mín}}) * H(\gamma) + \lambda_{\text{mín}} \quad \text{Ec.12}$$

$$H(\gamma) = \left(\frac{\left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^{2B}}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^{2B}} \right)^A \quad \text{Ec. 13}$$

Con el fin de obtener de la curva de degradación del módulo de corte y la relación de amortiguamiento de las muestras arcillosas estudiadas, se realizan pruebas triaxiales cíclicas bajo condiciones controladas de carga para un rango de alta deformación angular (elasto-plástico) $\gamma = 10^{-2} - 5$; ensayos de elementos Bender para niveles de deformación angular bajas (elástico) en el orden de $\gamma = 10^{-4} - 10^{-2}$, finalmente, para facilitar los análisis, se complementa con el uso de curvas teóricas para todo el rango de deformaciones.

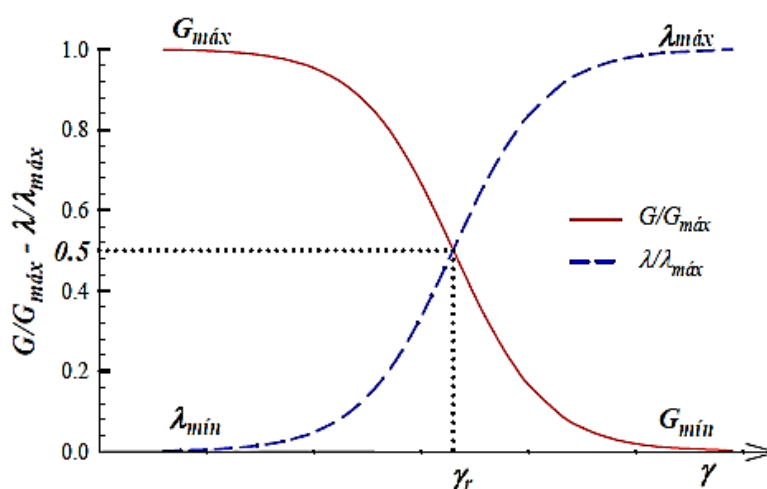
Se considera la Regla Masing como ley constitutiva en la modelación de las propiedades no lineales $G - \gamma$ y $\lambda - \gamma$ de los suelos, a la que se le relacionan las siguientes hipótesis:

- El material sometido a carga armónica con amplitud constante responde de manera estable, si el amortiguamiento histerético es suficiente para atenuar en pocos ciclos la parte transitoria.
- La no linealidad del material es de naturaleza plástica, es decir, la rigidez del suelo regresa a su valor máximo cada vez que la carga cambia de sentido.

- El amortiguamiento es de tipo histerético¹⁵.

En la figura 18, se evalúan valores de módulo de corte G y deformación angular γ , donde, para el rango elástico se tiene un módulo de rigidez máximo $G_{m\acute{a}x}$ y una relación de amortiguamiento mínima $\lambda_{m\acute{i}n}$; por el contrario, para condiciones elasto-plásticas se asume un módulo de rigidez mínimo $G_{m\acute{i}n}$ y una relación de amortiguamiento máximo $\lambda_{m\acute{a}x}$. Adicionalmente del gráfico se obtiene el valor de G al 50% de degradación importante en el cálculo del parámetro A .

Figura 18. Parámetros modelo tipo Masing

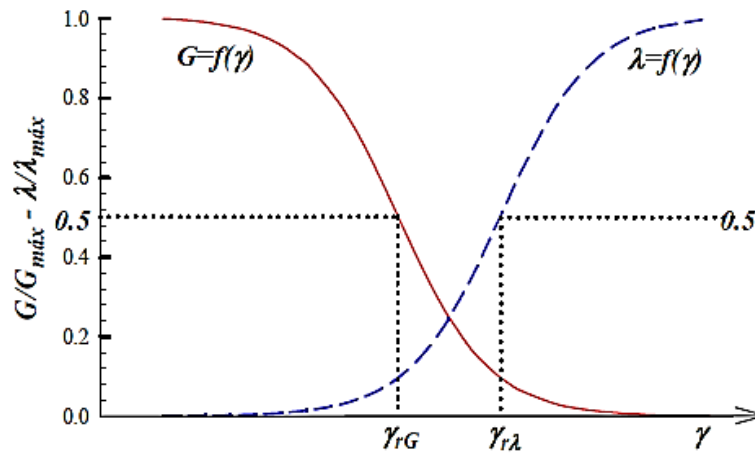


Fuente: GONZÁLEZ, Claudia et al. Estimación de Propiedades Dinámicas de Arcillas. p. 3.

En el análisis dinámico del modelo tipo Masing hay dos parámetros, A y B , que definen la geometría de las curvas $G - \gamma$ y $\lambda - \gamma$. A , toma un valor igual a 1 para G_{50} y la deformación de referencia γ_r (es el valor de la deformación correspondiente al punto de inflexión de la curva), ver figura 19, el cual es diferente para $G - \gamma$ tanto para $\lambda - \gamma$, obteniendo mayor deformación angular para la relación de amortiguamiento $\gamma_{r\lambda}$; B es un parámetro que depende del índice de plasticidad IP y puede tomar cualquier valor.

¹⁵ GONZÁLEZ, Claudia. et al. Estimación de Propiedades Dinámicas de Arcillas. Revista de Ingeniería Sísmica No. 84 1-23 (2011).

Figura 19. Puntos de inflexión de las relaciones $G-\gamma$ y $\lambda-\gamma$



Fuente: GONZÁLEZ, Claudia et al. Estimación de Propiedades Dinámicas de Arcillas. p. 7.

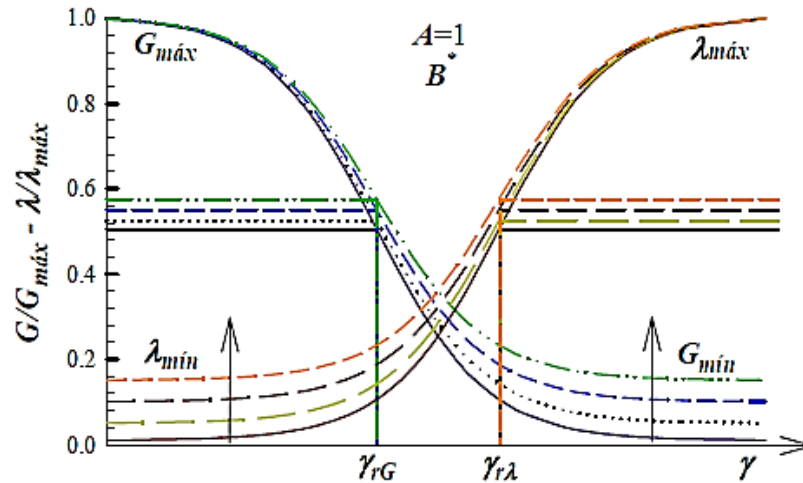
Los valores de módulo de rigidez G y amortiguamiento λ son definidos experimentalmente mediante ensayos de laboratorio, por tanto son representativos únicamente para el suelo de estudio y bajo las condiciones establecidas de reproducibilidad de especímenes. Investigaciones experimentales atribuyen al esfuerzo efectivo de confinamiento y al índice de plasticidad el comportamiento del módulo de corte máximo¹⁶ $G_{m\acute{a}x}$. El modelo Masing tiene como base la función normalizada:

$$G/G_{m\acute{a}x} = f(\gamma) \quad \text{Ec. 11}$$

La variación de los valores mínimos de G y λ , en resultados teóricos, figura 20, muestra el cambio de valores mínimos para módulo de corte y amortiguamiento según la variación el parámetro B con su respectiva deformación de referencia.

¹⁶ ROMO, M and OVANDO, S. Modelling the Dynamic Behavior of Mexican Clays. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering. 1996.

Figura 20. Variación de los valores mínimos de G y λ , en resultados teóricos



Fuente: GONZÁLEZ, Claudia et al. Estimación de Propiedades Dinámicas de Arcillas. p 8.

5.1.4.1. CURVAS DE DEGRADACION TEÓRICAS DE VUCETIC AND DOBRY

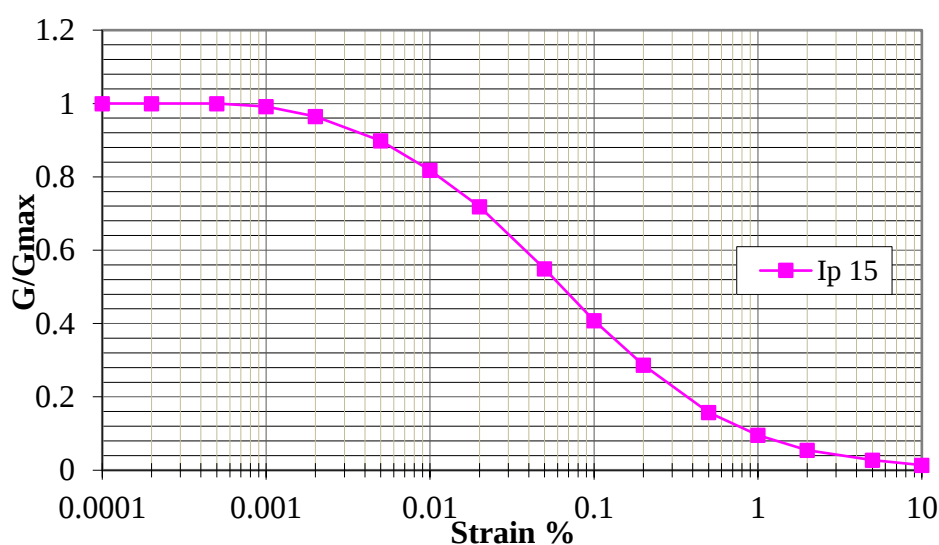
Para el análisis de las propiedades dinámicas de las muestras reconstituidas se emplean las curvas de reducción normalizadas del módulo de corte y la razón de amortiguamiento definidas por Vucetic¹⁷ en función del índice de plasticidad. Para simplificar el análisis del comportamiento del suelo se realiza la normalización del módulo de corte, este se halla con la relación el módulo de corte secante G_{sec} y el módulo de corte máximo $G_{máx}$ en función de la deformación cortante γ_c . En la gráfica 1, se muestra la curva de reducción del módulo de corte para arcillas con un índice de plasticidad $IP = 15$.

El límite entre las pequeñas y las medianas deformaciones fue definido por Vucetic, como la deformación cortante arriba de la cual la microestructura del suelo es irreversiblemente alterada por corte cíclico. Esto se puede explicar por la aparición de cambios irreversibles en la presión de poros o en el volumen del suelo, y es conocido como el umbral volumétrico de deformación cortante γ_t^v .

¹⁷ VUCETIC, Op, cit., p. 89-107.

Vucetic y Dobry [16], presentan una serie de curvas en las que se identifica la localización aproximada donde este umbral tiene lugar en las curvas de degradación del módulo. Con base en estos estudios la deformación media corresponde a valores entre 10^{-5} y 10^{-1} , dentro de este rango, el suelo tiene un comportamiento elasto-plástico, dando como consecuencia que existan deformaciones no recuperables en el suelo¹⁸.

Gráfica 1. Curva de degradación del módulo de corte

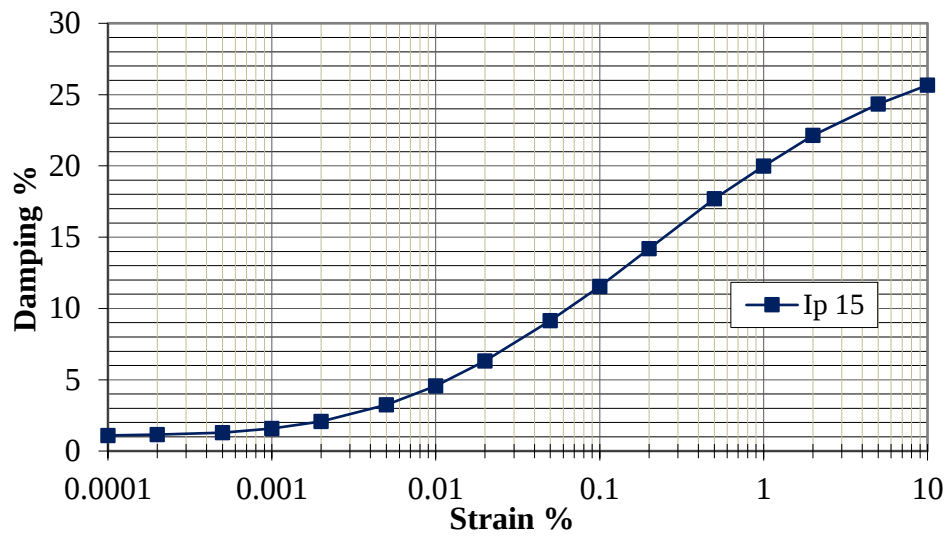


Fuente: Vucetic and Dobry Curves

En la gráfica 2, se muestra la curva de reducción del amortiguamiento para arcillas con un índice de plasticidad $IP = 15$.

¹⁸ ORTIZ, María. et al. Modelo unificado de curvas de degradación del módulo cortante en arenas del río Guayuriba. Universidad Nacional de Colombia. 2013. DYN. 81. p. 77-84.

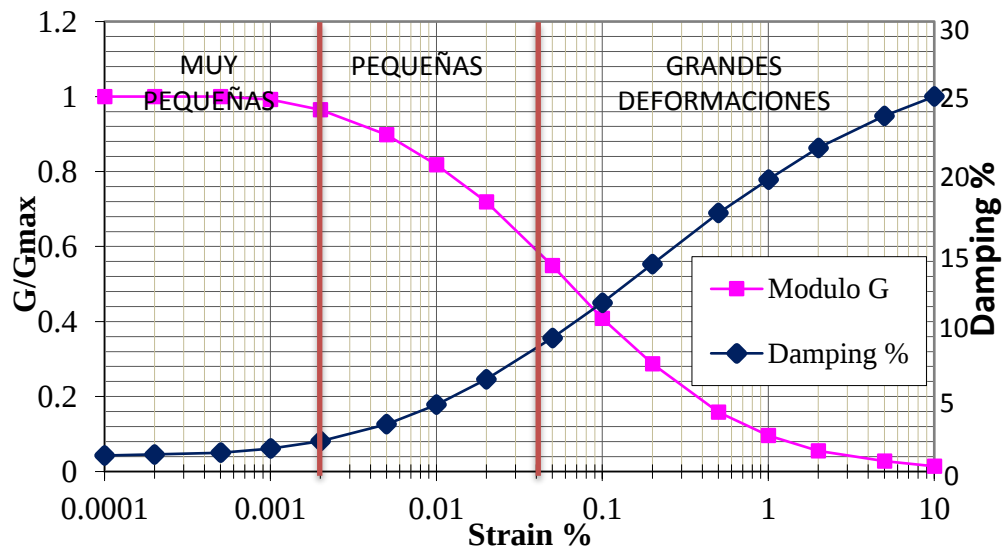
Gráfica 2. Curva de degradación teórica de amortiguamiento



Fuente: Vucetic and Dobry Curves

En la gráfica 3, se muestra la relación de corte y amortiguamiento normalizado para arcillas con un índice de plasticidad $IP = 15$.

Gráfica 3. Curvas de reducción de módulo de corte y amortiguamiento



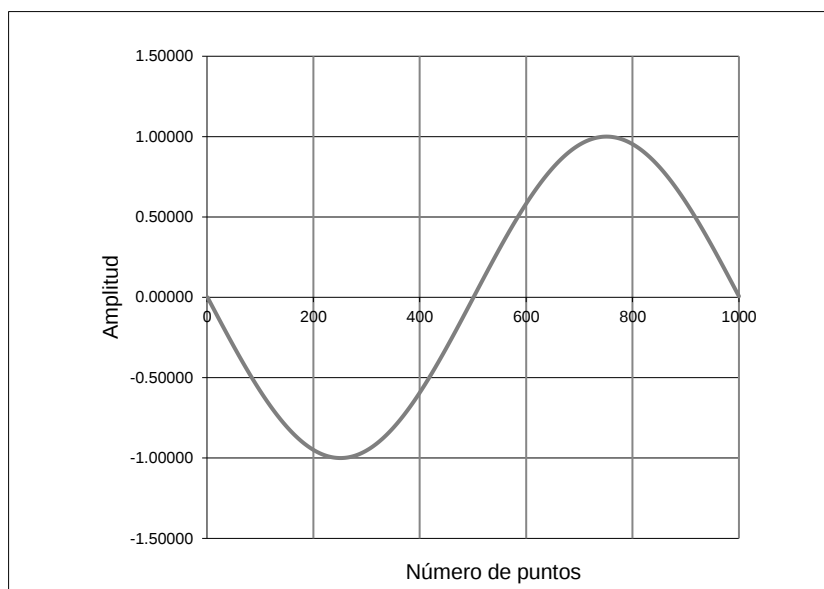
Fuente: Vucetic and Dobry Curves

5.1.5. ONDAS SINUSOIDALES

Usualmente las ondas sinusoidales se encuentran predefinidas en los equipos electrónicos y se usan para describir una aproximación al comportamiento de una onda periódica, este patrón o señal modela el comportamiento de varios fenómenos físicos en la naturaleza como las olas del mar, el sonido u ondas de propagación suaves.

Las señales sinusoidales son muy útiles en el análisis e identificación de sistemas en ingeniería, son muy importantes por la simplicidad y riqueza de la información e interacción física con los sistemas; está definida por funciones trigonométricas (seno), además de ser señales inherentemente periódicas¹⁹, ver gráfica 4.

Gráfica 4. Sine wave- GDS waveform file



Fuente: GDS INSTRUMENTS. Sine waveform.

¹⁹ TORRES, M. Utilización de los métodos no destructivos -MND- para determinar propiedades físico-mecánicas en rocas sedimentarias. Bogotá, 2005. Trabajo de grado (M.I.G.). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ingeniería civil. p 25.

5.1.6. REGISTRO SISMOLÓGICO MESA DE LOS SANTOS 10 DE MARZO DE 2015

Los datos del sismo tomado para el desarrollo del presente trabajo fueron suministrados por, en la tabla 6, se da una descripción del registro sismogénico.

SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO- RED NACIONAL DE ACELEROGRAFOS DE COLOMBIA²⁰

SISMO MESA DE LOS SANTOS SANTANDER

Tabla 6. Datos sismo Mesa de los Santos Santander (10/03/15)

FECHA	2015/03/10 20:55:44
MW	6.3
LATITUD DEL EVENTO (Grados)	6.83
LONGITUD DEL EVENTO (Grados)	-73.136
PROFUNDIDAD DEL EVENTO (km)	160
CÓDIGO DE LA ESTACIÓN	CBOG1
ESTACIÓN	Servicio Geológico Colombiano (SGC), Bogotá
GEOLOGÍA	Suelo
TOPOGRAFÍA	Plana
LATITUD DE LA ESTACIÓN (Grados)	4,641
LONGITUD DE LA ESTACIÓN (Grados)	-74,080
DISTANCIA EPICENTRAL (km)	264,61
DISTANCIA HIPOCENTRAL (km)	309.222
INTERVALO DE MUESTREO (Segundos)	0.005
NÚMERO DE DATOS	37485
DURACION (Segundos)	87,425
UNIDADES	cm/s ²
TIPO DE EQUIPO	ETNA
ESCALA MAXIMA (G)	2
CORRECCION DE LINEA BASE	LINEA BASE NO REMOVIDA
TIPO DE DATOS	NO CORREGIDO

Fuente: RED NACIONAL DE ACELERÓGRAFOS. Consulta general. 20150310205544. Santander/lossantos. Tomado el 15 de abril de 2016. [En línea]. <http://goo.gl/TPNxaj>.

²⁰ Red Nacional De Acelerógrafos. Consulta general. 20150310205544. Santander/lossantos. Tomado el 15 de abril de 2016. [En línea]. <http://goo.gl/TPNxaj>.

En la imagen 1 se muestra el mapa de intensidades reportadas en la región nacional a consecuencia del sismo presentado en el municipio de Mesa de los Santos.

Imagen 1. Mapa de intensidades sismo Mesa de los Santos, Santander



Fuente: RED NACIONAL DE ACELERÓGRAFOS. Mapa de evaluación de intensidades. Sismo Mesa de los Santos, Santander. Tomado el 15 de abril de 2016. [En línea]. <http://goo.gl/dlhwr>.

Imagen 2. Convenciones mapa de intensidades sismo Mesa de los Santos, Santander. (EMS-98)



Fuente: RED NACIONAL DE ACELERÓGRAFOS. Mapa de evaluación de intensidades. Sismo Mesa de los Santos, Santander. Tomado el 15 de abril de 2016. [En línea]. <http://goo.gl/dlhwzr>.

La anterior, como medida cualitativa de los efectos causados por el evento sísmico evaluada con referencia a en la Escala Macrosísmica Europea (ESM-98), donde se evalúan los efectos en las personas, efectos en objetos o en la naturaleza como lo son los daños en el suelo y daños a edificios. Por lo anterior, la Unidad Nacional para la Gestión del riesgo de Desastres (UNGRD), en su reporte de afectación nacional por sismo, informó que se reportaron alertas en los departamentos de Norte de Santander, Antioquia, Boyacá, Casanare, Tolima, Cundinamarca, Valle del cauca y Risaralda por afectaciones en viviendas, edificios, iglesias, vías, deslizamientos de tierras. Específicamente Bogotá tuvo afectaciones de cerca de seis edificios en las localidades de Suba, Engativá y en el Aeropuerto Internacional el Dorado²¹.

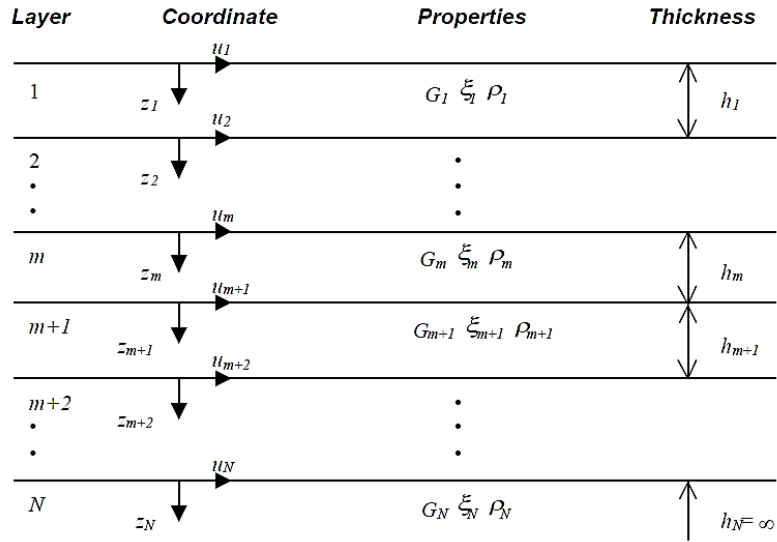
5.1.7. HOJA DE CÁLCULO EERA

EERA (Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits), es una hoja de cálculo de Excel diseñada para evaluar la respuesta de sitio ante la acción de un sismo en suelos estratificados y caracterizados litológicamente, en el que se aplican métodos numéricos en un modelo unidimensional en el dominio de la frecuencia y para un comportamiento lineal-equivalente que representa la respuesta de tensión-deformación del suelo en base al modelo Kelvin-Voigt

²¹ [Citado el 03 de septiembre de 2016]. Disponible en < <http://goo.gl/zU5mQr>>.

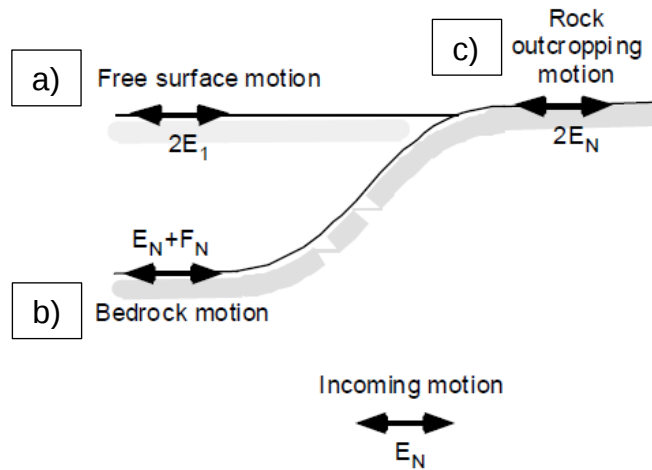
En la figura 21, se muestra los supuestos para un análisis de respuesta lineal-equivalente en una dimensión, en donde, la onda de corte V_s se propaga verticalmente en un sistema estratificado.

Figura 21. Sistema de depósito de suelo en capas unidimensional - EERA



Fuente: UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA. Department of civil Engineering. Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses. Manual. p. 7.

Figura 22. Terminología usada en el análisis de respuesta de sitio - EERA



Fuente: UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA. Department of civil Engineering. Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses. Manual. p. 9.

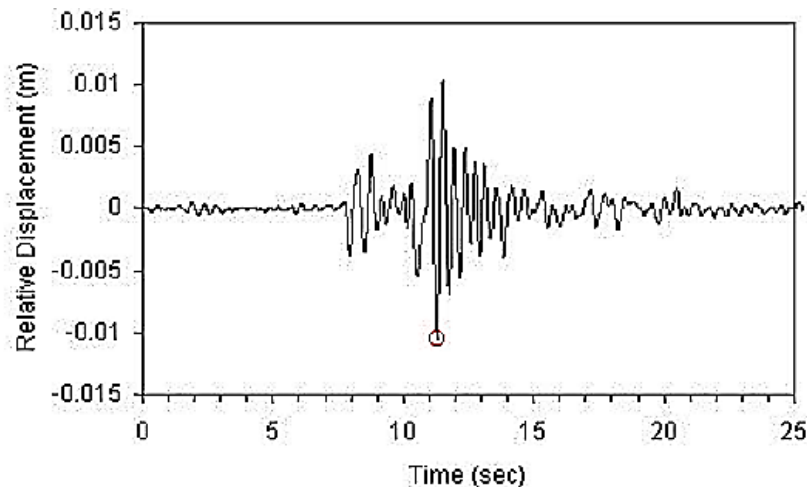
Se definen términos en el análisis de respuesta de sitio, figura 22, a) El movimiento de la superficie libre es el movimiento en la superficie de un

depósito de suelo; b) El movimiento de la roca madre es el movimiento en la base del depósito de suelo; c) El movimiento afloramiento de roca es el movimiento en un lugar donde la roca madre está expuesta en la planta de la superficie, esto en el rango del dominio de la frecuencia.

Dentro de los resultados que brinda esta hoja de cálculo se encuentra la variación del módulo de corte G , peso específico de los suelos G_s , velocidad de ondas de corte V_s con relación a la profundidad z , también, se puede obtener diagramas de aceleración, velocidad y desplazamiento relativo, en figura 23, respecto a un estrato o profundidad. Además de dar información del contenido frecuencial del suelo asociando amplitudes en el espectro de Fourier²².

Los resultados extraídos del programa son los correspondientes al desplazamiento relativo respecto a la profundidad teórica relacionada con el peso unitario de las muestras sometidas a ensayos de laboratorio.

Figura 23. Desplazamiento relativo Vs. Tiempo – EERA



Fuente: UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA. Department of civil Engineering. Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses. Manual. p. 33.

²² UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA. Department of civil Engineering. Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses. Manual.

5.1.8. TRIAXIAL DINÁMICO

El procedimiento de ensayo empleado para la determinación de las propiedades dinámicas, módulo de corte y amortiguamiento en el equipo triaxial es el descrito en la norma ASTM D3999-11²³, método A, donde se requiere la aplicación de carga controlada.

El procedimiento viene dado por las siguientes etapas:

- Saturación: el objetivo de este paso es llenar los vacíos que tiene la muestra con agua, de modo que se elimine el aire del espécimen, pero no se debe permitir que la muestra sufra cambios volumétricos como consecuencia de la saturación. La saturación se logra por la aplicación del esfuerzo de contrapresión, permitiendo que el agua inunde y desaloje el aire de la muestra.
Se debe chequear el grado de saturación mediante el parámetro B de Skempton, dada por la siguiente ecuación:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

Δu = Delta de presión de poros

$\Delta \sigma_3$ = Delta de presión de cámara

Si B se encuentra entre 0,95 -1,0 se considera que la muestra se encuentra saturada y se procederá con la etapa de consolidación.

- Consolidación: la etapa de consolidación permite que el espécimen encuentre un estado de equilibrio, durante el cual se aplicará una carga axial con el fin de mantener una condición de isotropía en la muestra.

Para esto se mantendrá el esfuerzo de contrapresión y se aumentará el esfuerzo de cámara hasta lograr el esfuerzo efectivo de consolidación requerido, las válvulas de drenaje deberán estar abiertas (CD).

²³ ASTM D3999. Standard test methods for the determination of the modulus and damping properties of soils using the cyclic triaxial apparatus. Summary of Test Method. p.2.

- Aplicación de carga cíclica: Este ensayo aplica para rangos de deformaciones por debajo de 10-2%, en los cuales el suelo se comporta como un sólido elástico, ante la aplicación de una carga cíclica. El nivel de deformación depende de la rigidez de la muestra. Donde para materiales duros y blandos se tendrán rangos pequeños y grandes de deformación respectivamente.

Para obtener la curva de degradación del módulo y de amortiguamiento es necesario que las muestras de suelo sean probadas para diferentes niveles de carga, se debe incrementar progresivamente etapa a etapa la magnitud de la carga. Las cargas dinámicas aplicadas en la muestra son en el orden de 0,01Kpa; 0,02Kpa; 0,04Kpa; 0,08Kpa; 0,16Kpa; 0,25Kpa ó hasta que la muestra falle por la acción de uno de estos incrementos.

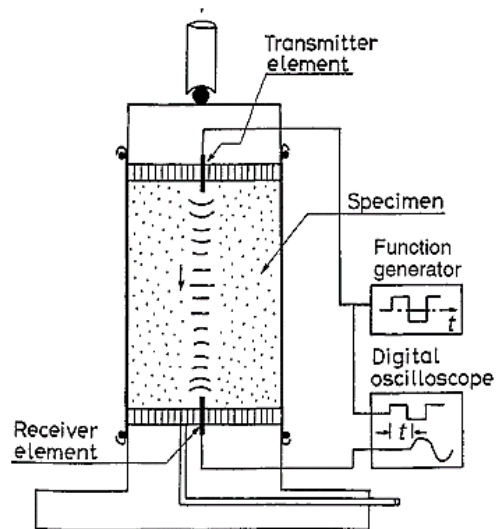
5.1.9. ENSAYO BENDER ELEMENT

El módulo de corte $G_{\text{máx}}$ provee información relevante del suelo, importante en el diseño de fundaciones sometidas a cargas dinámicas, procesos de licuefacción, control y mejoramiento del suelo²⁴. El parámetro G_{max} se puede obtener con la medición de velocidades de onda mediante la implementación de elementos Bender. El ensayo Bender Element permite la medición de la velocidad de onda de corte V_s y velocidad de onda V_p para muestras de suelo en laboratorio, consiste en dos placas de piezocerámica que generan una corriente eléctrica a lo largo el espécimen de suelo Figura 25, el mecanismo utiliza un receptor de onda

El Bender Element consiste en dos placas de cerámica piezoeléctrica, que se doblan proporcionalmente al voltaje aplicado, insertando cada elemento en cada extremo del espécimen de ensayo. Aplicando un voltaje de excitación en el elemento generador, emite una onda de corte en el suelo, como se ilustra en la figura 25; el otro elemento se utiliza como receptor de la onda de corte que se ha propagado a través de la muestra. Conociendo la distancia entre los dos elementos Bender y midiendo el tiempo requerido para que la onda de corte se propague por la muestra, se puede estimar la velocidad de onda de corte V_s y compresión V_p .

²⁴ VIGGIANI, G. and ATKINSON, H. Interpretation of bender element tests. Géotechnique. 1995. 149- 154

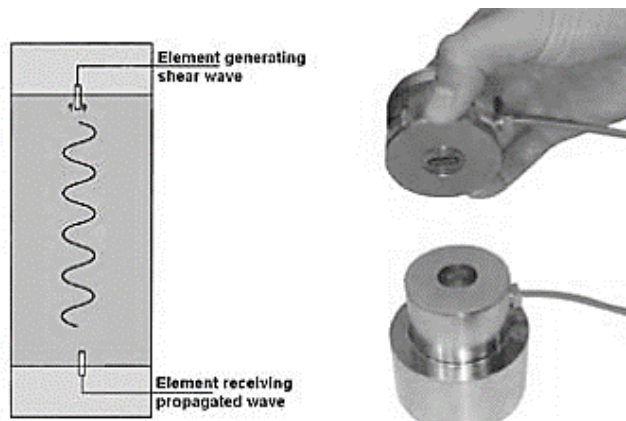
Figura 24. Uso de Bender Element en el aparato de prueba triaxial



Fuente: ISHIHARA, K. *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics. Use of bender elements in the triaxial test apparatus.* p 56.

Se presenta, en la imagen 3, los adaptadores o top- caps y pedestal del equipo de prueba Bender Element de la marca GDS Instruments.

Imagen 3. Ilustración de la prueba bender element (izquierda); Bender element GDS Instruments insertados en un top-cap y el pedestal (derecha) triaxial



Fuente: GDS INSTRUMENTS. *Bender element test analysis software development for laboratories.* Tomado el 05 octubre de 2016. [En línea]. <https://goo.gl/OMkjYb>.

5.2. MARCO LEGAL

A continuación, en la tabla 7, se enuncia la normativa mediante la cual se realizaron los ensayos de laboratorio para la caracterización física, mecánica y dinámica del suelo a estudiar.

Tabla 7. Marco Legal

NORMA	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN
<u>I.N.V. E - 102 - 13</u>	Descripción e identificación de suelos (procedimiento visual y manual)	Descripción manual del suelo
<u>I.N.V. E - 122 - 13</u>	Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo -agregado	Determinación el contenido de humedad
<u>I.N.V. E - 124 - 07</u>	Análisis granulométrico por medio del hidrómetro	Determinación de la granulometría
<u>I.N.V. E - 125 - 13</u>	Determinación del límite líquido de los suelos	Límites de Atterberg
<u>I.N.V. E - 126 - 13</u>	Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos	Límites de Atterberg
<u>I.N.V. E - 128 - 13</u>	Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua	Determinación de la gravedad específica del material
<u>I.N.V. E - 141 - 13</u>	Relaciones de humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo normal de compactación)	Obtención del porcentaje de humedad óptimo

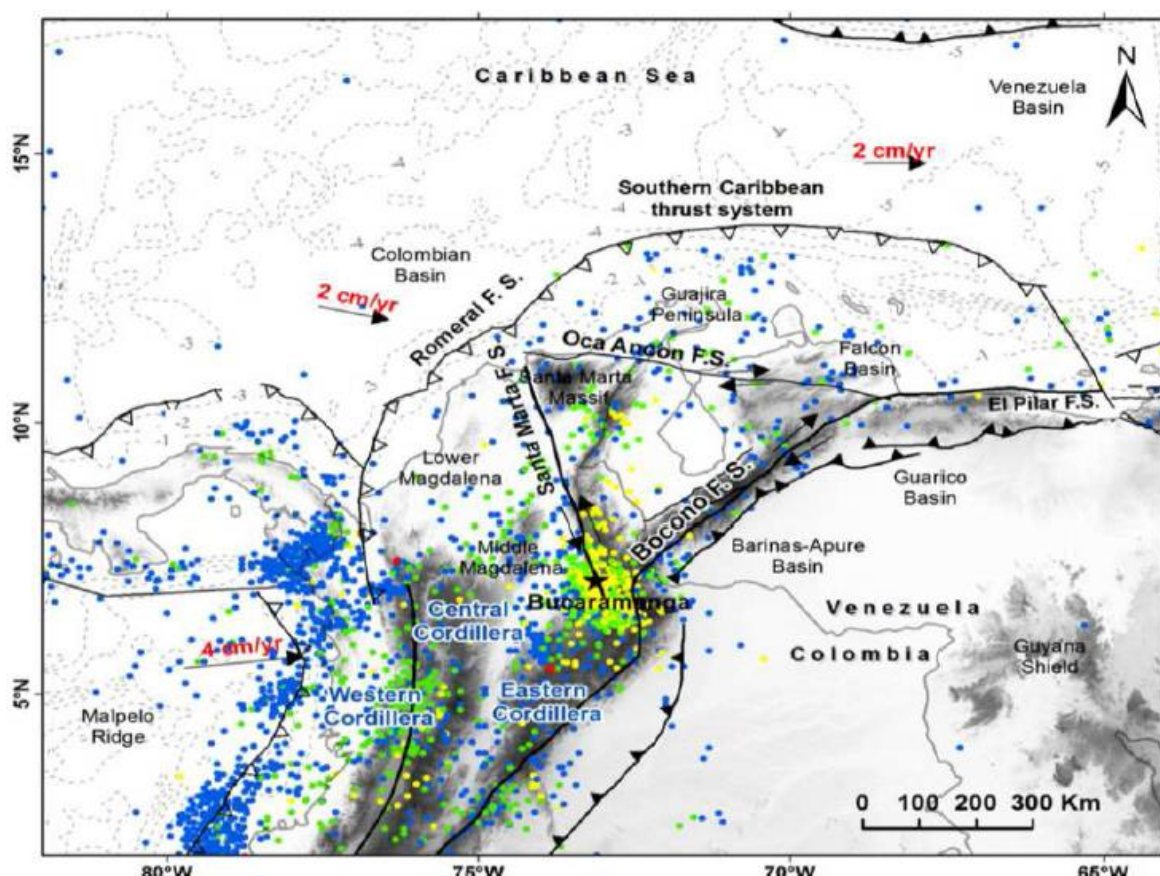
<u>I.N.V. E – 152 - 13</u>	Compresión inconfiada en muestras de suelos	Determinación de parámetros de resistencia
I.N.V. E – 154 - 13	Ensayo de corte directo en condición consolidada drenada (CD)	Determinación de parámetros de resistencia
I.N.V. E – 181 - 13	Sistema unificado de clasificación de suelos para propósitos de ingeniería	Clasificación del suelo
<u>I.N.V. E – 182 - 13</u>	Clasificación de la fracción fina de un suelo a partir de su valor de azul de metileno	Clasificación del suelo fino
<u>I.N.V. E – 153 – 07</u>	Parámetros de resistencia del suelo mediante compresión triaxial	Parámetros de resistencia,
<u>ASTM D3999-11</u>	Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus	Parámetros Dinámicos
<u>I.N.V. E – 182 - 13</u>	Clasificación de la fracción fina de un suelo a partir de su valor de azul de metileno	Caracterización del material arcilloso
<u>DECRETO 523-10</u>	“Por el cual se adopta la Microzonificación sísmica de Bogotá D.C.”	Microzonificación sísmica de Bogotá

Fuente: Propia

5.3. MARCO GEOGRÁFICO

Geográficamente, Colombia cuenta con tres cadenas montañosas, la cordillera oriental, central y occidental, resultado de la convergencia de las placas de Nazca, Caribe y Sudamérica como se muestra en la imagen 4. Por lo que se refiere al macizo de Santander, se sitúa en la cordillera oriental, en una zona de intensa actividad sísmica.

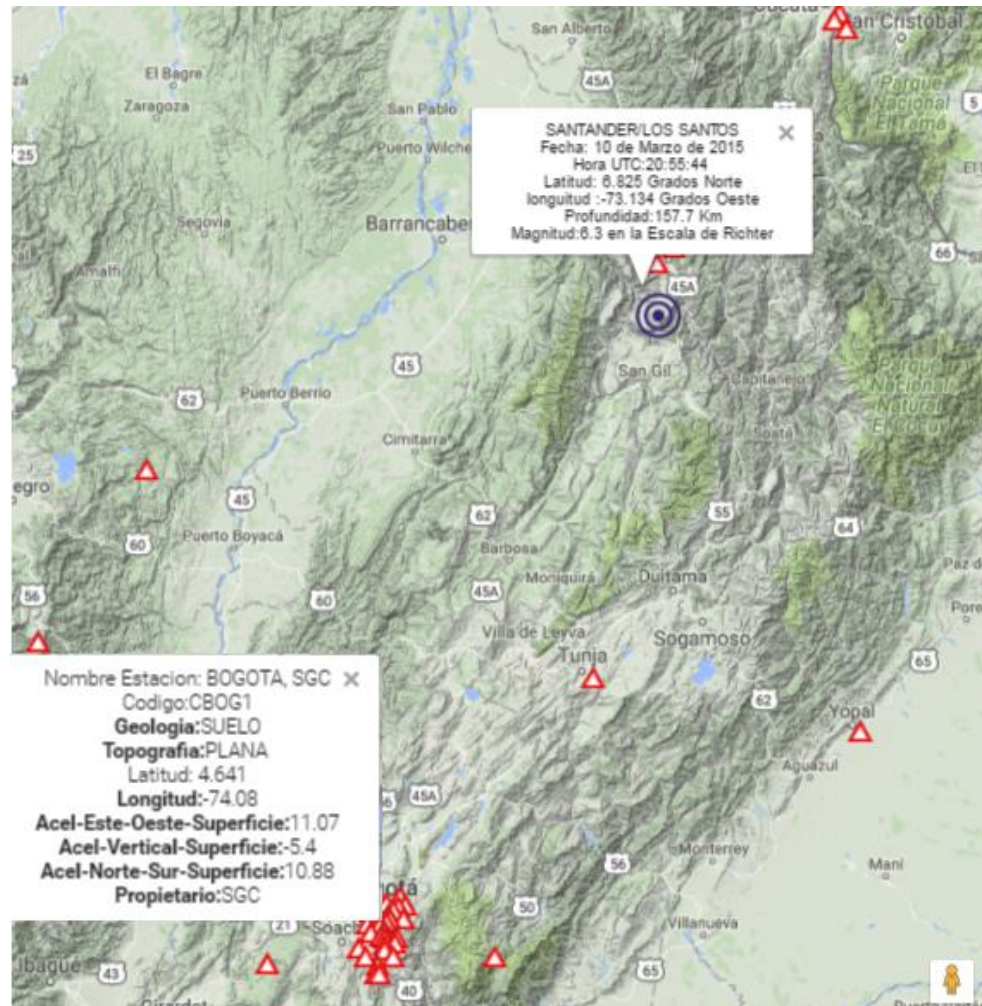
Imagen 4. Tectónica y sistema de fallas en Colombia



Fuente: SERVICIO GEOLÓGICO NACIONAL. Informe Sismo Mesa de los Santos, Santander. Tomado el 15 de abril de 2016. [En línea]. <http://goo.gl/EC24G4>.

A continuación, en la imagen 5 se muestra la ubicación del epicentro del sismo en el municipio de Mesa de los Santos y la ubicación del acelerógrafo que captó la señal en la ciudad de Bogotá y que se está tomando como referencia en esta investigación. De donde se tiene una distancia hipocentral de 309.222km.

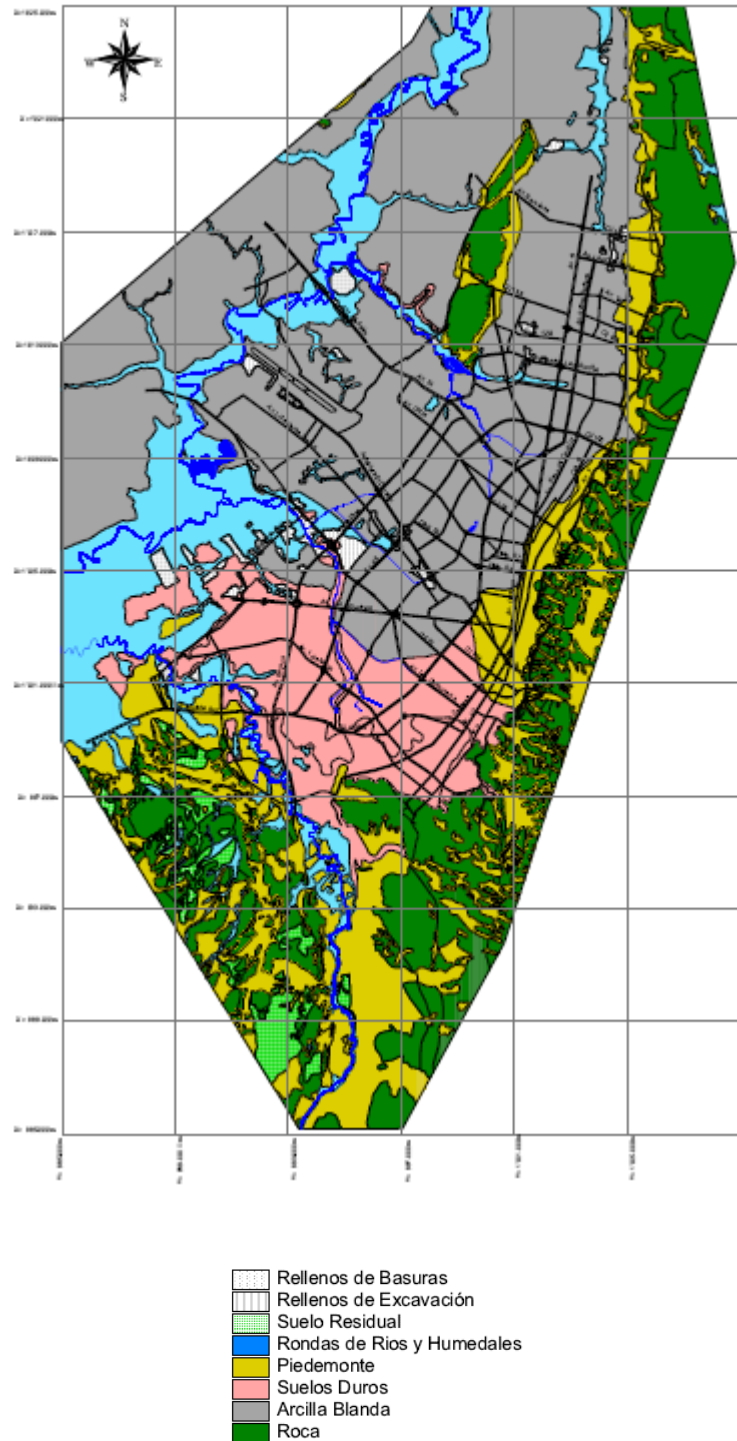
Imagen 5. Mapa de estaciones de acelerógrafos



Fuente: RED NACIONAL DE ACELERÓGRAFOS. Ubicación de estaciones. Sismo Tomado 15 de abril de 2016. [En línea]. <http://goo.gl/dtCIYY>.

Se complementa en la imagen 6, con el Mapa de Zonificación Geotécnica de la Ciudad de Bogotá, para tener una mejor visión de los suelos predominantes en distintas zonas de la ciudad. Adicionalmente en la Tabla 8, se presenta una descripción general de las zonas de respuesta sísmica en donde se detalla el espesor del depósito, periodo fundamental, se da una descripción geotécnica general, se estiman rangos para velocidades de onda de corte V_s promedio a 50m de profundidad y la evaluación de los efectos de sitio. El suelo representativo para esta investigación y los valores considerados para cada uno de los ítems anteriores se observan en la fila correspondiente a zonas lacustres 50-500m.

Imagen 6. Mapa de Zonificación Geotécnica de la Ciudad de Bogotá



Fuente: UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. *Mapa de Zonificación Geotécnica de la Ciudad de Bogotá*. Proyecto de microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá D. C. Departamento de Ingeniería Civil. 1996.

En la tabla 8, se presenta la descripción de zonas sísmicas para la ciudad de Bogotá según el decreto 523 adoptado por la alcaldía mayor de la ciudad.

Tabla 8. Descripción de las zonas de respuesta sísmica

Espesor del depósito (m)	Periodo fundamental del suelo (s)	Descripción Geotécnica General	Velocidad onda promedio 50 m	Vs (m/s)	Humedad Promedio 50 m Hn (%)	Efectos de sitio relacionados
Cerro	-	< 0.3	Rocas sedimentarias y depósitos de ladera con espesores inferiores a 6 m	> 750	< 10	Topográfico
Piedemonte A	< 50	0.3-0.6	Suelo coluvial y aluvial con intercalaciones de arcillas blandas: Bloques, cantos y gravas con matriz arcillo arenosas o areno arcillosa, capas de arcillas blandas.	200 - 750	oct-80	Topográfico, amplificación
Piedemonte B	< 50	0.3-0.6	Suelo coluvial y aluvial con espesor superior a 12 m: Bloques, cantos y gravas con matriz arcillo arenosas o areno arcillosa	300 - 750	oct-30	Topográfico, amplificación
Piedemonte C	< 50	0.3-0.6				
Lacustre-50	< 50	1.0-1.5	Suelo lacustre blando:	< 175	> 80	Amplificación
Lacustre-100	50-100	1.5-2.5	Arcillas limosas o limos arcillosos, en algunos sectores con intercalaciones de lentes de turba			Amplificación
Lacustre-200	100-200	2.5-3.5				Amplificación
Lacustre-300	200-300	3.5-4.5				Amplificación
Lacustre-500	300-500	4.5-6.5				Amplificación
Lacustre Aluvial-200	100-200	2.0-3.0	Suelo lacustre con intercalaciones de aluvial: Arcillas limosas o limos arcillosos con lentes de turba y capas de arenas compactas	< 200	> 60	Amplificación
Lacustre Aluvial-300	200-300	3.0-4.0				Amplificación
Aluvial-50	< 50	0.4-0.8	Suelo aluvial duro:	175 - 300	25 - 50	Amplificación, licuación
Aluvial-100	50-100	0.8-1.2	Arcillas limosas o arenas arcillosos o limos arenosos, en algunos sectores se encuentran lentes de arenas limpias			Amplificación, licuación
Aluvial-200	100-200	1.2-2.5				Amplificación, licuación
Aluvial-300	200-300	2.5-4.0				Amplificación, licuación
Depósito Ladera	jun-25	< 0.3	Depósitos de ladera con espesores superiores a 6 m de composición variable.	Variable según depósito	Variable según el tipo de depósito	Topográfico

Fuente: Decreto 523 del 16 de diciembre de 2010. Por el cual se adopta la Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C.²⁵

²⁵ ALCALDIA MAYOR DE BOGOTÁ. Decreto 523. Por el cual se adopta la Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C. Descripción de las zonas de respuesta sísmica. 2010. p 7-8.

6. DISEÑO METODOLÓGICO

6.1. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

El enfoque de investigación es de tipo cuantitativo, debido a que se obtuvieron datos mediante la realización de ensayos, de esta forma se logró caracterizar el material que sirvió para el desarrollo del presente trabajo. Así como conocer los parámetros sísmicos que se deben utilizar en posteriores estudios y diseño de obras de ingeniería que se planeen construir en la ciudad de Bogotá.

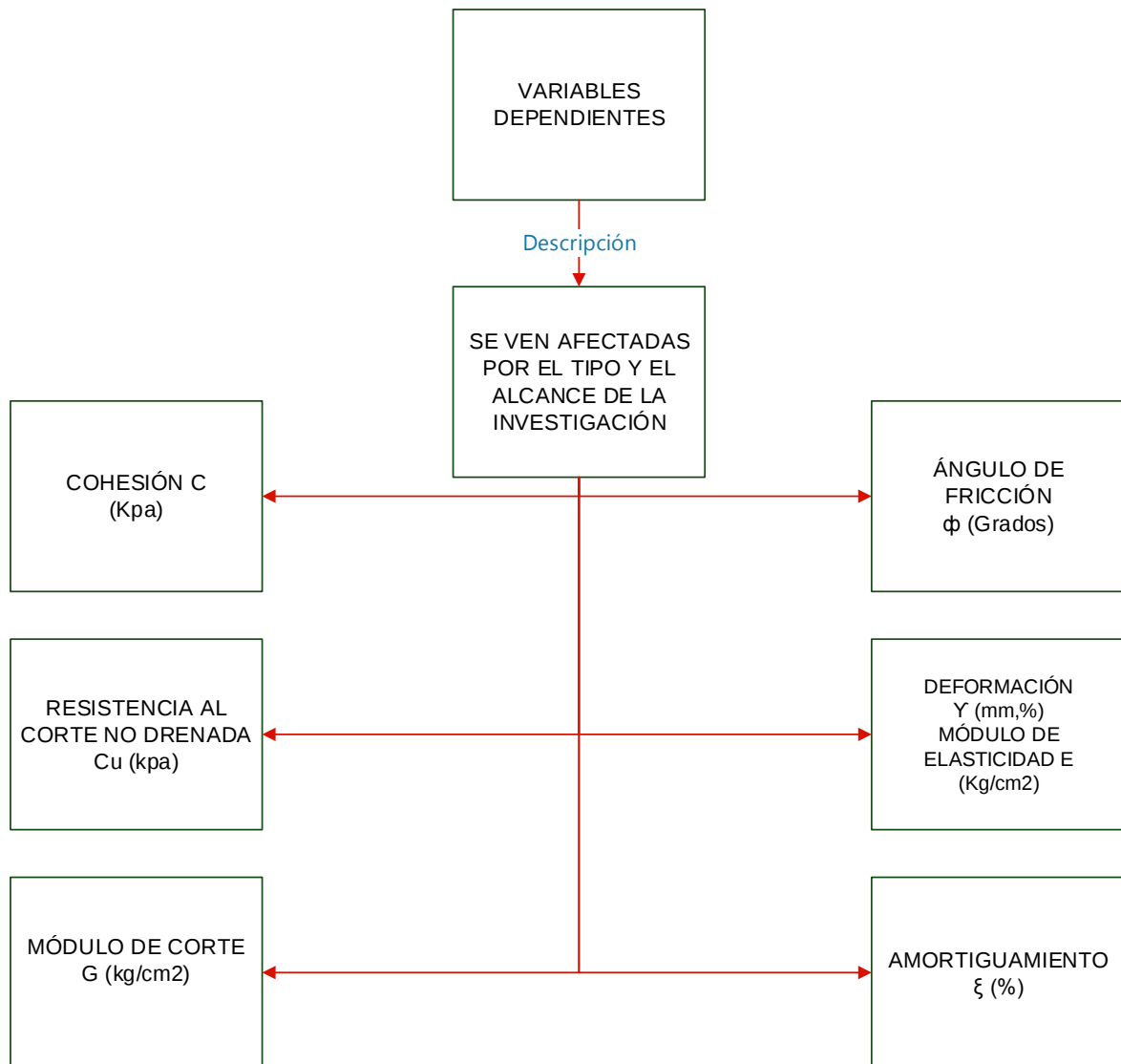
6.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación realizada es de tipo experimental y correlacional, puesto que se manipularon variables en la realización de las muestras utilizadas en los ensayos, el efecto que produce en la etapa investigativa y su respectiva validación, de esta manera obtener parámetros de las muestra de suelo reconstituida antes y después de someter a una solicitud sísmica mediante pruebas de laboratorio, las relaciones encontradas durante el proceso medirá la otra etapa investigativa correlacional.

6.3. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Durante el proceso de operacionalización existen varios cálculos medibles que están en función de las variables y es por eso que el proceso obliga a una definición conceptual de cada una de ellas. Se presenta en la figura 25, las variables dependientes de la investigación.

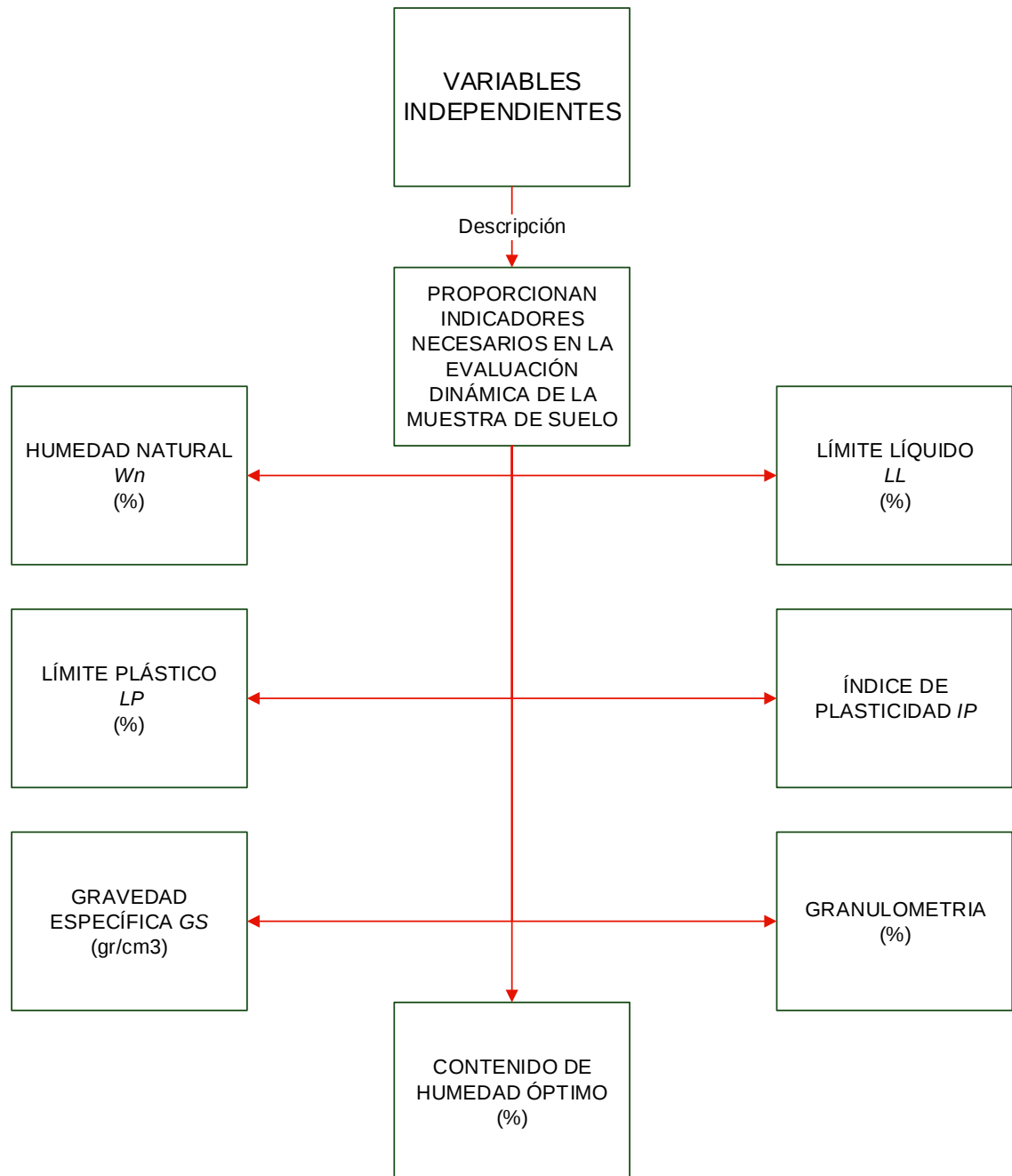
Figura 25. Variables dependientes



Fuente: Propia

Se presenta en la figura 26, las variables independientes de la investigación.

Figura 26. Variables independientes



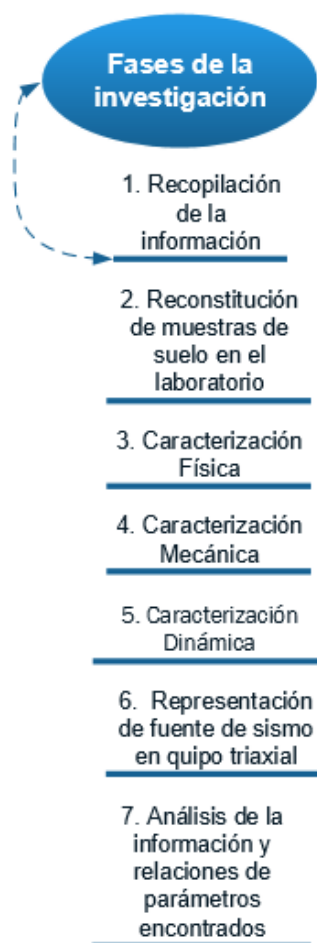
Fuente: Propia

6.4. FASES DE INVESTIGACIÓN

La metodología empleada para el análisis de la información y concepción del comportamiento consta de una etapa previa en el cual se identifican las características del material en etapa inicial donde se encuentra el caolín sin constituir y después de constituir, una vez conocidos estos parámetros se procede a realizar diseño experimental acordes con propiedades del material para culminar con el estudio y análisis entre los factores que afectan el comportamiento dinámico

La presente investigación se desarrolló en las siguientes fases, ver figura 27.

Figura 27. Fases de la investigación



Fuente: Propia

- I. Recopilación de información: Se desarrolló la investigación de los estudios realizados previamente, enfocados con el comportamiento dinámico de los suelos, además de consultar la normatividad técnica colombiana y el correcto uso de equipos vigente para la realización de los respectivos ensayos de laboratorio.
- II. Reconstitución y elaboración de muestras en laboratorio con características representativas de un suelo arcilloso propio de zonas de la ciudad de Bogotá. En el Anexo A, se encuentra el diagrama de flujo con el detalle del procedimiento desarrollado.
- III. Caracterización física: Se ejecutaron ensayos de contenido de humedad, límite líquido, límite plástico, gravedad específica y masa unitaria seca, según especificaciones de las Normas Técnicas Colombianas mencionadas en el marco legal.
- IV. Caracterización mecánica: La obtención de parámetros de resistencia como la resistencia al corte no drenado C_u se halló con el ensayo de compresión confinada. Por medio del ensayo de corte directo el esfuerzo cortante τ y el ángulo de fricción ϕ del material.
- V. Caracterización dinámica: Para evaluar el comportamiento del módulo de corte y amortiguamiento se sometió a ensayo triaxial cíclico a tres (3) muestras de suelo reconstituido con medición de onda de corte V_p y V_s , ensayo Bender Element. En el Anexo B y Anexo C, se encuentran los procedimientos de ensayo para ensayo triaxial dinámico y prueba Bender Element respectivamente.
- VI. Representación del sismo en equipo triaxial: El uso de la hoja de cálculo del EERA se emplea en este estudio básicamente para permitir la simulación del sismo representativo sucedido en el municipio de Mesa de los Santos en el equipo triaxial. Al cual se suma un análisis de factores de amplificación y espectros de Fourier. En el Anexo D, se encuentra el diagrama de flujo con el detalle del procedimiento desarrollado.
- VII. Análisis de la información: Se evaluó el comportamiento de las propiedades dinámicas como módulo cortante y amortiguamiento para la condición de carga establecida y con relación a la señal de prueba.

6.5. MATERIALES Y EQUIPOS

- MATERIALES

Caolín: material arcilloso formado por la alteración de feldespatos, micas, piroxenos ante la presencia de agua. Es un material de grano fino de color blanco hueso. En el presente trabajo se emplea este debido a que es una de las arcillas comunes en los suelos de Bogotá y se requiere conocer su comportamiento ante la incidencia de cargas dinámicas. En la imagen 7, se muestra el caolín trabajado.

Imagen 7. Caolín



Fuente: Propia

- EQUIPOS

Máquina triaxial: La máquina de ensayos triaxial Advanced Dynamic Triaxial Testing System (DYNTTS), ver imagen 8, tiene la capacidad de realizar ensayos: Consolidado drenado (CD), consolidado no drenado (CU), la consolidación (triaxial), pruebas de carga cíclica dinámica de muestras en régimen de carga o deformación controlada, ensayos cíclicos lentos, (baja velocidad/creep) pruebas pseudoestáticas, las trayectorias de tensiones, K-Zero y formas de onda definidas por el usuario. Ver tabla 9.

Tabla 9. Especificaciones técnicas máquina triaxial

Actuators:	High accuracy electromechanical
Axial Force Accuracy:	<0.1%
Axial Force Resolution:	16bit (i.e. <0.4N for 10kN load cell, <1.5N for 40kN load cell)
Axial Load (kN):	10, 25, 40 or 60
Displacement Range (mm):	100
Displacement Resolution:	0.20um
Operating Frequency (Hz):	2Hz - 10kN to 60kN - 2MPa, (Can be upgraded to 5MPa)
Pressure Range (MPa):	5Hz - 10kN to 60kN - 2MPa, (Can be upgraded to 5MPa) 10Hz - 10kN to 20kN - 1400kPa,
Speed of Measurement and Control:	5, 10kHz
Sample Sizes (mm):	38, 50, 70, 100 (other sizes available on request up to 300)

Fuente: GDS INSTRUMENTS. Advanced Dynamic Triaxial Testing System. World leaders in the manufacture of laboratory systems for soil & rock. Technical Specification. p 1.

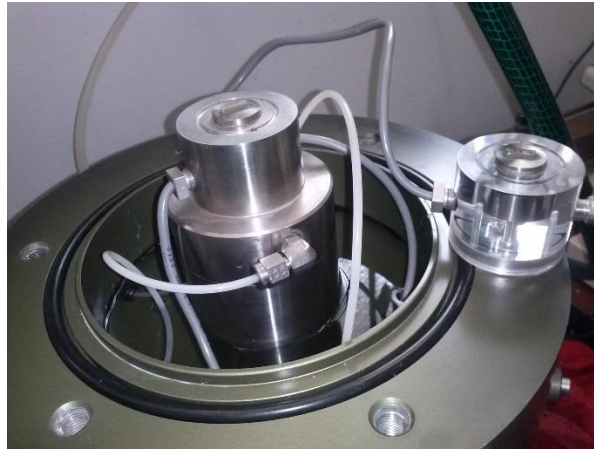
Imagen 8. Máquina triaxial GDS



Fuente: Propia

Bender Element: Consisten en dos placas de piezo-cerámica, ver imagen 9, el ensayo consiste en colocar un elemento Bender (top- cap) en cada uno de los extremos del espécimen de ensayo, en donde uno de estos funciona como emisor que emite una onda de corte y el otro como receptor que capta la llegada con el fin de conocer la velocidad del pulso generado en la muestra.

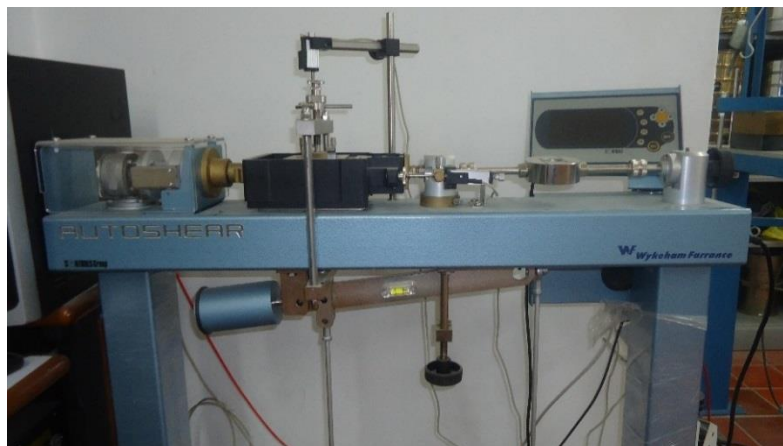
Imagen 9. Bender Element



Fuente: Propia

Máquina de corte directo: permite la determinación de la resistencia al corte de una muestra de suelo, sometida previamente a un proceso de consolidación, cuando se le aplica un esfuerzo de cizalladura o corte directo mientras se permite un drenaje completo de la muestra, ver imagen 10.

Imagen 10. Máquina de corte directo



Fuente: Propia

Máquina Versa Tester y máquina universal para compresión inconfiada: máquina semejante a una prensa con la que es posible someter materiales a ensayos de tracción y compresión para medir sus propiedades, ver imagen 11.

Imagen 11. Máquina Versa Tester y máquina universal



Fuente: Propia

6.6. DISEÑO EXPERIMENTAL

6.6.1. REPRODUCIBILIDAD DE MUESTRAS DE SUELO EN LABORATORIO

Para la formación de las probetas de ensayo en laboratorio se empleó una metodología de ensayo y error. Se compactó el material húmedo necesario para lograr muestras con la densidad seca deseada en capas²⁶, densificando y garantizando la adherencia entre cada una de ellas, para así lograr homogeneidad en el espécimen, usando un molde de dimensiones conocidas.

Para la reproducibilidad de las muestras en laboratorio se refirió a la norma ASTM D3999-11 7.4.3 y 7.4.4, con algunas modificaciones donde se recurrió al remplazo de algunas variables. En la figura 28, se explica paso a paso, la reproducibilidad de las muestras reconstituidas en el laboratorio, para mayor detalle ver el anexo A.

²⁶ ASTM D3999-11. Standard test methods for the determination of the modulus and damping properties of soils using the cyclic triaxial apparatus. 7.4.3. Reconstituted Specimens.p 10.

Figura 28. Reproducibilidad de muestras



- Se adicionó agua al material para lograr la humedad deseada



- Para obtener uniformidad se usa un aspersor y se mezcla constantemente



- Se pesó el material necesario, según la densidad seca requerida



- El molde empleado tiene dimensiones
H=10cm
D=5cm



- Se adiciona el material al molde



- Se compacta capa por capa, un total de tres capas



- Para garantizar adherencia, se suelta el material de contacto entre cada capa



- Se compactan las tres capas en en la máquina Versa Tester



- Se retira el collar de extensión del molde



- Se retira la probeta del molde



- Se toman las dimensiones de la muestra verificando que se cumpla la relación 1/2

Fuente: Propia

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos realizados para la caracterización física, mecánica y dinámica de las muestras de suelo reconstituidas en laboratorio.

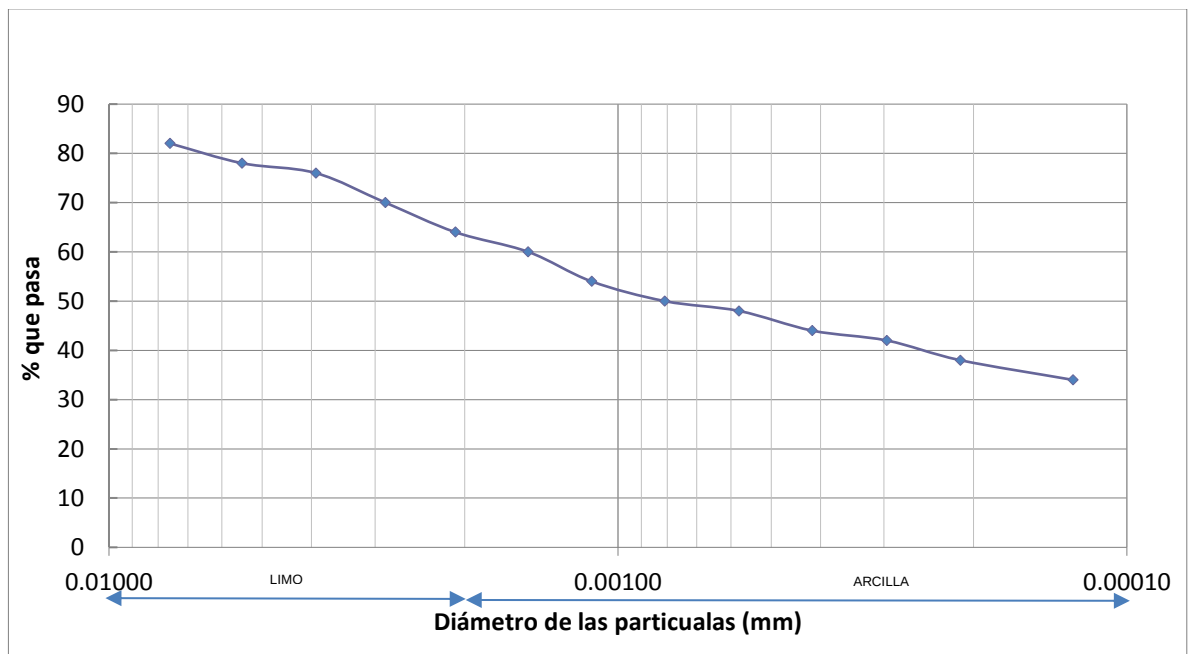
7.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA

7.1.1. ENSAYO DE HIDROMETRIA (I.N.V. E – 124 – 07)

Este ensayo se desarrolló para la determinación de la distribución del tamaño de las partículas en suelos finos, con partículas que pasan el tamiz número 200 ó partículas con diámetro menor a $75\mu\text{m}$.

De éste se obtuvo la siguiente curva granulométrica, gráfica 5:

Gráfica 5. Curva granulométrica



Fuente: Propia

Se encontró una distribución granulométrica de partículas entre los $0,0001\text{mm}$ y $0,0075\text{mm}$, donde cerca del 65% de las partículas tienen un diámetro menor a $0,002\text{mm}$, correspondiente a fracciones de arcilla y en el 35% restante, presencia de limos con diámetro superior a $0,002\text{mm}$ y que pasan el tamiz No. 200.

7.1.2. ENSAYO DE AZUL DE METILENO (I.N.V. E – 182 - 13)

El objetivo es identificar las características de las partículas finas de suelo que pasan el tamiz No. 200. La idea central es clasificar suelos finos que con relación a la carta de plasticidad se encuentran cercanos a la línea de A.

Los valores obtenidos a partir de la medición en laboratorio se presentan en la tabla 10.

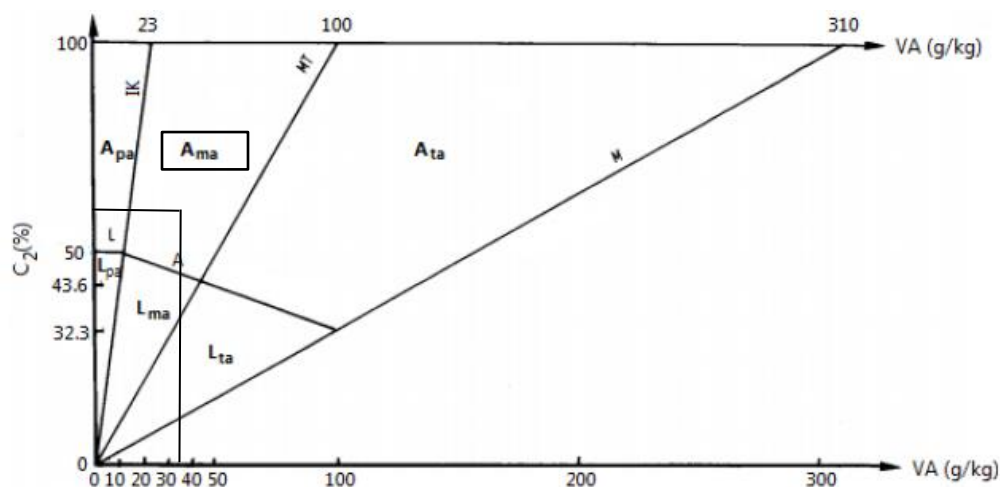
Tabla 10. Valores azul de metileno

V.A.	32.5
C ₂ (%)	65
A	0,26

Fuente: Propia

Se logra observar gráficamente, figura 29, que la clasificación del suelo fino corresponde a una arcilla poco activa (A_{pa}).

Figura 29. Carta de clasificación de suelos finos



Fuente: INV E 182 – 13. Clasificación de la fracción fina de un suelo a partir de su valor de azul de metileno. Carta de clasificación de los suelos finos. p.3.

$$A = \frac{IP}{\% \text{ granos } < 2 \mu} \quad \text{Ec. 14.}$$

Según la clasificación de la arcilla de estudio, esta refleja una baja capacidad para retener humedad y bajo potencial para presentar cambios de volumen, es decir una arcilla poco expansiva, tal como se correlaciona en la tabla 11.

Tabla 11. Actividad en arcillas

ACTIVIDAD	CLASIFICACION	TIPO DE ARCILLA	POTENCIAL DE CAMBIO DE VOLUMEN
$A < 0.75$	Inactivas	CAOLINITA	BAJO
$0.75 < A < 1.25$	Normales	ILITA	MEDIO
$A > 1.25$	Activas	MONTMORILLONITA ($A > 7.0$)	ALTO

Fuente: Tomado en línea. [<https://goo.gl/n8SOJd>].

7.1.3. ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD (I.N.V. E – 122 – 13)

Se reporta un contenido de humedad natural del material secado en horno del 2,25%.

7.1.4. ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA (I.N.V. E – 128 – 13)

$$G_s = 2.64$$

Se corrobora el valor obtenido con valores típicos citados en la tabla 12, de gravedad específica de algunos materiales y suelos en donde se verifica un rango para la caolinita de entre 2,62 -2,66.

Tabla 12. Gravedad específica de minerales

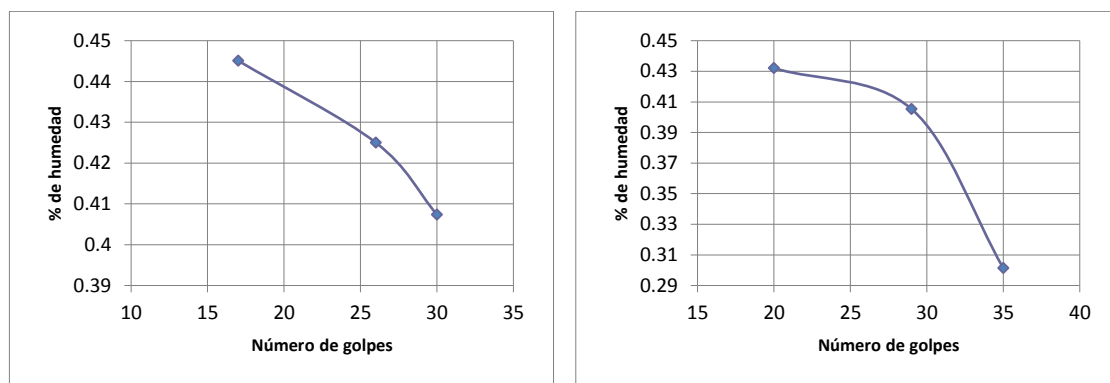
Mineral	Gravedad específica (G)
Cuarzo	2,65
Feldespato (K)	2,54 – 2,57
Feldespato (Na-Ca)	2,62 – 2,76
Calcita	2,72
Dolomita	2,85
Muscovita	2,70 – 3,20
Biotita	2,80 – 3,20
Clorita	2,60 – 2,90
Caolinita	2,62 – 2,66
Illita	2,60 – 2,86
Montmorillonita	2,75 – 2,78

Fuente: Lambe & Whitman, 1969.

7.1.5. ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS (I.N.V. E - 125 - 13) Y LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS (I.N.V. E - 126 - 13)

Se realizaron dos ensayos para la determinación del límite líquido del suelo, los resultados se presentan en la gráfica 6.

Gráfica 6. Límites de consistencia



Fuente: Propia

Se obtienen los siguientes valores del promedio de los ensayos, ver datos en la tabla 13, en porcentaje del límite líquido y del límite plástico, e índice de plasticidad.

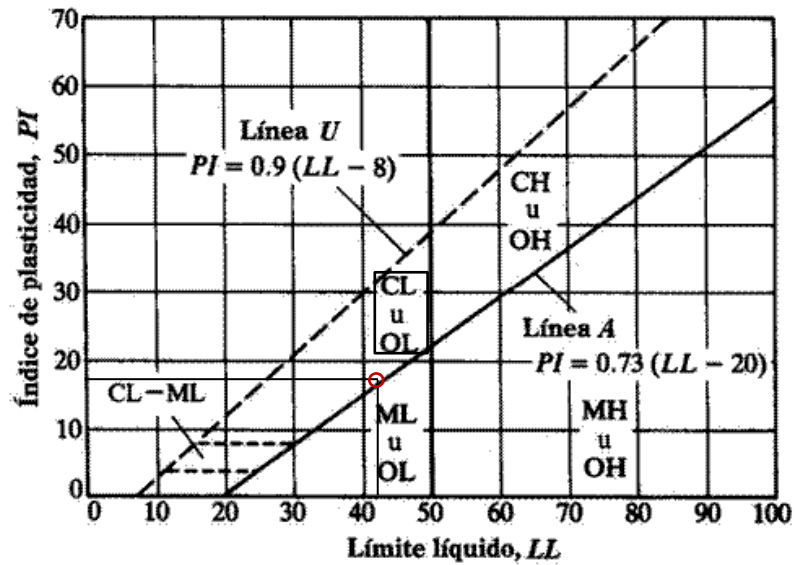
Tabla 13. Valor de LL e IP material de ensayo

LL %	42
LP %	25
IP	17

Fuente: Propia

Según la carta de plasticidad de Casa Grande, figura 30, en su relación entre el límite líquido y el índice de plasticidad la clasificación del material objeto de estudio corresponde a una arcilla de baja plasticidad (CL) con relación a los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio.

Figura 30. Carta de plasticidad

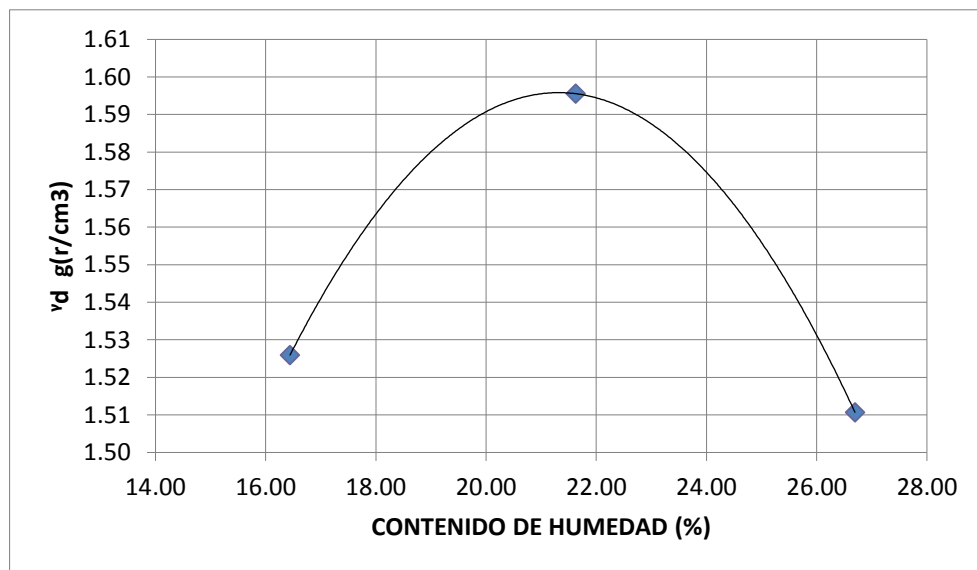


Fuente: Tomado en línea [<http://goo.gl/S9Y5Be>]

7.1.6. ENSAYO NORMAL DE COMPACTACIÓN (I.N.V. E – 141 - 13)

Se obtuvo un contenido de humedad óptimo de 21,5% para una densidad seca de 1,596 gr/cm³, ver gráfica 7.

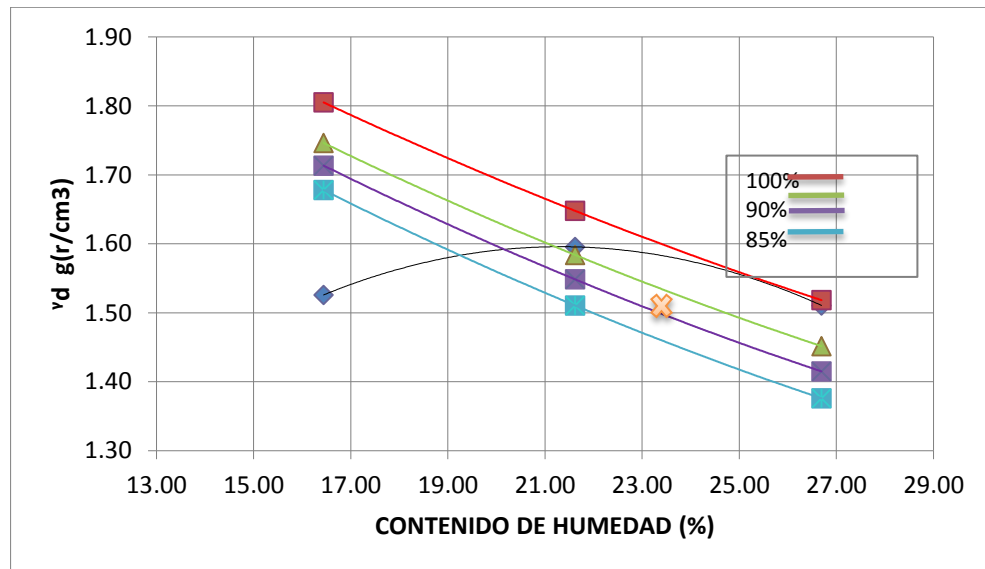
Gráfica 7. Curva de compactación



Fuente: Propia

Con el fin de obtener un γ_d acorde para trabajar en el equipo triaxial se hallaron las curvas de saturación correspondientes al 100%, 90%, 85% y 80% para poder ver el rango de variación de la densidad seca del material γ_d . Ver en gráfica 8. Se trabajó en la línea de saturación del 90% obteniendo una $\gamma_d = 1,5 \text{ (gr/cm}^3\text{)}$ y una humedad óptima de 23,5%.

Gráfica 8. Curvas de saturación



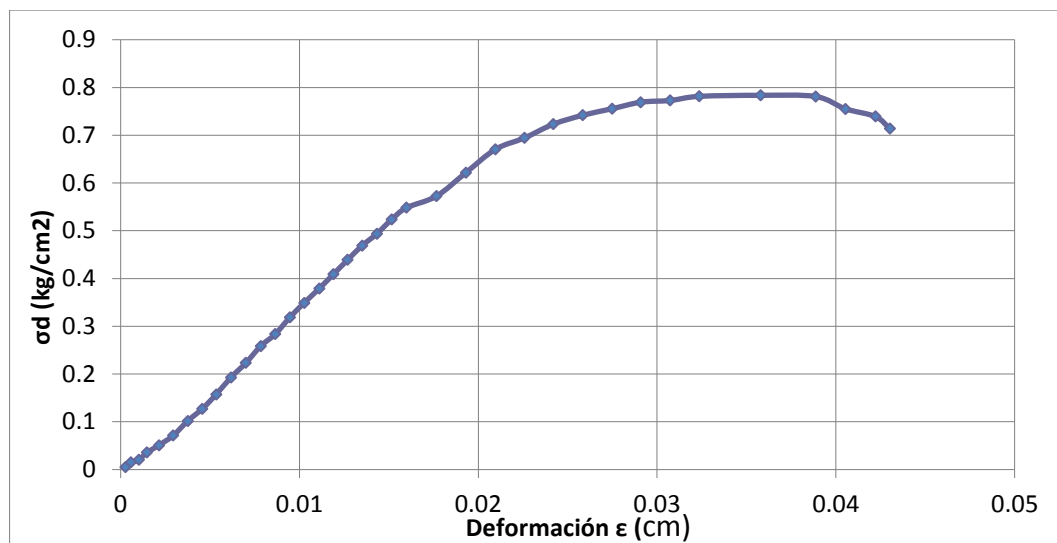
Fuente: Propia

7.2. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

7.2.1. ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA (I.N.V. E – 152 - 13)

Los resultados para la prueba de compresión simple arrojaron un valor promedio de resistencia última q_u . En la gráfica 9 se muestra la curva esfuerzo - deformación de uno de los ensayos, de un total de tres muestras.

Gráfica 9. Curva esfuerzo- deformación



Fuente: Propia

Se obtiene un estimativo de la consistencia (media) de las muestras constituidas en laboratorio, se presentan los valores medidos en la tabla 14.

Tabla 14. Valores de q_u y C_u material de ensayo

q_u (kg/cm ²)	0.84
C_u (kg/cm ²)	0.42
CONSISTENCIA	MEDIANAMENTE COMPACTA

Fuente: Propia

Según los rangos establecidos por (Braja, 1997), en la tabla 15. La arcilla con la cual se evaluó el comportamiento en condiciones de carga dinámica se establece una consistencia media- dura con un $q_u = 10 \text{ k}(kg/m^2)$.

Tabla 15. Consistencia de arcillas

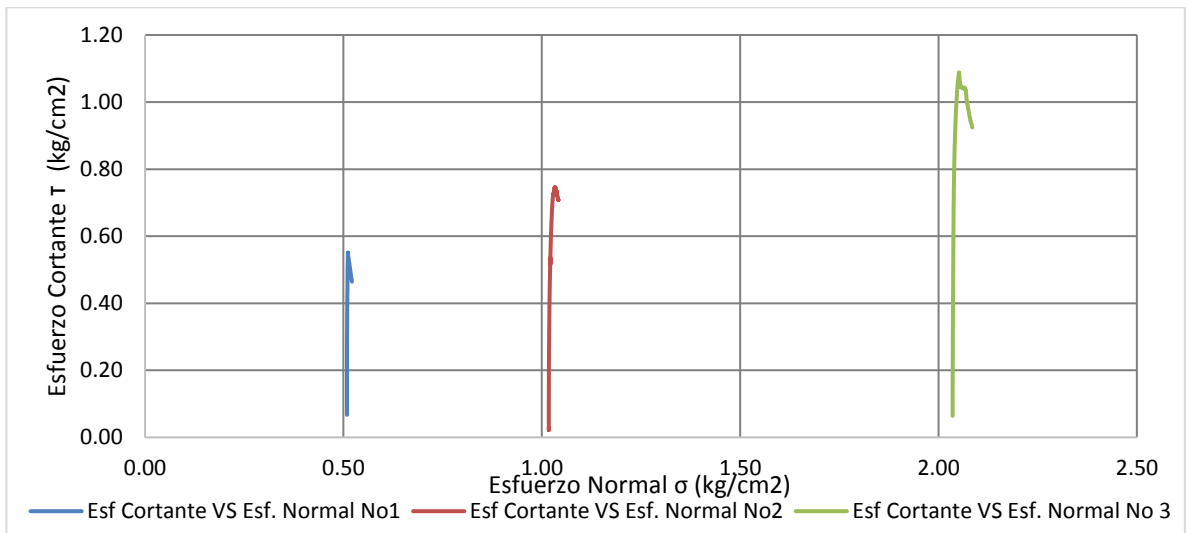
Consistencia	$q_u \text{ k}(kg/m^2)$
Muy suave	0 a 2.44
Suave	2.44 a 4.88
Medio	4.88 a 9.76
Duro	9.76 a 19.52
Muy duro	19.52 a 39.05

Fuente: Das, 1997

7.2.2. ENSAYO DE CORTE DIRECTO (I.N.V. E – 154 – 13)

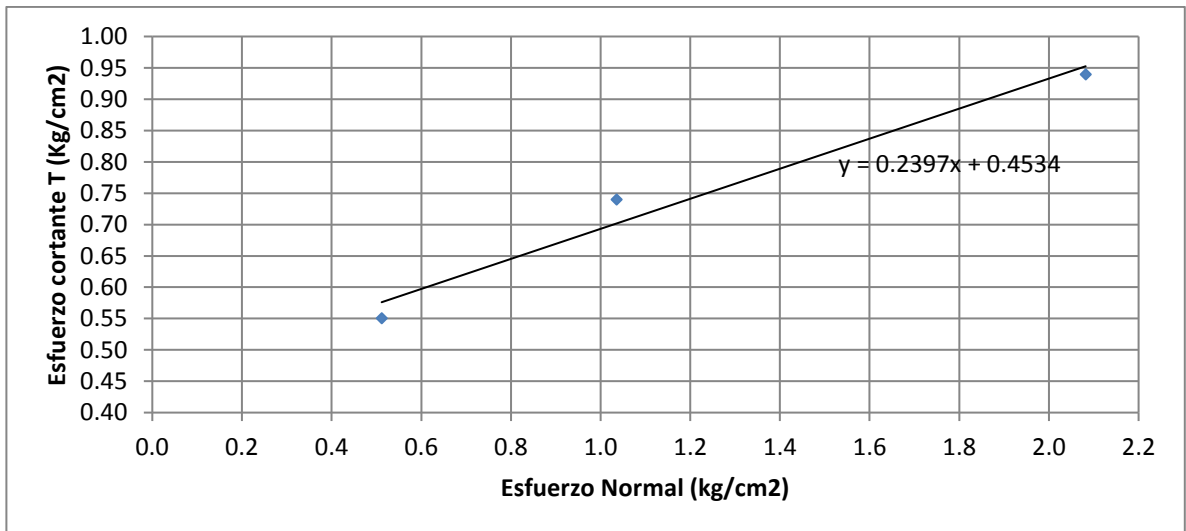
La trayectoria de esfuerzos normales fue obtenida mediante el incremento del esfuerzo normal en el rango de 0,5; 1,0; 2,0 con su correspondiente aumento de carga de 14,14kg; 28,27kg; 56,55kg respectivamente, donde se observa un comportamiento lineal ante el incremento de esfuerzos, Gráfica 10 y Gráfica 11.

Gráfica 10. Trayectoria de esfuerzos normales



Fuente: Propia

Gráfica 11. Esfuerzo cortante Vs esfuerzo normal



Fuente: Propia

Donde, se consigue un ángulo de fricción σ y valor de cohesión C, ver tabla 16.

Tabla 16. Ángulo de fricción ensayo de corte directo

RESULTADOS		
Muestra	τ kg/cm ²	σ kg/cm ²
1	0.551	0.512
2	0.740	1.0357
3	0.940	2.082
	Phi kg/cm²	13.48
	C kg/cm²	0.45

Fuente: Propia

En la tabla 17 se muestran valores típicos de cohesión para arcillas según su consistencia, para este caso, el valor de cohesión está en el rango de 0.25 – 0.5 kg/cm² para consistencia de arcillas medias.

Tabla 17. Valores de cohesión para arcillas según su consistencia

CONSISTENCIA	IDENTIFICACIÓN EN CAMPO	COHESIÓN kg / cm ²
Muy blanda	Fácilmente penetrable varios cms. con el puño	< 0.125
Blanda	Fácilmente penetrable varios cms. con el pulgar	0.125-0.25
Media	Se requiere un esfuerzo moderado para penetrarlo varios cms. con el pulgar	0.25-0.5
Rígida	Indentable fácilmente con el pulgar	0.5-1
Muy rígida	Indentable fácilmente con la uña del pulgar	1-2
Dura	Difícil de indentar con la uña del pulgar	2

Fuente: Tomado en línea. [<https://goo.gl/OWsUCZ>].

En la tabla 18, se presenta un resumen de los parámetros físicos y mecánicos determinados experimentalmente, donde adicionalmente, se especifica el número de pruebas realizadas detallando qué cantidad de pruebas fueron fallidas y cuales no lo fueron.

Tabla 18. Resumen propiedades físico-mecánicas

ENSAYO	PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN	NÚMERO DE PRUEBAS		
			CANTIDAD	DESCARTADAS	SELECCIONADAS
Hidrometría	Granulometría	65% Arcillas, 35% Limos	1	0	1
Azul de metileno	Actividad en arcillas y limos	Poco activa	1	0	1
Contenido de humedad natural	W%	2.25%	3	0	3
Límites de Atterberg	LL %	42	7	0	7
	LP %	25	4	0	4
	IP	17	-	-	-
Gravedad específica	Gs (gr/cm3)	2.64	4	2	2
Compresión inconfiada	qu (kg/cm2)	0.84	35	32	3
	CU (kg/cm2)	0.42	-	-	-
	CONSISTENCIA	Medianamente compacta	-	-	-
Ensayo normal de compactación	Yw (gr/cm3)	1.88	3	0	3
	Yd (gr/cm3)	1.54	-	-	-
Corte directo	Ángulo ϕ	13.5	3	0	3
	C Kg /cm2	0.45	-	-	-

Fuente: Propia

7.3. CARACTERIZACIÓN DINÁMICA

Para obtener las características dinámicas se realizaron veintinueve ensayos cíclicos y nueve ensayos dinámicos con la señal seleccionada, esto con el fin de lograr evaluar parámetros dinámicos como del módulo cortante, el módulo dinámico de elasticidad y el amortiguamiento de la muestra reconstituida en el laboratorio, variables tratadas en el contenido de esta investigación. Debido a errores en el manejo del equipo, montaje de la muestra y errores de tipo experimental se descartaron cerca de veintiséis ensayos dinámicos para la caracterización del suelo de estudio y siete ensayos dinámicos con la señal del sismo por errores en la normalización de la fuente de entrada. Dejando como pruebas de análisis tres ensayos dinámicos para realizar la caracterización y dos ensayos para la evaluación dinámica del suelo ante el sismo de estudio.

7.3.1. BENDER ELEMENT

Los resultados arrojados por las pruebas Bender Element se tienen en consideración en el análisis de la presente investigación debido a que se observa que los datos de salida simulan las condiciones esperadas de los parámetros medibles en el equipo. Las velocidades V_p y V_s se obtuvieron para cada muestra reconstituida y probada en equipo triaxial junto con Bender Element.

En la tabla 19 y tabla 20, se muestran en forma resumida los resultados obtenidos de las pruebas Bender Element realizadas a las tres muestras en proceso de ensayo triaxial consolidado no drenado C_u , en donde se tomaron datos de velocidades de onda para un estado saturado y para la muestra consolidada.

Tabla 19. Velocidades de onda ensayo Bender Element

V_s (m/s)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Saturado	153.6	266.7	122.0
	181.3	134.7	133.2
	165.3	207.3	133,2
Promedio	166.7	202.9	127.6
Consolidado	197.8	200.8	178.9
	214.1	207.3	191.9
	214.2	200.8	178.9
Promedio	208.7	203.0	183.2

Fuente: Propia

Tabla 20. Velocidades de onda ensayo Bender Element

V_p (m/s)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Saturado	318.5	503,4	434.8
	352.7	-	434.9
	318.5	-	483.1
Promedio	329.9	503,4	450.9
Consolidado	214.1	651.5	543.5
	651.5	621.1	543.5
	651.5	687.3	-
Promedio	505.7	653.3	543.5

Fuente: Propia

Los datos de velocidades de onda de corte V_s generados en el Bender Element, mostraron importante disparidad, sumado a esto, los rangos de velocidad de onda no son pertenecientes con el tipo de material trabajado, en la tabla 8, descripción de zonas de respuesta sísmica, en donde se le relaciona con suelos lacustres blandos específicamente con arcillas limosas a los que se le asignan velocidades de onda de corte promedio menores a 175 m/s. Para tales velocidades de onda V_s y V_p se obtuvo valores de relación de Poisson alrededor de $\nu = 0,4$ los que en bibliografía, tabla 2, son asignados para arcillas; estas relaciones se encuentran en valores cercanos para arcillas pero sufren incertidumbre atribuida al montaje de las muestras y sincronización del equipo Bender Element GDSLAB.

A manera de interpretación de los datos con relación a los resultados que se presentan enseguida en el numeral 7.3.2. se puede observar que al realizarse la consolidación de la muestra, la relación de vacíos disminuye, como consecuencia de esto la velocidad de onda que se propaga a través del espécimen tiene un incremento, esto se ve reflejado en los resultados obtenidos experimentalmente en este ensayo.

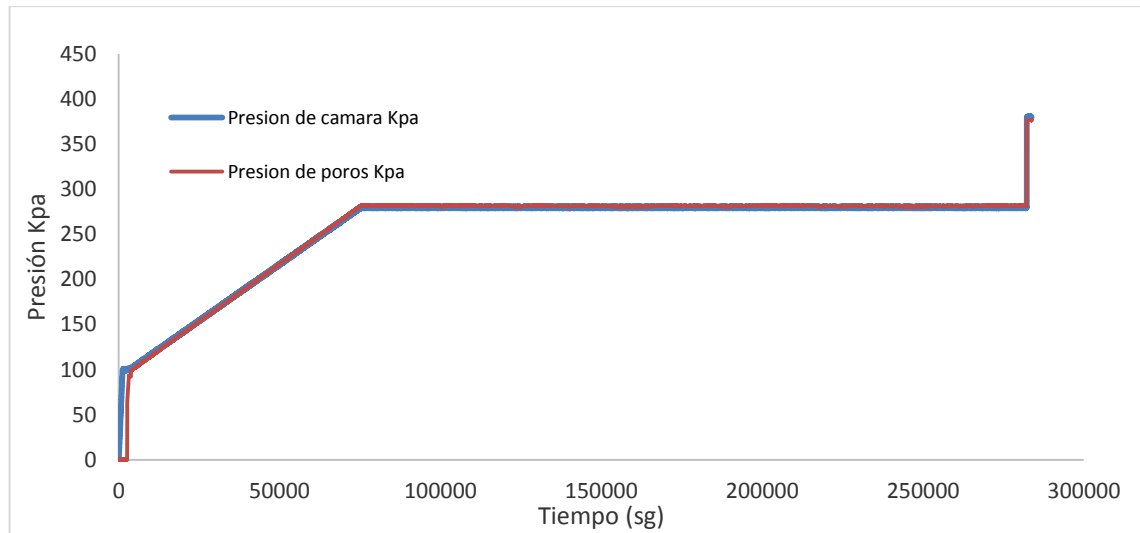
7.3.2. ENSAYOS TRIAXIALES CÍCLICOS

Se consideraron tres pruebas triaxiales consolidadas no drenadas C_u a las que posteriormente se les ejecutó ensayo triaxial dinámico bajo condiciones de carga controlada, a continuación, se muestran los resultados de uno de estos y se describen las etapas de ensayo.

ETAPA DE SATURACIÓN

Se realizaron incrementos de presión de cámara y contra presión para lograr la saturación de la muestra, igualmente, se evidencia un incremento de la presión de poros U desde el inicio hasta lograr alcanzar la presión de cámara durante toda la etapa de saturación. El tiempo de saturación para la muestra cuya densidad seca $\gamma_d = 1,5 \text{ gr/cm}^3$ fue de cerca de 3,5 días, ver gráfica 12.

Gráfica 12. Etapa de saturación ensayo triaxial

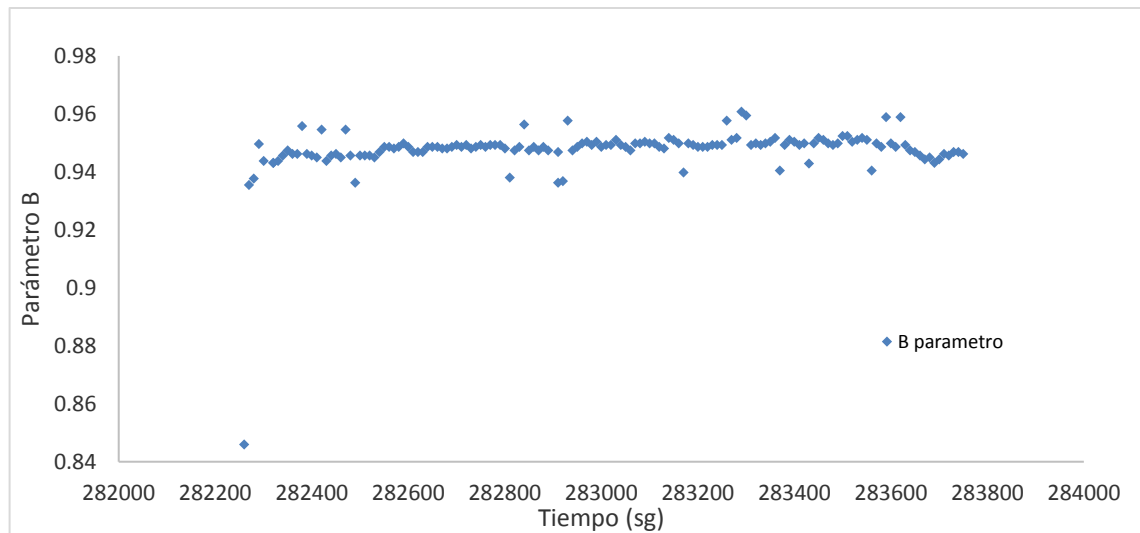


Fuente: Propia

CHEQUEO PARÁMETRO B DE SKEMPTON

A continuación, se comprueba el parámetro B de Skempton, encontrando que este se encuentra dentro del rango permitido de saturación para proceder con la etapa de consolidación $B \approx 0,96$, como se ilustra en la gráfica 13.

Gráfica 13. B Skempton

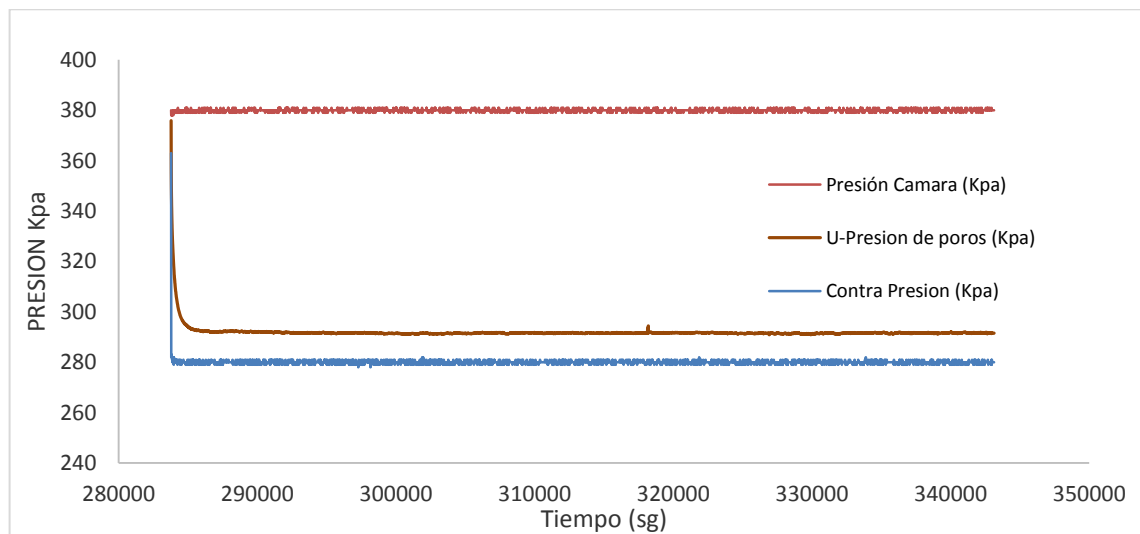


Fuente: Propia

ETAPA DE CONSOLIDACIÓN

Para la realización del ensayo triaxial consolidado no drenado, no se permite la salida de agua de la muestra, cerrando la válvula de contrapresión, la consolidación se hace de forma isotrópica, aplicando un esfuerzo de confinamiento en todos los sentidos al que se desea llevar la consolidación. El aumento de la presión de cámara para lograr la consolidación deseada fue de 100KPa para todos los triaxiales. La presión de poros a diferencia de la etapa de saturación tendrá que disminuir hasta igualar la contrapresión constante durante la etapa, ver gráfica 14.

Gráfica 14. Etapa de consolidación ensayo triaxial

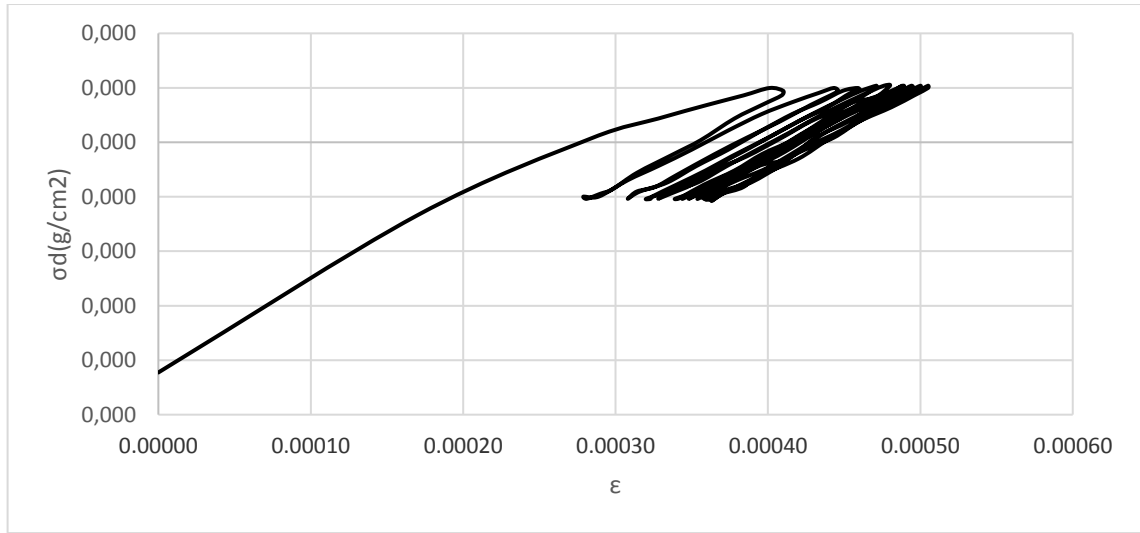


Fuente: Propia

ETAPAS DE APLICACIÓN DE CARGA

Se obtienen los ciclos de histéresis con la aplicación de una carga de 0,01KN en equipo triaxial dinámico para una señal sinusoidal a una frecuencia de 1Hz, como sigue en la gráfica 15. Debido a que la carga aplicada es muy pequeña, no se ve la formación del ciclo de histéresis.

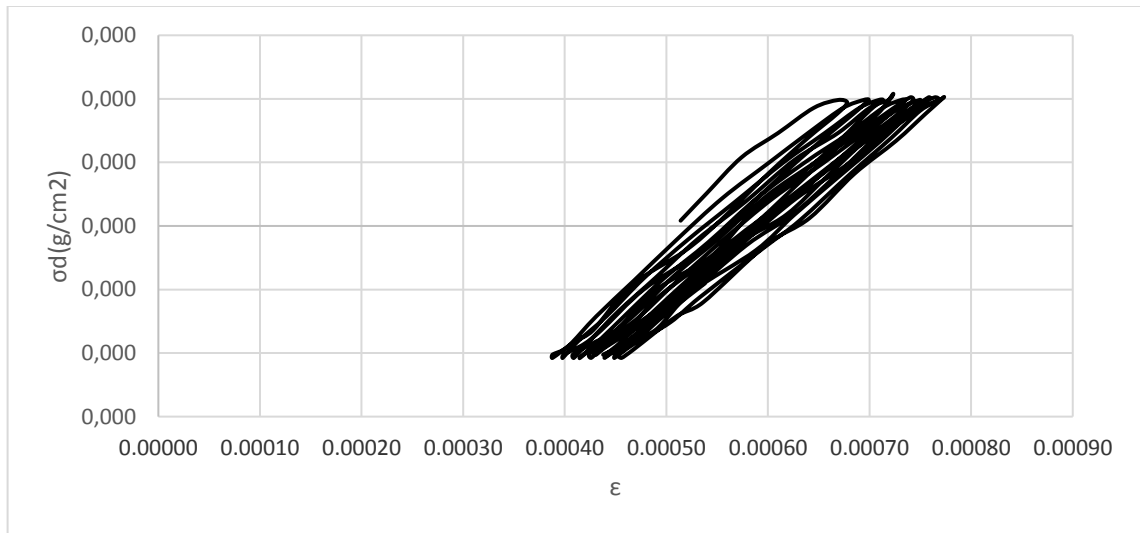
Gráfica 15. Histéresis Esfuerzo σ_d vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,01KN



Fuente: Propia

Se obtienen los ciclos de histéresis con la aplicación de una carga de 0,02KN en equipo triaxial dinámico para una señal sinusoidal a una frecuencia de 1Hz, como sigue en la gráfica 16.

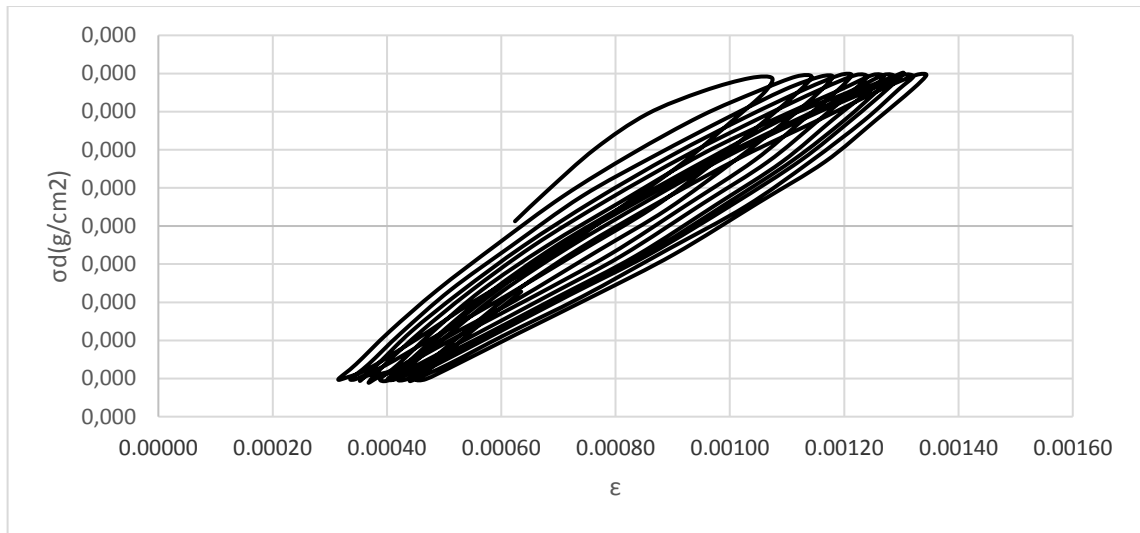
Gráfica 16. Histéresis Esfuerzo σ_d vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,02KN



Fuente: Propia

Se obtienen los ciclos de histéresis con la aplicación de una carga de 0,04KN en equipo triaxial dinámico para una señal sinusoidal a una frecuencia de 1Hz, como sigue en la gráfica 17.

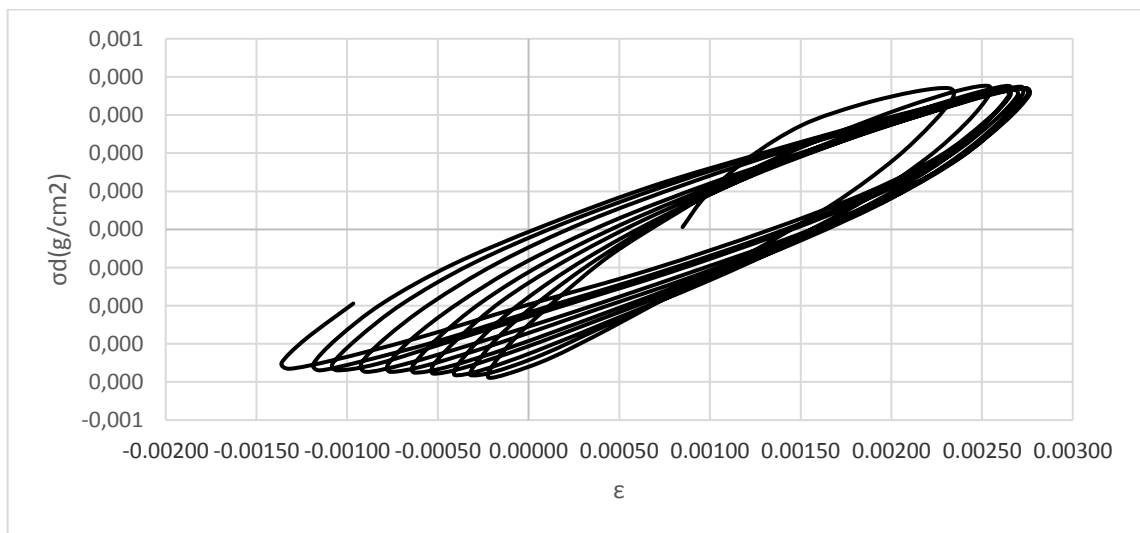
Gráfica 17. Histéresis Esfuerzo σd vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,04KN



Fuente: Propia

Se obtienen los ciclos de histéresis con la aplicación de una carga de 0,08KN en equipo triaxial dinámico para una señal sinusoidal a una frecuencia de 1Hz, como sigue en la gráfica 18.

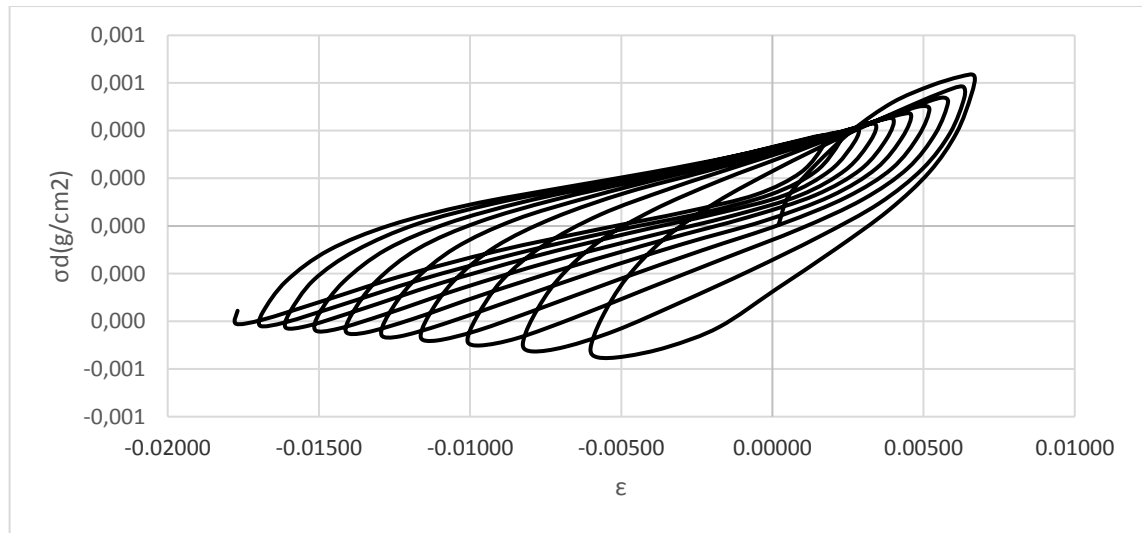
Gráfica 18. Histéresis Esfuerzo σd vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,08KN



Fuente: Propia

Se obtienen los ciclos de histéresis con la aplicación de una carga de 0,16KN en equipo triaxial dinámico para una señal sinusoidal a una frecuencia de 1Hz, como sigue en la gráfica 19.

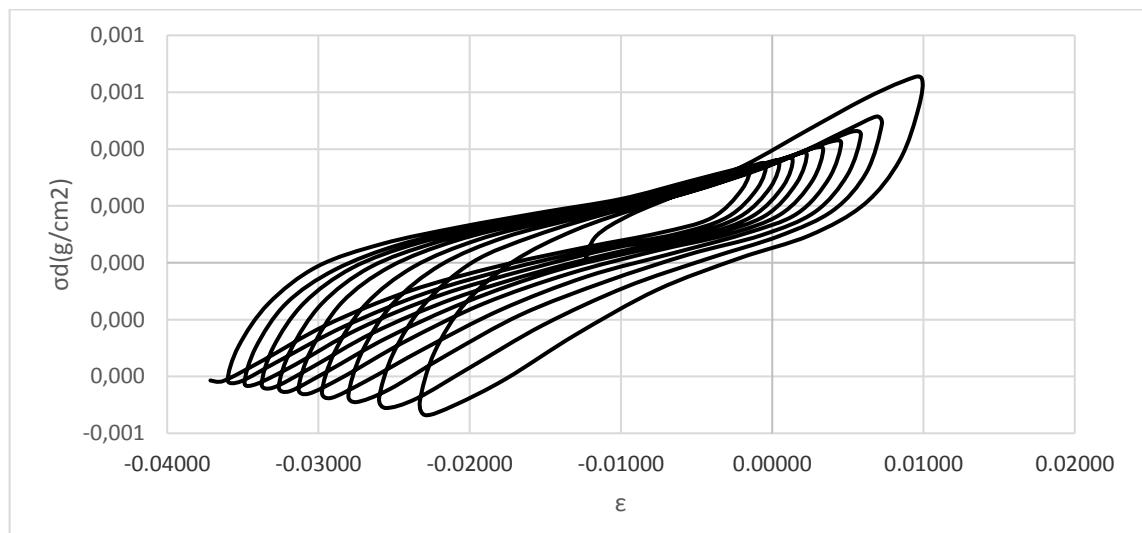
Gráfica 19. Histéresis Esfuerzo σ_d vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,16KN



Fuente: Propia

Se obtienen los ciclos de histéresis con la aplicación de una carga de 0,25KN en equipo triaxial dinámico para una señal sinusoidal a una frecuencia de 1Hz, como sigue en la gráfica 20.

Gráfica 20. Histéresis Esfuerzo σ_d vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,25KN

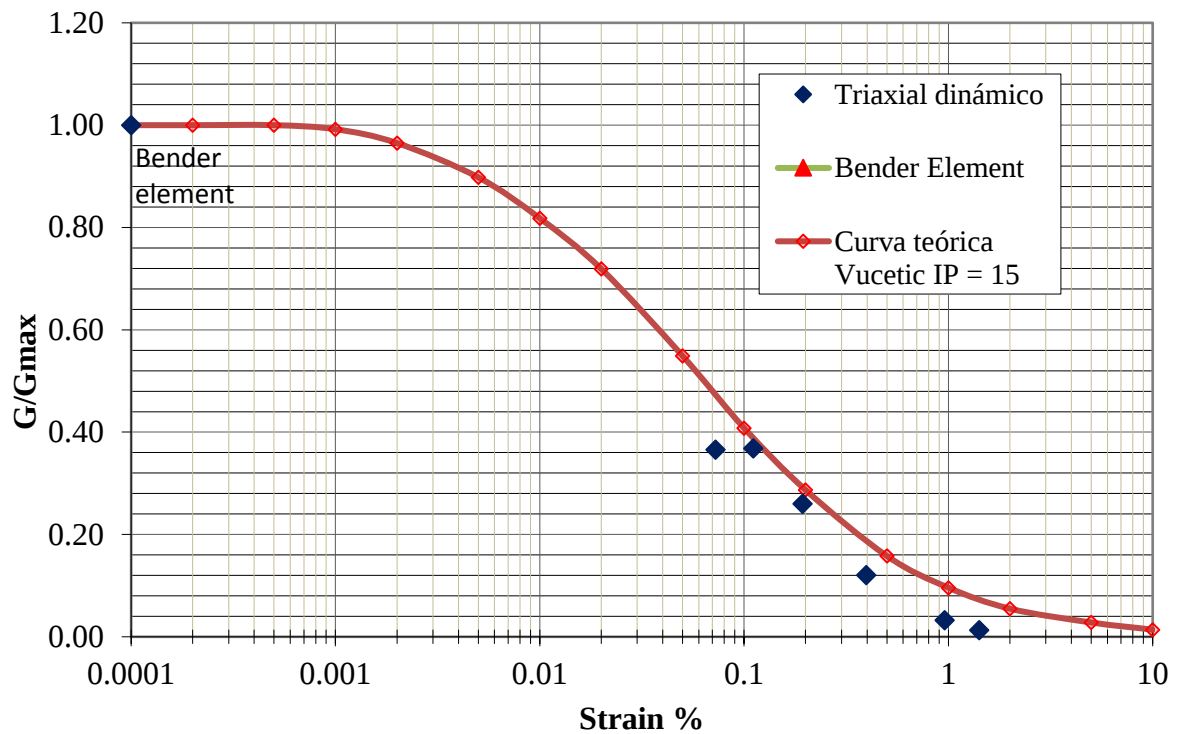


Fuente: Propia

El comportamiento del ciclo histerético se forma debido a los ciclos de carga-descarga que realiza el equipo para un comportamiento de tensión y compresión del suelo. En las gráficas 15-20 se observa ciclo a ciclo la inclinación de los bucles

histeréticos con cada incremento de carga y la degradación del módulo de elasticidad.

Gráfica 21. Curva de degradación del módulo de corte para triaxial con señal convencional

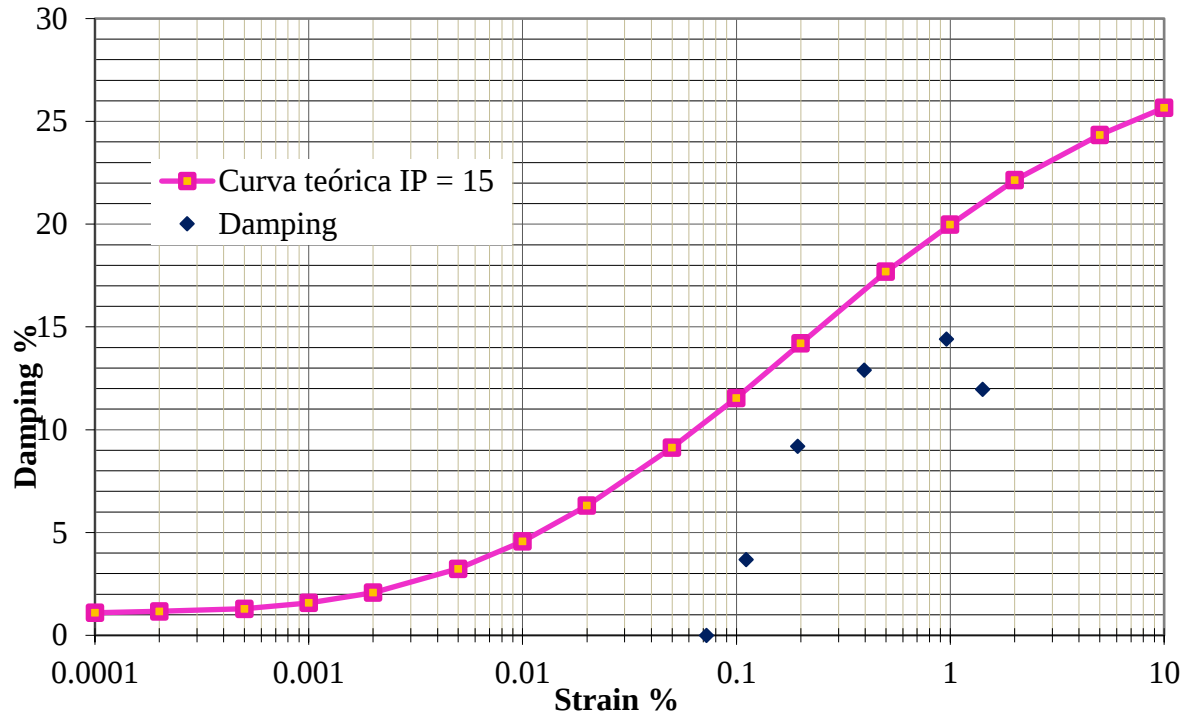


Fuente: Propia

Los resultados de los ensayos de laboratorio obtenidos para módulo de corte se comparan con la curva teórica propuesta por Vucetic para un índice de plasticidad de 15, con relación a esta, se encuentra similitud en la tendencia de la curva, lo que se traduce en una baja degradación del módulo de corte para la arcilla evaluada.

En la gráfica 31, se muestra la curva de relación de amortiguamiento teórica y los puntos hallados con el ensayo triaxial cíclico empleando la señal convencional.

Gráfica 22. Curva de amortiguamiento para triaxial con señal convencional



Fuente: Propia

Tabla 21. Resumen caracterización dinámica

Strain Yc %	E (Mpa)	G (Mpa)	G/Gmax	D %
0.0001	181.203	63.097	1.000	-
0.0725	66.263	23.074	0.366	0.003
0.1110	66.807	23.263	0.369	3.695
0.1930	47.182	16.429	0.260	9.195
0.3962	21.887	7.621	0.121	12.900
0.9583	5.856	2.039	0.032	14.415
1.4164	2.360	0.822	0.013	11.980

Fuente: Propia

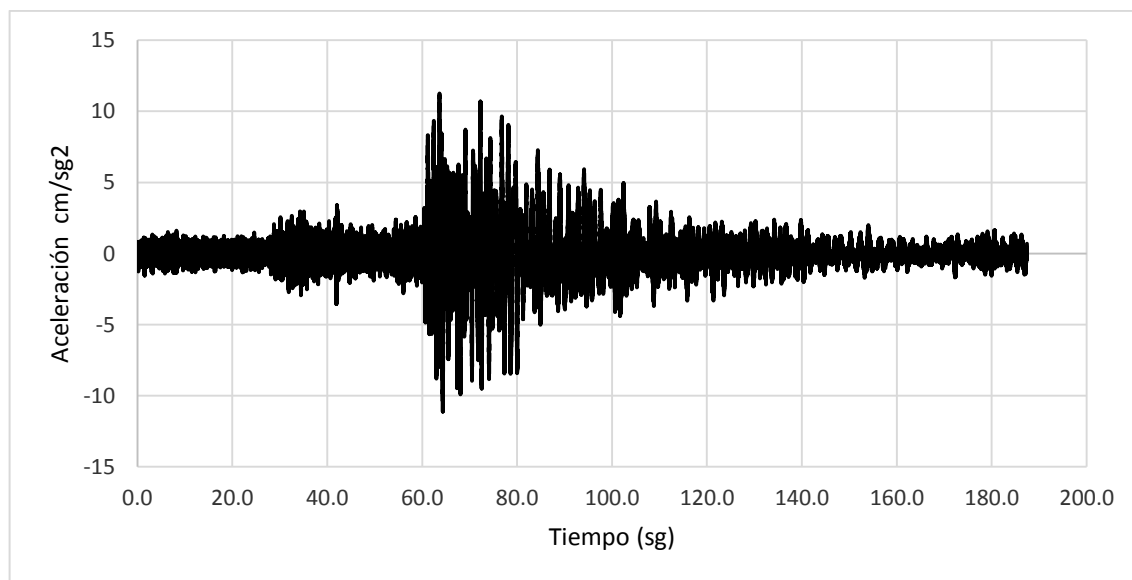
7.4. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DINÁMICOS SISMO MESA DE LOS SANTOS, SANTANDER

Por medio de procesos iterativos se obtuvo el desplazamiento vs. tiempo correspondientes a la señal sismogénica, datos que fueron utilizados para conocer el comportamiento del suelo arcilloso reconstituido ante la fuente sísmica.

7.4.1. USO DE HOJA ELECTRÓNICA EERA PARA CONOCER DESPLAZAMIENTOS DEL SISMO

Para la representación del registro sismogénico del presente estudio, se tomó la señal en el sentido con mayor desplazamiento reportado por el sismógrafo tipo ETNA, ubicado en el Servicio Geológico colombiano CBOG1, como se muestra en la gráfica 23.

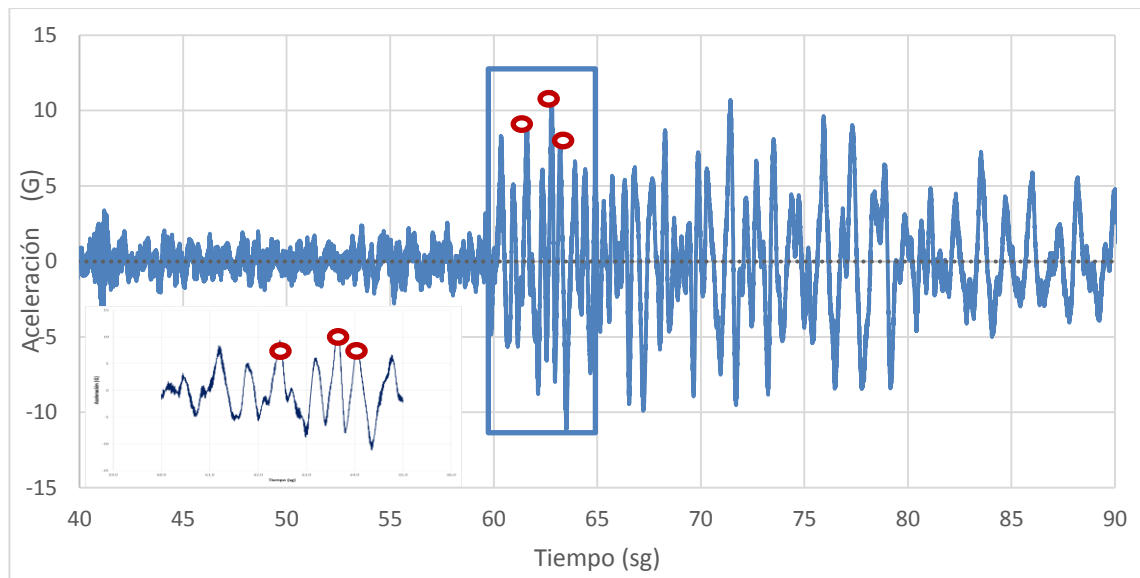
Gráfica 23. Registro acelerógrafo sentido N-S



Fuente: Propia

Se analiza el registro del sismo Mesa de los Santos ocurrido el 10 de marzo del 2015, tomando los puntos más representativos del sismo para un rango de tiempo de 5 segundos, gráfica 24.

Gráfica 24. Registro sismogénico Mesa de los Santos Aceleración Vs tiempo

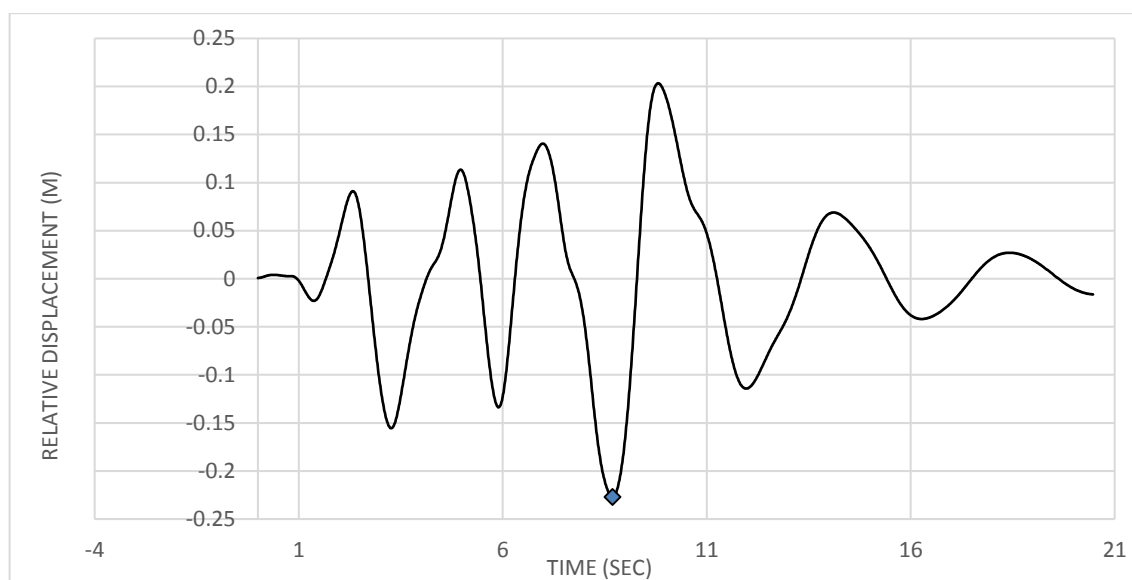


Fuente: Propia

Debido a que el funcionamiento del equipo triaxial para prueba dinámica está en función de los desplazamientos y que las unidades de medida de aceleración de los datos reportados por los acelerógrafos se expresan en Gales (G), se emplearon los datos sin corrección correspondientes a los 5 segundos representativos. A partir de esto y con el fin de obtener los desplazamientos se hace una relación G/g como parámetro de entrada para la hoja electrónica EERA, el procedimiento para el manejo de los datos se aclara en el Anexo D.

Respecto a lo anterior, se obtuvo por medio de procesos iterativos de cálculo, la gráfica de desplazamiento versus tiempo que facilita la implementación de la señal para la prueba dinámica en equipo triaxial. En la gráfica 25, se presentan los resultados arrojados por la hoja de cálculo EERA.

Gráfica 25. Desplazamiento relativo EERA



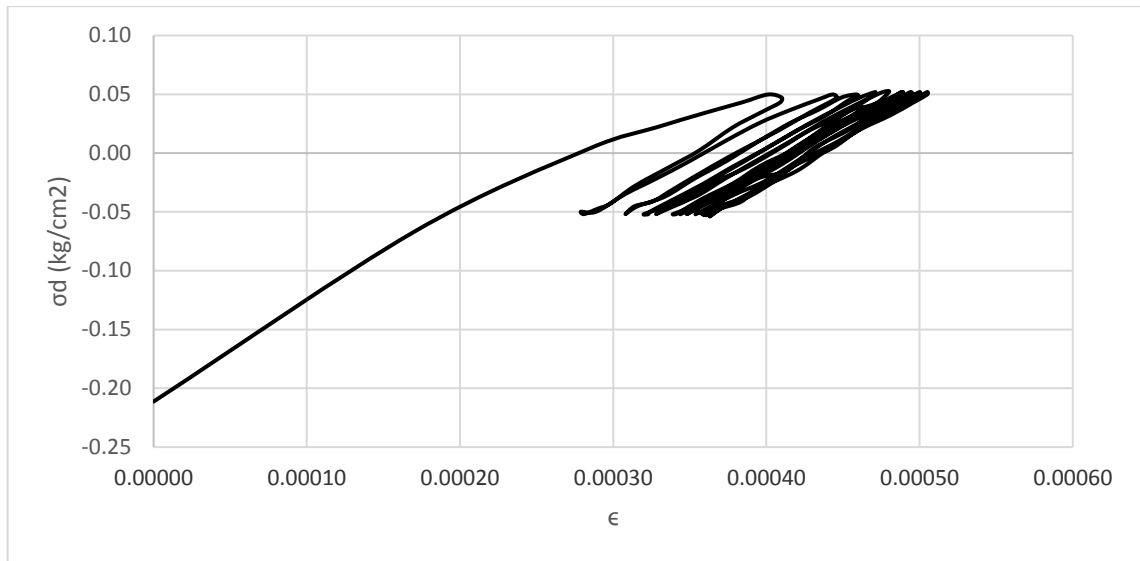
Fuente: Hoja electrónica EERA

Posteriormente, se normalizan los desplazamientos obtenidos para el rango de desplazamiento permitidos por el equipo Advanced Dynamic Triaxial Testing System, que corresponde a 90mm, el procedimiento y los datos respectivos de la normalización se adjuntan en el anexo D.

7.4.2. PRUEBAS TRIAXIALES CÍCLICAS CON SEÑAL DE SISMO

Se obtienen los ciclos de histéresis con la aplicación de una carga de 0,01kN en equipo triaxial dinámico para una señal definida por la hoja electrónica representativa del sismo ocurrido en el municipio de Mesa de los santos Santander el 10 de marzo del 2015, como sigue en la gráfica 26.

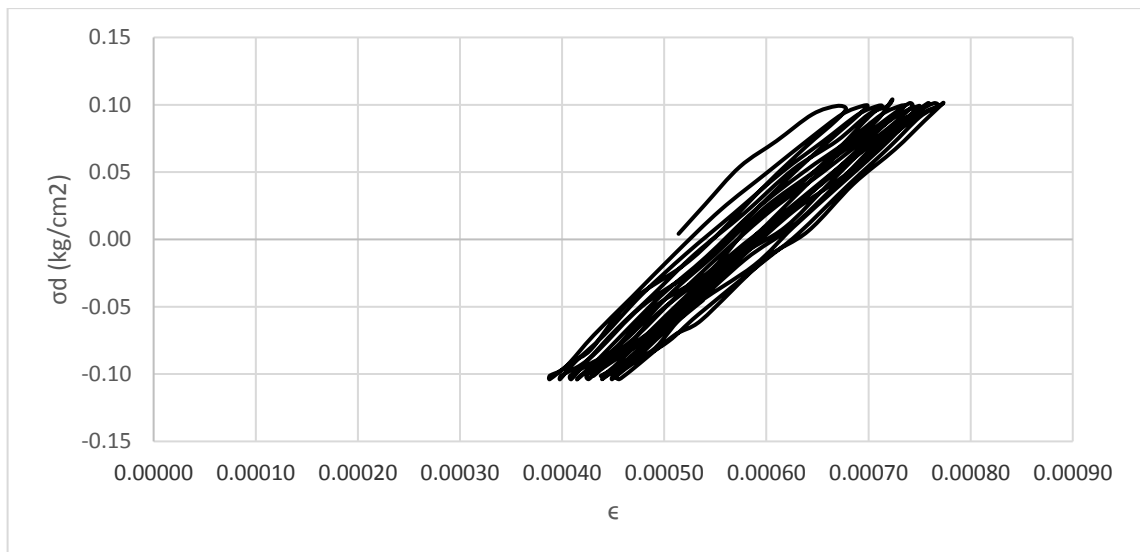
Gráfica 26. Histéresis Esfuerzo σ_d vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,01KN Sismo Mesa de los Santos



Fuente: Propia

Se obtienen los ciclos de histéresis con la aplicación de una carga de 0,02KN en equipo triaxial dinámico para una señal definida por la hoja electrónica representativa del sismo ocurrido en el municipio de Mesa de los santos Santander el 10 de marzo del 2015, como sigue en la gráfica 27.

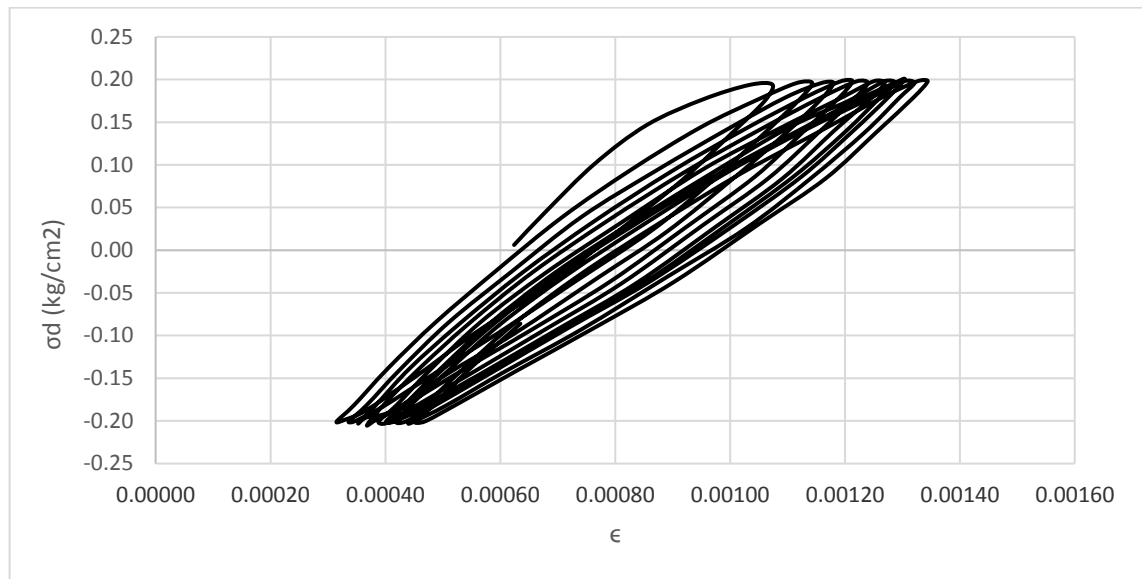
Gráfica 27. Histéresis Esfuerzo σ_d vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,02KN Sismo Mesa de los Santos



Fuente: Propia

Se obtienen los ciclos de histéresis con la aplicación de una carga de 0,04KN en equipo triaxial dinámico para una señal definida por la hoja electrónica representativa del sismo ocurrido en el municipio de Mesa de los santos Santander el 10 de marzo del 2015, como sigue en la gráfica 28.

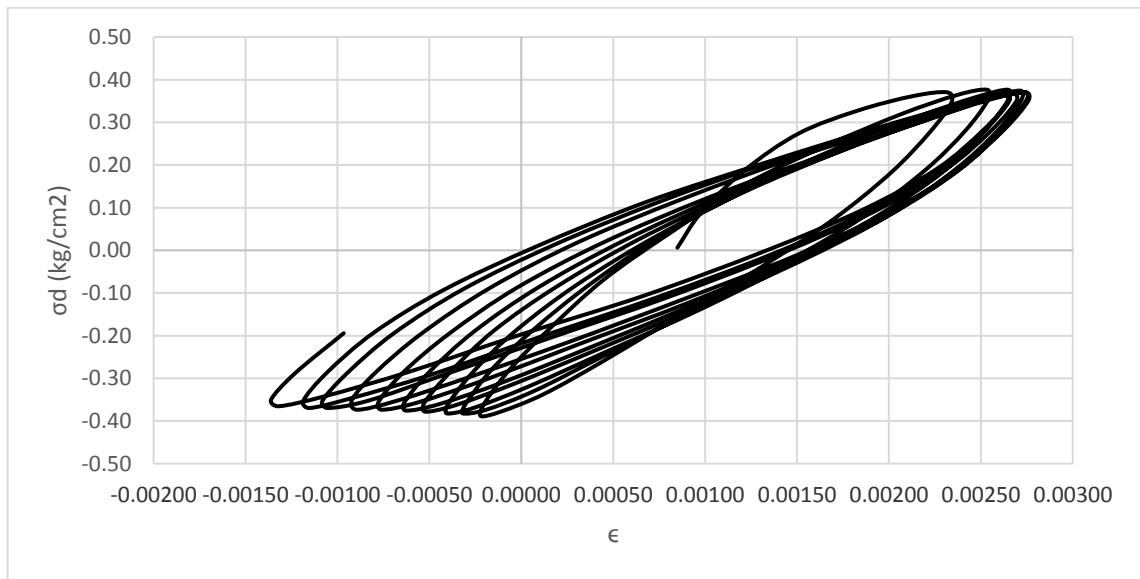
Gráfica 28. Histéresis Esfuerzo σ_d vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,04KN Sismo Mesa de los Santos



Fuente: Propia

Se obtienen los ciclos de histéresis con la aplicación de una carga de 0,08KN en equipo triaxial dinámico para una señal definida por la hoja electrónica representativa del sismo ocurrido en el municipio de Mesa de los santos Santander el 10 de marzo del 2015, como sigue en la gráfica 29.

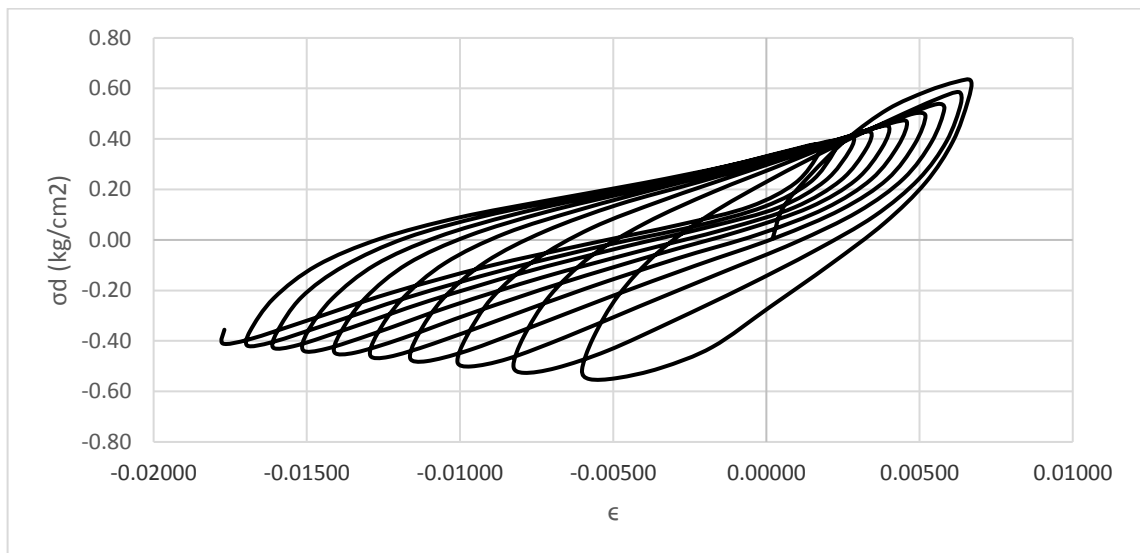
Gráfica 29. Histéresis Esfuerzo σd vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,08KN Sismo Mesa de los Santos



Fuente: Propia

Se obtienen los ciclos de histéresis con la aplicación de una carga de 0,16KN en equipo triaxial dinámico para una señal definida por la hoja electrónica representativa del sismo ocurrido en el municipio de Mesa de los santos Santander el 10 de marzo del 2015, como sigue en la gráfica 30.

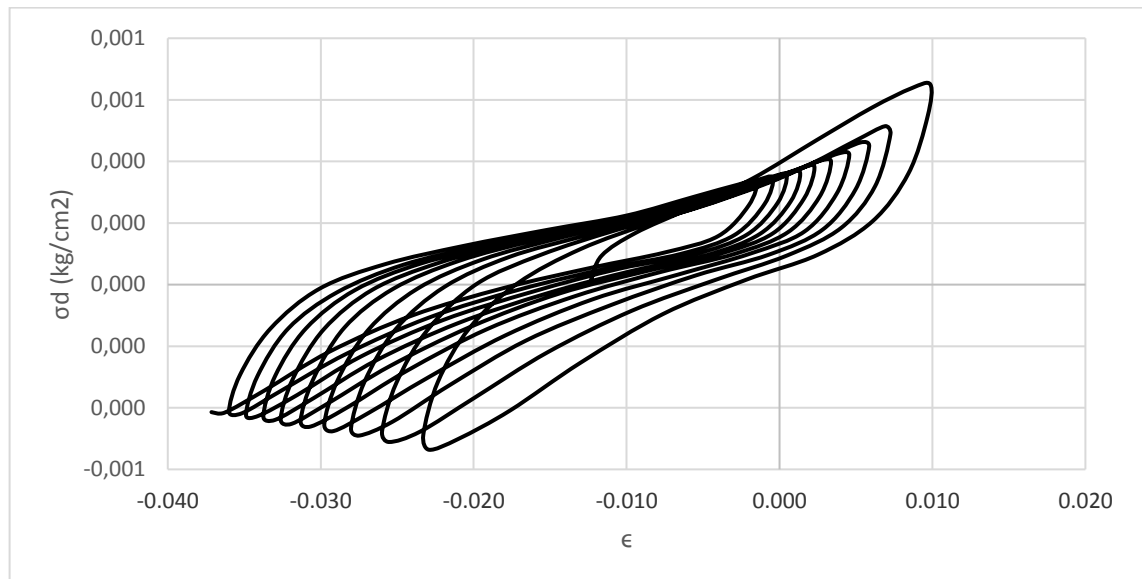
Gráfica 30. Histéresis Esfuerzo σd vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,16KN Sismo Mesa de los Santos



Fuente: Propia

Se obtienen los ciclos de histéresis con la aplicación de una carga de 0,25KN en equipo triaxial dinámico para una señal definida por la hoja electrónica representativa del sismo ocurrido en el municipio de Mesa de los santos Santander el 10 de marzo del 2015, como sigue en la gráfica 31.

Gráfica 31. Histéresis Esfuerzo σ_d vs deformación ϵ - Incremento de carga 0,25KN Sismo Mesa de los Santos



Fuente: Propia

Los ciclos histeréticos generados en la prueba triaxial cíclica se pueden estar en términos de esfuerzo desviador versus deformación axial, donde su pendiente determina el módulo elástico E , en contraste, el cálculo del módulo de cortante G y el amortiguamiento se define como pendiente de la gráfica del esfuerzo cortante τ en función de la deformación cortante cíclica γ_c .

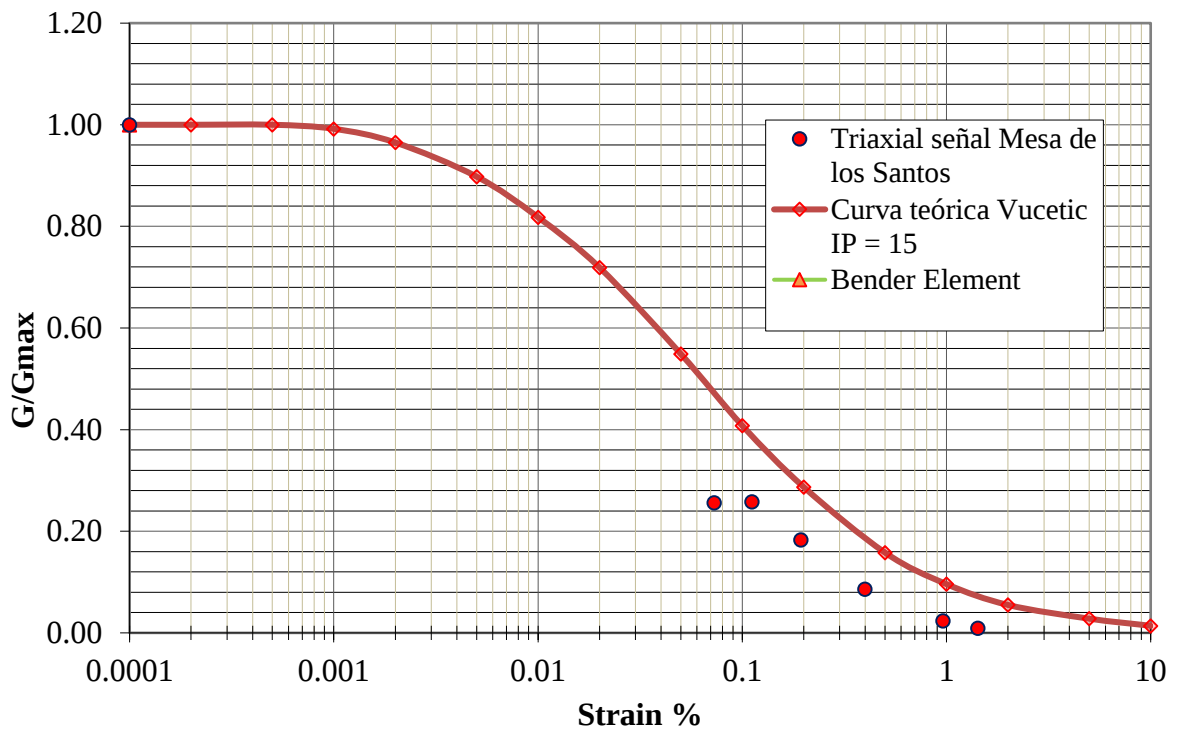
7.4.3. ANÁLISIS DE PARÁMETROS DINÁMICOS

Evaluando los ciclos de histéresis vs deformación por corte obtenidos experimentalmente, para cada incremento de carga, se halló un valor de módulo de corte para una arcilla caolinita con características representativas de suelos

cohesivos de la ciudad de Bogotá, a partir de los cuales se realizó una normalización del módulo de corte o rigidez, encontrando la curva de degradación del módulo, además de esto, se encontró la curva de relación del amortiguamiento para este suelo, todo lo anterior para rangos de deformación por corte $\gamma_c \%$ de entre $10^{-2} - 2$ correspondientes a las pruebas triaxiales cíclicas y el valor de deformación por corte $\gamma_c \% = 10^{-4}$ para la prueba de bajas deformaciones Bender Element . Lo anterior, se desarrolló tanto para la señal convencional o sinusoidal del equipo GDS y para la señal característica del sismo de estudio tomada de los resultados para el análisis de respuesta de sitio del EERA.

En la gráfica 32, se muestra la curva de degradación, el módulo de corte teórica para índice de plasticidad de 15 y los puntos hallados con el ensayo triaxial cíclico y ensayo Bender. |

Gráfica 32. Curva de degradación del módulo de corte para triaxial con señal representativa sismo Mesa de los Santos



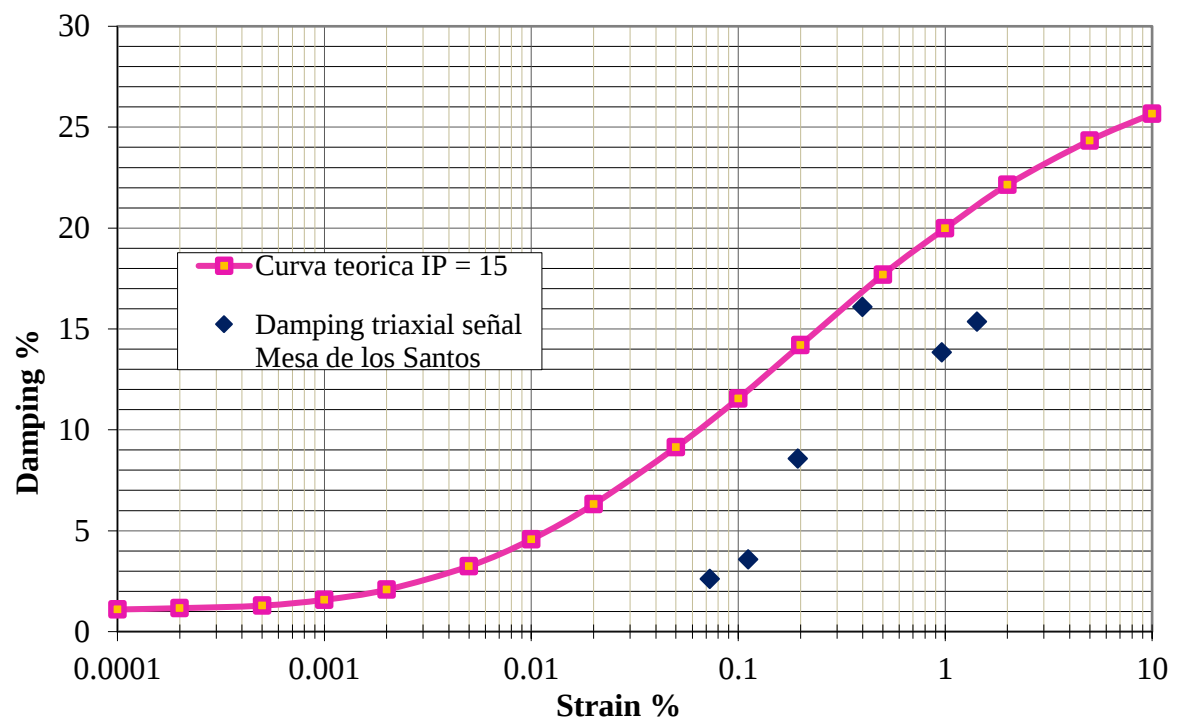
Fuente: Propia

Adicionalmente, se realiza la comparación tanto del módulo de corte y la relación de amortiguamiento con las curvas teóricas citadas anteriormente en el numeral 5.1.4.1., para estudiar el comportamiento de los parámetros dinámicos de la muestra de suelo sometida a dos señales de análisis.

La normalización de las curvas de degradación se hizo empleando el ensayo Bender Element obteniendo el valor de $G_{\max}$ y relacionándolo con cada punto adquirido del ensayo triaxial cíclico.

En la gráfica 33, se muestra la curva de relación de amortiguamiento teórica y los puntos hallados con el ensayo triaxial cíclico empleando la señal de diseño.

Gráfica 33. Curva de amortiguamiento para triaxial con señal representativa sismo Mesa de los Santos



Fuente: Propia

Se presenta en la Tabla 22, el resumen de la prueba triaxial cíclica con la aplicación de la señal representativa del sismo, donde se evaluó el módulo de elasticidad E , módulo de corte G y relación de amortiguamiento D .

Tabla 22. Resumen propiedades dinámicas sismo

Strain Yc %	E (Mpa)	G (Mpa)	G/Gmax	D %
0.0001	259.619	90.002	1.000	
0.0725	66.463	23.041	0.256	2.619
0.1110	66.983	23.221	0.258	3.584
0.1930	47.564	16.489	0.183	8.569
0.3962	22.301	7.731	0.086	16.099
0.9583	6.183	2.144	0.024	13.843
1.4164	2.427	0.841	0.009	15.359

Fuente: Propia

8. CONCLUSIONES

Se establecen las propiedades físico- mecánicas mediante el desarrollo de ensayos de laboratorio, donde se concluye, que las muestras reproducidas en laboratorio corresponden a un suelo arcilloso con presencia de limos, cuyas propiedades son semejantes a la de una arcilla caolinita.

Se caracterizaron las propiedades dinámicas para una muestra de caolinita reconstituida en el laboratorio, sometida a la señal estándar del equipo triaxial dinámico GDSELAB de la Universidad La Gran Colombia, encontrando para cada nivel de incremento de carga una disminución del módulo de corte y aumento de la relación de amortiguamiento, esto como función de la deformación por corte, además, se halló el módulo de elasticidad para esta arcilla.

Con el empleo de la hoja de cálculo EERA se logró la representación del sismo ocurrido en Mesa de los Santos Santander el 10 de marzo del 2010 en cámara triaxial cíclica, haciendo una evaluación de parámetros de aceleración-tiempo hasta llegar a términos de desplazamiento-tiempo para el caso de una fuente de señal lejana. Empleando los datos de aceleración tomados por la estación ubicada en el Servicio Geológico Colombiano. De esta manera, lograr una aproximación teórica del comportamiento dinámico de una muestra reconstituida con valores típicos para arcillas en condiciones saturadas para profundidades de 6m.

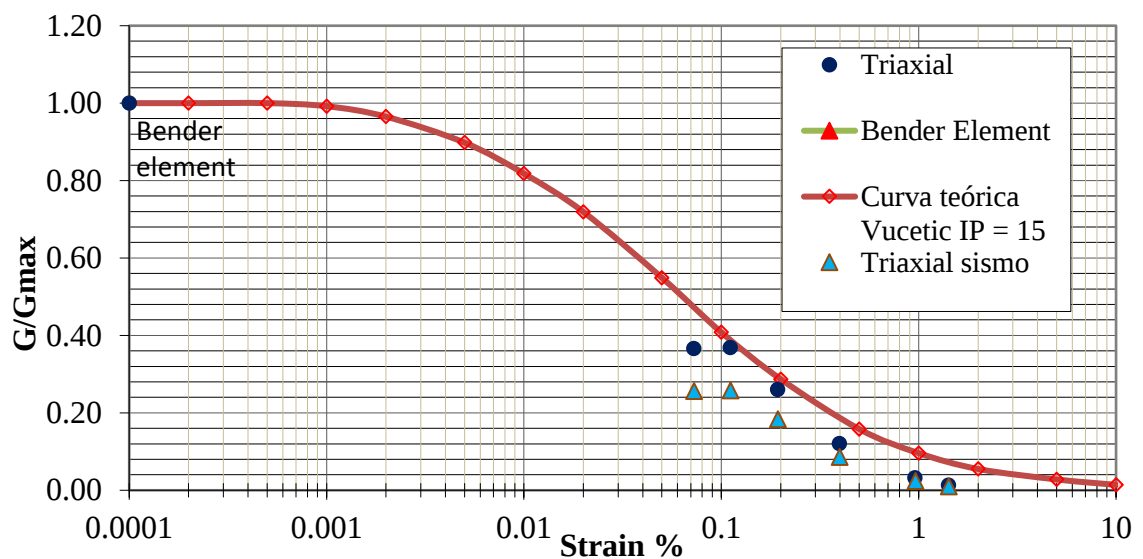
Se analizó el comportamiento del suelo arcilloso reconstituido en laboratorio sometido a una fuente sísmica conocida en equipo triaxial cíclico con características representativas de suelos típicos de la ciudad de Bogotá, hallando el siguiente comportamiento en la degradación del módulo de corte y variación de la relación de amortiguamiento

Los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio corresponden únicamente para un suelo reconstituido en laboratorio bajo las condiciones específicas detalladas en el anexo A, los resultados de estos ensayos pueden variar con

relación al tipo de muestras extraídas in situ y por tanto, la variación de estas propiedades.

Podemos observar en la gráfica 34, la curva teórica de amortiguamiento para características similares de la arcilla reproducida en el laboratorio, del mismo modo observamos como la fuente sísmica simulada en el ensayo dinámico muestra que para valores de deformación entre 0.1 y 1 se degrada el módulo cortante con respecto a los datos obtenidos en el ensayo inicial, aproximadamente se degrada en un 50% con respecto a triaxial dinámico.

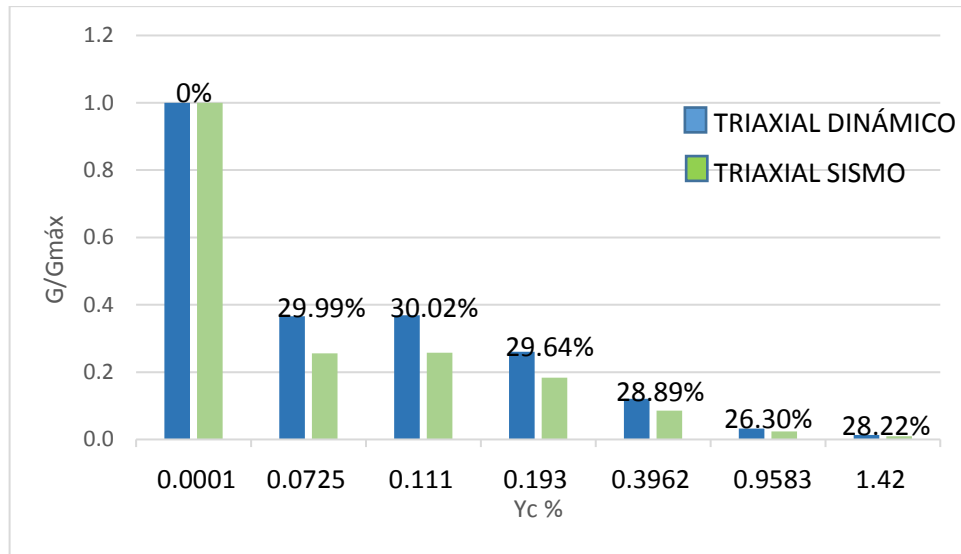
Gráfica 34. Comportamiento del módulo de corte



Fuente: Propia

Se presentan gráficos de barras en donde se realiza un análisis de los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización de las muestras de caolín y los hallados con la aplicación de la fuente representativa del sismo de estudio, en la degradación de los parámetros dinámicos. En la Grafica 35, se muestran los porcentajes de degradación del módulo de corte con la señal del sismo respecto a la caracterización, respectivamente para cada incremento de carga.

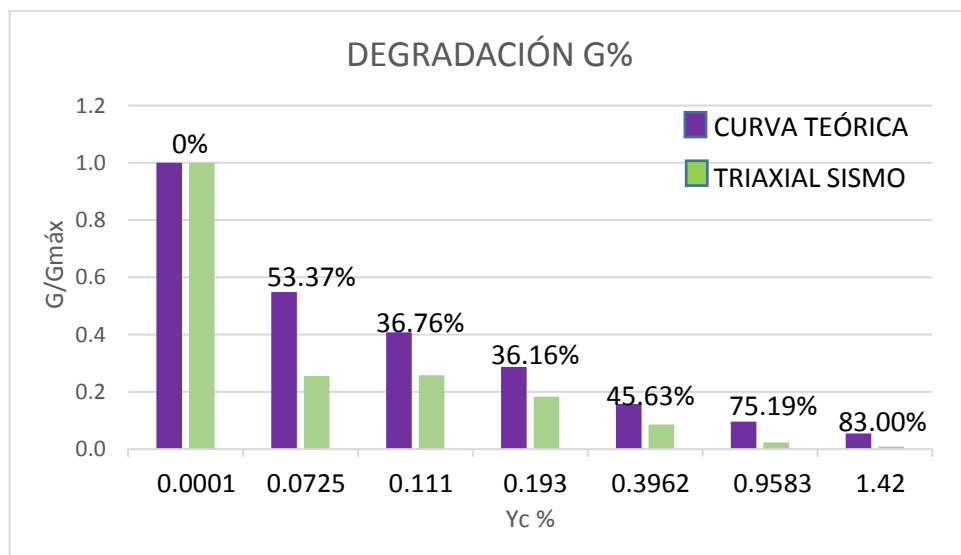
Gráfica 35. Porcentaje de degradación del módulo cortante respecto a la caracterización



Fuente: Propia

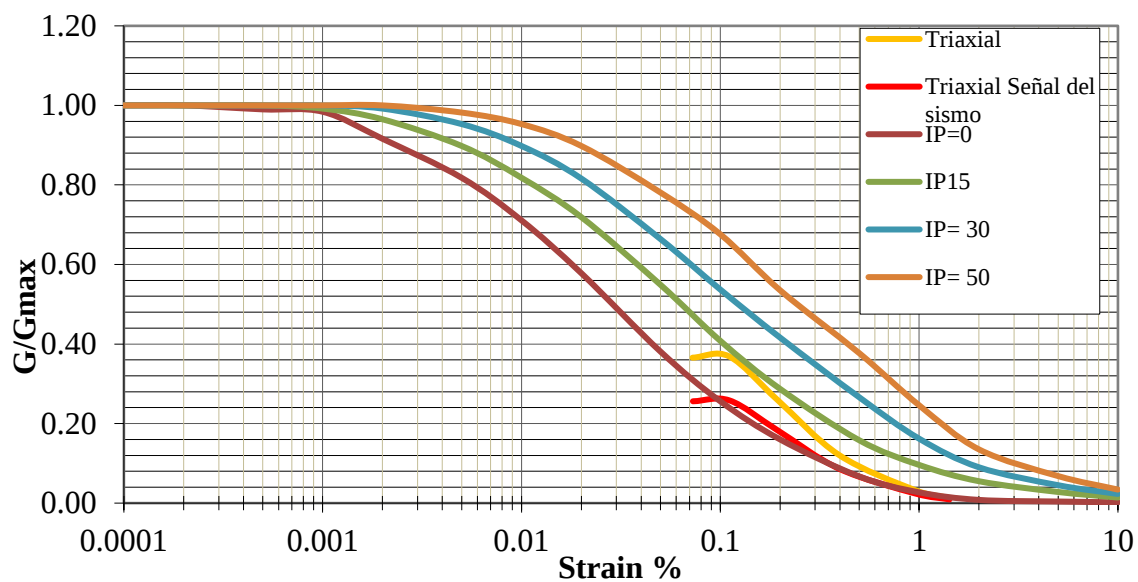
En la Grafica 36, se muestran los porcentajes de degradación del módulo de corte con la señal del sismo respecto a las curvas teóricas de referencia.

Gráfica 36. Porcentaje de degradación del módulo cortante respecto a curvas teóricas



Fuente: Propia

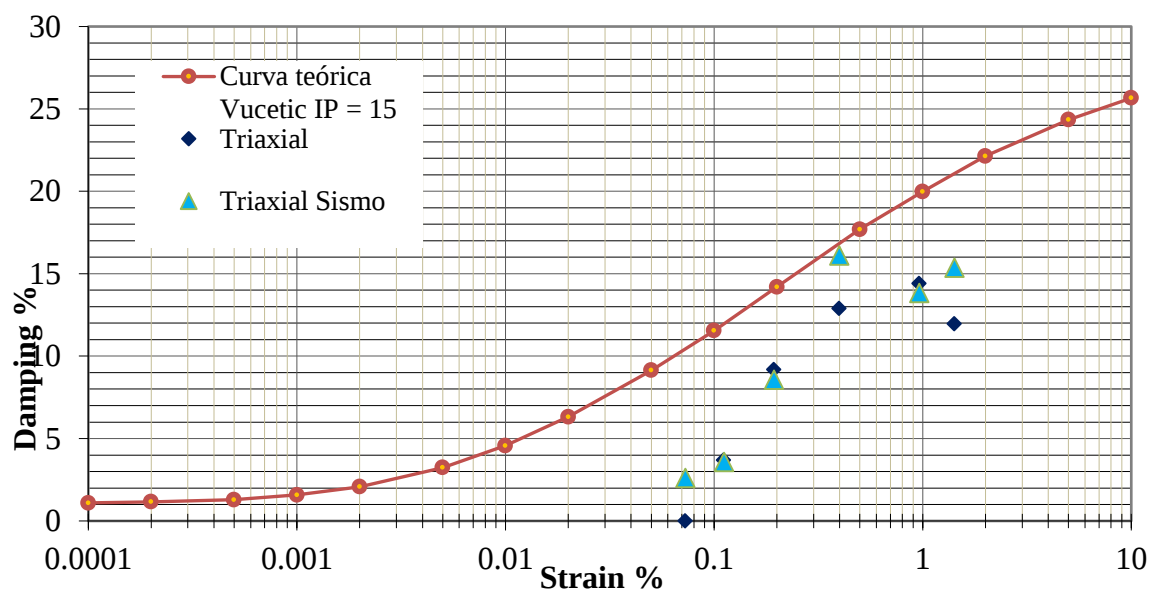
Gráfica 37. Comparación curvas obtenidas con curvas teóricas de degradación $G/G_{\max}$



Fuente: Propia

En la gráfica 38 se muestra el comportamiento de la relación de amortiguamiento con el cambio de señal para la prueba dinámica.

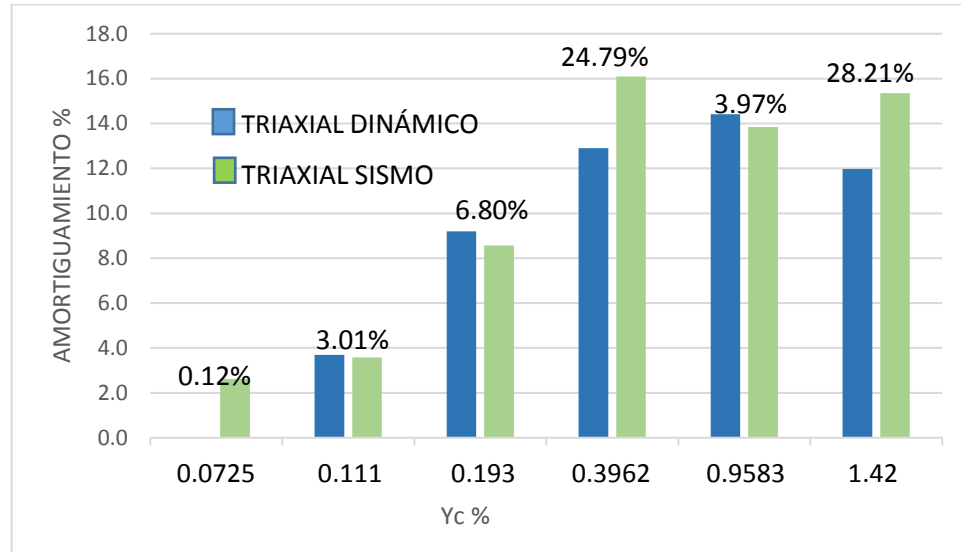
Gráfica 38. Comportamiento de la relación de amortiguamiento respecto a la caracterización



Fuente: Propia

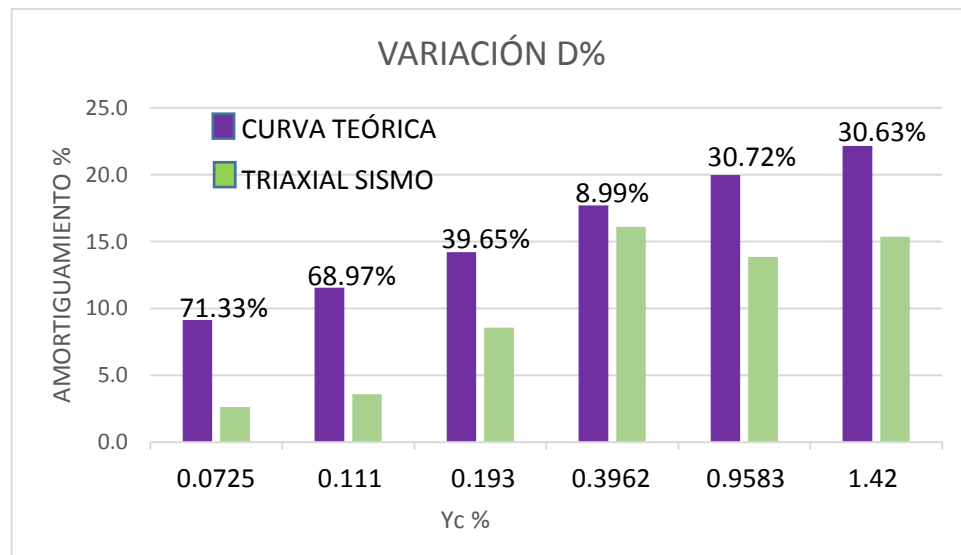
En la Grafica 39, se muestran los porcentajes de degradación de la relación de amortiguamiento con la señal del sismo respecto a la caracterización para cada incremento de carga y en la Gráfica 40, respecto a las curvas teóricas.

Gráfica 39. Porcentaje de variación de la relación de amortiguamiento respecto a la caracterización



Fuente: Propia

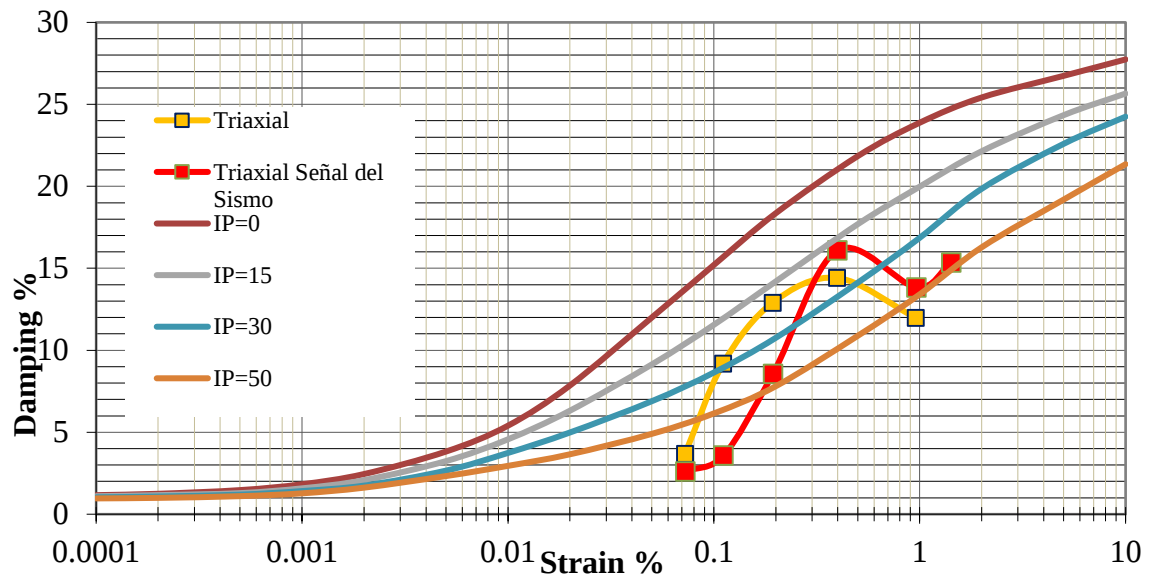
Gráfica 40. Porcentaje de variación de la relación de amortiguamiento respecto a curvas teóricas



Fuente: Propia

Se hace la comparación de los resultados obtenidos tanto en la caracterización dinámica como con los arrojados por las pruebas con la señal del sismo y se observa el comportamiento de estas curvas evidenciando que la tendencia lograda no discrepa de las teóricas, pero se puede lograr mejores resultados realizando mayor número de pruebas.

Gráfica 41. Comparación curvas obtenidas con curvas teóricas de relación de amortiguamiento



Fuente: Propia

9. RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer un análisis detallado de los datos suministrados en la prueba bender element, además de consultar la página web de los fabricantes en donde suministran varios artículos relacionados con la interpretación de datos y herramientas que facilitan una mejor comprensión de los resultados.
- Cabe resaltar que la prueba bender element se realiza con la incorporación de dos aditamentos en el equipo triaxial, por tanto se debe ser metódico en el momento de alinear los top-cap para que éste se encuentre en fase y pueda generar resultados.
- Realizar un análisis detallado respecto a los efectos de sitio evaluando espectros de amplificación de Fourier, haciendo uso de la hoja electrónica EERA, además de sacar un mayor provecho de los resultados que esta aplicación brinda.
- Se aconseja corregir o tratar los datos obtenidos por la red de acelerógrafos de Colombia con el objetivo de obtener una información más óptima a la hora de trabajar. Esta información puede tomarse de acuerdo a la zona o distancia epicentral por lo cual tomar otras fuentes de acelerógrafos diferentes a RNAC será posible en la medida en que se requiera la información.
- Es importante ser cuidadosos en el proceso de reproducibilidad de las muestras y en el montaje de los especímenes en el equipo triaxial. Adicional a esto tener las nociones básicas en cuanto a la operación del equipo triaxial GSDLAB para no incurrir en errores experimentales.
- Para ampliar el presente estudio se aconseja realizar mayor número de pruebas triaxiales cíclicas realizando la variación de parámetros como la frecuencia de aplicación de la carga, aumento del nivel de confinamiento de las muestras, rigidez de la membrana e incluso ensayos bajo deformación controlada entre otros.
- El diseño de estructuras seguras y salvaguardar la vida de las personas se logra gracias al estudio detallado de las características dinámicas de los suelos ante sollicitaciones dinámicas, por lo cual es de importancia seguir analizado estos comportamiento sísmicos en relación al suelo y las teorías que lo sustentan.
- El uso de modelos avanzados, hiperbólicos y equivalentes deben ser estimados para la respectiva realización de cada investigación dependiendo del alcance de cada estudio.

BIBLIOGRAFÍA

ALARCÓN, A. et al. Shear modulus and cyclic undrained behavior of sand. Soils and foundations. 1989.

ALCALDIA MAYOR DE BOGOTÁ. Decreto 523. Por el cual se adopta la Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C. Descripción de las zonas de respuesta sísmica. 2010. p 7-8.

ASTM D3999. Standard test methods for the determination of the modulus and damping properties of soils using the cyclic triaxial apparatus. Summary of Test Method. p.2.

BRAND, José. GONZÁLEZ, Rafael. ORTIZ, Hugo. Métodos de ensayo para la determinación de las principales propiedades dinámicas de los suelos del Salvador. Universidad del Salvador. 2009.

DIAZ, Fernando. et al. Modelo de comportamiento dinámico de arcillas blandas. Universidad Nacional de Colombia. 2007. p. 1-17.

GDS INSTRUMENTS. Advanced Dynamic Triaxial Testing System. World leaders in the manufacture of laboratory systems for soil & rock. Technical Specification. p 1.

GONZÁLEZ, Claudia. et al. Miguel. Estimación de Propiedades Dinámicas de Arcillas. Revista de Ingeniería Sísmica No. 84 1-23 (2011)

ISHIBASHI, I. ZHANG, X. Unified dynamic shear modulo and damping ratios of sand and clay. Soil and foundations. 1993.

KRAMER. S. Geotechnical Earthquake Engineering. University of Washington. Representation of stress conditions by the Mohr circle. 1996. p. 184-190.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente. NSR-10. Bogotá D.C. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010. A.2.3.

Red Nacional De Acelerógrafos. Consulta general. 20150310205544. Santander/lossantos. Tomado el 15 de abril de 2016. [En línea]. <http://goo.gl/TPNxaj>.

RODRÍGUEZ, Montse. Caracterización de la respuesta sísmica de los suelos, aplicación a la ciudad de Barcelona. Universidad de Barcelona. Facultad de geología. 2005. Capítulo 2. p. 12.

ROMO, M and OVANDO, S. Modelling the Dynamic Behavior of Mexican Clays. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering. 1996.

SEED, H. and IDRISS, I. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses. University of California. Berkeley. 1970.

TORRES, M. Utilización de los métodos no destructivos -MND- para determinar propiedades físico-mecánicas en rocas sedimentarias. Bogotá, 2005. Trabajo de grado (M.I.G.). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ingeniería civil. p 25.

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Mapa de Zonificación Geotécnica de la Ciudad de Bogotá. Proyecto de microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá D. C. Departamento de Ingeniería Civil. 1996.

UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA. Department of civil Engineering. Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses. Manual.

VIGGIANI, G. and ATKINSON, H. Interpretation of bender element tests. Géotechnique. 1995. 149- 154.

VUCETIC, M. DOBRY, R. Effect of soil plasticity on cyclic response. Journal of Geotechnical engineering. 1991.

VUCETIC, M. Soil properties and seismic response. University of California at los Angeles. Earthquake Engineering. Tenth.

ORTIZ, María. et al. Modelo unificado de curvas de degradación del módulo cortante en arenas del río Guayuriba. Universidad Nacional de Colombia. 2013. DYN. 81. p. 77-84.

ANEXOS

ANEXO A. REPRODUCIBILIDAD DE MUESTRAS

ANEXO B. PROCEDIMIENTO DE MANEJO EQUIPO TRIAXIAL DINÁMICO

**ANEXO C. PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN SOTFWARE BENDER
ELEMENT**

**ANEXO D. PROCEDIMIENTO PARA INTRODUCIR DESPLAZAMIENTO EN EL
EQUIPO**