

**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE UN TERRAPLÉN SOMETIDO A CARGA
CÍCLICA**

**JHOANA ALEXANDRA OCHOA ALDANA
RAFAEL ENRIQUE VEGA MEDINA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE UN TERRAPLÉN SOMETIDO A CARGA
CÍCLICA**

**JHOANA ALEXANDRA OCHOA ALDANA
RAFAEL ENRIQUE VEGA MEDINA**

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director

**JORGE ALEJANDRO MENDOZA RIZO
Doctor en Ingeniería Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

A Dios por permitirme lograr esta meta de vida y por siempre darme fuerzas cuando creí no poder seguir, por permitir compartir este logro con mi familia, por hacer de mí una persona más fuerte cada día.

A mi familia por ser el motor de mi vida, por acompañarme en este proceso, por su incondicional apoyo y amor.

A mi mami Esperanza por enseñarme a ser una mujer guerrera y con carácter, por su infinito amor y ternura que siempre estuvo ahí para apoyarme en todo, gracias por enseñarme a afrontar todo lo que se venga con la mejor actitud y con la fe puesta en Dios.

A mi papi Jaime por su infinito amor y comprensión, por enseñarme a levantarme cada día y saber que cada caída es una oportunidad para levantarme y triunfar, por enseñarme a que las oportunidades son para aprovecharlas en el momento y buscarlas que si son para uno llegarán.

A mi hermano Jhonatan por darme ese ejemplo que los sueños se cumplen si uno lucha por ellos, por darme ánimo cuando lo necesite y por su amor incondicional.

A mi hermana Ximena por enseñarme el valor de la incondicionalidad, por ser mi confidente, mi mejor amiga de vida, gracias porque en ti siempre encontré una persona con la que podía contar en todo, donde tus palabras y ternura siempre me ayudaron en los momentos de dificultad, gracias por compartir conmigo todos los momentos de felicidad y tristeza.

A Rafael por apoyarme en cada momento que lo necesite y por compartir mis alegrías y tristezas.

A todas las personas que de una u otra manera hicieron parte de este camino y me brindaron su ayuda para continuar, a todos mil gracias y bendiciones.

JHOANA ALEXANDRA OCHOA ALDANA

DEDICATORIA

A DIOS

Por darme cada día de vida con sus afanes, calmas, dificultades, victorias, alegrías y tristezas la vida es siempre un tesoro padre.

A MI HERMANA JACKE

Por apoyarme y quererme tanto de manera incondicional y por creer siempre en mí, eres mi orgullo y mejor ejemplo, esta victoria es 90% tuya marita.

A MI MAMÁ

Por llenarme de amor y calma, gracias por tus oraciones y dulces palabras eres mi motivación y gran ejemplo.

A MI PAPÁ

Por tus palabras de ánimo, palabras de afecto y sabios consejos.

A JHOANA

Por acompañarme y apoyarme en todo este proceso, gracias por siempre estar ahí y compartir mis alegrías y tristezas.

A MIS PROFESORES Y A LA UIS

Por enseñarme y guiarme, son responsables del amor que siento hacia la ingeniería y hacia la universidad Industrial de Santander mi gratitud y cariño serán eternos.

A MI FAMILIA Y AMIGOS

A todos mis familiares, mis hermanos, tíos, primos y amigos que me acompañaron desde la distancia y en la cercanía muchas gracias por su cariño, consejos y buenos deseos están muy bien correspondidos.

A LOS ÁNGELES QUE PARTIERON EN EL CAMINO

Le dedico este triunfo a mi abuela Joselina que nos sigue cuidando desde el cielo, a mi amigo Jhon tirado que pronto partiste al cielo... y a mis primas Lili y Cami que a diario las recuerdo con alegría, los lazos que hacemos en este mundo siempre nos mantienen unidos.

RAFAEL ENRIQUE VEGA MEDINA

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial a Dios por guiarnos hasta donde debemos llegar, al profesor Vladimir Merchán por su guía en este proyecto, a nuestro director Jorge Mendoza por guiarnos en la realización de este proyecto y por aportarnos su sabiduría. A nuestra Alma Máter la Universidad Industrial de Santander por acogernos y brindarnos la oportunidad de llevar a cabo una carrera profesional. Nos llevamos el corazón verde de nuestra amada UIS.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. OBJETIVOS.....	21
1.1 OBJETIVO GENERAL	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
2. METODOLOGÍA	22
2.1 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO.....	22
2.1.1 Granulometría	22
2.1.2 Límites de Atterberg.....	25
2.1.3 Humedad óptima y densidad máxima seca	27
2.2 ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO.....	30
2.2.1 Preparación de las probetas.	30
2.2.2 Ensayo de las probetas.....	31
2.3 FALLA ESTÁTICA	33
2.4 MODELO NUMÉRICO	34
2.4.1 Modelamiento del terraplén.....	35
2.4.2 Modelamiento del suelo bajo el terraplén.....	39
3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	40
3.1 MÓDULO DE RIGIDEZ (G_{sec}).....	40
3.2 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD.....	43
3.2.1 Factor de seguridad estático (Mohr-Coulomb).....	43
3.2.2 Factor de seguridad (HS small)	44
3.2.3 Puntos de falla	48
3.2.4 Variación el módulo de rigidez (G_0) bajo el efecto de la onda.....	52
4. CONCLUSIONES	62

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
BIBLIOGRAFÍA.....	66
ANEXOS.....	68

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Muestra de suelo	22
Figura 2. Lavado de la muestra	23
Figura 3. Curva granulométrica.....	25
Figura 4. Límites de consistencia.....	26
Figura 5. Laboratorio LP	26
Figura 6. Laboratorio LL.....	26
Figura 7. Carta de plasticidad casa grande	27
Figura 8. Ensayo de compactación.....	28
Figura 9. Curva de compactación	29
Figura 10. Probetas de ensayo	30
Figura 11. Molde de compactación	31
Figura 12. Montaje de la muestra	31
Figura 13. Envolvente Mohr-Coulomb	34
Figura 14. Terraplén modelado.....	35
Figura 15. Esfuerzo axial efectivo vs deformación unitaria	38
Figura 16. Modelo completo	39
Figura 17. G_{sec} y G_{tan}	40
Figura 18. G_{sec} , Frecuencia 1Hz, σ_3 100 kPa.....	41
Figura 19. G_{sec} , Frecuencia 2 Hz, σ_3 20 kPa.....	42
Figura 20. G_{sec} , Frecuencia 0.5 Hz, σ_3 60 kPa.....	42
Figura 21. Fases de desarrollo	43
Figura 22. Puntos de falla, Amplitud 0.01cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg.....	48
Figura 23. Puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg	49
Figura 24. Puntos de falla, Amplitud 1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg.....	49

Figura 25. Puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg.....	49
Figura 26. Puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 5seg.....	50
Figura 27. Puntos de falla, Amplitud 0.01cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg.....	50
Figura 28. Puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg.....	50
Figura 29. Puntos de falla, Amplitud 1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg.....	51
Figura 30. Puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg.....	51
Figura 31. Puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 5seg.....	51
Figura 32. Cambio de G_0 , Amplitud 0.01cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg.....	53
Figura 33. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg.....	53
Figura 34. Cambio de G_0 , Amplitud 1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg.....	53
Figura 35. Cambio de G_0 , Amplitud 10cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg.....	54
Figura 36. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg.....	54
Figura 37. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 0.5Hz, Tiempo 1seg.....	55
Figura 38. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 0.25Hz, Tiempo 1seg.....	55
Figura 39. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg.....	56
Figura 40. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 5seg.....	56
Figura 41. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 10seg.....	56
Figura 42. Cambio de G_0 , Amplitud 0.01cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg.....	57
Figura 43. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg.....	57
Figura 44. Cambio de G_0 , Amplitud 1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg.....	58
Figura 45. Cambio de G_0 , Amplitud 10cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg.....	58
Figura 46. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg.....	59
Figura 47. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 0.5Hz, Tiempo 1seg.....	59
Figura 48. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 0.25Hz, Tiempo 1seg.....	59
Figura 49. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg.....	60
Figura 50. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 5seg.....	60
Figura 51. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 10seg.....	60

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Pesos antes y después del lavado.....	23
Tabla 2. Tamices	24
Tabla 3. Resultados de la granulometría	24
Tabla 4. Resultados experimentales.....	28
Tabla 5. Datos teóricos	29
Tabla 6. Cargas cíclicas.....	32
Tabla 7. Frecuencia y Presión de confinamiento	32
Tabla 8. F.S estático	44
Tabla 9. F.S, Frecuencia 1Hz	45
Tabla 10. F.S, Frecuencia 1Hz	45
Tabla 11. F.S, Frecuencia 0.5Hz	45
Tabla 12. F.S, Frecuencia 0.25Hz	46
Tabla 13. F.S, Número de ciclos.....	46
Tabla 14. F.S, Frecuencia 1Hz	46
Tabla 15. F.S, Frecuencia 1Hz	47
Tabla 16. F.S, Frecuencia 0.5Hz	47
Tabla 17. F.S, Frecuencia 0.25Hz	47
Tabla 18. F.S, Número de ciclos.....	48

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1. Granulometría	68
ANEXO 2. Curva granulométrica	69
ANEXO 3. Pesos obtenidos en el laboratorio ensayo proctor modificado	70
ANEXO 4. Humedades experimentales obtenidas en el laboratorio	71
ANEXO 5. Curva de compactación ensayo Proctor modificado	72
ANEXO 6. Envolvente de falla Mohr-Coulomb	73
ANEXO 7. Falla estática para una presión de confinamiento de 100 kPa	74
ANEXO 8. Falla estática para una presión de confinamiento de 20 kPa	75
ANEXO 9. Gráfica de esfuerzo desviador contra deformación axial para una presión de confinamiento de 100 kPa	76
ANEXO 10. Gráfica de esfuerzo desviador contra deformación axial para una presión de confinamiento de 20 kPa	77
ANEXO 11. Gráfica de esfuerzo desviador contra deformación axial para una presión de confinamiento de 60 kPa	78
ANEXO 12. Cálculo del γ sat para el suelo que compone el terraplén.	79
ANEXO 13. Gráficas de los 10 ciclos por cada amplitud para la muestra confinada con una presión de 100 kPa y sometida a una frecuencia de 1Hz.	81
ANEXO 14. Módulo de rigidez secante y tangente para una Frecuencia de 1Hz y Presión de confinamiento de 100 kPa	83
ANEXO 15. Comportamiento del módulo de rigidez secante para una frecuencia de 1Hz y Presión de confinamiento de 100 kPa.	85
ANEXO 16. Gráficas de los 10 ciclos por cada amplitud para la muestra confinada con una presión de 20 kPa y sometida a una frecuencia de 2Hz.	86
ANEXO 17. Módulo de rigidez secante y tangente para una Frecuencia de 2Hz y	

Presión de confinamiento de 20 kPa	88
ANEXO 18. Comportamiento del módulo de rigidez secante para una frecuencia de 1Hz y Presión de confinamiento de 20 kPa.	90
ANEXO 19. Gráficas de los 10 ciclos por cada amplitud para la muestra confinada con una presión de 60 kPa y sometida a una frecuencia de 0.5Hz.	91
ANEXO 20. Módulo de rigidez secante y tangente para una Frecuencia de 0.5Hz y Presión de confinamiento de 60 kPa	93
ANEXO 21. Comportamiento del módulo de rigidez secante para una frecuencia de 0.5Hz y Presión de confinamiento de 60 kPa.	94
ANEXO 22. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.01cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.....	95
ANEXO 23. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.....	96
ANEXO 24. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.....	97
ANEXO 25. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.....	98
ANEXO 26. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.01cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 5seg, con suelo de fundación blando.....	99
ANEXO 27. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 5seg, con suelo de fundación blando.....	100
ANEXO 28. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 5seg, con suelo de fundación blando.....	101
ANEXO 29. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 5seg, con suelo de fundación blando.....	102
ANEXO 30. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.01cm, Frecuencia 0.5Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.....	103
ANEXO 31. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 0.5Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.....	104
ANEXO 32. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 1cm, Frecuencia 0.5Hz,	

Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.....	105
ANEXO 33. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 0.5Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.....	106
ANEXO 34. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 0.5Hz, Tiempo 5seg, con suelo de fundación blando.....	107
ANEXO 35. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.01cm, Frecuencia 0.25Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.....	108
ANEXO 36. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 0.25Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.....	109
ANEXO 37. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 1cm, Frecuencia 0.25Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.....	110
ANEXO 38. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 0.25Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.....	111
ANEXO 39. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 0.25Hz, Tiempo 5seg, con suelo de fundación blando.....	112
ANEXO 40. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 10seg, con suelo de fundación blando.....	113
ANEXO 41. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.01cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.	114
ANEXO 42. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.	115
ANEXO 43. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.	116
ANEXO 44. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.	117
ANEXO 45. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.01cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 5seg, con suelo de fundación duro.	118
ANEXO 46. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 5seg, con suelo de fundación duro.	119
ANEXO 47. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 1cm, Frecuencia 1Hz,	

Tiempo 5seg, con suelo de fundación duro.	120
ANEXO 48. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 1Hz,	
Tiempo 5seg, con suelo de fundación duro.	121
ANEXO 49. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.01cm, Frecuencia 0.5Hz,	
Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.	122
ANEXO 50. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 0.5Hz,	
Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.	123
ANEXO 51. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 1cm, Frecuencia 0.5Hz,	
Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.	124
ANEXO 52. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 0.5Hz,	
Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.	125
ANEXO 53. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 0.5Hz,	
Tiempo 5seg, con suelo de fundación duro.	126
ANEXO 54. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.01cm, Frecuencia 0.25Hz,	
Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.	127
ANEXO 55. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 0.25Hz,	
Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.	128
ANEXO 56. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 1cm, Frecuencia 0.25Hz,	
Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.	129
ANEXO 57. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 0.25Hz,	
Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.	130
ANEXO 58. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 0.25Hz,	
Tiempo 5seg, con suelo de fundación duro.	131
ANEXO 59. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz,	
Tiempo 10seg, con suelo de fundación duro.	132

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE UN TERRAPLÉN SOMETIDO A CARGA CÍCLICA*

AUTOR(ES): JHOANA ALEXANDRA OCHOA ALDANA**
RAFAEL ENRIQUE VEGA MEDINA

PALABRAS CLAVE: Terraplén, estabilidad, movimiento del suelo, cargas cíclicas, amplitud, frecuencia, número de ciclos, propiedades dinámicas del suelo, modelación numérica (PLAXIS 2D).

DESCRIPCIÓN:

Los sismos son una consecuencia del movimiento telúrico, los cuales le han causado grandes transformaciones a la tierra desde sus inicios, como la formación de los continentes, de las montañas. Estos movimientos del suelo traen consigo consecuencias para los seres humanos y más cuando actualmente se tienen construcciones verticales tan altas como los rascacielos, y construcciones horizontales semirrígidas y rígidas como las carreteras, pues dichos movimientos las afectan generando graves daños; por lo mencionado anteriormente es fundamental estudiar el efecto que trae consigo este tipo de fenómenos.

Es por ello que en este proyecto se caracterizó un suelo que emula el suelo de un terraplén mediante los laboratorios establecidos por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), posteriormente se realizó un ensayo triaxial cíclico para determinar el comportamiento del módulo de rigidez ante cargas cíclicas y finalmente se estudió la influencia de diferentes condiciones de una carga cíclica como la frecuencia, la amplitud y el número de ciclos en el comportamiento en términos de estabilidad, es decir, en los términos de factor de seguridad de los taludes que componen un terraplén tipo, mediante una modelación numérica en el programa PLAXIS 2D, donde se establecieron cuales variables son representativas en un análisis dinámico de estabilidad.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Jorfe Alejandro Mendoza Rizo, Doctor en Ingeniería Civil

ABSTRACT

TITLE: STABILITY ANALYSIS OF AN EMBANKMENT SUBMITTED TO CYCLIC LOADING*

AUTHOR(S): JHOANA ALEXANDRA OCHOA ALDANA**
RAFAEL ENRIQUE VEGA MEDINA

KEYWORDS: Embankment, stability, ground motion, cyclic loads, amplitude, frequency, amount of cycles, dynamic soil properties, ground response analysis.

DESCRIPTION:

The earthquakes are a consequence of the telluric movement, which have caused great transformations to the earth from its beginnings, like the formation of the continents, of the mountains. These movements of the ground bring consequences for human beings and more when there are currently vertical constructions as high as skyscrapers, and rigid and rigid horizontal constructions such as roads, because these movements affect them generating serious damage; Because of the aforementioned, it is fundamental to study the effect that this type of phenomena brings.

That is why in this project was characterized a soil that emulates the soil of an embankment through the laboratories established by the National Institute of Roads (INVIAS), then a triaxial cyclic test was performed to determine the behavior of the module of rigidity before cyclic loads and finally, the influence of different conditions of a cyclic load, such as the frequency, amplitude and number of cycles in the behavior in terms of stability, that is, in terms of safety factor of the slopes that make up a type embankment, was studied, through a numerical modeling in the PLAXIS 2D engineering program, where which variables were established that are more representative in a dynamic stability analysis.

* Graduation Project

** Faculty of Physical Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Jorfe Alejandro Mendoza Rizo, Doctor in Civil Engineering

INTRODUCCIÓN

El movimiento del suelo debido a sismos ha causado grandes daños en la infraestructura de diferentes países, es un fenómeno impredecible e imposible de evitar, un ejemplo reciente como es en el Ecuador [1], donde se evidenció la magnitud del daño causado especialmente en la carretera Chillones-Bucay dejando un terraplén totalmente colapsado.

Al tener presente este tipo de fenómenos naturales en el entorno humano, se diseñan y construyen estructuras que soporten los movimientos telúricos para así principalmente salvaguardar la vida de las personas y reducir el daño que se pueda ocasionar en las estructuras.

El sismo genera grandes daños en las construcciones por la afectación del suelo en el que estas se soportan, por ello es indispensable estudiar el efecto que hace la onda del sismo sobre el suelo donde yacen las estructuras para dar solución a los problemas de estabilidad que se presenten, teniendo presente la variación de las propiedades dinámicas del suelo.

Este proyecto tiene como finalidad estudiar la influencia de las variables que componen una carga cíclica en la estabilidad de un terraplén, teniendo presente la variación de la frecuencia, amplitud y número de ciclos de una onda aplicada en la base de este, además de tener en cuenta la variación del módulo de rigidez en cada caso.

Teniendo en cuenta que el suelo que compone al terraplén es un suelo tomado de la parte norte de la Universidad Industrial de Santander, al cual se le hicieron los respectivos ensayos de laboratorio para su respectiva caracterización.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar la influencia de las variables que componen una carga cíclica en la estabilidad de un terraplén tipo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el módulo de rigidez a diferentes niveles de deformación mediante el ensayo triaxial cíclico para una muestra compactada que emule el suelo que compone el terraplén.
- Estudiar la influencia de la amplitud, frecuencia y número de ciclos en el factor de seguridad por estabilidad de los taludes que componen el terraplén mediante simulaciones numéricas con el programa PAXIS.
- Estudiar el efecto de la rigidez del suelo de cimentación (suelo blando y suelo duro) en el factor de seguridad de los taludes del terraplén.

2. METODOLOGÍA

2.1 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

A continuación, se presentan los laboratorios realizados para la caracterización del suelo del terraplén (Figura 1), suelo tomado de la parte norte de la Universidad Industrial de Santander donde en su momento se estaban realizando los respectivos arreglos de las residencias estudiantiles.

Figura 1. Muestra de suelo



2.1.1 Granulometría. Para caracterizar el suelo dependiendo del tamaño de las partículas que lo componen, se utilizó la norma I.N.V. E-123-13 [2], reglamentada por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), donde se llevó paso a paso lo establecido en ella.

Primeramente, se lavó la muestra sobre el tamiz N° 200 para determinar el porcentaje de finos que estaban presentes en el suelo como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Lavado de la muestra



En la tabla 1 se observa que aproximadamente el 50% del suelo está compuesto por partículas finas.

Tabla 1. Pesos antes y después del lavado

Pesos (g)	
Antes del lavado	
Peso muestra inicial	1000
Peso muestra seca inicial	874.8
Después del lavado	
Peso bandeja	9.4
Peso bandeja + muestra seca	445.8
Peso muestra seca	436.4

Posteriormente se llevó la muestra al horno para secarla y así pasarla por los respectivos tamices (Tabla 2).

Tabla 2. Tamices

Nº Tamiz	Abertura(mm)
1/2	12.7
3/8	9.5
Nº 4	4.75
Nº 10	2
Nº 20	0.85
Nº 40	0.425
Nº 60	0.25
Nº 100	0.15
Nº 200	0.075
Fondo	

Fuente: I.N.V. E-123-12

Los resultados obtenidos de la granulometría se muestran a continuación.

Tabla 3. Resultados de la granulometría

Nº Tamiz	Peso suelo retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
1/2	14.1	1.61	1.61	98.39
3/8	0	0.00	1.61	98.39
Nº 4	5.2	0.59	2.21	97.79
Nº 10	12.7	1.45	3.66	96.34
Nº 20	16.9	1.93	5.59	94.41
Nº 40	54.6	6.24	11.83	88.17
Nº 60	68.4	7.82	19.65	80.35
Nº 100	123.7	14.14	33.79	66.21
Nº 200	132.5	15.15	48.94	51.06
Fondo	446.7	51.06	100.00	0.00
	874.8	100		

Teniendo en cuenta que se consideran gravas a las partículas que quedan retenidas sobre el tamiz N°4, arenas a las partículas que pasan el tamiz N°4 y finos a las partículas que pasan el tamiz N°200 se obtuvo lo siguiente:

% Grava= 2.21

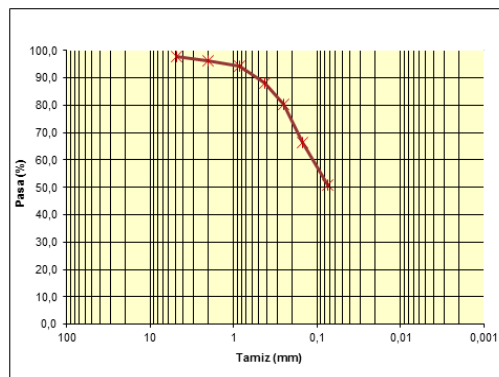
%Arena= 46.73

%Finos= 51.1

De esta manera el suelo se clasificó como un suelo fino con alto contenido de arena.

A partir de la tabla 3 se obtiene la siguiente curva granulométrica, donde se observa que es un suelo pobremente gradado.

Figura 3. Curva granulométrica

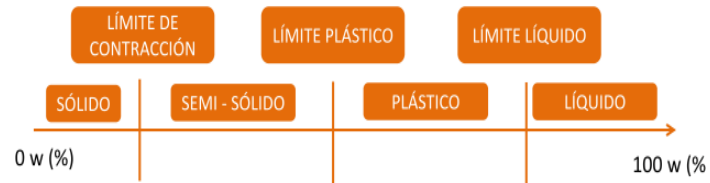


Los coeficientes de curvatura y uniformidad solo se calculan para suelos que no sean finos, en este caso que el suelo es fino no se calculan.

2.1.2 Límites de Atterberg. Los límites de Atterberg o límites de consistencia se basan en que los suelos finos presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados dependiendo del contenido de agua. [3]

Estos límites se clasifican en límite de contracción, límite plástico y límite líquido.

Figura 4. Límites de consistencia.



Fuente: Ingenieros Geotecnistas Asociados. Granulometria-y-limites. Disponible en: <https://www.dropbox.com/s/8hziuzze9tz0o4p/granulometria-y-limites.pdf?dl=0>

Para la realización de este laboratorio se siguieron las normas I.N.V. E-125-13 [4] e I.N.V. E-126-13 [5], donde se determinó el límite líquido (LL), el límite plástico (LP) y el índice de plasticidad (IP).

Figura 5. Laboratorio LP



Figura 6. Laboratorio LL



Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

LL=31.5 %

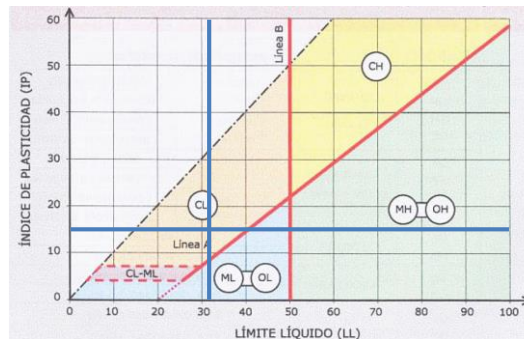
LP=17.3 %

IP=14.2 %

La clasificación de la muestra se hizo con el sistema de clasificación unificado U.S.C.S (Unified Soil Classification System).

Con base en la carta de plasticidad (Figura 7) el suelo se clasifica como una arcilla de baja plasticidad (CL), y como tiene alto contenido de arena es una arcilla arenosa de baja plasticidad.

Figura 7. Carta de plasticidad casa grande



Fuente: Ingenieros Geotecnistas Asociados. Clasificación de los suelos. <https://www.dropbox.com/s/xifs0pl8owwlypa/clasificacion-de-los-suelos.pdf?dl=0>

2.1.3 Humedad óptima y densidad máxima seca. Para la determinación de la humedad óptima y la densidad máxima seca se tomó como referencia la norma I.N.V. E-142-13 [6] (Proctor modificado). En el ensayo se tomaron tres puntos de referencia por cada probeta ensayada, en la parte superior, en medio y en la parte inferior, para determinar un promedio de humedades debido a que en la parte más

superficial de la probeta se empieza a evaporar más rápidamente el agua que en la parte intermedia e inferior, y esto podría afectar los resultados; por cada probeta realizada se tomaron 2500g de suelo a los cuales se les fue adicionando cantidades diferentes de agua.

Figura 8. Ensayo de compactación



Teniendo en cuenta lo anterior, los resultados experimentales de los pesos obtenidos en el laboratorio se presentan en el anexo 3 y las humedades se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4. Resultados experimentales

Punto	#1	#2	#3	#4	#5	#6
ρ_{21} [g/cm ³]	1.81	1.87	2.08	2.12	2.09	2.07
w%	9.18	9.77	11.47	13.31	15.53	16.41
w%	8.86	9.78	11.50	13.54	15.46	16.48
w%	8.73	9.93	11.74	13.42	15.48	16.32
w%	8.92	9.83	11.57	13.42	15.49	16.41
ρ_D [g/cm ³]	1.67	1.70	1.87	1.87	1.81	1.78
Y_D [KN/m ³]	16.34	16.69	18.31	18.30	17.75	17.46

	Parte superior de la probeta
	Parte intermedia de la probeta
	Parte inferior de la probeta

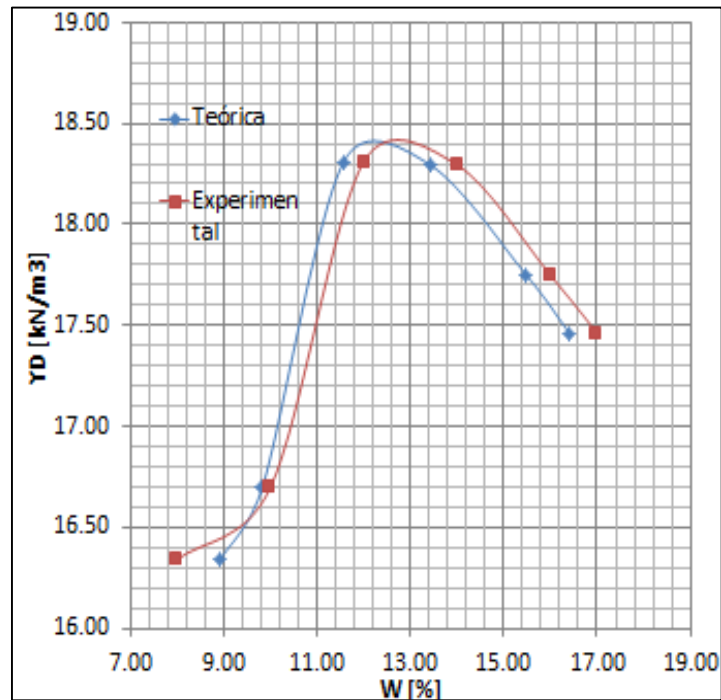
Para comparar los datos obtenidos en el laboratorio, se hizo con referencia a la curva de compactación teórica con los datos que se muestran en la tabla 5 y así verificar que los datos obtenidos estuviesen acordes.

Tabla 5. Datos teóricos

Punto	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Ww [g]	200	250	300	350	400	425
w [%]	8	10	12	14	16	17
γ_D [KN/m ³]	16.34	16.69	18.31	18.30	17.75	17.46

La curva de compactación obtenida de donde se determinó la densidad máxima seca y la humedad óptima fue la siguiente:

Figura 9. Curva de compactación



Los resultados del laboratorio fueron:

$$\gamma_D = 18.40 \frac{KN}{m^3}$$

$$W_{opt} = 12.10 \%$$

2.2 ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO

El ensayo triaxial de compresión es el laboratorio más usado para la medición de las propiedades del suelo bajo condiciones de carga estática, el ensayo triaxial cíclico ha sido el más comúnmente usado para la medición de las propiedades dinámicas del suelo a grandes niveles de deformación. [7]

2.2.1 Preparación de las probetas. Para este laboratorio se usaron 3 probetas con dimensiones de diámetro 5cm y altura de 10cm, y fueron compactadas teniendo en cuenta la humedad óptima determinada en el ensayo Proctor modificado.

Figura 10. Probetas de ensayo



Para la compactación de las muestras se utilizó un molde de diámetro 5cm y altura de 10cm. Las muestras fueron compactadas con la misma energía que en el ensayo de Proctor modificado $1617 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$, con 25 golpes por capa y 3 capas de suelo.

Figura 11. Molde de compactación



2.2.2 Ensayo de las probetas. Para la aplicación de las cargas cíclicas, primeramente, la muestra a ensayar se debió llevar a un proceso de saturación para eliminar el aire contenido en los vacíos, proceso que duró aproximadamente 2 días; posteriormente se procedió a consolidarla, donde se alcanzó la presión de cámara establecida para cada ensayo.

Figura 12. Montaje de la muestra



Se definieron varios parámetros para la aplicación de las cargas cíclicas, variando la amplitud con un número de ciclos fijo como se muestra en la tabla 6, esta variación de amplitudes se aplicó de la misma manera para las tres probetas; la amplitud de 0.001 kN se descartó debido a que se presentó un comportamiento atípico y se debe a que la máquina triaxial no tiene la precisión para esta magnitud de carga.

Tabla 6. Cargas cíclicas

Amplitud [kN]	Número de Ciclos
0.001	10
0.01	10
0.35	10
0.05	10
0.08	10
0.1	10

Además, se estableció una variación en la frecuencia y en la presión de confinamiento de las muestras como se registra en la siguiente tabla:

Tabla 7. Frecuencia y Presión de confinamiento

Probeta	Frecuencia [Hz]	σ_3 [kPa]
1	1	100
2	2	20
3	0.5	60

Donde la primera muestra con presión de confinamiento de 100 kPa representa el suelo a 5.4m de profundidad desde la parte superior del terraplén, la muestra con presión de confinamiento de 60 kPa representa al suelo a 3.3m y la muestra con presión de confinamiento de 20 kPa representa el suelo a 1.1m.

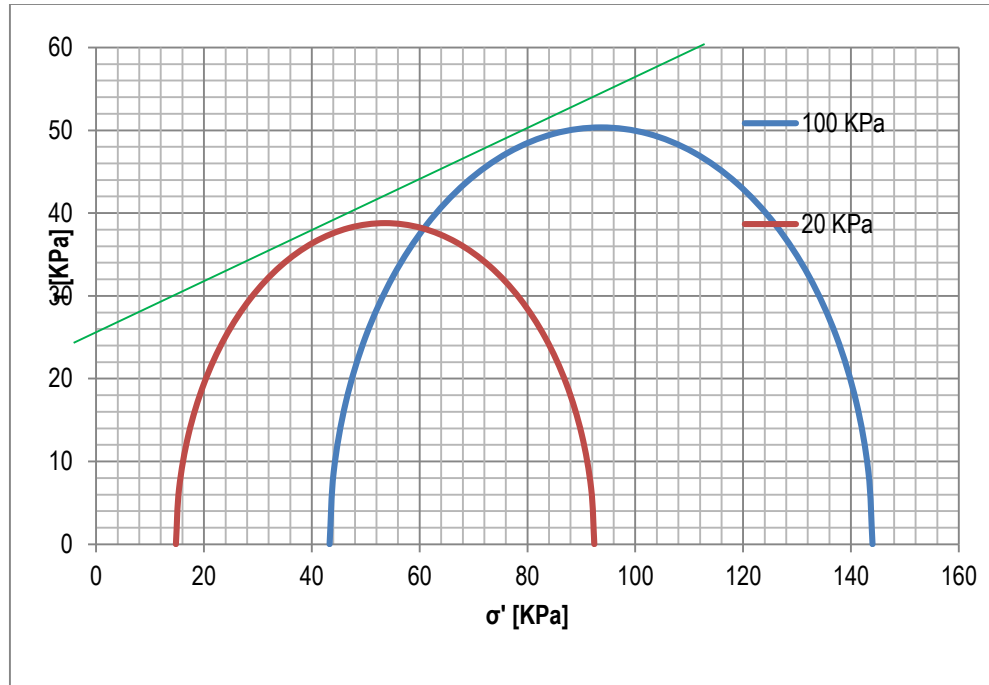
2.3 FALLA ESTÁTICA

Para determinar el ángulo de fricción y la cohesión del suelo en estudio fue necesario fallar las probetas de manera estática después de aplicada la carga cíclica, esto es válido debido a que las deformaciones en la muestra siguieron siendo muy pequeñas después de aplicado el último ciclo.

El criterio de falla usado fue el de Mohr-Coulomb, que permite averiguar cuando se ha producido la rotura en un plano determinado, debido a que existe una relación entre las tensiones normales y tangenciales que produce la rotura, generalmente se comporta de manera lineal y a ésta se le llama envolvente de falla. [8]

Con los datos obtenidos del ensayo se graficó el esfuerzo cortante contra el esfuerzo efectivo de las probetas ensayadas con un esfuerzo de confinamiento de 100 kPa y 20 kPa (Figura 13).

Figura 13. Envolvente Mohr-Coulomb



A partir de la gráfica de la envolvente de falla se determinó lo siguiente:

$$\phi' = 17^\circ$$
$$C' = 24 \frac{KN}{m^2}$$

2.4 MODELO NUMÉRICO

Para el análisis de estabilidad de los taludes del terraplén se utilizó el programa PLAXIS 2D, que utiliza el método de elementos finitos [9] para el desarrollo del modelo.

Con el modelamiento se busca analizar el terraplén en términos de factor de seguridad, donde se indujo una onda en la base del terraplén con unas características definidas, como lo son la amplitud, la frecuencia y el tiempo dinámico.

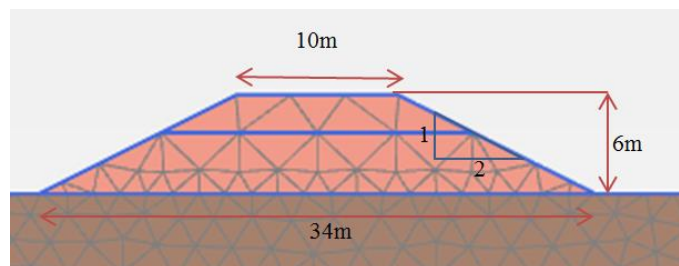
Las amplitudes definidas fueron 0.01cm, 0.1cm, 1cm y 10cm; las frecuencias fueron 0.25Hz, 0.5Hz y 1Hz; y los ciclos fueron 1, 5 y 10.

Además, el análisis involucra estudiar el efecto de la rigidez del suelo de cimentación (suelo blando y suelo duro) en el factor de seguridad de los taludes del terraplén.

En las secciones 2.4.1.1 se hizo un modelamiento del terraplén con el método Mohr-Coulomb para así determinar posteriormente los factores de seguridad estáticos, y en la sección 2.4.1.2 se realizó el modelo del terraplén con el material constructivo Hardening Soil small para determinar el factor de seguridad después de aplicar los diferentes casos de onda y hacerle el seguimiento al cambio del módulo de rigidez G_s .

2.4.1 Modelamiento del terraplén. El terraplén se dimensionó con una pendiente de 2:1, una altura de 6m desde la base, ancho (parte superior) de 10 m y un ancho en la base de 34 m (Figura 14).

Figura 14. Terraplén modelado



2.4.1.1 Modelo Mohr-Coulomb: El terraplén se modeló primeramente con el método de Mohr-Coulomb [10], para así determinar el factor de seguridad estático para ambos casos (Suelo de cimentación duro y suelo de cimentación blando). Los parámetros ingresados en PLAXIS fueron la cohesión, el ángulo de fricción determinados anteriormente, el γ_{sat} (Peso específico del suelo en estado de saturación) y el γ_{unsat} (Peso específico del suelo en estado no saturado). El γ_{unsat} se tomó como el valor del peso específico seco determinado en el ensayo de Proctor modificado cuyo valor es de 18.4 kN/m^3 ; el γ_{sat} se determinó a partir de las relaciones volumétricas asumiendo una gravedad específica (G_s) de 2.65 y un grado de saturación (S_r) de 1, dando como resultado un γ_{sat} de 20.6 kN/m^3 (Anexo 12).

2.4.1.2 Modelo Hardening Soil with small strain stiffness: El modelamiento del terraplén se hizo con el material constructivo HS small [11], en el cual se involucra la variación del módulo de rigidez bajo pequeñas deformaciones.

Los parámetros a tener en cuenta en este material fueron referenciados a partir de la muestra sometida a una presión de cámara de 100 kPa, además de ingresar también los parámetros descritos en el modelamiento de Mohr-Coulomb.

G_0 , es el módulo inicial a deformaciones muy pequeñas ($\leq 1 \times 10^{-5}\%$) [12], también se puede asumir que el módulo de rigidez secante (G_{sec}) de la menor amplitud aplicada corresponde al 40% de G_0 .

$G_{\text{sec}} = 33.83 \text{ MPa}$ (Anexo 14)

$$G_0 = 0.4 * G_{\text{sec}} \quad \text{Ec. 1}$$

$Y_{0.7}$, es la deformación cortante cuando el módulo secante se ha reducido a un 70% del módulo G_0 .

$$\gamma_{0.7} = \frac{1}{9G_0} [2C'(1 + \cos(2\phi')) - \sigma'_1(1 + K_0)\text{sen}(2\phi')] \quad \text{Ec. 2}$$

Dónde:

σ'_1 : esfuerzo vertical efectivo

K_0 : coeficiente de presión de tierras.

$$K_0 = 1 - \text{sen}(\phi') \quad \text{Ec. 3}$$

E_{sta}^{ref} , es el módulo de elasticidad estático.

E_{50}^{ref} , es la rigidez secante en el ensayo triaxial.

E_{oed}^{ref} , es el módulo edométrico de referencia.

E_{ur}^{ref} , es el módulo de carga y descarga.

Estos módulos se pueden determinar a partir de las siguientes relaciones [13]:

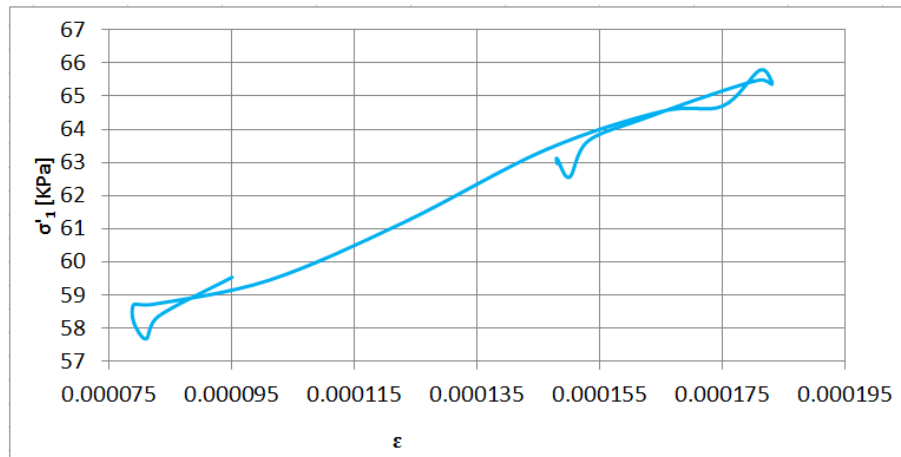
$$E_{50}^{ref} = 0.5 * E_{sta}^{ref} \quad \text{Ec. 4}$$

$$E_{oed}^{ref} = 0.8 * E_{50}^{ref} \quad \text{Ec. 5}$$

$$E_{ur}^{ref} = 0.5 * E_{50}^{ref} \quad \text{Ec. 6}$$

El E_{sta}^{ref} (módulo elasticidad) fue determinado como la pendiente de la gráfica esfuerzo axial efectivo vs deformación unitaria (Figura 15), de la probeta de referencia a una deformación muy pequeña.

Figura 15. Esfuerzo axial efectivo vs deformación unitaria



Teniendo en cuenta lo anterior los parámetros ingresados a PLAXIS fueron los siguientes:

$$G_0 = 85 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{0.7} = 0.00008373$$

$$E_{sta}^{ref} = 79.33 \text{ MPa}$$

$$E_{50}^{ref} = 39.665 \text{ MPa}$$

$$E_{oed}^{ref} = 31.732 \text{ MPa}$$

$$E_{ur}^{ref} = 118.995 \text{ MPa}$$

2.4.2 Modelamiento del suelo bajo el terraplén. Para la modelación del suelo bajo el terraplén se utilizó el método de Mohr-Coulomb, donde se simuló una fundación con un suelo duro ($E= 100 \text{ MPa}$) y una con suelo blando ($E=50 \text{ MPa}$), para ambos casos se ingresaron los siguientes parámetros al programa PLAXIS 2D:

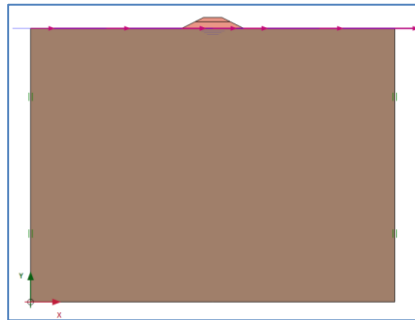
$$C' = 10 \frac{KN}{m^2}$$

$$\phi' = 30^\circ$$

$$\nu = 0.3$$

El suelo bajo el terraplén se modeló con una profundidad de 150 m y un ancho de 200 m (Figura 16), donde el nivel freático se ubicó en la superficie, es decir entre la fundación y el terraplén.

Figura 16. Modelo completo



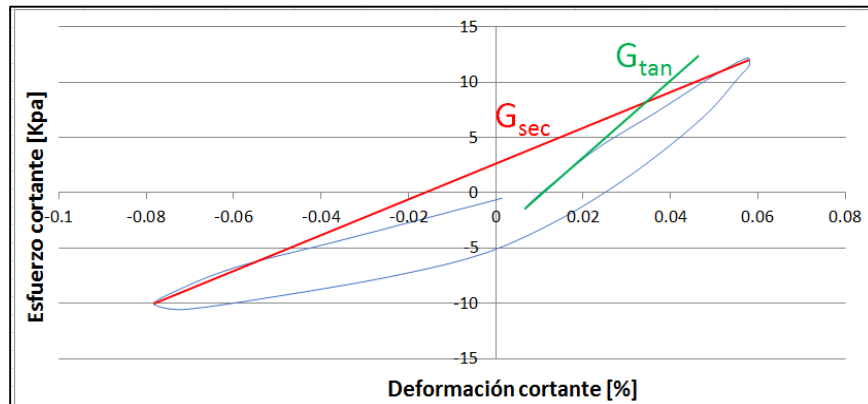
3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

3.1 MÓDULO DE RIGIDEZ (G_{sec})

Los datos obtenidos en el laboratorio del ensayo triaxial cíclico fueron analizados para determinar el comportamiento del módulo de rigidez con cada ciclo de carga y descarga para cada probeta.

Se determinaron dos módulos de rigidez, uno tangente y uno secante (Figura 17) por cada ciclo de carga y para cada amplitud impuesta, datos obtenidos de graficar esfuerzo cortante vs deformación cortante para las tres probetas ensayadas (Anexos 13,16 y 19).

Figura 17. G_{sec} y G_{tan}



Donde el módulo secante se determinó como la pendiente entre los puntos más extremos de la gráfica, es decir, entre el esfuerzo cortante máximo (Q_{max}) y el esfuerzo cortante mínimo (Q_{min}) y sus respectivas coordenadas en el eje x (Ec. 7);

y el módulo tangente se determinó entre el primer valor de esfuerzo (Q_1) y el esfuerzo cortante máximo/2 ($Q_{max}/2$) con sus respectivas coordenadas en el eje x (Ec. 8).

$$G_{sec} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{X_{Q_{max}} - X_{Q_{min}}} \quad Ec.7$$

$$G_{tan} = \frac{Q_1 - \frac{Q_{max}}{2}}{X_{Q_1} - X_{\frac{Q_{max}}{2}}} \quad Ec.8$$

Se determinaron 10 módulos para cada amplitud de carga aplicada, donde el comportamiento del módulo de rigidez se estudió con el G_{sec} .

Figura 18. G_{sec} , Frecuencia 1Hz, σ_3 100 kPa

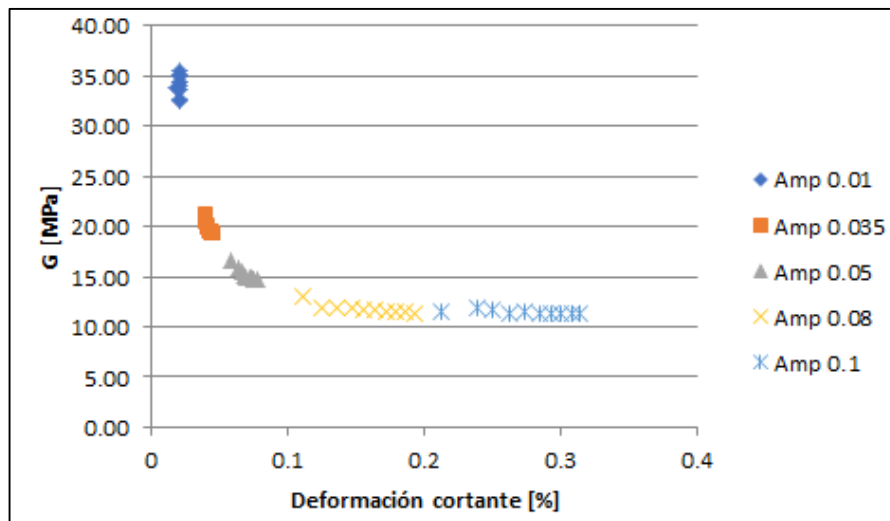


Figura 19. G_{sec} , Frecuencia 2 Hz, σ_3 20 kPa

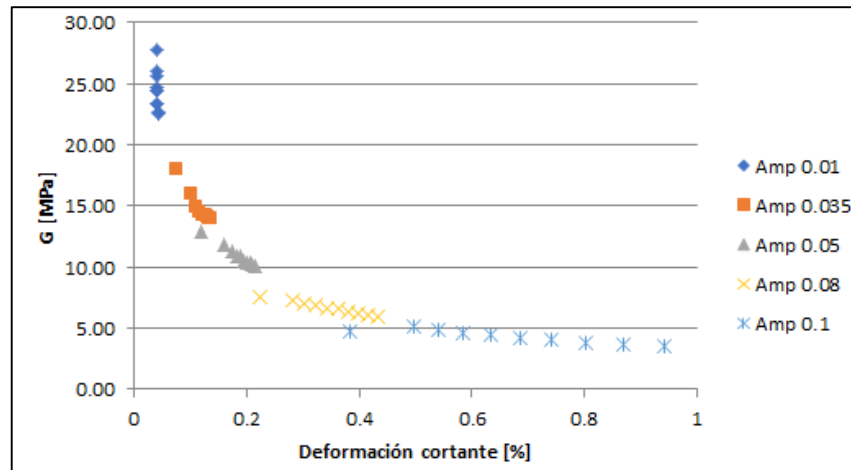
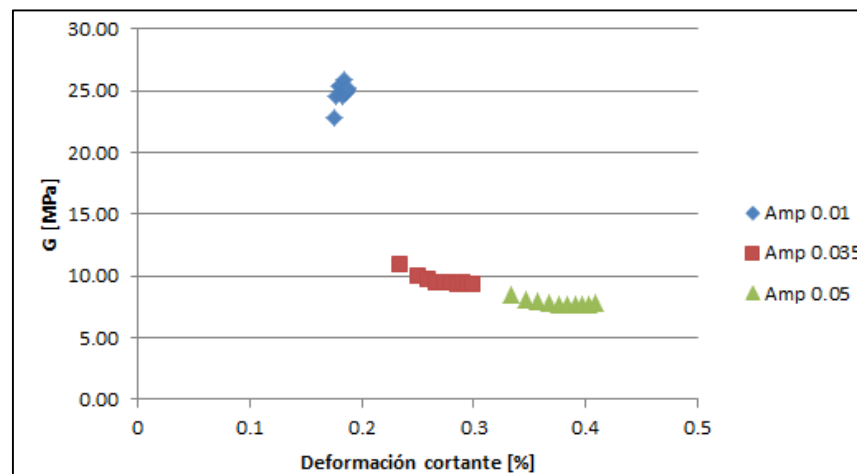


Figura 20. G_{sec} , Frecuencia 0.5 Hz, σ_3 60 kPa



Para la última probeta ensayada solo se tomaron 3 amplitudes de estudio debido a que con las amplitudes superiores de 0.05, se presentó un comportamiento atípico del suelo, muy probablemente debido a que la carga aplicada era muy grande y esto alteró el comportamiento del suelo.

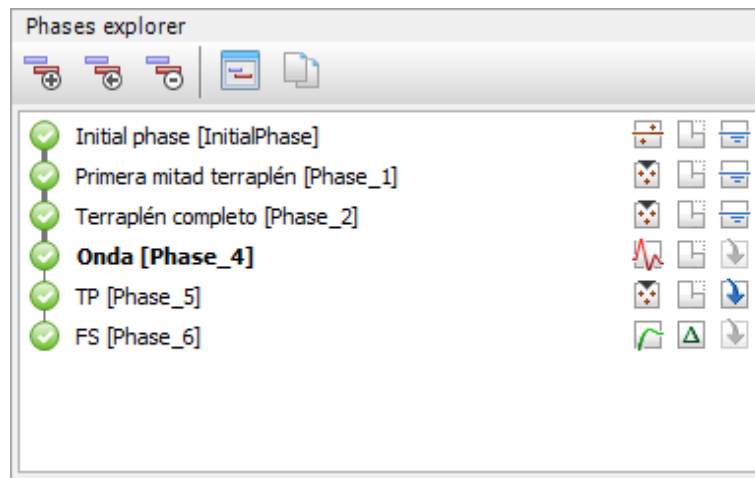
Como se puede observar, en las figuras 18,19 y 20, el módulo de rigidez decrece a medida que el suelo sufre una perturbación mayor, lo que conlleva a que esta propiedad del terraplén cambie durante un movimiento telúrico.

3.2 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

En el análisis de estabilidad del terraplén se estudió la influencia de una onda aplicada en la base variando la amplitud, frecuencia y número de ciclos para así determinar cuál de estos parámetros lo afecta de una manera más considerable.

3.2.1 Factor de seguridad estático (Mohr-Coulomb). Con el terraplén modelado se crearon unas fases (Figura 21) para determinar el F.S en la primera mitad del terraplén construido y cuando estaba totalmente construido.

Figura 21. Fases de desarrollo



Los factores de seguridad se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 8. F.S estático

F.S/Suelo de fundación	Suelo blando E= 50 MPa	Suelo duro E= 100 MPa
F.S primera mitad	2.935	2.934
F.S final	2.330	2.331

Como se puede observar en la tabla 8, el factor de seguridad estático se mantiene prácticamente igual en ambos casos, tanto para el perfil estratigráfico duro como para el blando, debido a que el terraplén ni la fundación se encuentran sometidos a alguna perturbación.

3.2.2 Factor de seguridad (HS small)

3.2.2.1 F.S Suelo de fundación blando (E= 50 MPa): En el análisis de estabilidad del terraplén sobre la fundación blanda, se aplicó la onda con las características mencionadas anteriormente en el modelo numérico, y se obtuvieron los siguientes resultados de estabilidad en términos del F.S (Tablas 9, 10, 11, 12 y 13), teniendo como primer punto de análisis la variación de la frecuencia, como segundo punto la variación de las amplitudes y como tercer punto el número de ciclos.

Tabla 9. F.S, Frecuencia 1Hz

Amplitud [cm]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [S]	F.S
0.01	1	1	2.298
0.1	1	1	2.3
1	1	1	2.292
10	1	1	2.29

Tabla 10. F.S, Frecuencia 1Hz

Amplitud [cm]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [S]	F.S
0.01	1	5	2.301
0.1	1	5	2.297
1	1	5	2.295
10	1	5	2.296

Tabla 11. F.S, Frecuencia 0.5Hz

Amplitud [cm]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [S]	F.S
0.01	0.5	1	2.299
0.1	0.5	1	2.3
1	0.5	1	2.295
10	0.5	1	2.294
10	0.5	5	2.296

Tabla 12. F.S, Frecuencia 0.25Hz

Amplitud [cm]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [S]	F.S
0.01	0.25	1	2.298
0.1	0.25	1	2.299
1	0.25	1	2.292
10	0.25	1	2.292
10	0.25	5	2.301

Tabla 13. F.S, Número de ciclos

Amplitud [cm]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [S]	Nº de ciclos	F.S
0.1	1	1	1	2.297
		5	5	2.3
		10	10	2.303

3.2.2.2 F.S Suelo de fundación duro (E= 100 MPa): En el análisis de estabilidad del terraplén sobre la fundación dura, se hizo de la misma manera que en el de suelo blando y los resultados se observan en las tablas 14, 15, 16, 17 y 18.

Tabla 14. F.S, Frecuencia 1Hz

Amplitud [cm]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [S]	F.S
0.01	1	1	2.294
0.1	1	1	2.299
1	1	1	2.296
10	1	1	2.296

Tabla 15. F.S, Frecuencia 1Hz

Amplitud [cm]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [S]	F.S
0.01	1	5	2.294
0.1	1	5	2.3
1	1	5	2.297
10	1	5	2.3

Tabla 16. F.S, Frecuencia 0.5Hz

Amplitud [cm]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [S]	F.S
0.01	0.5	1	2.295
0.1	0.5	1	2.296
1	0.5	1	2.297
10	0.5	1	2.294
10	0.5	5	2.295

Tabla 17. F.S, Frecuencia 0.25Hz

Amplitud [cm]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [S]	F.S
0.01	0.25	1	2.296
0.1	0.25	1	2.294
1	0.25	1	2.295
10	0.25	1	2.292
10	0.25	5	2.296

Para estudiar la influencia del número de ciclos de la onda sobre el factor de seguridad se tomó como referencia la onda con una amplitud de 0.1 cm y frecuencia 1 Hz.

Tabla 18. F.S, Número de ciclos

Amplitud [cm]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [S]	Nº de ciclos	F.S
0.1	1	1	1	2.299
		5	5	2.3
		10	10	2.296

Los factores de seguridad determinados variaron muy ligeramente ante la perturbación causada por las diferentes ondas, esto es debido a que el suelo del terraplén es muy resistente como para que las fuerzas actuantes que generan las ondas no afecten el factor de seguridad.

3.2.3 Puntos de falla. A continuación, se muestran los puntos de falla para la onda de amplitudes de 0.01cm, 0.1cm, 1cm y 10cm con una frecuencia de 1Hz y tiempo dinámico de 1seg y 5seg. Para los demás casos los resultados se pueden observar en los anexos del 22 al 59.

3.2.3.1 Suelo de fundación blando ($E=50$ MPa)

Figura 22. Puntos de falla, Amplitud 0.01cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg

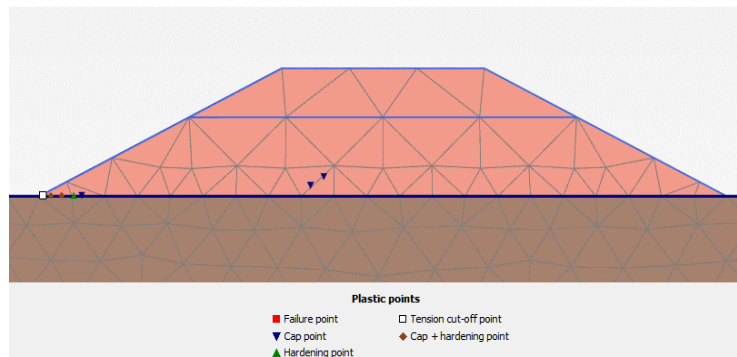


Figura 23. Puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg

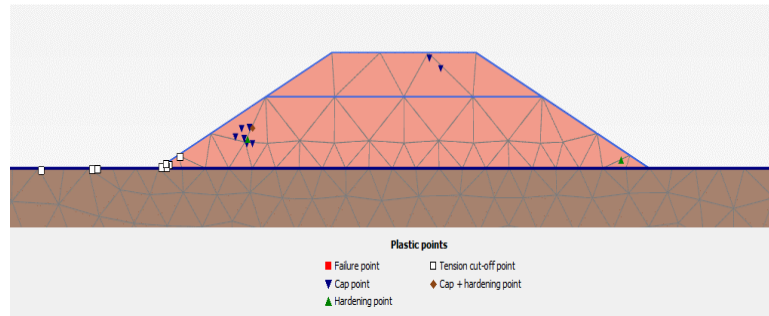


Figura 24. Puntos de falla, Amplitud 1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg

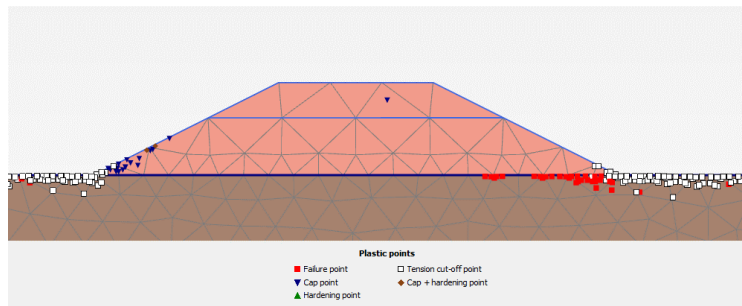


Figura 25. Puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg

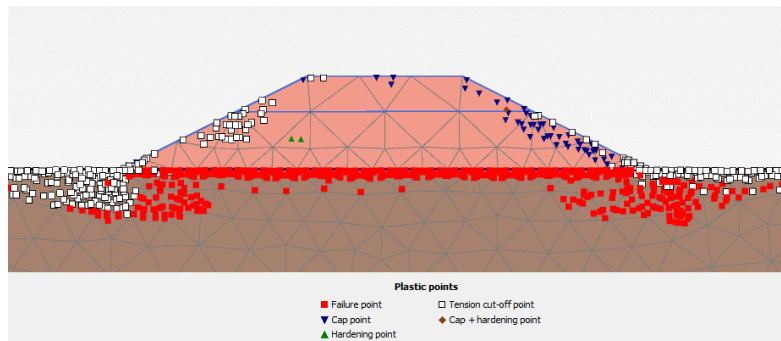
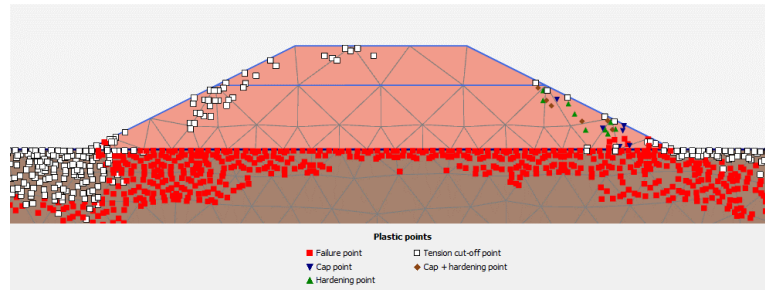


Figura 26. Puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 5seg



3.2.3.2 Suelo de fundación duro ($E=50$ MPa)

Figura 27. Puntos de falla, Amplitud 0.01cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg

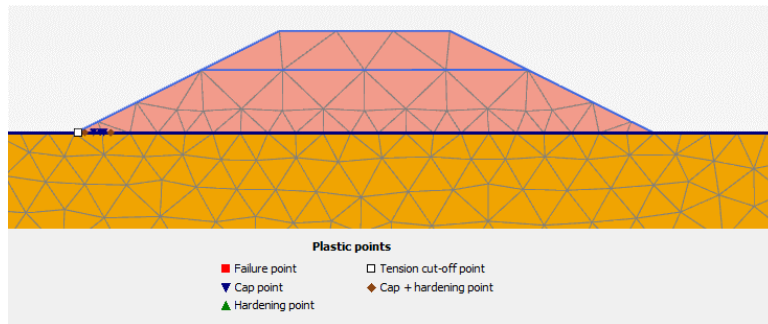


Figura 28. Puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg

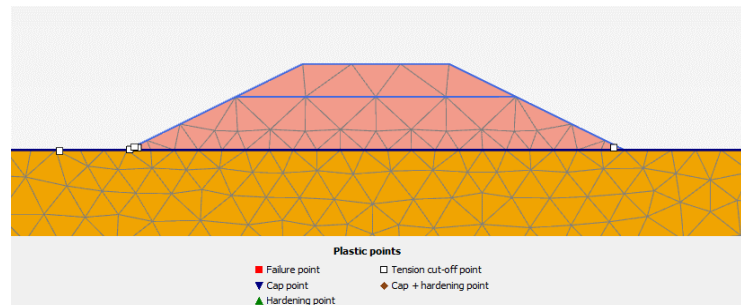


Figura 29. Puntos de falla, Amplitud 1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg

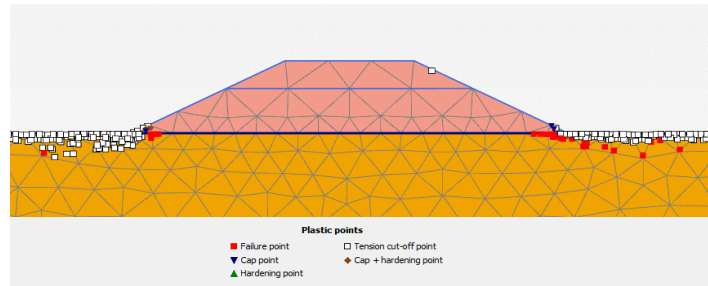


Figura 30. Puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg

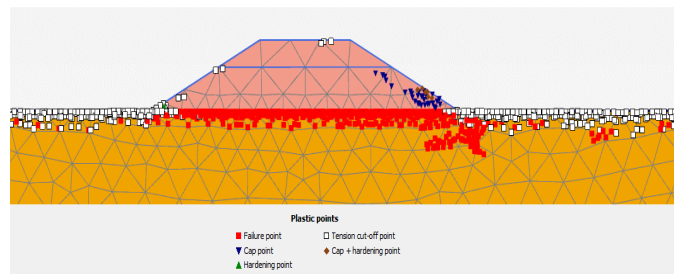
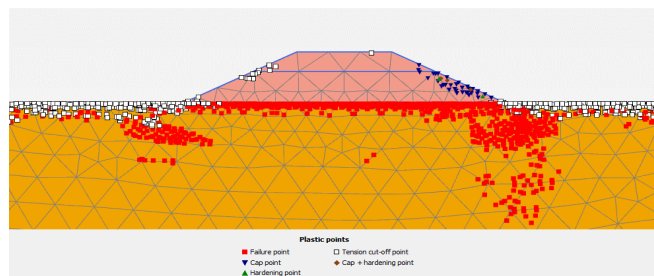


Figura 31. Puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 5seg



Se observó que el suelo es resistente debido a que los puntos de falla en el terraplén no se dieron sobre los taludes si no que se presentaron en la base, lo que conlleva a que la estabilidad del terraplén no se vea afectada de una manera considerable para que el factor de seguridad llegase a cambiar.

Además, se evidencia que en el suelo de fundación duro se presentan menos puntos de falla en la base del terraplén, lo que lo hace menos susceptible a posibles hundimientos en comparación con el modelo de fundación con suelo blando, donde los puntos de falla se presentan en mayor cantidad.

3.2.4 Variación el módulo de rigidez (G_0) bajo el efecto de la onda. Una vez aplicada la onda en la base del terraplén se estudió la variación que esta producía en el módulo de rigidez G_0 , tanto para el suelo de fundación blando como el suelo de fundación duro.

Para estudiar la influencia de la amplitud de la onda se presentan los casos con amplitudes de 0.01cm, 0.1cm, 1cm y 10cm con frecuencia de 1Hz y tiempo de 1seg; para la frecuencia de la onda se presentan los casos con amplitud de 0.1cm con frecuencias de 1Hz, 0.5Hz y 0.25Hz y tiempo de 1seg; y para estudiar la influencia del número de ciclos de la onda se presentan los casos con amplitud de 0.1cm con frecuencia de 1Hz, con 1, 5 y 10 ciclos para fundación blanda y dura, los demás casos se pueden observar en los anexos del 22 al 59.

3.2.4.1 Suelo de fundación blando ($E=50$ MPa): Al aplicar una amplitud mayor en la base del terraplén, se observó que el módulo de rigidez de este iba disminuyendo cada vez más. Como se puede observar en la figura 32 la rigidez del suelo disminuye ligeramente debido a que es una onda con una amplitud muy pequeña, pero en las figuras 33 y 34 se observa que, en la base, más específicamente en el pie del talud, es donde se presente una mayor disminución del módulo. Cuando se aplicó una onda con una amplitud más grande de 10cm (Figura35), se evidenció que el módulo disminuye significativamente a 42 MPa, esto quiere decir que entre más grande sea la amplitud de la onda aplicada, se verá un decrecimiento del módulo de rigidez del suelo del terraplén cada vez mayor.

Figura 32. Cambio de G_0 , Amplitud 0.01cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg

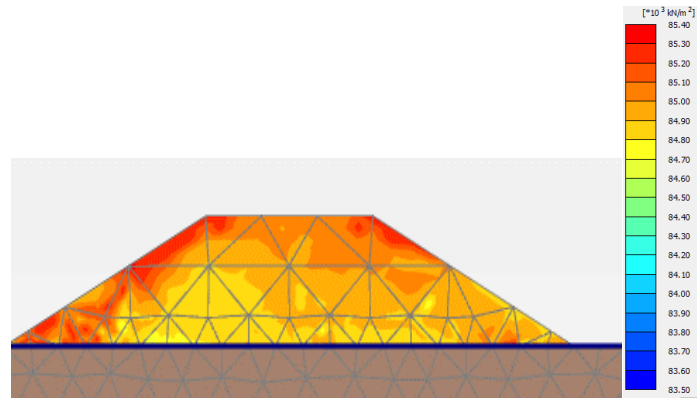


Figura 33. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg

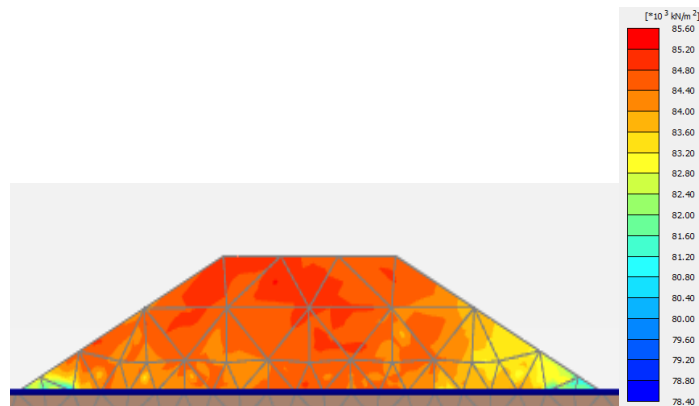


Figura 34. Cambio de G_0 , Amplitud 1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg

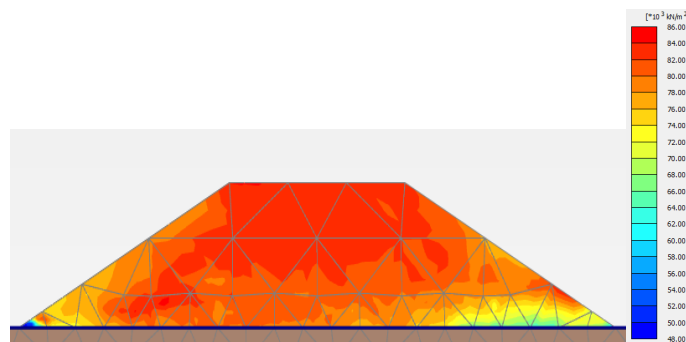
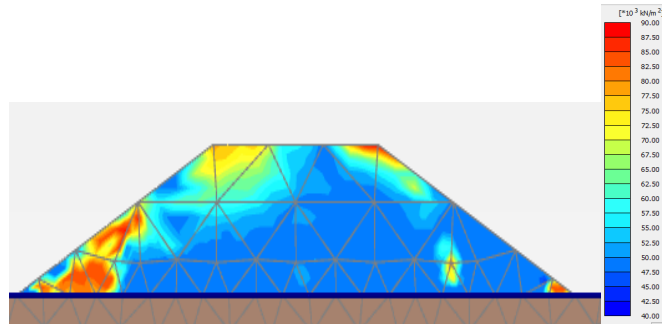


Figura 35. Cambio de G_0 , Amplitud 10cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg



Al variar la frecuencia manteniendo una amplitud constante de 0.1cm se observó que se presentan variaciones en la rigidez del suelo (Figura 36, 37 y 38), pero el módulo de rigidez (G_s) no se llega a disminuir de una manera considerable, aunque se sigue observando que la parte más afectada del terraplén ante la variación de la frecuencia es en el pie del talud. También se observó que el suelo se ve más afectado ante una frecuencia mayor, en este caso de 1Hz y la variación de esta propiedad es menor con frecuencias menores.

Figura 36. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg

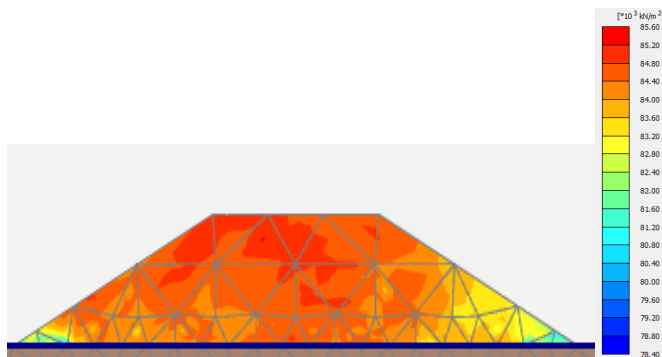


Figura 37. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 0.5Hz, Tiempo 1seg

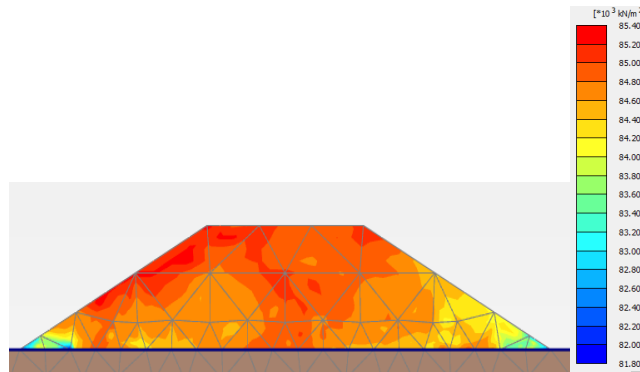
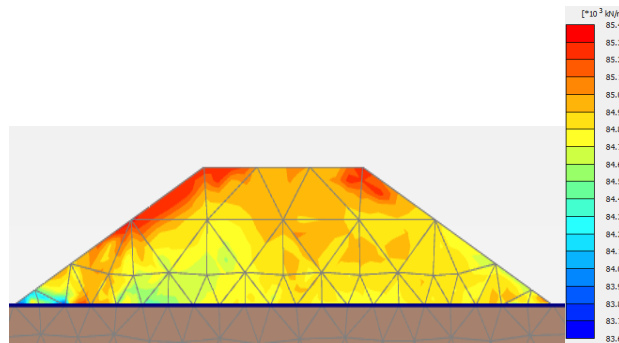


Figura 38. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 0.25Hz, Tiempo 1seg



Al variar el número de ciclos se encontró que la rigidez del terraplén de igual manera cambia especialmente en el pie del talud, pero al ir aumentando el número de ciclos no se observó un cambio considerable en el módulo G_s en comparación con los demás casos de variación del número de ciclos, aunque si se evidenció que al aplicar 10 ciclos el módulo decrece más en el pie del talud que en los otros casos (Figura 41).

Figura 39. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg

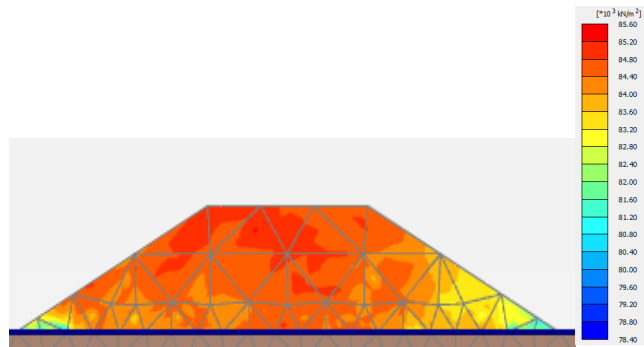


Figura 40. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 5seg

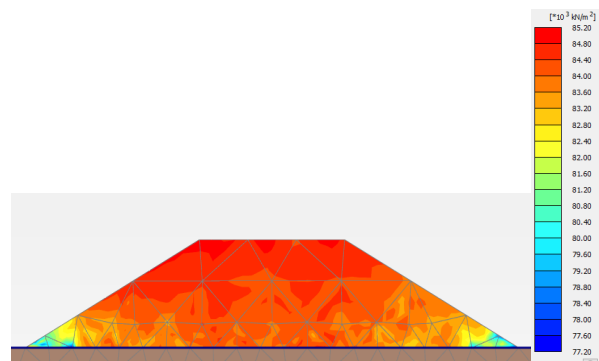
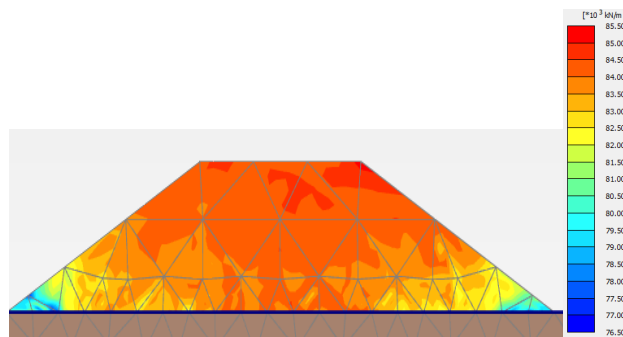


Figura 41. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 10seg



3.2.4.2 Suelo de fundación duro ($E=100\text{MPa}$): El comportamiento que presenta el módulo de rigidez G_0 , fue el mismo presentado con el terraplén sobre un suelo de fundación blando pero en menor proporción, la diferencia se da en que cuando la fundación es dura, el pie del talud con amplitudes de 0.01cm, 0.1cm y 1cm se ve afectado en menor proporción como se observa en las figuras 42, 43 y 44, en el caso de una amplitud de 0.01cm la variación de la rigidez es casi nula, pero al aplicarle una amplitud de 10cm (Figura 45) la rigidez si varía considerablemente, disminuyéndose a un valor cercano a 58 MPa, pero aun así no se reduce tanto como ocurre en el caso de la fundación blanda. También se observa que donde se reduce el modulo no son los mismos puntos para ambos tipos de fundación, no hay un patrón de decrecimiento del módulo.

Figura 42. Cambio de G_0 , Amplitud 0.01cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg

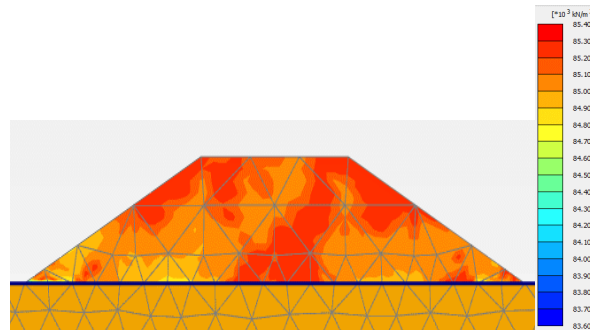


Figura 43. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg

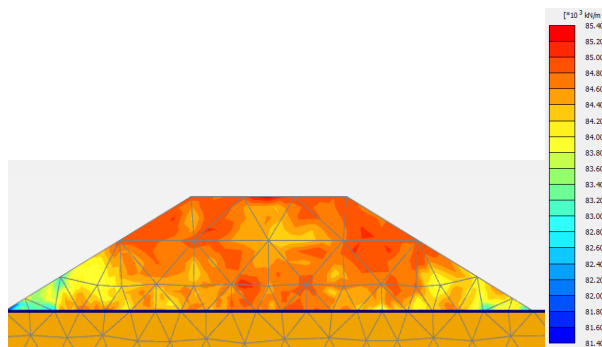


Figura 44. Cambio de G_0 , Amplitud 1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg

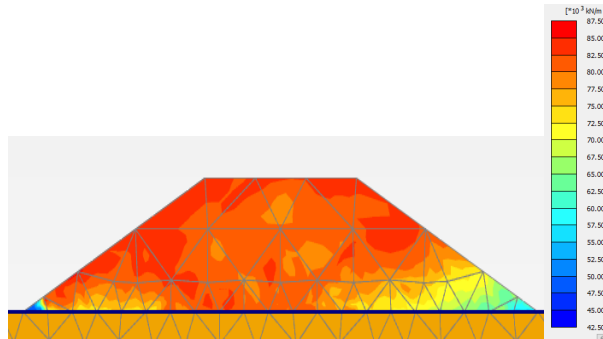
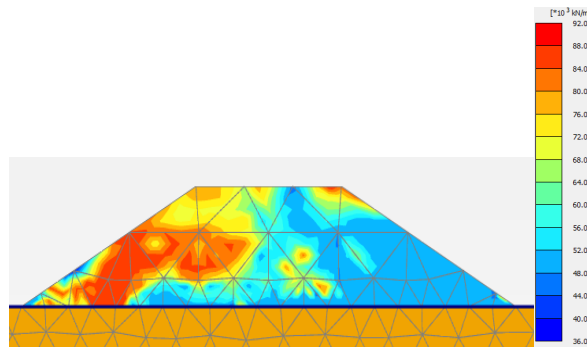


Figura 45. Cambio de G_0 , Amplitud 10cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg



Al variar la frecuencia el módulo decrece ligeramente ante frecuencias más altas, sin embargo, no se presenta una gran variación ante las diferentes frecuencias aplicadas, tampoco se observó que el pie del talud fuera altamente afectado.

Figura 46. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg

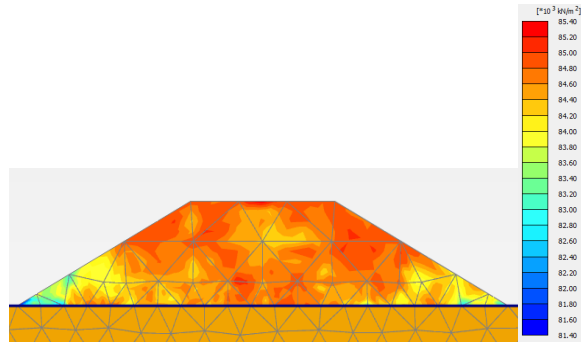


Figura 47. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 0.5Hz, Tiempo 1seg

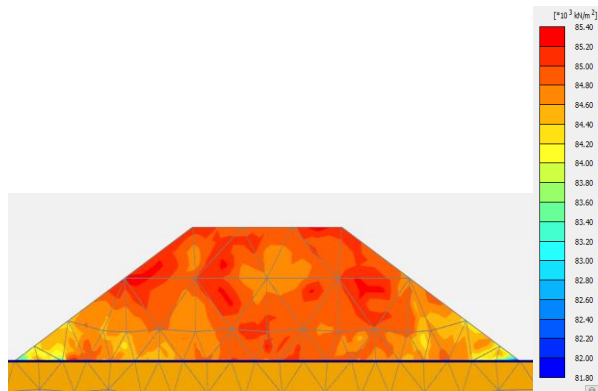
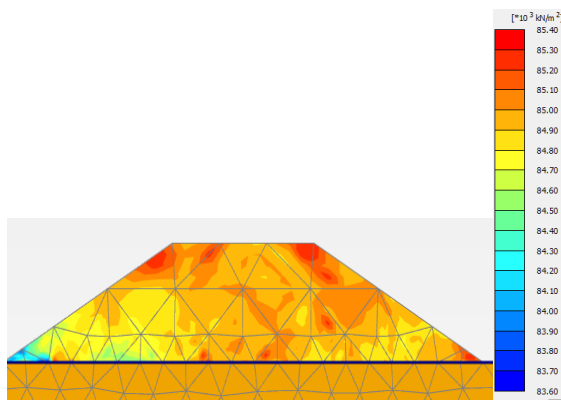


Figura 48. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 0.25Hz, Tiempo 1seg



En el caso de la variación de ciclos de igual manera que en el suelo blando, entre más ciclos tenga la onda más decrece el G_0 , pero este no se llega a ver reducido de una manera considerable como cuando se realiza la variación de las amplitudes.

Figura 49. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg

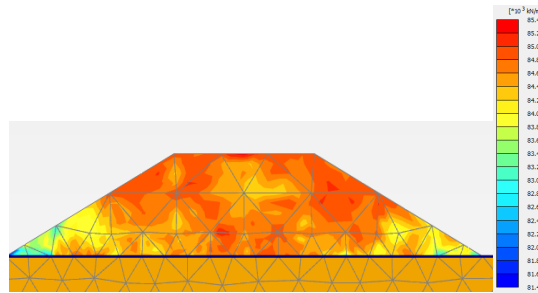


Figura 50. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 5seg

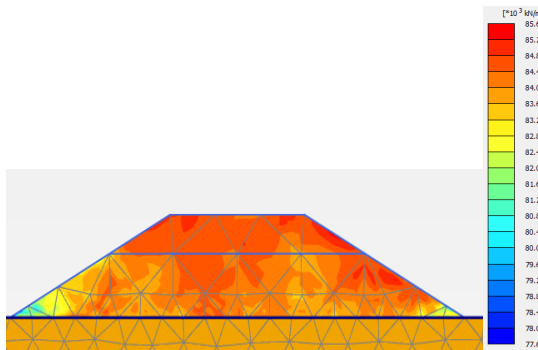
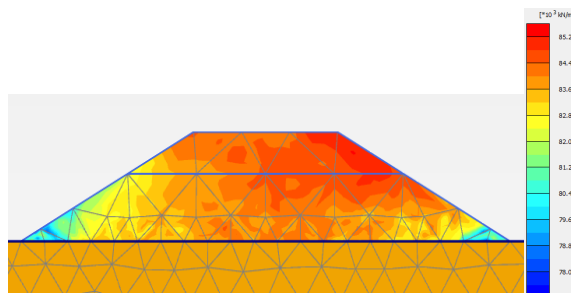


Figura 51. Cambio de G_0 , Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 10seg



Se observó que a medida que se presenta una perturbación mayor, existe una mayor variación del módulo de rigidez en el terraplén, sin embargo, en el terraplén soportado sobre el suelo de fundación blando presenta un mayor rango de variación, además de que el G_0 disminuye más que cuando este se soporta sobre una fundación dura.

4. CONCLUSIONES

Al analizar el comportamiento del módulo de rigidez se obtuvo que entre mayor sea la perturbación causada por la onda que se impone en la base del terraplén, el módulo decrece como se muestra en los resultados obtenidos en las figuras 18, 19 y 20, pero tiende a estabilizarse cuando se aplicaron las amplitudes mayores, esto indica que durante un movimiento telúrico la rigidez del suelo variará, es decir la rigidez no será constante durante todo el movimiento.

Con los resultados obtenidos en el programa PLAXIS 2D se encontró que la mayor afectación de la rigidez del terraplén se ocasiona principalmente cuando la amplitud de la onda es cada vez mayor, es decir que entre la variación de amplitudes, frecuencias y número de ciclos, la amplitud es la variable de la carga cíclica que más afecta al terraplén, dado que al ir aumentando la amplitud de la onda se registró una mayor variación en el módulo de rigidez tanto para suelo de fundación blando (Figuras 32, 33, 34 y 35) como suelo de fundación duro (Figuras 42, 43, 44 y 45), pero en este caso no es lo suficientemente grande como para llegar a afectar el factor de seguridad de los taludes.

Al tener una variación en la elasticidad del suelo de fundación se encontró que en el suelo de fundación duro ($E=100\text{MPa}$) el decrecimiento del módulo de rigidez es menor que cuando se tiene un suelo de fundación blando ($E=50\text{MPa}$), además los puntos de falla que se dan sobre el suelo duro son menores que en el blando, esto quiere decir que un terraplén soportado sobre un suelo de fundación blando tiene más afectación ante una perturbación causada por una onda.

Al aplicar una onda con distintas amplitudes, frecuencias y número de ciclos, el factor de seguridad varía muy ligeramente como se puede observar en las tablas de la 9 a la 18, debido a que los puntos de falla no se presentan sobre los taludes

sino que se presentan es en la base de este y en el suelo de fundación, lo que conlleva a que durante un movimiento telúrico la estabilidad de los taludes no se vean afectada, lo que se verá afectado es la base del terraplén y el suelo donde esta se soporta, es así que es fundamental mejorar el suelo de fundación, ya que en él es donde se presentan las fallas que podrían hacer colapsar el terraplén.

Cuando una onda perturba el terraplén, la rigidez del suelo que lo compone se ve claramente afectada principalmente en el pie del talud que es donde más se llega a reducir este módulo, con este comportamiento se observa que la variación de la rigidez no influye en la estabilidad del terraplén pero esto puede ocasionar asentamientos diferenciales debido a que la variación del módulo es heterogénea y no existe un patrón del comportamiento de degradación del módulo de rigidez con el cual se pueda prever este cambio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Sismo de magnitud 6.2 se registró en Ecuador. (17 de Noviembre de 2017)
Disponible en: <http://www.vanguardia.com/mundo/416046-sismo-de-magnitud-62-se-registro-en-ecuador>
- [2] I.N.V. E-123-13. Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos.
- [3] Límites de consistencia. (Marzo 16 de 2017)
<https://es.slideshare.net/jonatantrujillo1/limites-de-consistencia-73228733>
- [4] I.N.V. E-125-13. Determinación del límite líquido de los suelos
- [5] I.N.V. E-126-13. Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.
- [6] I.N.V. E-142-13. Relaciones de humedad-peso unitario seco en los suelos
(Ensayo modificado de compactación)
- [7] Kramer, S.L, Geotechnical earthquake engineering, Prentice Hall. INC, New Jersey, 1996, Cap.6 Dynamic soil properties, p. 220.
- [8] Escario, V & De Justo Alpañes, J.L, Resistencia al esfuerzo cortante de los suelos, Dossat S.A., Madrid, 1970, Cap.1 Suelos saturados. Principios básicos, p. 20.
- [9] Kramer, S.L, Geotechnical earthquake engineering, Prentice Hall. INC, New Jersey, 1996, Cap.7 Ground response analysis, p. 281.

[10] PLAXIS manual, Materials models, Lineal elastic perfectly plastic model (Mohr-coulomb model), p. 31-40

[11] PLAXIS manual, Materials models, The Hardening Soil model with small-strain stiffness (HSsmall), p. 77-85

[12] PLAXIS manual, Materials models, The Hardening Soil model with small-strain stiffness (HSsmall), p. 82

[13] Merchán, V, Determinación de módulos de deformación para el análisis del comportamiento esfuerzo-deformación ante cargas cíclicas.

BIBLIOGRAFÍA

ESCARIO, V & DE JUSTO ALPAÑES, J.L, Resistencia al esfuerzo cortante de los suelos, Dossat S.A., Madrid, 1970, Cap.1 Suelos saturados. Principios básicos, p. 20.

I.N.V. E-123-13. Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos.

I.N.V. E-125-13. Determinación del límite líquido de los suelos

I.N.V. E-126-13. Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.

I.N.V. E-142-13. Relaciones de humedad-peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación)

KRAMER, S.L, Geotechnical earthquake engineering, Prentice Hall. INC, New Jersey, 1996, Cap.7 Ground response analysis, p. 281.

_____. _____. Prentice Hall. INC, New Jersey, 1996, Cap.6 Dynamic soil properties, p. 220.

TRUJILLO, Jonatan. Límites de consistencia. Marzo 16 de 2017. Disponible en: <https://es.slideshare.net/jonatantrujillo1/limites-de-consistencia-73228733>

MERCHÁN, V, Determinación de módulos de deformación para el análisis del comportamiento esfuerzo-deformación ante cargas cíclicas.

PLAXIS. manual, Materials models, Lineal elastic perfectly plastic model (Mohr-coulomb model), p. 31-40

_____. _____. The Hardening Soil model with small-strain stiffness (HSsmall), p. 77-85

_____. _____. The Hardening Soil model with small-strain stiffness. HSsmall, p. 82

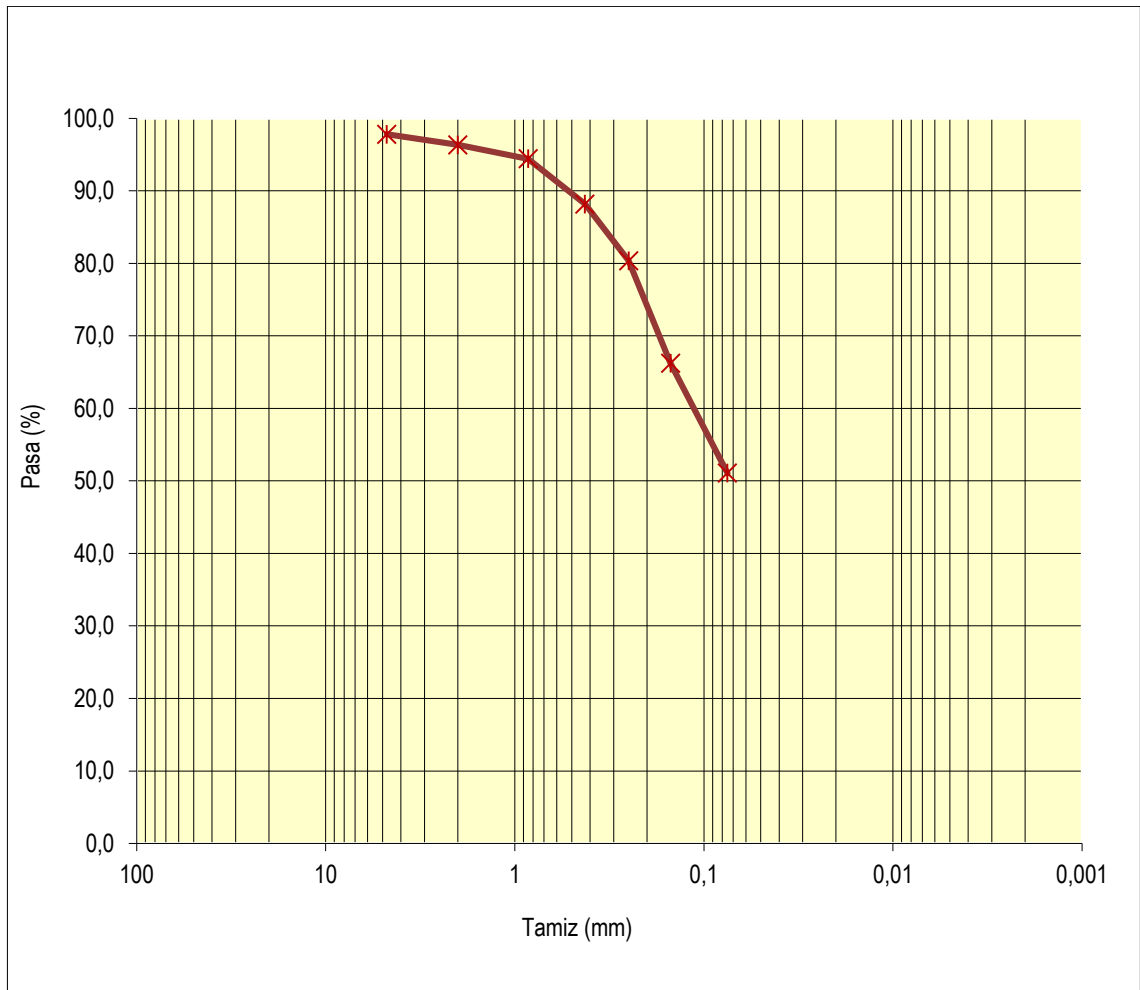
VANGUARDIA LIBERAL. Sismo de magnitud 6.2 se registró en Ecuador. (17 de Noviembre de 2017) Disponible en: <http://www.vanguardia.com/mundo/416046-sismo-de-magnitud-62-se-registro-en-ecuador>

ANEXOS

ANEXO 1. Granulometría

Nº Tamiz	Abertura(mm)	Peso suelo retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
1/2	12.7	14.1	1.61	1.61	98.39
3/8	9.5	0	0.00	1.61	98.39
Nº 4	4.75	5.2	0.59	2.21	97.79
Nº 10	2	12.7	1.45	3.66	96.34
Nº 20	0.85	16.9	1.93	5.59	94.41
Nº 40	0.425	54.6	6.24	11.83	88.17
Nº 60	0.25	68.4	7.82	19.65	80.35
Nº 100	0.15	123.7	14.14	33.79	66.21
Nº 200	0.075	132.5	15.15	48.94	51.06
Fondo		446.7	51.06	100.00	0.00
		874.8	100		

ANEXO 2. Curva granulométrica



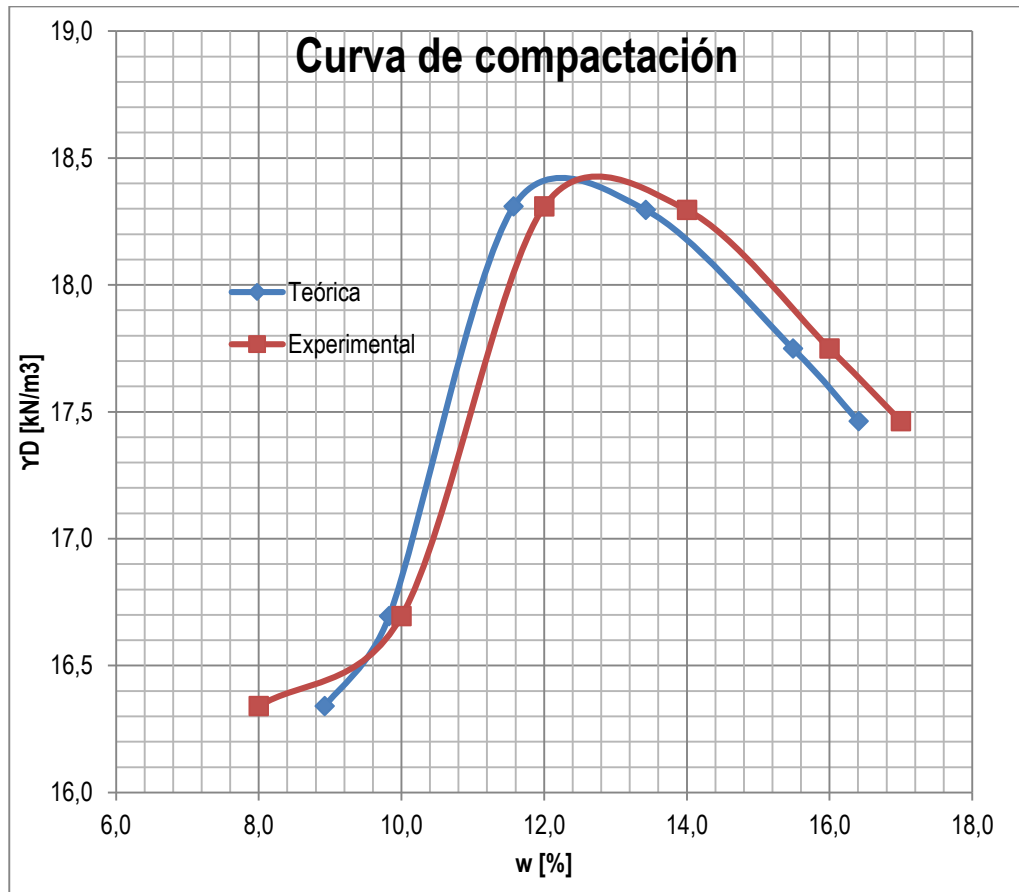
ANEXO 3. Pesos obtenidos en el laboratorio ensayo proctor modificado

	Punto	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Arriba	Peso tara [g]	15.9	15.9	5.5	5.5	15.8	15.8
	Wtara+Sh [g]	164.5	118.1	84.2	87.2	128.9	146.3
	Wtara+Ss [g]	152	109	76.1	77.6	113.7	127.9
Medio	Peso tara [g]	15.7	15.7	15.8	5.5	15.8	15.8
	Wtara+Sh [g]	148.4	95.4	138.9	86	157.7	180.5
	Wtara+Ss [g]	137.6	88.3	126.2	76.4	138.7	157.2
Abajo	Peso tara [g]	15.9	15.9	5.5	15.8	16.1	16.1
	Wtara+Sh [g]	141.7	120	80.7	146.8	181	174.3
	Wtara+Ss [g]	131.6	110.6	72.8	131.3	158.9	152.1
	Wmolde+Sh [g]	5876.9	5928.6	6130	6161.1	6136.7	6120.3
	Cant Agua [ml]	200	250	300	350	400	425

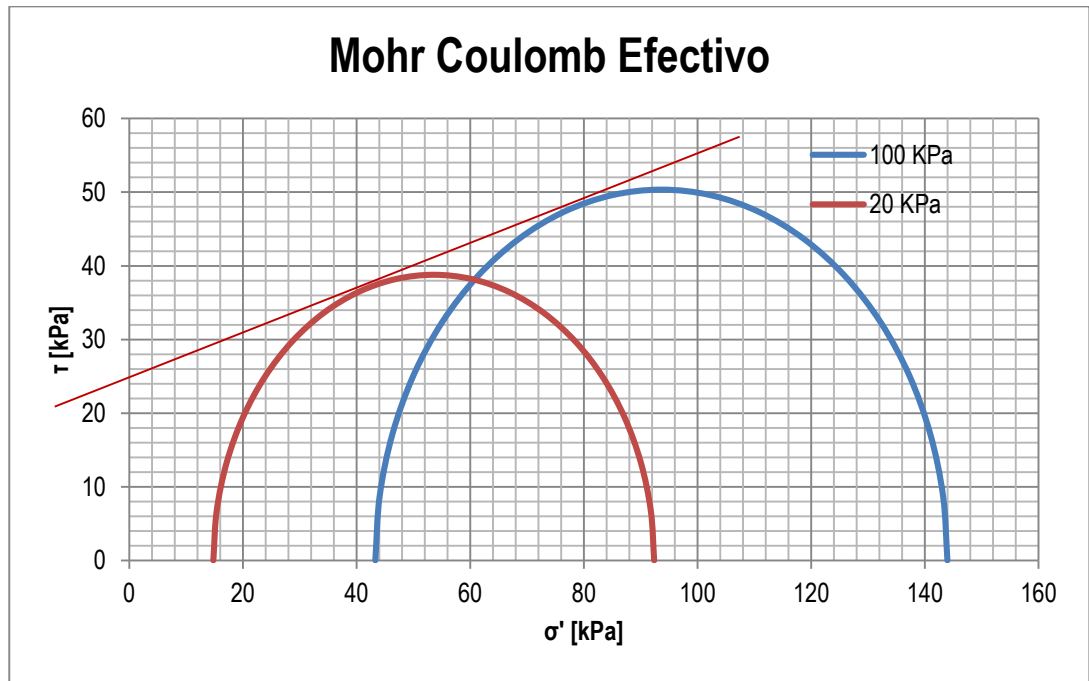
ANEXO 4. Humedades experimentales obtenidas en el laboratorio

	Punto	#1	#2	#3	#4	#5	#6
	ρ_H [g/cm ³]	1.81	1.87	2.08	2.12	2.09	2.07
Arriba	w%	9.18	9.77	11.47	13.31	15.53	16.41
Medio	w%	8.86	9.78	11.50	13.54	15.46	16.48
Abajo	w%	8.73	9.93	11.74	13.42	15.48	16.32
	w%	8.92	9.83	11.57	13.42	15.49	16.41
	ρ_D [g/cm ³]	1.67	1.70	1.87	1.87	1.81	1.78
	γ_D [kN/m ³]	16.34	16.69	18.31	18.30	17.75	17.46

ANEXO 5. Curva de compactación ensayo Proctor modificado



ANEXO 6. Envolvente de falla Mohr-Coulomb



ANEXO 7. Falla estática para una presión de confinamiento de 100 kPa

σ_{desv}	100.71	[kPa]	Angulo [Grados]	Angulo [rad]	Sigma	Tau
σ'_1	144	[kPa]	0	0	144	0
σ'_3	43.29	[kPa]	10	0.174532925	143.234994	8.74405399
τ_{zx}	0	[kPa]	20	0.34906585	140.963222	17.2224243
r'	50.355		30	0.523598776	137.253709	25.1775
	93.645		40	0.698131701	132.219168	32.3675701
			50	0.872664626	126.01257	38.5741679
			60	1.047197551	118.8225	43.6087092
			70	1.221730476	110.867424	47.3182219
			80	1.396263402	102.389054	49.5899944
			90	1.570796327	93.645	50.355
			100	1.745329252	84.900946	49.5899944
			110	1.919862177	76.4225757	47.3182219
			120	2.094395102	68.4675	43.6087092
			130	2.268928028	61.2774299	38.5741679
			140	2.443460953	55.0708321	32.3675701
			150	2.617993878	50.0362908	25.1775
			160	2.792526803	46.3267781	17.2224243
			170	2.967059728	44.0550056	8.74405399
			180	3.141592654	43.29	6.1692E-15

ANEXO 8. Falla estática para una presión de confinamiento de 20 kPa

σ desv	77.5786
σ'_1	92.4
σ'_3	14.8214
τ_{zx}	0
r'	38.789
C'	53.611

[kPa]

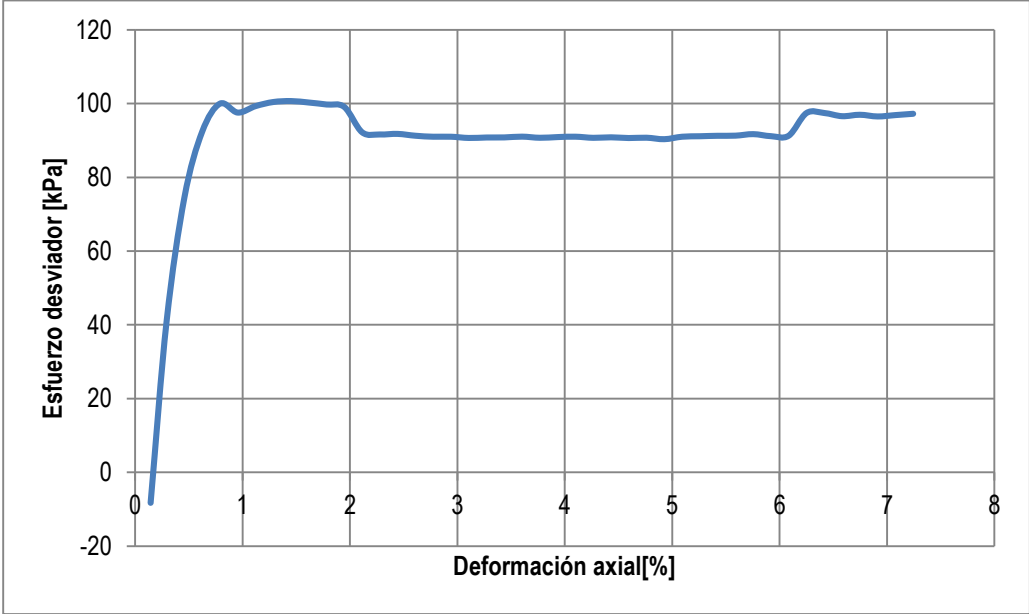
[kPa]

[kPa]

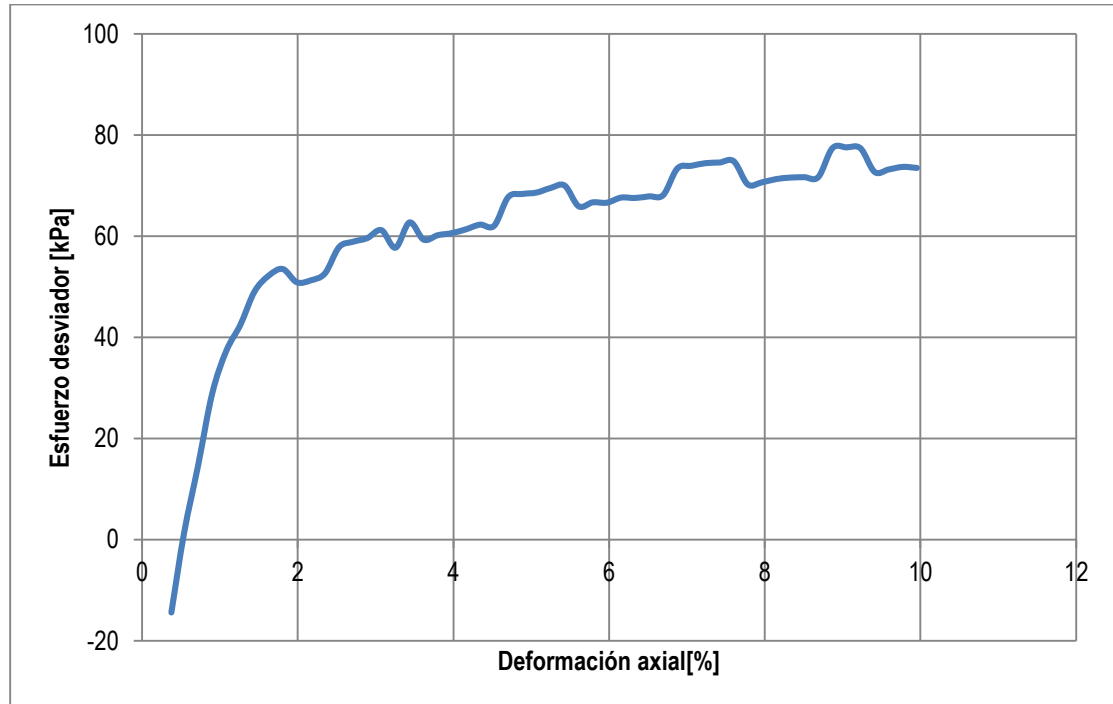
[kPa]

Angulo [Grados]	Angulo [rad]	Sigma	Tau
0	0	92.4	0
10	0.174532925	91.8107034	6.73569126
20	0.34906585	90.060719	13.2667219
30	0.523598776	87.2032192	19.39465
40	0.698131701	83.3250277	24.9332814
50	0.872664626	78.5439814	29.7143277
60	1.047197551	73.00535	33.5925192
70	1.221730476	66.8774219	36.450019
80	1.396263402	60.3463913	38.2000034
90	1.570796327	53.6107	38.7893
100	1.745329252	46.8750087	38.2000034
110	1.919862177	40.3439781	36.450019
120	2.094395102	34.21605	33.5925192
130	2.268928028	28.6774186	29.7143277
140	2.443460953	23.8963723	24.9332814
150	2.617993878	20.0181808	19.39465
160	2.792526803	17.160681	13.2667219
170	2.967059728	15.4106966	6.73569126
180	3.141592654	14.8214	4.7523E-15

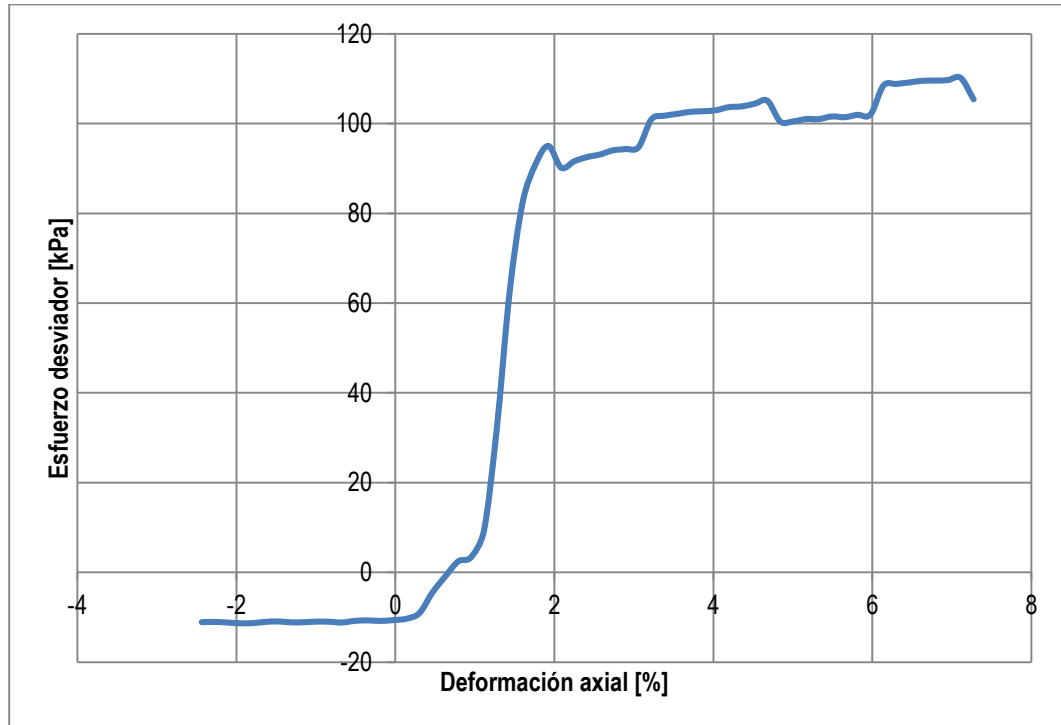
ANEXO 9. Gráfica de esfuerzo desviador contra deformación axial para una presión de confinamiento de 100 kPa



ANEXO 10. Gráfica de esfuerzo desviador contra deformación axial para una presión de confinamiento de 20 kPa



ANEXO 11. Gráfica de esfuerzo desviador contra deformación axial para una presión de confinamiento de 60 kPa



ANEXO 12. Cálculo del γ sat para el suelo que compone el terraplén.

$$\gamma d = \frac{W_s}{V_T}$$

W_s : Peso de los sólidos

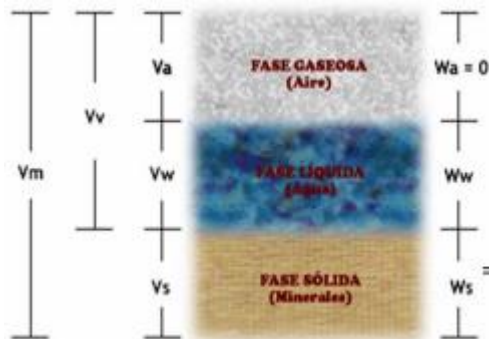
V_T : Volumen del molde de diámetro de 10.1 cm y altura de 11.64 cm.

$$W_s = 18.4 * 9.437 \times 10^{-4} * \frac{1000}{9.81} = 1.77 \text{ kg}$$

Asumiendo un $G_s = 2.65$ y un $\gamma_o = 1 \text{ g/cm}^3$ se obtiene

$$\gamma_s = \gamma_o * G_s = 2.65 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$V_s = \frac{W_s}{\gamma_s} = \frac{1770 \text{ gr}}{2.65} = 668 \text{ m}^3$$



$$V_m = 943.7 \text{ cm}^3$$

$$V_s = 668 \text{ cm}^3$$

$$W_s = 1770 \text{ g}$$

Asumiendo un $Sr = 1$

$$Sr = \frac{Vw}{Vv}$$

$$Vv = 943.7 - 668 = 275.7 \text{ cm}^3$$

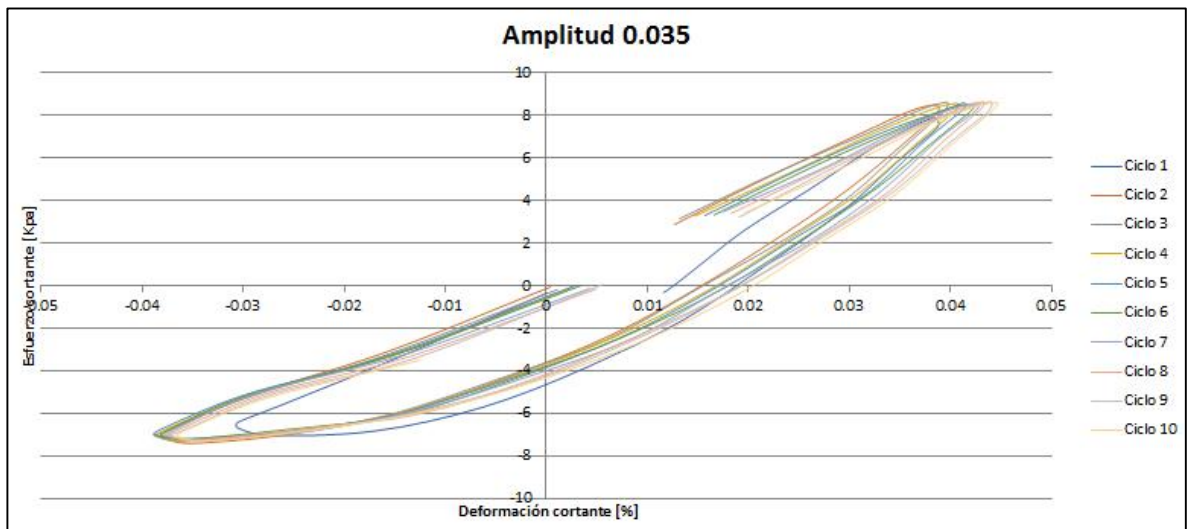
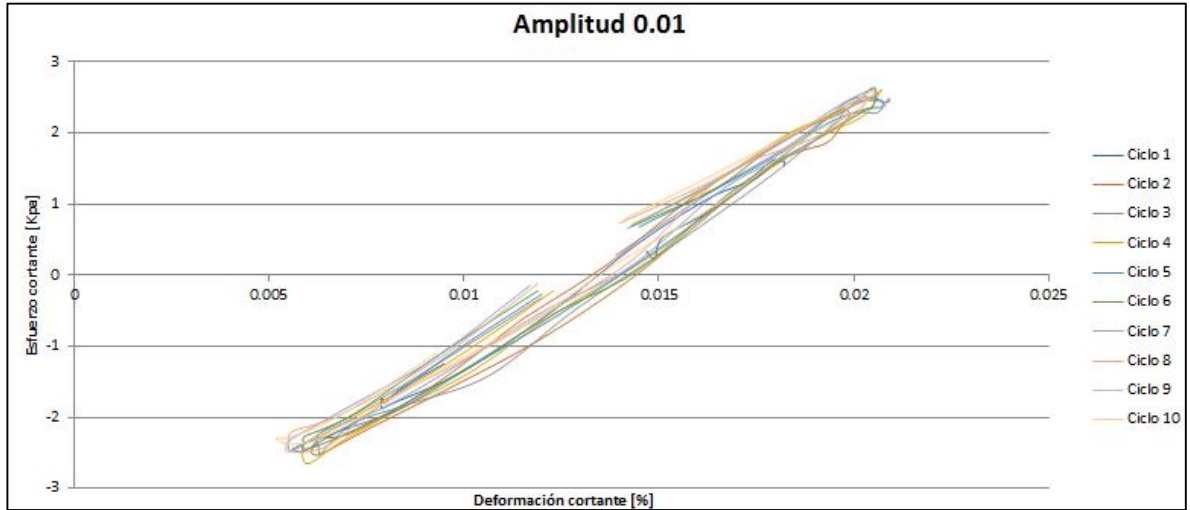
$$Vw = 275.7 * 1 = 275.7 \text{ cm}^3$$

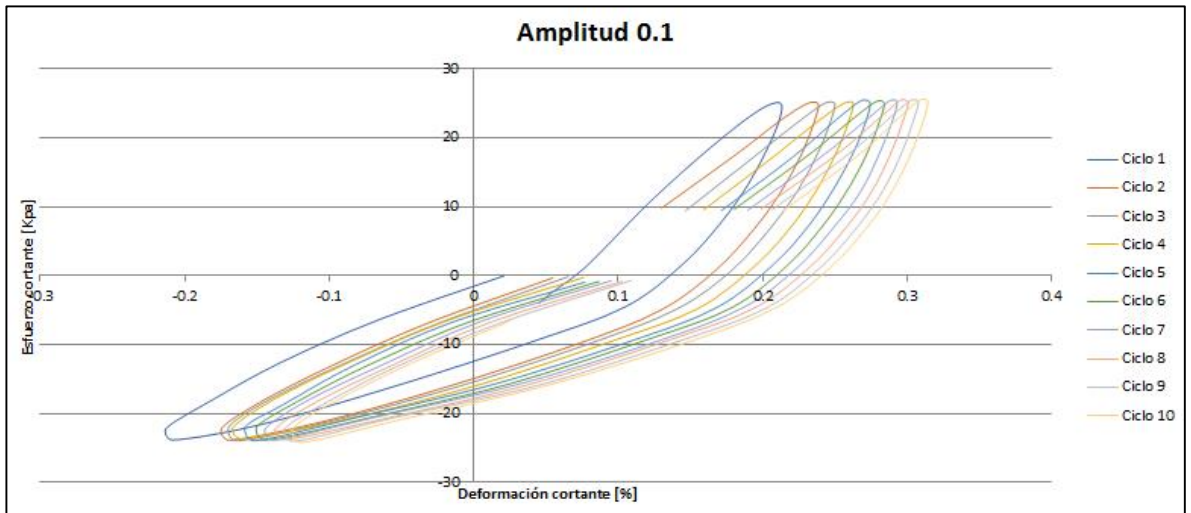
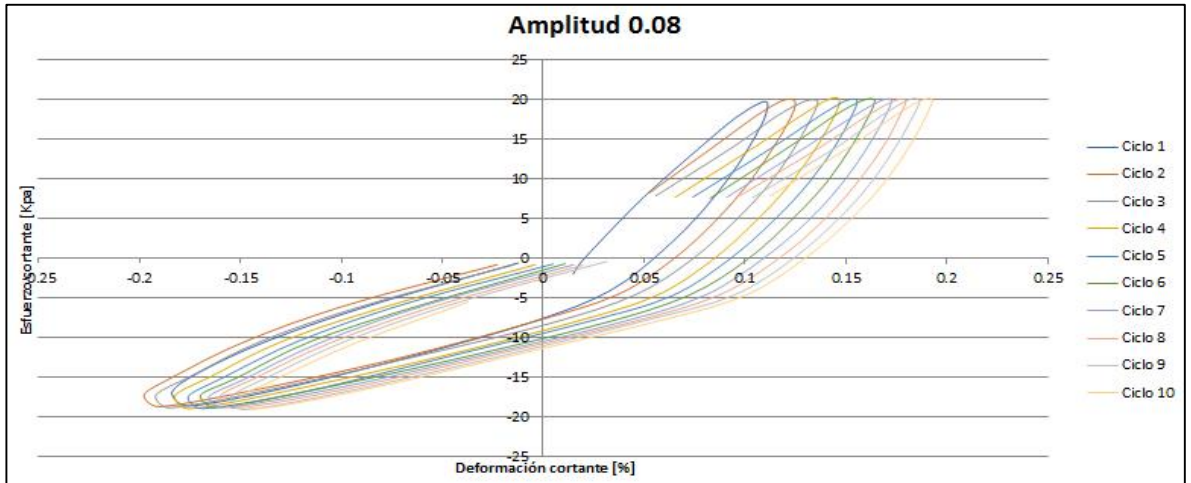
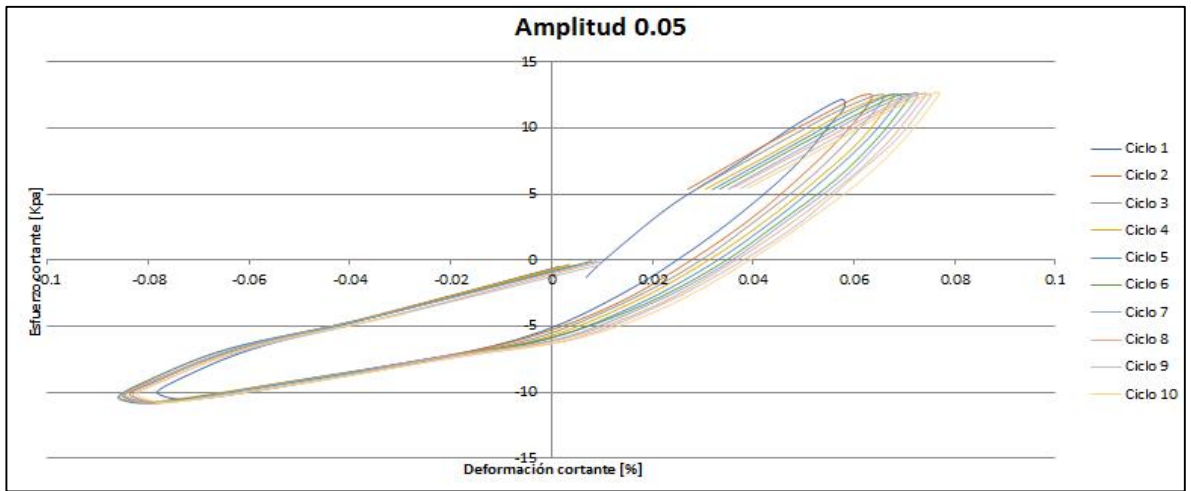
$$\gamma_{sat} = \frac{Ws + Ww}{V_T} = \left(\frac{1770 + 275.7}{943.7} \right) = 2.1 \frac{g}{\text{cm}^3}$$

$$\gamma_{sat} = 2.1 \frac{gr}{\text{cm}^3} * \left(\frac{100\text{cm}}{1\text{m}} \right)^3 * \left(\frac{1\text{kg}}{1000g} \right) = 2100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\gamma_{sat} = \frac{2100 * 9.81}{1000} = 20.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

ANEXO 13. Gráficas de los 10 ciclos por cada amplitud para la muestra confinada con una presión de 100 kPa y sometida a una frecuencia de 1Hz.





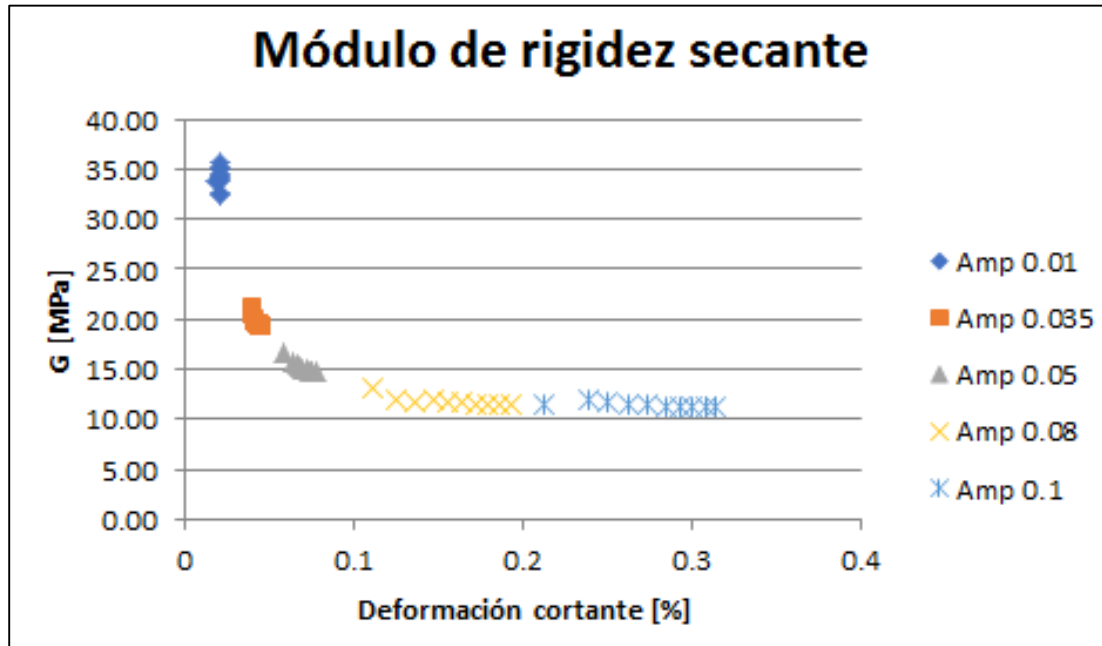
**ANEXO 14. Módulo de rigidez secante y tangente para una Frecuencia de 1Hz
y Presión de confinamiento de 100 kPa**

Carga aplicada (KN)	0.01			0.035		
Ciclo de carga	Shear	G_secante	G_tangente	Shear	G_secante	G_tangente
	Strain (%)	(Mpa)	(Mpa)	Strain (%)	(Mpa)	(Mpa)
1	0.0182	33.83	38.06	0.0389	21.40	34.22
2	0.0199	35.23	38.71	0.0387	20.67	23.66
3	0.0209	34.34	35.67	0.0397	20.23	22.09
4	0.0207	35.57	30.68	0.0407	19.96	21.67
5	0.0207	32.69	28.60	0.0414	19.65	22.72
6	0.0205	34.87	30.02	0.0424	19.45	22.81
7	0.0205	33.94	30.46	0.0428	19.60	21.05
8	0.0203	33.70	26.95	0.0433	19.67	22.44
9	0.0203	34.44	26.45	0.0441	19.54	24.55
10	0.0205	32.42	27.81	0.0447	19.53	22.31

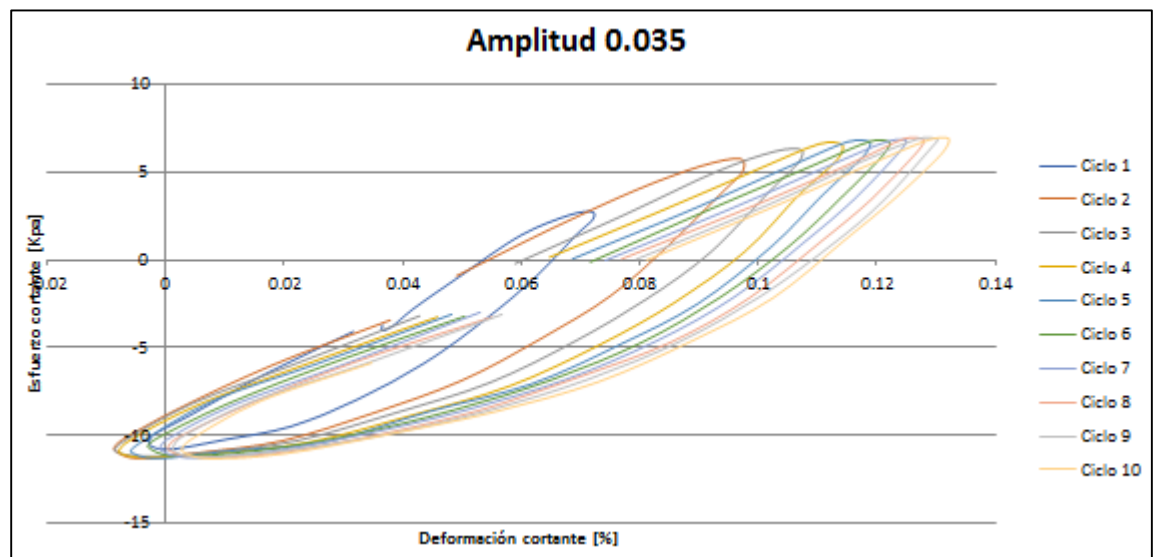
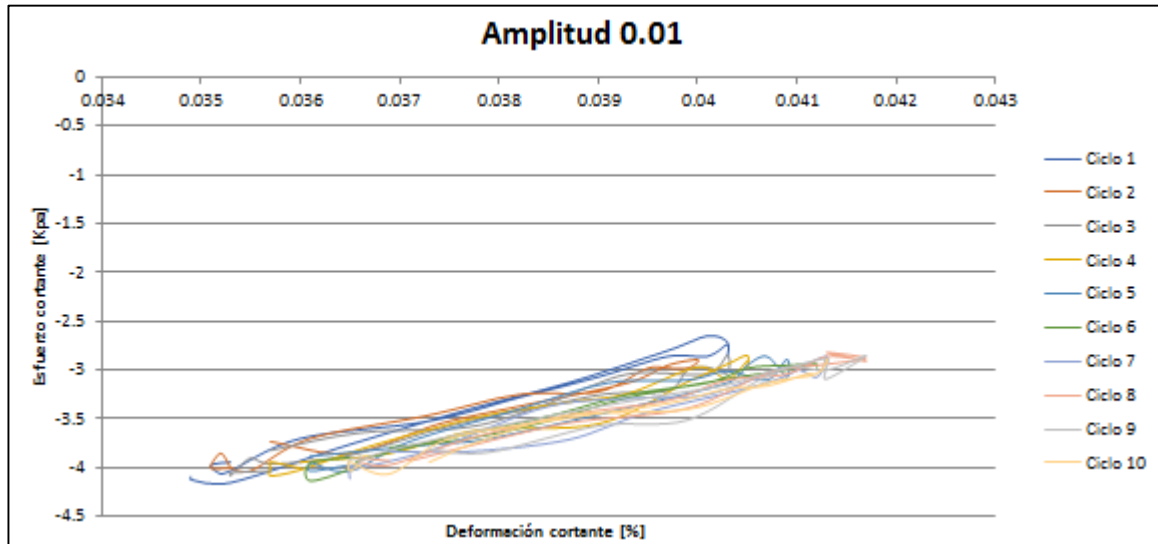
0.05			0.08			0.1		
Shear	G_secante	G_tangente	Shear	G_secante	G_tangente	Shear	G_secante	G_tangente
Strain (%)	(Mpa)	(Mpa)	Strain (%)	(Mpa)	(Mpa)	Strain (%)	(Mpa)	(Mpa)
0.058	16.68	30.37	0.1104	13.03	27.05	0.2119	11.52	19.12
0.0635	15.80	21.68	0.1247	11.97	18.23	0.2384	11.83	15.15
0.066	15.46	21.43	0.136	11.79	16.13	0.2496	11.70	16.56
0.0679	15.15	20.78	0.1468	11.86	16.09	0.2625	11.37	16.00
0.0695	14.99	21.09	0.1556	11.72	15.94	0.2741	11.42	15.82
0.0713	14.89	21.01	0.1643	11.61	16.53	0.284	11.30	15.35

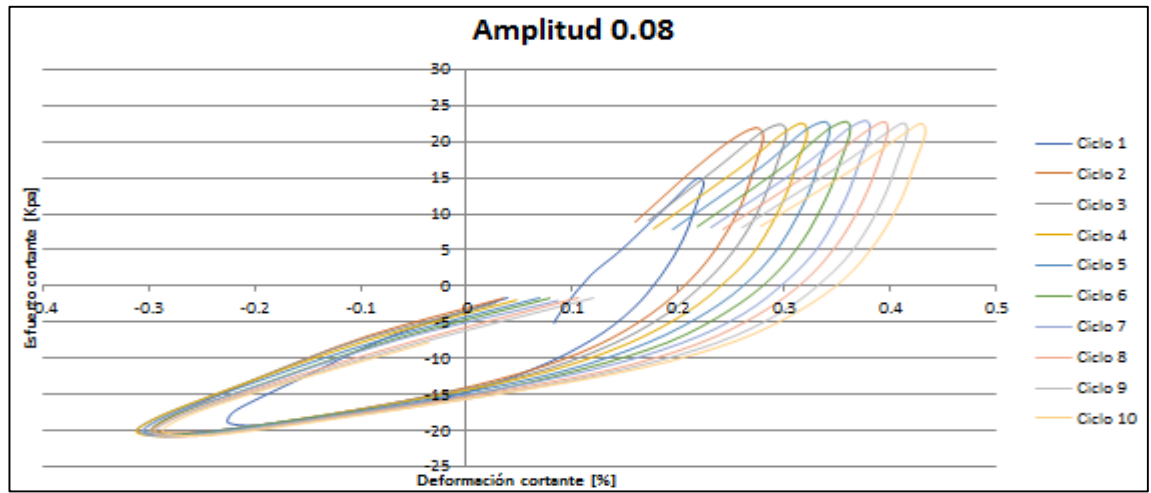
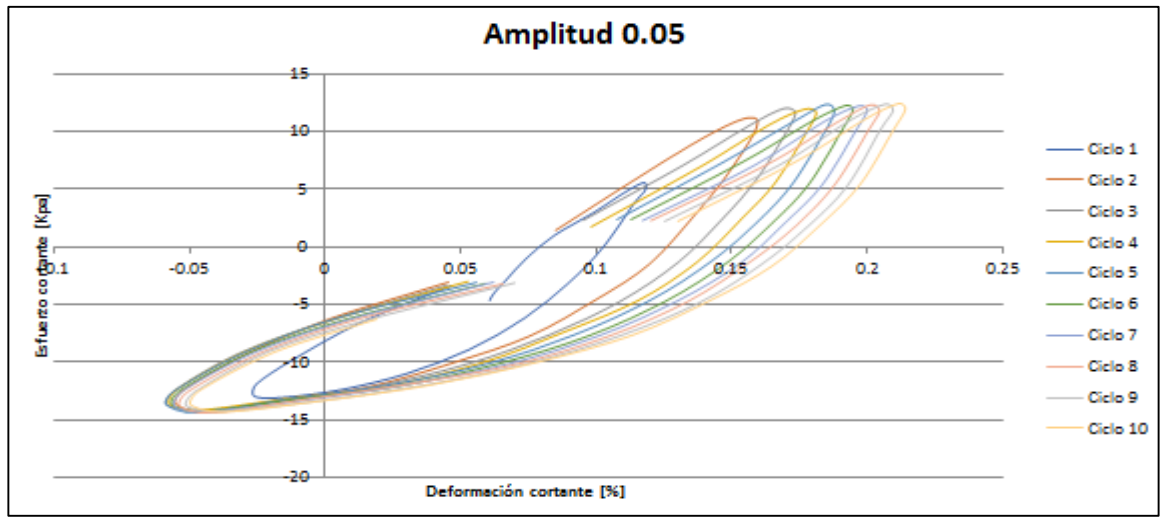
0.05			0.08			0.1		
Shear Strain (%)	G_secante (Mpa)	G_tangente (Mpa)	Shear Strain (%)	G_secante (Mpa)	G_tangente (Mpa)	Shear Strain (%)	G_secante (Mpa)	G_tangente (Mpa)
0.0727	14.88	21.22	0.1726	11.48	16.15	0.2927	11.26	15.29
0.0742	14.71	20.33	0.1797	11.42	15.36	0.3006	11.26	15.15
0.0753	14.72	20.37	0.1865	11.45	15.25	0.3077	11.28	15.23
0.077	14.72	20.44	0.1929	11.37	15.70	0.3142	11.33	15.48

ANEXO 15. Comportamiento del módulo de rigidez secante para una frecuencia de 1Hz y Presión de confinamiento de 100 kPa.



ANEXO 16. Gráficas de los 10 ciclos por cada amplitud para la muestra confinada con una presión de 20 kPa y sometida a una frecuencia de 2Hz.





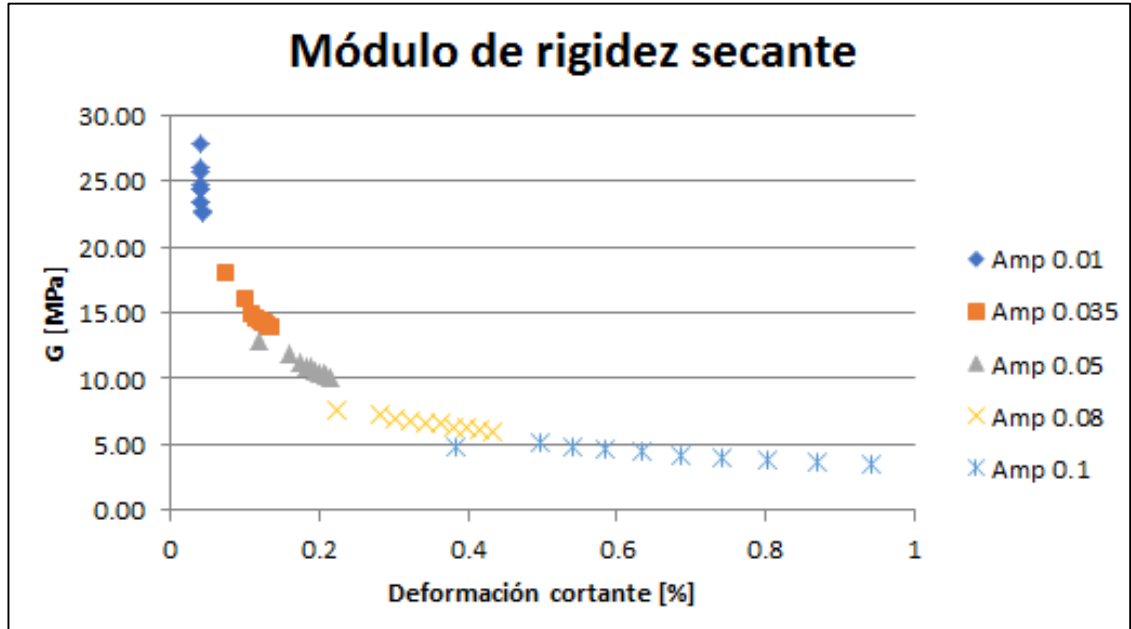
**ANEXO 17. Módulo de rigidez secante y tangente para una Frecuencia de 2Hz
y Presión de confinamiento de 20 kPa**

Carga aplicada (kN)	0.01			0.035		
Ciclo de carga	Shear Strain (%)	G_secante (Mpa)	G_tangente (Mpa)	Shear Strain (%)	G_secante (Mpa)	G_tangente (Mpa)
1	0.0403	27.81	24.77	0.0721	18.09	11.80
2	0.04	23.30	15.15	0.0974	16.08	16.43
3	0.0403	24.63	17.27	0.1073	15.05	15.17
4	0.0405	25.66	16.42	0.1142	14.61	14.09
5	0.0409	24.41	15.76	0.1189	14.43	14.10
6	0.0412	23.40	20.11	0.1222	14.32	14.82
7	0.0413	26.06	16.54	0.125	14.32	14.00
8	0.0417	22.59	19.61	0.128	14.18	13.69
9	0.0417	22.74	16.46	0.1303	14.05	14.07
10	0.0413	24.41	22.84	0.1322	14.05	14.24

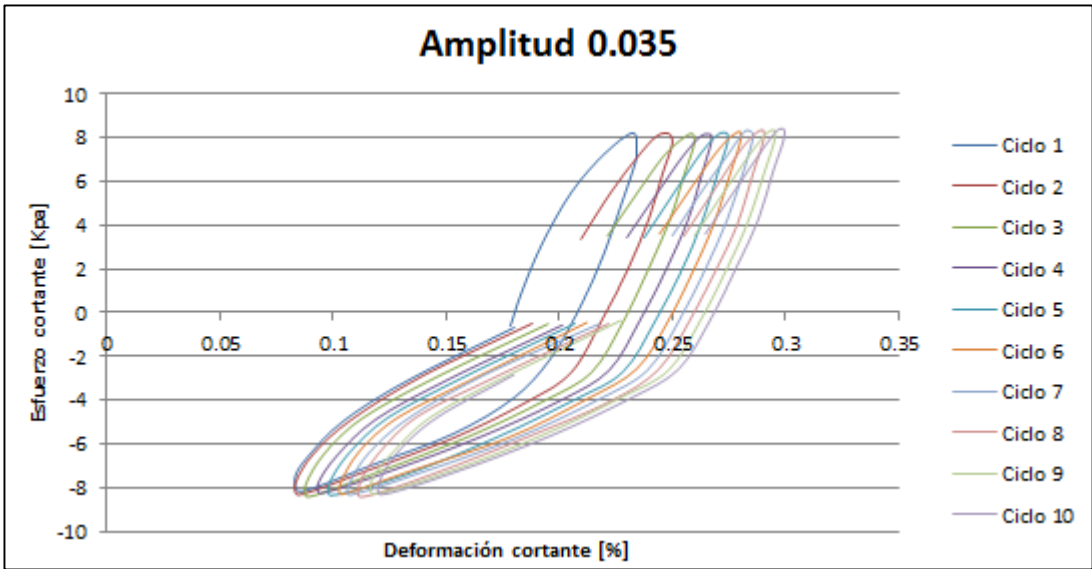
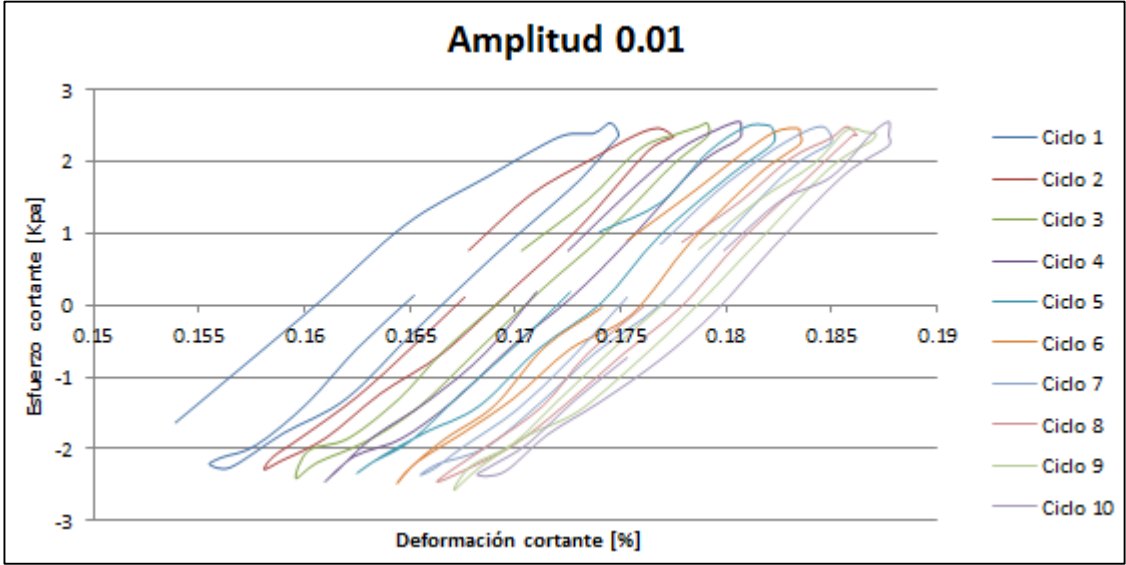
0.05			0.08			0.1		
Shear Strain (%)	G_secante (Mpa)	G_tangente (Mpa)	Shear Strain (%)	G_secante (Mpa)	G_tangente (Mpa)	Shear Strain (%)	G_secante (Mpa)	G_tangente (Mpa)
0.118	12.90	24.19	0.224	7.58	16.11	0.384	4.77	12.86
2			1			3		
0.159	11.80	14.99	0.280	7.31	13.13	0.495	5.14	10.14
5			3			9		
0.173	11.27	12.94	0.301	6.99	11.29	0.539	4.88	8.96
7			9			7		

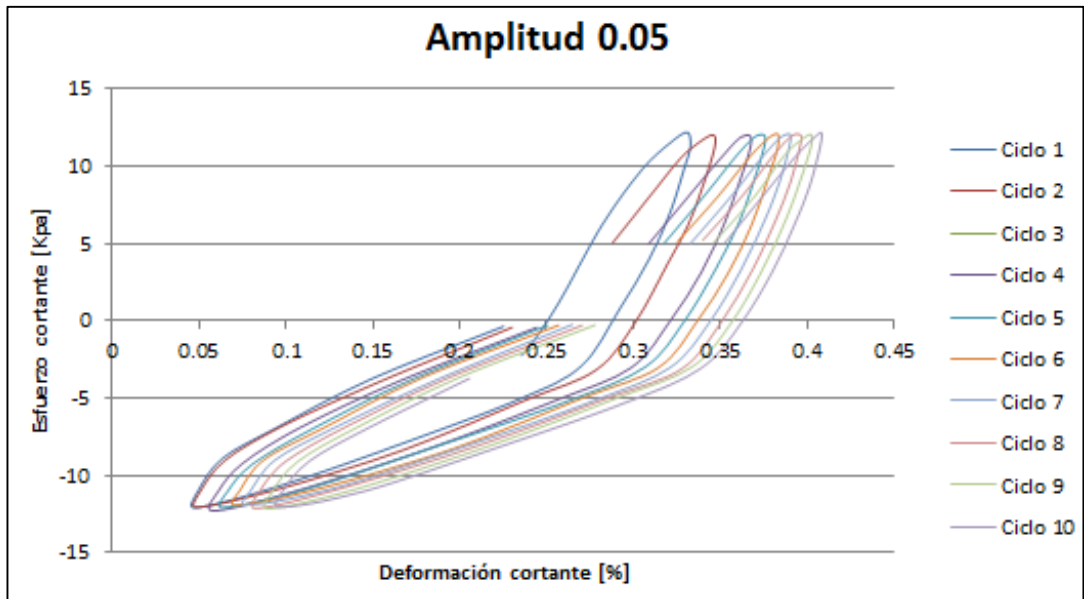
0.05			0.08			0.1		
Shear Strain (%)	G_secant e (Mpa)	G_tangent e (Mpa)	Shear Strain (%)	G_secant e (Mpa)	G_tangent e (Mpa)	Shear Strain (%)	G_secant e (Mpa)	G_tangent e (Mpa)
0.1814	10.92	12.90	0.3215	6.83	10.31	0.5851	4.62	8.30
0.1881	10.83	12.68	0.3427	6.66	10.32	0.6329	4.44	7.67
0.195	10.53	12.11	0.3622	6.55	10.24	0.6853	4.22	7.59
0.2002	10.35	11.70	0.3807	6.34	9.78	0.7417	4.01	7.33
0.2047	10.34	11.44	0.3977	6.25	9.50	0.8033	3.81	6.82
0.2097	10.21	11.60	0.416	6.07	9.28	0.8689	3.63	6.79
0.2143	10.12	11.86	0.4333	5.98	9.10	0.9421	3.48	6.66

ANEXO 18. Comportamiento del módulo de rigidez secante para una frecuencia de 1Hz y Presión de confinamiento de 20 kPa.



ANEXO 19. Gráficas de los 10 ciclos por cada amplitud para la muestra confinada con una presión de 60 kPa y sometida a una frecuencia de 0.5Hz.

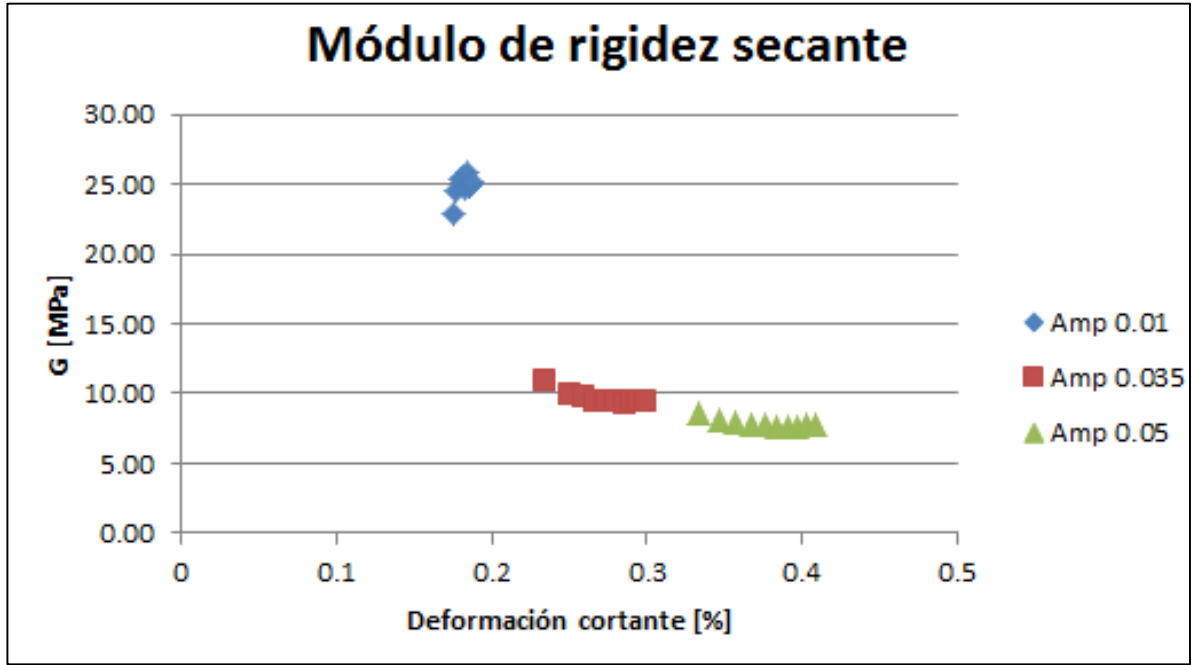




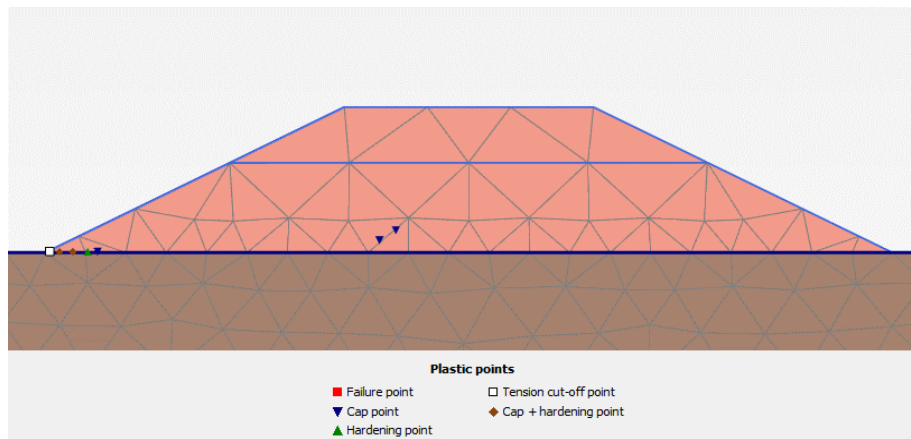
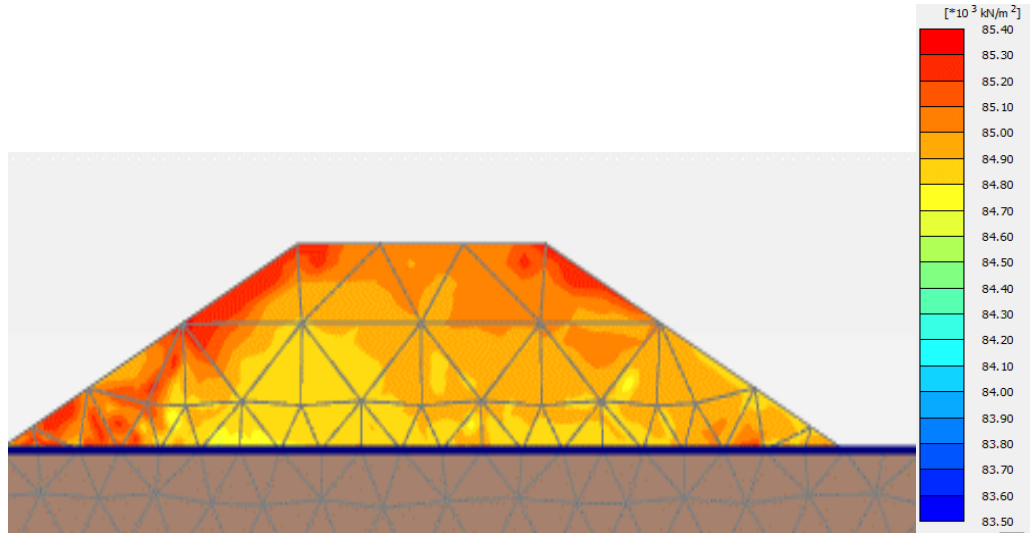
**ANEXO 20. Módulo de rigidez secante y tangente para una Frecuencia de 0.5Hz
y Presión de confinamiento de 60 kPa**

Carga aplicada (kN)	0.01			0.035			0.05		
Ciclo de carga	Shear Strain (%)	G_secante (Mpa)	G_tangente (Mpa)	Shear Strain (%)	G_secante (Mpa)	G_tangente (Mpa)	Shear Strain (%)	G_secante (Mpa)	G_tangente (Mpa)
1	0.1749	22.84	24.97	0.2343	10.85	24.77	0.3327	8.52	17.89
2	0.1775	24.50	25.19	0.25	9.91	15.81	0.3467	8.07	14.08
3	0.1791	25.36	23.57	0.2597	9.66	14.88	0.3576	7.90	13.50
4	0.1807	25.44	27.88	0.2673	9.43	15.10	0.3672	7.84	13.38
5	0.1822	24.61	18.74	0.2745	9.39	15.54	0.3754	7.72	13.34
6	0.1835	25.89	21.79	0.2801	9.37	15.05	0.3831	7.68	12.78
7	0.185	24.86	26.87	0.2855	9.32	15.41	0.3903	7.63	13.15
8	0.1862	24.85	21.65	0.2904	9.39	15.64	0.3966	7.67	12.86
9	0.1871	25.06	22.97	0.2952	9.34	15.29	0.4024	7.73	13.08
10	0.1877	25.23	21.67	0.2994	9.35	15.27	0.4082	7.75	13.82

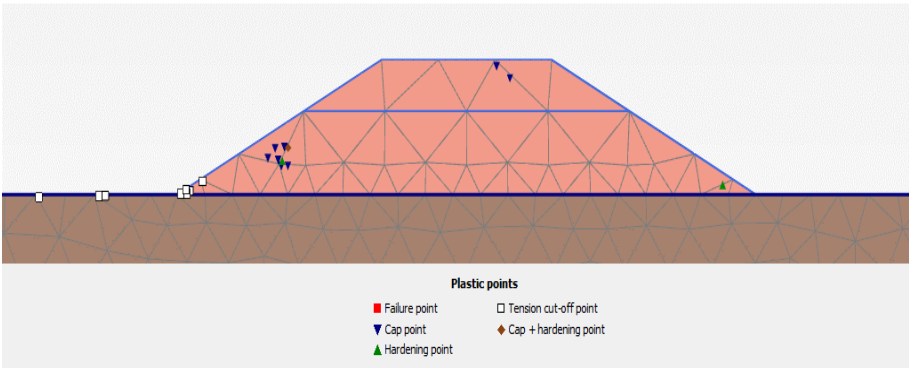
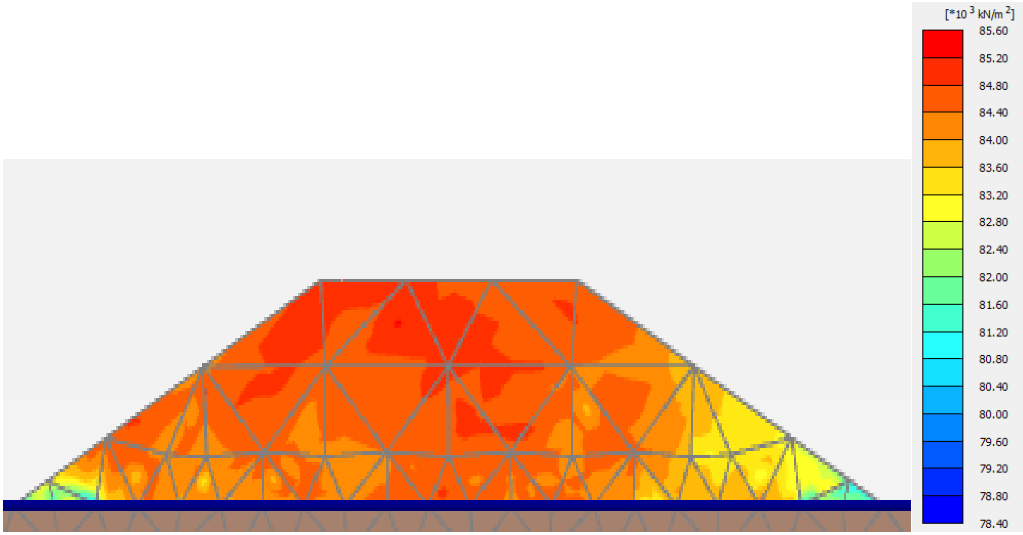
ANEXO 21. Comportamiento del módulo de rigidez secante para una frecuencia de 0.5Hz y Presión de confinamiento de 60 kPa.



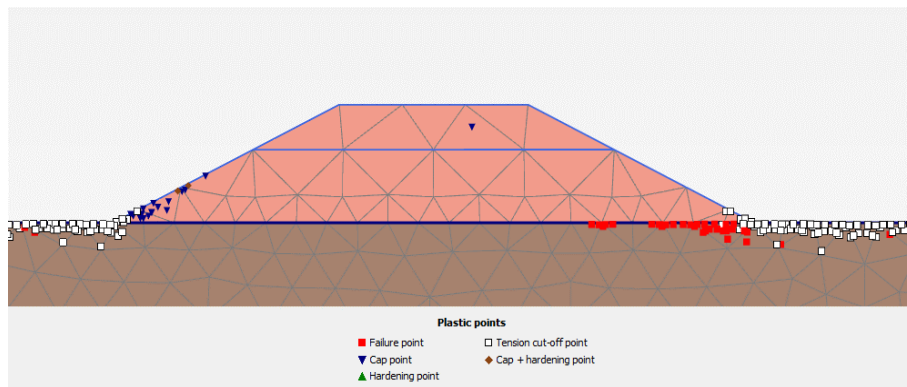
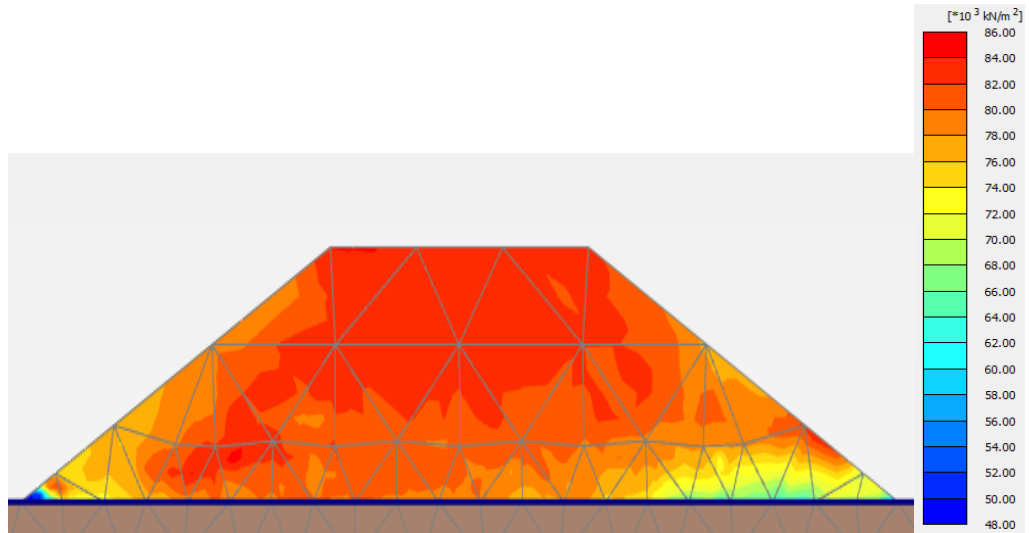
ANEXO 22. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.01cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.



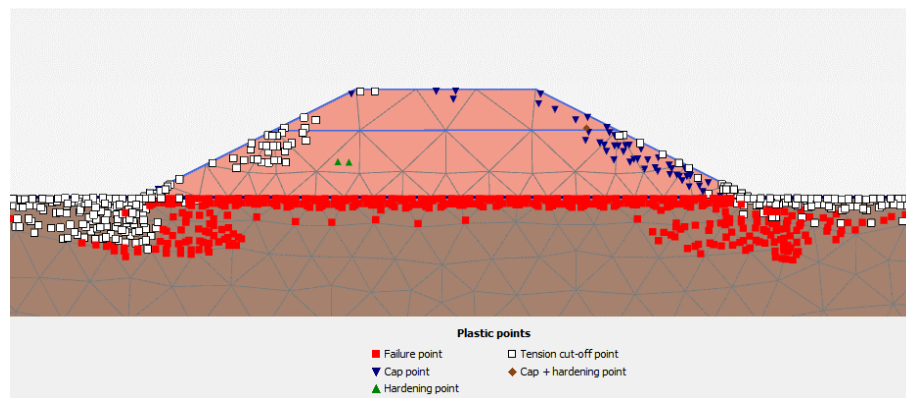
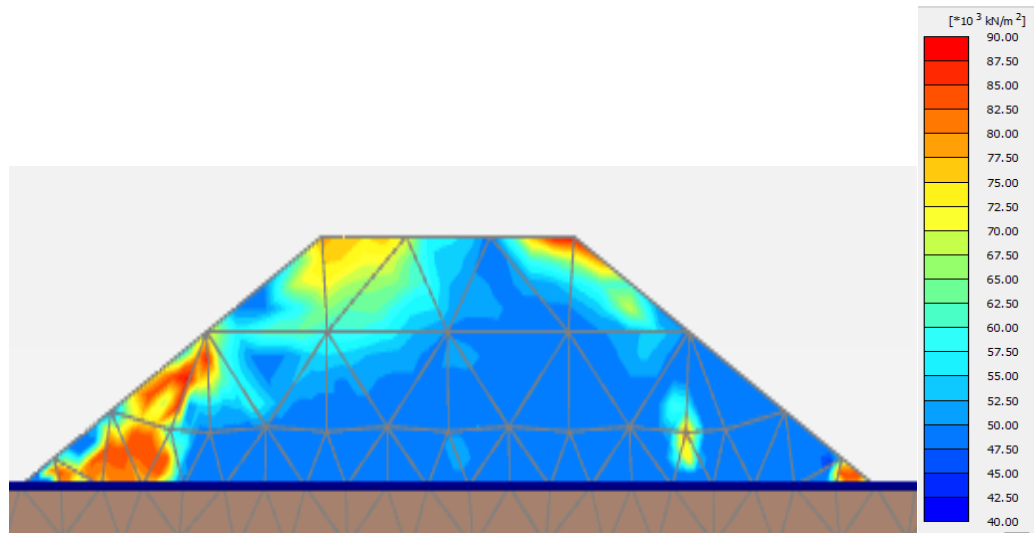
ANEXO 23. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.



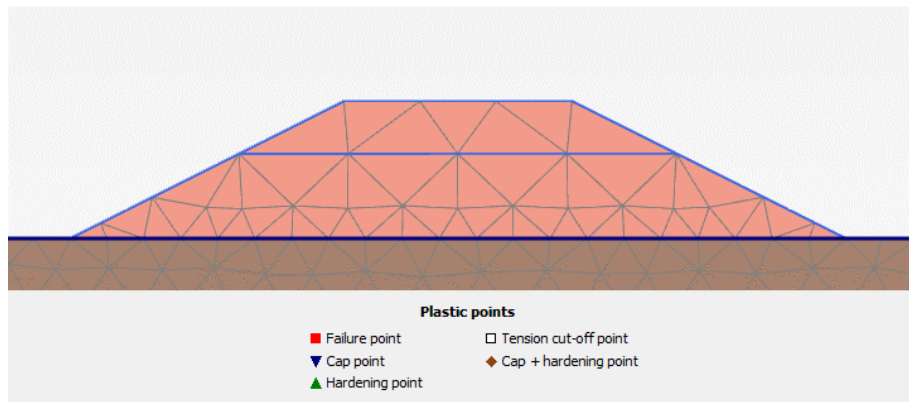
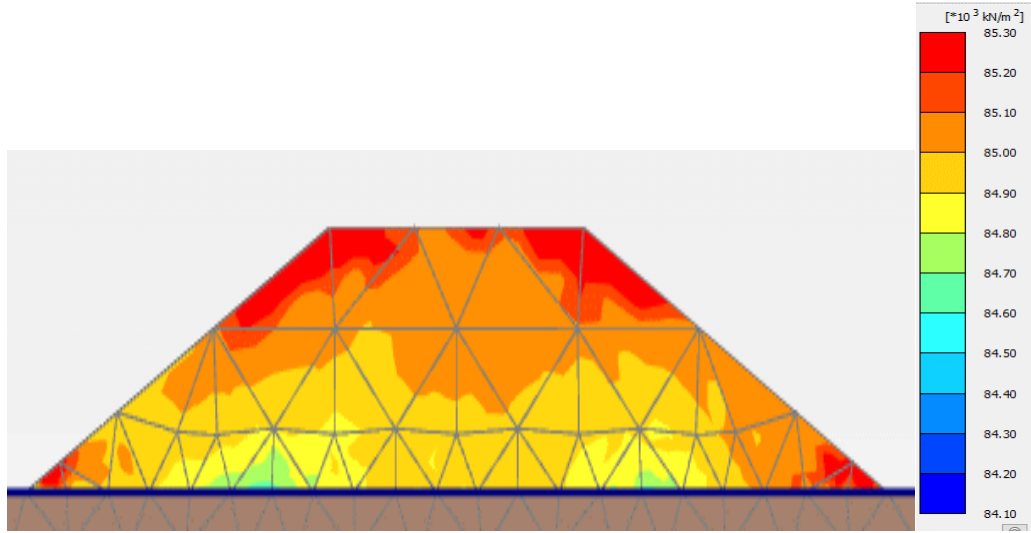
**ANEXO 24. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 1cm, Frecuencia 1Hz,
Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.**



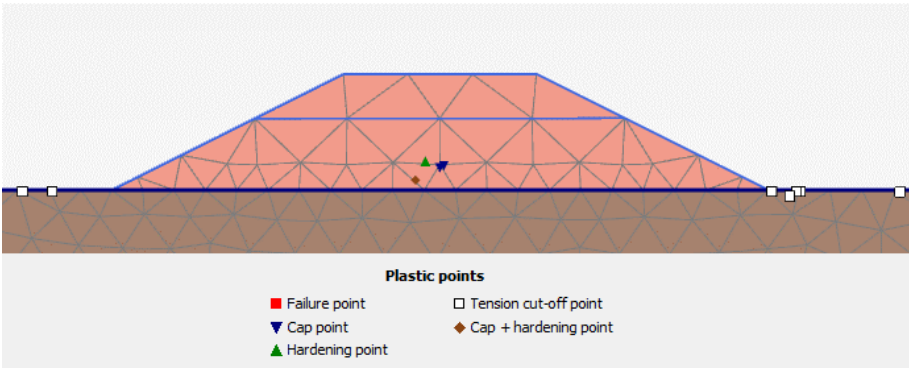
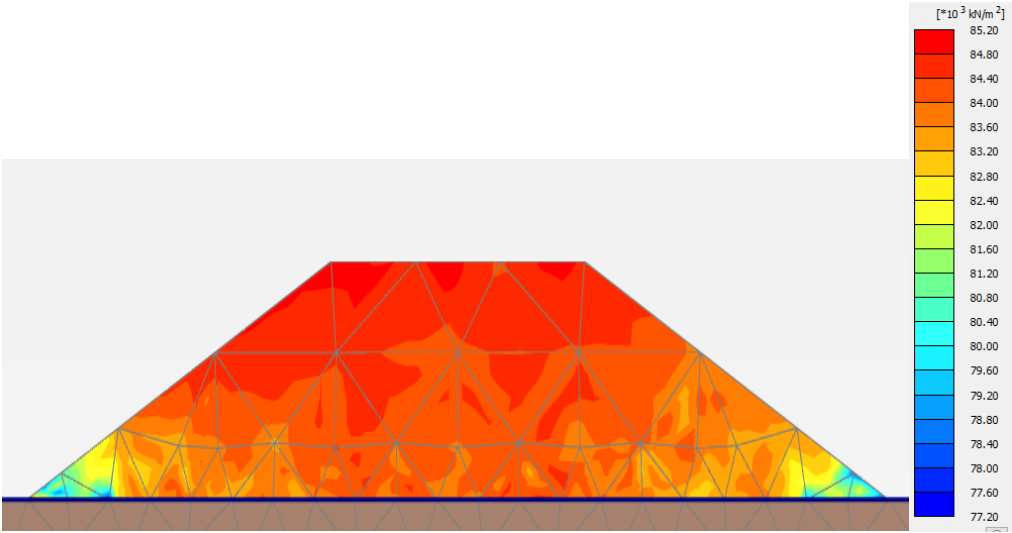
**ANEXO 25. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 1Hz,
Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.**



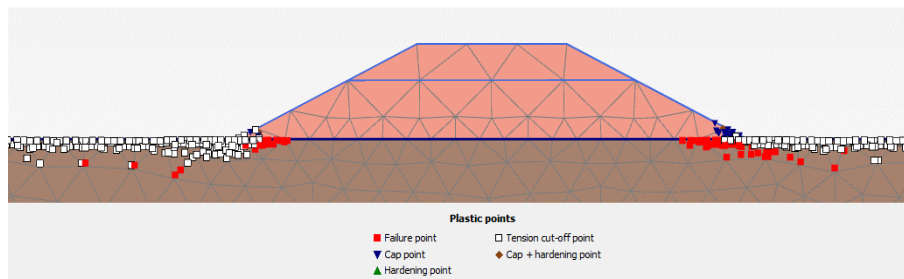
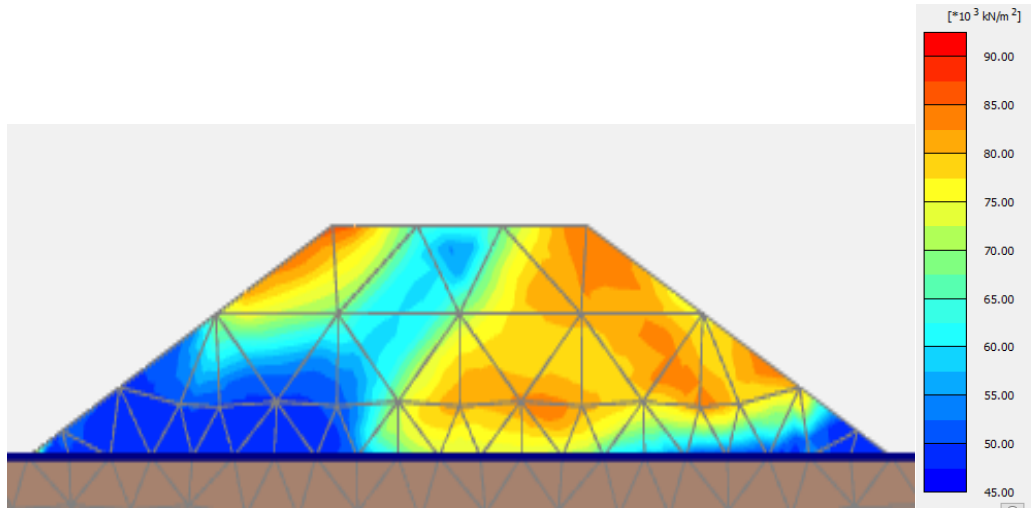
ANEXO 26. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.01cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 5seg, con suelo de fundación blando.



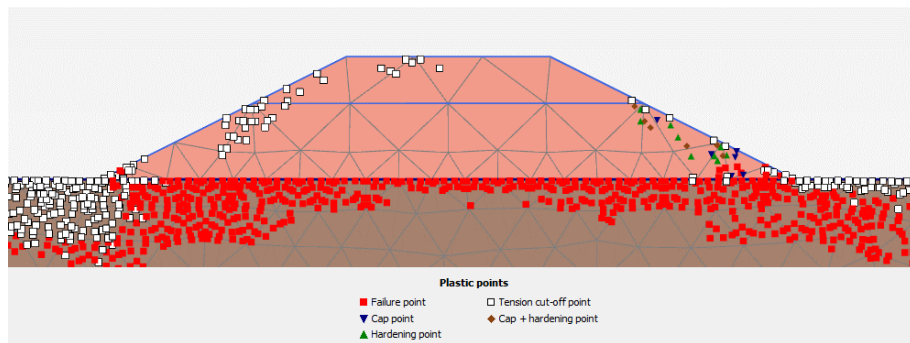
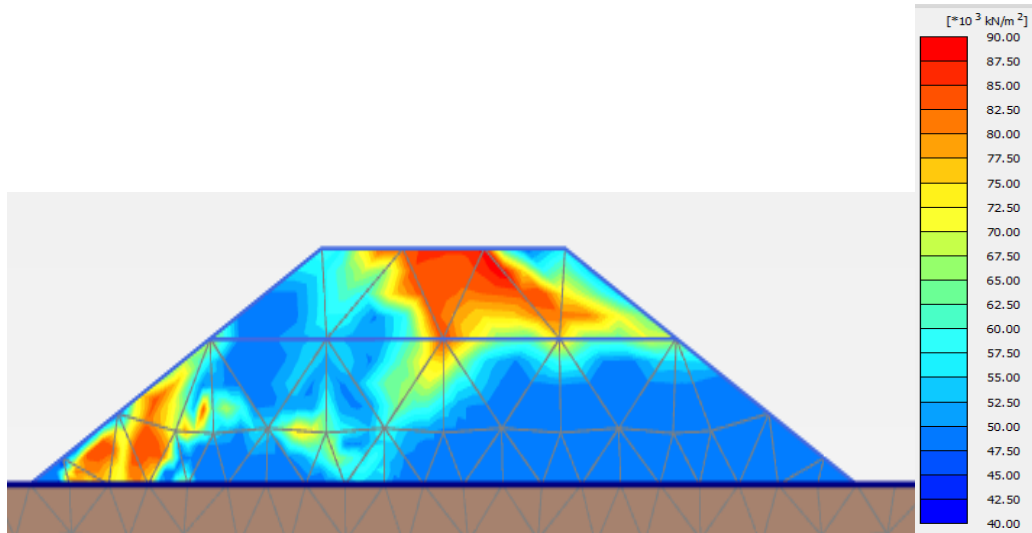
**ANEXO 27. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz,
Tiempo 5seg, con suelo de fundación blando.**



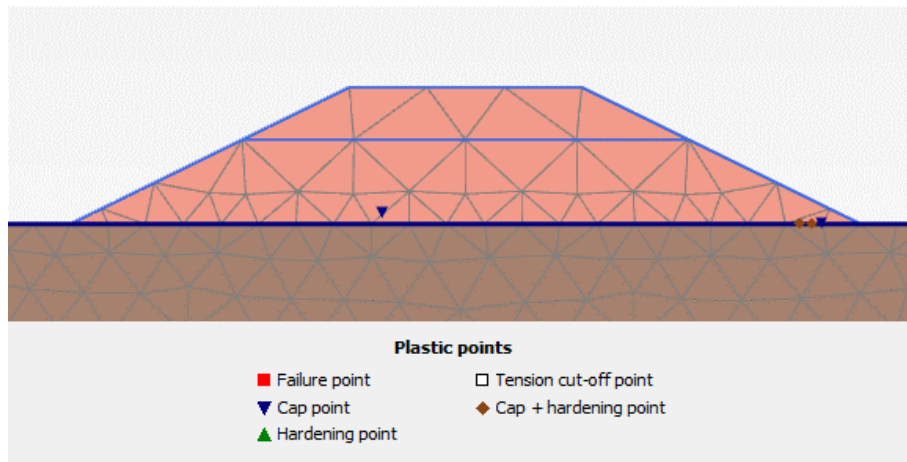
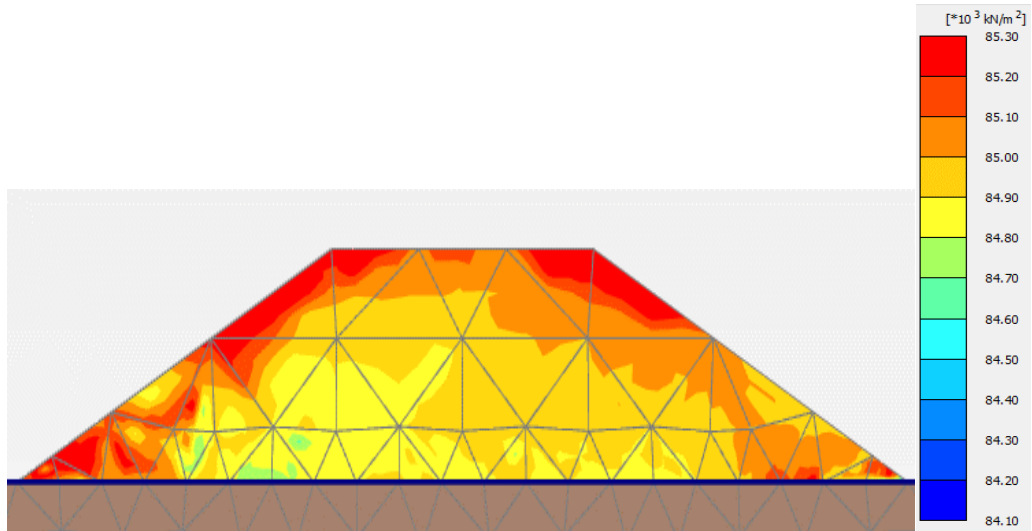
**ANEXO 28. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 1cm, Frecuencia 1Hz,
Tiempo 5seg, con suelo de fundación blando.**



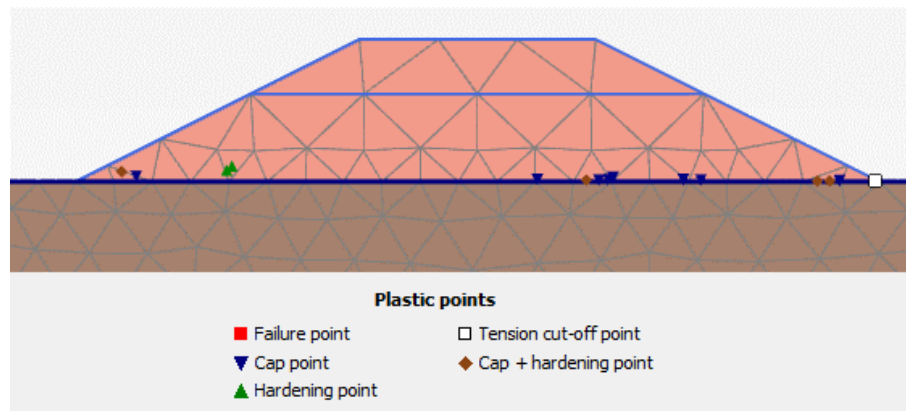
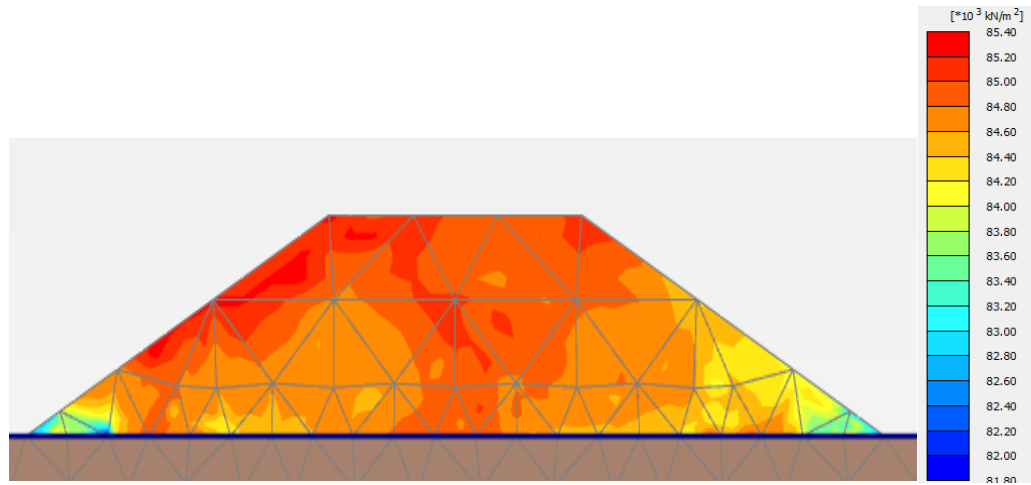
**ANEXO 29. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 1Hz,
Tiempo 5seg, con suelo de fundación blando.**



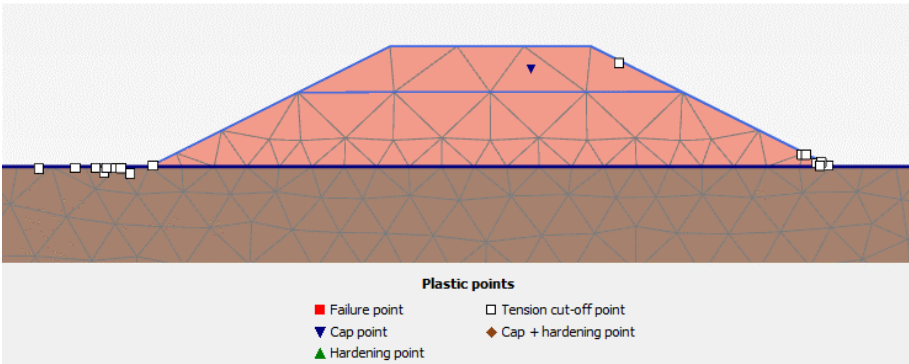
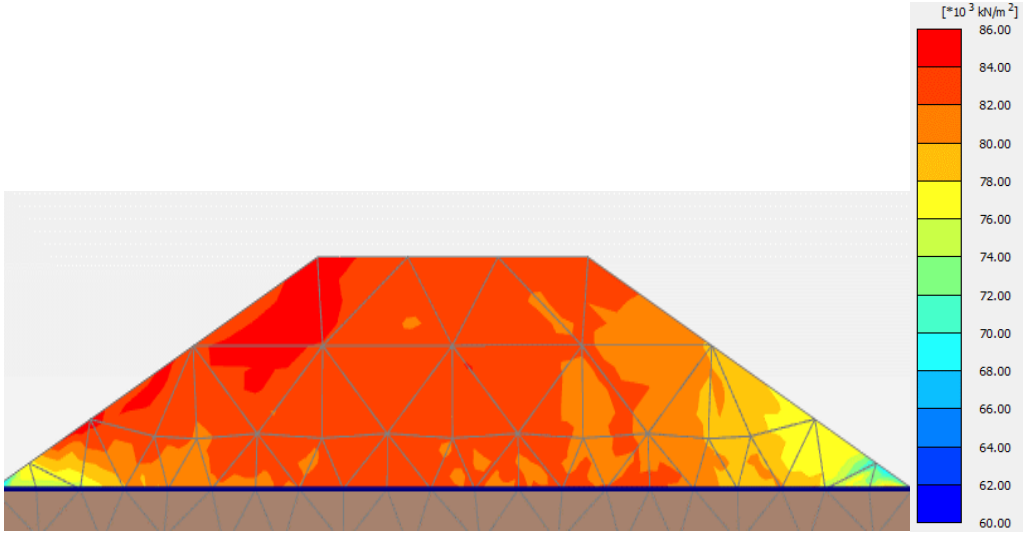
ANEXO 30. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.01cm, Frecuencia 0.5Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.



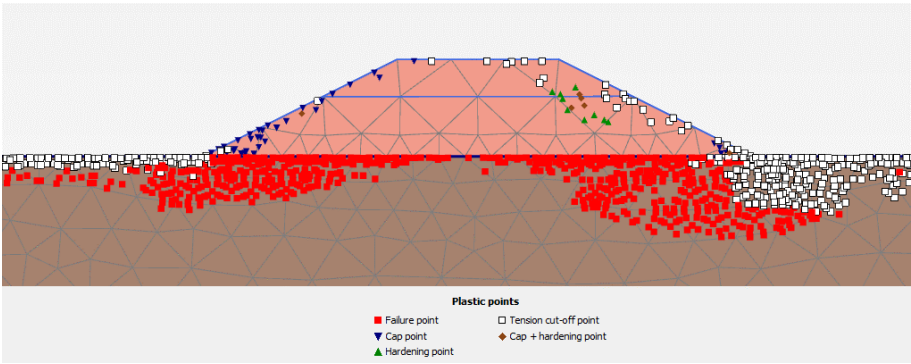
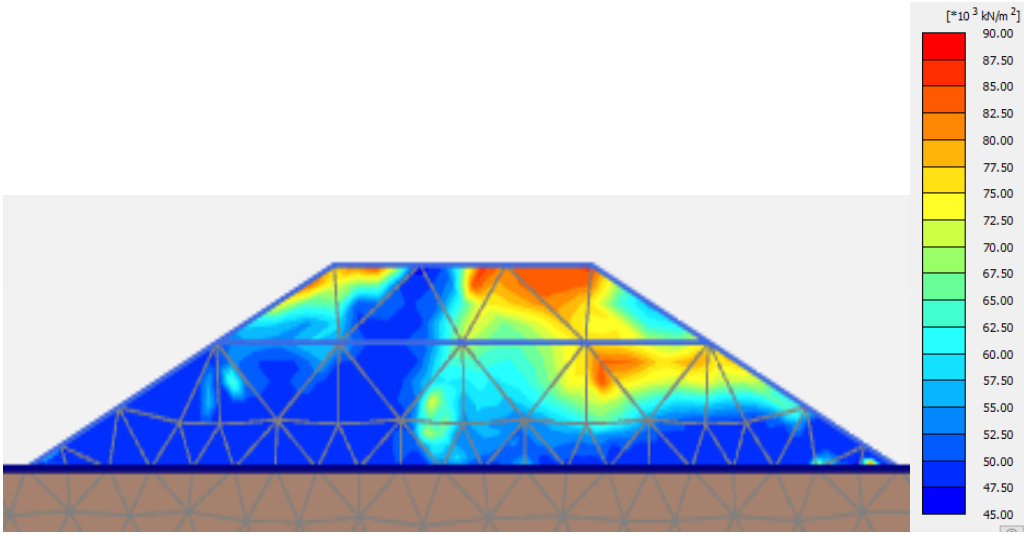
ANEXO 31. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 0.5Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.



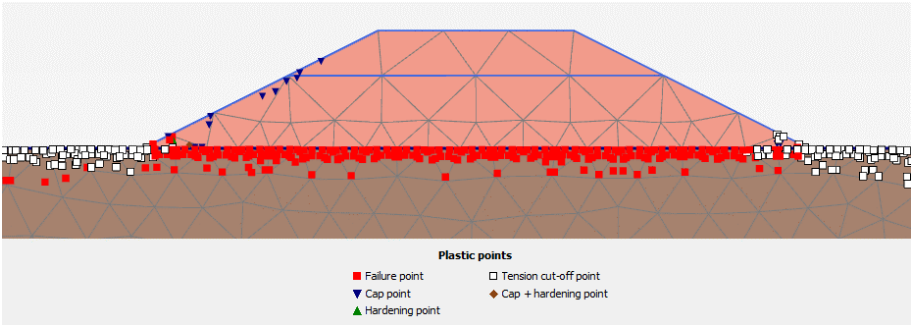
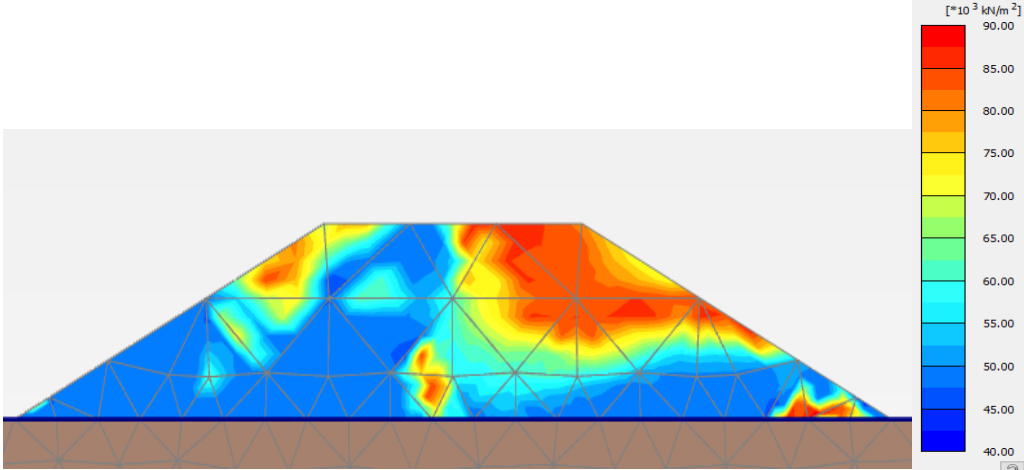
**ANEXO 32. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 1cm, Frecuencia 0.5Hz,
Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.**



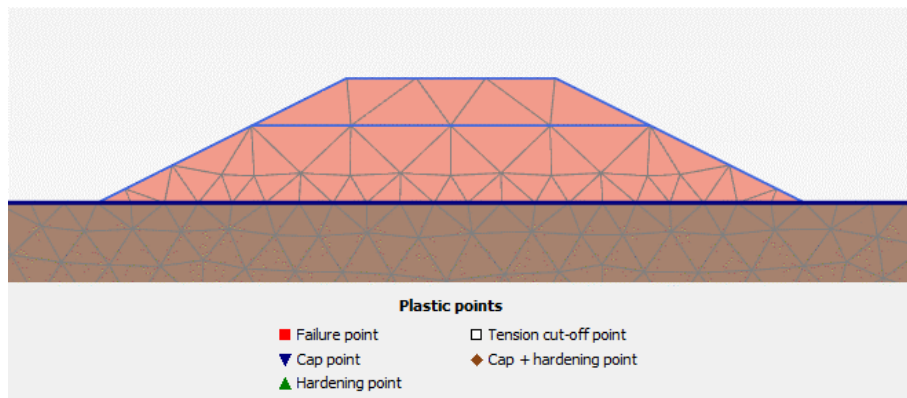
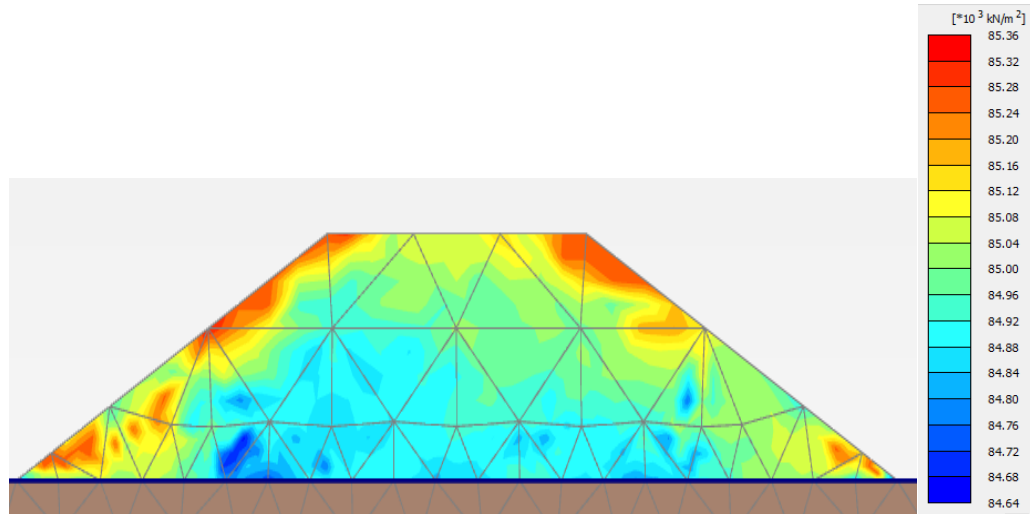
ANEXO 33. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 0.5Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.



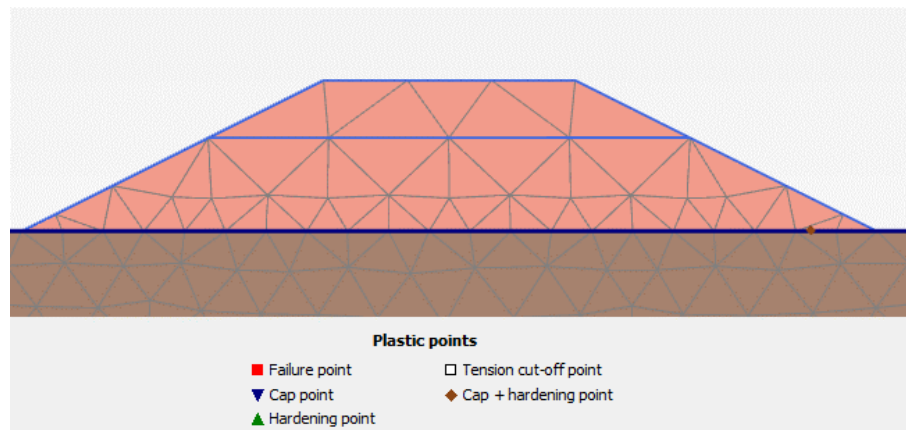
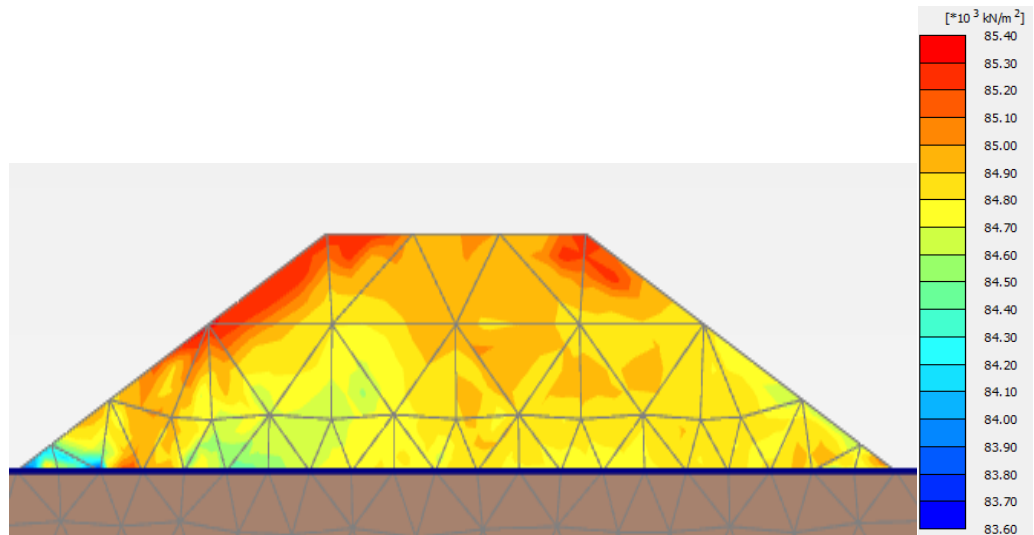
ANEXO 34. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 0.5Hz, Tiempo 5seg, con suelo de fundación blando.



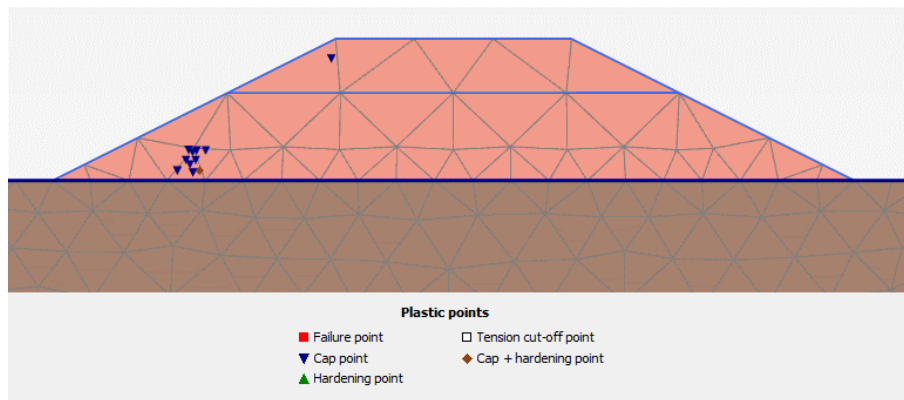
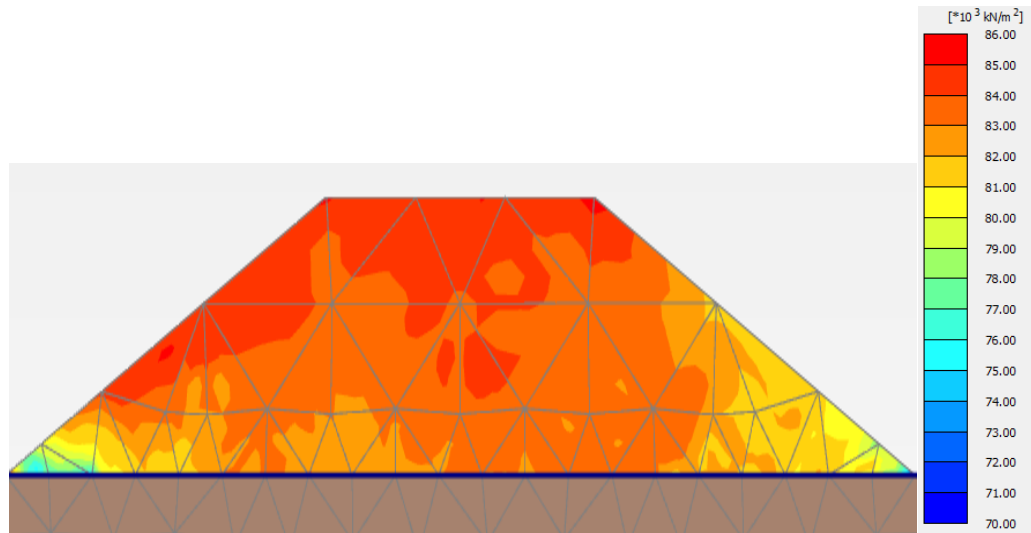
ANEXO 35. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.01cm, Frecuencia 0.25Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.



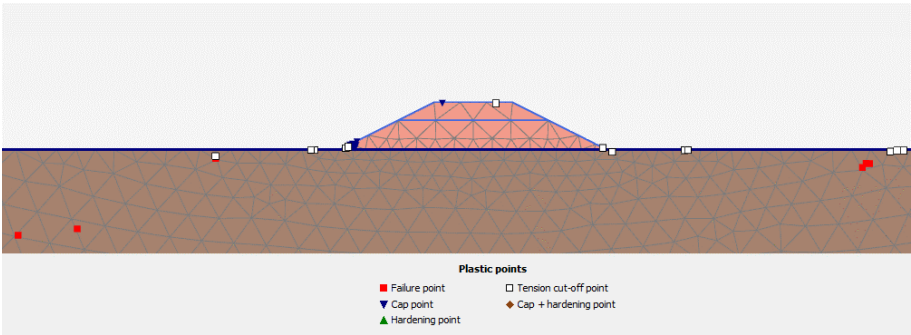
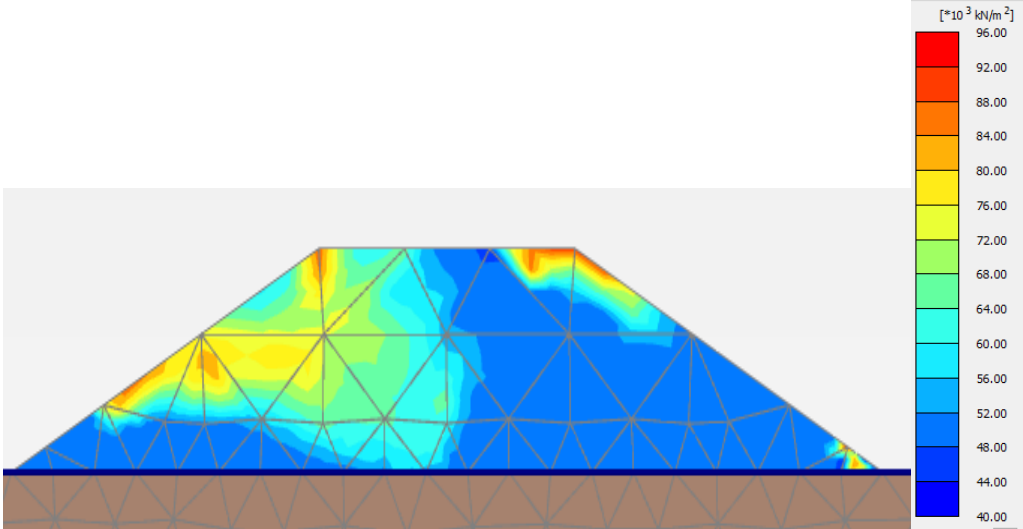
ANEXO 36. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 0.25Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.



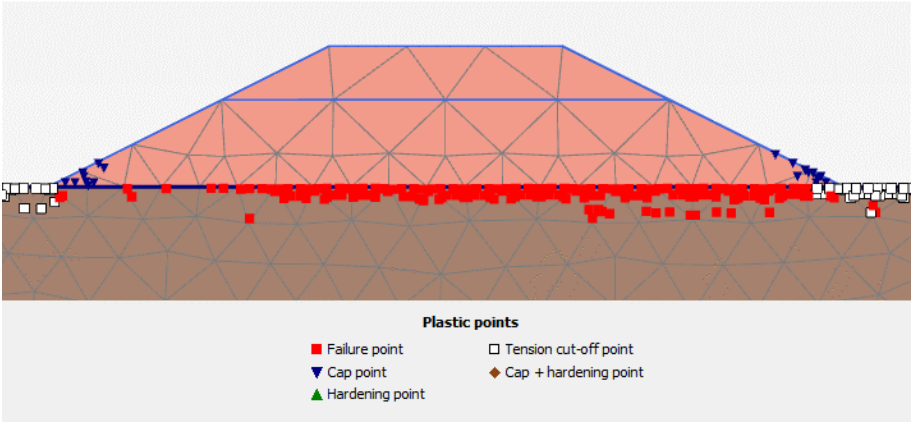
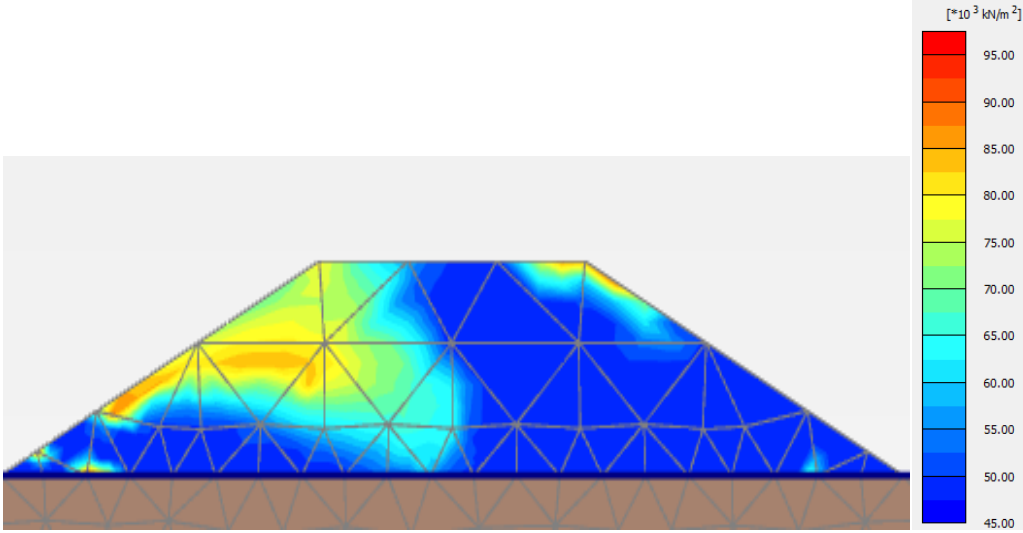
ANEXO 37. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 1cm, Frecuencia 0.25Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.



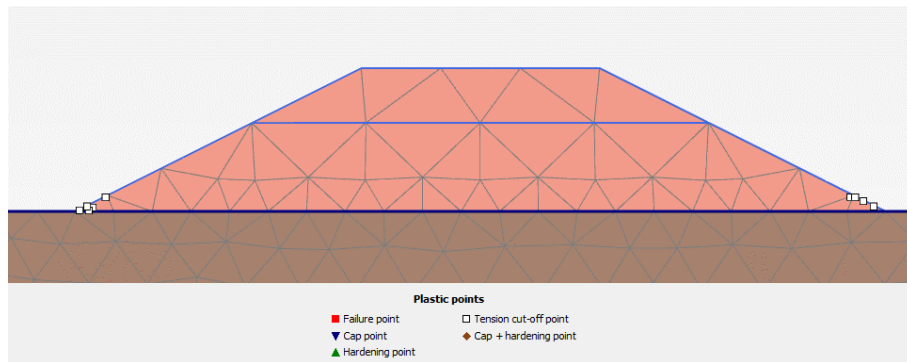
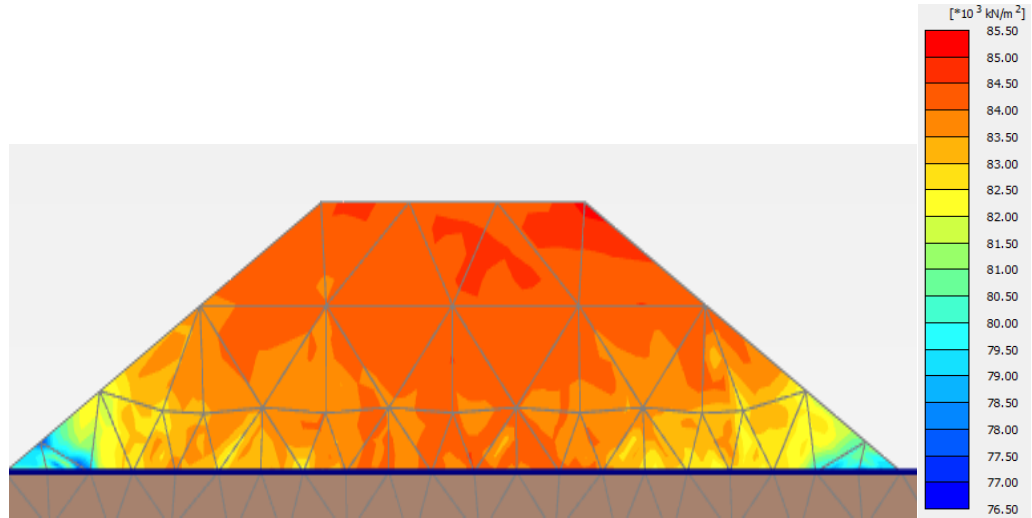
ANEXO 38. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 0.25Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación blando.



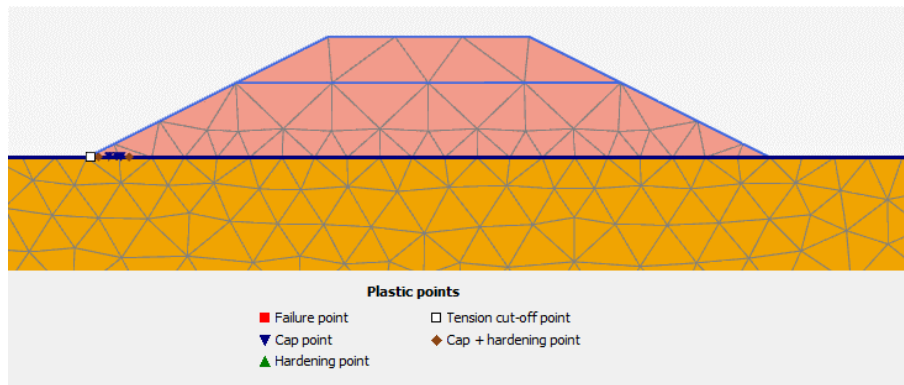
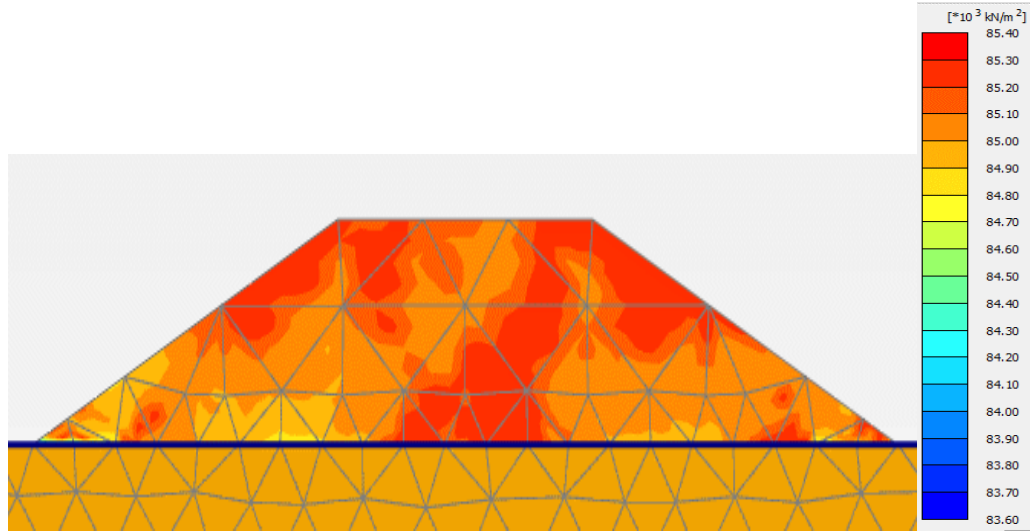
ANEXO 39. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 0.25Hz, Tiempo 5seg, con suelo de fundación blando.



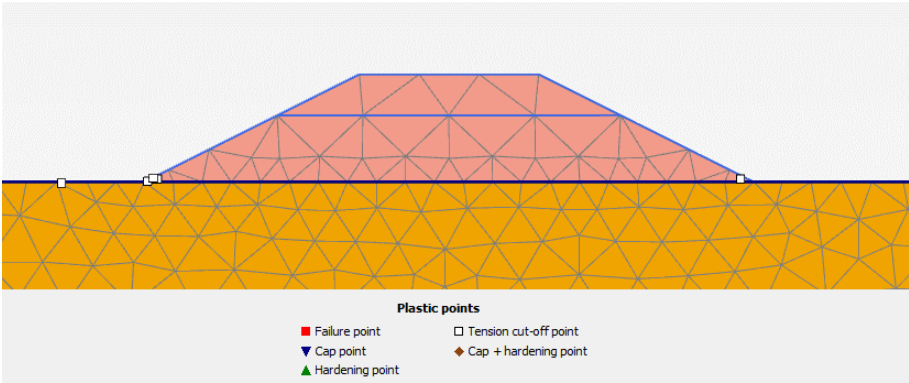
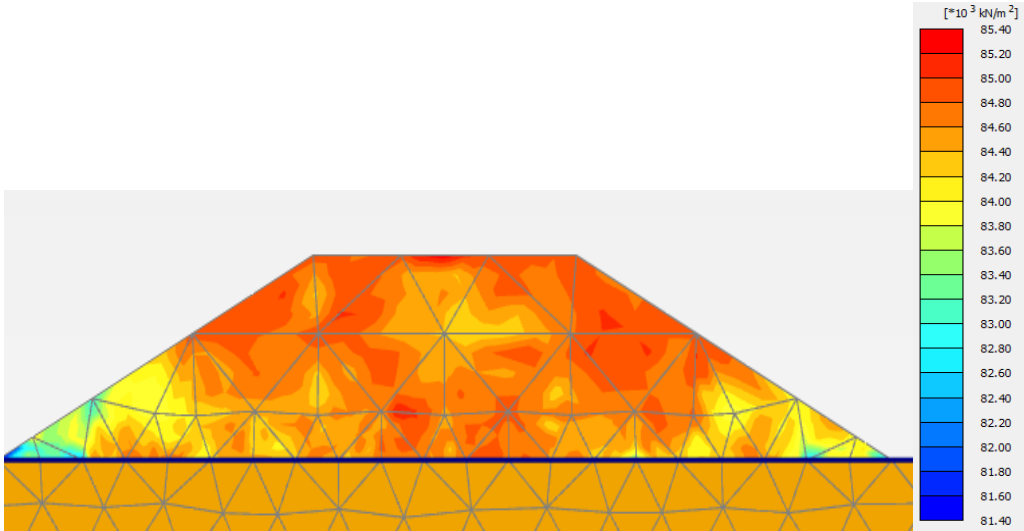
**ANEXO 40. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz,
Tiempo 10seg, con suelo de fundación blando.**



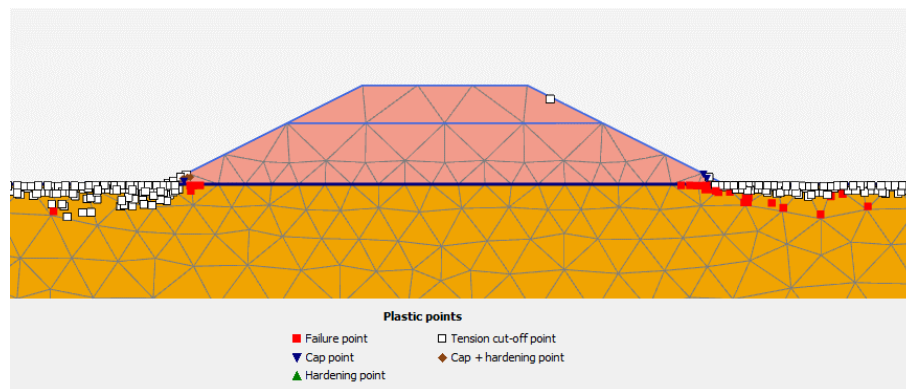
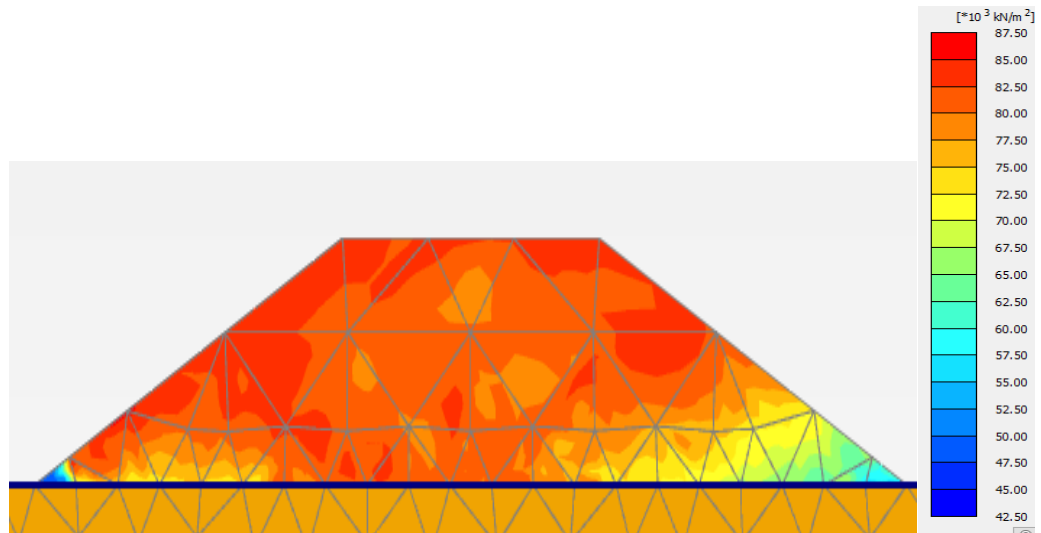
ANEXO 41. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.01cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.



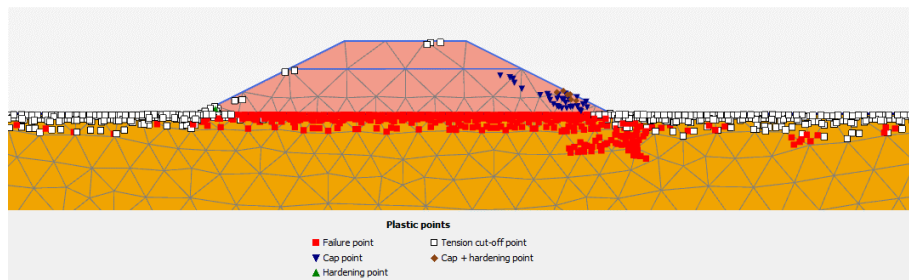
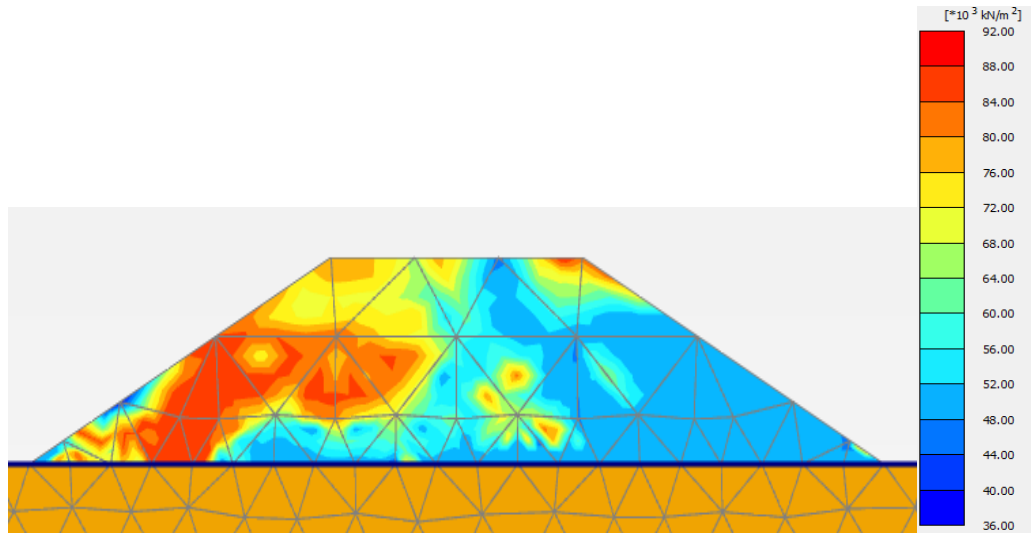
**ANEXO 42. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz,
Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.**



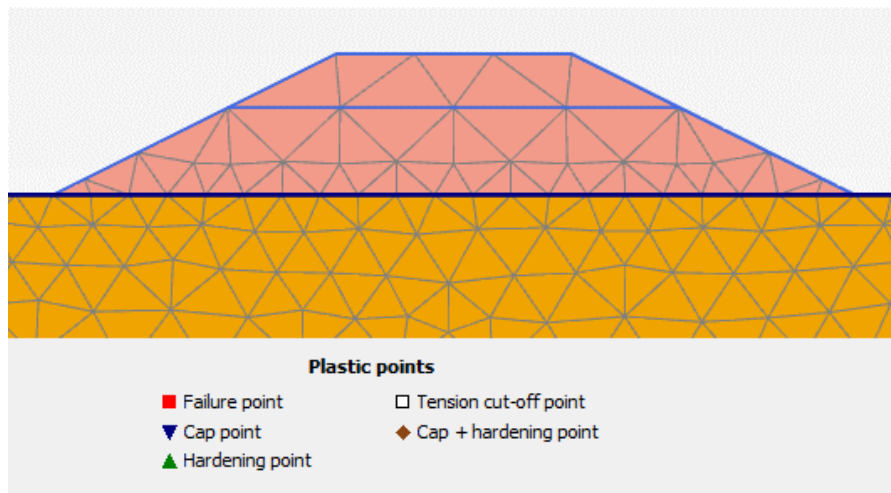
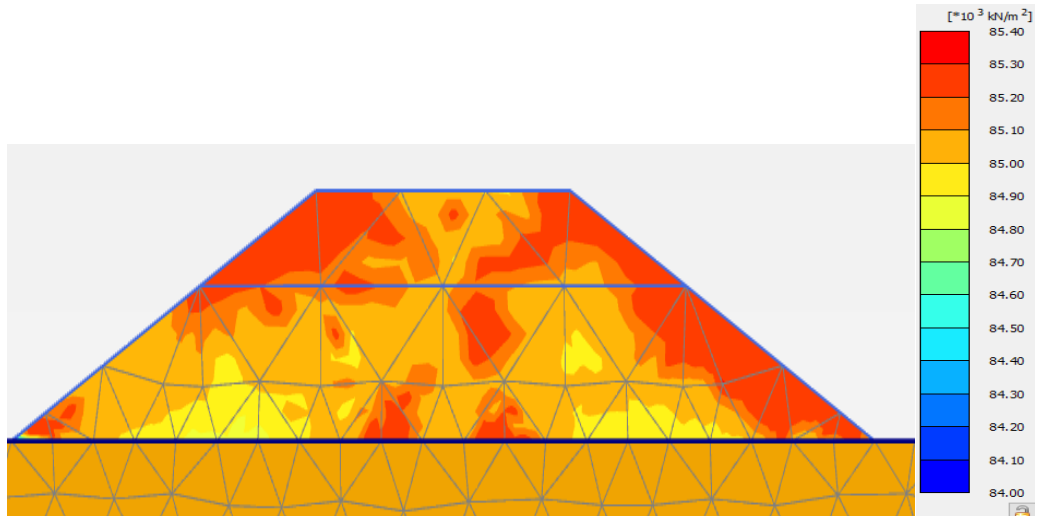
**ANEXO 43. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 1cm, Frecuencia 1Hz,
Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.**



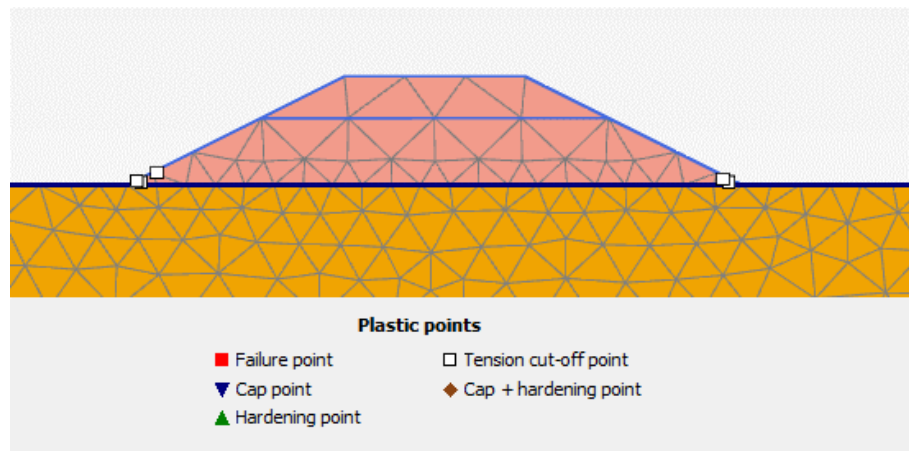
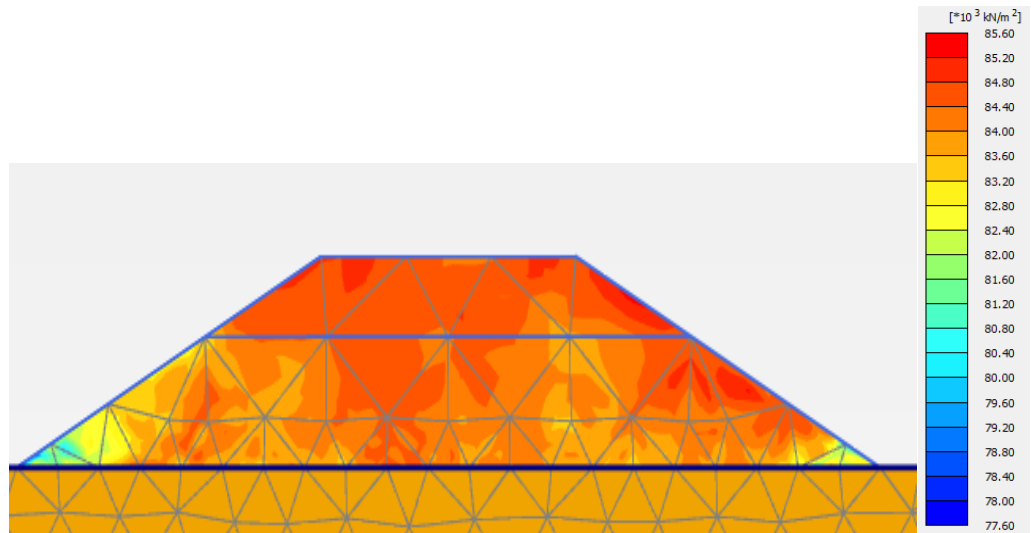
**ANEXO 44. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 1Hz,
Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.**



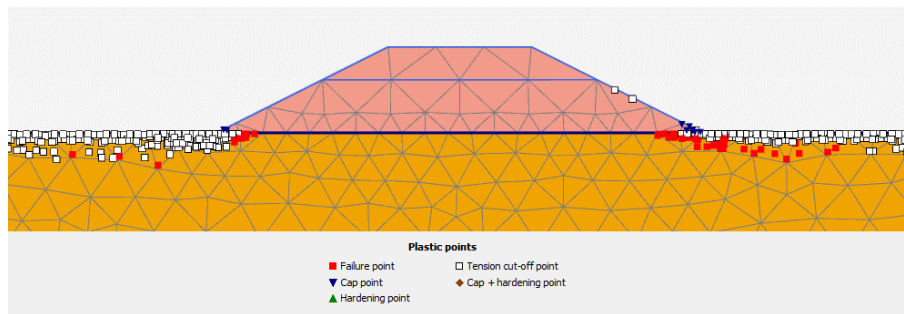
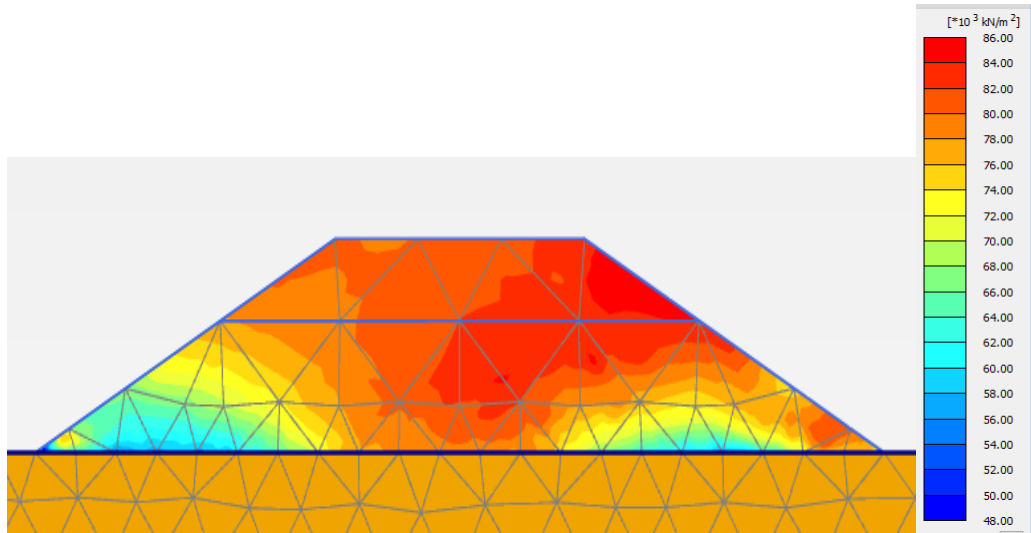
ANEXO 45. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.01cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 5seg, con suelo de fundación duro.



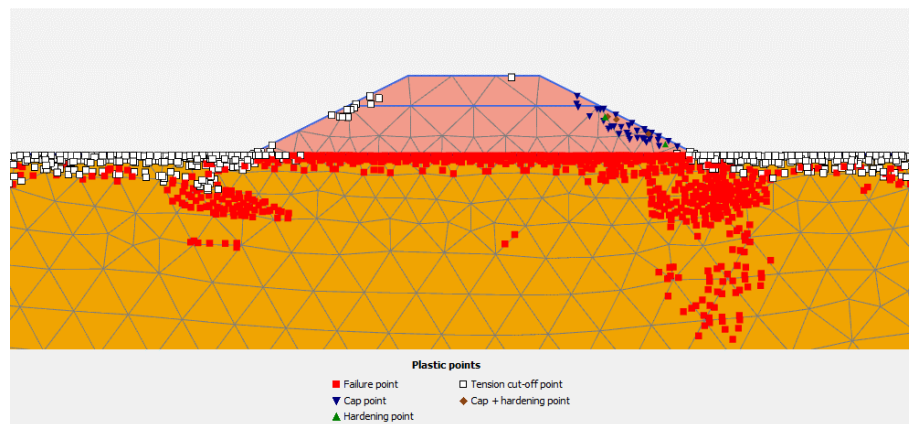
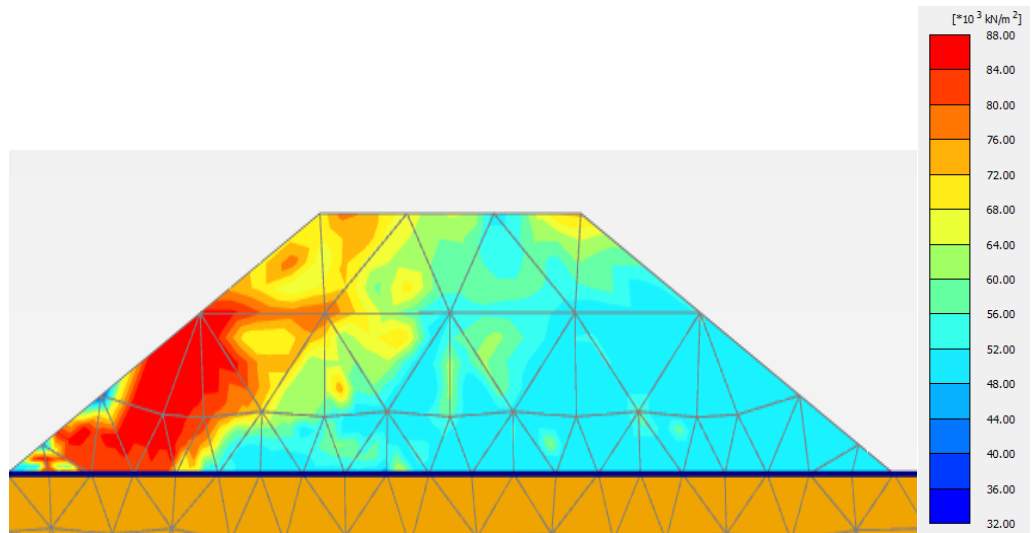
ANEXO 46. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 5seg, con suelo de fundación duro.



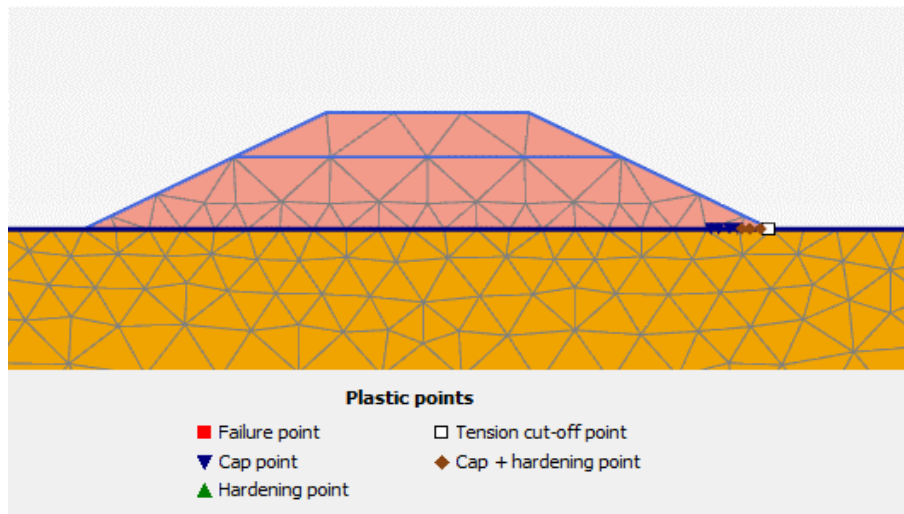
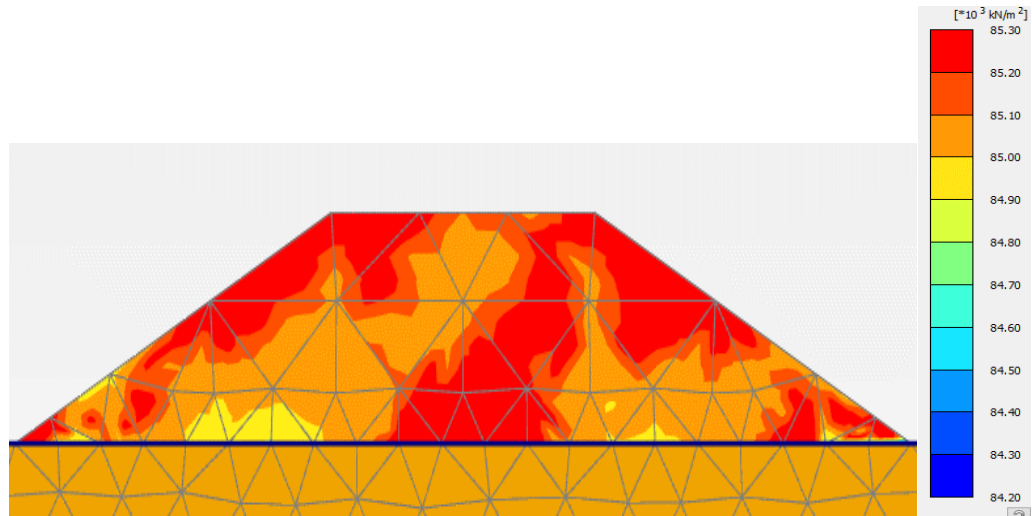
**ANEXO 47. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 1cm, Frecuencia 1Hz,
Tiempo 5seg, con suelo de fundación duro.**



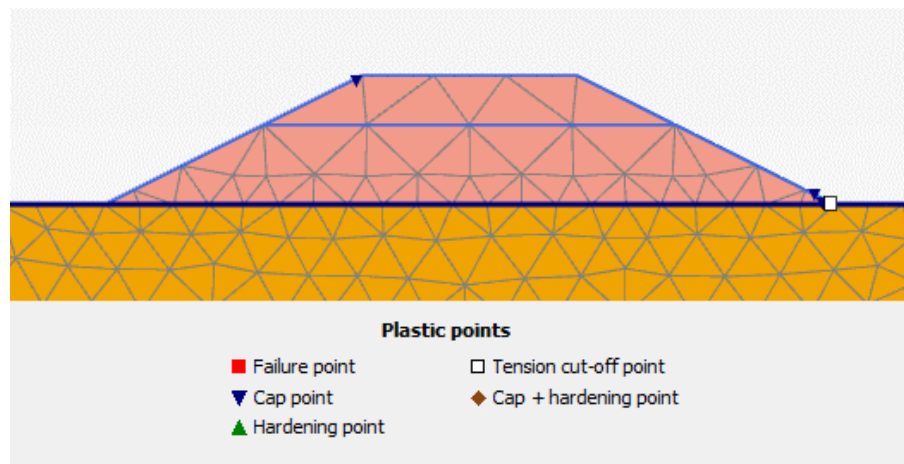
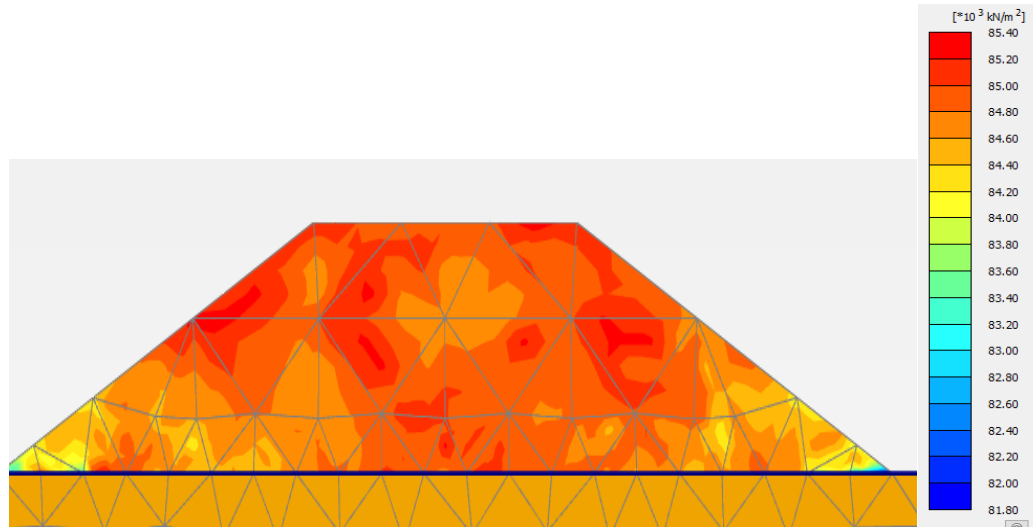
ANEXO 48. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 1Hz, Tiempo 5seg, con suelo de fundación duro.



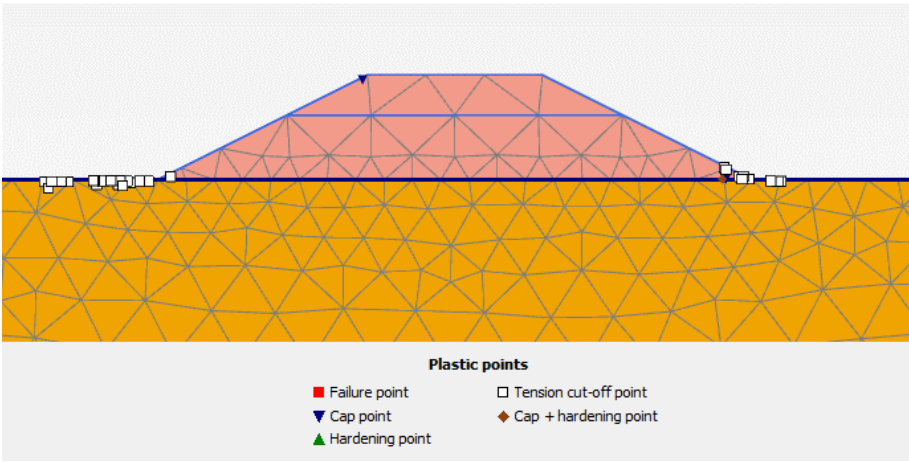
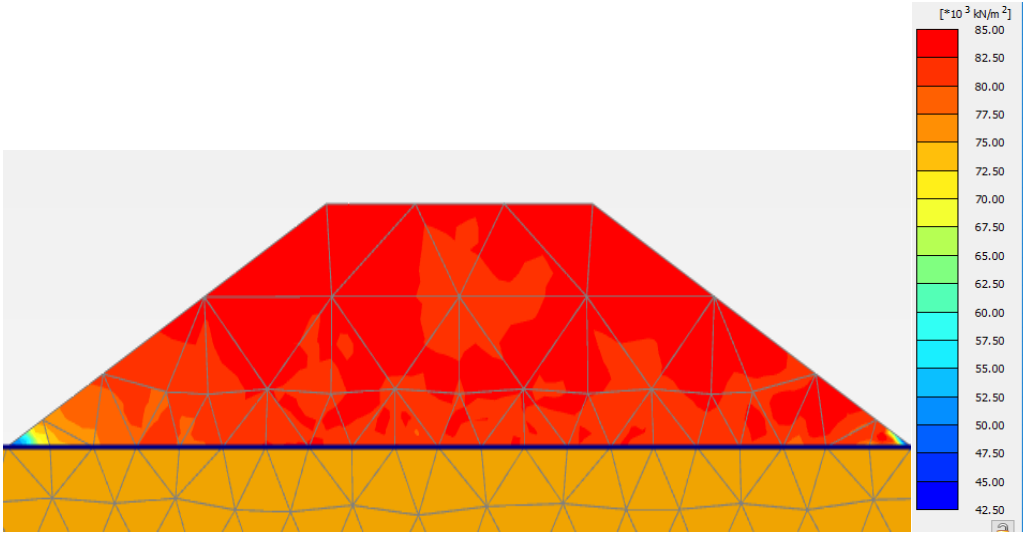
ANEXO 49. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.01cm, Frecuencia 0.5Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.



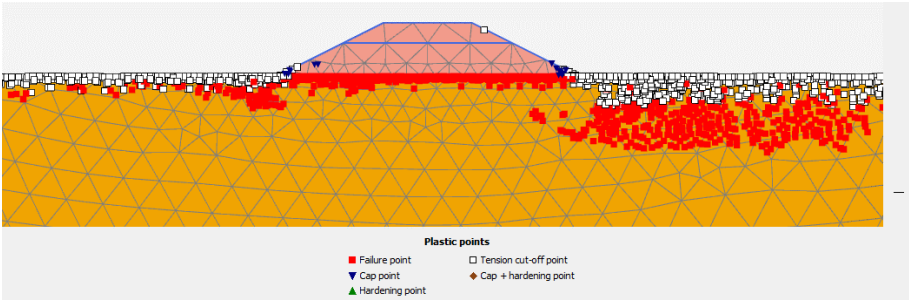
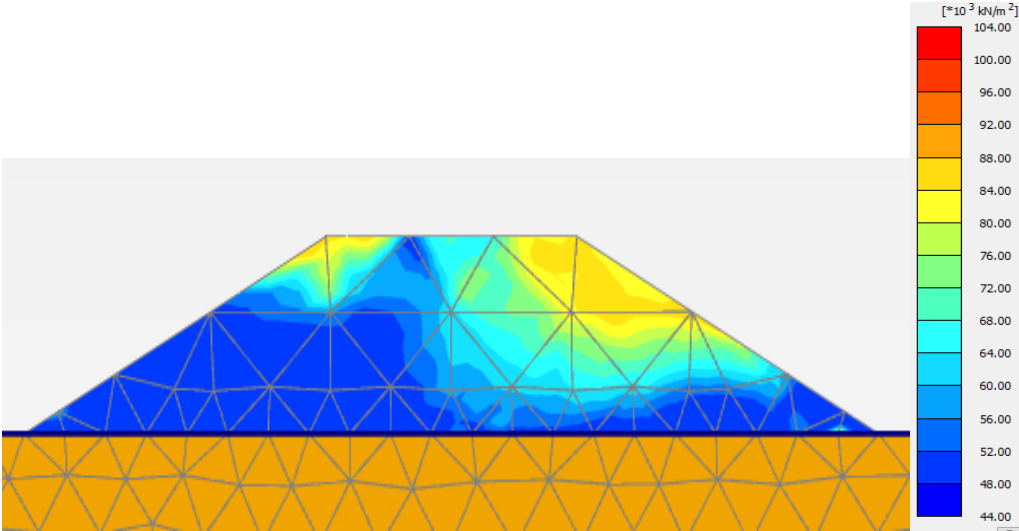
ANEXO 50. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 0.5Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.



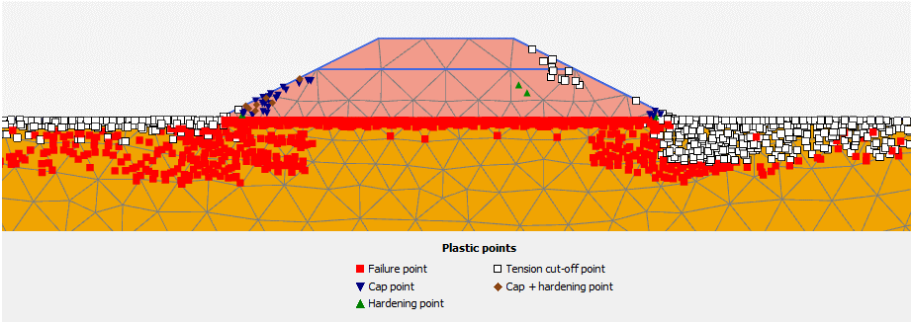
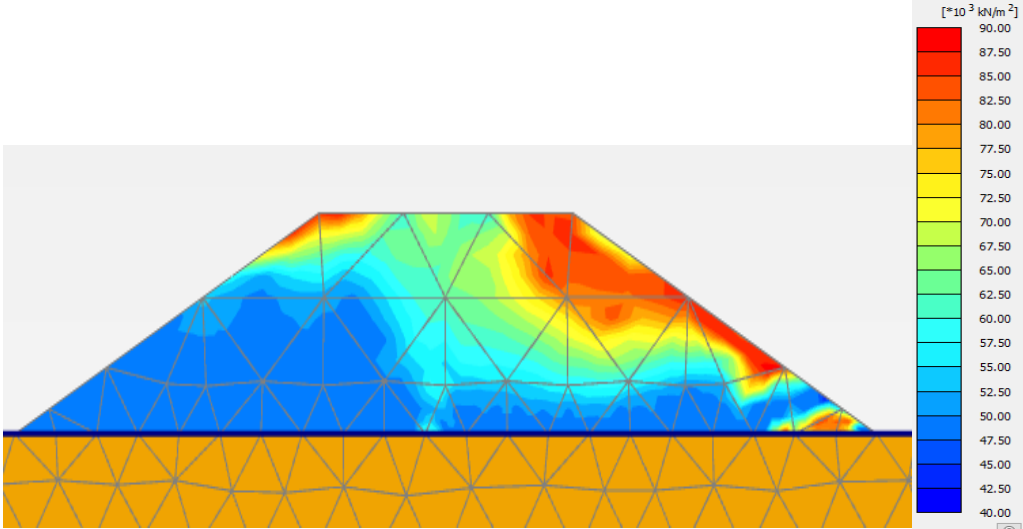
**ANEXO 51. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 1cm, Frecuencia 0.5Hz,
Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.**



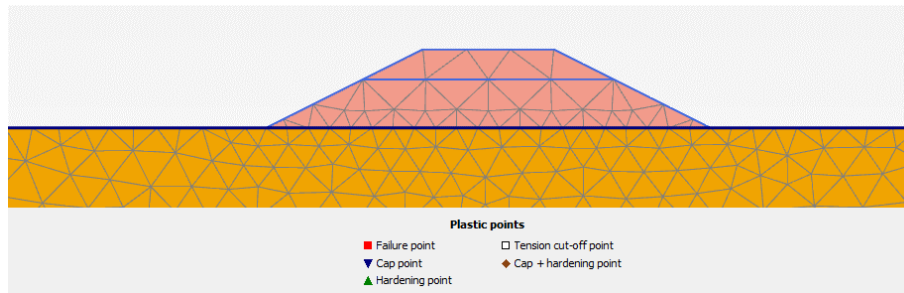
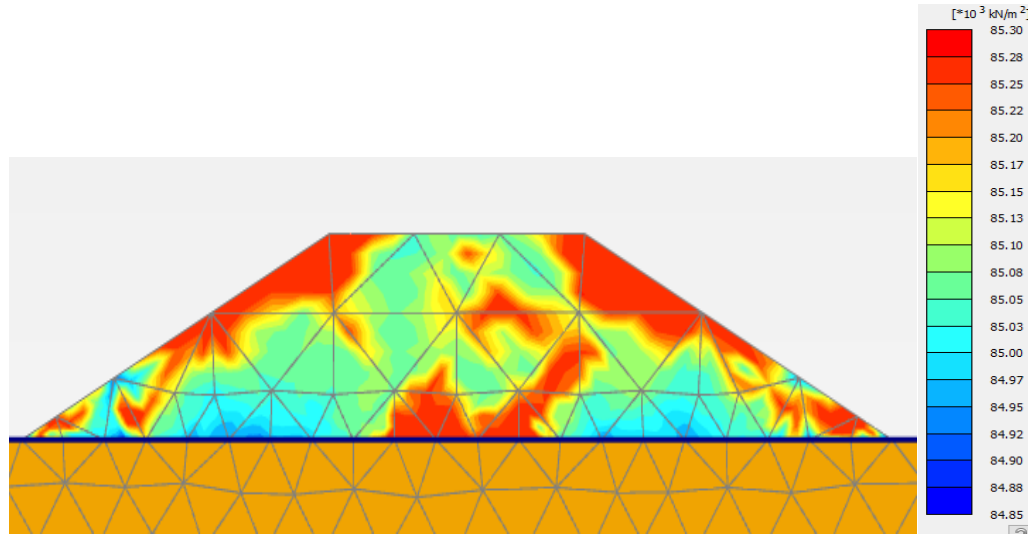
ANEXO 52. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 0.5Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.



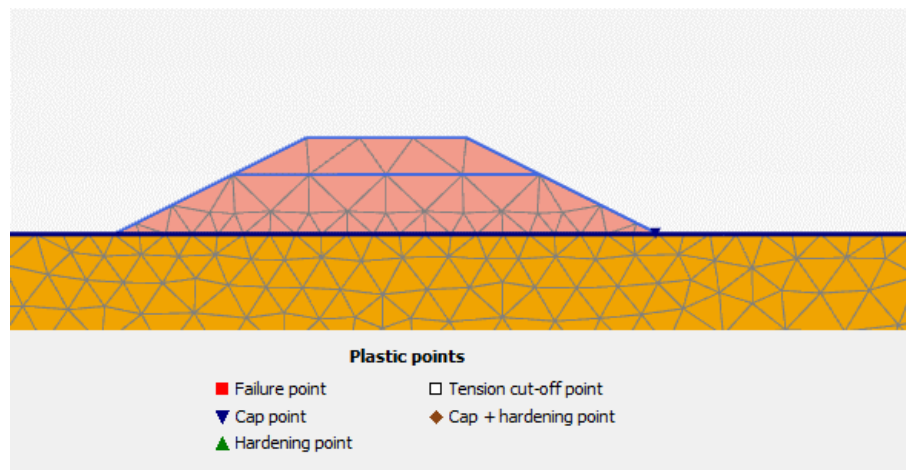
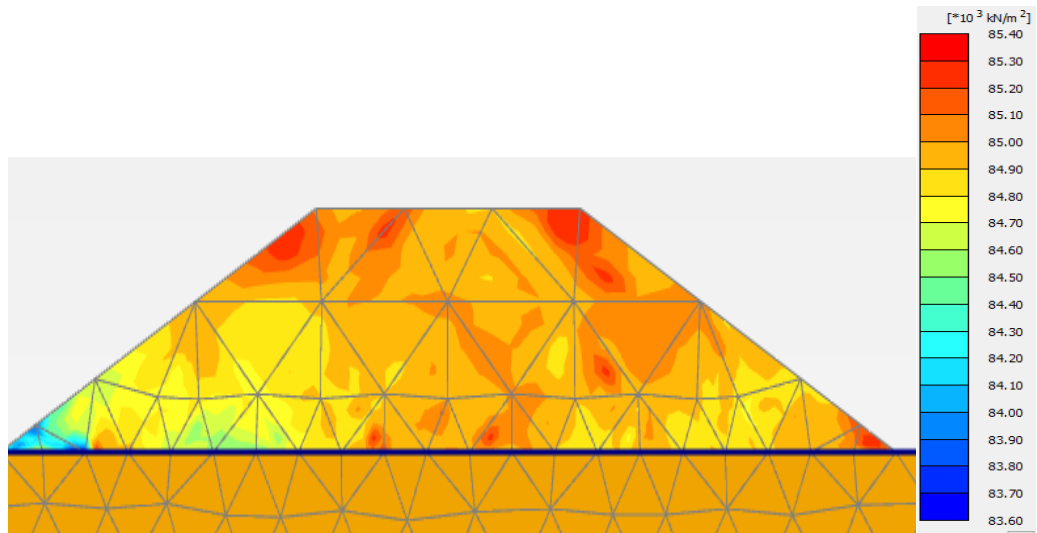
ANEXO 53. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 0.5Hz, Tiempo 5seg, con suelo de fundación duro.



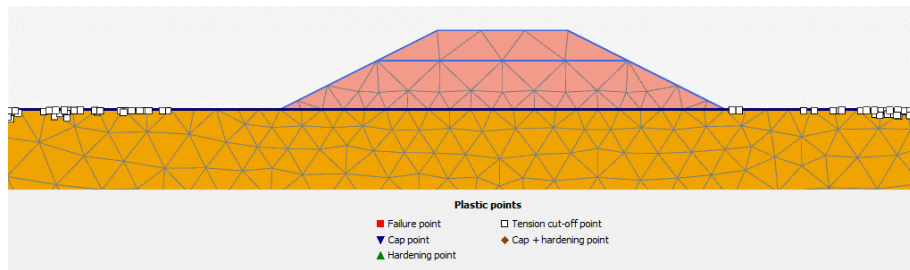
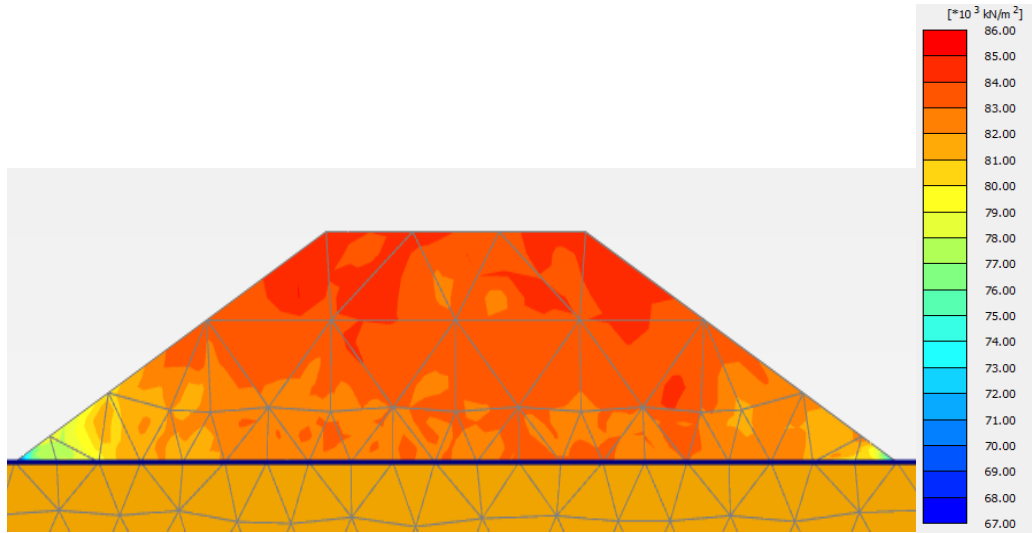
ANEXO 54. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.01cm, Frecuencia 0.25Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.



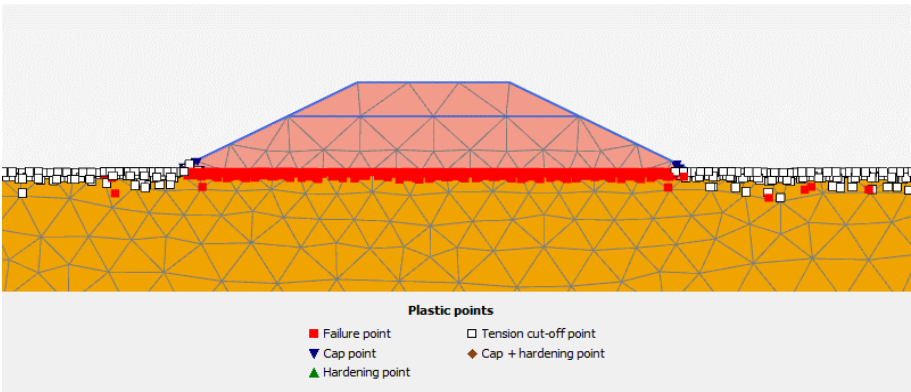
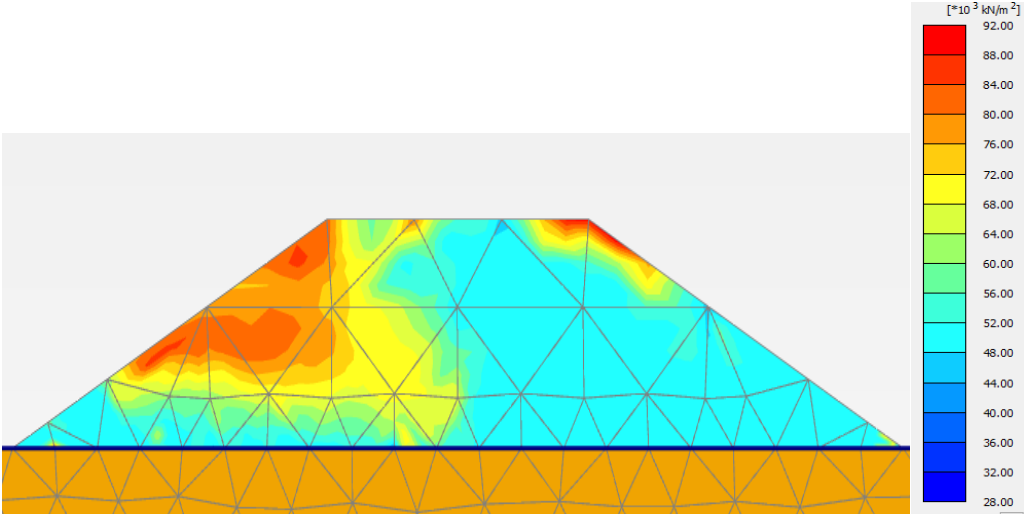
ANEXO 55. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 0.25Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.



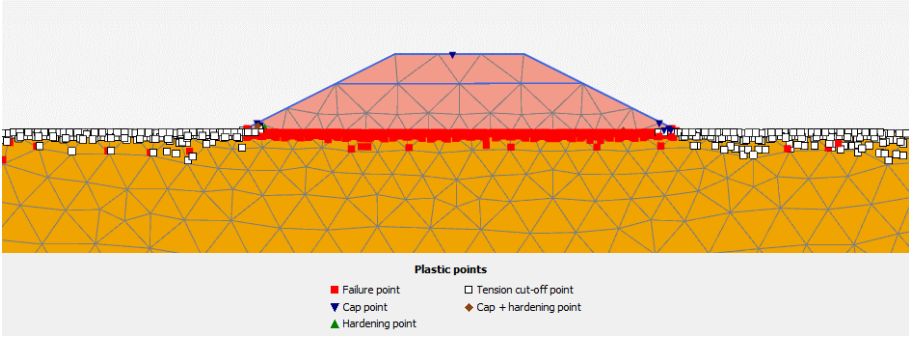
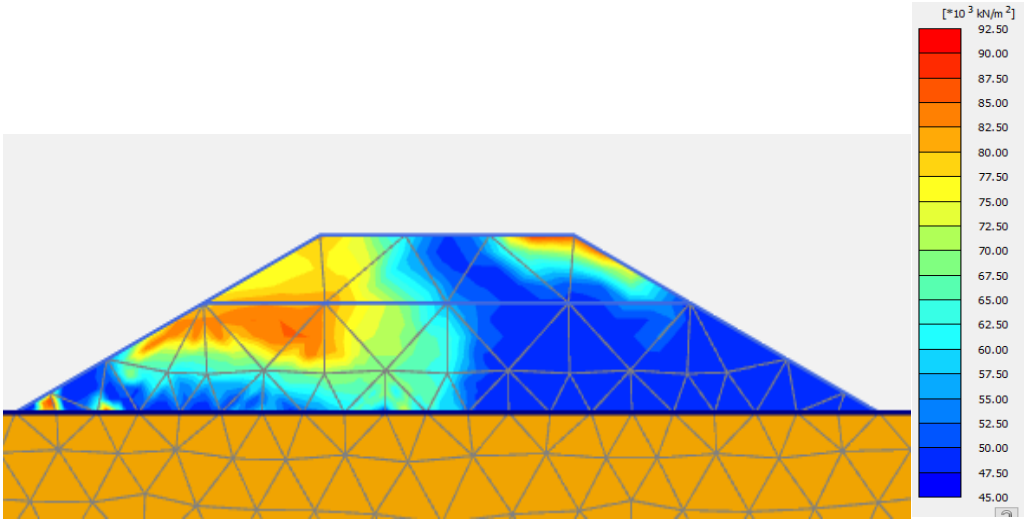
ANEXO 56. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 1cm, Frecuencia 0.25Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.



ANEXO 57. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 0.25Hz, Tiempo 1seg, con suelo de fundación duro.



ANEXO 58. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 10cm, Frecuencia 0.25Hz, Tiempo 5seg, con suelo de fundación duro.



**ANEXO 59. Cambio de G_0 y puntos de falla, Amplitud 0.1cm, Frecuencia 1Hz,
Tiempo 10seg, con suelo de fundación duro.**

