



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE SUELOS, MEDIANTE EL
MÉTODO COMBINADO DE “COLUMNA RESONANTE Y CORTE TORSIONAL
CÍCLICO”, PARA EL ESTUDIO DE LA RESPUESTA DE SITIO, DEL “BLOQUE G”,
UBICADO EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, SEDE QUITO,
CAMPUS SUR, 2022**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniera e Ingeniero Civil

AUTORES: Alisson Mayte López Recalde
Kevin Alejandro Mestanza Córdova

TUTOR: José Domingo Alviar Malabet

Quito - Ecuador
2023


CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Alisson Mayte López Recalde con documento de identificación N° 1727277491 y Kevin Alejandro Mestanza Córdova con documento de identificación N° 1725418824; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 01 de febrero del 2023

Atentamente,



Alisson Mayte López Recalde
1727277491



Kevin Alejandro Mestanza Córdova
1725418824


CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Alisson Mayte López Recalde con documento de identificación N° 1727277491 y Kevin Alejandro Mestanza Córdova con documento de identificación N° 1725418824; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Análisis y caracterización Dinámica de Suelos, mediante el Método combinado de “Columna resonante y Corte torsional cíclico”, para el estudio de la respuesta de sitio, del “Bloque G”, ubicado en la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, campus sur, 2022”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera e Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 01 de febrero del 2023

Atentamente,



Alisson Mayte López Recalde

1727277491



Kevin Alejandro Mestanza Córdova

1725418824

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, José Domingo Alviar Malabet con documento de identificación N° 1757837602, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE SUELOS, MEDIANTE EL MÉTODO COMBINADO DE “COLUMNA RESONANTE Y CORTE TORSIONAL CÍCLICO”, PARA EL ESTUDIO DE LA RESPUESTA DE SITIO, DEL “BLOQUE G”, UBICADO EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, SEDE QUITO, CAMPUS SUR, 2022, realizado por Alisson Mayte López Recalde con documento de identificación N° 1727277491 y por Kevin Alejandro Mestanza Córdova con documento de identificación N° 1725418824, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 01 de febrero del 2023

Atentamente,



Ing. José Domingo Alviar Malabet, PhD.

1757837602

DEDICATORIA

*A Dios, por guiarme en su sendero, darme fuerzas,
la paciencia y sabiduría necesaria para sobrellevar
todo obstáculo que se ha presentado en el camino.*

*A mis padres, Edison y Carmen quienes con su
bendición, consejos y educación han sabido
guiarme en el camino de la vida, son el pilar en mi
vida; sé que sin su apoyo y confianza no lo hubiese
logrado. Este logro es para ustedes.*

*A mis hermanos Edison, Fernando y a mi cuñada
Jessy por el cariño, enseñanzas y apoyo
incondicional en este largo camino.*

ALISSON MAYTE LÓPEZ RECALDE

DEDICATORIA

*A Dios, por permitirme superar cada obstáculo
presentado en este camino, así como a conocer
muchas gente maravillosa que recordaré por
siempre.*

*A toda mi familia, principalmente a mis padres,
quienes me guiaron a ser quien soy el día de hoy,
por enseñarme a jamás rendirme y perseguir mis
sueños con coraje y valentía.*

*A mi hermano de Vida José, por darme fortaleza y
apoyo incondicional en cada momento.*

KEVIN ALEJANDRO MESTANZA CÓRDOVA

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Politécnica Salesiana, porque por medio de cada uno de los docentes, recibí el conocimiento intelectual, humano y profesional.

Un especial agradecimiento a nuestro tutor el Ing. José Domingo Alviar por brindarnos su conocimiento, experiencia, y orientación para poder llevar a cabo este proyecto. Además, al Ing. Freddy Rodríguez por su total apoyo, paciencia, consejos y amistad.

A Ariel por su ayuda, amor y siempre estar presente en todo momento.

Finalmente quiero agradecer a todos mis amigos, es difícil nombrar a cada uno de ustedes, pero saben que aportaron con un granito de ayuda, cariño y conocimiento en mi vida, los llevo en mi corazón.

ALISSON MAYTE LÓPEZ RECALDE

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Politécnica Salesiana, por guiarnos por medio de sus profesionales en este proceso de crecimiento educativo y personal.

Un agradecimiento especial a los ingenieros, Ing. José Domingo Alviar e Ing. Freddy Rodríguez, quienes, con mucha paciencia y sabiduría, supieron encaminarnos en este proceso de la mejor manera, siempre con gran predisposición.

Y, además, como no, a todos nuestros amigos, imposible nombrarlos a todos, por toda su ayuda y buenos momentos en los que convivimos. Esto es posible gracias a todos ustedes.

KEVIN ALEJANDRO MESTANZA CÓRDOVA

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I.....	1
ANTECEDENTES Y GENERALIDADES	1
1.1 Introducción	1
1.2. Descripción del Problema	2
1.2.1. Antecedentes.....	2
1.2.2. Importancia y Alcances	2
1.2.3. Delimitación	3
1.3. Justificación	4
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivo General.....	4
1.4.2. Objetivos Específicos	5
CAPÍTULO II	6
MARCO TEÓRICO	6
2.1. Método combinado de “Columna Resonante y Corte Torsional Cíclico”	6
2.2. Ondas Sísmicas	6
2.3. Amortiguamiento	7
2.4. Amplitud.....	7
2.5. Periodo	7
2.6. Frecuencia	7
2.7. Carga Dinámica.....	8
2.8. Rigidez	8
2.9. Módulo de Corte.....	9
2.10. Modos de Vibración.....	9
2.11. Desempeño Estructural	9
2.12. Respuesta de Sitio	10
2.13. Interacción Suelo-Estructura	10
2.14. Ensayo de Penetración Estándar (SPT).....	10
2.15. Propiedades Físico Mecánicas del Suelo	11
2.16. Límites de Atterberg.....	11
CAPÍTULO III.....	12
METODOLOGÍA	12
3.1. Tipo de Investigación	12

3.2. Método	12
3.3. Técnica de recolección de información.....	12
3.4. Proceso Técnico de Ingeniería Civil	12
3.4.1. Recopilación de Muestras.....	12
3.4.2. Ensayo de Penetración Estándar (SPT)	13
3.4.3. Propiedades Físico Mecánicas del suelo	19
3.4.3.1. Granulometría por lavado.....	19
3.4.3.2. Contenido de Humedad secado al horno	21
3.4.3.3. Límites de Atterberg.....	22
3.4.3.3.1. Límite Líquido	22
3.4.3.3.2 Límite Plástico	23
3.4.3.3.3 Índice de Plasticidad	24
3.4.4. Clasificación de Suelo SUCS	24
3.4.5. Propiedades Dinámicas del Suelo.....	26
3.4.5.1 Ensayo de Columna Resonante y Corte Torsional Cíclico.....	27
3.4.5.1.1 Preparación de Muestras.....	31
3.4.5.1.2 Ensayo de Columna Resonante	35
3.4.5.1.3 Ensayo de Corte Torsional Cíclico	38
3.4.6. Módulos de Corte en Estratos de Suelo.....	41
3.4.7. Gráficas Amortiguamiento-Módulo G vs Deformación.....	42
3.4.8. Ecuaciones para Cálculo de G/Gmax y Amortiguamiento.....	42
CAPÍTULO IV	46
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	46
4.1. Caracterización de Muestras	46
4.2. Caracterización dinámica del suelo.....	53
4.2.1 Resultados de Estrato I	54
4.2.2 Resultados de Estrato II.....	56
4.2.3 Resultados de Estrato III.....	58
4.2.4 Resultados de Estrato V	60
4.2.5 Resultados de Estrato VI	62
4.3. Comparación de Muestras con la Literatura	64
4.3.1 ESTRATO I (OL).....	64

4.3.2 ESTRATO II (CL).....	69
4.3.3 ESTRATO III (ML-CL).....	75
4.3.4 ESTRATO V (SM).....	81
4.3.5 ESTRATO VI (SM).....	87
CONCLUSIONES.....	95
RECOMENDACIONES	97
REFERENCIAS.....	99
ANEXOS.....	Error! Bookmark not defined.
.....	Error! Bookmark not defined.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Eficiencia de Martillo	17
Tabla 2. Corrección del Diámetro del Pozo.....	17
Tabla 3. Corrección del Muestreador.....	18
Tabla 4. Corrección de Longitud de Varilla	18
Tabla 5. Tipología según el tipo de Suelo.....	26
Tabla 6. Tabla de Resultados	46
Tabla 7. Resultados de Cálculo de Esfuerzo Confinante Promedio	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Observación de Fisura en "Bloque G"	3
Figura 2. Ubicación del Proyecto.....	3
Figura 3. Equipo de Corte a Torsión y Columna Resonante	6
Figura 4. Representación Gráfica de Parámetros del Suelo.....	8
Figura 5. Equipo de Penetración Estándar (SPT)	13
Figura 6. Limpieza de Terreno para SPT.....	14
Figura 7. Extracción Muestra Alterada con Cuchara Partida.....	15
Figura 8. Almacenamiento de Tubos Shelby	16
Figura 9. Lavado de Muestra por Tamiz.....	19
Figura 10. Tamizado de Muestra	20
Figura 11. Criterios de Clasificación de Suelos (SUCS)	25
Figura 12. Carta de Plasticidad	26
Figura 13. Extracción de Muestra.....	31
Figura 14. Muestra de Suelo	32
Figura 15. Montaje Final del Equipo	33
Figura 16. Explicación Funcionamiento de Programa.....	36
Figura 17. Ilustración para la obtención de las expresiones de vs y G en el programa de Columna Resonante.....	37
Figura 18. Configuración Ensayo de Columna Resonante (RC)	38
Figura 19. Gráfica Tipo Ensayo de Columna Resonante (RC).....	38
Figura 20. Configuración Ensayo de Corte Torsional Cíclico (TS)	39
Figura 21. Gráfica Tipo Ensayo de Corte Torsional Cíclico (TS).....	40
Figura 22. Gráfica Esfuerzo de Corte τ (kPa) vs Deformación Angular γ (%).....	41
Figura 23. Curva Granulométrica de Estrato I.....	47
Figura 24. Curva Granulométrica de Estrato II	47
Figura 25. Curva Granulométrica de Estrato III	48
Figura 26. Curva Granulométrica de Estrato IV	48
Figura 27. Curva Granulométrica de Estrato V	49
Figura 28. Curva Granulométrica de Estrato VI.....	49
Figura 29. Gráfica Límite Líquido de Estrato I	50
Figura 30. Gráfica Límite Líquido de Estrato II	50
Figura 31. Gráfica Límite Líquido de Estrato III.....	51
Figura 32. Gráfica Límite Líquido de Estrato IV.....	51
Figura 33. Gráfica Límite Líquido de Estrato V.....	52
Figura 34. Gráfica Límite Líquido de Estrato VI.....	52
Figura 35. Carta de Plasticidad General	53
Figura 36. Gráfica de Ensayo Columna Resonante Estrato I.....	54
Figura 37. Gráfica de Ensayo Corte Torsional Cíclico Estrato I	54
Figura 38. Gráfica Módulo de Corte G/G_{max} Estrato I	55
Figura 39. Gráfica D vs γ Estrato I.....	55
Figura 40. Gráfica de Ensayo Columna Resonante Estrato II	56
Figura 41. Gráfica de Ensayo Corte Torsional Cíclico Estrato II.....	56

Figura 42. Gráfica Módulo de Corte G/Gmax Estrato II	57
Figura 43. Gráfica D vs γ Estrato II	57
Figura 44. Gráfica de Ensayo Columna Resonante Estrato III	58
Figura 45. Gráfica de Ensayo Corte Torsional Cíclico Estrato III.....	58
Figura 46. Gráfica Módulo de Corte G/Gmax Estrato III.....	59
Figura 47. Gráfica D vs γ Estrato III.....	59
Figura 48. Gráfica de Ensayo Columna Resonante Estrato V	60
Figura 49. Gráfica de Ensayo Corte Torsional Cíclico Estrato V.....	60
Figura 50. Gráfica Módulo de Corte G/Gmax Estrato V	61
Figura 51. Gráfica D vs γ Estrato V	61
Figura 52. Gráfica de Ensayo Columna Resonante Estrato VI.....	62
Figura 53. Gráfica de Ensayo Corte Torsional Cíclico Estrato VI	62
Figura 54. Gráfica Módulo de Corte G/Gmax Estrato VI.....	63
Figura 55. Gráfica D vs γ Estrato VI.....	63
Figura 56. Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato I dependiendo el Índice de Plasticidad.	64
Figura 57. Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato I para Suelos Cohesivos.....	65
Figura 58. Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato I para Suelos Según el Esfuerzo Confinante Promedio y el Índice de Plasticidad.	66
Figura 59. Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato I dependiendo el Índice de Plasticidad.	67
Figura 60. Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato I para Suelos Cohesivos.....	68
Figura 61. Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato I para Suelos Según el Esfuerzo Confinante Promedio y el Índice de Plasticidad.	69
Figura 62. Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato II dependiendo el Índice de Plasticidad.	70
Figura 63. Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato II para Suelos Cohesivos.....	71
Figura 64. Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato II para Suelos Según el Esfuerzo Confinante Promedio y el Índice de Plasticidad.	72
Figura 65. Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato II dependiendo el Índice de Plasticidad.	73
Figura 66. Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato II para Suelos Cohesivos.....	74
Figura 67. Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato II para Suelos Según el Esfuerzo Confinante Promedio y el Índice de Plasticidad.	75
Figura 68. Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato III dependiendo el Índice de Plasticidad.	76
Figura 69. Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato III para Suelos Cohesivos.....	77
Figura 70. Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato III para Suelos Según el Esfuerzo Confinante Promedio y el Índice de Plasticidad.	78

Figura 71. Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato III dependiendo el Índice de Plasticidad.	79
Figura 72. Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato III para Suelos Cohesivos.....	80
Figura 73. Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato III para Suelos Según el Esfuerzo Confinante Promedio y el Índice de Plasticidad.	81
Figura 74. Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato V según EPRI, 1993.	82
Figura 75. Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato V para Suelos No Cohesivos.....	83
Figura 76. Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato V para Suelos Según el Esfuerzo Confinante Promedio.	84
Figura 77. Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato V según EPRI, 1993.	85
Figura 78. Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato V para Suelos No Cohesivos.....	86
Figura 79. Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato V para Suelos Según el Esfuerzo Confinante Promedio.	87
Figura 80. Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato VI según EPRI, 1993.	88
Figura 81. Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato VI para Suelos No Cohesivos.....	89
Figura 82. Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato VI para Suelos Según el Esfuerzo Confinante Promedio.	90
Figura 83. Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato VI. según EPRI, 1993.	91
Figura 84. Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato VI para Suelos No Cohesivos.....	92
Figura 85. Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato VI para Suelos Según el Esfuerzo Confinante Promedio.	93
Figura 86. Efecto del Esfuerzo Confinante Promedio en Estratos sobre 50 kPa	94

RESUMEN

La caracterización dinámica de suelos presenta parámetros de fundamental importancia para el análisis del comportamiento de los mismos frente a cargas dinámicas, por lo que, es la base para un estudio mucho más amplio del comportamiento de una estructura frente a sismos al considerar análisis de respuesta de sitio o los problemas de interacción suelo-estructura. El presente documento tratará acerca de la aplicación del ensayo combinado de “Columna Resonante y Cortante Torsional Cíclico”, con el equipo 31-WF8500, en 5 estratos de suelos tomados en el “Bloque G” de la Universidad Politécnica Salesiana, que van desde 0 hasta 10 metros, con el fin de obtener las gráficas de “Degradación del Módulo de Corte vs Deformación”, así como la de “Amortiguamiento Vs Deformación Angular”. Se describe en detalle, los datos obtenidos de 5 estratos de suelo a diferentes profundidades. Para lo cual se obtuvieron 3 muestras de arcillas en los primeros 3 estratos de 0 a 8 metros (OL, CL, ML-CL) y 2 de arenas para los últimos 2 estratos de 8 a 10 metros (SM), de las cuales se obtienen todas sus propiedades físico mecánicas. El ensayo se realiza con muestras extraídas en tubos Shelby de 2 y 3” de diámetro mediante el ensayo SPT. Además, se realiza una comparación de los parámetros dinámicos medidos en el presente estudio y los obtenidos por diferentes autores de la literatura.

Palabras clave: Columna Resonante, Corte Torsional Cíclico, Caracterización Dinámica, Muestras Alteradas e Inalteradas, Esfuerzo Confinante Promedio, Módulo de Corte, Amortiguamiento.

ABSTRACT

The Dynamic characterization of soils presents parameters of fundamental importance for the analysis of their behavior against dynamic loads; thus, it is the basis for a much broader study of the behavior of a structure against earthquakes when considering site response analysis or soil-structure interaction problems. This paper will deal with the application of the combined test of “Resonant Column and Cyclic Torsional” Shear, with the 31-WF8500 equipment, in 5 soil strata taken from “Block G” of the Salesian Polytechnic University, ranging from 0 to 10 meters, in order to obtain the graphs of “Shear Modulus Degradation vs Deformation”, as well as the “Damping Vs Angular Deformation”. The data obtained from 5 soil strata at different depths are described in detail. For which 3 clay samples were obtained in the first 3 strata from 0 to 8 meters (OL, CL, ML-CL) and 2 of sands for the last 2 strata from 8 to 10 meters (SM), from which all their physical-mechanical properties are obtained. The test is carried out with samples extracted in 2 and 3" diameter Shelby tubes using the SPT test. In addition, a comparison of the dynamic parameters measured in the present study and those obtained by different authors in the literature is carried out.

Keywords: Resonant Column, Cyclic Torsional Shear, Dynamic Characterization, Altered and Unaltered Samples, Average Confining Stress, Shear Modulus, Damping.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES Y GENERALIDADES

1.1 Introducción

El objetivo principal del presente documento, es la realización del ensayo combinado de “Columna Resonante y Corte Torsional Cíclico” mediante el equipo 31-WF8500, para la obtención de las gráficas de “Degradación del Módulo de Corte vs Deformación”, así como la de “Amortiguamiento Vs Deformación Angular”. Todo el procedimiento a seguir, tales como la perforación mediante el ensayo de penetración estándar SPT para la extracción de muestras alteradas e inalteradas en tubos Shelby, la toma de las propiedades físico-mecánicas de todas las muestras, montaje de muestra en equipo, y la ejecución de los ensayos, serán explicadas de forma detallada, de forma que el lector pueda entenderlo de manera fácil y eficaz.

El ensayo combinado de “Columna Resonante y Corte Torsional Cíclico” permite la obtención de parámetros dinámicos del suelo como el módulo de corte, deformación angular y amortiguamiento.

Los resultados de este ensayo serán importantes para un futuro análisis del comportamiento de la estructura “Bloque G” frente a cargas sísmicas, así como su interacción suelo-estructura.

1.2. Descripción del Problema

1.2.1. Antecedentes

La edificación del “Bloque G” de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito campus Sur, ha presentado fisuras con el paso del tiempo en su revestimiento. Es por esto, que se ha visto en la necesidad de detectar las causas y corregir el problema para evitar alteraciones estructurales a futuro. Por esta razón se llevará a cabo estudios, análisis para el presente trabajo de tesis, a fin de que se pueda determinar la posible causa y evaluación del desempeño de la edificación ante eventos sísmicos; para lo cual es preciso considerar las características del suelo de soporte, además se requerirá la caracterización dinámica del suelo, que permitirá realizar el estudio de respuesta de sitio y la interacción suelo-estructura.

1.2.2. Importancia y Alcances

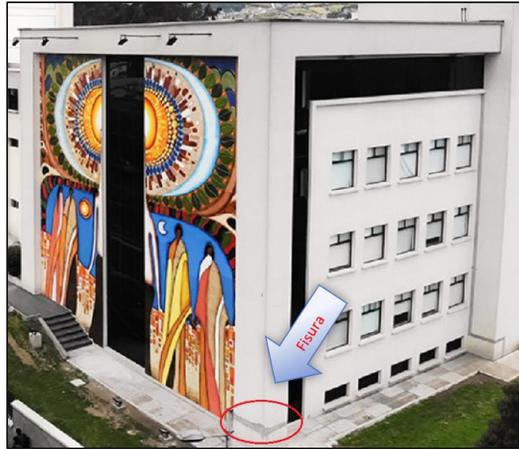
Los daños producidos por los fenómenos sísmicos, representan un alto grado de inconvenientes para las edificaciones en general. Estos daños pueden provocar el colapso de los elementos estructurales y en asentamientos indeseables en el suelo, que pueden ser reflejados en la estructura vista en forma de grietas o fisuras.

Las fisuras normalmente no tienen mayor importancia, más que en el aspecto estético de la estructura; sin embargo, si no se las trata adecuadamente y a tiempo, pueden provocar efectos mayores como corrosión, y en casos extremos el colapso parcial o total del elemento.

En el presente trabajo se realizará la caracterización dinámica del suelo, ubicado en el “Bloque G”, a fin de evaluar en trabajos posteriores, cual es el desempeño de la edificación, tomando en consideración el estudio de respuesta de sitio y la interacción suelo-estructura.

Figura 1.

Observación de Fisura en "Bloque G"



Nota. Dentro del círculo rojo se puede observar la fisura en la edificación del “Bloque G”.

Elaborado por: Los autores, a través, de Google Maps (2021).

1.2.3. Delimitación

El presente estudio se realizará en el suelo de la edificación del “Bloque G” de la Universidad Politécnica Salesiana campus Sur, el cual se encuentra ubicado en la ciudad de Quito, entre las avenidas Rumichaca Ñan y Morán Valverde, en la parroquia de Chillogallo.

Figura 2.

Ubicación del Proyecto



Nota. Se presenta la ubicación del “Bloque G”. Elaborado por: Los autores, a través, de Google Earth (2021).

1.3. Justificación

Al conocer sobre la importancia del comportamiento de los elementos estructurales a eventos sísmicos, surge la necesidad de analizar la caracterización dinámica sobre el suelo del “Bloque G”; a fin de que se pueda determinar en estudios futuros el desempeño de la estructura, frente a estos efectos mediante el estudio de respuesta de sitio y la interacción suelo-estructura. Adicionalmente, es esencial conocer la caracterización dinámica de suelos, utilizando el método combinado de “Columna Resonante y Cortante Torsional Cíclico”; logrando obtener como resultados del presente estudio, parámetros de la caracterización dinámica de los suelos subyacentes al “Bloque G”, y así poder plantear, además una base sólida para los posteriores estudios frente a cargas sísmicas.

Cabe manifestar, que el presente proyecto es viable, porque se cuenta con el apoyo de la Universidad Politécnica Salesiana, en cuanto al uso de los laboratorios de Suelos y Geotecnia, ubicados en el “Bloque E y G” respectivamente; los cuales están proporcionados con los equipos e implementos necesarios para el estudio de la caracterización dinámica del suelo. Además, se cuenta con los recursos económicos para realizar la perforación y extracción de muestras del suelo del “Bloque G”.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Analizar las características dinámicas del suelo del “Bloque G” de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, campus Sur, utilizando el método combinado de “Columna Resonante y Cortante Torsional Cíclico”; para la entrega de los parámetros necesarios frente a un estudio futuro de respuesta de sitio y de interacción suelo-estructura.

1.4.2. Objetivos Específicos

Extraer muestras de suelos perturbadas y no perturbadas del “Bloque G”, de la Universidad Politécnica Salesiana, con el equipo de ensayo de penetración estándar SPT y muestreadores de pared delgada tipo Shelby, para realizar los ensayos de caracterización.

Determinar las propiedades físico-mecánicas de los suelos realizando ensayos de clasificación de suelos, contenidos de humedad, ensayo de columna resonante y ensayo torsional cíclico.

Estudiar las propiedades dinámicas del suelo del “Bloque G”, mediante análisis experimentales y software del equipo de columna resonante, como una base para entender su comportamiento frente a un evento sísmico.

Obtener los módulos de corte de cada uno de los estratos del suelo que serán ensayados mediante muestras tomadas del suelo del “Bloque G”, para observar su comportamiento frente a sismos en trabajos futuros.

Elaborar las gráficas de “Amortiguamientos vs. Deformación” y “Módulo de rigidez normalizado (modulo cortante $(G)/G_{max}$) vs. Deformación” de los estratos del suelo ubicados en los primeros 10 metros de profundidad y comparar con valores de la literatura.

CAPÍTULO II

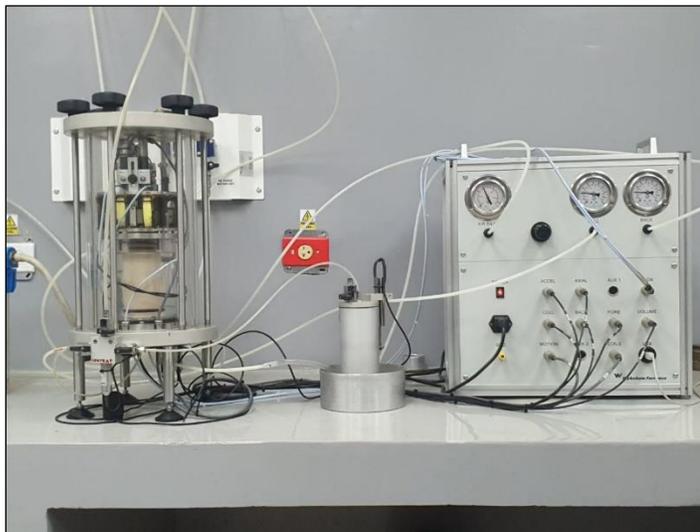
MARCO TEÓRICO

2.1. Método combinado de “Columna Resonante y Corte Torsional Cíclico”

El método combinado de “Columna Resonante y Corte Torsional Cíclico” es óptimo para la caracterización dinámica del suelo. “Permite estudiar el comportamiento del suelo en condiciones sísmicas” (Wykeham, 2013, p. 2). Ante lo citado, este método permitirá realizar un estudio detallado de los principales parámetros dinámicos del suelo, como el módulo de corte y el amortiguamiento con la deformación.

Figura 3.

Equipo de Corte a Torsión y Columna Resonante



Nota. Se presenta el equipo con el cual se realizará el método combinado de “Corte a Torsión y Columna Resonante”. Elaborado por: Los autores.

2.2. Ondas Sísmicas

La liberación repentina de energía por parte de los sismos producidos en el suelo, derivan en ondas sísmicas como producto del choque de placas tectónicas o erupciones volcánicas. Según Kramer (1996), “Cuando ocurre un sismo, se producen diferentes tipos de ondas sísmicas, las

ondas de volumen y las ondas de superficie” (p. 19). Las cuales están divididas en: Primarias (P), Secundarias (S), Love (L) y Rayleigh (R).

2.3. Amortiguamiento

Es la capacidad que tiene un cuerpo de perder energía producida en un sistema a vibración. Según Candela y Clevel (2020), “En los suelos, representa una medida de la capacidad de disipación de energía ante la aplicación de cargas cíclicas” (p. 15). La cual se produce cuando existe fricción y cohesión en el suelo.

2.4. Amplitud

Es una medida que indica la variación máxima del desplazamiento en un periodo de tiempo. Según Candela y Clevel (2020), “Está asociada al valor más alto registrado en una variable, medido con respecto al equilibrio o a cero.” (p. 16). Ante lo citado, podremos medir el valor más alto de una variable.

2.5. Periodo

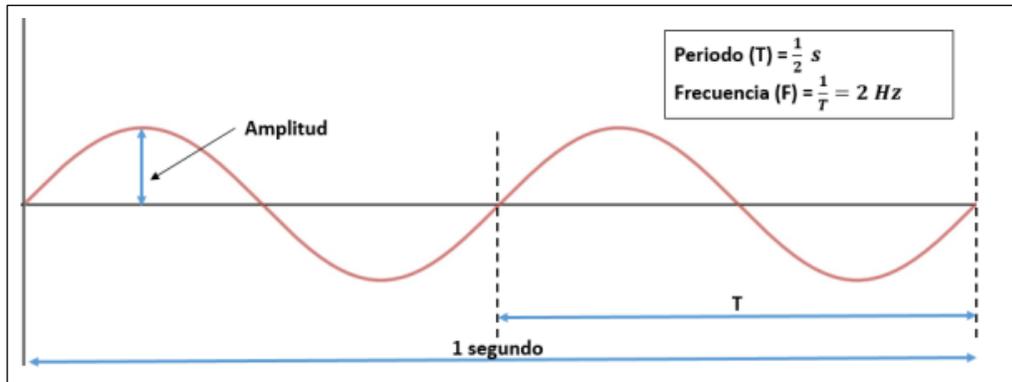
El periodo se mide en segundos (s). Según Candela y Clevel (2020), “El periodo es el lapso de tiempo en el que un ciclo se completa” (p. 16). Esto permitirá saber el tiempo exacto en el que una partícula regresará a la misma posición.

2.6. Frecuencia

Es el número de oscilaciones que da la partícula en un segundo, es medida en Hertz (Hz). Según Candela y Clevel (2020), “Es el número de veces que se repite una vibración por unidad de tiempo.” (p. 16). Los mencionados parámetros se pueden presentar mediante gráficas, como se muestran a continuación en la Figura 4.

Figura 4.

Representación Gráfica de Parámetros del Suelo



Nota. Se presenta mediante un gráfico la explicación de Periodo (Color Azul), Frecuencia (Color Rojo) y Amplitud (Flecha Color Azul), además, de las fórmulas correspondes.

Fuente: (Candela y Clevel, 2020, p. 17).

2.7. Carga Dinámica

Son cargas que se pueden aplicar de manera repentina. Según Candela y Clevel (2020), “Son todos los esfuerzos que soportará la estructura cuando se presenten movimientos sísmicos, cargas de lluvia, granizo, etc. Las cuales se presentan de forma fortuita” (p.17). De este modo, podemos identificar las cargas aplicadas sobre la edificación.

2.8. Rigidez

La rigidez está influenciada por los parámetros del suelo. Según Uribe (2002), “Es una medida de la capacidad de un elemento para oponerse al desplazamiento o giro de uno de sus extremos cuando se le aplica sobre él, algún esfuerzo” (p. 198). Ante lo citado, es de gran importancia la medición de este parámetro, para medir su capacidad de resistencia frente a eventos sísmicos.

2.9. Módulo de Corte

Al ser una medida de dureza. “Definido como una constante que relaciona el esfuerzo de corte y la deformación de corte que experimenta el suelo” (Garzón y Gerena, 2016, p. 11). Es muy importante para la caracterización dinámica de suelos.

$$\tau = G * \gamma$$

Dónde:

τ : Esfuerzo Cortante

G: Módulo de Corte

Γ : Deformación por Corte

2.10. Modos de Vibración

Indican la respuesta de la estructura total frente a un evento sísmico o un esfuerzo determinado. Este varía dependiendo el esfuerzo que se haya aplicado a lo largo del tiempo. Según Candela y Clevel (2020), “Es la forma característica en que oscila un sistema que no disipa energía” (p. 19). La combinación de los modos de vibración, reproducen el movimiento que experimenta la estructura ante un evento sísmico.

2.11. Desempeño Estructural

Para saber cuál es el desempeño estructural frente a sismos es muy importante conocer la respuesta dinámica de la estructura bajo una acción sísmica. Según Muñoz (2017), “La evaluación del desempeño en estructuras bajo cargas dinámicas como las causadas por terremotos, se pueden utilizar en los análisis de respuesta dinámica” (p. 169). En este sentido, una de las técnicas utilizadas es aplicar a la estructura un grupo de sismos que sean representativos después de realizar estudios de respuesta de sitios.

2.12. Respuesta de Sitio

Cabe señalar, que es de alta prioridad conocer cuál será la respuesta del suelo de nuestra edificación cuando se produzca un sismo. Según CEDERI (2006), “Los cambios en las señales sísmicas generados por propagación de ondas en los estratos de suelos inciden directamente en las sollicitaciones y el comportamiento de las edificaciones ante un terremoto” (p.1). Es por esta razón que se vuelve útil su adecuada implementación frente a problemas sísmicos en las edificaciones. Según Alviar (2019), “El estudio particular de sitio o la respuesta dinámica del suelo bajo acciones sísmicas consiste en imponer en la base del depósito del suelo, sismos representativos, cuyas características se corresponda con un estudio de amenaza” (p.146). Ante lo citado, es muy importante que las edificaciones cumplan con los parámetros necesarios para su correcto funcionamiento.

2.13. Interacción Suelo-Estructura

Cuando se construye una edificación, se deben considerar las características dinámicas que presenta cada tipo de suelo. Según Águila y Villarreal (2021), “La interacción suelo-estructura es una rama de la ingeniería geotécnica, que tiene como uno de sus objetivos diseñar y construir estructuras capaces de resistir la acción sísmica o los terremotos considerando las características dinámicas del suelo” (p. 428). De este modo, la estructura presentará un mejor desempeño cuando ocurran estos fenómenos.

2.14. Ensayo de Penetración Estándar (SPT)

El Ensayo SPT es uno de los ensayos más realizados en campo para la obtención de parámetros geotécnicos, debido a su bajo costo es accesible para su ejecución. Según Carmona (2014), “El Ensayo de penetración estándar (SPT), es un ensayo in situ que define parámetros de diseño geotécnico, en el cual, dependiendo el tipo de suelo, se calculan correcciones del número

de golpes y el ángulo de fricción equivalente.” (p. 15). Mediante este ensayo se puede contabilizar el número de golpes necesarios para la extracción de una muestra de suelo.

2.15. Propiedades Físico Mecánicas del Suelo

Para la obtención de las propiedades físico-mecánicas del suelo, es necesario el estudio de muestras perturbadas y no perturbadas de suelo, mediante ensayos de campo y laboratorio. Según Martínez (2017):

Los ensayos de campo permiten la evaluación “in situ” de las propiedades del suelo, es decir, en su condición natural donde su estado complejo debido a tensiones y condiciones químicas, térmicas y estructurales. Uno de los métodos para la obtención de los principales parámetros dinámicos del suelo es el de la sísmica de refracción, es el procedimiento más convencional que se utiliza debido a su simplicidad, el cual permite definir perfiles de suelos y rocas en áreas bastante amplias. (p.19)

Estos parámetros muestran características importantes que permitirán estudiar y analizar las muestras de suelo de mejor manera.

2.16. Límites de Atterberg

Límite Líquido (LL), Límite Plástico (LP) e Índice de Plasticidad (IP), son ensayos realizados en laboratorio, conocidos comúnmente como Límites de Atterberg. Según Aguirre y Yépez (2019), “Los límites de Atterberg, son usados para caracterizar el comportamiento de suelos con partículas finas, así como la propiedad que presentan para poder deformarse, o sea su plasticidad” (p.75). Realizar estos ensayos de laboratorio permitirán conocer las características de las muestras que serán empleadas.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Tipo de Investigación

Para el presente proyecto se aplicará la investigación experimental, ya que se realizarán los ensayos de “Columna Resonante y Cortante Torsional Cíclico”, mediante la toma de muestras de suelo no perturbado para su análisis dinámico. Según Marenco (2003), “La investigación experimental se refiere a un estudio en el que se manipulan deliberadamente una o más variables independientes (supuestas causas) para analizar las consecuencias de una situación” (p. 38). Por lo tanto, se realizará este tipo de investigación para la caracterización dinámica del suelo.

3.2. Método

El método a ser utilizado dentro del presente estudio será el analítico. “Este método implica el análisis y la síntesis, es decir la separación de un todo en sus partes o en sus elementos constitutivos, y la segunda implicando la unión de elementos para formar un todo” (Cuaical, 2015, p.16). Por esta razón se tomará en consideración el método a seguir.

3.3. Técnica de recolección de información

Para el presente proyecto, las técnicas de recolección de información serán: Observación de resultados, fichas de resultados, estudio de suelos, comparaciones con la literatura y herramientas tecnológicas.

3.4. Proceso Técnico de Ingeniería Civil

3.4.1. Recopilación de Muestras

Se realizará la extracción de muestras de suelo del “Bloque G” de la Universidad Politécnica Salesiana mediante Tubos Shelby de 2” y 3” de diámetro, las perforaciones de los estratos de suelo, serán hasta los 10 metros de profundidad. Una vez extraída la muestra, se la

someterán a los ensayos de “Columna Resonante y Cortante Torsional Cíclico” para obtener sus parámetros dinámicos.

3.4.2. Ensayo de Penetración Estándar (SPT)

Mediante este ensayo, se permite la exploración subterránea de un sitio en particular, con el fin de conseguir características de la litología del suelo, para lo cual, se recaudan muestras alteradas e inalteradas. El ensayo de penetración estándar requiere un equipo mínimo, el cual es detallado en el anexo 1.

En su inicio se utilizará la cuchara partida para la extracción de muestras alteradas, las cuales servirán para la obtención de límites de Atterberg; mientras que, para la obtención de las muestras inalteradas se usarán tubos Shelby de 2” y 3”, los cuales, posterior a ser preparados servirán para la obtención de parámetros característicos del suelo, mediante el método de “Columna Resonante y Corte Torsional Cíclico”.

Figura 5.

Equipo de Penetración Estándar (SPT)



Nota. Montaje de Equipo de Ensayo de Penetración Estándar (SPT). Elaborado por: Los autores.

De allí, se seguirán una serie de pasos, los detallados a continuación:

- Para empezar, se procede a preparar los equipos a ser utilizados, se elige una zona específica para la perforación, así como la verificación de todos los componentes, para asegurar que funcionen de manera óptima.
- Se realiza el montaje del equipo, así como su levantamiento, además, se marca el lugar de perforación, para de este modo se encuentre en el centro del trípode, de esta forma todo se encuentra nivelado y registrará datos adecuados.
- Se agranda el pozo de perforación con la posteadora y se procede a perforar 0.55 m, los cuales son catalogados como limpieza del terreno, este procedimiento se lo realiza previo al SPT.

Figura 6.

Limpieza de Terreno para SPT



Nota. Limpieza de terreno con Posteadora, a 0.55 metros de profundidad para Ensayo de Penetración Estándar SPT. Elaborado por: Los autores.

- Posteriormente se realiza la perforación SPT. Para facilitar el conteo de número de golpes, se realiza tres marcas cada 15 cm en la tubería de perforación, a fin de contabilizar el número de golpes necesarios para hincar el saca muestra los últimos 30 cm en el terreno natural.
- Se realiza una toma del número de golpes cada 15 cm, el cual no debe sobrepasar los 50 golpes; de darse este caso, se considerará rechazo y se continúa avanzando la perforación con profundidad.
- Se procede a la recolección de muestra con la cuchara partida, en este caso, alterada. Es importante resaltar que no se deben sobrepasar los 15 metros de perforación con este ensayo para obtener datos correctos.

Figura 7.

Extracción Muestra Alterada con Cuchara Partida



Nota. Extracción de muestra de suelo con cuchara partida. Elaborado por: Los autores.

Por otra parte, Para obtener muestras inalteradas de suelo se requieren tubos Shelby, para el presente proyecto se contaron con tubos de 2” y 3”. Para el caso de 2”, su extracción es directa en el tubo, mientras que, para el caso de los tubos de 3”, se introduce previamente un tubo PVC de 3”, para que su extracción sea más sencilla y directa.

- Teniendo claro lo mencionado anteriormente, se introduce el tubo Shelby, con tubería de perforación para la profundidad demandada, igualmente se marca cada 15cm hasta conseguir una altura de 45cm; una vez llegada a la profundidad requerida y si la muestra no se considera rechazo, se procede con su extracción.

El almacenamiento de la muestra en Shelby debe hacerse con sumo cuidado, envolviéndola en plástico para que la muestra no pierda humedad y se conserven las características del suelo.

Figura 8.

Almacenamiento de Tubos Shelby



Nota. Se muestran los tubos Shelby, PVC para tubos de 3 pulgadas y tubo metálico para 2 pulgadas, envueltos en plástico para evitar la pérdida de humedad y cambios en las propiedades del suelo. Elaborado por: Los autores.

Se considera este proceso las veces necesarias de perforación y conteo de golpes, así como el almacenamiento de muestras según los metros deseados para el ensayo.

Con los datos obtenidos del previo ensayo, se procede a calcular la corrección del número de golpes N_{60} en condiciones de campo. Para lo cual, se sigue un proceso dependiendo del autor y en casos más específicos, el tipo de suelo. Con ayuda de tablas se obtiene el dato de la eficiencia del martillo, la corrección del diámetro del pozo de perforación, la corrección del muestreador y la corrección de la longitud de la varilla; estos datos se presentan en las tablas 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

Tabla 1.

Eficiencia de Martillo

País	Tipo de Martillo	Lanzamiento de Martillo	η_H (%)
Japón	Dona	Caída Libre	78
	Dona	Cuerda y Polea	67
Estados Unidos	Seguridad	Cuerda y Polea	60
	Dona	Cuerda y Polea	45
Argentina	Dona	Cuerda y Polea	45
China	Dona	Caída Libre	60
	Dona	Cuerda y Polea	50

Nota. Se presentan datos para la eficiencia del martillo. Elaborado por: Los autores, con referencia de Braja M. Das. (2016).

Tabla 2.

Corrección del Diámetro del Pozo

Diámetro (mm)	η_B
60-120	1
150	1,05
200	1,15

Nota. Se presentan datos para la corrección del diámetro del pozo de perforación.

Elaborado por: Los autores, con referencia de Braja M. Das. (2016).

Tabla 3.*Corrección del Muestreador*

Variable	η_S
Muestreador Estándar	1
Con Separador para Arena Densa y Arcilla	0,8
Con Separador para Arena Suelta	0,9

Nota. Se presentan datos para la corrección del muestreador a utilizar. Elaborado por: Los autores, con referencia de Braja M. Das. (2016).

Tabla 4.*Corrección de Longitud de Varilla*

Longitud Varilla (m)	η_R
>10	1
6-10	0,95
4-6	0,85
0-4	0,75

Nota. Se presentan datos para la corrección de la longitud de varilla. Elaborado por: Los autores, con referencia de Braja M. Das. (2016).

Con estos datos obtenidos en las tablas ya mencionadas, se consigue el dato del número de golpes del SPT, corregido por condiciones de campo:

$$N_{60} = \frac{NSPT * nH * nB * nS * nR}{60}$$

Dónde:

NSPT: Número de golpes contabilizados en SPT.

nH: Corrección de martillo.

nB: Corrección de diámetro.

nS: Corrección muestreador.

nR: Corrección de profundidad.

3.4.3. Propiedades Físico Mecánicas del suelo

3.4.3.1. Granulometría por lavado

El análisis granulométrico de los áridos fino y grueso, se realiza para muestras de suelo cuyas partículas son mayores a la abertura del tamiz No.200. Según Aguirre y Yépez (2019), “La granulometría consiste en determinar la distribución de los diferentes tamaños de las partículas de suelo, así como su abundancia dentro del conjunto separándolas por rangos” (p. 94). El ensayo se puede realizar de dos formas: manual o mecánica, con el fin de clasificar el suelo y conocer sus propiedades; para la elaboración del ensayo se seguirá la norma ASTM C 136.

- Una vez obtenidas las muestras con en el ensayo (SPT), se procede a colocar en la cápsula una muestra de tamaño considerable; verter la muestra en el tamiz No.40 y No.200, colocados de forma decreciente para realizar el lavado como se muestra en la Figura 9.

Figura 9.

Lavado de Muestra por Tamiz



Nota. Se muestra el procedimiento de lavado por tamiz. Elaborado por: Los autores.

- A continuación, lo retenido en el tamiz No.40 y No.200, se coloca en una cápsula, para así ser llevado al horno a temperatura constante de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas.
- Pasada las 24 horas, se retira del horno para proceder con el tamizado manual, se utiliza tamices de $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", No.4, No.10, No.40, No.200, los cuales serán colocados de forma decreciente; posteriormente verter la muestra seca en el tamiz superior y agitar de forma manual un periodo considerable en forma vertical y horizontal.

Figura 10.

Tamizado de Muestra



Nota. Se muestra el procedimiento de tamizado manual. Elaborado por: Los autores.

- Para finalizar el ensayo, pesar la masa retenida en cada tamiz, lo cual ayudará a calcular el porcentaje que pasa, teniendo en cuenta que la masa inicial no debe variar en más del 1% de la suma de todas las masas retenidas.
- A continuación, se determinará el porcentaje retenido.
- En virtud de los procedimientos realizados se procede a graficar la curva granulométrica, esta es la abertura del tamiz (mm) en escala logarítmica vs. el porcentaje que pasa.

3.4.3.2. Contenido de Humedad secado al horno

Este ensayo de laboratorio, se realiza con muestra alterada extraída del ensayo SPT. Según la norma ASTM D2216-19, (2019), “El contenido de agua es una de las propiedades más significativas usadas para establecer una correlación entre el comportamiento del suelo y sus propiedades” (p.3). La diferencia de peso después del secado al horno se considera pérdida de humedad.

Para la elaboración de este ensayo se considera lo siguiente:

- Con la ayuda de la balanza, determinar y anotar el peso de la cápsula a utilizar; seleccionar una porción representativa del material, y determinar el peso de la cápsula más la muestra húmeda usando la balanza.
- Colocar en el horno a temperatura constante de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas.
- Transcurrido el tiempo sacar las muestras del horno y determinar el peso de la cápsula más la muestra seca; determinar el contenido de humedad mediante la siguiente fórmula. Según la norma ASTM D 2216-19 (2019):

$$w = \frac{M_{CWS} - M_{CS}}{M_{CS} - M_C} * 100$$

Donde:

w: contenido de humedad, %

M_{CWS} : Masa de la cápsula + muestra húmeda

M_{CS} : Masa de la cápsula + muestra seca

M_C : Masa de la cápsula. (p.8)

3.4.3.3. Límites de Atterberg

3.4.3.3.1. Límite Líquido

El ensayo de Límite líquido se realiza en laboratorio con el mecanismo de “Cuchara de Casagrande”. Según la norma ASTM D4318-17 (2017). “Límite Líquido es el contenido de agua expresado en porcentaje de una muestra de suelo, se remoja el material y se ajusta su contenido de agua para llevarlo a una consistencia que requiera 25 golpes para que la ranura se cierre o solape en una distancia de 1 cm (p.5). Mediante los cuales se puede llegar a obtener características importantes del suelo, además de analizar su comportamiento, para lo cual se requiere un equipo mínimo, detallado en la sección de anexo 5; para la elaboración del ensayo se seguirán una serie de pasos, los cuales son detallados a continuación:

- Una vez obtenidas las muestras alteradas del ensayo (SPT), se debe poner a secar al aire libre por un tiempo considerado, a continuación, con la ayuda de un mazo con cabeza de caucho disgregar las partículas de la muestra procurando que no se produzca fragmentación de las partículas individuales.
- Utilizando el tamiz No.40, tamizar de forma manual la muestra disgregada, así, las partículas finas que pasen, serán utilizadas en el ensayo. Se pesa entre 150 g a 200 g de muestra, además, agregar agua de entre 1 ml a 3 ml con la pipeta y se mezcla con la espátula cuidadosamente hasta conseguir una pasta homogénea.
- Con la ayuda de la espátula se coloca la muestra en el equipo cuchara de Casagrande y se enrasa hasta conseguir 1 cm de espesor, realizar un solo corte con la ayuda del ranurador de 2 mm de ancho a través de la línea central de la muestra.
- Activar el motor del aparato por medio de la manija para que la cuchara de Casagrande se levante y caiga golpeando en la base a una velocidad de $2 \text{ rev/s} \pm 0.1 \text{ rev/s}$.

- Se realizan tres ensayos, en el primero debe cerrar la ranura entre 30-40 golpes, cuando se cumpla esto, es decir, la ranura se una 12 mm dentro del rango de golpes, se toma esta parte de la muestra para determinar la humedad del mismo.
- Con ayuda de la balanza, pesar la masa de las cápsulas y una vez realizado el ensayo pesar la masa de la cápsula más la muestra, para después ser llevadas al horno a temperatura constante de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas.
- Retomar la muestra restante de la cuchara de Casagrande y aumentar el porcentaje de agua, mezclar muy bien, con el fin de que se necesite menos golpes.
- Limpiar y secar la cuchara de Casagrande además del ranurador y se prosigue con las siguientes tomas, una con un número de golpes que se encuentren entre 20 a 30 y otra entre 10 a 20 golpes.
- Pasadas las 24 horas, se retira del horno y se pesa la masa de la cápsula más la muestra seca.
- Calcular la humedad de la muestra.
- Finalizando el ensayo realizando la gráfica de Límite Líquido que es número de golpes vs. contenido de humedad (%).

3.4.3.3.2 Límite Plástico

La plasticidad es una propiedad que tiene un suelo para soportar grandes deformaciones sin regresar a su forma original. Según Braja M. Das (2016), “El límite plástico se define como el contenido de agua más bajo al que el suelo de grano fino se puede enrollar en un hilo de 3 mm de diámetro” (p. 20). El ensayo se lo realiza de la siguiente manera.

- Al igual que en el límite líquido se utiliza las partículas del material que pasa por el tamiz No.40. Seleccionar aproximadamente 20 g de muestra para realizar el ensayo.

- A continuación, agregar agua a la muestra y con ayuda de la espátula mezclar hasta obtener una pasta homogénea.
- Con las manos limpias y secas seleccionar aproximadamente 1.5 g a 2 g de muestra, amasar la muestra entre la palma de la mano y dedos entre una superficie limpia hasta conseguir rollos de 3 mm los cuales se agrietan en no más de 2 minutos.
- Con la ayuda de la balanza determinar la masa de la cápsula con los rollos de suelo.
- A continuación, llevar al horno a temperatura constante de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas.
- Pasado el tiempo, registrar la masa de la cápsula más la muestra seca.
- Determinar el contenido de humedad.

3.4.3.3.3 Índice de Plasticidad

El índice de plasticidad se puede expresar como la diferencia entre límite líquido y límite plástico. Según Aguirre y Yépez (2019), “Este valor define la plasticidad del suelo arcilloso, siendo nulo para las arenas” (p.76). Siendo así, importante para conocer las propiedades de la muestra que se esté tratando.

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP: Índice de Plasticidad

LL: Límite Líquido

LP: Límite Plástico

3.4.4. Clasificación de Suelo SUCS

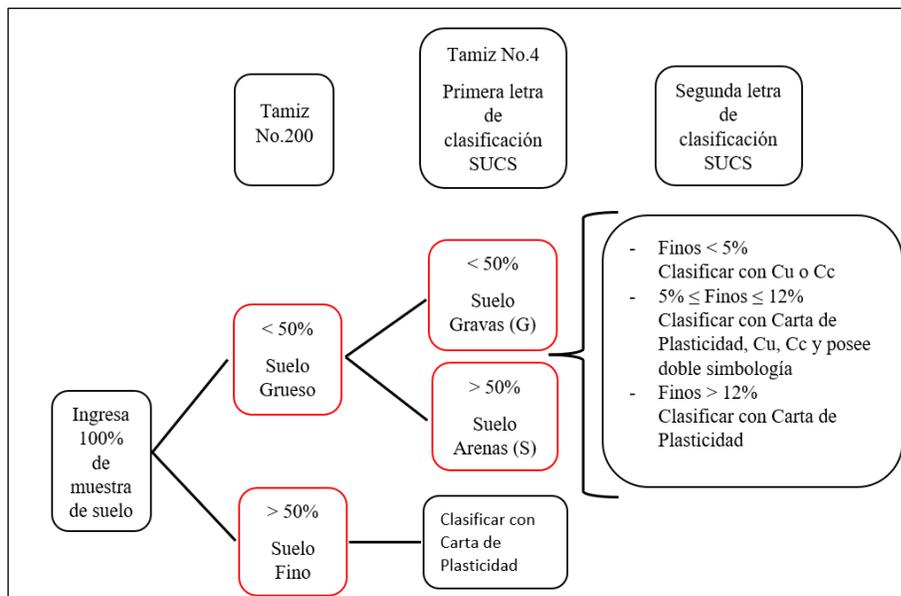
El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), se lo realiza una vez finalizado los ensayos de granulometría por lavado y límites de Atterberg. Según Juárez y Rodríguez (2005):

El sistema cubre los suelos gruesos y finos, distinguiendo ambos por el cribado a través de la malla No. 200; las partículas gruesas son mayores que dicha malla y las finas, menores. Un suelo se considera grueso si más del 50% de sus partículas son gruesas y fino, si más de la mitad de sus partículas, en peso, son finas. (p. 153)

Este método de clasificación es utilizado ampliamente en la actualidad.

Figura 11.

Criterios de Clasificación de Suelos (SUCS)



Nota. Se muestra el procedimiento a seguir para la clasificación SUCS. Elaborado por:

Los autores, con referencia de Juárez y Rodríguez (2005)

Tabla 5.

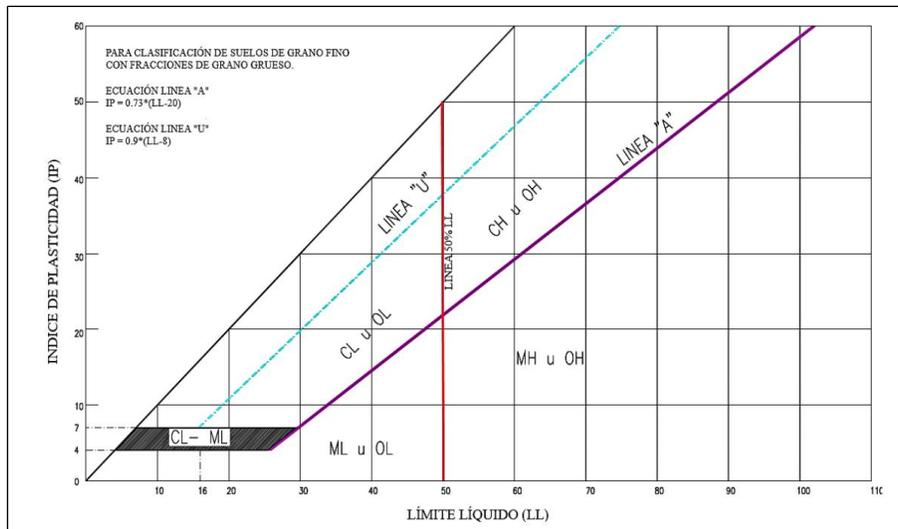
Tipología según el tipo de Suelo

	TIPO DE SUELO	PREFIJO	SUBGRUPO	SUFIJO
SUELO GRUESO	Gravas	G	Bien Graduado	W
	Arenas	S	Mal Graduado	P
SUELO FINO	Limo	M	Limoso	M
	Arcillas	C	Arcilloso	C
	Limos y Arcillas Orgánicas	O	Baja Plasticidad	L
			Alta Plasticidad	H

Nota. Se muestra una tabla con prefijos y sufijos según el tipo de suelo. Elaborado por: Los autores, con referencia de Juárez y Rodríguez (2005)

Figura 12.

Carta de Plasticidad



Nota. Se presenta un ejemplo de la Carta de Plasticidad. Fuente: Aguirre y Yépez (2019)

3.4.5. Propiedades Dinámicas del Suelo

La determinación de las propiedades dinámicas del suelo se obtiene de forma automática mediante el instrumento de ensayo luego de someter las probetas de suelo a excitación. Según

Garzón y Gerena (2016), “Las propiedades dinámicas son las que rigen el comportamiento de los suelos, tales son el módulo de corte, el amortiguamiento, la relación de Poisson, el módulo de Elasticidad; para la obtención de estos parámetros, se cuenta con varios métodos de campo y laboratorio.” (p.10). Para este estudio, el método a utilizar será el de “Columna Resonante y Corte Torsional Cíclico” en laboratorio.

El análisis de la muestra por medio del método de “Columna Resonante y Torsional Cíclico”, tiene mucha relevancia, ya que, según Murcia y Perdomo (2012), “Importantes trabajos realizados han permitido desarrollar mejoras significativas al método analizado, como lo es la incursión del análisis en el dominio de la frecuencia en el ensayo de Columna Resonante” (p.36). Es importante, además, mencionar que, mediante el estudio de propagación de ondas sísmicas en el suelo, se podrá medir cuál es la respuesta estructural de una edificación cuando está sometida a una acción sísmica.

3.4.5.1 Ensayo de Columna Resonante y Corte Torsional Cíclico

El equipo de Columna Resonante y Corte Torsional Cíclico utilizado para el presente ensayo será el 31-WF8500, es importante conocer a profundidad este equipo, pues el mismo será utilizado durante la mayor parte del proyecto. Según Martínez, Molina y Ruge (2018):

El equipo de columna resonante empleado durante la fase experimental de esta investigación, fue fabricado por la compañía Wykeham Farrance, el cual es un equipo instrumentado y automatizado que nos ofrece algunas ventajas, entre las que destacan:

- Es un dispositivo combinado de columna resonante y corte torsional simple.
- Se puede obtener mediante el dispositivo de manera automática parámetros dinámicos del suelo como la frecuencia de resonancia, velocidad de propagación de ondas de corte, módulo de rigidez, deformación angular y razón de amortiguamiento.

- No requiere del uso externo de osciloscopio (medidor de ondas sísmicas), ni de un generador de funciones.
- El sistema de excitación de estructura flotante interna permite realizar ensayos en muestras que tengan grandes deformaciones axiales.
- Permite visualizar, en tiempo real, la respuesta dinámica de los sensores durante la ejecución del ensayo. (p.1)

Este método es comúnmente el más utilizado por sus altos resultados de confiabilidad, por lo que, es el método de laboratorio más óptimo para la realización del proyecto. Ya obtenidas las muestras del ensayo, se realizarán los cálculos respectivos para hallar el esfuerzo confinante promedio que será utilizado en cada estrato. Para comenzar se necesita el valor del número de golpes corregido por presión de sobrecarga efectiva del ensayo (SPT). Utilizando los datos previamente obtenidos, siguiendo el procedimiento del libro de Braja M. Das, (2016).

$$N_{SPT} = N_{15-30} + N_{30-45}$$

Donde:

N_{SPT} : Número total de golpes

N_{15-30} : Número de golpes de 15 a 30 cm de penetración

N_{30-45} : Número de golpes de 30 a 45 cm de penetración

El Factor de corrección. Según Liao and Whitman (1986), mencionado en Braja M. Das, (2016):

$$C_N = \left(\frac{1}{\frac{\sigma'_o}{p_a}} \right)^{0.5}$$

Donde:

σ'_o : Presión de sobrecarga efectiva

$$p_a = 100 \text{ kN/m}^2 : \text{Presión atmosférica}$$

Finalmente se obtiene uno de los parámetros necesarios para el cálculo del esfuerzo confinante promedio en muestras de tipo granular.

$$N_1 = C_N * N_{SPT}$$

Donde:

N_1 : Valor de número de golpes corregido al valor de presión de sobrecarga efectiva

El siguiente paso es hallar el Coeficiente de Empuje en Reposo K_0 para el cual su fórmula varía dependiendo el tipo de suelo, ya sean arenas o arcillas. Para el caso de las arcillas, el coeficiente de empuje en reposo se obtiene mediante el índice de plasticidad, tal como se detalla a continuación. Según Massarsch (1979), mencionado en Braja M. Das, (2016)

$$K_0 = 0.44 + 0.0042 * \log(PI)$$

Mientras que, para el caso de arenas, el coeficiente de empuje en reposo se calcula mediante el ángulo de fricción interna del suelo, de la siguiente manera:

$$\phi = 27.1 + 0.3 * N_1 - 0.00054 * N_1^2$$

De este modo, para el caso de arenas, el coeficiente de empuje en reposo es igual:

$$K_0 = 1 - \text{sen}(\phi)$$

En virtud del dato obtenido del coeficiente de empuje en reposo, se procede a calcular un valor de esfuerzo confinante promedio referente al suelo sujeto de análisis, para de este modo, simular las condiciones propias del terreno.

- Se toma como dato h_i , la profundidad de la muestra a ensayar, medida en metros:

$$h_i \text{ (m)}$$

- Se procede a tomar datos de la muestra de suelo extraída con el muestreador,

$$h \text{ (cm)}$$

$$W_{muestra}(g)$$

$$D (cm)$$

Donde:

h : Altura de la muestra en cm

$W_{muestra}$: Peso de la muestra en g

D : Diámetro de la muestra en cm

- Se obtiene el peso específico de la muestra:

$$\gamma_m = \frac{W_{muestra}}{V_{muestra}} = (kgf/m^3)$$

- Se calcula el esfuerzo vertical y horizontal:

$$\sigma'v = hi * \gamma_m = (kgf/cm^2)$$

$$\sigma'h = K_0 * \sigma'v = (kgf/cm^2)$$

- Finalmente, se calcula el esfuerzo confinante promedio de sitio:

$$\sigma'm = \frac{\sigma'v + 2 * \sigma'h}{3} = (kPa)$$

- Entonces, la muestra será ensayada con un esfuerzo confinante promedio de ($\sigma'm$), medido en kPa, el cual simula las condiciones de campo que realmente tiene la muestra bajo el suelo a la profundidad dada.
- Hay que tener en cuenta que cuando se llegue al nivel freático, se deberá obtener el peso específico sumergido, restando el peso unitario del agua del peso específico de la muestra saturada.

$$\gamma_{sum} = \gamma_{sat} - \gamma_{agua} = (kgf/m^3)$$

3.4.5.1.1 Preparación de Muestras

Para empezar a ensayar una muestra de suelo, se selecciona uno de los Shelby obtenidos y se lo corta cada 15 centímetros para obtener una muestra representativa con mayor facilidad. Existen diferentes métodos para la extracción de la muestra del tubo, tales como el uso de gatas hidráulicas, extractores de tubos, tallado de muestras, entre otras. En el caso de los tubos de PVC, se realizó mediante un extractor de tubos para no alterar la muestra.

- Una vez que el tubo Shelby está cortado, se prepara el muestreador para introducirlo en el tubo y extraer la muestra, para esto, se untan con lubricante las paredes del muestreador de modo que no se quede material pegado y la extracción sea más sencilla.
- A continuación, se introduce el muestreador sobre el tubo, teniendo la seguridad de que se encuentre lo más centrado y alineado posible y se lo lleva al extractor de tubos para obtener muestra únicamente en el muestreador.

Figura 13.

Extracción de Muestra



Nota. La muestra se encuentra dentro del muestreador para su posterior montaje.

Elaborado por: Los autores.

- Se procede a obtener una muestra de suelo con dimensiones adecuadas para el equipo de Columna Resonante y Corte Torsional cíclico, como se muestra en la figura 14.

Figura 14.

Muestra de Suelo



Nota. Muestra lista para ingresar en el equipo de Columna Resonante y Cortante Torsional Cíclico. Elaborado por: Los autores.

Una vez cumplidos todos estos pasos, se comenzará a ensayar la muestra en el equipo “Columna Resonante y Cortante Torsional Cíclico”, para lo cual se sigue el siguiente proceso. Según Cepeda y Arenas (2010), a continuación, detallado:

- Se introduce la muestra en una membrana, la que será sellada con el fin de que no exista ningún tipo de filtración interna en la muestra de agua externa o en la cámara.
- Se realiza el montaje del equipo, asegurándose de ubicar todos los pernos de sujeción de forma adecuada para evitar que existan fugas de agua al momento del ensayo, el procedimiento del montaje del equipo se muestra a detalle en la sección de anexos 16.

Figura 15.

Montaje Final del Equipo



Nota. Se presenta el montaje final del equipo, completamente nivelado y listo para ensayar. Elaborado por: Los autores.

- Una vez que el equipo se encuentra completamente montado y ensamblado, se revisa que se encuentre totalmente nivelado para evitar que se obtengan datos erróneos al correr el programa.
- Se llena el tanque que provee de agua al equipo de “Columna Resonante y Cortante Torsional Cíclico”, una vez lleno, se procede a desairar esta agua mediante una bomba de vacío. Una vez que se haya extraído el aire, se procede a llenar de agua la cámara interna de la muestra.
- Antes de iniciar el programa en el ordenador, se aplica presión de aire de forma manual dentro del equipo, precisamente 100 psi, esto con la finalidad de mantener una presión inicial en el equipo.
- Para el caso de las muestras que se encuentren por encima del nivel freático, se procede a inicializar el programa sin saturar la muestra, esto debido a que representa

condiciones representativas del campo; sin embargo, para las muestras bajo el nivel freático, se debe saturar, se puede afirmar que una muestra ha alcanzado la saturación cuando el resultado de la ecuación [1] es 1 o se encuentra en el rango de 0.95 a 1. Siendo el parámetro de Skempton.

$$\bar{B} = \frac{\mu_f - \mu_o}{\sigma_f - \sigma_o} \quad [1]$$

Dónde:

\bar{B} : Parámetro B de Skempton

μ_f : Presión de Poro Final

μ_o : Presión de Poro Inicial

σ_f : Presión de Cámara Final

σ_o : Presión de Cámara Inicial

- Para obtener los datos de presión de cámara y presión de poro, se va agregando presión de cámara y contrapresión en el programa, dejando pasar intervalos de tiempo hasta que la muestra se estabilice. Los intervalos se dan de 50 en 50 kPa, manteniendo siempre un diferencial de 20 kPa entre Presión de Cámara y Contrapresión.
- Se procede a consolidar o confinar la muestra, de modo que represente las condiciones del terreno en estado natural, dependiendo de las características de la muestra, se obtiene el esfuerzo confinante promedio antes ya calculado que será ingresado en el programa.
- Consolidación: este proceso permite que la muestra encuentre un punto de equilibrio bajo efectos de consolidación, se adquiere la medida del cambio de altura y volumen de la muestra mediante la aplicación de una carga confinante. El tiempo de

consolidación será de 24 horas para todas las muestras o el necesario para que finalice la consolidación primaria

3.4.5.1.2 Ensayo de Columna Resonante

- Se inicia con el proceso de Columna Resonante (RC), en el que se puede configurar el programa de modo que los datos obtenidos sean exactos medidos en aceleración como también en rotación angular. Se realizan barridos de frecuencia sobre la muestra, para saber cuál es su frecuencia natural, en este punto se pueden ingresar datos como:
 - Frecuencia Inicial, medida en Hz
 - Frecuencia Final, medida en Hz
 - Duración del Barrido, medido en segundos.
 - Amplitud de Onda, medida en voltios.
 - Duración de Rampa, medido en porcentaje. Tiene por defecto un valor de 0 (%), esto asegura un barrido completo desde 0 hasta alcanzar el 100 %.
- El ensayo aplica una carga torsional pequeña, la cual produce deformaciones pequeñas en la muestra, obteniendo así, parámetros de frecuencia natural (Hz), deformación angular (%), amortiguamiento (%) y módulo de corte G (MPa).
- Se parte de la frecuencia natural, con la cual se aplica el método del ancho de banda para obtener dos frecuencias que van de f1 a f2 determinadas a partir de la frecuencia natural de la muestra donde se alcanzan los desplazamientos máximos. (Figura 16)
- El programa realiza el cálculo del amortiguamiento, así como la frecuencia natural, en base a la siguiente teoría. Según Paz, M, Leigh, W, (2004).

$$\xi = \frac{1}{2}(r_2 - r_1)$$

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega} = \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1}$$

$$\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega} = \frac{f_2 - f_1}{2f}$$

$$f = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

Donde:

ξ : Amortiguamiento

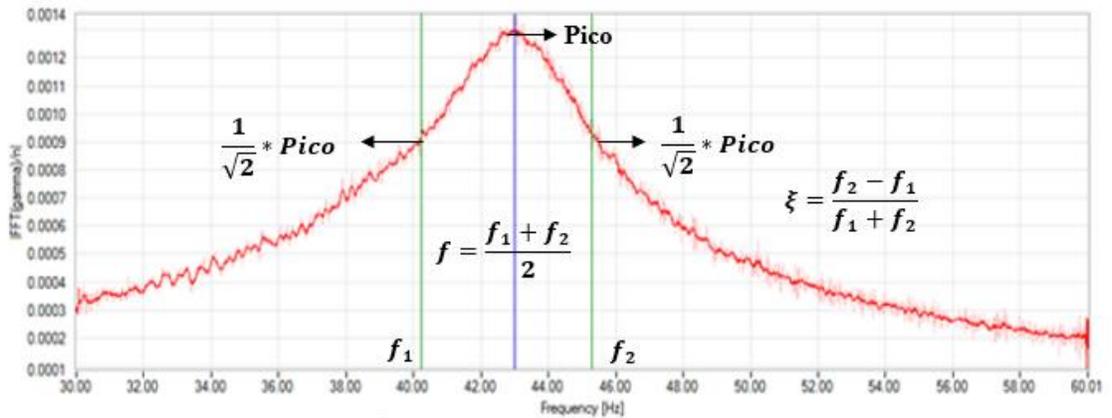
ω : Velocidad Angular

f : Frecuencia

r : Radio de Frecuencia

Figura 16.

Explicación Funcionamiento de Programa



Nota. Se presenta cómo se obtienen los valores en el programa del Ensayo de Columna Resonante. Elaborado por: Los autores.

- Para el cálculo del módulo de corte (G), en el ensayo de columna resonante utiliza la siguiente ecuación.

$$\frac{J_S}{J_m} = \frac{\omega_n L}{v_s} \tan\left(\frac{\omega_n L}{v_s}\right) = \alpha \tan \alpha$$

Donde:

J_s : Momento Polar de Inercia de la Masa del Espécimen de Suelo.

J_m : Momento Polar de Inercia de la Masa de los Accesorios con Masa m .

G : Módulo de Corte.

v_s : Velocidad de ondas de corte

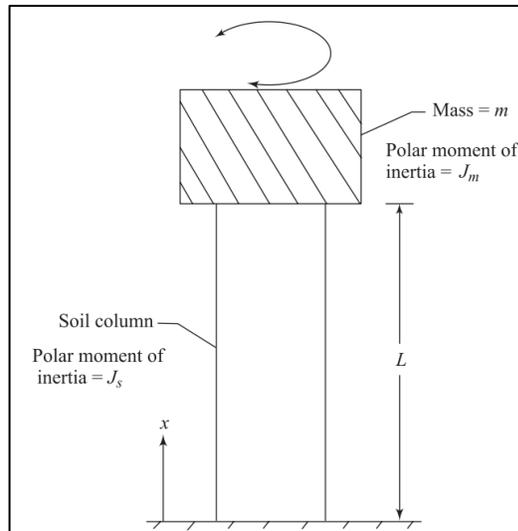
ω_n : Frecuencia Circular Natural.

L : Longitud del Espécimen.

f_n : Frecuencia Natural.

Figura 17.

Ilustración para la obtención de las expresiones de v_s y G en el programa de Columna Resonante



Nota. Se muestra la explicación grafica para el cálculo del módulo (G) en el programa.

Fuente: Braja M. Das & G. Ramana (2011).

$$v_s = \frac{\omega_n L}{\alpha} = \frac{2\pi f_n L}{\alpha}$$

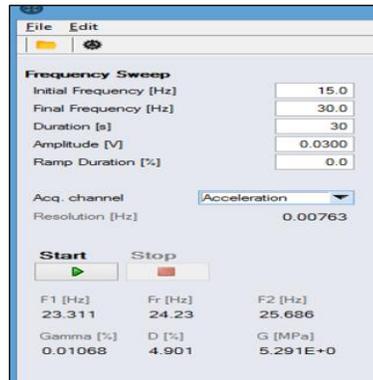
$$G = \rho v_s^2$$

Donde:

ρ : Densidad Del suelo

Figura 18.

Configuración Ensayo de Columna Resonante (RC)

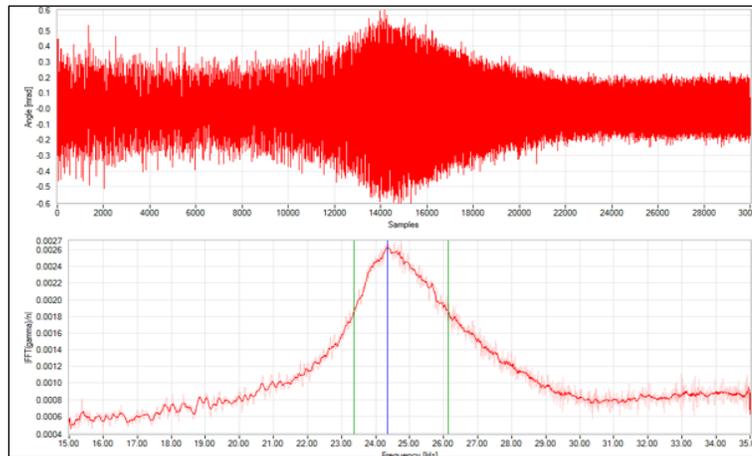


Nota. Se muestra el panel de configuración para el Ensayo de Columna Resonante.

Elaborado por: Los autores.

Figura 19.

Gráfica Tipo Ensayo de Columna Resonante (RC)



Nota. Se muestra gráfica tipo del Ensayo de Columna Resonante. Elaborado por: Los autores.

3.4.5.1.3 Ensayo de Corte Torsional Cíclico

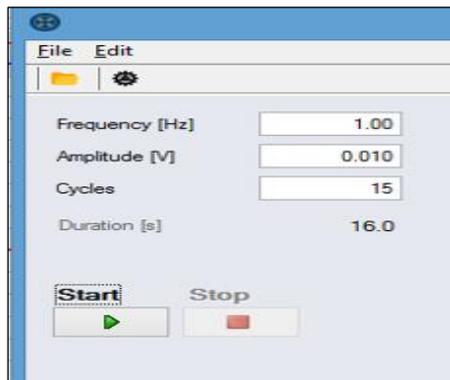
- Al iniciar el ensayo de Corte Torsional Cíclico (TS), de igual forma que en el ensayo de Columna Resonante, se deberá ingresar algunos parámetros para una correcta toma

de datos, tales como: Frecuencia de excitación en Hz, Amplitud de onda medida en Voltios y Número de Ciclos.

- La frecuencia ingresada, será de 1 Hz, esto debido a que, para simular condiciones de sismo, se utiliza generalmente este valor.
- La amplitud de onda deberá variar en distintos intervalos ingresados por el usuario, empezando desde valores de amplitud muy bajos, y continuando con un aumento controlado hasta que la muestra falle. La muestra fallará cuándo su resistencia sea muy baja y no soporte la carga torsional aplicada, todos estos valores serán registrados e ingresados en una tabla, de modo que se pueda obtener la gráfica de $G/G_{\text{máx}}$.
- Los ciclos requeridos serán ingresados por el usuario, y dependiendo de estos ciclos, el programa ajustará una determinada duración para que el ensayo de por concluido.

Figura 20.

Configuración Ensayo de Corte Torsional Cíclico (TS)



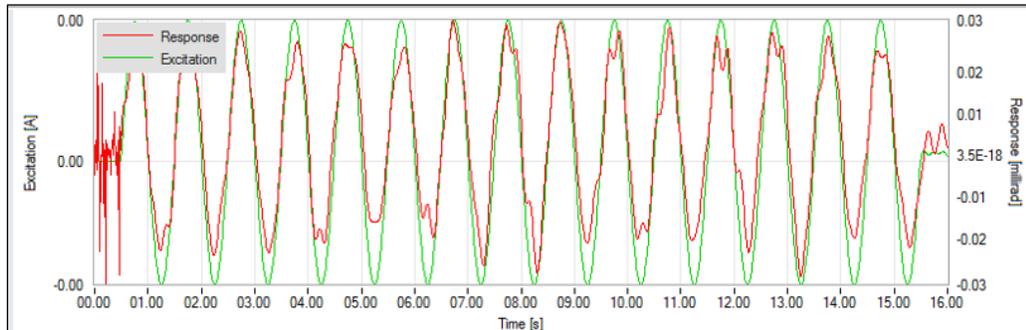
Nota. Se muestra el panel de configuración para el Ensayo de Corte Torsional Cíclico.

Elaborado por: Los autores.

- Una vez concluido el corrido del programa, se obtendrán valores para deformación (%), G_{max} (MPa) y amortiguamiento (%). Todos estos valores deberán ser registrados.

Figura 21.

Gráfica Tipo Ensayo de Corte Torsional Cíclico (TS)

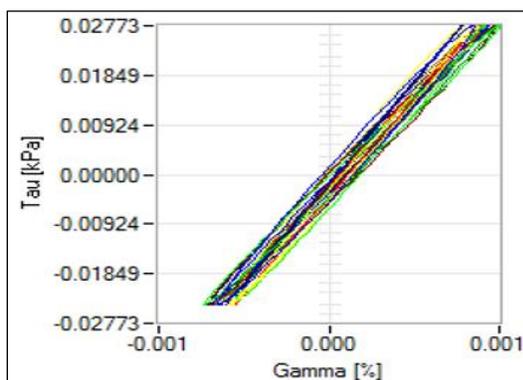


Nota. Se muestra gráfica tipo del Ensayo de Corte Torsional Cíclico (TS). Elaborado por: Los autores.

- El programa aplica torsión sobre la muestra, de forma que se obtiene un espectro de respuesta dado por la excitación de la muestra, en la cual refleja en qué ciclo la muestra ya falló o está próxima a fallar; mientras más amplitud se ingrese, la resistencia del suelo deberá bajar y el amortiguamiento será más grande por su mayor energía disipada.
- El Ensayo de Corte Torsional Cíclico, permite además obtener una gráfica que relaciona el esfuerzo y la deformación:

Figura 22.

Gráfica Esfuerzo de Corte τ (kPa) vs Deformación Angular γ (%)



Nota. Se muestra gráfica Esfuerzo vs Deformación (TS), Elaborado por: Los autores.

- Para el cálculo del Módulo de Corte G , se determina la pendiente de la línea esfuerzo de corte vs deformación angular y el amortiguamiento se calcula a partir del área bajo la curva del lazo de histéresis.

En base a lo expuesto, el presente ensayo se realizará en los estratos de suelo, ubicados hasta 10 metros de profundidad del “Bloque G” de la Universidad Politécnica Salesiana, luego de obtenidas las probetas con las muestras, se realiza un esquema de ensayos para la ejecución del proyecto. Según Muñoz (2017), “El programa de ensayos para realizar el proyecto es: Ensayos de Caracterización de Muestras de Suelos, Granulometría, Límites de Atterberg, Humedad, Peso Unitario, Columna Resonante, Corte Torsional Cíclico” (p. 113). Estos ensayos son fundamentales para conocer a detalle cuales son las características del suelo utilizado.

3.4.6. Módulos de Corte en Estratos de Suelo

Mediante el ensayo de “Columna Resonante y Corte Torsional Cíclico”, se puede obtener los módulos de corte del estrato de suelo analizado, además de medir características de rigidez y amortiguamiento del suelo. Según Cepeda y Arenas (2010):

Para su realización se siguen una serie de pasos, a continuación, detallados:

- Se confina la muestra lateralmente, la cual es aplicada por un sistema neumático (aire).
- Se restringe lateralmente a la muestra con una membrana de caucho para aplicar el esfuerzo confinante.
- Se aplica un esfuerzo torsional en la cabeza de la muestra, el cuál inducirá esfuerzos cortantes en planos horizontales, utilizando un ordenador controlado por un sistema neumático.
- Se impone además una rotación controlada de esfuerzos mientras la muestra está sometida a tensión cortante. (p.72)

Una vez que se obtengan los respectivos parámetros de la muestra ensayada en laboratorio, se puede obtener las gráficas necesarias mediante software.

3.4.7. Gráficas Amortiguamiento-Módulo G vs Deformación

Se deben seguir algunos procedimientos mediante ensayos para la determinación de las gráficas de módulo G y amortiguamiento vs deformación en los diferentes estratos que conforman el perfil litológico. Según Murcia y Perdomo (2012), “La respuesta que presenta un suelo frente a las deformaciones se puede obtener en un diagrama de tensión-deformación, en donde se definen los módulos de corte” (p.10). Una vez obtenidas estas gráficas, serán comparadas con estudios de la literatura.

3.4.8. Ecuaciones para Cálculo de G/Gmax y Amortiguamiento

Para arcillas, se procede al cálculo de los parámetros G/Gmax y Amortiguamiento, para lo cual se siguen las ecuaciones planteadas por Taboada et. al, (2017). Las cuales se detallan con mayor precisión en la sección de Anexo 25.

Según Darendeli (2001), mencionado en Taboada et. al, (2017):

$$\left(\frac{G}{G_{max}}\right) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^\alpha}$$

$$\alpha = 0.0025 * IP + 1.08$$

$$\gamma_r = \alpha * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a}\right)^k + c$$

$$k = 0.6903 * e^{-0.005*IP}$$

$$c = 0.0006 * e^{(0.072*IP)} \text{ para } IP \leq 45$$

Donde:

G/G_{max} : Módulo de Esfuerzo Cortante

γ : Deformación angular

γ_r : Deformación Cortante de Referencia

α : Parámetro de Curvatura

IP : Índice de Plasticidad

σ'_m : Esfuerzo Confinante Promedio

p_a : Presión Atmosférica

k : Parámetro Plástico

c : Parámetro Plástico

$$D = (D_{max} - D_{min}) * \left[1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_{rD}}\right)^{\alpha_D}} \right] + D_{min}$$

$$(D_{max} - D_{min}) = (-0.008 * IP + 0.334) * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a}\right) + 13.5$$

$$\alpha_D = 0.0025 * IP + 1.08$$

$$\gamma_{rD} = \alpha_D * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^{k_D} + c_D$$

$$k_D = 1.14 * e^{0.0013 * IP}$$

$$c_D = 0.0027 * IP - 0.0609$$

$$D_{\min} = (-0.246) * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right) + 2.75$$

Para arenas, se procede al cálculo de los parámetros G/Gmax y Amortiguamiento, para lo cual se siguen las ecuaciones planteadas por Taboada, et al., (2017). Las cuales se detallan con mayor precisión en la sección de Anexo 25.

Según Darendeli (2001), mencionado en Taboada et. al, (2017):

$$\left(\frac{G}{G_{max}} \right) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^\alpha}$$

$$\gamma_r = 0.0156 * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right) + 0.0277$$

$$\alpha = 1.08$$

Dónde:

G/Gmax: Módulo de Esfuerzo Cortante

γ : Deformación angular

γ_r : Deformación Cortante de Referencia

α : Parámetro de Curvatura

σ'_m = Esfuerzo Confinante Promedio

P_a = Presión Atmosférica

$$D = (D_{max} - D_{min}) * \left[1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_{rD}} \right)^{\alpha_D}} \right] + D_{min}$$

$$\alpha_D = 1.85$$

$$\gamma_{rD} = 0.0393 * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right) + 0.0346$$

$$D_{min} = 1.3492 * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^{-0.262}$$

$$D_{max} - D_{min} = -0.3221 * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right) + 16$$

Dónde:

γ_{rD} : Esfuerzo Cortante de Referencia de Amortiguamiento

α_D : Parámetro de Curvatura de Amortiguamiento

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Caracterización de Muestras

Se realizan diferentes ensayos de campo con el fin de obtener muestras representativas alteradas e inalteradas del sitio, tales como, la profundidad de cada estrato, tipo de muestra, números de golpes del SPT, clasificación SUCS, descripción del tipo de suelo, identificación de muestras. Se presenta un resumen de resultados, pero en anexos, se muestra a detalle los cálculos y resultados de cada ensayo. El nivel freático del pozo de perforación se encuentra a 5.6 metros, medido desde la superficie del terreno.

Tabla 6.

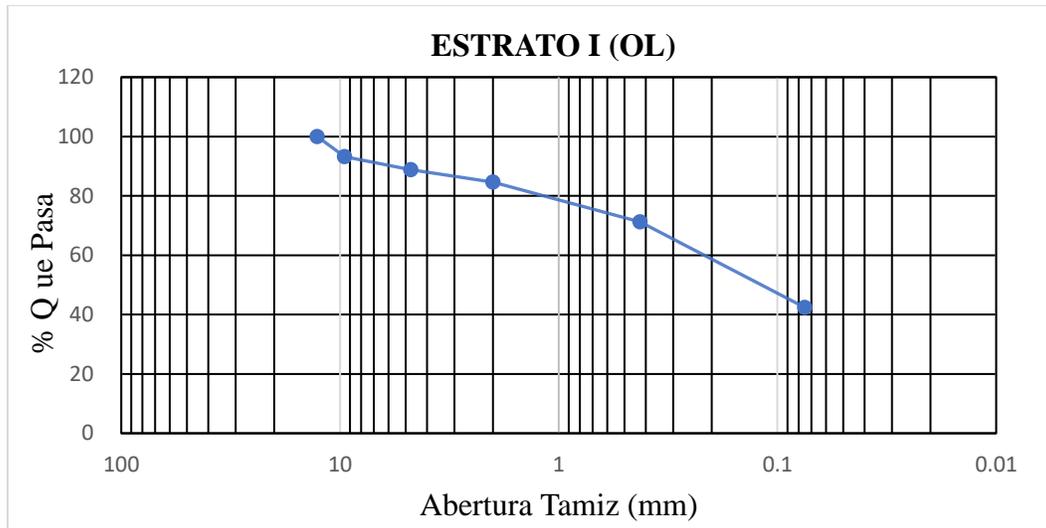
Tabla de Resultados

N	PROF (m)	TIPO DE MUESTRA	"N" SPT	SUCS	DESCRIPCIÓN	GRANULOMETRÍA				LÍMITES		W (%)
						G (%)	S (%)	F (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	
I	0.00-0.50	*	9	OL	Arcilla organica, presencia de capa vegetal y residuos, de baja plasticidad, de color café oscuro, humeda.	11.18	46.41	42.41	30.76	21.39	9.36	15.7
	0.50-1.55	SPT										
	1.55-2.20	SH										
II	2.20-2.55	*	12	CL	Arcilla de baja plasticidad, de color café oscuro, humeda.	2.51	47.17	50.32	39.88	21.86	18.02	25.96
	2.55-3.00	SPT										
	3.00-3.50	SH										
III	3.50-4.00	*	24	ML-CL	Arcilla con limo de baja plasticidad, con presencia de gravilla, color café claro.	4.53	44.79	50.58	24.24	17.35	6.89	21.18
	4.00-4.50	SPT										
	4.50-5.00	SH										
IV	5.00-6.00	SPT	68	CL	Arcilla de baja plasticidad, color café claro, muy humeda.	8.39	29.17	62.41	28.74	20.37	8.37	26.14
	N.F.=5.60m											
V	8.00-8.50	SPT	66	SM	Arena limosa de baja plasticidad, color café claro, muy humeda con restos de oxidación	2.84	50.28	46.88	23.81	20.59	3.22	26.89
	8.50-9.00	SH										
VI	9.00-9.50	SPT	71	SM	Arena Limosa de baja plasticidad, color café claro muy humeda.	10.21	50.28	32.04	24.63	20.71	3.92	31.99
	9.50-10.00	SH										

Nota. Se presentan los resultados de Ensayo (SPT), Contenido de humedad (W%), análisis granulométrico, límites de Atterberg y clasificación SUCS. Cabe mencionar que no se realizó la toma de muestra de 6 a 8 m de profundidad por inconvenientes en la perforación. (*) Limpieza con barreno, (SPT) Ensayo SPT, (SH) Muestra de Shelby, (N.F.) Nivel Freático. Elaborado por: Los autores.

Figura 23.

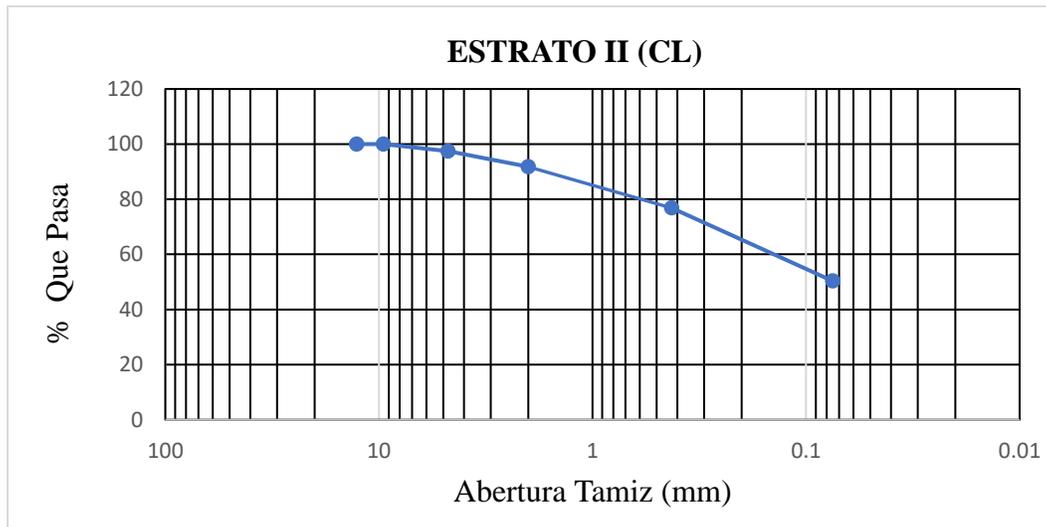
Curva Granulométrica de Estrato I



Nota. Se presenta la curva granulométrica para el estrato I, los cálculos se detallan en la sección de anexos. Elaborado por: Los autores.

Figura 24.

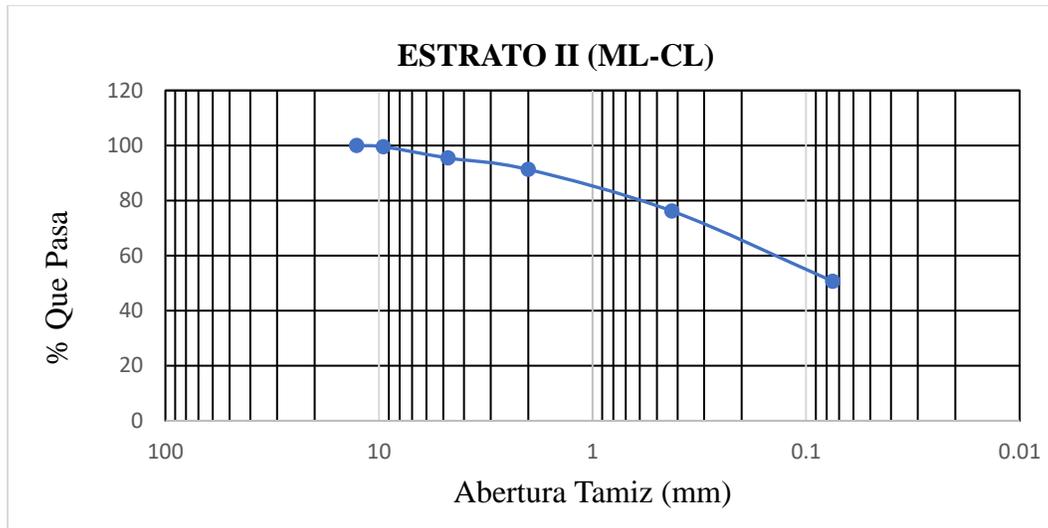
Curva Granulométrica de Estrato II



Nota. Se presenta la curva granulométrica para el estrato II, los cálculos se detallan en la sección de anexos. Elaborado por: Los autores.

Figura 25.

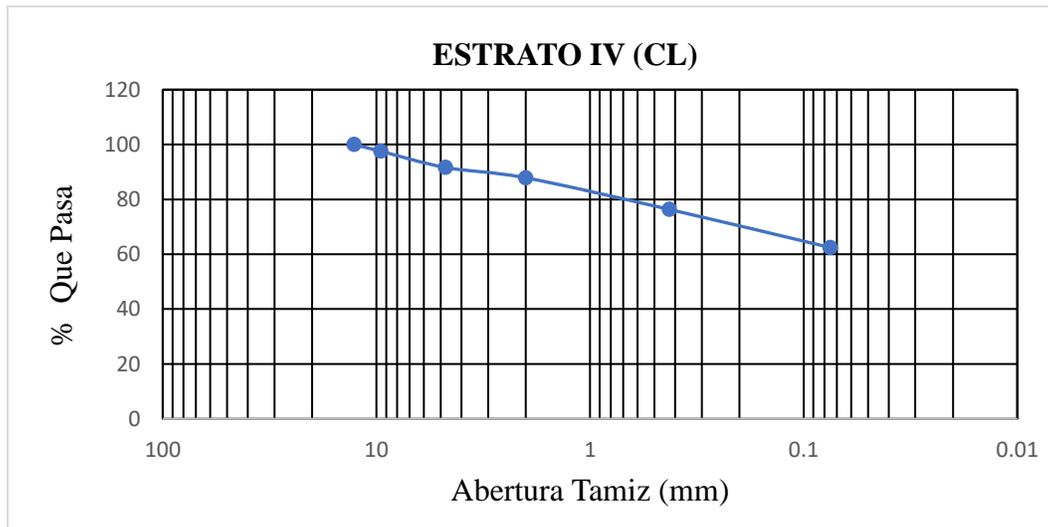
Curva Granulométrica de Estrato III



Nota. Se presenta la curva granulométrica para el estrato III, los cálculos se detallan en la sección de anexos. Elaborado por: Los autores.

Figura 26.

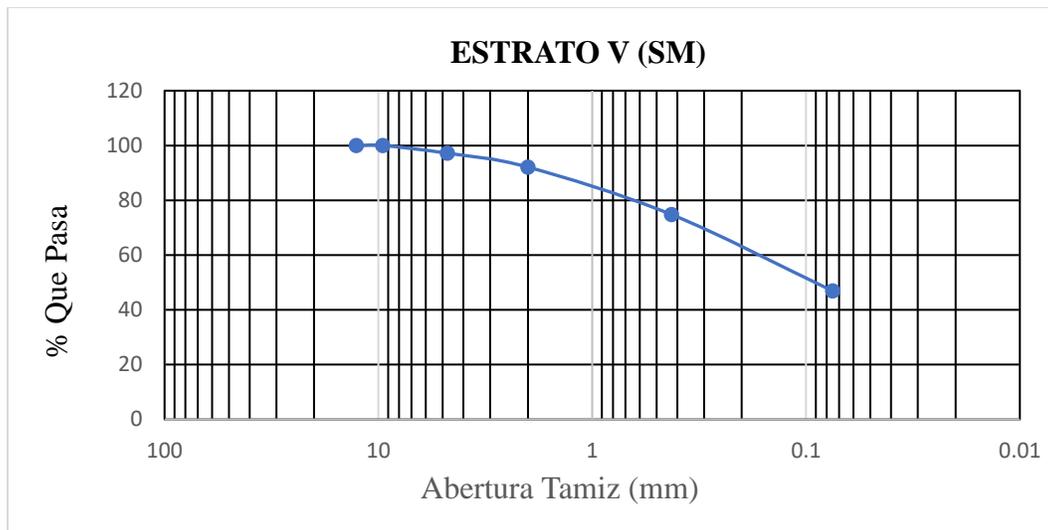
Curva Granulométrica de Estrato IV



Nota. Se presenta la curva granulométrica para el estrato IV, los cálculos se detallan en la sección de anexos. Elaborado por: Los autores.

Figura 27.

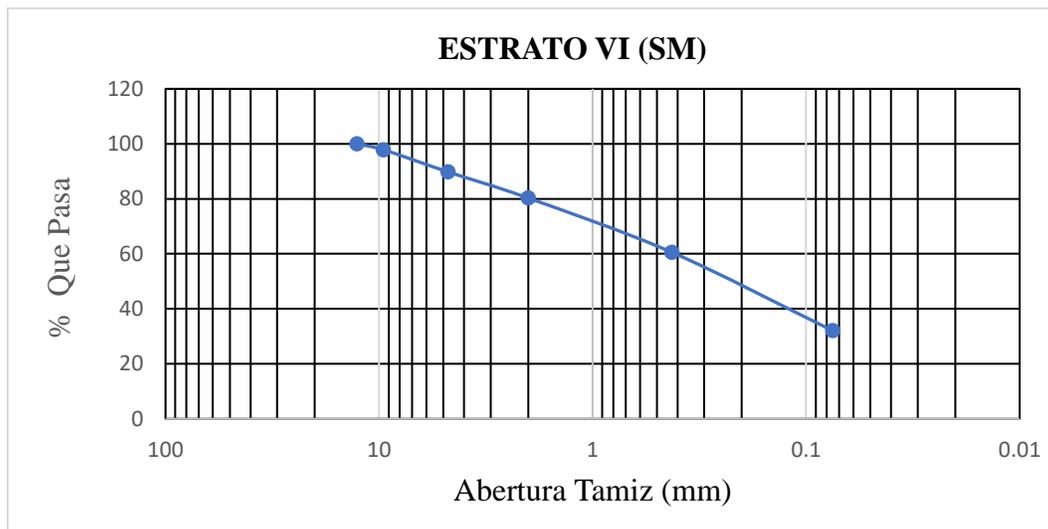
Curva Granulométrica de Estrato V



Nota. Se presenta la curva granulométrica para el estrato V, los cálculos se detallan en la sección de anexos. Elaborado por: Los autores.

Figura 28.

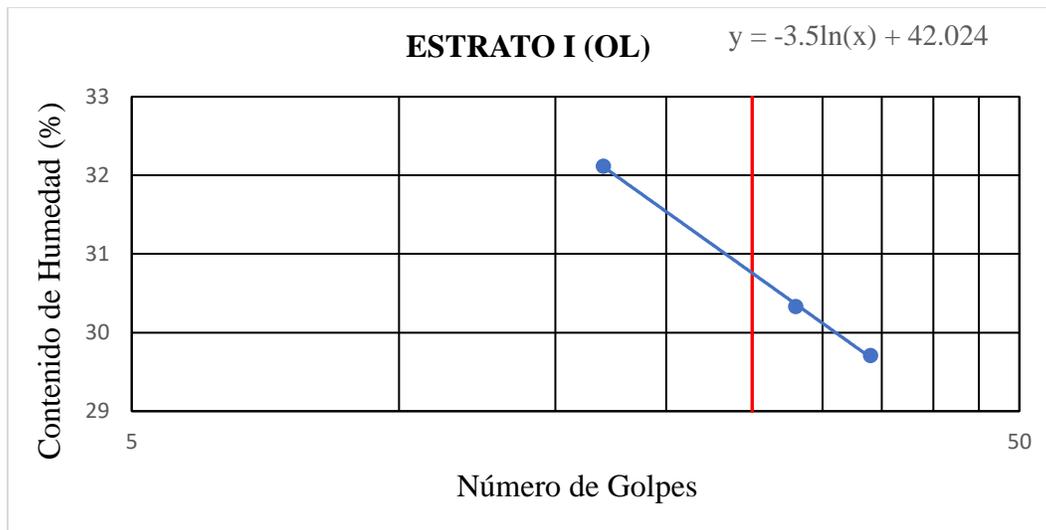
Curva Granulométrica de Estrato VI



Nota. Se presenta la curva granulométrica para el estrato V, los cálculos se detallan en la sección de anexos. Elaborado por: Los autores.

Figura 29.

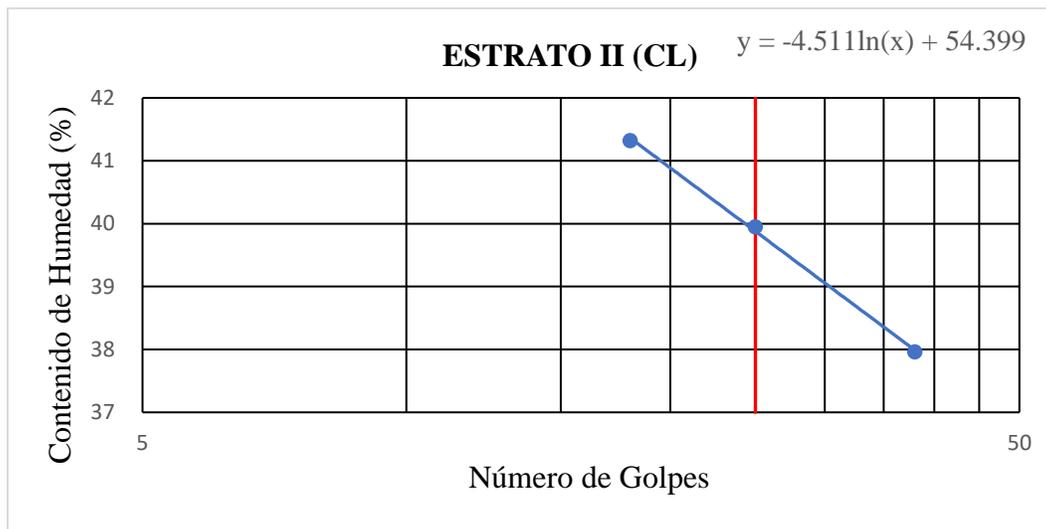
Gráfica Límite Líquido de Estrato I



Nota. Se presenta la gráfica de Límite Líquido para el estrato I, los cálculos se detallan en la sección de anexos. Elaborado por: Los autores.

Figura 30.

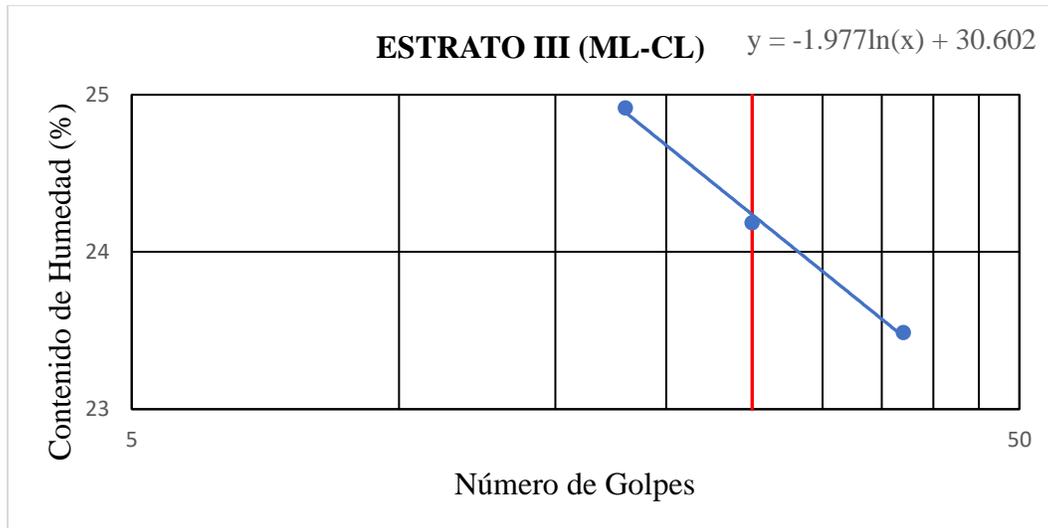
Gráfica Límite Líquido de Estrato II



Nota. Se presenta la gráfica de Límite Líquido para el estrato II, los cálculos se detallan en la sección de anexos. Elaborado por: Los autores.

Figura 31.

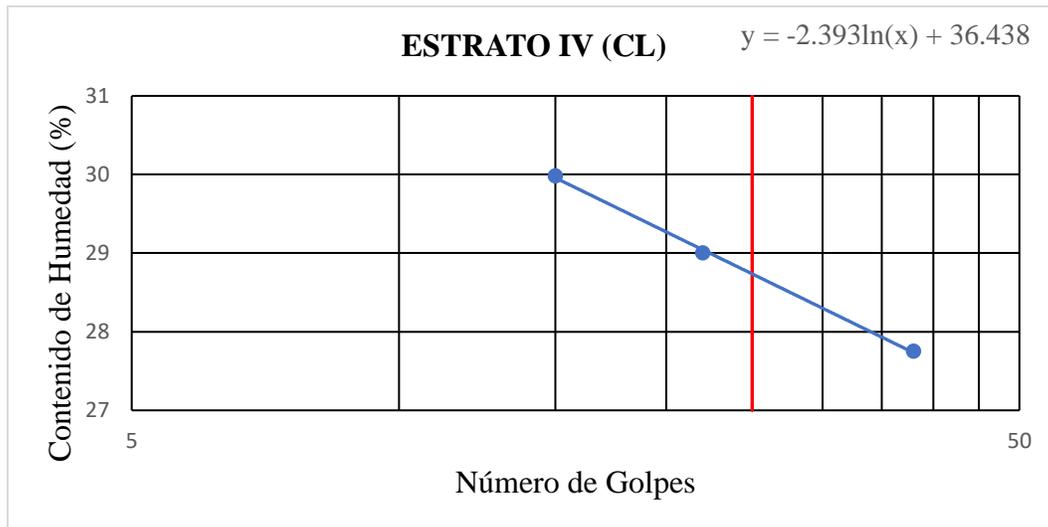
Gráfica Límite Líquido de Estrato III



Nota. Se presenta la gráfica de Límite Líquido para el estrato III, los cálculos se detallan en la sección de anexos. Elaborado por: Los autores.

Figura 32.

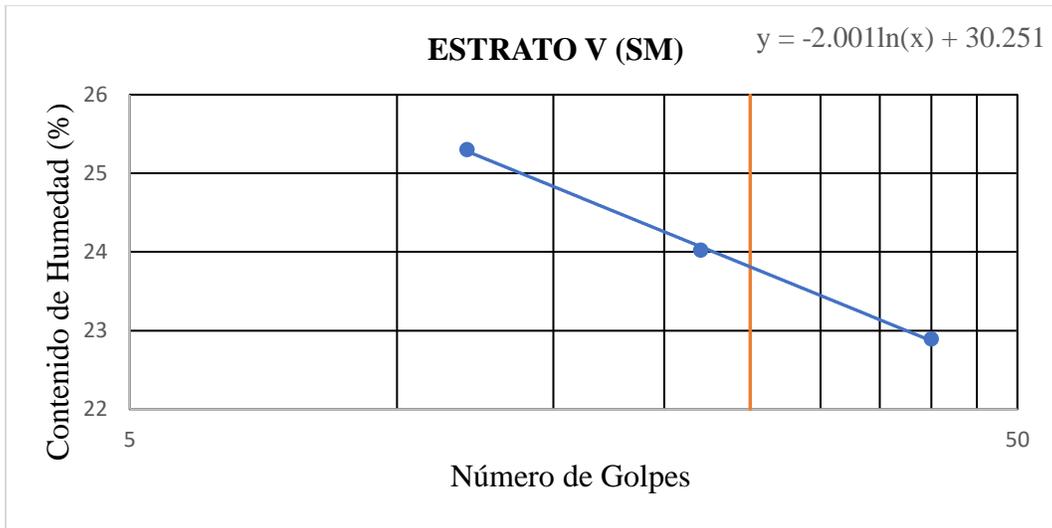
Gráfica Límite Líquido de Estrato IV



Nota. Se presenta la gráfica de Límite Líquido para el estrato IV, los cálculos se detallan en la sección de anexos. Elaborado por: Los autores.

Figura 33.

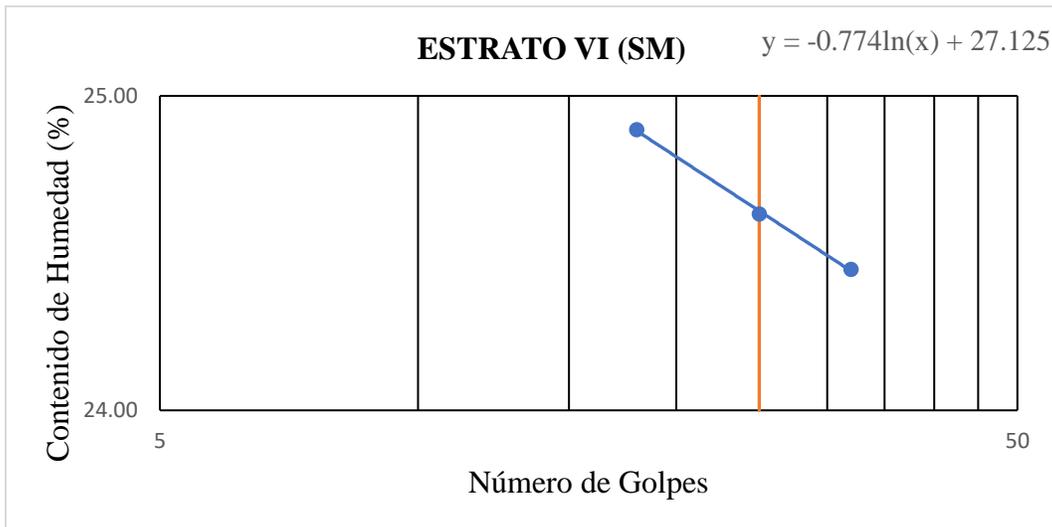
Gráfica Límite Líquido de Estrato V



Nota. Se presenta la gráfica de Límite Líquido para el estrato V, los cálculos se detallan en la sección de anexos. Elaborado por: Los autores.

Figura 34.

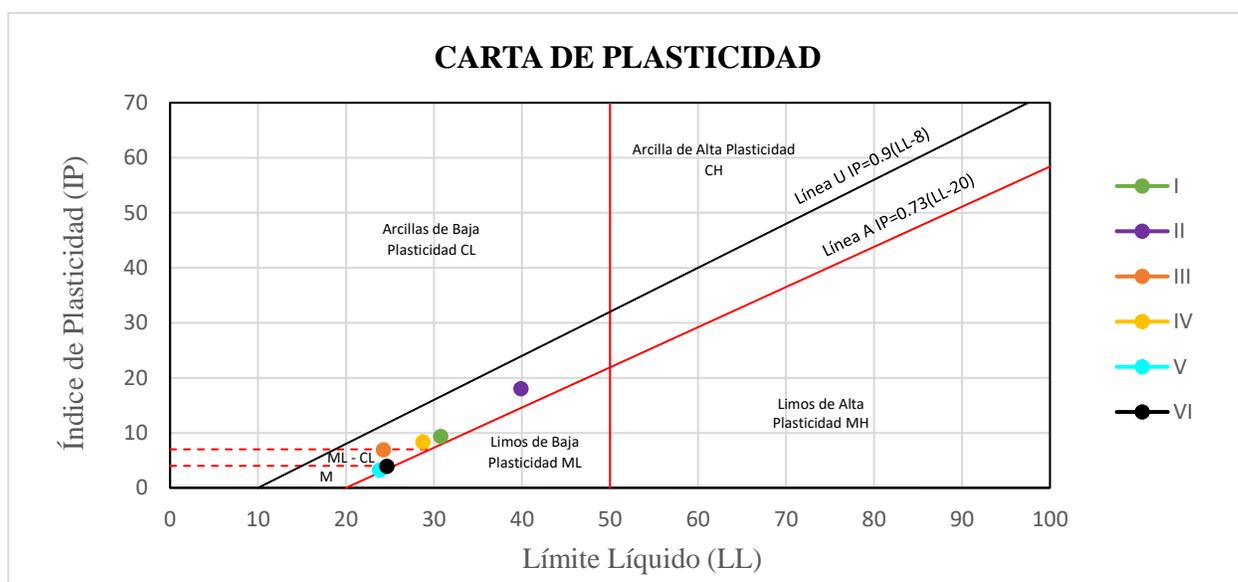
Gráfica Límite Líquido de Estrato VI



Nota. Se presenta la gráfica de Límite Líquido para el estrato VI, los cálculos se detallan en la sección de anexos. Elaborado por: Los autores.

Figura 35.

Carta de Plasticidad General



Nota. Se presenta la carta de plasticidad general para todos los estratos, los cálculos se detallan en la sección de anexos. Elaborado por: Los autores.

4.2. Caracterización dinámica del suelo

Tabla 7.

Resultados de Cálculo de Esfuerzo Confinante Promedio

N	PROF (m)	SUCS	N1	PARÁMETROS						RESULTADOS					Esfuerzo Confinante Promedio (kPa)
				ϕ	IP (%)	Ko	h1 (m)	h (cm)	D (mm)	W (g)	Ym (kgf/m ³)	Ysum (kgf/m ³)	σ_v (kgf/m ²)	σ_h (kgf/m ²)	
I	1,55 - 2,20	OL	9	-	9.36	0.48	2.20	10.25	49.85	328.47	1641.92	-	3612.22	1731.38	23.13
II	3,00 - 3,50	CL	12	-	18.02	0.52	3.50	10.05	50.10	371.20	1873.60	-	6047.90	3118.81	40.16
III	4,50 - 5,00	ML-CL	24	-	6.89	0.47	5.00	10.10	50.00	359.43	1812.44	-	8766.56	4110.97	55.53
V	8,50 - 9,00	SM	66	44.6	-	0.30	9.00	9.75	49.90	396.28	2078.29	1078.29	13815.84	4123.98	72.12
VI	9,50 - 10,00	SM	71	45.7	-	0.29	10.00	9.65	49.35	392.95	2128.85	1128.85	15116.61	4301.84	77.54

Nota. Se presenta un resumen del cálculo de Esfuerzo Confinante Promedio para cada estrato. Elaborado por: Los autores.

4.2.1 Resultados de Estrato I

Datos Estrato I

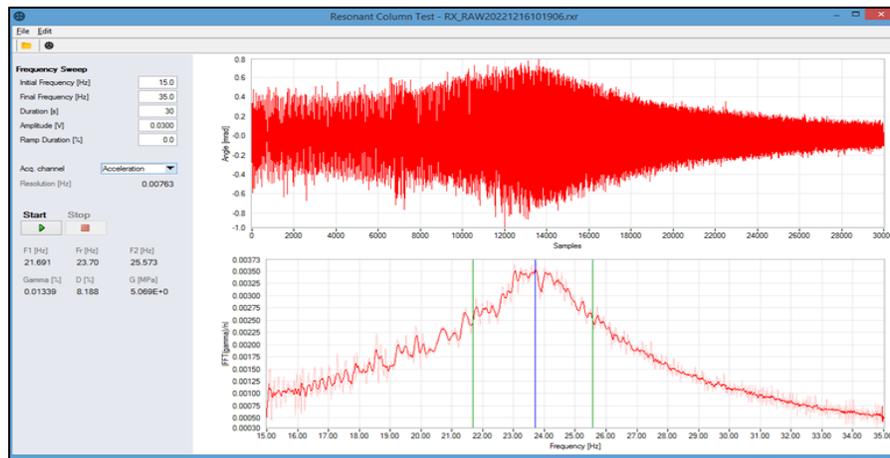
Localización: Cancha detrás del “Bloque G”, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campus Sur.

Fecha de Ensayo: 12/12/2022

Profundidad Muestra 1: 1.55 - 2.20 m

Figura 36.

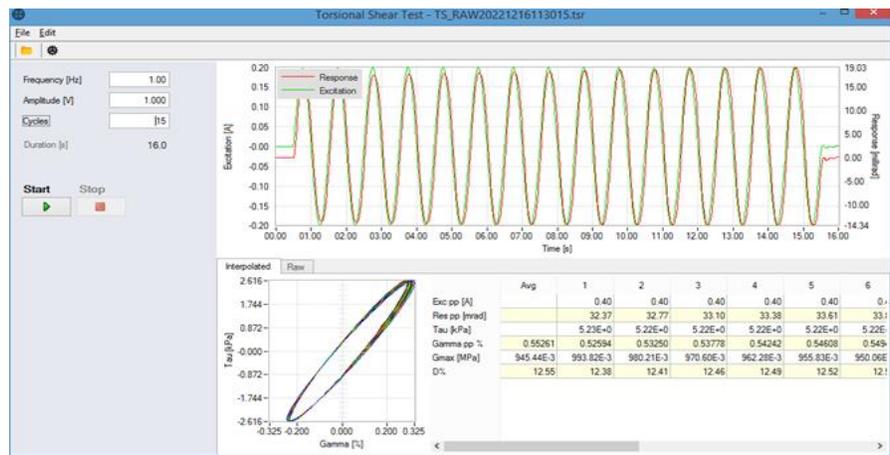
Gráfica de Ensayo Columna Resonante Estrato I



Nota. Se presenta el gráfico del programa de Columna Resonante. Elaborado por: Los autores.

Figura 37.

Gráfico de Ensayo Corte Torsional Cíclico Estrato I

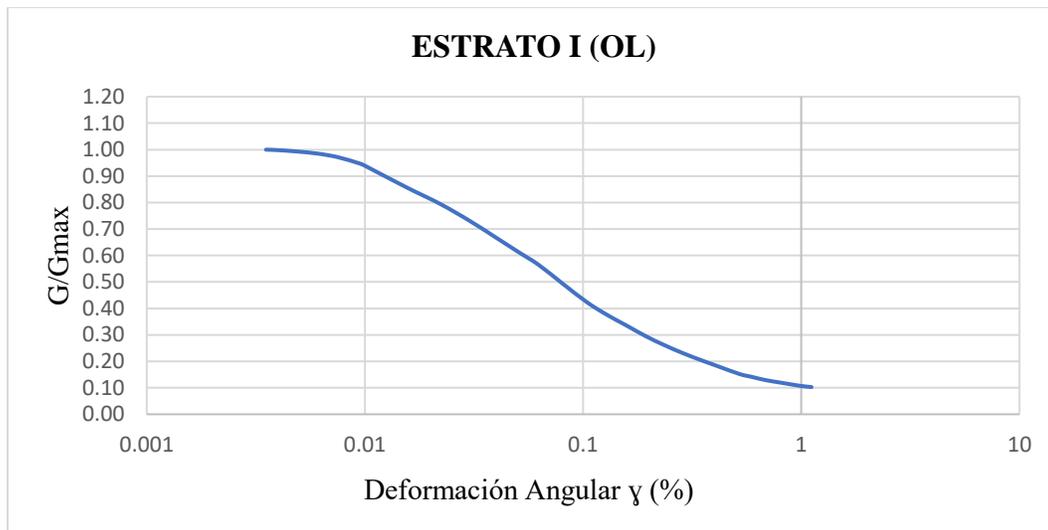


Nota. Se presenta gráfico representativo del programa de Corte Torsional Cíclico.

Elaborado por: Los autores.

Figura 38.

Gráfica Módulo de Corte G/G_{max} Estrato I

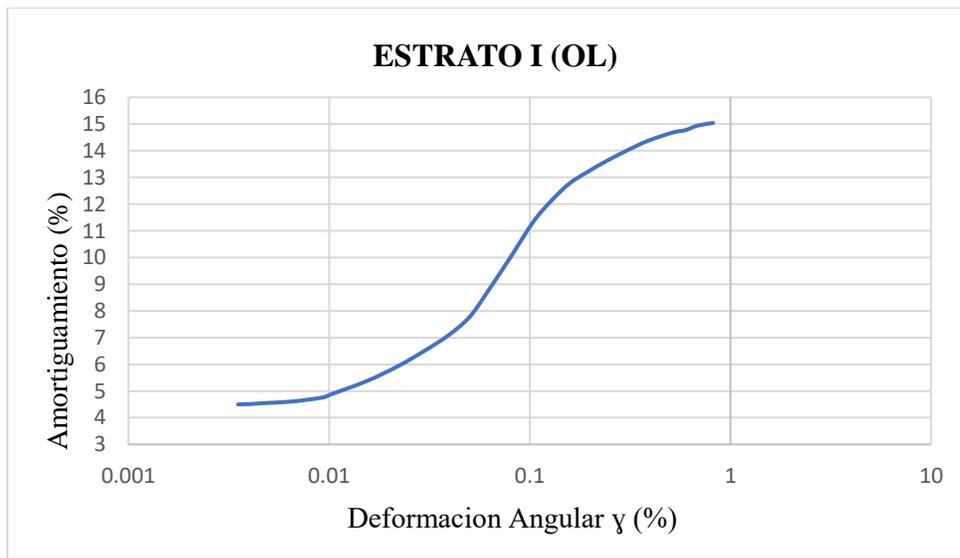


Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de

Corte vs Deformación Angular. Elaborado por: Los autores.

Figura 39.

Gráfica D vs γ Estrato I



Nota. Se presenta gráfica de Amortiguamiento vs Deformación Angular para el Estrato I

Elaborado por: Los autores.

4.2.2 Resultados de Estrato II

Datos Estrato II

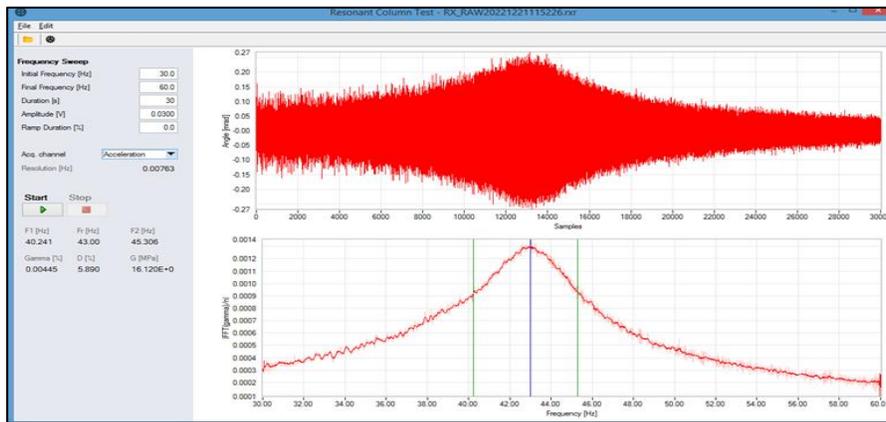
Localización: Cancha detrás del “Bloque G”, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campus Sur.

Fecha de Ensayo: 15/12/2022

Profundidad Muestra II: 3.00 - 3.50 m

Figura 40.

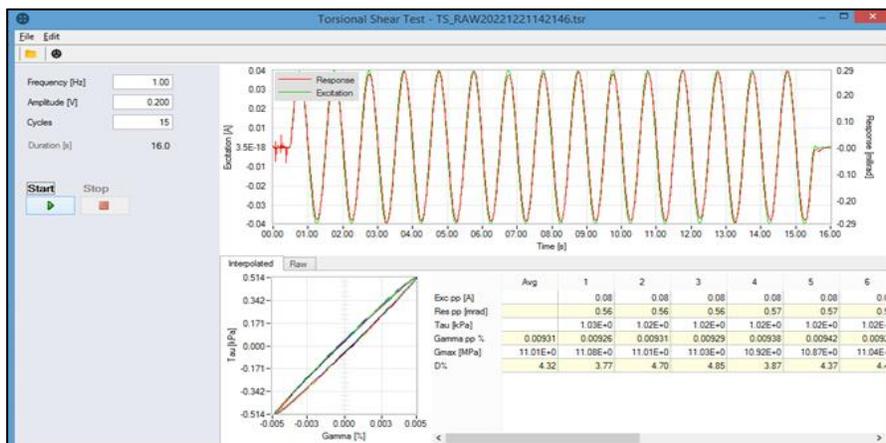
Gráfica de Ensayo Columna Resonante Estrato II



Nota. Se presenta el gráfico del programa de Columna Resonante. Elaborado por: Los autores.

Figura 41.

Gráfica de Ensayo Corte Torsional Cíclico Estrato II

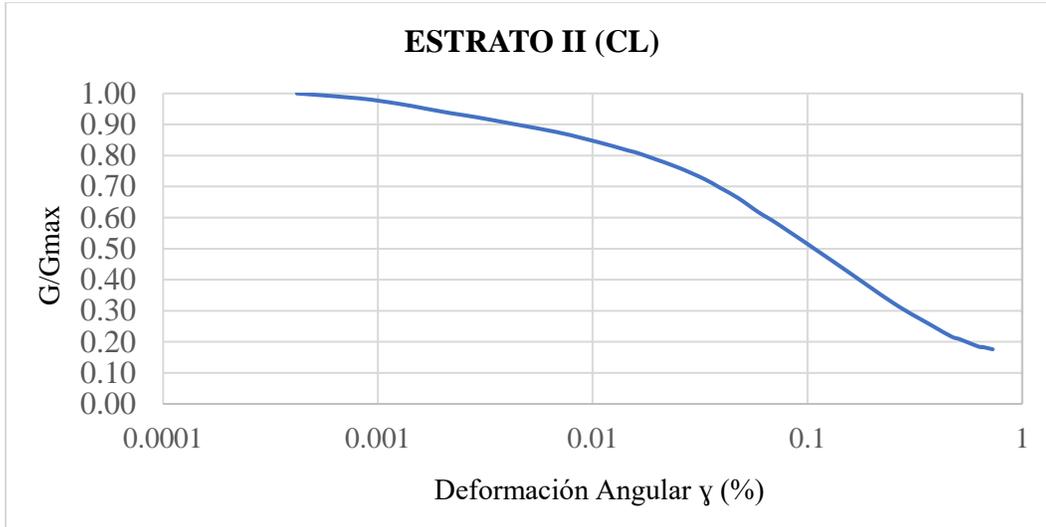


Nota. Se presenta gráfico representativo del programa de Corte Torsional Cíclico.

Elaborado por: Los autores.

Figura 42.

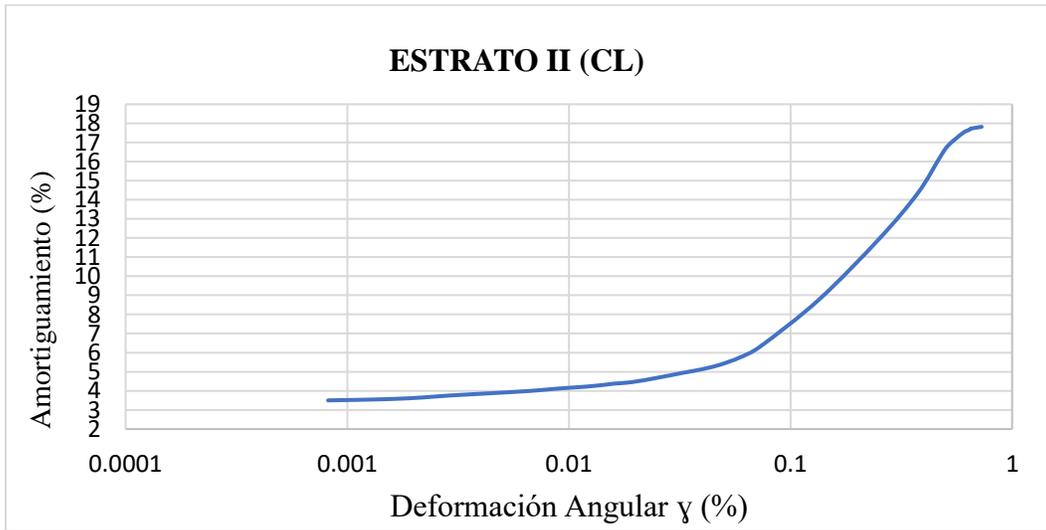
Gráfica Módulo de Corte G/G_{max} Estrato II



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación Angular. Elaborado por: Los autores.

Figura 43.

Gráfica D vs γ Estrato II



Nota. Se presenta gráfica de Amortiguamiento vs Deformación Angular para el Estrato II. Elaborado por: Los autores.

4.2.3 Resultados de Estrato III

Datos Estrato III

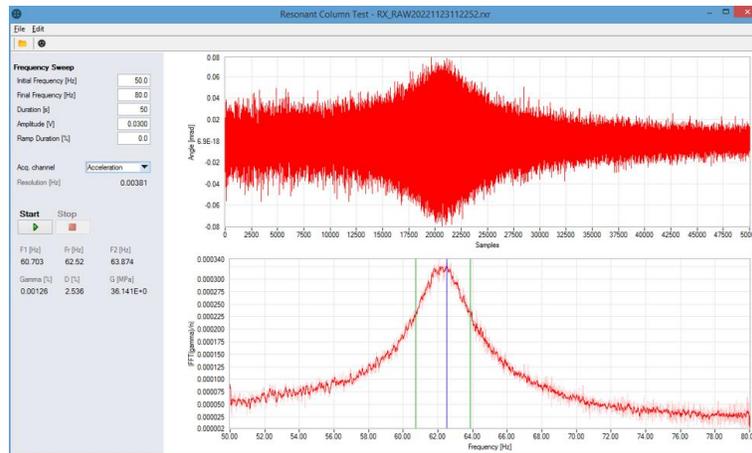
Localización: Cancha detrás del “Bloque G”, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campus Sur.

Fecha de Ensayo: 20/12/2022

Profundidad Muestra III: 4.50 - 5.00 m

Figura 44.

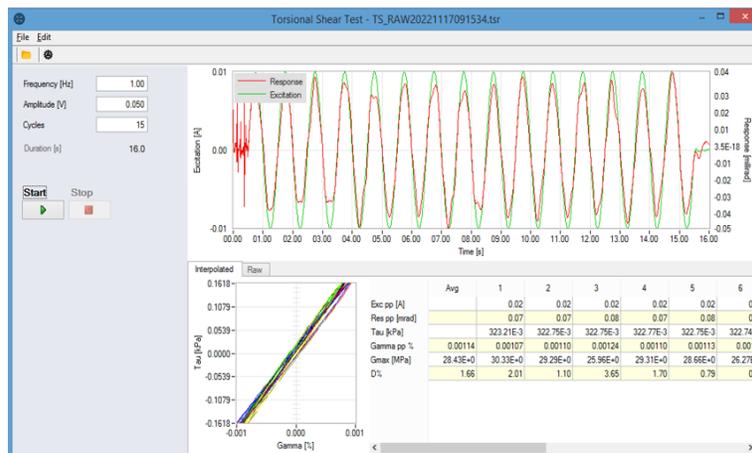
Gráfica de Ensayo Columna Resonante Estrato III



Nota. Se presenta el gráfico del programa de Columna Resonante. Elaborado por: Los autores.

Figura 45.

Gráfica de Ensayo Corte Torsional Cíclico Estrato III

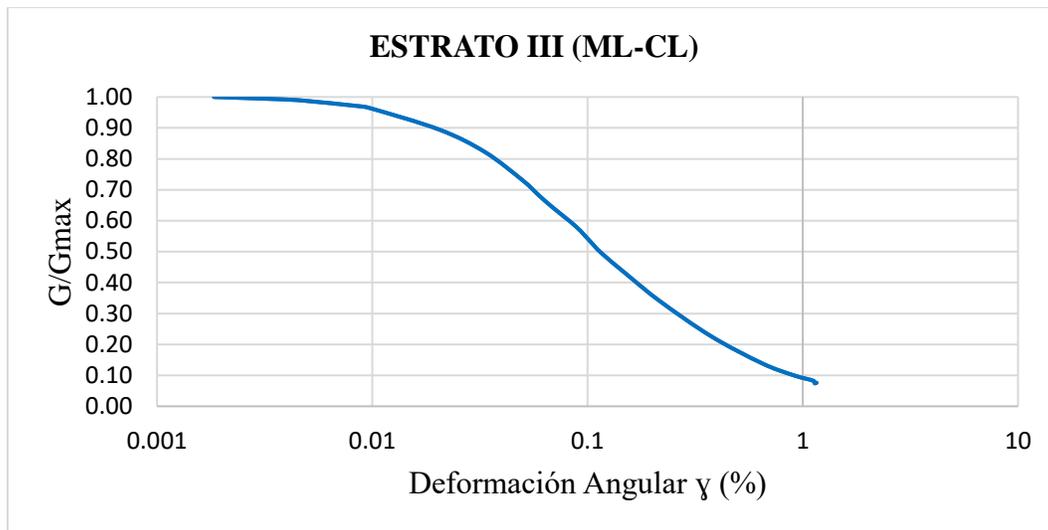


Nota. Se presenta gráfico representativo del programa de Corte Torsional Cíclico.

Elaborado por: Los autores.

Figura 46.

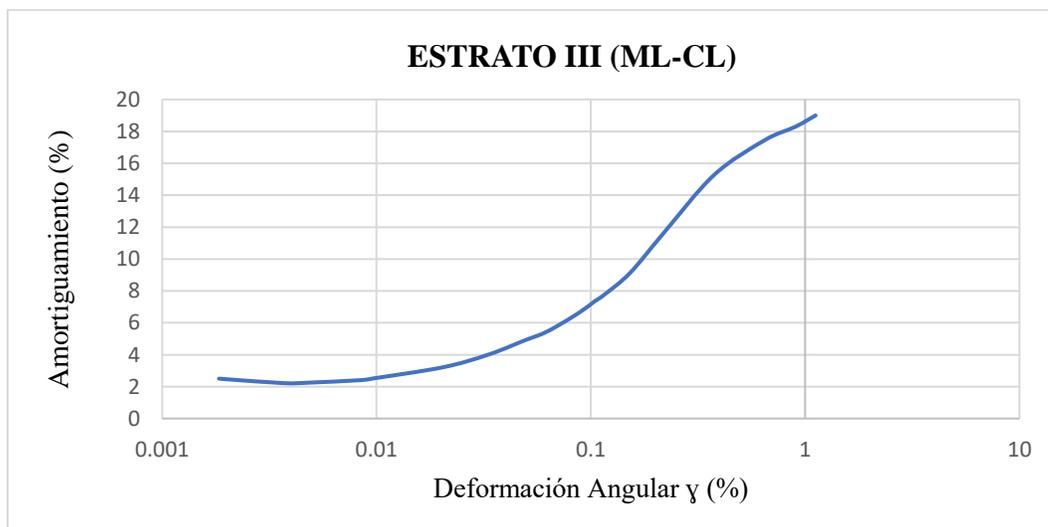
Gráfica Módulo de Corte G/G_{max} Estrato III



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación Angular. Elaborado por: Los autores.

Figura 47.

Gráfica D vs γ Estrato III



Nota. Se presenta gráfica de Amortiguamiento vs Deformación Angular para el Estrato III Elaborado por: Los autores.

4.2.4 Resultados de Estrato V

Datos Estrato V

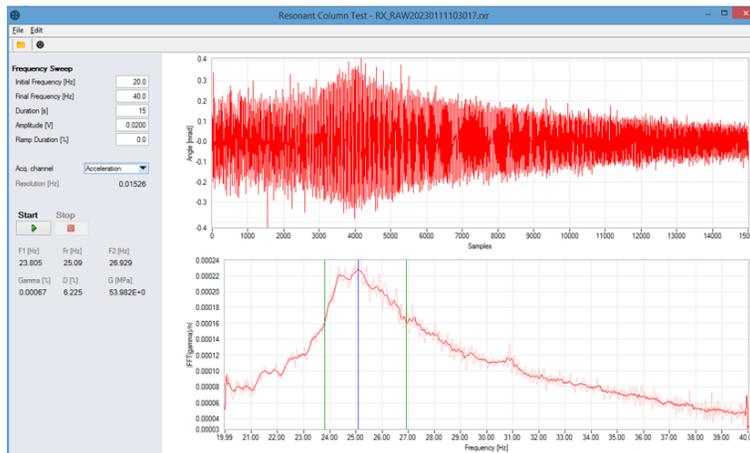
Localización: Cancha detrás del “Bloque G”, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campus Sur.

Fecha de Ensayo: 04/01/2023

Profundidad Muestra V: 8.50 – 9.00 m

Figura 48.

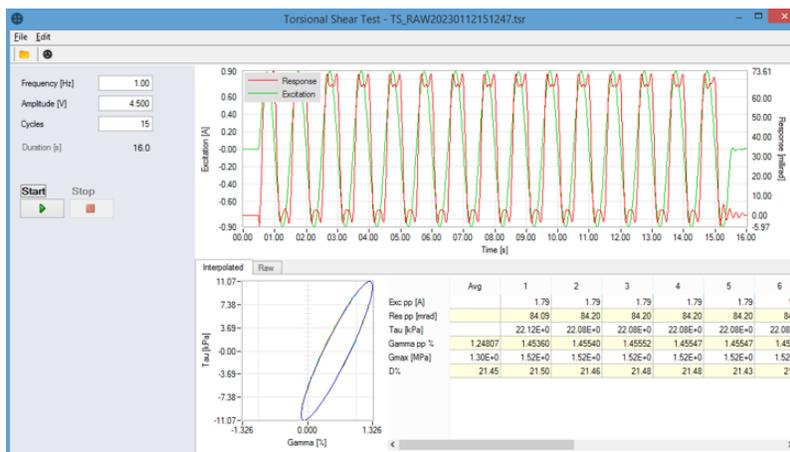
Gráfica de Ensayo Columna Resonante Estrato V



Nota. Se presenta el gráfico del programa de Columna Resonante. Elaborado por: Los autores.

Figura 49.

Gráfica de Ensayo Corte Torsional Cíclico Estrato V

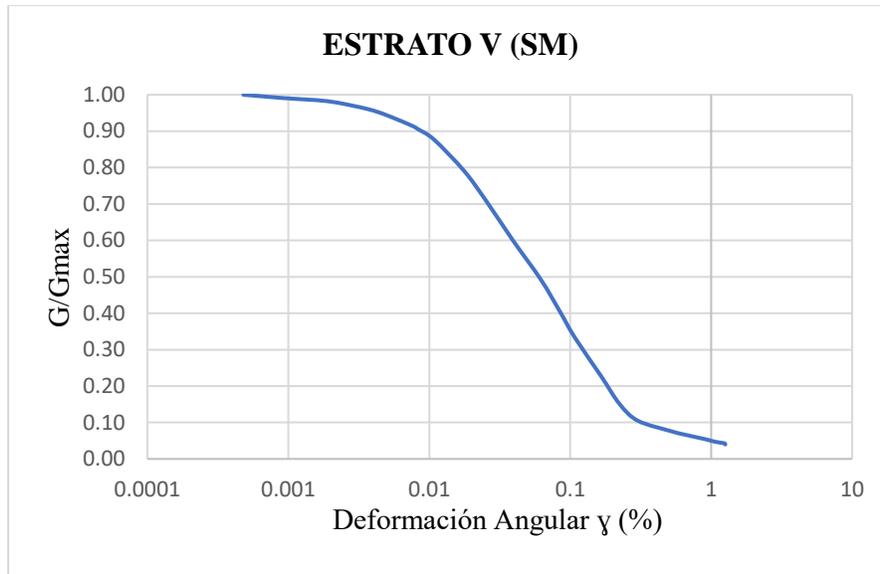


Nota. Se presenta gráfico representativo del programa de Corte Torsional Cíclico.

Elaborado por: Los autores.

Figura 50.

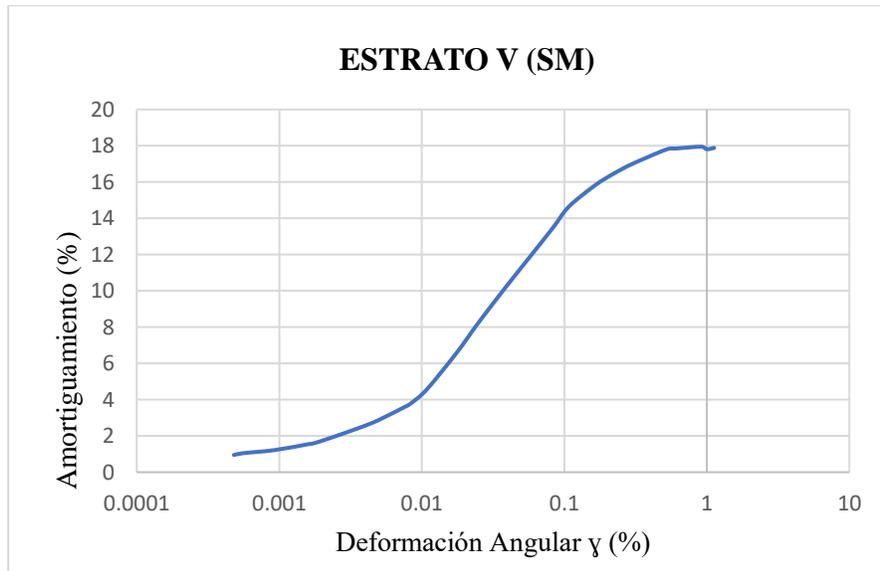
Gráfica Módulo de Corte G/G_{max} Estrato V



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación Angular. Elaborado por: Los autores.

Figura 51.

Gráfica D vs γ Estrato V



Nota. Se presenta gráfica de Amortiguamiento vs Deformación Angular para el Estrato V. Elaborado por: Los autores.

4.2.5 Resultados de Estrato VI

Datos Estrato VI

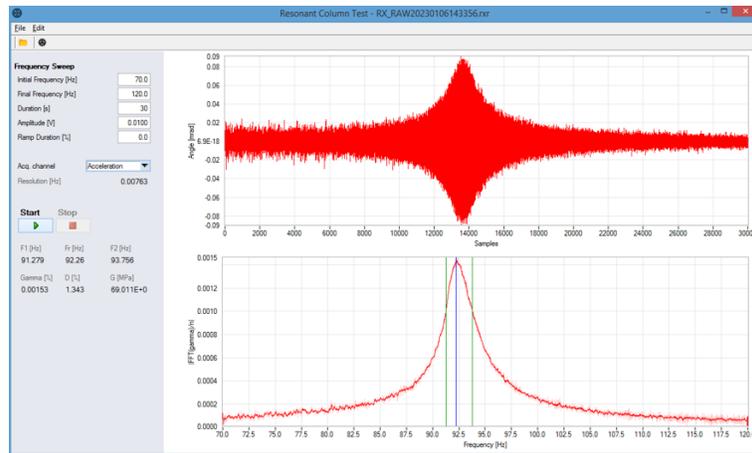
Localización: Cancha detrás del “Bloque G”, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campus Sur.

Fecha de Ensayo: 09/01/2022

Profundidad Muestra VI: 9.50 – 10.00 m

Figura 52.

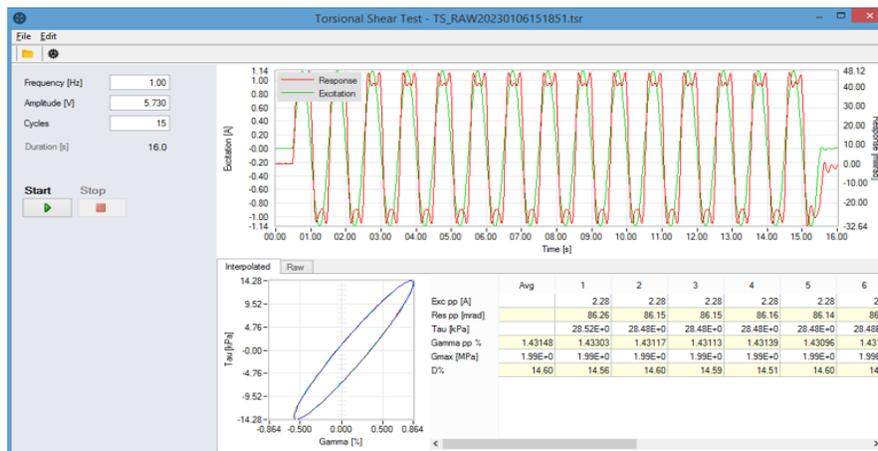
Gráfica de Ensayo Columna Resonante Estrato VI



Nota. Se presenta el gráfico del programa de Columna Resonante. Elaborado por: Los autores.

Figura 53.

Gráfica de Ensayo Corte Torsional Cíclico Estrato VI

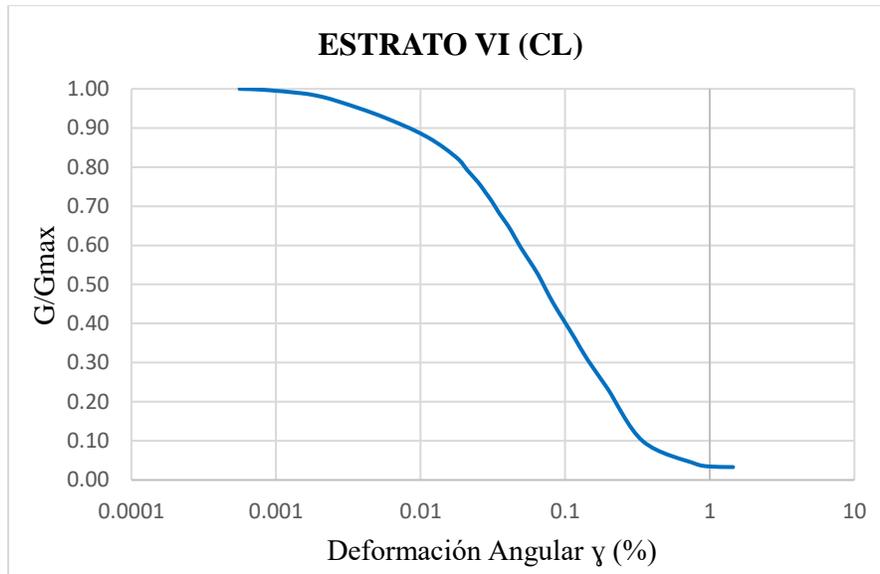


Nota. Se presenta gráfico representativo del programa de Corte Torsional Cíclico.

Elaborado por: Los autores.

Figura 54.

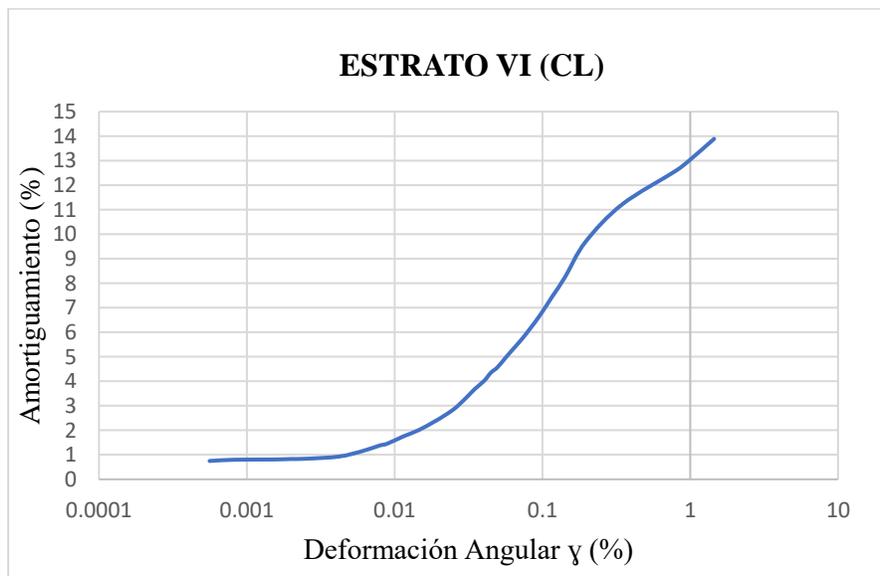
Gráfica Módulo de Corte G/G_{max} Estrato VI



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación Angular. Elaborado por: Los autores.

Figura 55.

Gráfica D vs γ Estrato VI



Nota. Se presenta gráfica de Amortiguamiento vs Deformación Angular para el Estrato VI. Elaborado por: Los autores.

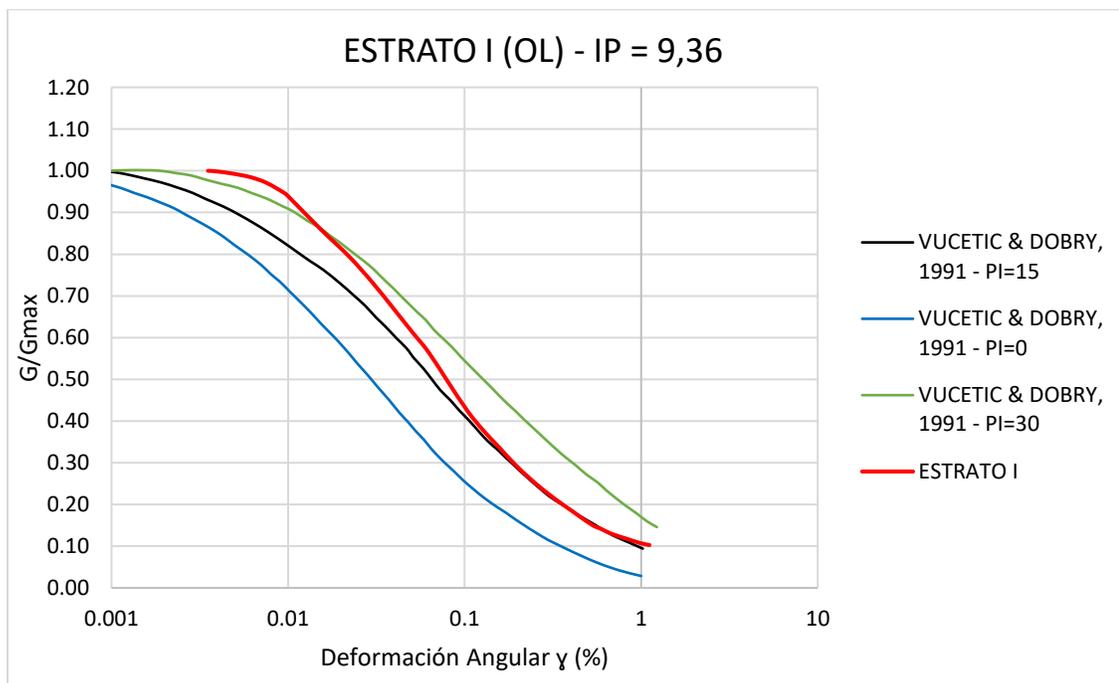
4.3. Comparación de Muestras con la Literatura

4.3.1 ESTRATO I (OL)

Se presenta el Estrato I junto a gráficas referentes a la Degradación del Módulo de Corte vs Deformación de diferentes autores. Este estrato presenta como tipo de suelo una arcilla, por lo que se realizará una comparación con datos encontrados en la literatura para suelos que presentan cohesión. Precisamente, con los autores Vucetic & Dobry, (1991) para suelos con un índice de plasticidad IP de 0 a 30, así como con Sun et al, (1988) para suelos cohesivos.

Figura 56.

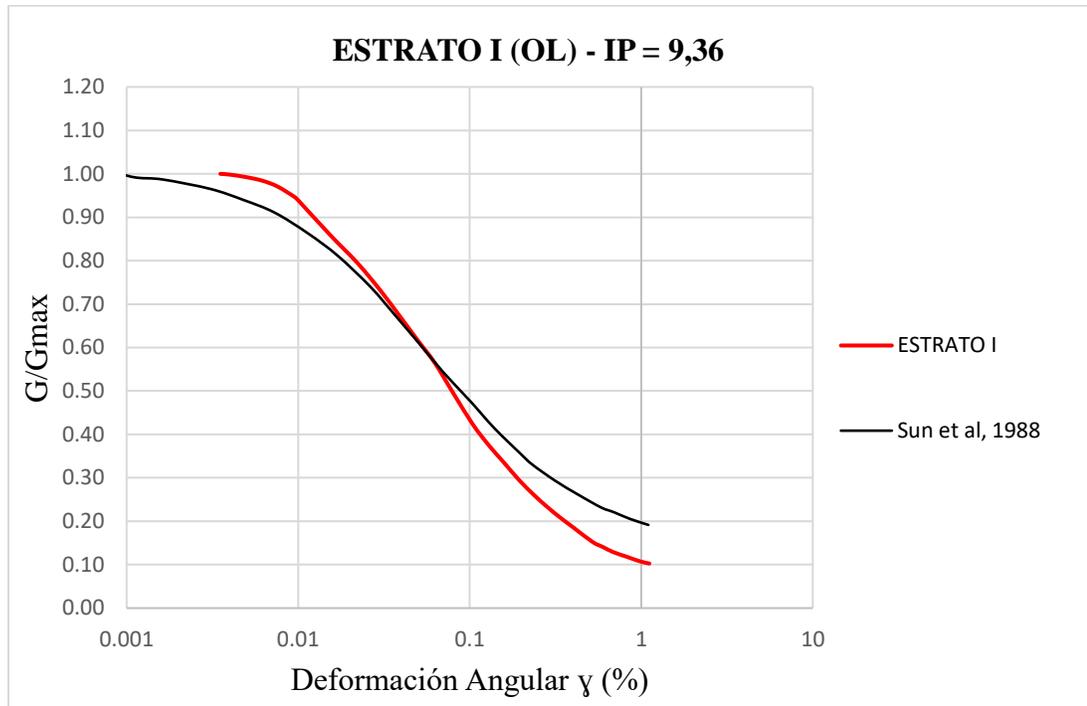
Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato I dependiendo el Índice de Plasticidad.



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de Vucetic & Dobry, (1991), mencionado en Park, D, Kishida, T (2018).

Figura 57.

Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato I para Suelos Cohesivos.

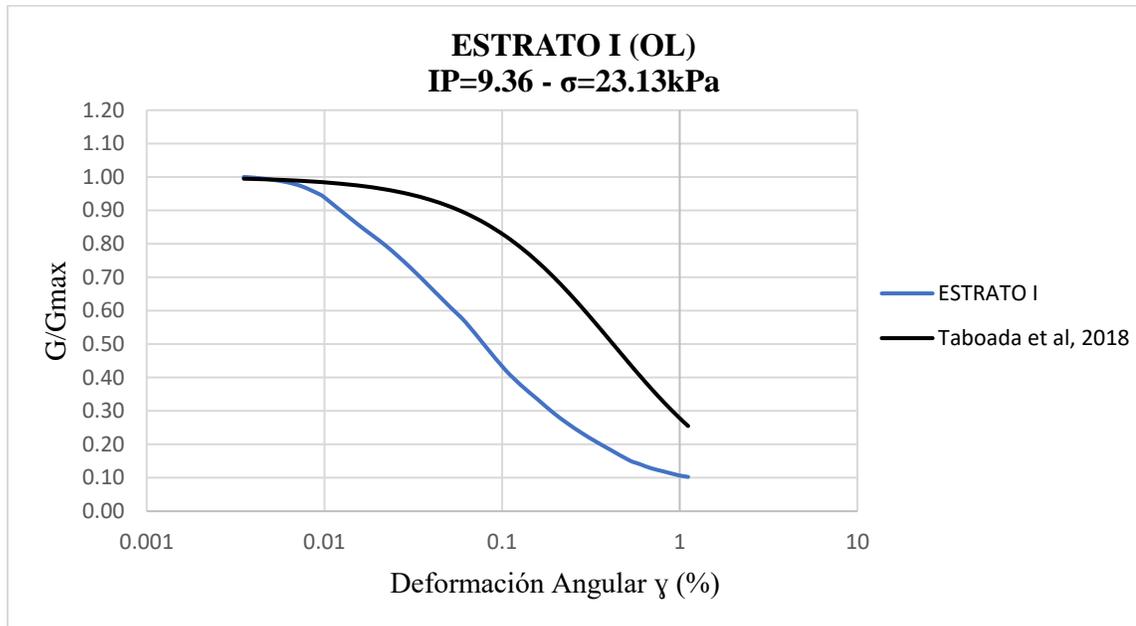


Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de Sun et. al, (1988), mencionado en Sengara, W, Sulaiman, A, (2020)

Así mismo, se presenta una comparación con las gráficas planteadas por Taboada et al, (2018), en las que se toma en cuenta el esfuerzo promedio confinante, así como también el índice de plasticidad en el caso de arcillas.

Figura 58.

Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato I para Suelos Según el Esfuerzo Confinante Promedio y el Índice de Plasticidad.

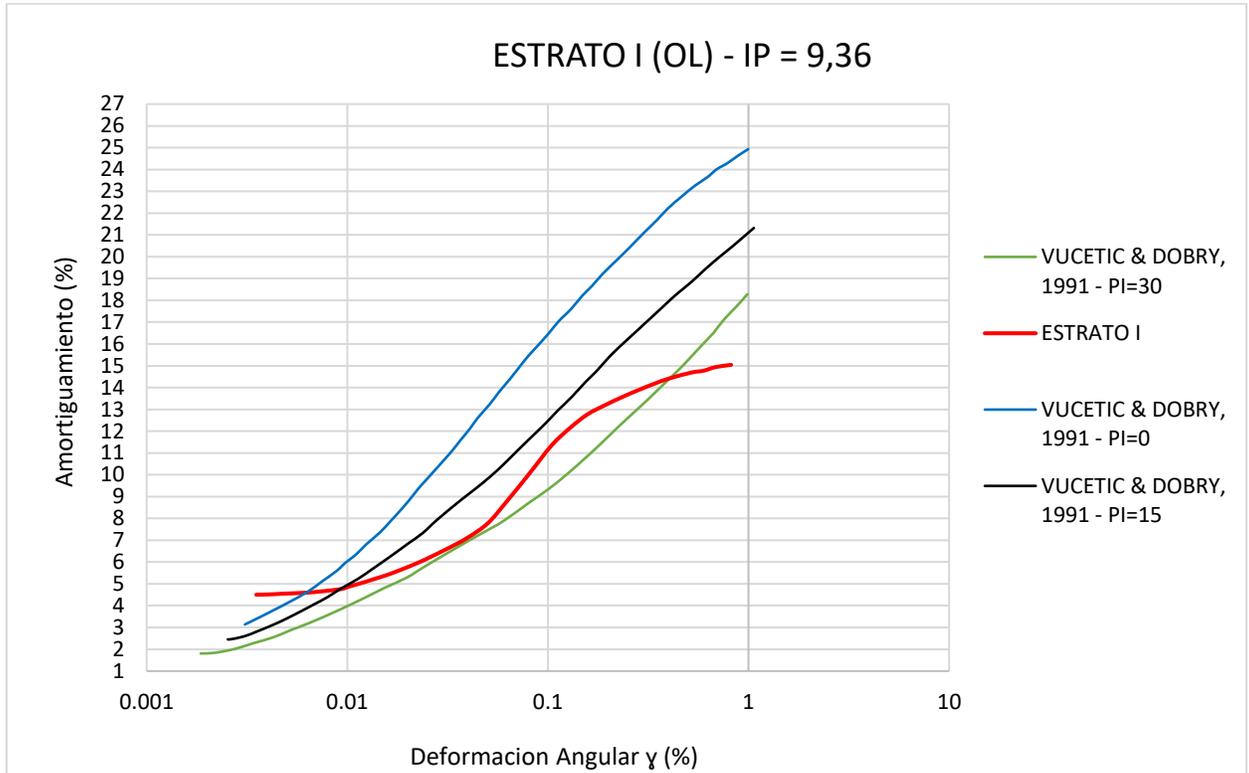


Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de Taboada et. al, (2018)

Para el caso de Amortiguamiento vs Deformación Angular, de igual manera se presenta la gráfica del Estrato I frente a la de diferentes autores para su comparación.

Figura 59.

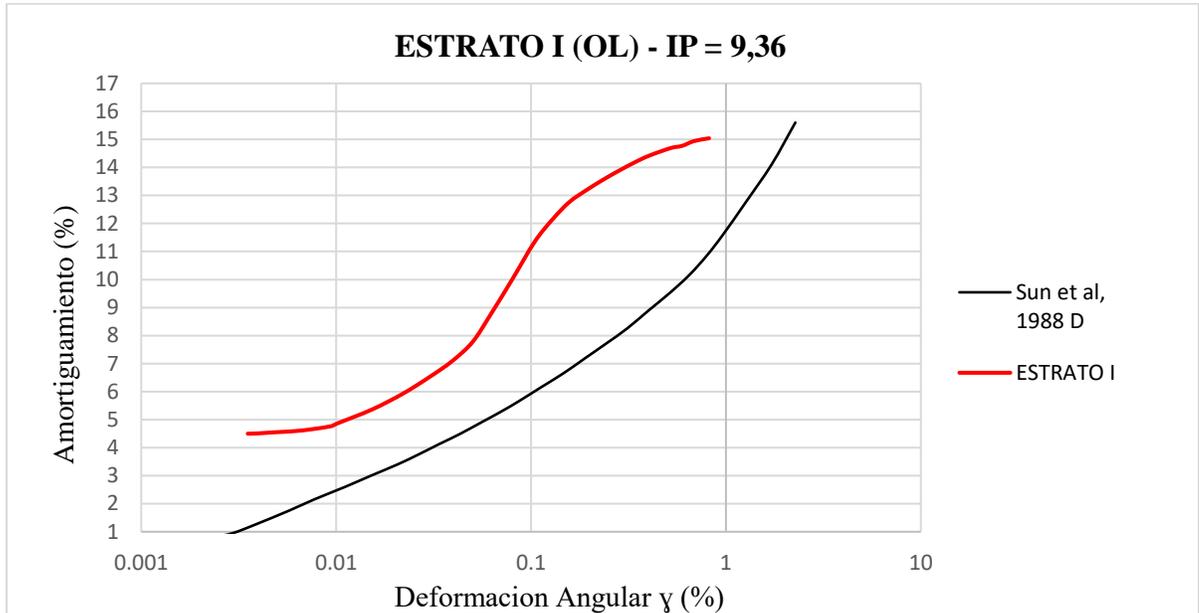
Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato I dependiendo el Índice de Plasticidad.



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de Vucetic & Dobry, (1991), mencionado en Park, D, Kishida, T (2018).

Figura 60.

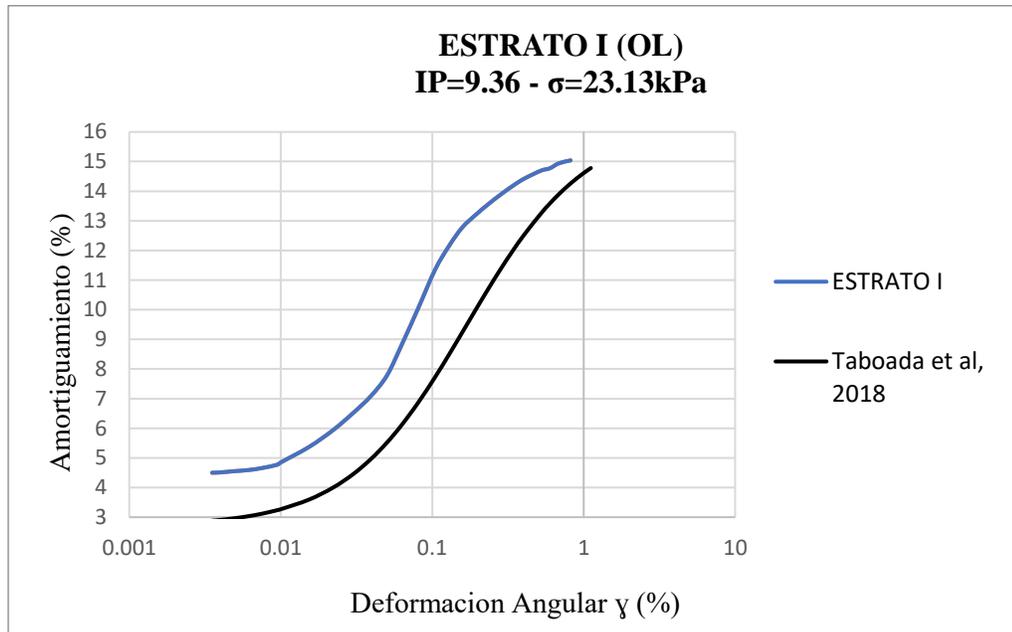
Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato I para Suelos Cohesivos.



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de Sun et. al, (1988), mencionado en Sengara, W, Sulaiman, A, (2020)

Figura 61.

Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato I para Suelos Según el Esfuerzo Confinante Promedio y el Índice de Plasticidad.



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de Taboada et al, (2018)

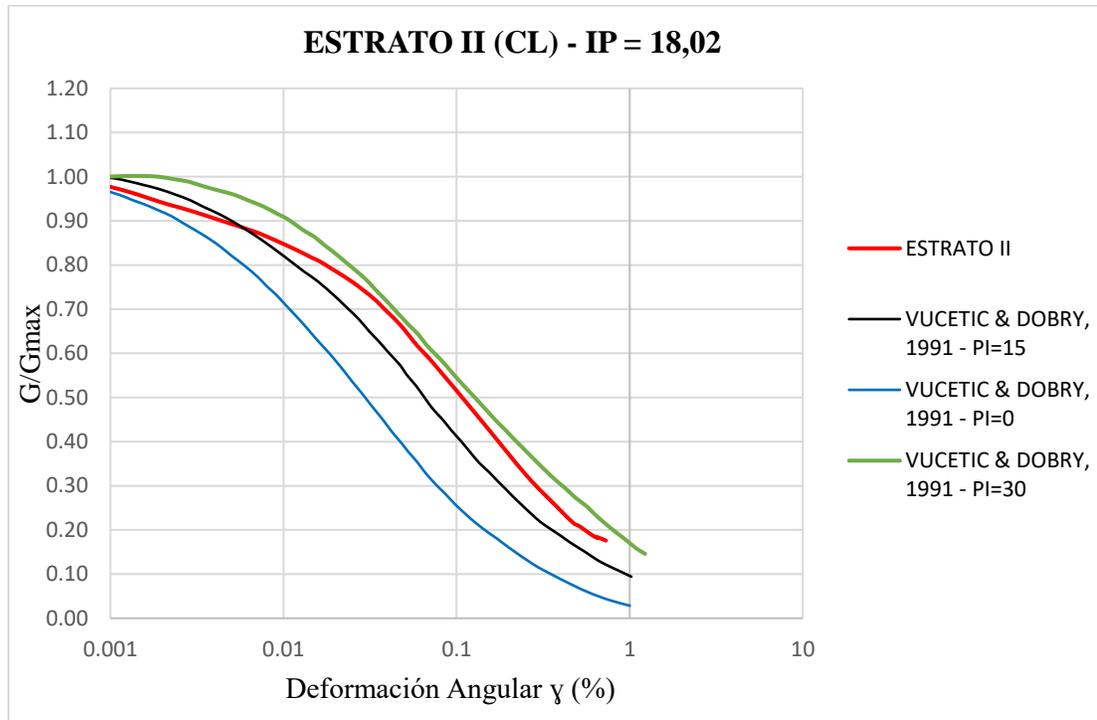
4.3.2 ESTRATO II (CL)

Se presenta el Estrato II junto a gráficas referentes a la Degradación del Módulo de Corte vs Deformación de diferentes autores. Este estrato presenta como tipo de suelo una arcilla, por lo que se realizará una comparación con datos encontrados en la literatura para suelos que presentan cohesión.

Precisamente, con los autores Vucetic & Dobry, (1991) para suelos con un índice de plasticidad IP de 0 a 30, así como con Sun et al, (1988) para suelos cohesivos.

Figura 62.

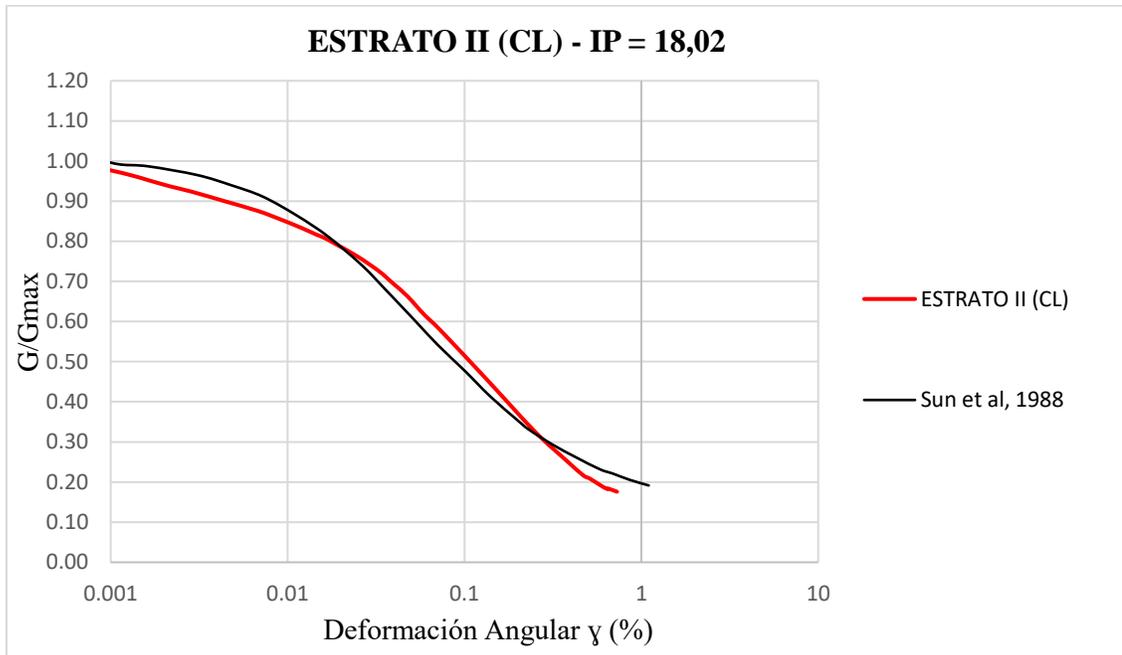
Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato II dependiendo el Índice de Plasticidad.



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de: Vucetic & Dobry, (1991), mencionado en Park, D, Kishida, T (2018).

Figura 63.

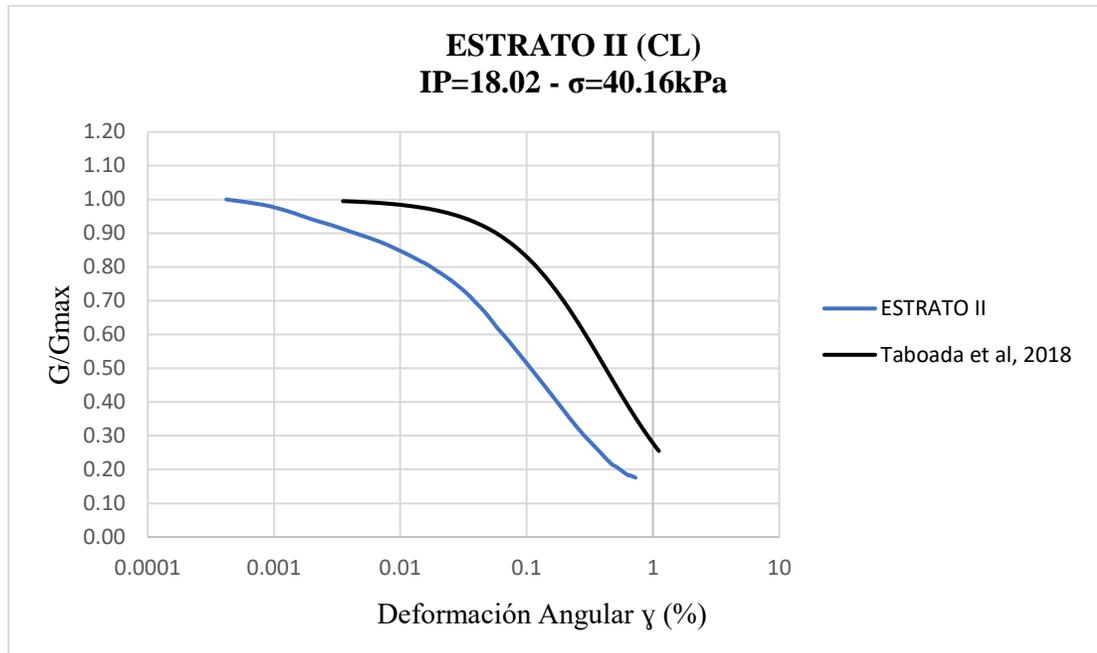
Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato II para Suelos Cohesivos.



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de Sun et. al, (1988), mencionado en Sengara, W, Sulaiman, A, (2020)

Figura 64.

Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato II para Suelos Según el Esfuerzo Confinante Promedio y el Índice de Plasticidad.

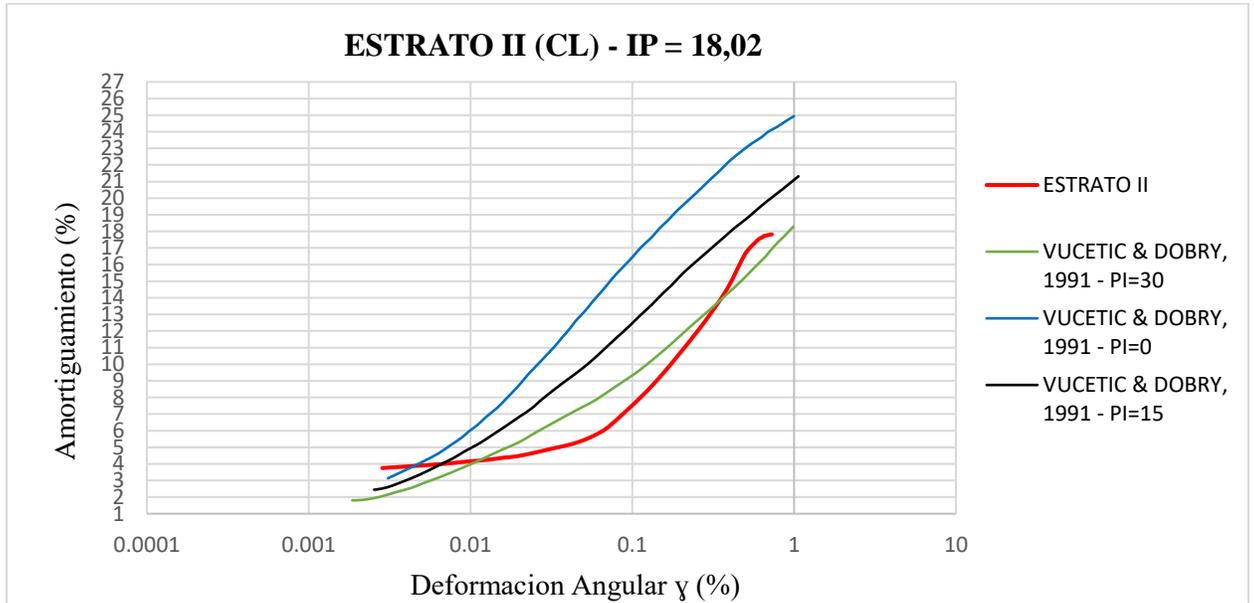


Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de: Taboada et al, (2018)

Para el caso de Amortiguamiento vs Deformación Angular, de igual manera se presenta la gráfica del Estrato II frente a la de diferentes autores para su comparación.

Figura 65.

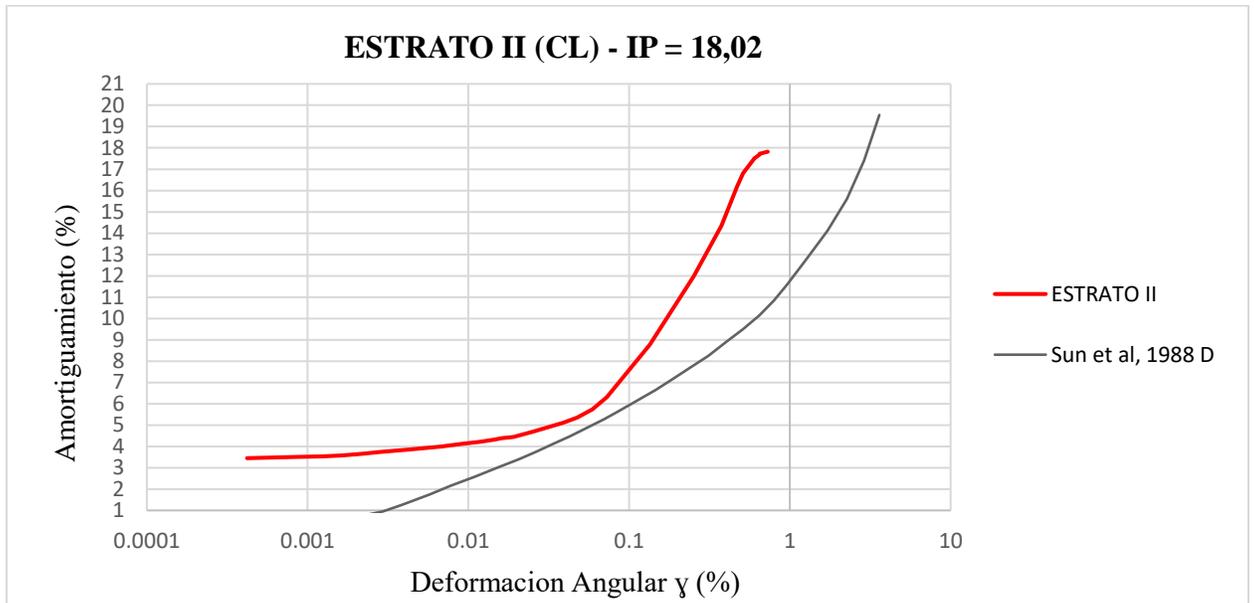
Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato II dependiendo el Índice de Plasticidad.



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores., con referencia de: Vucetic & Dobry, (1991), mencionado en Park, D, Kishida, T (2018).

Figura 66.

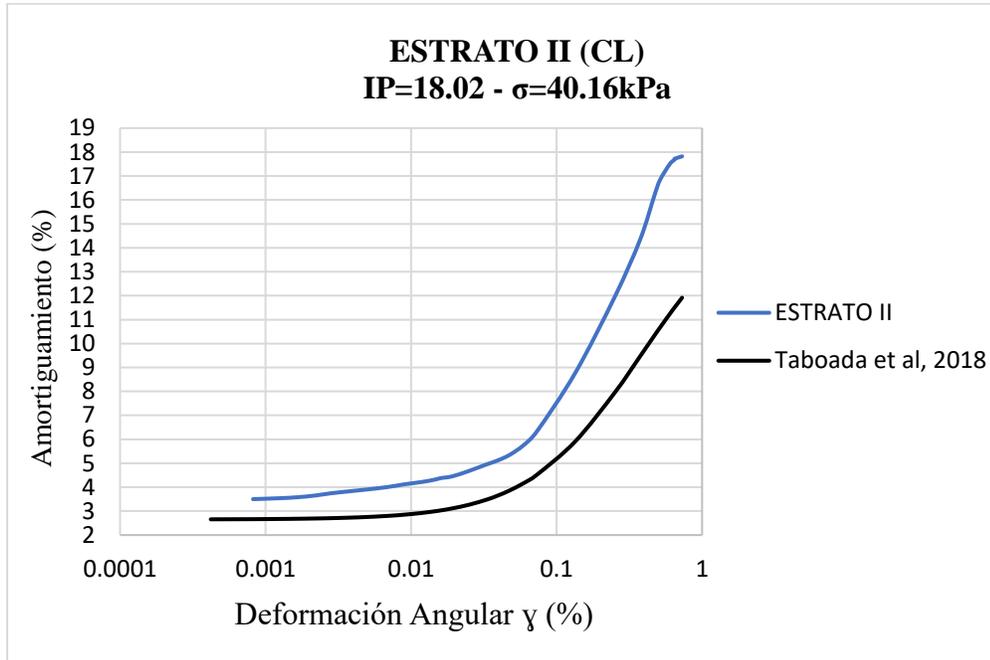
Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato II para Suelos Cohesivos.



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de Sun et. al, (1988), mencionado en Sengara, W, Sulaiman, A, (2020)

Figura 67.

Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato II para Suelos Según el Esfuerzo Confinante Promedio y el Índice de Plasticidad.



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de: Taboada et al, (2018)

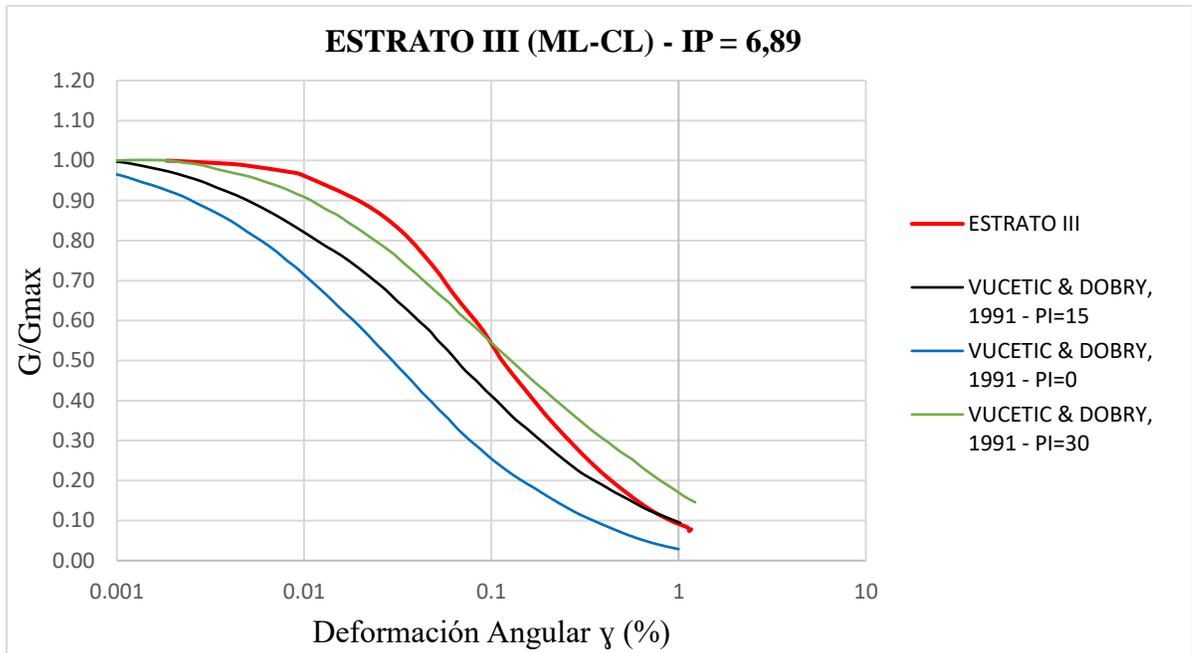
4.3.3 ESTRATO III (ML-CL)

Se presenta el Estrato III junto a gráficas referentes a la Degradación del Módulo de Corte vs Deformación de diferentes autores. Este estrato presenta como tipo de suelo un limo arcilloso, por lo que se realizará una comparación con datos encontrados en la literatura para suelos que presentan cohesión.

Precisamente, con los autores Vucetic & Dobry, 1991 para suelos con un índice de plasticidad IP de 0 a 30, así como con Sun et al, 1988 para suelos cohesivos.

Figura 68.

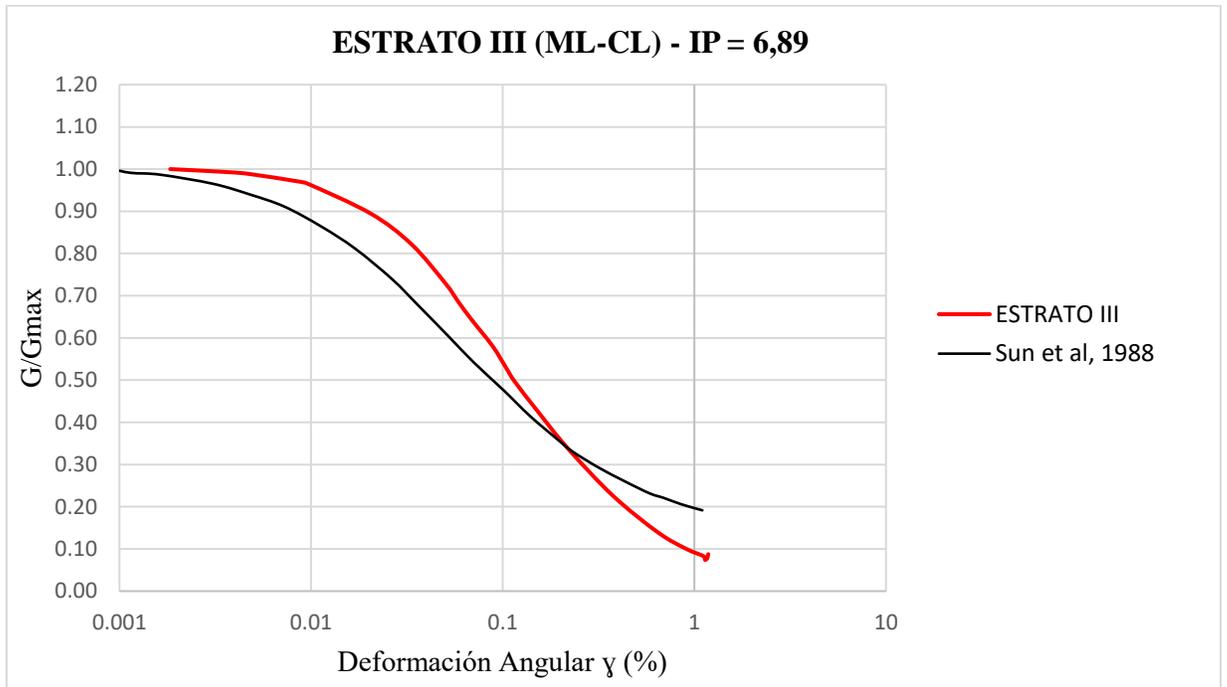
Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato III dependiendo el Índice de Plasticidad.



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de: Vucetic & Dobry, (1991), mencionado en Park, D, Kishida, T (2018).

Figura 69.

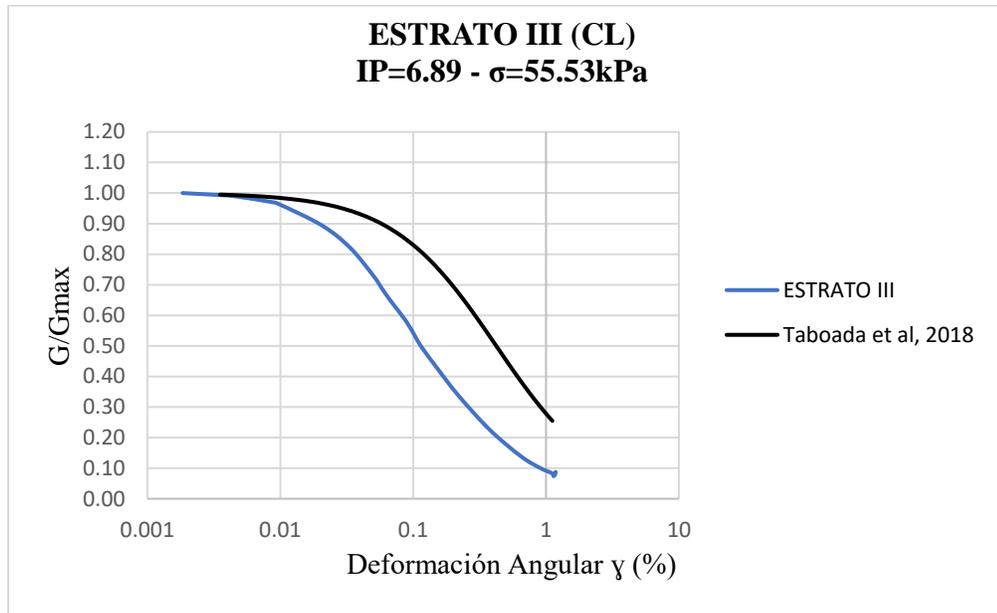
Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato III para Suelos Cohesivos.



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de Sun et. al, (1988), mencionado en Sengara, W, Sulaiman, A, (2020)

Figura 70.

Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato III para Suelos Según el Esfuerzo Confinante Promedio y el Índice de Plasticidad.

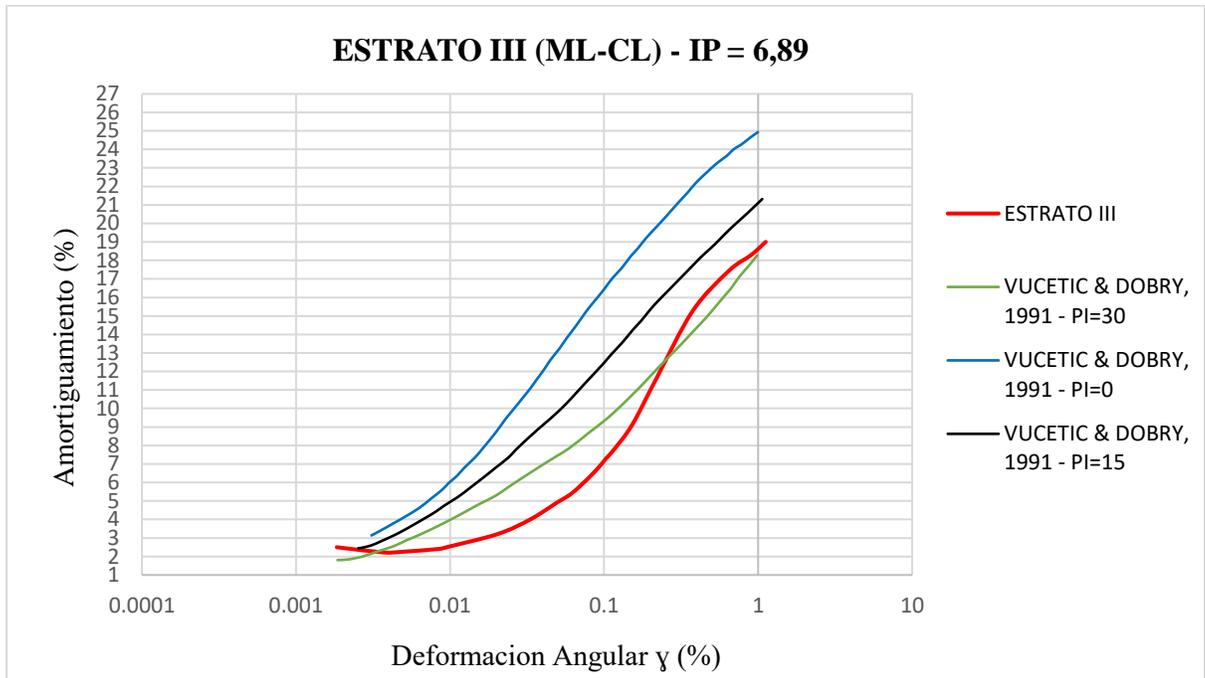


Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de: Taboada et al, (2018)

Para el caso de Amortiguamiento vs Deformación Angular, de igual manera se presenta la gráfica del Estrato III frente a la de diferentes autores para su comparación.

Figura 71.

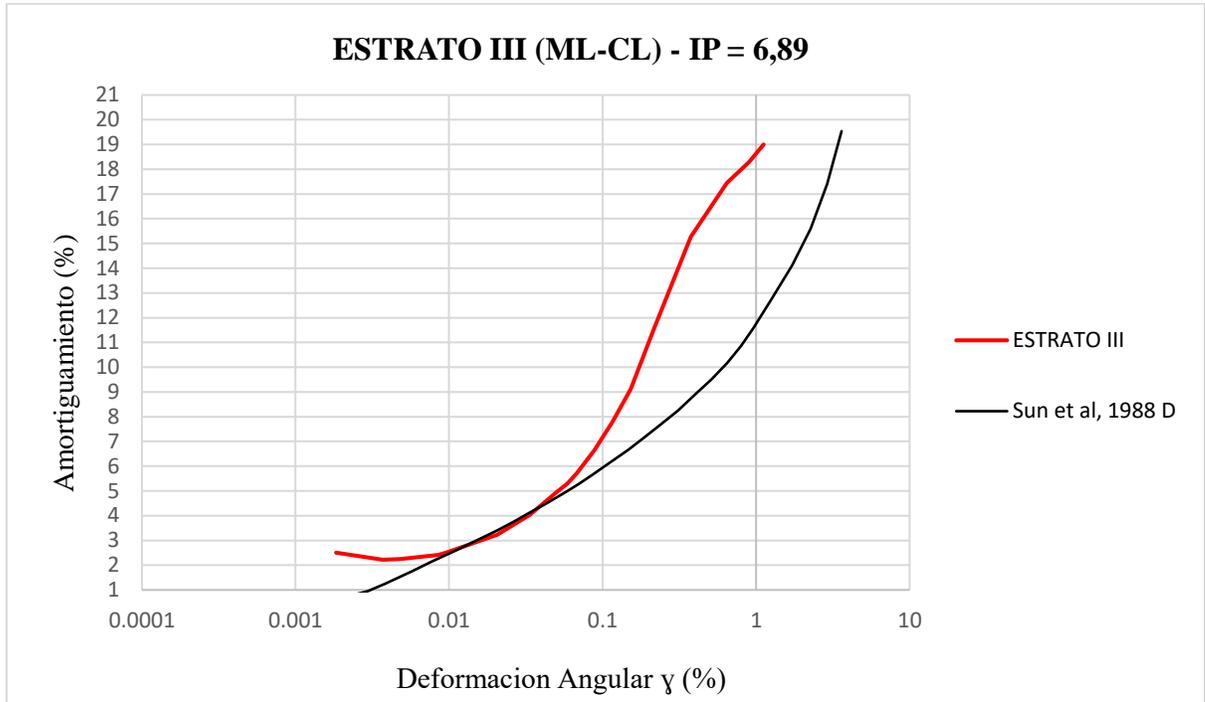
Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato III dependiendo el Índice de Plasticidad.



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de: Vucetic & Dobry, (1991). mencionado en Park, D, Kishida, T (2018).

Figura 72.

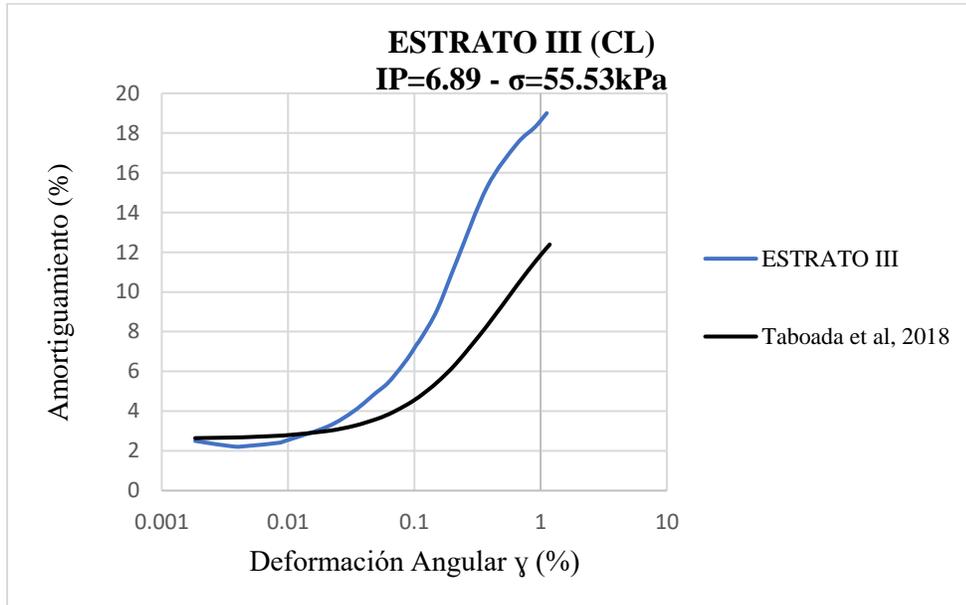
Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato III para Suelos Cohesivos.



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de Sun et. al, (1988), mencionado en Sengara, W, Sulaiman, A, (2020)

Figura 73.

Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato III para Suelos Según el Esfuerzo Confinante Promedio y el Índice de Plasticidad.



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de: Taboada et al, (2018)

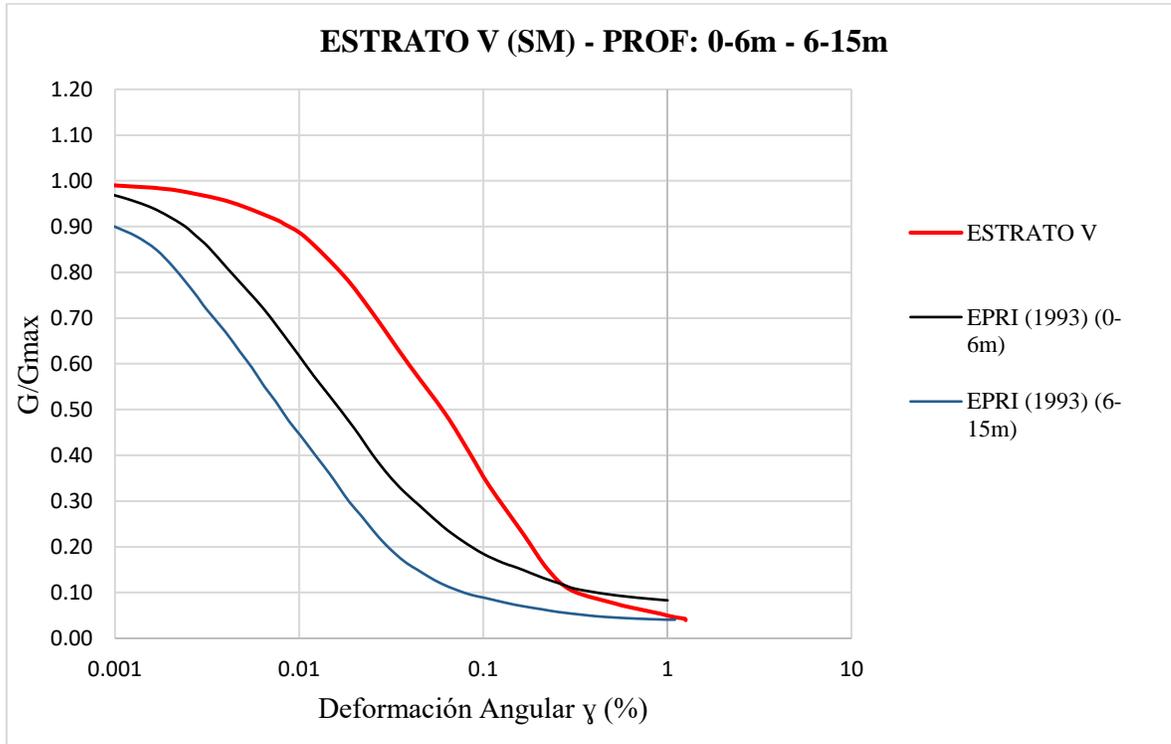
4.3.4 ESTRATO V (SM)

Se presenta el Estrato V junto a gráficas referentes a la Degradación del Módulo de Corte vs Deformación de diferentes autores. Este estrato presenta como tipo de suelo una arena limosa, por lo que se realizará una comparación con datos encontrados en la literatura para suelos que no presentan cohesión.

Precisamente, con los autores EPRI, 1993 para suelos con profundidades de 0 a 6 metros, y de 6 a 15 metros, y Seed and Idriss, 1970, para suelos sin cohesión.

Figura 74.

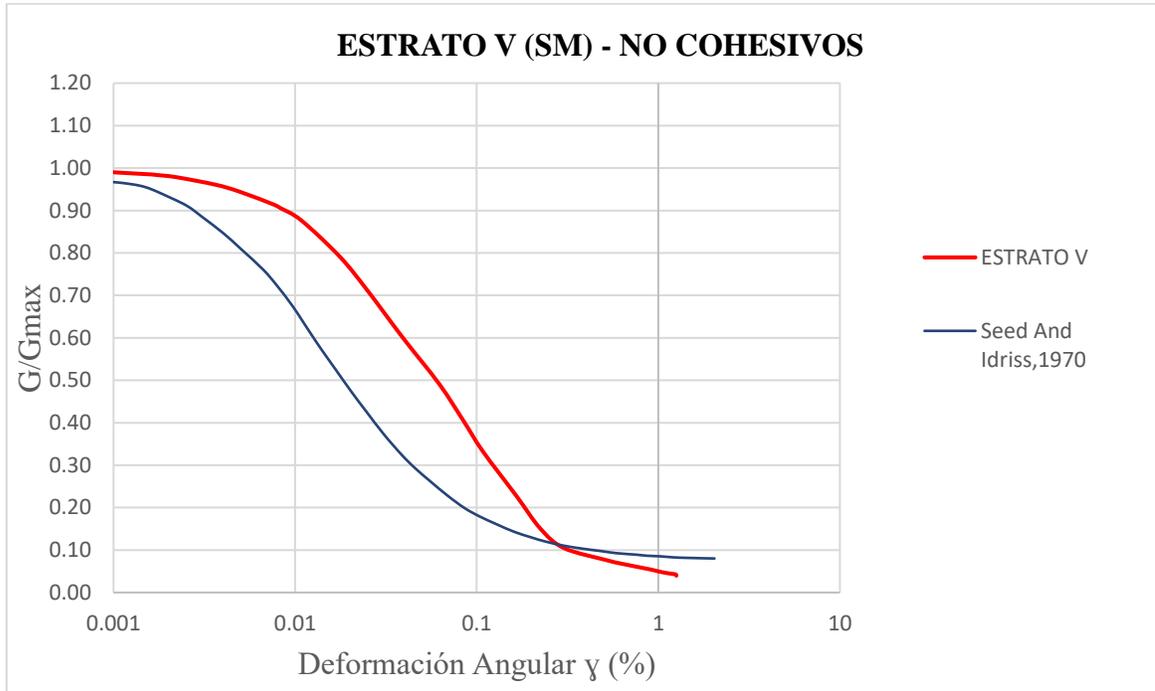
Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato V según EPRI, 1993.



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de EPRI, (1993), mencionado en Pilaguano, L, Reinoso, P, (2022)

Figura 75.

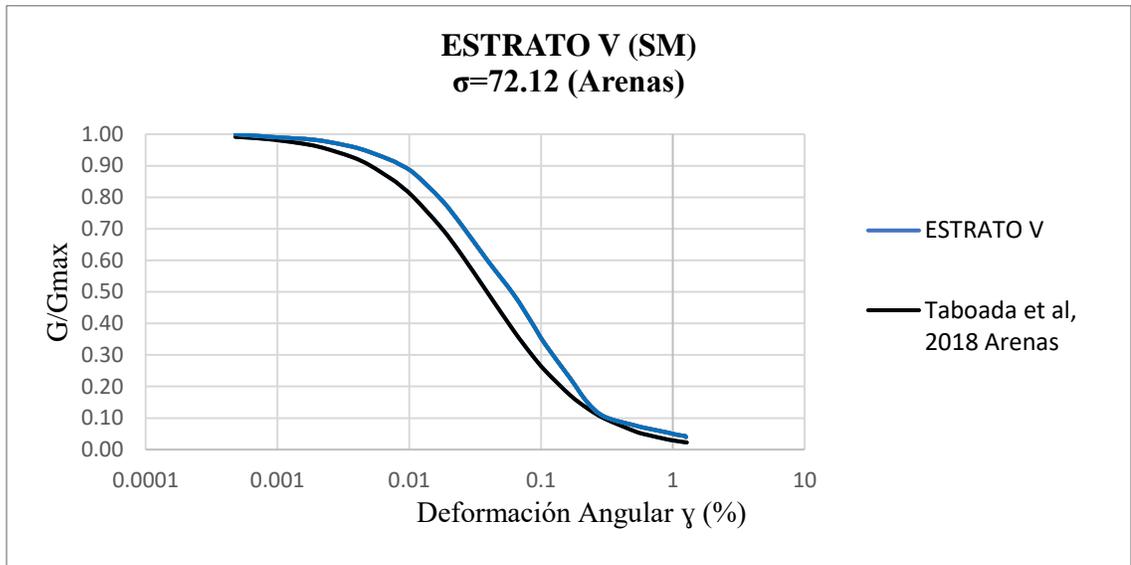
Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato V para Suelos No Cohesivos.



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de Seed & Idriss (1970), mencionado en Sengara, W, Sulaiman, A, (2020)

Figura 76.

Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato V para Suelos Según el Esfuerzo Confinante Promedio.

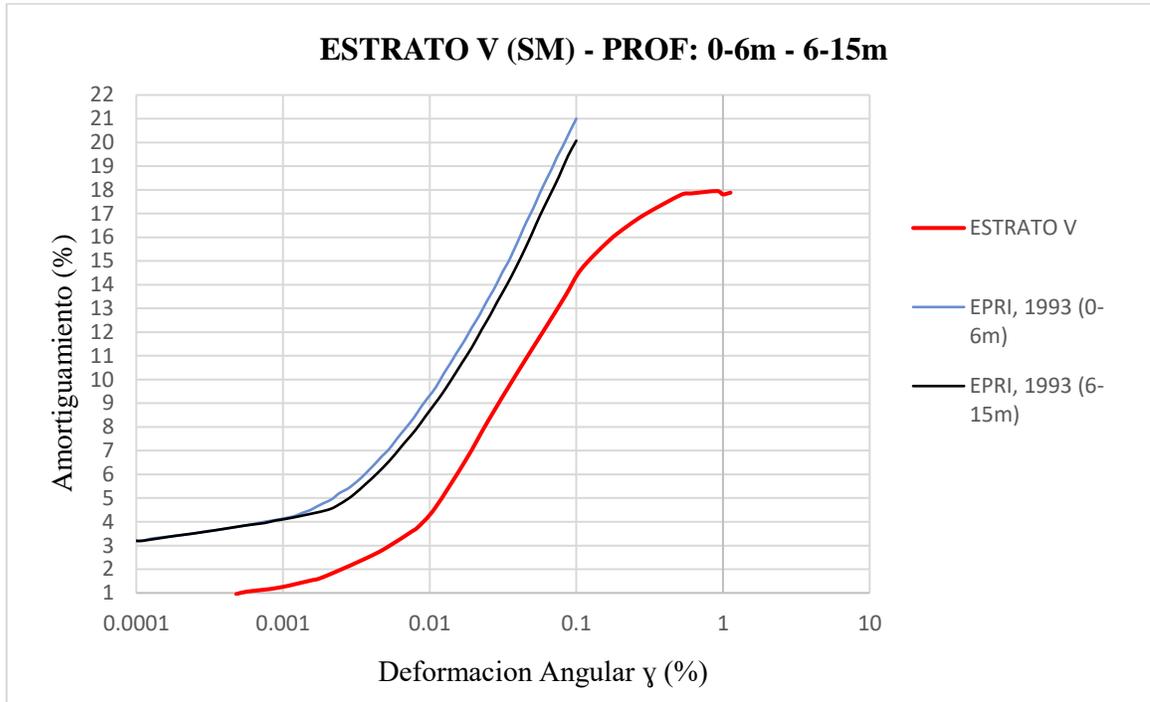


Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de: Taboada et al, (2018)

Para el caso de Amortiguamiento vs Deformación Angular, de igual manera se presenta la gráfica del Estrato V frente a la de diferentes autores para su comparación.

Figura 77.

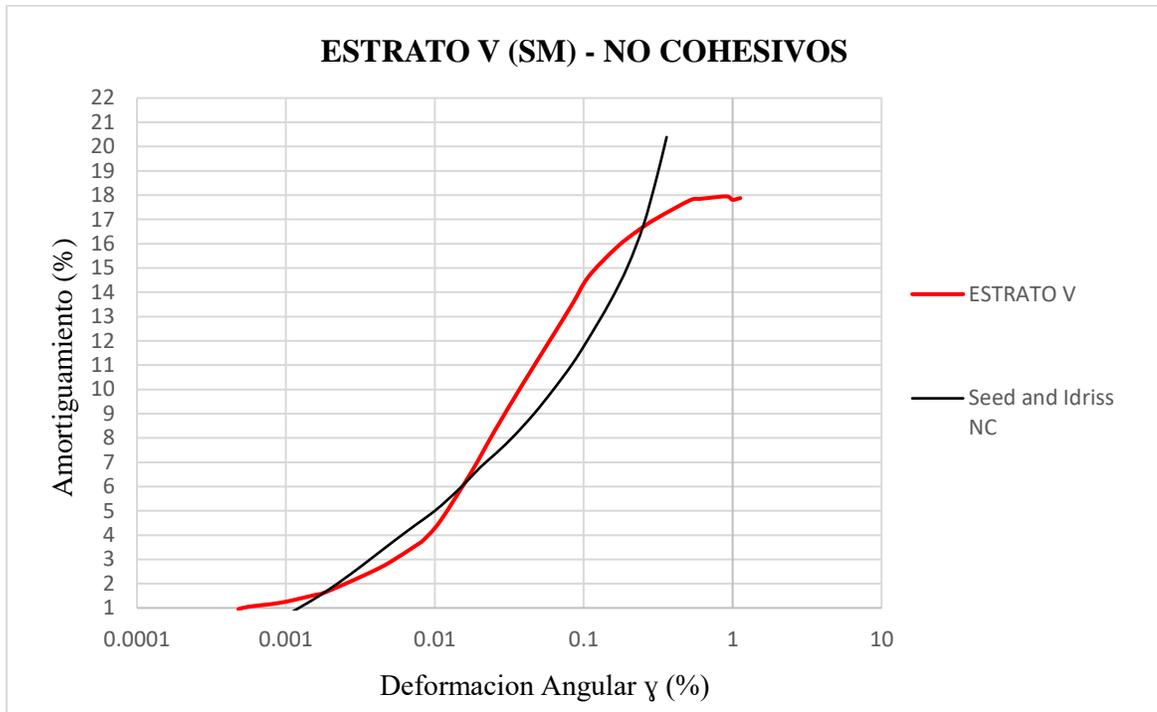
Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato V según EPRI, 1993.



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de EPRI, (1993), mencionado en Pilaguano, L, Reinoso, P, (2022)

Figura 78.

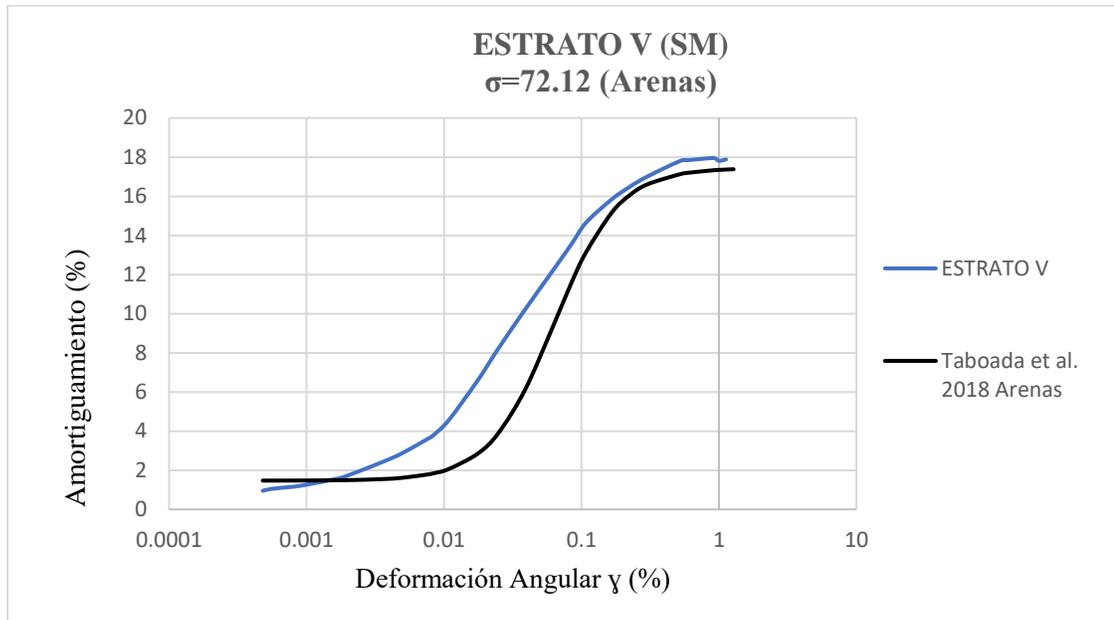
Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato V para Suelos No Cohesivos.



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de Seed & Idriss (1970), mencionado en Sengara, W, Sulaiman, A, (2020)

Figura 79.

Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato V para Suelos Según el Esfuerzo Confinante Promedio.



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de: Taboada et al, (2018)

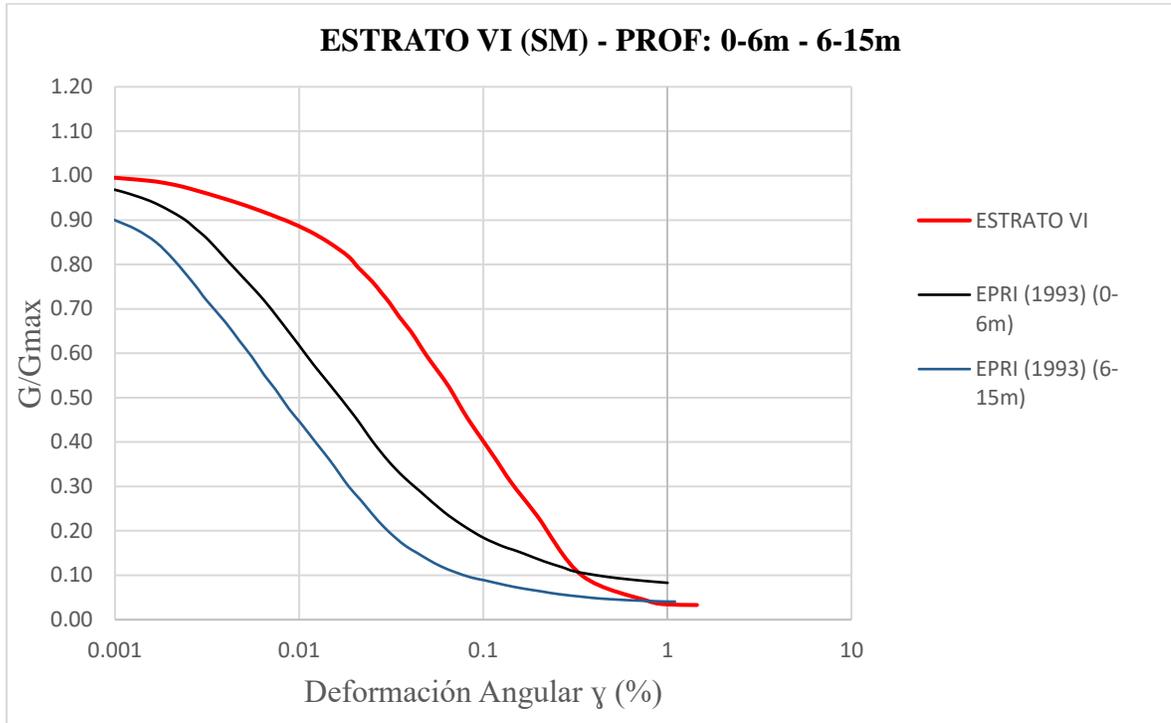
4.3.5 ESTRATO VI (SM)

Se presenta el Estrato VI junto a gráficas referentes a la Degradación del Módulo de Corte vs Deformación de diferentes autores. Este estrato presenta como tipo de suelo una arena limosa, por lo que se realizará una comparación con datos encontrados en la literatura para suelos que presentan cohesión.

Precisamente, con los autores EPRI, 1993 para suelos con profundidades de 0 a 6 metros, y de 6 a 15 metros, y Seed and Idriss, 1970, para suelos sin cohesión.

Figura 80.

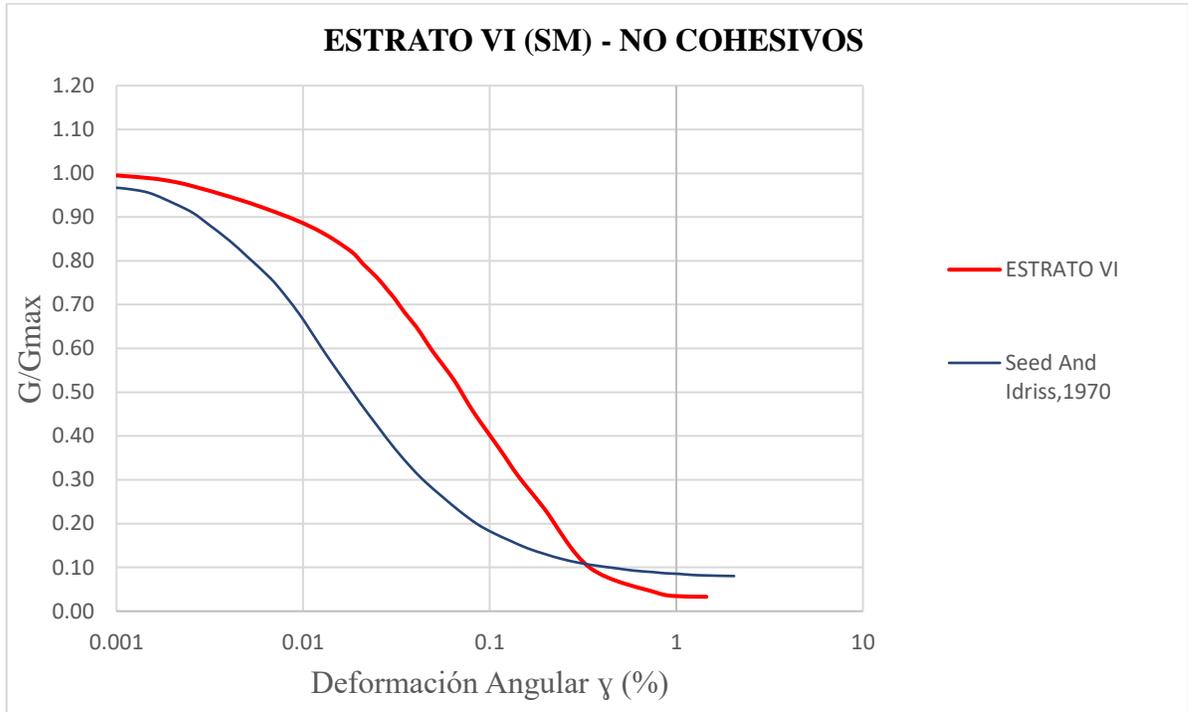
Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato VI según EPRI, 1993.



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de EPRI, (1993), mencionado en Pilaguano, L, Reinoso, P, (2022)

Figura 81.

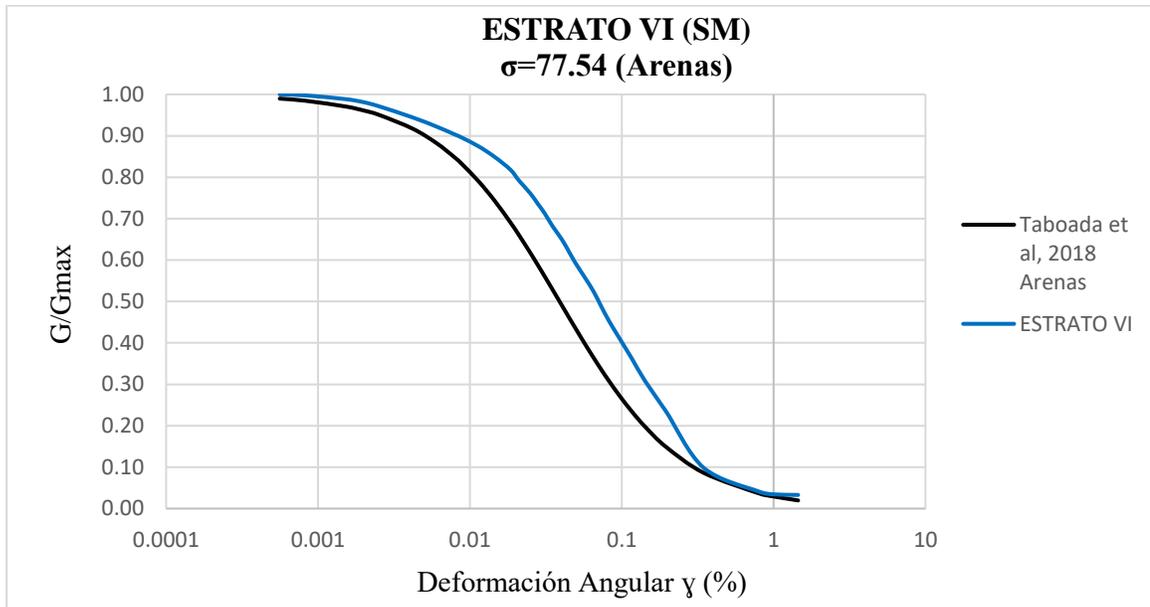
Comparación Degradación del Módulo de Corte vs Deformación para Estrato VI para Suelos No Cohesivos.



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de Seed & Idriss (1970), mencionado en Sengara, W, Sulaiman, A, (2020)

Figura 82.

Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato VI para Suelos Según el Esfuerzo Confinante Promedio.

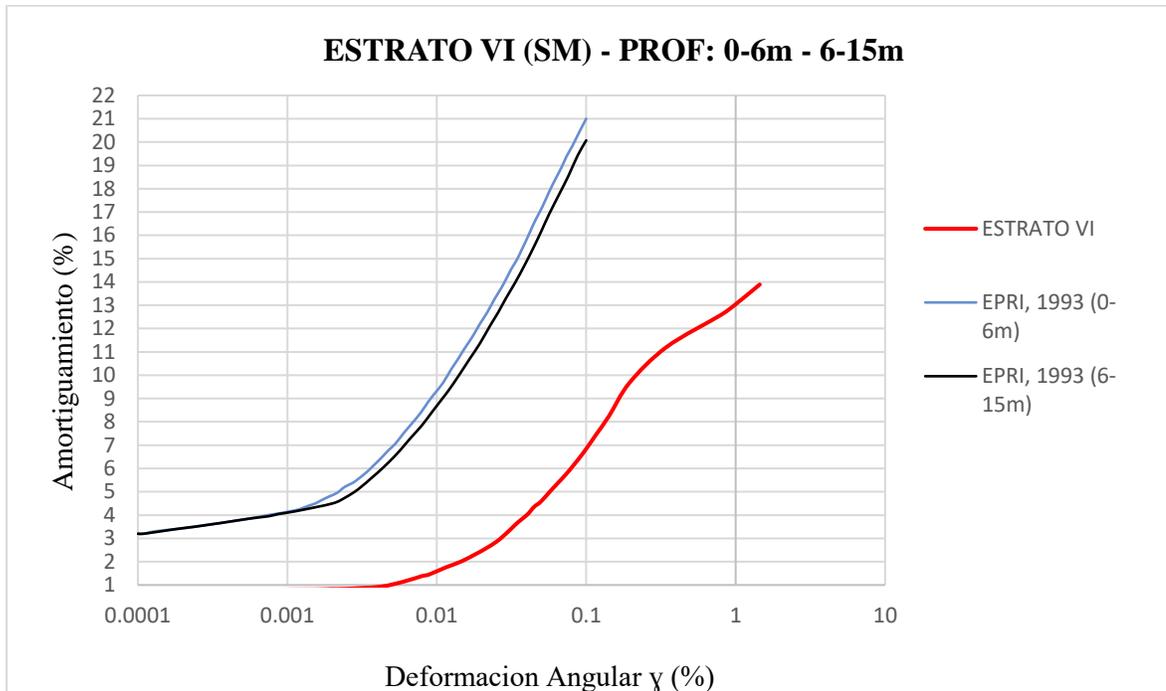


Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de: Taboada et al, (2018)

Para el caso de Amortiguamiento vs Deformación Angular, de igual manera se presenta la gráfica del Estrato VI frente a la de diferentes autores para su comparación.

Figura 83.

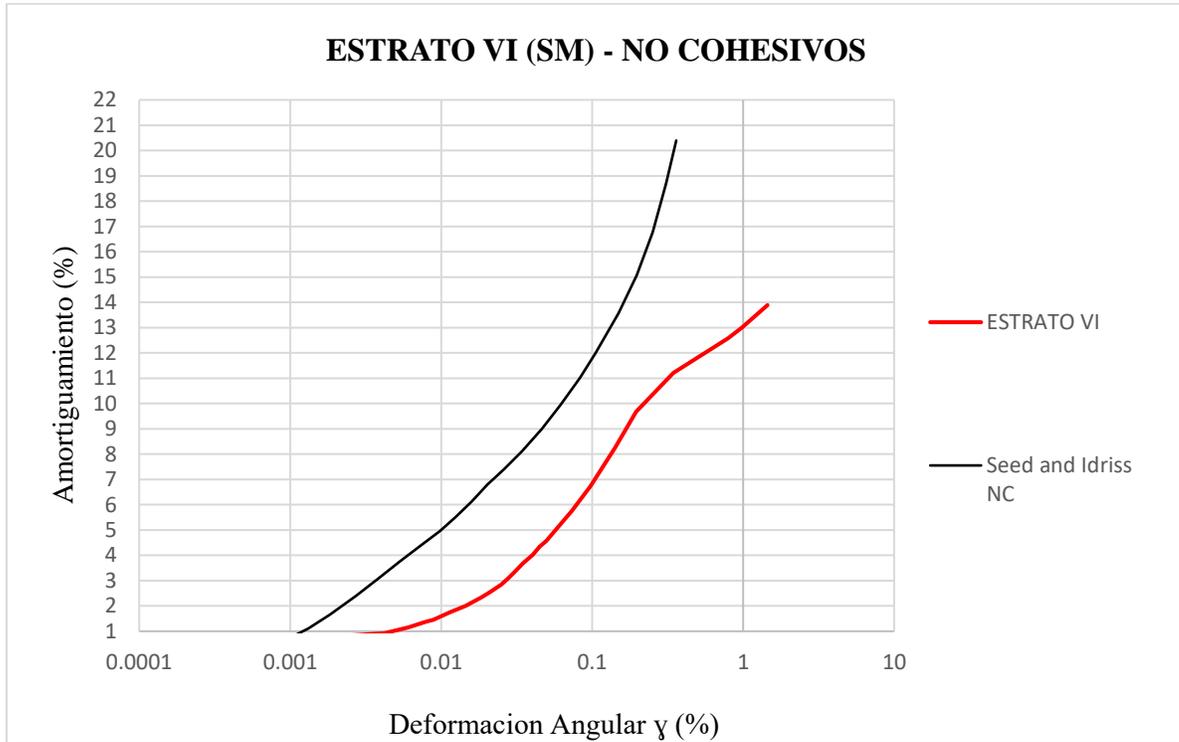
Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato VI. según EPRI, 1993.



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de EPRI, (1993), mencionado en Pilaguano, L, Reinoso, P, (2022)

Figura 84.

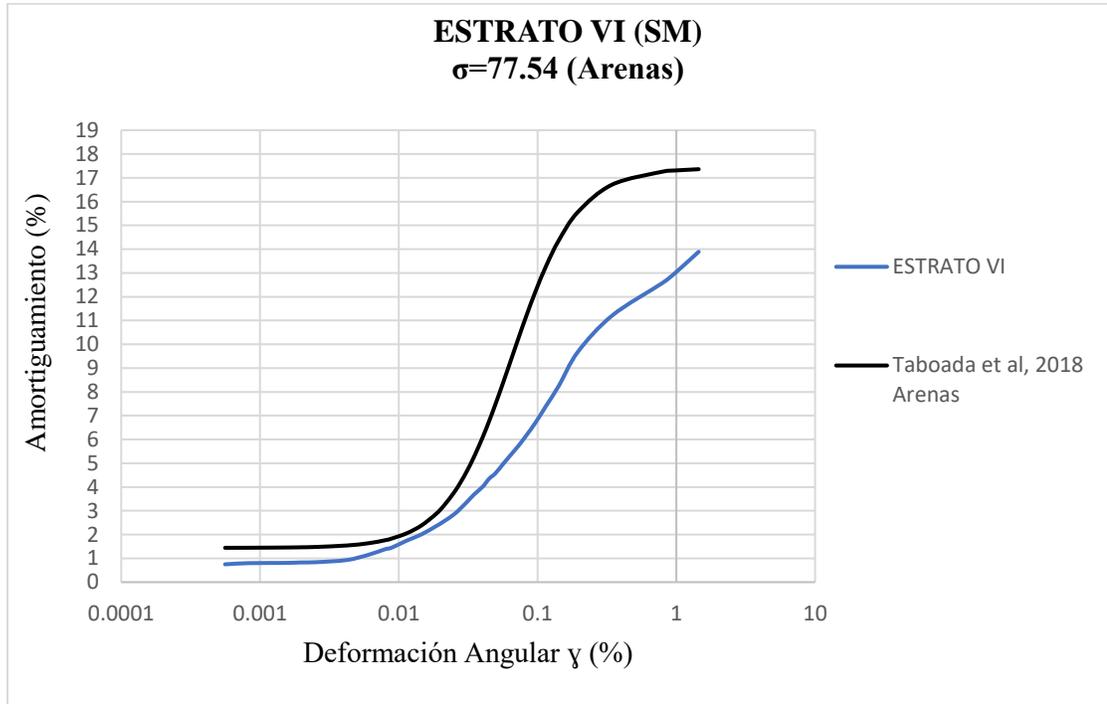
Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato VI para Suelos No Cohesivos.



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de Seed & Idriss (1970), mencionado en Sengara, W, Sulaiman, A, (2020)

Figura 85.

Comparación Amortiguamiento Vs Deformación Angular para Estrato VI para Suelos Según el Esfuerzo Confinante Promedio.

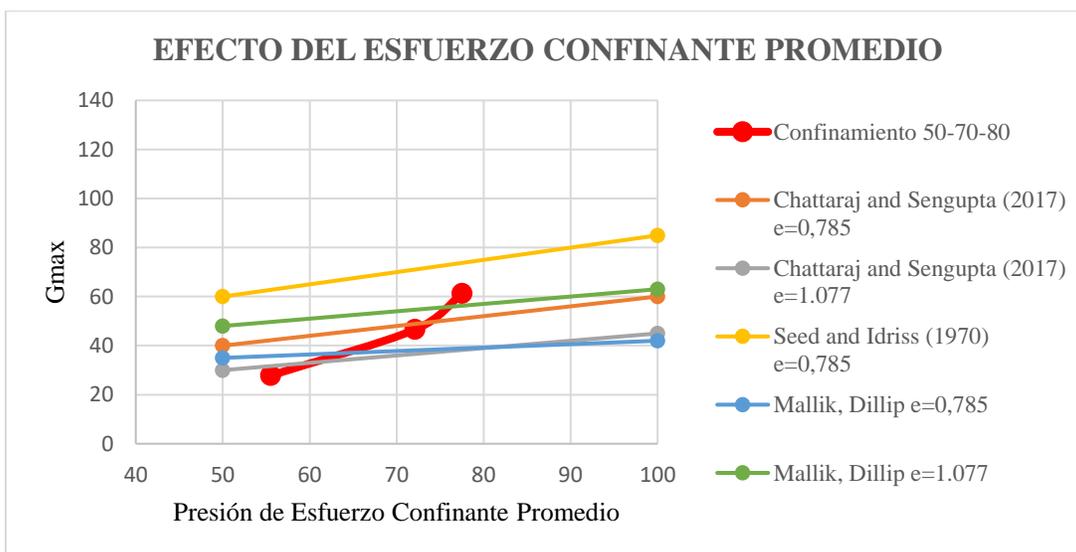


Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Deformación. Elaborado por: Los autores, con referencia de: Taboada et al, (2018)

Se presenta, además, una gráfica planteada por Baidya, D, Mallick, A, (2020), dónde se muestra el efecto del esfuerzo confinante promedio en el módulo de Corte, al evaluarlo con el presente ensayo se obtiene la gráfica a continuación.

Figura 86.

Efecto del Esfuerzo Confinante Promedio en Estratos sobre 50 kPa



Nota. Se presenta el gráfico de comparación de la gráfica de Degradación del Módulo de Corte vs Amortiguamiento. Con datos planteados por diferentes autores. Elaborado por: Los autores, con referencia de Chatarraj & Sengupta (2017), Seed & Idriss (1970), Dillip, Mallick, (2020) mencionado en Baidya, D, Mallick, A, (2020)

Se reafirma que, a mayor esfuerzo confinante promedio, la muestra ganará mayor rigidez, pues esta se está consolidando mediante la aplicación de la carga confinante antes de realizar el ensayo dinámico.

Los valores del efecto de esfuerzo confinante promedio muestran una buena correspondencia con los planteados por los diferentes autores, por lo que se afirma una correcta toma de resultados.

CONCLUSIONES

El Ensayo de Penetración Estándar (SPT) conjuntamente con la toma de muestras imperturbadas (Shelby), es el pilar del presente proyecto para la caracterización de las mismas y su posterior análisis. Por lo cual, mediante la clasificación SUCS con los datos obtenidos en los ensayos realizados, se concluye que, los estratos I, II, III y IV pertenecen al grupo de arcillas de baja plasticidad, por otra parte, los estratos V y VI pertenecen al grupo de arenas de baja plasticidad, las cuales presentan mayor contenido de humedad conforme la profundidad aumenta, esto debido al acercamiento al nivel freático.

Al estudiar las propiedades dinámicas del suelo mediante el presente estudio, se puede concluir que, como consecuencia del incremento de esfuerzo confinante promedio aplicado en una muestra de suelo, el módulo de corte aumenta, y, por lo tanto, la rigidez del suelo es mayor.

A partir de los estratos I, II y III correspondientes a suelos arcillosos, se puede inferir que, las arcillas degradan de forma similar a las planteadas por Sun et.al, (1988) y Vucetic & Dobry, (1991) atendiendo al índice plástico de la muestra, no así a la formulación de Taboada et.al, (2013). Por otra parte, en el caso del amortiguamiento las arcillas amortiguan menos que las planteadas por los mencionados autores. De allí la importancia de realizar ensayos de caracterización dinámica de suelos.

Se puede concluir, que para los estratos V y VI correspondientes a suelos arenosos, se evidencia que las arenas del “Bloque G” degradan menos que las arenas típicas planteadas por Seed – Idriss, (1970) y EPRI, (1993) pero existe gran correspondencia con la planteada por Taboada et. al. (2013). Ahora bien, en el caso del amortiguamiento se puede constatar que las arenas amortiguan menos que las planteadas por EPRI, (1993) y de forma similar a las de Seed-

Idriss, (1970) y Taboada et.al, (2013) De allí, la importancia de realizar los ensayos de caracterización dinámica de suelos.

Con los datos obtenidos para los diferentes estratos de suelo, en el caso de las gráficas de Degradación del “Módulo de Corte vs Deformación Angular” para suelos de características similares, se puede constatar que presentan características muy cercanas a las gráficas planteadas por los distintos autores mencionados de la literatura. Se observa que en los suelos cohesivos existe una mejor correspondencia con la formulación planteada por Vucetic & Dobry, (1991), en cambio en los suelos granulares, existe una mejor correspondencia con los datos planteados por Taboada et. al, (2013).

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar el ensayo (SPT) con sumo cuidado al momento de extraer las muestras, para que de este modo se conserven sus propiedades índices, además, de que el personal a realizar el ensayo sea capacitado.

Es muy importante el correcto almacenamiento de las muestras inalteradas de Shelby de 2" y 3", ya que de este modo aseguramos que la muestra no pierda características propias.

En los laboratorios se recomienda utilizar todos los implementos de seguridad durante la fase de realización de los ensayos, esto con el fin de salvaguardar la integridad del personal. asimismo, se recomienda a la Universidad contar con los implementos necesarios en los laboratorios, para que los estudiantes den un mejor uso del mismo.

Se recomienda tener precaución al momento de la extracción del espécimen de los tubos Shelby, para así, mantener la muestra inalterada. Se debe tomar correctamente las medidas de la muestra antes de ingresarlas al programa para obtener datos certeros.

Se debe procurar que la membrana se encuentre completamente sellada dentro de la cámara interna, ya que, si presenta fisuras, el ensayo no presentará valores reales.

El equipo debe estar completamente nivelado para la correcta toma de resultados.

Arrancar el programa de Torsión Cíclico con amplitudes muy bajas, con el fin de no alterar la muestra y obtener la gráfica correctamente.

Con fines de investigación, se recomienda a la Universidad, continuar con la investigación de "Bloque G", precisamente, con el análisis de respuesta en sitio e interacción suelo-estructura, ya que por medio de este proyecto técnico cuentan con los datos necesarios para realizarlo.

Para el futuro estudio de respuesta de sitio e interacción suelo estructura, se recomienda utilizar las curvas de caracterización dinámicas obtenidas en el presente estudio por estrato de suelo.

REFERENCIAS

Aguirre, V, Yépez, S. (2019). *MANUAL DE LABORATORIO PARA LOS ENSAYOS DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS SUELOS*. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]. Archivo digital.

<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17839>

Alviar, J. (2019). Estudio de propagación de ondas sísmicas - caso particular de sitio. En E. Inga (Ed.), *Aplicaciones e Innovación de la Ingeniería en Ciencia y Tecnología* (pp. 144-164). Abya-Yala.

ASTM C136 NTP 400.012. (2017). *Método de Ensayo Normalizado para Determinar el Análisis Granulométrico de los Áridos Finos y Gruesos*. Norma núm. C136 NTP 400.012.

<https://es.scribd.com/document/426835382/ASTM-D4318-17#>

ASTM DD2216-19. (2019). *Standar Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock*. Norma núm. DD2216-19.

<https://www.studocu.com/row/document/islamic-azad-university-central-tehran-branch/soil-mechanics/astm-d-2216-19-astm-d-2216-19/13220693>

ASTM D4318-17. (2017). *Método de Ensayo Estándar para Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad de Suelos*. Norma núm. D4318-17. Archivo Digital.

<https://es.scribd.com/document/426835382/ASTM-D4318-17#>

Baidya, D, Mallick, A (2020). Dynamic Modulus, Young's Modulus and Damping Ratio Measurements of Fly Ash from Fixed-Free Resonant Column Apparatus. *394(1)* 1-9.

<https://doi.org/10.53243/ISC2020-394>

Braja M. Das, G. V. Ramana. (2011). *Principles of Soil Dynamics*. Cengage Learning.

https://ftp.idu.ac.id/wpcontent/uploads/ebook/tdg/TERRAMECHANICS%20AND%20MOBILITY/epdf.pub_principles-of-soil-dynamics-second-edition.pdf

Braja M. Das. (2016). *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*. Springer.

<https://link.springer.com/book/10.1007/978-81-322-2629-1>

Camacho-Tauta, J., Reyes, O., Molina, F. (2014). Ensayo combinado columna resonante - bender elements para evaluar la rigidez del suelo. *Research Gate*, 140-147.

https://www.researchgate.net/publication/272164159_Ensayo_combinado_columna_resonante_-_bender_elements_para_evaluar_la_rigidez_del_suelo?enrichId=rgreq-e798e6280b3a6a6fcc3aaf6c3c374414-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI3MjE2NDElOTtBUzoxOTYwMjk1MzEwNzA0NjIAMSQyMzc0ODQ5MDQwOQ%3D%3D&el=1_x_2&esc=publicationCoverPdf

Candela, C. y Clevel, H. (2020). *Guía de laboratorio del ensayo de columna resonante utilizando el equipo TSH-100 de la Universidad Santo Tomás* [Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomas de Bogotá]. Archivo digital.

<https://repository.usta.edu.co/jspui/bitstream/11634/30965/1/2020carloscandela.pdf>

Carmona, J. (2014). *ESTUDIO DE RESULTADOS ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT) PARA EL FACTOR DE CORRECCIÓN (CN) Y EL ÁNGULO DE FRICCIÓN (ϕ) DEL SUELO USANDO DIFERENTES TIPOS DE CORRELACIONES*. [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia]. Archivo digital.

https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2572/1/SPT_factor_CN_ángulo_φ_diferentes_correlaciones.pdf

CEDERI (2006). RESPUESTA DINÁMICA DEL SUBSUELO Y EFECTOS DE SITIO. *ESTUDIOS DE AMENAZA, RESPUESTA DINÁMICA Y MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA PARA LA CIUDAD DE IBAGUÉ* (pp.1-52).

Cepeda, D. y Arenas, L. (2010). *Caracterización Dinámica de Suelos; Estado del Arte e Implementación del Laboratorio* [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander]. Archivo digital.

<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2010/133501.pdf>

Cuaical, R. (2015). *Sistema de auditoría informática para la entidad promotora de salud indígena Mallamas de Cumbal* [Tesis de pregrado, Universidad Regional Autónoma de los Andes UNIANDÉS de Tulcán]. Archivo digital.

<https://docplayer.es/96995423-Universidad-regional-autonoma-de-los-andes-uniandes.html>

- Darendeli, B., (2001). “Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves”. Doctoral dissertation, University of Texas.
- Flores, F, Taboada, V., Gonzalez, D., Cruz, D., Barrera, P., Dantal, V., (2018). “Normalized modulus reduction and damping ratio curves for Bay of Campeche carbonate sand”. Offshore Technology Conference.
- <http://dx.doi.org/10.4043/29010-MS>
- Garzón, J. y Gerena, I. (2016). *EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE UN SUELO COHESIVO RECONSTITUIDO, BAJO LA REPRODUCCIÓN EN EQUIPO TRIAXIAL DINÁMICO DE UNA FUENTE SÍSMICA CONOCIDA* [Tesis de pregrado, Universidad La Gran Columbia de Bogotá]. Archivo digital.
- https://repository.ugc.edu.co/bitstream/handle/11396/5208/Evaluación_propiedad_esdinámicas_suelo_cohesivo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Google Earth. (2021). *Ubicación de la Universidad Politécnica Salesiana Campus Sur*. Obtenido de <https://earth.google.com/web/>
- Google Maps. (2021). *Ubicación de la Universidad Politécnica Salesiana Campus Sur*. Obtenido de <https://www.google.com.ec/maps/@-0.1615789,-78.4845747,19z?hl=es>
- Juárez, E, Rodríguez, R. (2005) *Mecánica de Suelos-Fundamentos de la Mecánica de Suelos*, Limusa.
- https://suelos.milaulas.com/pluginfile.php/128/mod_resource/content/1/Mecanica%20de%20suelos%20-%20Juarez%20Badillo.pdf
- Kramer, S. L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Meg Weist. http://cee.sutec.ac.ir/sites/cee.sutec.ac.ir/files/Groups/khak/drrahnama/GEOTECHNICAL_EARTHQUAKE_ENGINEERING_KRAMER_1996.pdf
- Marengo, A. (2003). *METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN EN LA MAESTRIA DE ADMINISTRACIÓN DE LAS TELECOMUNICACIONES EN EL ITESM, CAMPUS MONTERREY: PRÁCTICAS ACTUALES, TENDENCIAS METODOLÓGICAS, LINEAS Y PROCESOS DE INVESTIGACIÓN*. [Tesis de maestría, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey]. Archivo digital.
- https://repositorio.tec.mx/bitstream/handle/11285/571031/DocsTec_1469.pdf?sequ
[u](#)

Martínez, E. (2017). *PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE LOS ESTÉRILES MINEROS DE LA MINA DE RIOTINTO, HUELVA-ESPAÑA* [Tesis de doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo digital.

https://oa.upm.es/44720/1/Eliana_Martinez_Rojas.pdf

Martínez, E., Molina, F., Ruge, J. (2018). Módulo de corte de relaves mineros a partir de ensayos de columna resonante. *DYNA*, 85(205), 310-318.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532018000200310&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Muñoz, A. (2017). *MANUAL DE LABORATORIO PARA DETERMINAR PARÁMETROS DINÁMICOS EN SUELOS, CON EL USO DE LOS EQUIPOS: TRIAXIAL CÍCLICO, COLUMNA RESONANTE Y ELEMENTOS PIEZOELÉCTRICOS BENDER*. [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. Archivo digital.

<http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/14000/PROYECTO%20DE%20TITULACIÓN%20ANDRÉS%20MUÑOZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Murcia, D. y Perdomo, L. (2012). *IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO DE COLUMNA RESONANTE*. Bogotá. [Tesis de pregrado, Universidad Militar Nueva Granada de Bogotá]. Archivo digital.

<https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/7191/MurciaLopezDelyAndrea2012.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Paucar, W. (2019). *CORRELACIÓN ENTRE EL COEFICIENTE DE COMPRESIBILIDAD VERSUS EL PORCENTAJE DE HUMEDAD, RELACION DE VACÍOS Y EL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS DEL BARRIO EL GARROCHAL*. Quito. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]. Archivo digital.

<file:///C:/Users/Aleja/Downloads/UPS-ST004044.pdf>

Park, D, Kishida, T (2018). Shear Modulus Reduction and Damping Ratio Curves for Earth Core Materials of Dams. 104(1) 250-258.

<http://dx.doi.org/10.1139/cgj-2017-0529>

Paz, M, Leigh, W. (2004). *Structural Dynamics: Theory and Computation*. Kluwer Academic Publishers.

<https://www.amazon.com/-/es/Mario-Paz/dp/1402076673>

Pilaguano, L, Reinoso, P. (2022). *VALIDACIÓN DE PROGRAMAS 1D (DEEPSOIL, CYCLIC 1D Y MIDAS GTS-NX), QUE REALIZAN ESTUDIOS DE PROPAGACIÓN DE ONDAS CON EL USO DE LA BASE DE DATOS SISMOLÓGICA DE JAPÓN (NIED), EN “COLUMNAS DE SUELOS” INSTRUMENTADAS EN EL TOPE Y LA BASE DEL DEPÓSITO*. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]. Archivo digital.

<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21900>

Sengara, W, Murali, Sulaiman, A (2020). Nonlinear Dynamic Analysis Adopting Effective Stress Approach of an Embankment Involving Liquefaction Potential. *156(1)* 1-9.

<http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202015602018>

Shankar, S, Murali, A y Dey, A. (2017). Evaluation of Dynamic Properties of Sandy Soil at High Cyclic Strains. *99(1)* 157-167.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.05.016>

Taboada, V, Cruz, D., Barrera, P., Espinosa, E., Carrasco, D., y Gan, K.C. (2018). Predictive equations of shear wave velocity for Bay of Campeche Clay. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA.

<http://dx.doi.org/10.4043/27541-MS>

Taboada, V, Cruz, D, Barrera, P, Renovato, D, Hernández, J & K C Gan (2018). “Predictive equations of shear wave velocity for Bay of Campeche Sand”. Proceedings of the third International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (3)1115–1120. Taylor & Francis Group.

<https://onepetro.org/OTCONF/proceedings-abstract/18OTC/2-18OTC/D021S021R007/179256>

Uribe, J. (2002). *Análisis de Estructuras*. ECOE (2nd ed.).

https://www.researchgate.net/publication/31754481_Analisis_de_estructuras_J_Uribe_Escamilla/link/5b92b9eaa6fdccfd5422cbc1/download

Villareal, G, Aguila, C. (2021). Soil-structure interaction and its influence on the seismic response of RC buildings. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 2021. 26(3): p. 426-471. Archivo digital.

<https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/riie/article/view/2336/1775>

Vucetic, M. and Dobry, R. (1991) Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response. Journal of Geotechnical Engineering, 117, 89-107.

[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:1\(89\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:1(89))

Wichtmann, T, Tryantafyllidis, T (2013). Effect of Uniformity Coefficient on G/Gmax and Damping Ratio of Uniform to Well-Graded Quartz Sands. *139*(1) 1-14..

[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000735](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000735)

Wykeham, F. (2013). 31-WF8500 Resonant Column & Torsional Shear Testing System Hardware Manual.

https://estliveupsedumy.sharepoint.com/:b:/g/personal/kmestanzac_est_ups_edu_e/c/EePM3eavaLFGsXoG1daWf00BvJXfWufEIWPziVhxPMhfGw?e=r6nVzk

ANEXOS

Anexo 1. Equipo de Ensayo de Penetración Estándar (SPT)

OBJETO	FOTOGRAFIA	DESCRIPCIÓN
Posteadora		Barra helicoidal que sirve para la limpieza del terreno y agrandar el pozo de perforación.
Cabo de Manila		Cuerda que permite sujetar al tripode junto con el Martillo Tipo Dona.
Tubos Shelby		Tubos de 2 y 3 pulgadas de diámetro utilizados para la recolección de muestras inalteradas de suelo.
Motor		Permite el funcionamiento del sistema SPT.
Martillo Tipo Dona		Sirve esencialmente para la perforación del suelo durante el SPT.
Trípode		Estructura de 3 a 5 metros que permite realizar perforaciones en SPT.
Cuchara Partida		Sirve para tomar muestras de suelos generalmente alteradas.
Tubería de Perforación		Tubería de acero que permite perforación a mayor profundidad mediante uniones.

Se presenta el equipo completo para la realización del ensayo SPT.

Anexo 2. Proceso de Ensayo de Penetración Estándar SPT

Paso 1



Preparación de Equipo

Paso 2



Montaje de Equipo

Paso 3



Limpieza con Barreno

Paso 4



Ensayo SPT

Paso 5



Trazado cada 15 cm.

Paso 6



Muestra Cuchara Partida

Paso 7



Ensayo con Shelby

Paso 8



Extracción Shelby

Paso 9



Muestras de Shelby

Anexo 3. Equipo Mínimo para Contenido de Humedad

OBJETO	FOTOGRAFIA	DESCRIPCIÓN
Balanza		Intrumento utilizado para medir la masa de objetos, con una capacidad de 2000g y sensibilidad de 0.01g.
Espátula		Espátula de hija flexible utilizada para mezclar la muestra de suelo.
Horno		Horno Termostáticamente controlado.
Cápsulas		Recipientes donde se coloca la muestra, capaz de soportar altas temperaturas.
Pipeta		Es un contenedor de agua, ayuda a humedecer la muestra en pocas cantidades.

Verificación de equipo para Contenido de Humedad.

Anexo 4. Equipo Mínimo Para Ensayo de Granulometría

OBJETO	FOTOGRAFIA	DESCRIPCIÓN
Balanza		Instrumento utilizado para medir la masa de objetos, con una capacidad de 2000g y sensibilidad de 0.01g.
Horno		Horno Termostáticamente controlado.
Tamiz		Tamices de diferentes abertura, 1/2", 3/8", No.4, No.10, No.40, No.200
Cápsulas		Recipientes donde se coloca la muestra, capaz de soportar altas temperaturas.
Mazo con Cabeza de Caucho		Se utiliza para disgregar las partículas de la muestra.

Verificación de equipo para Granulometría.

Anexo 5. Equipo Mínimo para Ensayo Límite Líquido

OBJETO	FOTOGRAFIA	DESCRIPCIÓN
Balanza		Instrumento utilizado para medir la masa de objetos, con una capacidad de 2000g y sensibilidad de 0.01g.
Espátula		Espátula de hija flexible utilizada para mezclar la muestra de suelo.
Cápsulas		Recipientes donde se coloca la muestra, capaz de soportar altas temperaturas.
Mazo con Cabeza de Caucho		Se utiliza para disgregar las partículas de la muestra.
Horno		Horno Termostáticamente controlado.
Cuchara de Casagrande		Consta de una cuchara o cazuela de bronce suspendida por un pasador que fija a un dispositivo de rotación por manivela o motor, que permite la elevación y caída de la cazuela (10mm) que produce un golpe de rebote en la base del aparato que es de caucho duro. El motor tiene que girar la leva a $2 \text{ rev/s} \pm 0,1$
Tamiz No.40		Malla con marco de acero, con malla de acero inoxidable que permite el paso de las partículas de la muestra.

Verificación de equipo para Límite Líquido.

Anexo 6. Equipo Mínimo para Ensayo Límite Plástico

OBJETO	FOTOGRAFIA	DESCRIPCIÓN
Balanza		Instrumento utilizado para medir la masa de objetos, con una capacidad de 2000g y sensibilidad de 0.01g.
Espátula		Espátula de hija flexible utilizada para mezclar la muestra de suelo.
Cápsulas		Recipientes donde se coloca la muestra, capaz de soportar altas temperaturas.
Mazo con Cabeza de Caucho		Se utiliza para disgregar las partículas de la muestra.
Horno		Horno Termostáticamente controlado.
Tamiz No.40		Malla con marco de acero, con malla de acero inoxidable que permite el paso de las partículas de la muestra.

Verificación de equipo para Límite Plástico.

Anexo 7. Ensayo de Contenido de Humedad



Muestras después de secado al horno para el contenido de humedad.

Ensayo de Granulometría



Lavado de muestra por el tamiz No. 40 y 200.



Muestras Retenidas en Tamices.



Tamizado de Muestras después del secado.

Anexo 8. Ensayo Límites de Atterberg



Disgregación de muestra para límites.



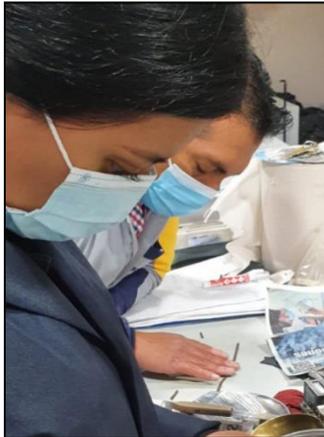
Mezcla de la Muestra con Agua.



Aplicación de Muestra en Cuchara de Casagrande



Toma de Muestra Cumplido el No Golpes.



Ensayo Límite Plástico.



Muestras en Horno Límites de Atterberg.

RESULTADOS DE ESTRATOS

Anexo 9. Resultados de Estrato I

Datos Estrato I

Localización: Cancha detrás del “Bloque G”, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campus Sur.

Fecha de Ensayo: 19/10/2022

Profundidad Estrato I: 0.50 - 1.55 m

Norma: ASTM D 2487

Masa de la Muestra (g)

Cápsula N°	B
Masa Cápsula (g)	58,40
Masa de Muestra Húmeda (g)	163,36
Masa de Muestra Seca (g)	141,19

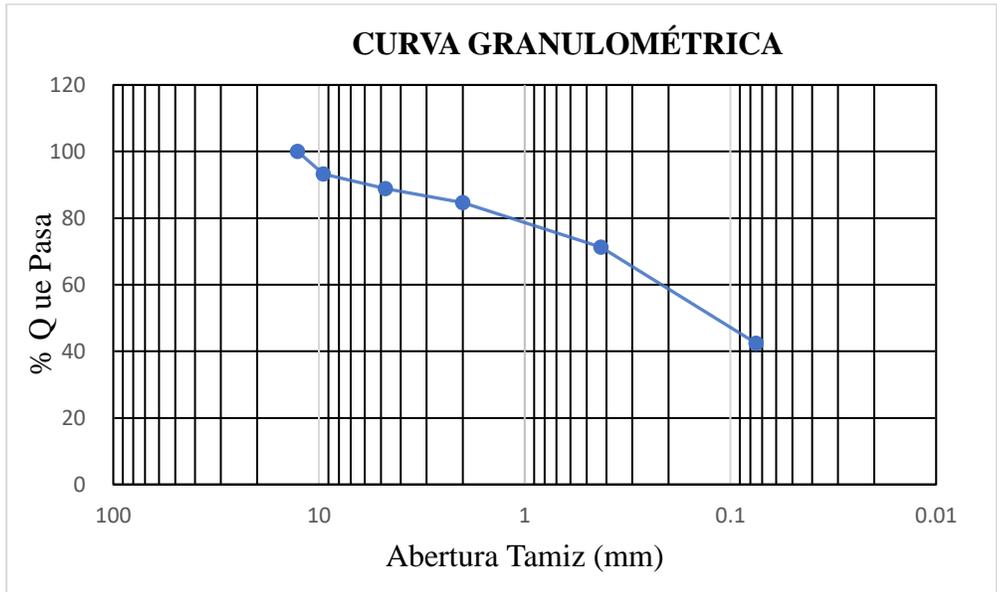
Contenido de Humedad (%)

Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
246	27,55	85,61	78,08	14,90
22	27,81	76,61	69,7	16,50
Promedio % Humedad				15,70

Análisis Granulométrico

Tamiz N°	Abertura (mm)	Masa Retenida	Masa Retenida Acumulada	% Ret.	% Ret. Acumulado	% Pasa
1/2"	12,7	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,53	9,52	9,52	6,74	6,74	93,26
N° 4	4,75	6,27	15,79	4,44	11,18	88,82
N° 10	2	5,91	21,70	4,19	15,37	84,63
N° 40	0,425	18,9	40,60	13,39	28,75	71,25
N° 200	0,075	40,72	81,32	28,84	57,59	42,41
Comprobación				100,00		

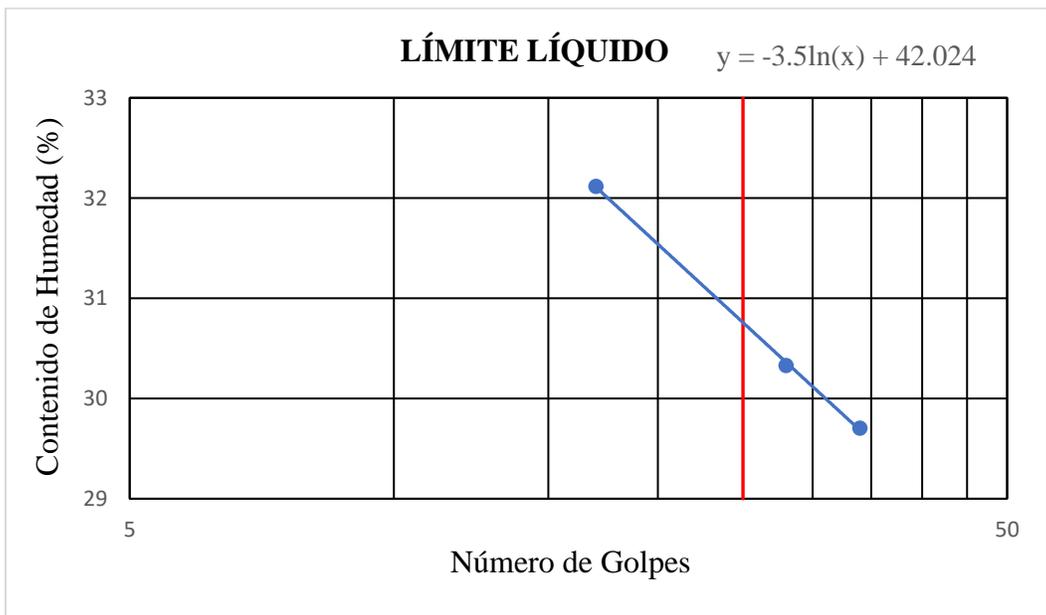
Curva Granulométrica



Límite Líquido (LL)

Nº de Golpes	Cápsula Nº	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
34	79	21,43	34,18	31,26	29,70
28	34	21,22	30,33	28,21	30,33
17	64	21,25	30,30	28,10	32,12
LL (y = -3.5ln(x) + 42.024); x= 25 golpes					30,76

Grafica Límite Líquido (LL)



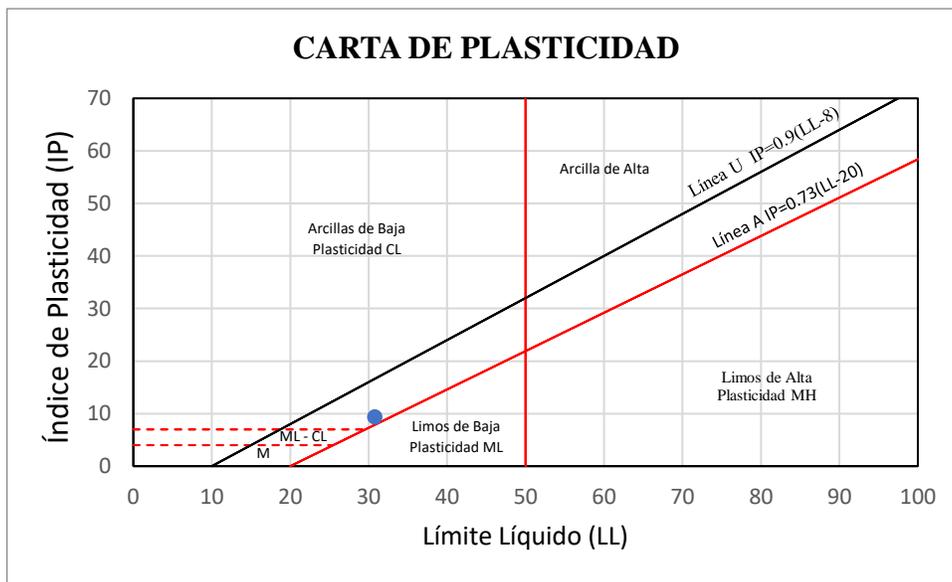
Límite Plástico (LP)

Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
79	21,42	23,09	22,80	21,01
39	21,08	22,62	22,35	21,26
78	21,28	22,56	22,33	21,90
Promedio % Humedad				21,39

Índice de Plasticidad (IP)

Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
30,76	21,39	9,36

Grafica Carta de Plasticidad



La clasificación SUCS es: Arcilla Orgánica de Baja Plasticidad (OL).

Anexo 10. Resultados de Estrato II

Datos Estrato II

Localización: Cancha detrás del “Bloque G”, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campus Sur.

Fecha de Ensayo: 25/10/2022

Profundidad Estrato II: 2.55 - 3.00 m

Norma: ASTM D 2487

Masa de la Muestra (g)

Cápsula N°	C
Masa Cápsula (g)	73,24
Masa de Muestra Húmeda (g)	203,68
Masa de Muestra Seca (g)	161,70

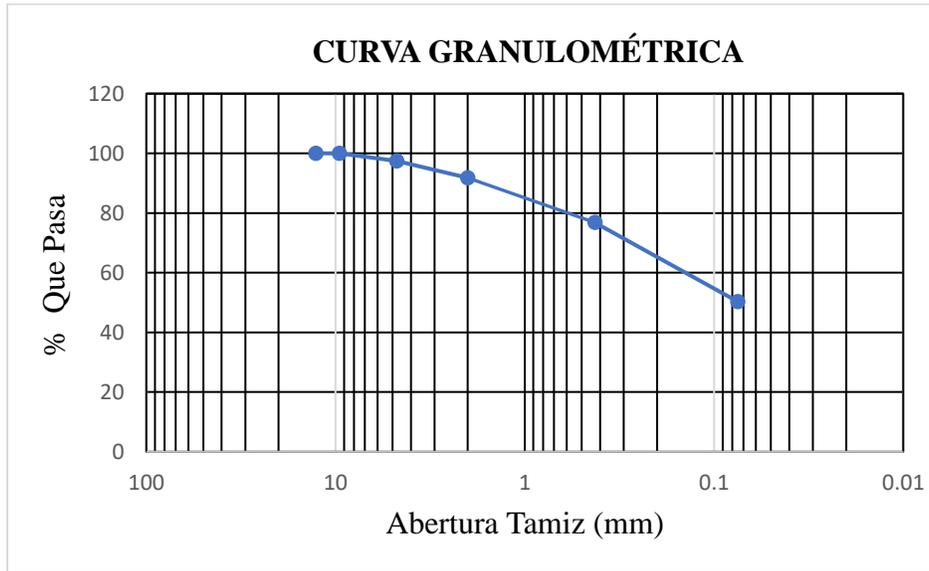
Contenido de Humedad (%)

Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
26M	22,44	67,53	58,39	25,42
224	23,5	85,71	72,68	26,49
Promedio % Humedad				25,96

Análisis Granulométrico

Tamiz N°	Abertura (mm)	Masa Retenida	Masa Retenida Acumulada	% Ret.	% Ret. Acumulado	% Pasa
1/2"	12,7	0,00	0,00	0,0	0,0	100,00
3/8"	9,53	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
N° 4	4,75	4,06	4,06	2,51	2,51	97,49
N° 10	2	9,25	13,31	5,72	8,23	91,77
N° 40	0,425	24,22	37,53	14,98	23,21	76,79
N° 200	0,075	42,8	80,33	26,47	49,68	50,32
Comprobación				100,00		

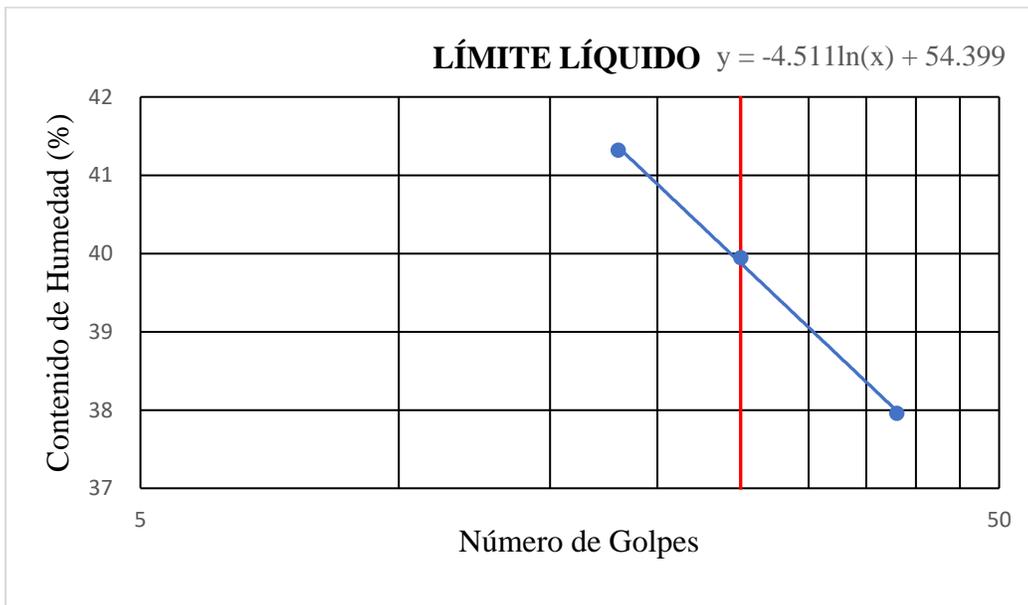
Curva Granulométrica



Límite Líquido (LL)

N° de Golpes	Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
38	7	21,24	26,51	25,06	37,96
25	24	21,18	26,47	24,96	39,95
18	55	21,16	28,65	26,46	41,32
LL ($y = -4,511 \cdot \ln(25) + 54,399$); $x = 25$ golpes					39,88

Grafica Límite Líquido (LL)



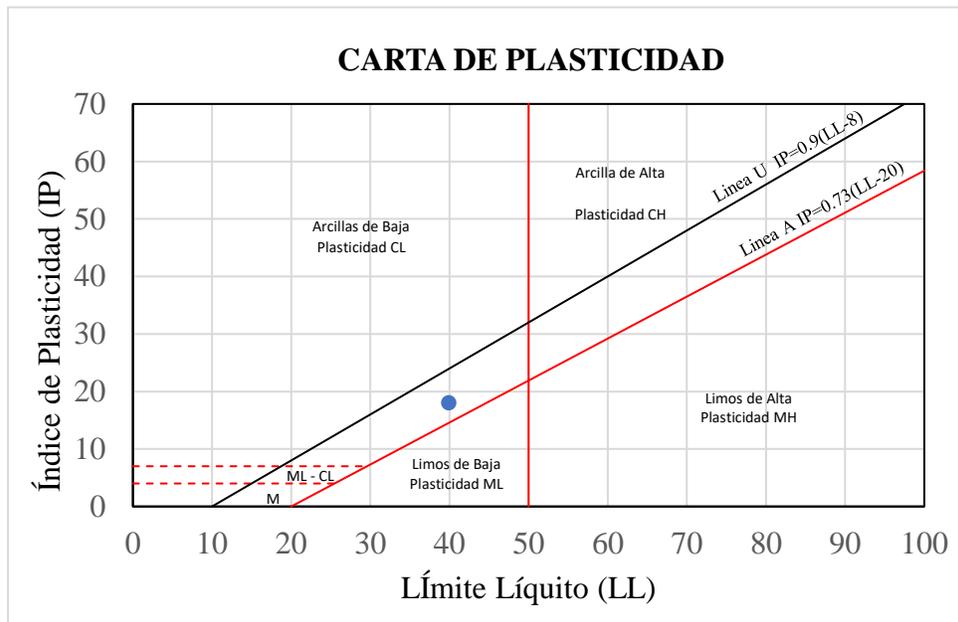
Límite Plástico (LP)

Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
84	21,39	23,07	22,77	21,74
40	21,75	23,45	23,15	21,43
73	21,62	23,75	23,36	22,41
Promedio % Humedad				21,86

Índice de Plasticidad (IP)

Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
39,88	21,86	18,02

Grafica Carta de Plasticidad



La clasificación SUCS es: Arcilla de Baja Plasticidad (CL).

Anexo 11. Resultados de Estrato III

Datos Estrato III

Localización: Cancha detrás del “Bloque G”, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campus Sur.

Fecha de Ensayo: 27/10/2022

Profundidad Estrato III: 3.50 - 4.00 m

Norma: ASTM D 2487

Masa de la Muestra (g)

Cápsula N°	F1
Masa Cápsula (g)	71,45
Masa de Muestra Húmeda (g)	245,19
Masa de Muestra Seca (g)	202,33

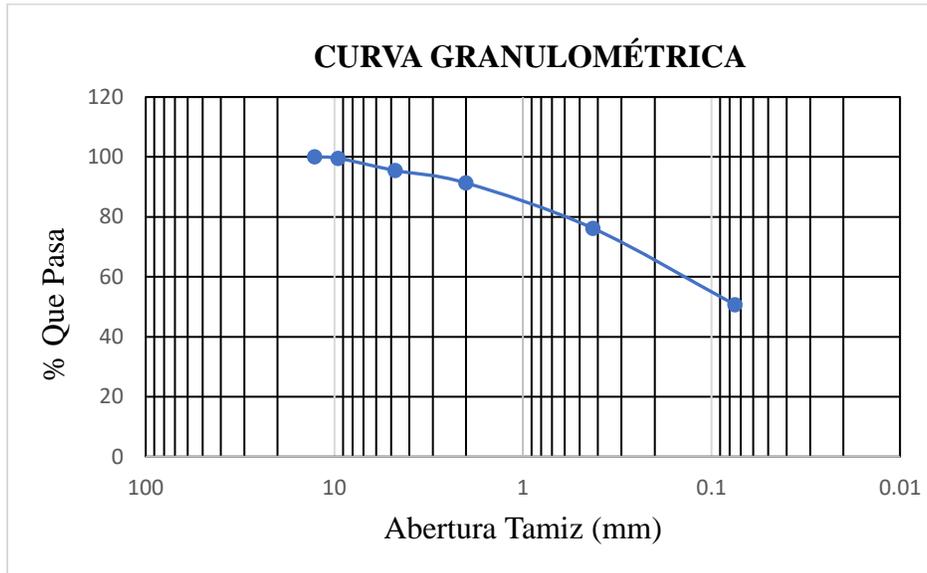
Contenido de Humedad

Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
245	27,73	97,29	85,02	21,42
62	28,63	93,01	81,86	20,95
Promedio % Humedad				21,18

Análisis Granulométrico

Tamiz N°	Abertura (mm)	Masa Retenida	Masa Retenida Acumulada	% Ret.	% Ret. Acumulado	% Pasa
1/2"	12,7	0	0	0	0	100,00
3/8"	9,53	0,9	0,9	0,44	0,44	99,56
N° 4	4,75	8,26	9,16	4,08	4,53	95,47
N° 10	2	8,44	17,6	4,17	8,70	91,30
N° 40	0,425	30,57	48,17	15,11	23,81	76,19
N° 200	0,075	51,62	99,79	25,51	49,32	50,68
Comprobación				100,00		

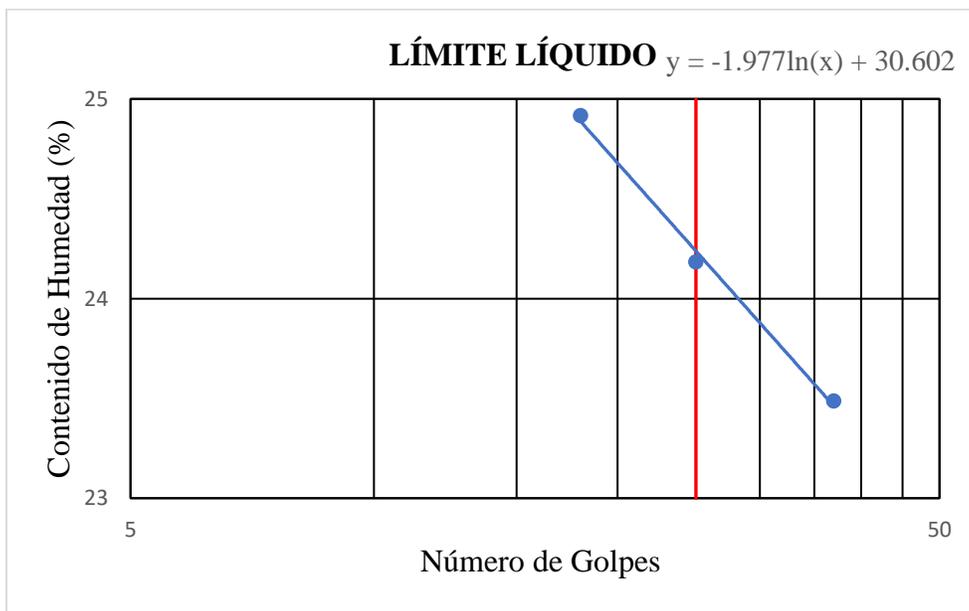
Curva Granulométrica



Límite Líquido (LL)

Nº de Golpes	Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
37	59	21,55	30,12	28,49	23,49
25	39	21,10	30,24	28,46	24,18
18	5	21,18	28,65	27,16	24,92
LL ($y = -1,977 \cdot \ln(x) + 30,602$); $x = 25$ golpes					24,24

Grafica Límite Líquido (LL)



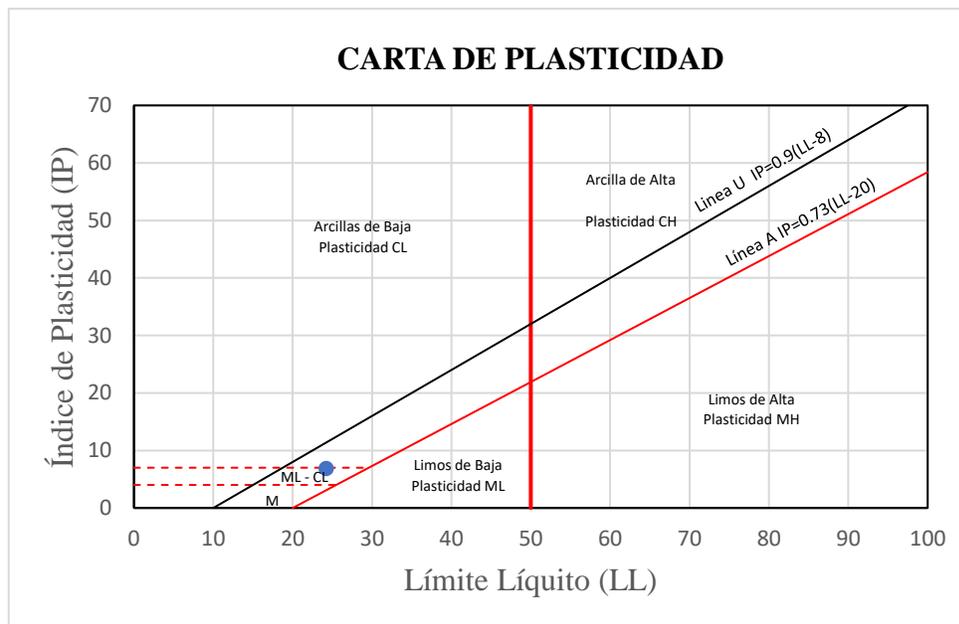
Límite Plástico (LP)

Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
50	21,32	23,03	22,78	17,12
12	21,04	23,06	22,76	17,44
49	21,12	23,07	22,78	17,47
Promedio % Humedad				17,35

Índice de Plasticidad (IP)

Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
24,24	17,35	6,89

Gráfica Carta de Plasticidad



La clasificación SUCS es: Arcilla Limosa de Baja Plasticidad (ML-CL).

Anexo 12. Resultados de Estrato IV

Datos Estrato IV

Localización: Cancha detrás del “Bloque G”, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campus Sur.

Fecha de Ensayo: 01/11/2022

Profundidad Estrato IV: 5.00 - 6.00 m

Norma: ASTM D 2487

Masa de la Muestra (g)

Cápsula N°	A
Masa Cápsula (g)	58,8
Masa de Muestra Húmeda (g)	203,66
Masa de Muestra Seca (g)	161,46

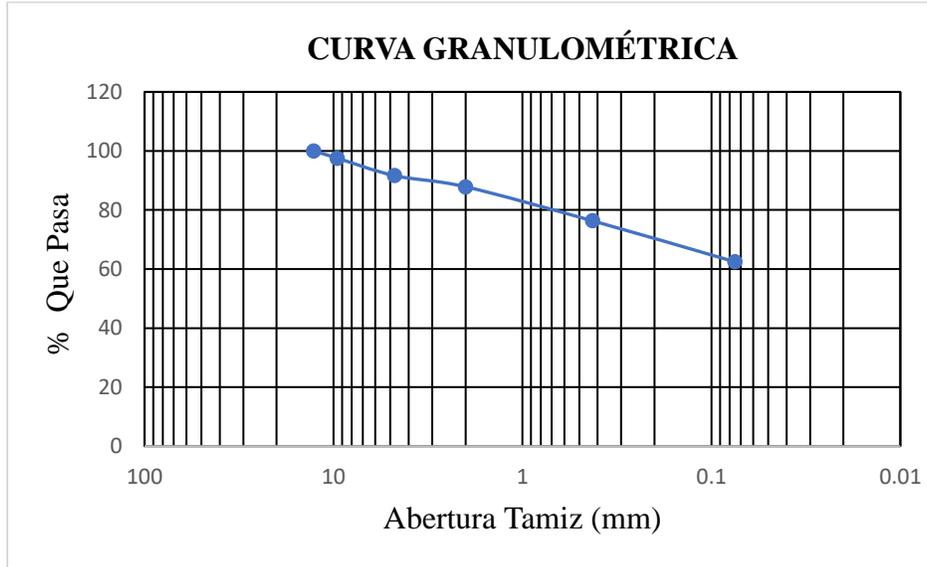
Contenido de Humedad

Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
5	28,29	82,56	71,26	26,30
306	27,73	89,56	76,81	25,98
Promedio % Humedad				26,14

Análisis Granulométrico

Tamiz N°	Abertura (mm)	Masa Retenida	Masa Retenida Acumulada	% Ret.	% Ret. Acumulado	% Pasa
1/2"	12,7	0	0	0	0	100,00
3/8"	9,53	3,95	3,95	2,45	2,45	97,55
N° 4	4,75	9,55	13,5	5,91	8,36	91,64
N° 10	2	6,1	19,6	3,78	12,14	87,86
N° 40	0,425	18,61	38,21	11,53	23,67	76,33
N° 200	0,075	22,44	60,65	13,90	37,56	62,44
Comprobación				100,00		

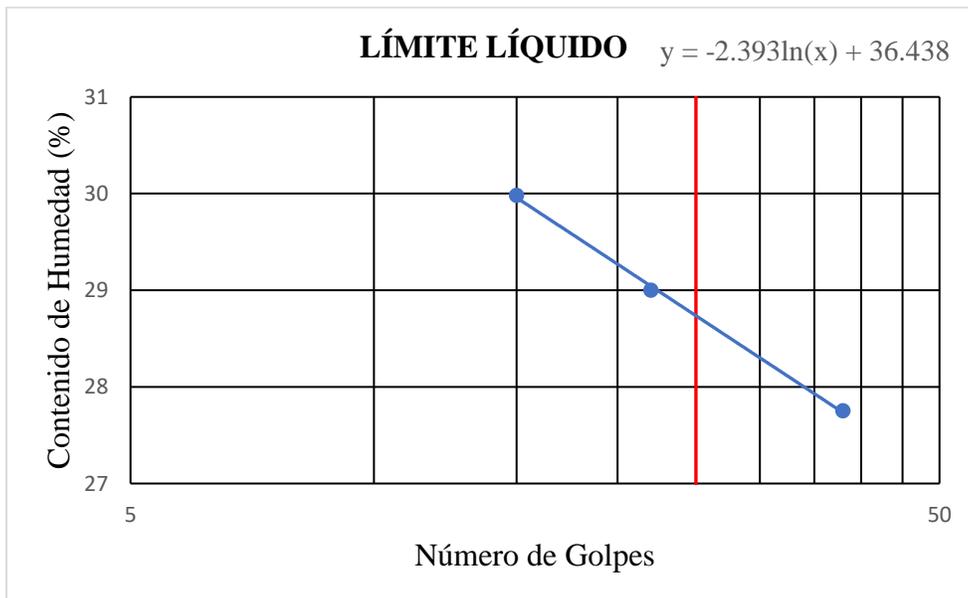
Curva Granulométrica



Límite Líquido (LL)

N° de Golpes	Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
38	39	21,12	26,46	25,30	27,75
22	7	21,24	28,98	27,24	29,00
15	70	21,04	28,54	26,81	29,98
LL ($y = -2.393\ln(x) + 36.438$); $x = 25$ golpes					28,74

Grafica Límite Líquido (LL)



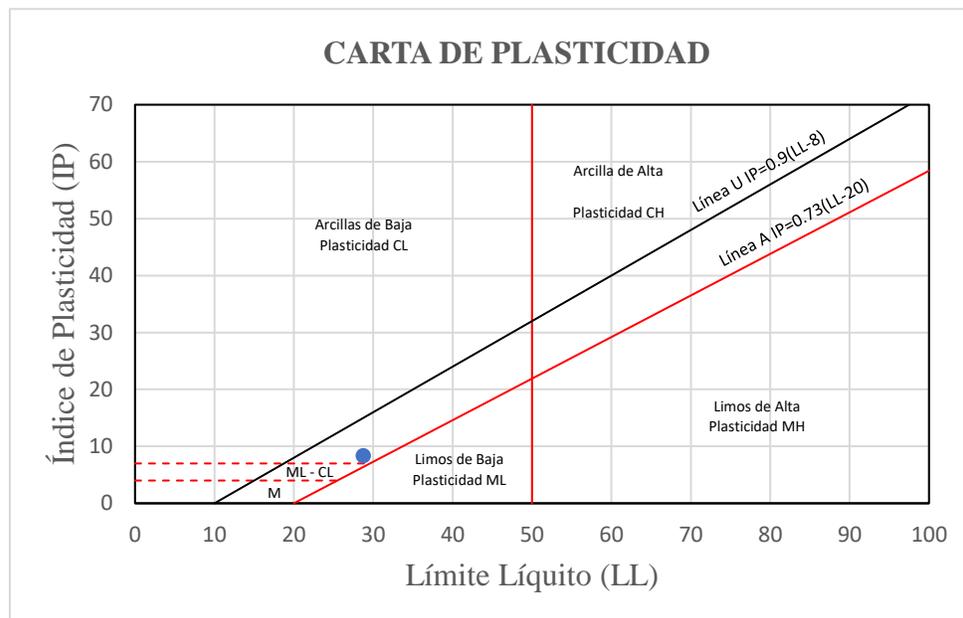
Límite Plástico (LP)

Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
18	21,39	23,82	23,41	20,30
94	21,48	23,13	22,85	20,44
89	21,41	23,36	23,03	20,37
Promedio % Humedad				20,37

Índice de Plasticidad (IP)

Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
28,74	20,37	8,37

Grafica Carta de Plasticidad



La clasificación SUCS es: Arcilla Arenosa de Baja Plasticidad (CL).

Anexo 13. Resultados de Estrato V

Datos Estrato V

Localización: Cancha detrás del “Bloque G”, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campus Sur.

Fecha de Ensayo: 03/11/2022

Profundidad Estrato V: 8.50 - 9.00 m

Norma: ASTM D 2487

Masa de la Muestra (g)

Cápsula N°	A
Masa Cápsula (g)	58,94
Masa de Muestra Húmeda (g)	157,17
Masa de Muestra Seca (g)	123,86

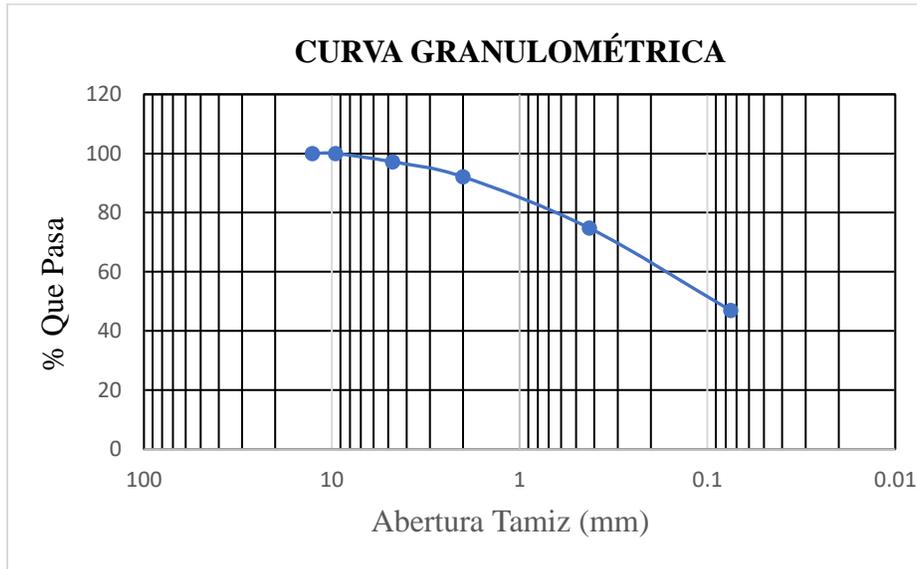
Contenido de Humedad (%)

Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
300	24,43	91,33	77,06	27,11
1MI	24,35	95,69	80,67	26,67
Promedio % Humedad				26,89

Análisis Granulométrico

Tamiz N°	Abertura (mm)	Masa Retenida	Masa Retenida Acumulada	% Ret.	% Ret. Acumulado	% Pasa
1/2"	12,7	0	0	0	0	100,00
3/8"	9,53	0	0	0,00	0,00	100,00
N° 4	4,75	3,52	3,52	2,84	2,84	97,16
N° 10	2	6,26	9,78	5,05	7,90	92,10
N° 40	0,425	21,47	31,25	17,33	25,23	74,77
N° 200	0,075	34,54	65,79	27,89	53,12	46,88
Comprobación				100,00		

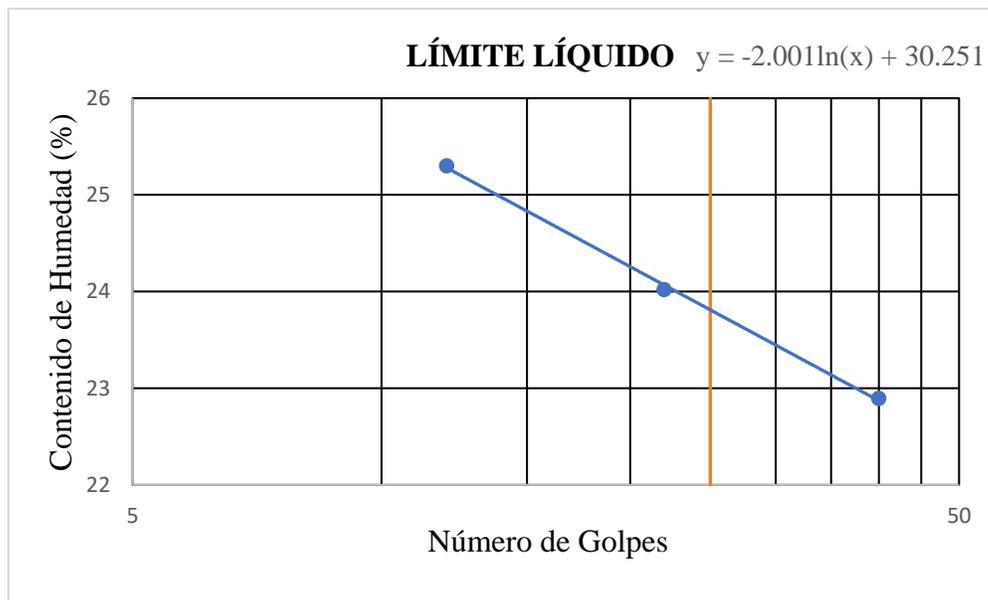
Curva Granulométrica



Límite Líquido (LL)

Nº de Golpes	Cápsula Nº	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
40	49	21,14	34,56	32,06	22,89
22	65	21,19	35,75	32,93	24,02
12	3	21,49	34,96	32,24	25,30
LL ($y = -2.001\ln(x) + 30.251$); $x = 25$ golpes					23,81

Grafica Límite Líquido (LL)



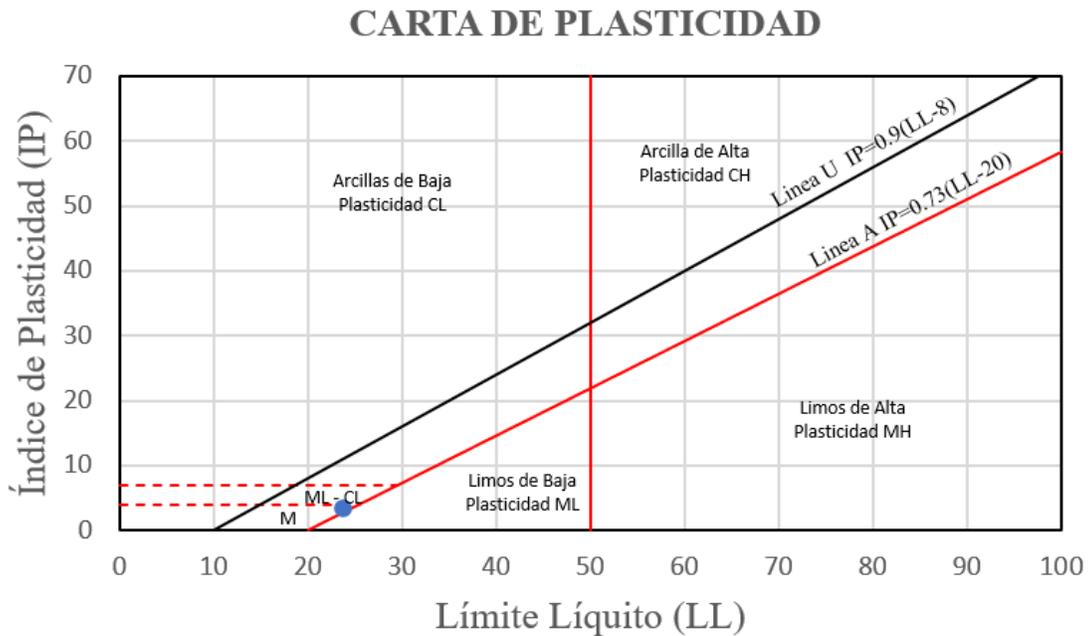
Límite Plástico (LP)

Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
24	21,18	25,53	24,80	20,17
55	21,16	24,07	23,57	20,75
75L	21,34	24,18	23,69	20,85
Promedio % Humedad				20,59

Índice de Plasticidad (IP)

Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
23,81	20,59	3,22

Grafica Carta de Plasticidad



La clasificación SUCS es: Arena Limosa de Baja Plasticidad (SM).

Anexo 14. Resultados de Estrato VI

Datos Estrato VI

Localización: Cancha detrás del “Bloque G”, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campus Sur.

Fecha de Ensayo: 09/11/2022

Profundidad Estrato VI: 9.50 - 10.00 m

Norma: ASTM D 2487

Masa de la Muestra (g)

Cápsula N°	B
Masa Cápsula (g)	58,4
Masa de Muestra Húmeda (g)	180,05
Masa de Muestra Seca (g)	136,41

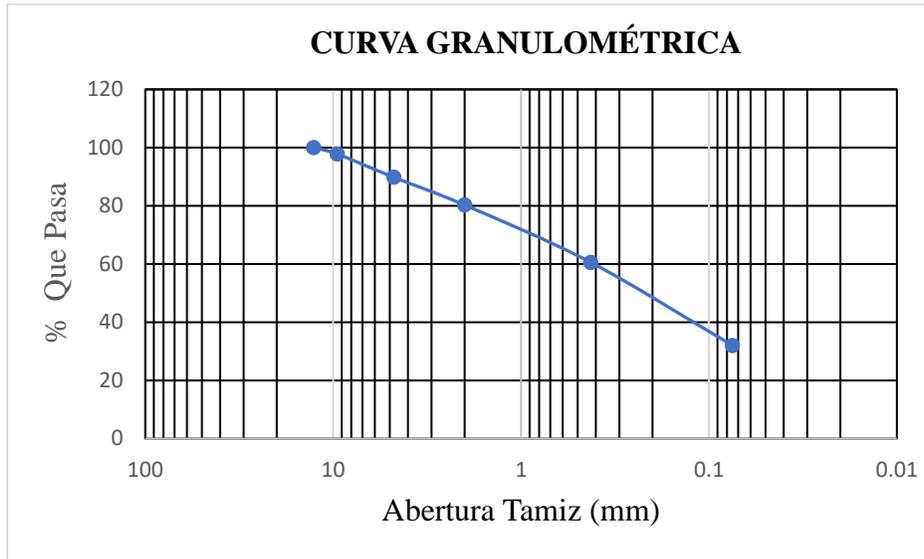
Contenido de Humedad

Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
74	27,68	79,35	67,32	30,35
343	24,18	81,59	67,14	33,64
Promedio % Humedad				31,99

Análisis Granulométrico

Tamiz N°	Abertura (mm)	Masa Retenida	Masa Retenida Acumulada	% Ret.	% Ret. Acumulado	% Pasa
1/2"	12,7	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,53	2,96	2,96	2,17	2,17	97,83
N° 4	4,75	10,97	13,93	8,04	10,21	89,79
N° 10	2	12,97	26,9	9,51	19,72	80,28
N° 40	0,425	26,92	53,82	19,73	39,45	60,55
N° 200	0,075	38,88	92,7	28,50	67,96	32,04
Comprobación				100,00		

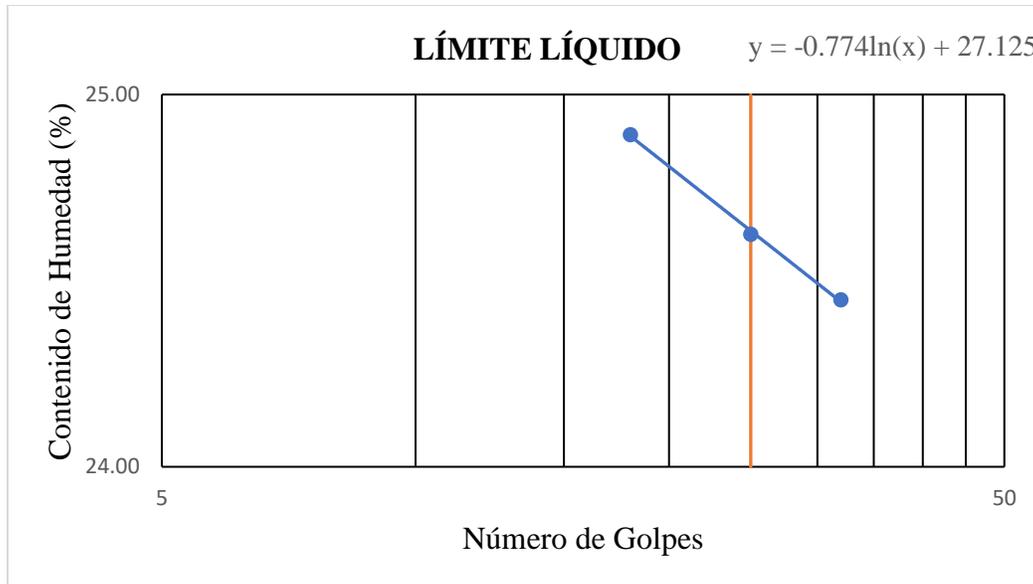
Curva Granulométrica



Límite Líquido (LL)

Nº de Golpes	Cápsula Nº	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
32	59	21,54	35,64	32,87	24,45
25	5	21,18	31,96	29,83	24,62
18	25	21,23	32,82	30,51	24,89
LL (y = -0.774x + 27.125); x= 25 golpes					24,63

Grafica Límite Líquido (LL)



Límite Plástico (LP)

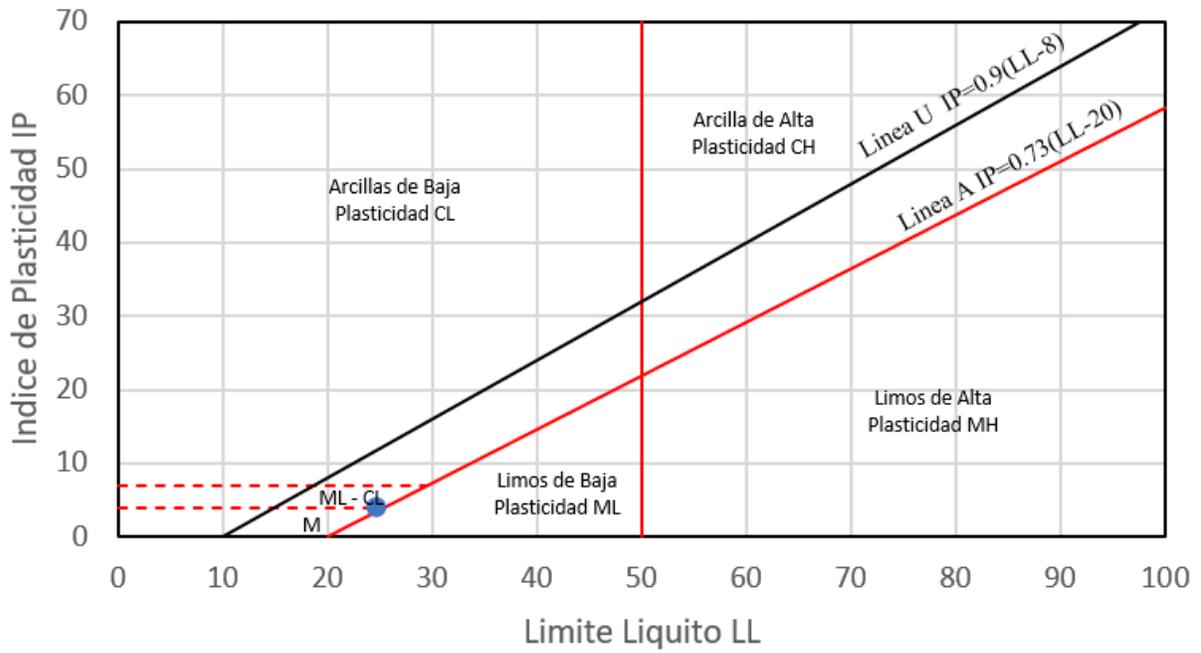
Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
7	21,24	23,79	23,31	23,19
70	21,04	23,48	23,10	18,45
39	21,11	24,46	23,89	20,50
Promedio % Humedad				20,71

Índice de Plasticidad (IP)

Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
24,63	20,71	3,92

Grafica Carta de Plasticidad

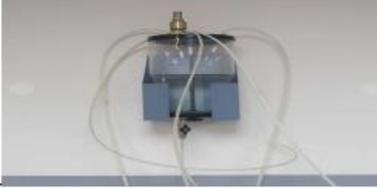
CARTA DE PLASTICIDAD



La clasificación SUCS es: Arena Limosa de Baja Plasticidad (SM).

Anexo 15. Equipo “Columna Resonante y Cortante Torsional Cíclico”

OBJETO	FOTOGRAFIA	DESCRIPCIÓN
Muestra de Suelo		Es la muestra que se va a ensayar en el equipo de RC - TS.
Muestreador		Sirve para obtener muestras con diámetro, tamaño y peso adecuados para el ensayo.
Extractor de Tubos		Sirve para extraer la muestra del tamaño apropiado para la ejecución del ensayo.
Gata		Sirve para extraer la muestra dentro del aparato de muestreo.
Membranas		Son hechas de latex, sirven para aislar la muestra del agua interna o externa de cámara.
Ordenador		Sirve para arrancar el programa del ensayo y monitorear sus valores.
Máquina RC TS		Marca los valores en los que se encuentran distintos parámetros del ensayo como presión de aire, presión de cámara, contrapresión.
Bomba de Vacío		Sirve principalmente para la eliminación de vacíos (aire) del tanque de agua.

OBJETO	FOTOGRAFIA	DESCRIPCIÓN
Arco de Sierra		Sirve para el corte de tubos de PVC para el ensayo de RC - TS.
Equipo RC - TS		Equipo de Columna Resonante y Corte Torsional Cíclico.
Tanque de Agua		Sirve para proveer de agua al equipo de RC - TS.
Destornilladores		Sirven para ajustar el equipo durante el montaje de la muestra.
Ligas Elásticas		Sirven para el correcto sellado de las membranas, de modo que no existan fugas de agua.
Aspirador		Sirve para ajustar la membrana con el menor aire posible.
Cabezal		Permite ajustar la muestra al Equipo de RC - TS.

Nota. Se presenta el equipo completo para la realización del ensayo de Columna Resonante y Corte Torsional Cíclico. Elaborado por: Los autores.

Anexo 16. Proceso de Montaje para Ensayo de Columna Resonante y Corte Torsional Cíclico

Paso 1



Corte de Shelby cada 15 cm

Paso 2



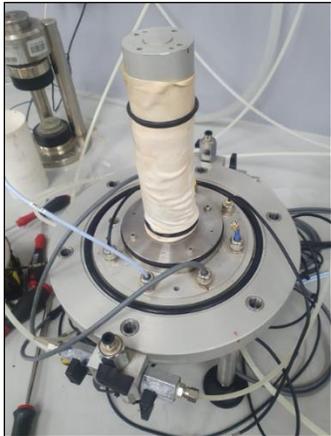
Extracción de Muestra

Paso 3



Extracción en Muestreador

Paso 4



Montaje con Membrana

Paso 5



Colocación Cámara Interna

Paso 6



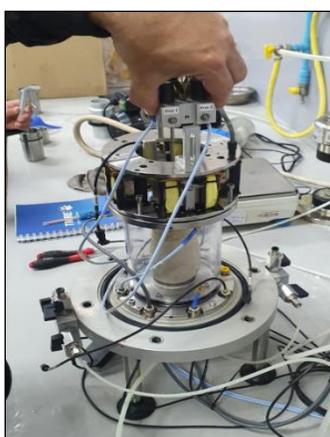
Colocación Marco Flotante

Paso 7



Colocación Sensores
Axiales

Paso 8



Colocación Sensores
Motion

Paso 9



Colocación Cilindro
Acrílico

Paso 12

Paso 11

RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE SUELO

Se muestran los resultados del ensayo de Columna Resonante, obtenidos con muestras inalteradas de suelo, mediante tubos Shelby.

Anexo 19. Resultados de Estrato I

Datos Estrato I

Localización: Cancha detrás del “Bloque G”, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campus Sur.

Fecha de Ensayo: 12/12/2022

Profundidad Muestra I: 1.55 - 2.20 m

Corrección de Número de Golpes del Ensayo SPT

No SPT	Factor de Corrección σ'_{o-pa} (kN/m ²)	CN	$\eta_H(\%)$	η_B	η_S	η_R	N60
9	100	1	45	1	1	0.75	5.063

Datos de la Muestra

hi (m)	h (mm)	D (mm)	W (gm)	A (cm ²)	V (cm ³)
2.20	102.5	49.85	328.47	19.52	200.05

Coefficiente de Empuje en Reposo para Arcillas

IP (%)	K _o
9.36	0,479

Cálculo de Esfuerzo Vertical y Horizontal del Terreno

Peso Específico γ (kgf/cm ³)	σ'_v (kgf/m ²)	σ'_h (kgf/m ²)
1.657,607	3612.22	1731.38

Cálculo de Esfuerzo Confinante Promedio de Sitio para Estrato I

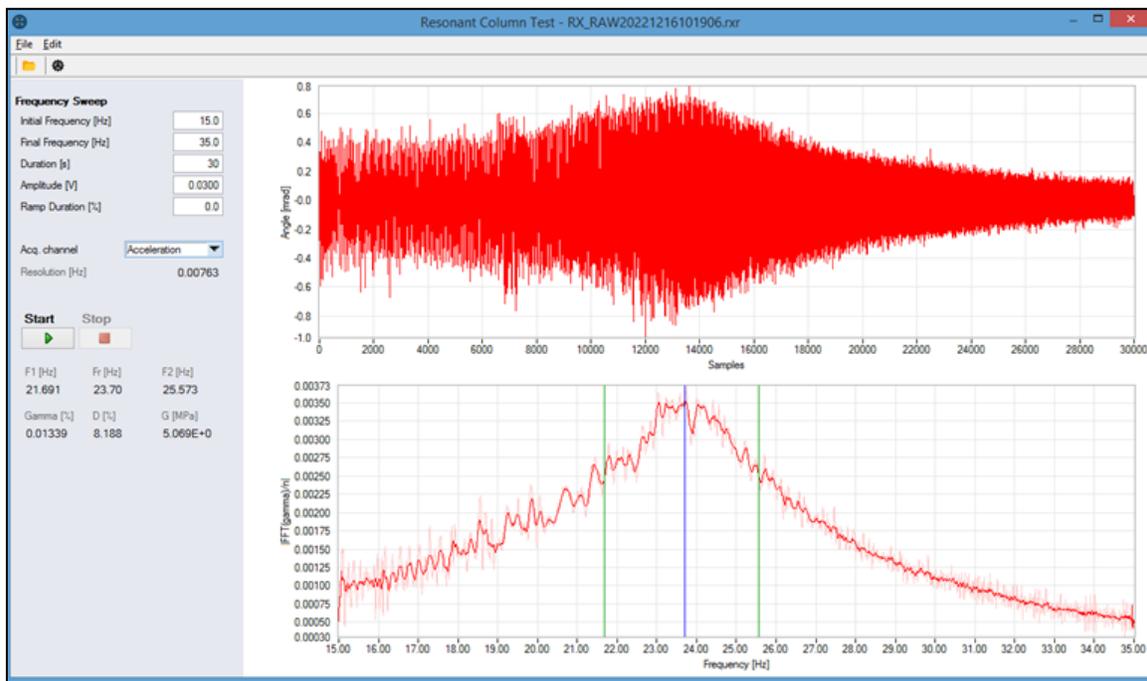
$$\sigma'_m = \frac{\sigma'v + 2 * \sigma'h}{3} = 23.13 \text{ kPa}$$

Programa Columna Resonante

Esfuerzo Confinante Promedio y Módulo de Corte G para Estrato

Esfuerzo Confinante Promedio (kPa)	G (Mpa)
23.13	5,89

Gráfica de Ensayo Columna Resonante



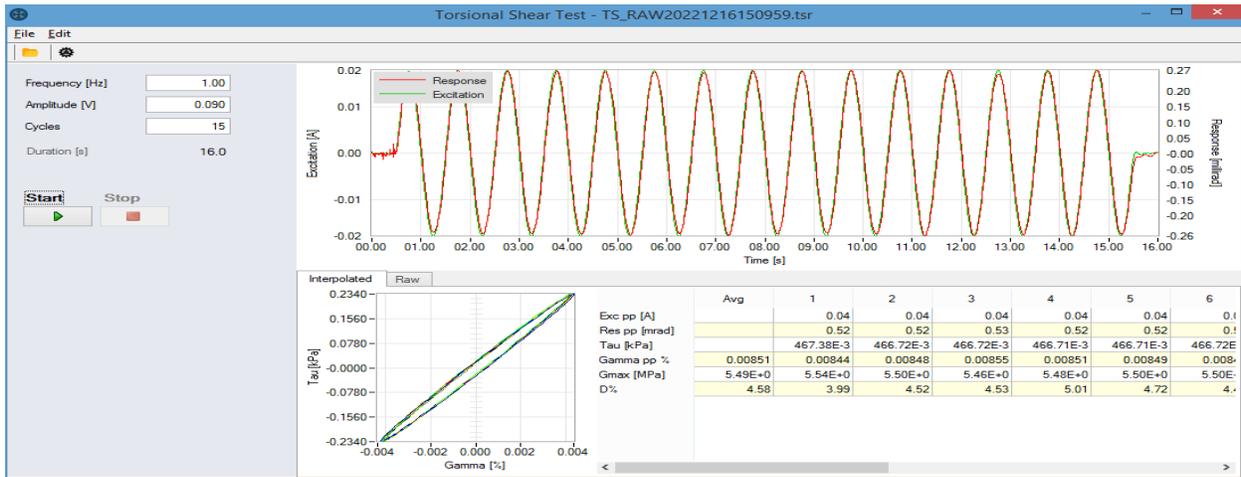
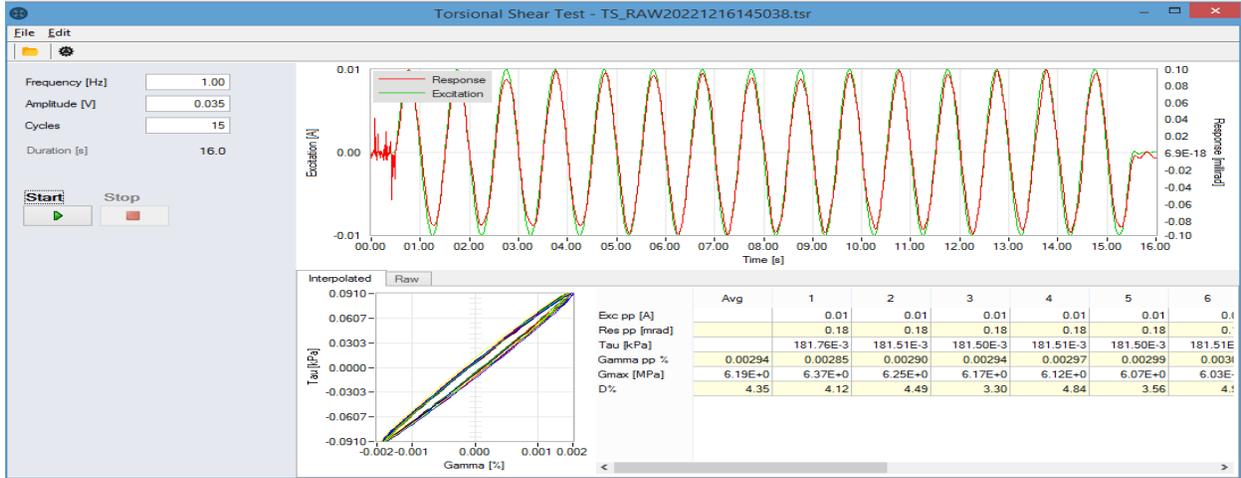
Programa Corte Torsional Cíclico

Valores Corte Torsional Cíclico

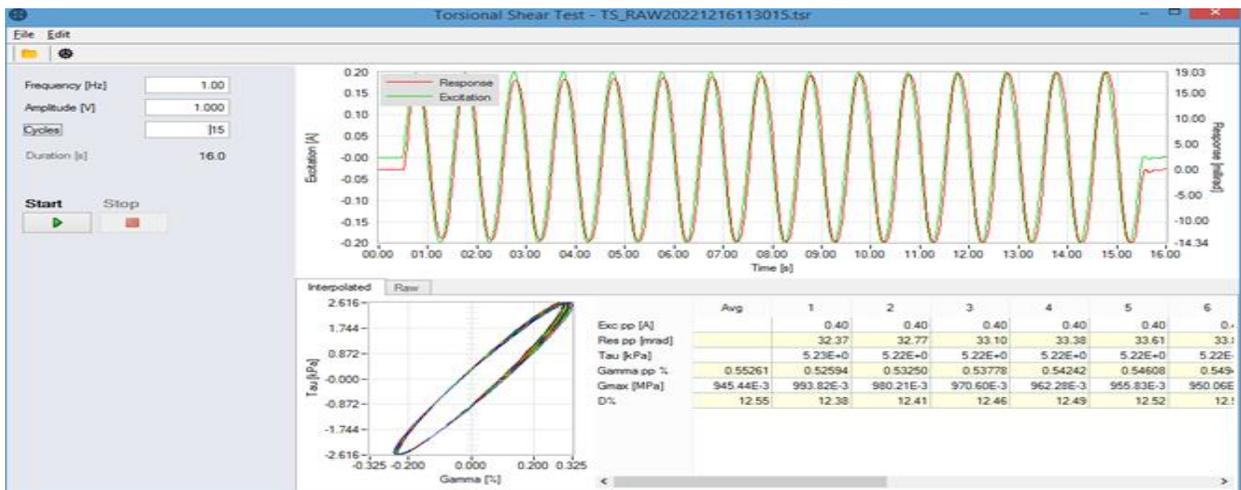
Amplitud (V)	D %	Gmax Mpa	Deformación γ (%)	G/Gmax
0,04	4,50	5,89	0,00352	1,0000
0,05	4,51	5,88	0,00397	0,9983
0,055	4,55	5,85	0,00485	0,9932
0,06	4,59	5,80	0,00612	0,9847
0,07	4,66	5,72	0,00755	0,9711
0,09	4,77	5,58	0,00948	0,9474
0,10	4,85	5,53	0,01002	0,9389
0,15	5,37	5,06	0,01537	0,8591
0,20	5,94	4,68	0,02217	0,7946
0,25	6,52	4,31	0,03011	0,7317
0,30	7,09	3,95	0,0394	0,6706
0,35	7,78	3,62	0,05023	0,6146
0,40	8,78	3,33	0,06241	0,5654
0,45	10,03	2,91	0,08049	0,4941
0,50	11,35	2,49	0,10444	0,4228
0,55	12,15	2,21	0,12903	0,3752
0,60	12,77	1,98	0,15753	0,3362
0,65	13,20	1,74	0,19343	0,2954
0,70	13,57	1,54	0,23549	0,2615
0,75	13,89	1,37	0,28375	0,2326
0,80	14,18	1,22	0,34035	0,2071
0,85	14,42	1,09	0,40376	0,1851
0,90	14,69	0,90	0,52058	0,1523
0,95	14,77	0,83	0,59596	0,1409
1,00	14,94	0,76	0,68605	0,1290
1,10	15,04	0,70	0,81951	0,1185
1,20	15,70	0,63	0,98375	0,1076
1,30	16,17	0,61	1,1150	0,1027
1,50	15,69	0,62	1,24689	0,1053
1,60	15,73	0,62	1,32524	0,1053

Se presentan valores obtenidos en el programa de Corte Torsional Cíclico, tales como amortiguamiento, deformación y Gmax.

Gráficas de Ensayo Corte Torsional Cíclico Estrato I



+



Anexo 20. Resultados de Estrato II

Datos Estrato II

Localización: Cancha detrás del “Bloque G”, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campus Sur.

Fecha de Ensayo: 15/12/2022

Profundidad Estrato II: 3.00 - 3.50 m

Corrección de Número de Golpes del Ensayo SPT

No SPT	Factor de Corrección σ'_{o-pa} (kN/m ²)	CN	$\eta_H(\%)$	η_B	η_S	η_R	N60
12	100	1	45	1	1	0.75	6.75

Datos de la Muestra

h_i (m)	h (mm)	D (mm)	W (gm)	A (cm ²)	V (cm ³)
3.50	100.5	50.10	371.2	19.714	198.121

Coefficiente de Empuje en Reposo para Arcillas

IP (%)	Ko
18.02	0,516

Cálculo de Esfuerzo Vertical y Horizontal del Terreno

Peso Específico γ (kgf/m ³)	σ'_v (kgf/m ²)	σ'_h (kgf/m ²)
1873.60	6047..90	3118.81

Cálculo de Esfuerzo Confinante Promedio de Sitio para Estrato II

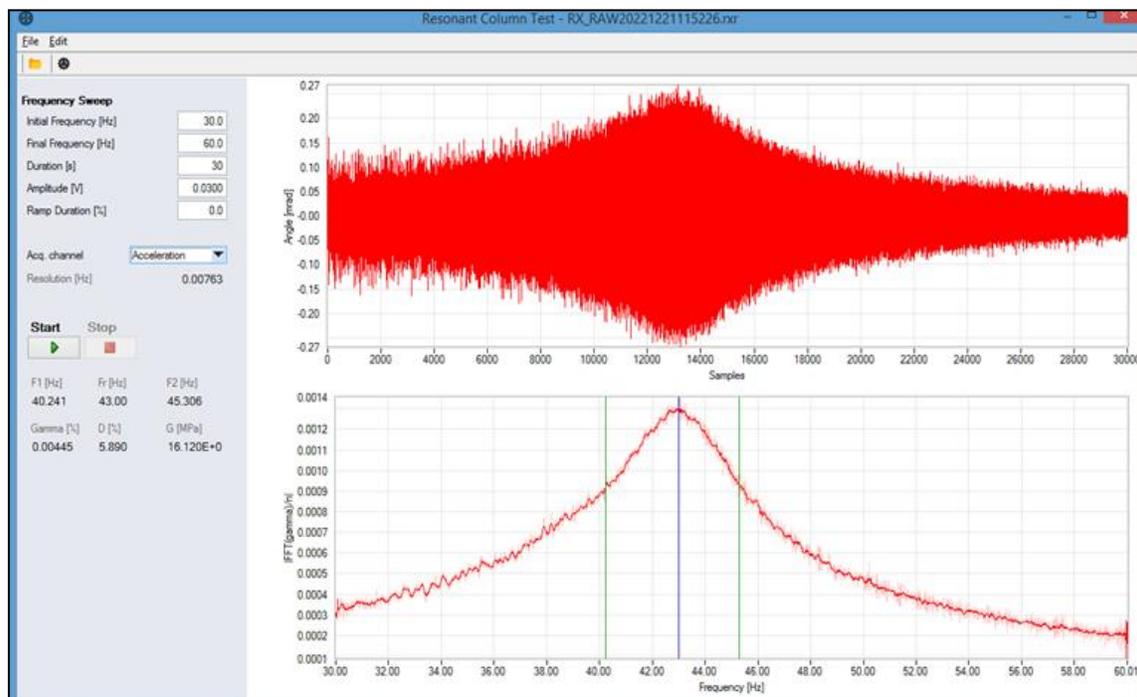
$$\sigma'_m = \frac{\sigma'v + 2 * \sigma'h}{3} = 40.16 \text{ kPa}$$

Programa Columna Resonante

Esfuerzo Confinante Promedio y Módulo de Corte G para Estrato II

Esfuerzo Confinante Promedio (kPa)	G (Mpa)
40.16	12.62

Gráfica de Ensayo Columna Resonante

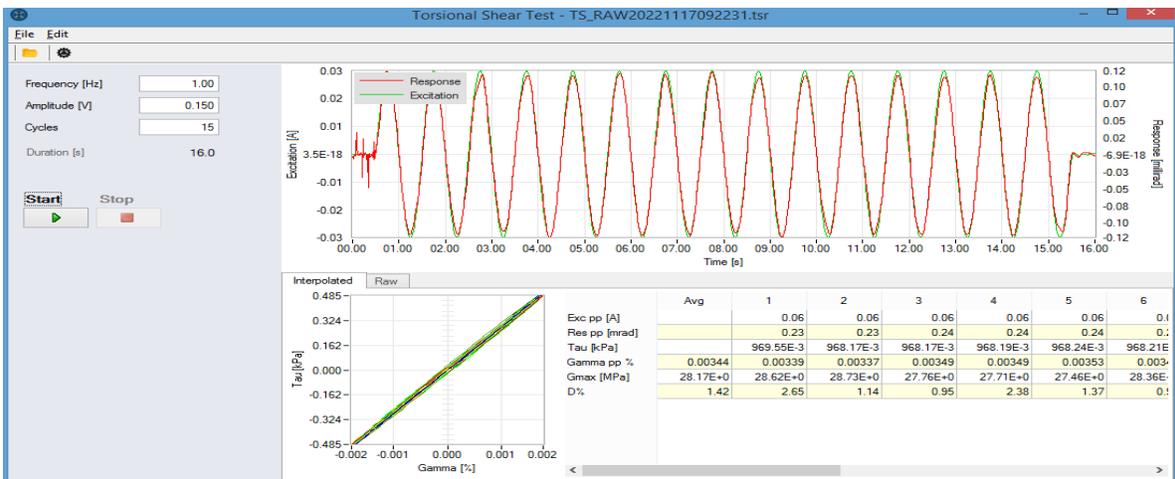
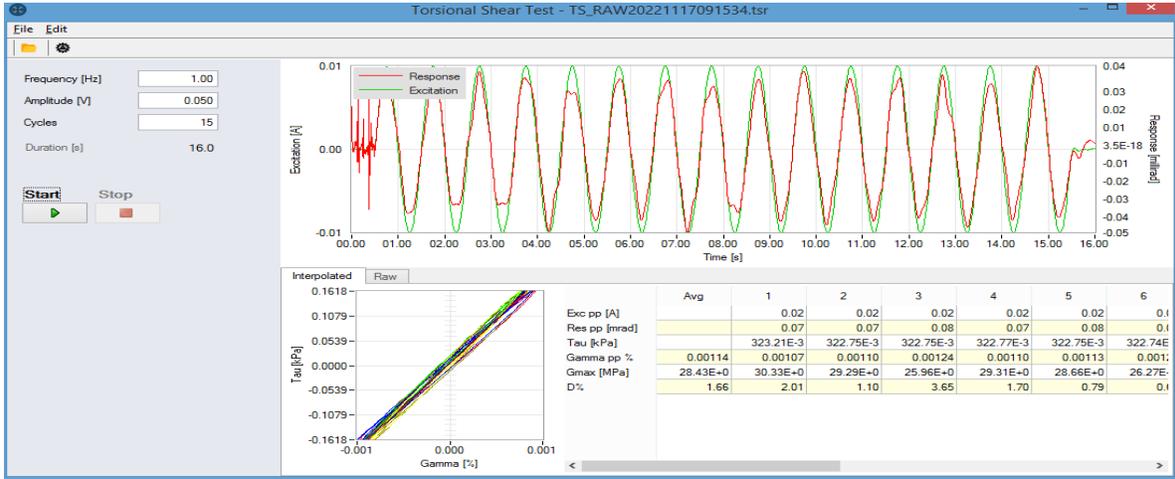


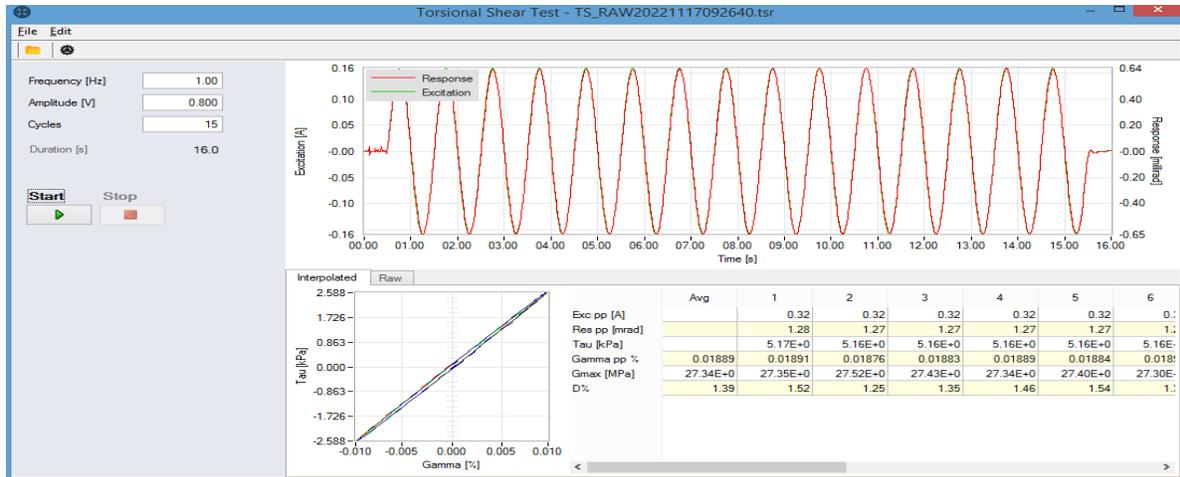
Programa Corte Torsional Cíclico
Valores Corte Torsional Cíclico

Amplitud (V)	D %	Gmax Mpa	Deformación γ (%)	G/Gmax
0,01	3,45	12,62	0,00042	1
0,02	3,501	12,42	0,00082	0,984152139
0,03	3,54	12,2	0,00125	0,966719493
0,04	3,58	12,01	0,00165	0,951664025
0,05	3,65	11,82	0,00218	0,936608558
0,07	3,75	11,66	0,00285	0,923930269
0,1	3,87	11,36	0,00439	0,900158479
0,15	4	11,05	0,0068	0,875594295
0,2	4,12	10,8	0,00898	0,855784469
0,25	4,22	10,52	0,01194	0,833597464
0,3	4,32	10,3	0,01463	0,816164818
0,35	4,38	10,21	0,01604	0,809033281
0,4	4,45	9,98	0,01911	0,790808241
0,5	4,68	9,61	0,02502	0,761489699
0,6	4,95	9,15	0,03296	0,72503962
0,7	5,11	8,79	0,03912	0,696513471
0,8	5,35	8,37	0,04756	0,663232964
0,9	5,75	7,79	0,05921	0,617274168
1	6,31	7,31	0,07283	0,579239303
1,5	8,77	5,74	0,13429	0,454833597
2	11,98	4,09	0,25244	0,324088748
2,2	14,35	3,21	0,37548	0,254358162
2,5	16,19	2,73	0,47042	0,216323296
2,7	16,82	2,63	0,51245	0,208399366
2,8	17,5	2,39	0,59998	0,189381933
2,9	17,68	2,3	0,64556	0,182250396
3	17,72	2,32	0,64854	0,183835182
3,2	17,82	2,22	0,72852	0,175911252
3,5	17,75	2,12	0,84496	0,167987322
4	17,73	2,02	0,92774	0,160063391
4,3	17,78	1,92	1,018935	0,152139461
4,5	17,51	1,91	1,254785	0,151347068
5	17,45	1,85	1,385215	0,14659271

Se presentan valores obtenidos en el programa de Corte Torsional Cíclico, tales como amortiguamiento, deformación y Gmax.

Gráficas de Ensayo Corte Torsional Cíclico





Anexo 21. Resultados de Estrato III

Datos Estrato III

Localización: Cancha detrás del “Bloque G”, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campus Sur.

Fecha de Ensayo: 20/12/2022

Profundidad Muestra III: 4.50 - 5.00 m

Corrección de Número de Golpes del Ensayo SPT

No SPT	Factor de Corrección σ'_{o-pa} (kN/m ²)	CN	η_H (%)	η_B	η_S	η_R	N60
24	100	1	45	1	1	0.85	15.30

Datos de la Muestra

h_i (m)	h (mm)	D (mm)	W (gm)	A (cm ²)	V (cm ³)
5	100,1	50	359.43	19,64	198,31

Coefficiente de Empuje en Reposo para Arcillas

IP (%)	Ko
6.89	0,469

Cálculo de Esfuerzo Vertical y Horizontal del Terreno

Peso Específico γ (kgf/m ³)	σ'_v (kgf/m ²)	σ'_h (kgf/m ²)
1212.44	8766.56	4110.97

Cálculo de Esfuerzo Confinante Promedio de Sitio para Estrato III

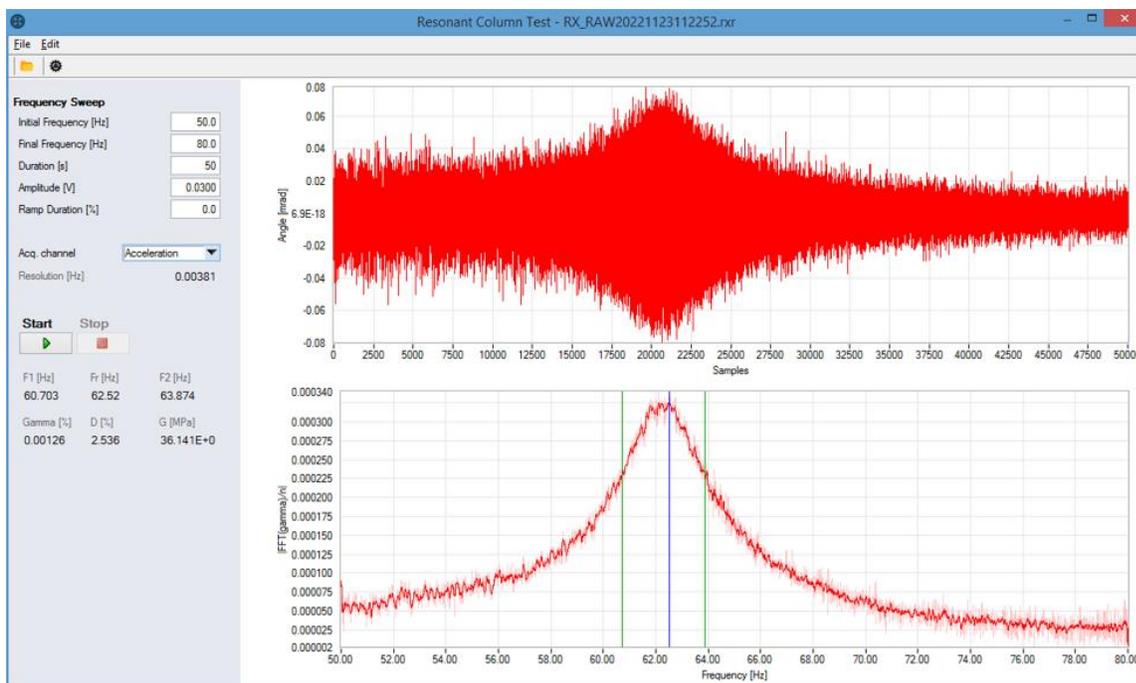
$$\sigma'_m = \frac{\sigma'_v + 2\sigma'_h}{3} = 55.53 \text{ kPa}$$

Programa Columna Resonante

Esfuerzo Confinante Promedio y Módulo de Corte G para Estrato III

Esfuerzo Confinante Promedio (kPa)	G (Mpa)
55.53	27.84

Gráfica de Ensayo Columna Resonante



Programa Corte Torsional Cíclico

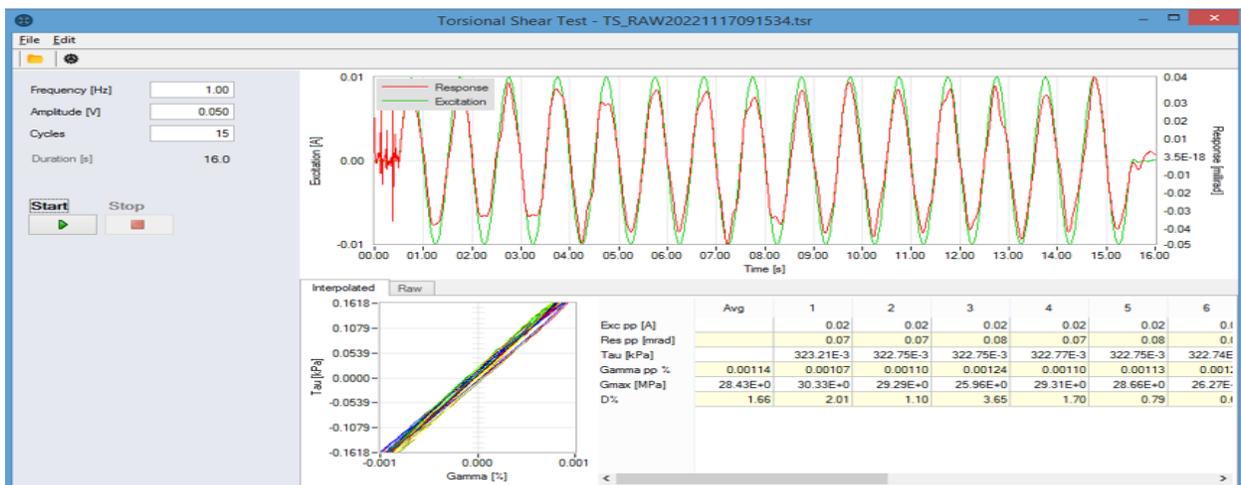
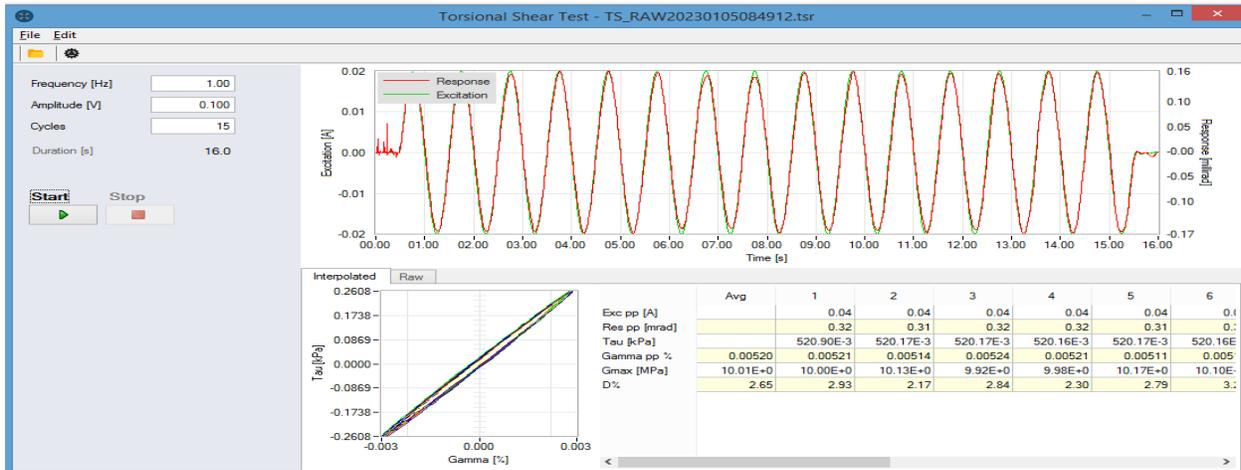
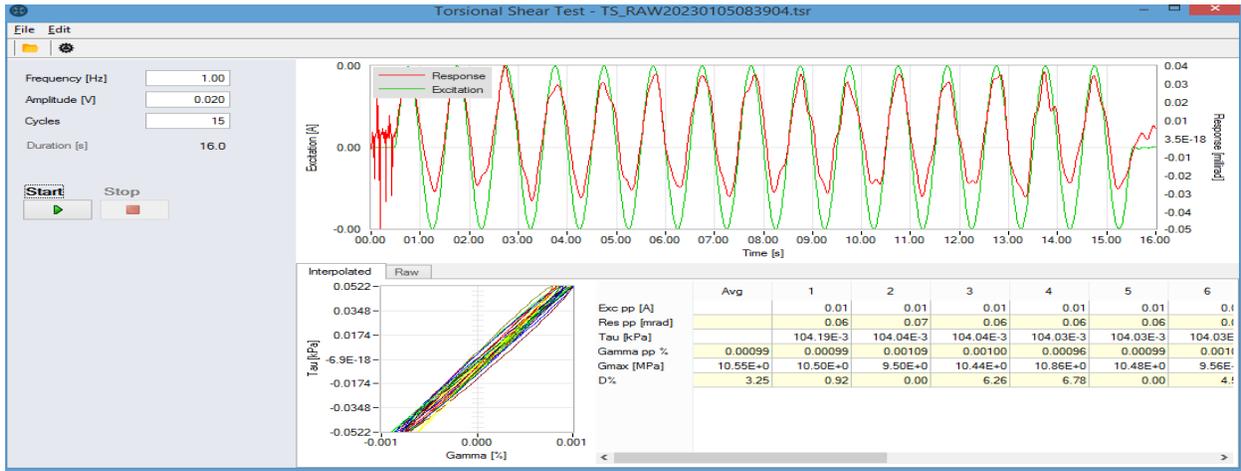
Valores Corte Torsional Cíclico

Amplitud (V)	D %	Gmax Mpa	Deformación γ (%)	G/Gmax
0,1	2,5	27,84	0,00184	1
0,2	2,22	27,64	0,00369	0,992816092
0,3	2,25	27,51	0,00482	0,988146552
0,4	2,41	27,03	0,00851	0,970905172
0,5	2,52	26,85	0,00971	0,964439655
1	3,22	24,9	0,02052	0,894396552
1,5	4,02	22,87	0,03348	0,821479885
2	4,95	20,3	0,05024	0,729166667
2,2	5,29	19,06	0,05887	0,684626437
2,4	5,72	17,98	0,06809	0,645833333
2,8	6,64	16,18	0,08834	0,581178161
3	7,32	14,79	0,10352	0,53125
3,2	7,75	13,84	0,11525	0,497126437
3,6	9,12	11,86	0,15231	0,426005747
4	11,58	9,45	0,21734	0,339439655
4,5	15,27	6,29	0,37621	0,225933908
4,8	17,44	3,87	0,64633	0,139008621
4,9	18,3	2,8	0,9031	0,100574713
5	19	2,3	1,11925	0,082614943
5,1	19,94	2,07	1,13547	0,074353448
5,2	21,66	2,12	1,15854	0,076149425
5,5	22,83	2,18	1,16875	0,078304598
5,6	28,68	2,44	1,18168	0,087643678
5,7	20,23	2,86	1,0265	0,102729885
6	21,13	2,28	1,35401	0,081896552
6,2	22,71	2,21	1,43419	0,079382184
6,5	23,84	2,31	1,44866	0,082974138
6,8	22,79	2,38	1,46839	0,085488506
7	22,92	2,45	1,47231	0,088002874
7,5	23,45	2,64	1,4635	0,094827586
0	22,79	2,38	1,46839	0,085488506

Se presentan valores obtenidos en el programa de Corte Torsional Cíclico, tales como

amortiguamiento, deformación y Gmax.

Gráficas de Ensayo Corte Torsional Cíclico



Anexo 22. Resultados de Estrato V

Datos Estrato V

Localización: Cancha detrás del “Bloque G”, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campus Sur.

Fecha de Ensayo: 04/01/2023

Profundidad Muestra V: 8.50 – 9.00 m

Corrección de Número de Golpes del Ensayo SPT

No SPT	Factor de Corrección σ'_{o-pa} (kN/m ²)	CN	$\eta_H(\%)$	η_B	η_S	η_R	N60
66	100	1	45	1	1	0,95	47,03

Datos de la Muestra

h_i (m)	h (mm)	D (mm)	W (gm)	A (cm ²)	V (cm ³)
9	97,5	49,9	396.28	19,56	191,6

Coefficiente de Empuje en Reposo para Arcillas

\emptyset	K_o
44.55	0.298

Cálculo de Esfuerzo Vertical y Horizontal del Terreno

Peso Específico γ_{sum} (kgf/m ³)	σ'_v (kgf/m ²)	σ'_h (kgf/m ²)
1078.29	13815.84	4123.98

Cálculo de Esfuerzo Confinante Promedio de Sitio para Estrato V

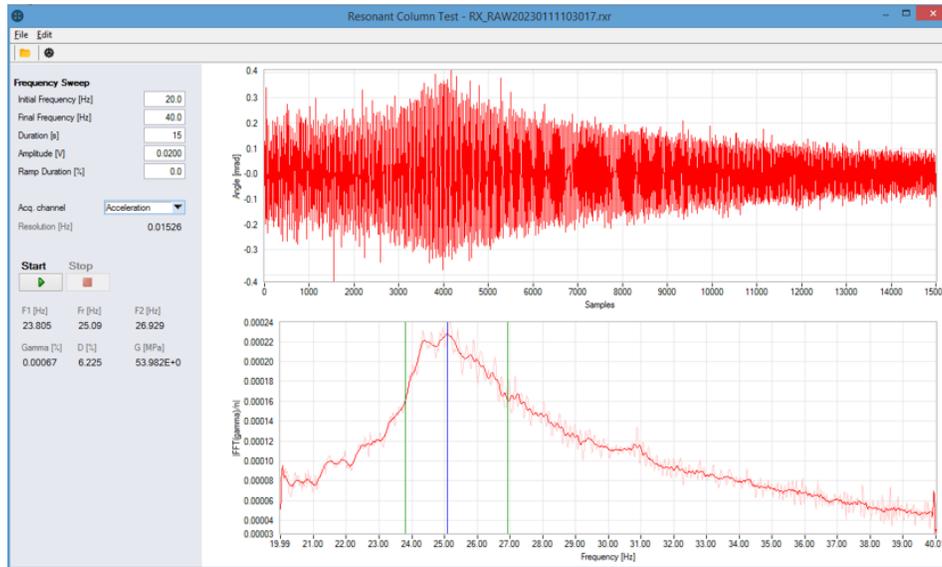
$$\sigma'_m = \frac{\sigma'v + 2 * \sigma'rh}{3} = 72.12 \text{ kPa}$$

Programa Columna Resonante

Esfuerzo Confinante Promedio y Módulo de Corte G para Estrato V

Esfuerzo Confinante Promedio (kPa)	G (Mpa)
72.12	46.58

Gráfica de Ensayo Columna Resonante



Programa Corte Torsional Cíclico

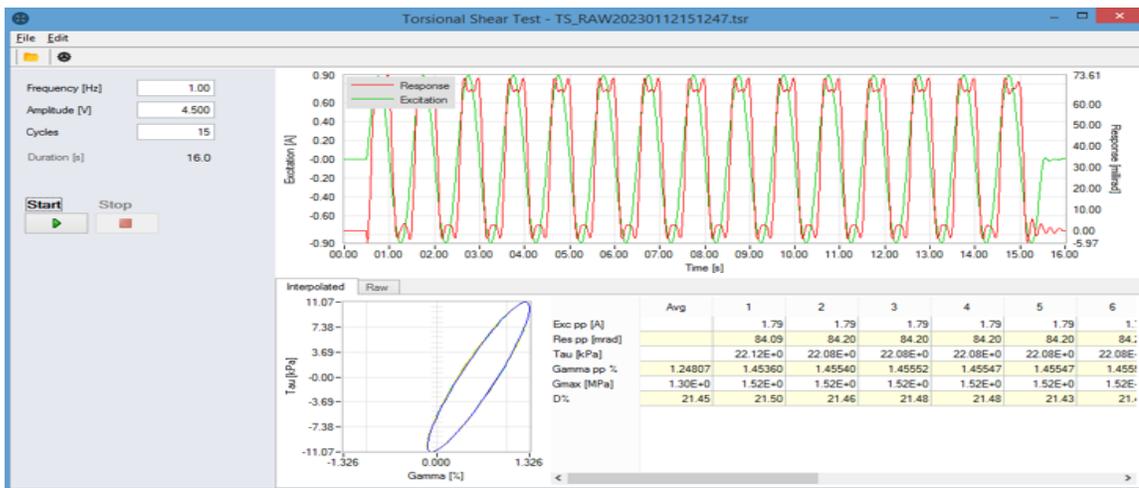
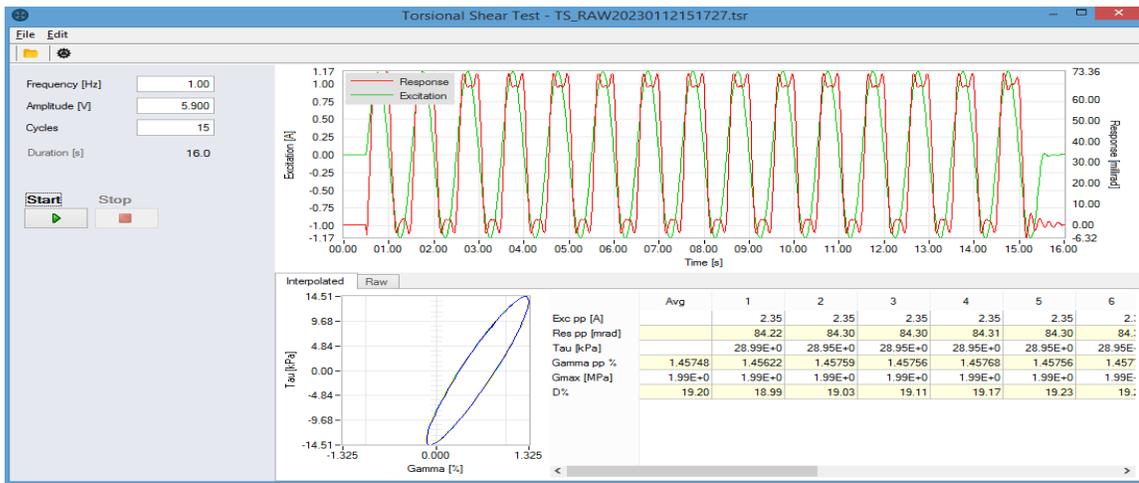
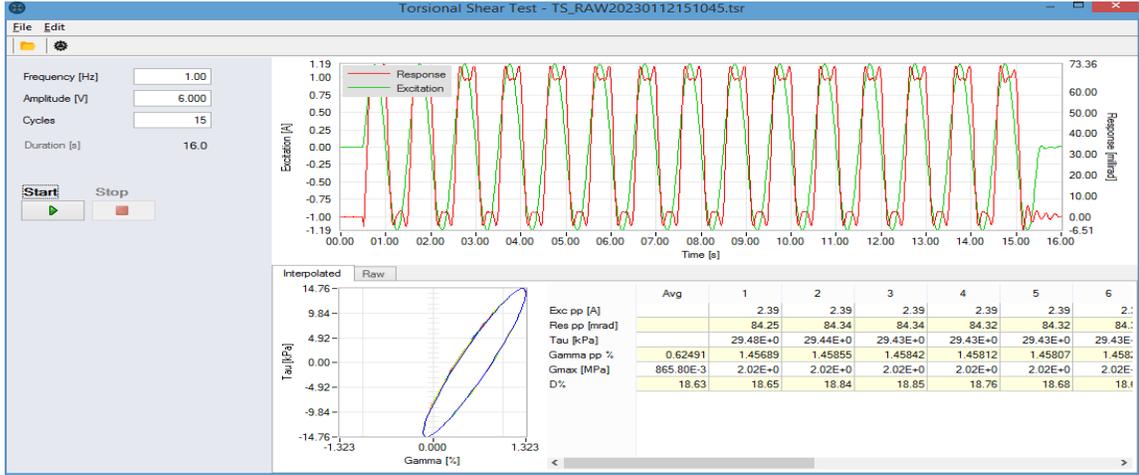
Valores Corte Torsional Cíclico

Amplitud (V)	D %	Gmax Mpa	Deformación γ (%)	G/Gmax
0,06	0,95	46,58	0,00048	1
0,07	1,05	46,48	0,00056	0,997853156
0,1	1,22	46,15	0,00093	0,99076857
0,15	1,55	45,88	0,00161	0,984972091
0,2	1,58	45,82	0,00172	0,983683985

0,25	1,85	45,58	0,00221	0,978531559
0,26	2,45	44,75	0,00365	0,960712752
0,27	2,88	43,96	0,00499	0,943752684
0,3	3,62	42,55	0,00768	0,913482181
0,35	3,75	42,22	0,00824	0,906397596
0,45	4,55	40,85	0,0108	0,876985831
0,5	6,59	36,88	0,01758	0,791756119
0,55	8,22	33,22	0,02485	0,713181623
0,6	10,22	28,03	0,03895	0,601760412
0,65	12,22	22,89	0,06215	0,491412623
0,67	13,55	18,85	0,08452	0,40468012
0,7	14,65	15,52	0,10788	0,33319021
1	15,84	10,58	0,16578	0,22713611
1,5	16,48	7,02	0,22412	0,150708459
2	17,01	4,88	0,30212	0,104765994
2,3	17,8	3,54	0,52154	0,075998283
2,5	17,85	3,21	0,61122	0,068913697
3	17,95	2,51	0,91521	0,053885788
3,3	17,81	2,33	0,99545	0,050021468
3,5	17,88	2,12	1,12524	0,045513096
4	18,5	1,99	1,24807	0,042722198
4,2	19,26	1,85	1,25851	0,039716617
4,5	21,45	1,3	1,27807	0,027908974
4,8	20,84	0,69	1,36895	0,014813225
5	20,1	1,68	1,45727	0,036066982
5,1	19,97	1,72	1,4567	0,036925719
5,9	19,2	1,99	1,45748	0,042722198

Nota. Se presentan valores obtenidos en el programa de Corte Torsional Cíclico, tales como amortiguamiento, deformación y Gmax.

Gráficas de Ensayo Corte Torsional Cíclico



Anexo 23. Resultados de Estrato VI

Datos Estrato VI

Localización: Cancha detrás del “Bloque G”, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campus Sur.

Fecha de Ensayo: 09/01/2022

Profundidad Muestra VI: 9.50 – 10.00 m

Corrección de Número de Golpes del Ensayo SPT

No SPT	Factor de Corrección σ'_{o-pa} (kN/m ²)	CN	$\eta_H(\%)$	η_B	η_S	η_R	N60
71	100	1	45	1	1	0,95	50,59

Datos de la Muestra

hi (m)	h (mm)	D (mm)	W (gm)	A (cm ²)	V (cm ³)
10	97,5	49,9	392.95	19,56	190,68

Coefficiente de Empuje en Reposo para Arcillas

IP (%)	Ko
18.02	0,29

Cálculo de Esfuerzo Vertical y Horizontal del Terreno

Peso Específico γ sum(kgf/m ³)	σ'_v (kgf/m ²)	σ'_h (kgf/m ²)
1128.85	15116.1	4301.84

Cálculo de Esfuerzo Confinante Promedio de Sitio para Estrato V

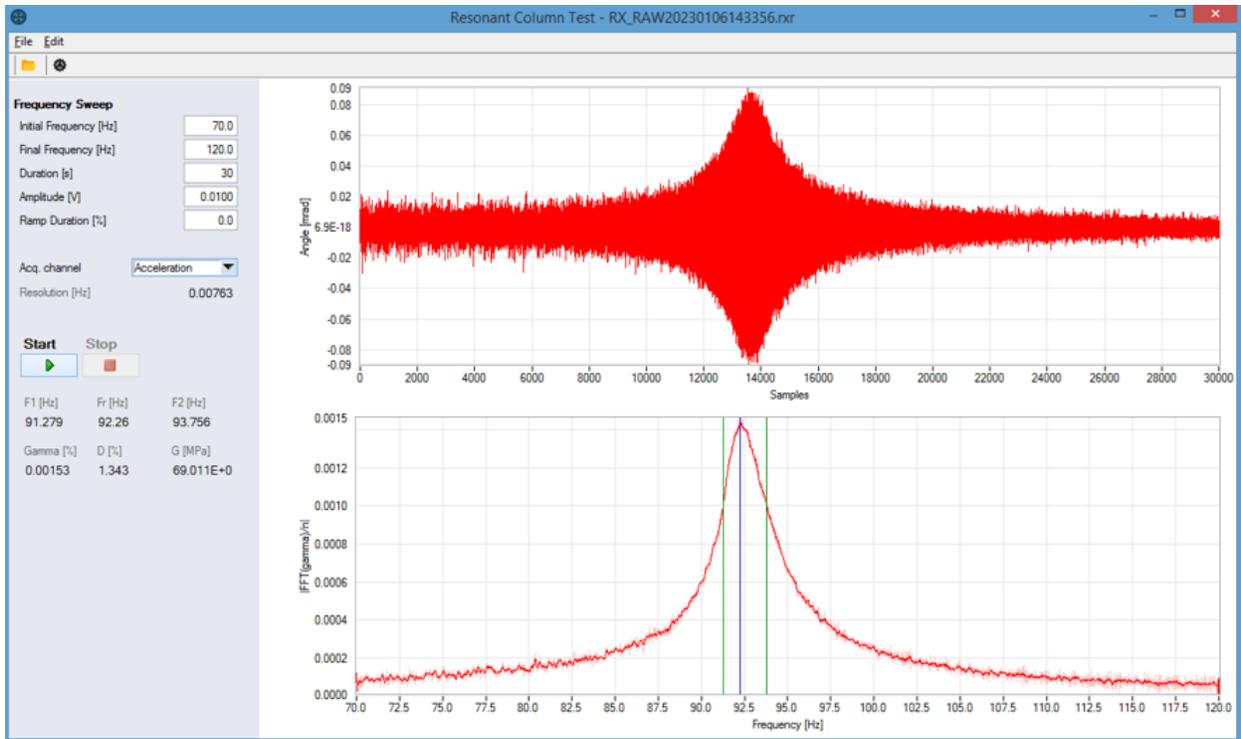
$$\sigma'_m = \frac{\sigma'_v + 2\sigma'_h}{3} = 77.54 \text{ kPa}$$

Programa Columna Resonante

Esfuerzo Confinante Promedio y Módulo de Corte G para Estrato 5

Esfuerzo Confinante Promedio (kPa)	G (Mpa)
77.54	61.28

Gráfica de Ensayo Columna Resonante

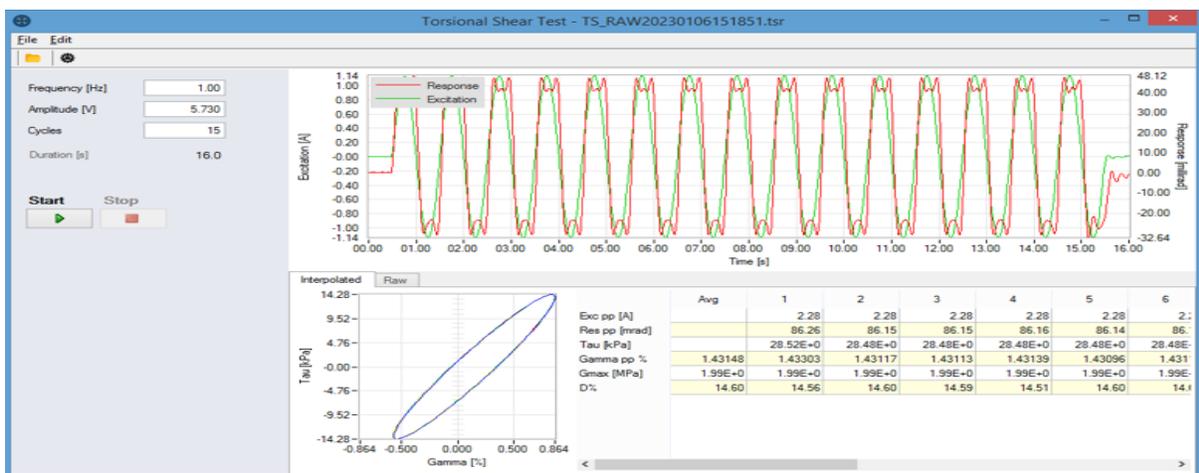
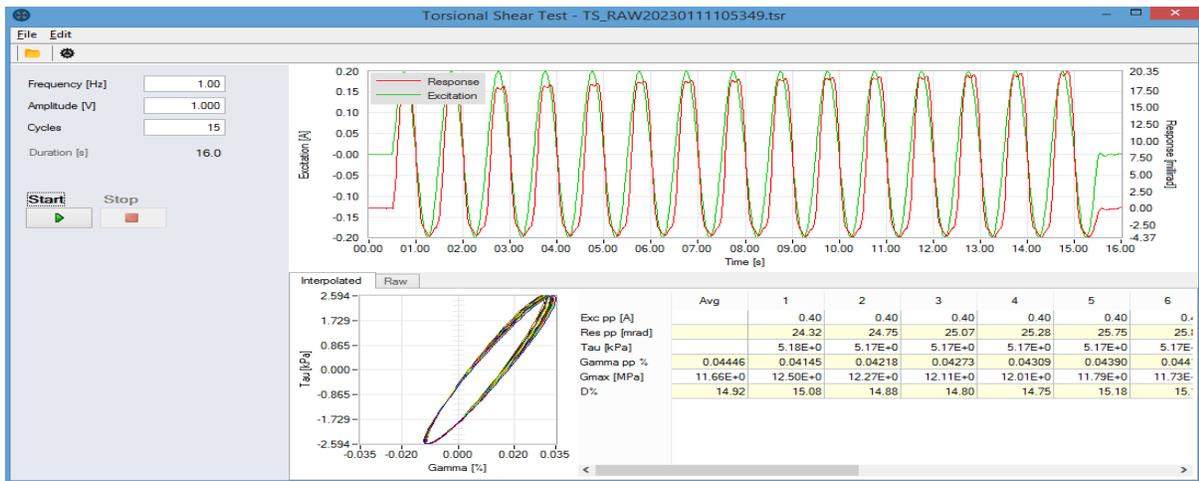
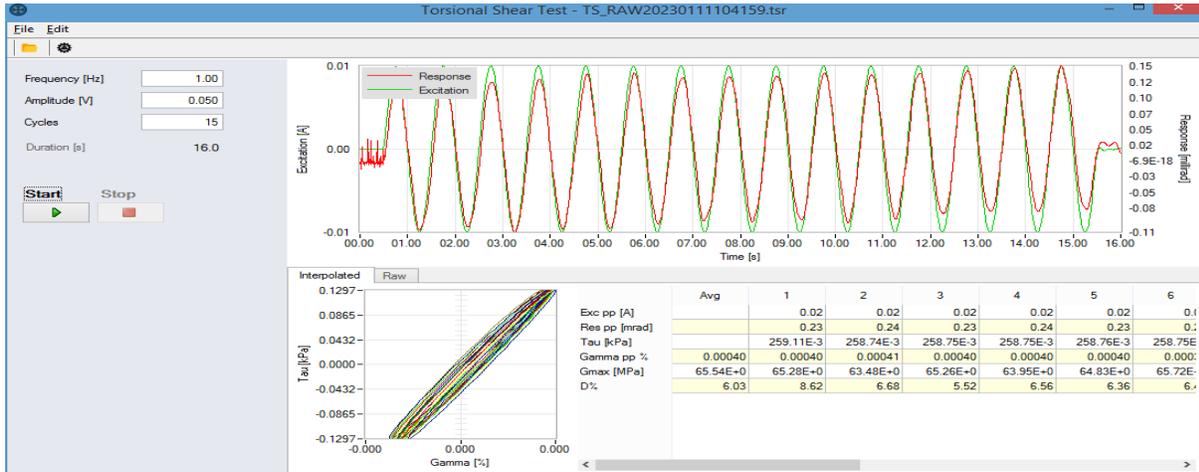


Programa Corte Torsional Cíclico
Valores Corte Torsional Cíclico

Amplitud (V)	D %	Gmax Mpa	Deformación γ (%)	G/GMAX
0,07	0,75	61,28	0,00056	1
0,1	0,8	61,13	0,00083	0,997552219
0,15	0,81	60,58	0,00152	0,988577023
0,2	0,83	60,13	0,00199	0,981233681
0,3	0,84	59,52	0,00252	0,971279373
0,5	0,93	57,86	0,00421	0,944190601
0,7	1,15	56,51	0,00604	0,922160574
0,9	1,38	55,37	0,00792	0,903557441
1	1,45	54,87	0,00888	0,895398172
1,3	1,75	53,58	0,01144	0,874347258
1,5	2,01	52,02	0,01458	0,848890339
1,7	2,35	50,13	0,01851	0,818048303
2	2,55	48,53	0,02106	0,791938642
2,3	2,85	46,63	0,02501	0,76093342
2,5	3,11	45,11	0,02798	0,736129243
2,7	3,38	43,67	0,0311	0,712630548
3	3,69	41,82	0,03493	0,682441253
3,3	4,02	39,81	0,04036	0,649640992
3,5	4,35	38,06	0,04478	0,621083551
4,3	5,4	32,13	0,06519	0,524314621
4,5	5,75	29,92	0,07324	0,488250653
4,7	6,15	27,73	0,08255	0,452513055
5	6,72	25,14	0,09693	0,410248042
5,3	7,45	22,23	0,11631	0,362761097
5,5	8,25	18,91	0,14215	0,308583551
5,7	9,68	14,42	0,19512	0,235313316
5,73	11,21	6,06	0,3452	0,098890339
5,75	12,58	2,54	0,79524	0,041449086
5,77	13,01	2,12	0,98545	0,0345953
6	13,89	2,02	1,44955	0,032963446
6,05	14,05	2,05	1,44825	0,033453003
6,1	14,12	2,05	1,44563	0,033453003

Nota. Se presentan valores obtenidos en el programa de Corte Torsional Cíclico, tales como amortiguamiento, deformación y Gmax.

Gráficas de Ensayo Corte Torsional Cíclico



Anexo 24. RESULTADOS DE CONTENIDO DE HUMEDAD DE MUESTRAS SHELBY

Estrato I

Antes de Ensayar

Contenido de Agua PROF: 1.55-2.20m				
Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
1	29,30	41,38	38,71	28,37
4	29,57	41,59	39,03	27,06
Contenido de Humedad				27,72

Después de Ensayar

Contenido de Agua PROF: 1.55-2.20m				
Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
1	29,30	56,03	50,25	27,59
4	29,57	50,46	46,01	27,07
Contenido de Humedad				27,33

Estrato II

Antes de Ensayar

Contenido de Agua PROF: 1.55-2.20m				
Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
3	18,72	52,46	44,79	29,42
6	19,28	51,78	44,12	30,84
Contenido de Humedad				30,13

Después de Ensayar

Contenido de Agua PROF: 1.55-2.20m				
Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
7A	28,86	49,53	44,69	30,57
2	28,35	51,94	46,45	30,33
Contenido de Humedad				30,45

Estrato III

Antes de Ensayar

Contenido de Agua PROF: 1.55-2.20m				
Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
4	29,30	69,48	62,16	22,28
1	29,59	66,82	59,89	22,87
Contenido de Humedad				22,57

Después de Ensayar

Contenido de Agua PROF: 1.55-2.20m				
Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
4	29,59	65,17	58,64	22,48
1	29,32	66,46	59,58	22,74
Contenido de Humedad				22,61

Estrato V

Antes de Ensayar

Contenido de Agua PROF: 1.55-2.20m				
Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
3	19,27	52,46	46,26	22,97
6	18,72	51,78	45,87	21,77
Contenido de Humedad				22,37

Después de Ensayar

Contenido de Agua PROF: 1.55-2.20m				
Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
4	29,59	60,64	54,87	22,82
2	28,35	63,76	57,13	23,04
Contenido de Humedad				22,93

Estrato VI

Antes de Ensayar

Contenido de Agua PROF: 1.55-2.20m				
Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
7A	28,86	69,25	61,22	24,81
1	29,3	68,81	60,9	25,03
Contenido de Humedad				24,92

Después de Ensayar

Contenido de Agua PROF: 1.55-2.20m				
Cápsula N°	Masa Cápsula	Masa Cápsula + M. Húmeda (g)	Masa Cápsula + Masa Seca (g)	% Humedad
7A	28,89	60,97	54,58	24,87
2	28,36	60,35	53,78	25,85
Contenido de Humedad				25,36

Anexo 25. ECUACIONES G/GMAX Y AMORTIGUAMIENTO

ESTRATO I – (OL)

Procedimiento Arcillas

Esfuerzo Confinante Promedio: 23.13 kPa

IP: 9.36

Según Darendeli (2001)

$$\alpha = 0.0025 * IP + 1.08 = 1.1034$$

$$\gamma_r = \alpha * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^k + c = 0.4218$$

$$k = 0.6903 * e^{-0.005 * IP} = 0.6587$$

$$c = 0.0006 * e^{(0.072 * IP)} \text{ para } IP \leq 45 = 0.0012$$

$$\left(\frac{G}{G_{max}} \right) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^\alpha} = 1$$

Para el resto de Deformaciones:

Deformaciones	G/Gmax
0,00352	1
0,00397	0,994223712
0,00485	0,992805989
0,00612	0,990720767
0,00755	0,988329546
0,00948	0,98504706
0,01002	0,984119485
0,01537	0,974780183
0,02217	0,962686826
0,03011	0,948466375
0,0394	0,93187778
0,05023	0,912770448
0,06241	0,89171488
0,08049	0,86148339
0,10444	0,823501374
0,12903	0,787003649
0,15753	0,747769463
0,19343	0,702707339
0,23549	0,65545986
0,28375	0,607645286
0,34035	0,558909518
0,40376	0,512054147
0,52058	0,442216008
0,59596	0,405792639
0,68605	0,368951071
0,81951	0,324568436
0,98375	0,28203124
1,1150	0,254909768
1,24689	0,23219582
1,32524	0,220424193

Amortiguamiento:

$$(D_{max} - D_{min}) = (-0.008 * IP + 0.334) * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right) + 13.5 = 13.5946$$

$$\alpha_D = 0.0025 * IP + 1.08 = 1.1034$$

$$Y_{rD} = \alpha_D * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^{k_D} + c_D = 0.1691$$

$$k_D = 1.14 * e^{0.0013 * IP} = 1.1507$$

$$c_D = 0.0027 * IP - 0.0609 = -0.0356$$

$$D_{min} = (-0.246) * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right) + 2.75 = 2.6931$$

$$D = (D_{max} - D_{min}) * \left[1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{Y}{Y_{rD}} \right)^{\alpha_D}} \right] + D_{min} = 2.88$$

Para el resto de Deformaciones:

<u>Deformaciones</u>	<u>Amortiguamiento</u>
0,00352	2,880169955
0,00397	2,906309581
0,00485	2,957991506
0,00612	3,033549947
0,00755	3,119533949
0,00948	3,236429001
0,01002	3,269225743
0,01537	3,593781657
0,02217	3,999308535
0,03011	4,456100618
0,0394	4,963391967
0,05023	5,516159535
0,06241	6,089426918
0,08049	6,853266826
0,10444	7,725697616
0,12903	8,484686217
0,15753	9,225787248
0,19343	9,994612667
0,23549	10,71970366
0,28375	11,38130551
0,34035	11,99150677
0,40376	12,52535129
0,52058	13,23900061
0,59596	13,57733878
0,68605	13,89875331
0,81951	14,26078412
0,98375	14,58441617
1,1150	14,77986454
1,24689	14,93747065
1,32524	15,01706972

ESTRATO II – (CL)

Procedimiento Arcillas

Esfuerzo Confinante Promedio: 40.16 kPa

IP: 18.02

Según Darendeli (2001)

$$\alpha = 0.0025 * IP + 1.08 = 1.1251$$

$$\gamma_r = \alpha * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^k + c = 0.6350$$

$$k = 0.6903 * e^{-0.005 * IP} = 0.6308$$

$$c = 0.0006 * e^{(0.072 * IP)} \text{ para } IP \leq 45 = 0.0022$$

$$\left(\frac{G}{G_{max}} \right) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^\alpha} = 1$$

Para el resto de Deformaciones:

Deformaciones	G/Gmax
0,00042	1
0,00082	0,998981599
0,00125	0,998379364
0,00165	0,997799738
0,00218	0,997010408
0,00285	0,995985899
0,00439	0,993550226
0,0068	0,989588714
0,00898	0,985902619
0,01194	0,980795442
0,01463	0,976084616
0,01604	0,973596541
0,01911	0,968147475
0,02502	0,95758618
0,03296	0,943364848
0,03912	0,932375649
0,04756	0,917451171
0,05921	0,897196567
0,07283	0,874133473
0,13429	0,779519701
0,25244	0,637940045
0,37548	0,532043474
0,47042	0,46994144
0,51245	0,446504209
0,59998	0,404005254
0,64556	0,384711646
0,64854	0,383509462
0,72852	0,353658874
0,84496	0,317214973
0,92774	0,295311195
1,018935	0,274246462
1,254785	0,230956511
1,385215	0,212146589

Amortiguamiento:

$$(D_{max} - D_{min}) = (-0.008 * IP + 0.334) * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right) + 13.5 = 13.6920$$

$$\alpha_D = 0.0025 * IP + 1.08 = 1.1251$$

$$Y_{rD} = \alpha_D * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^{k_D} + c_D = 0.3780$$

$$k_D = 1.14 * e^{0.0013 * IP} = 1.1607$$

$$c_D = 0.0027 * IP - 0.0609 = -0.0122$$

$$D_{min} = (-0.246) * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right) + 2.75 = 2.6512$$

$$D = (D_{max} - D_{min}) * \left[1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{Y}{Y_{rD}} \right)^{\alpha_D}} \right] + D_{min} = 2.66$$

Para el resto de Deformaciones:

<u>Deformaciones</u>	<u>Amortiguamiento</u>
0,00042	2,657702531
0,00082	2,664988747
0,00125	2,673339909
0,00165	2,681436854
0,00218	2,692529421
0,00285	2,70701149
0,00439	2,74170647
0,0068	2,798653499
0,00898	2,852019076
0,01194	2,92637017
0,01463	2,995263009
0,01604	3,03174467
0,01911	3,111828568
0,02502	3,267605815
0,03296	3,478158519
0,03912	3,641254412
0,04756	3,863080211
0,05921	4,164402493
0,07283	4,507489914
0,13429	5,908708901
0,25244	7,969136416
0,37548	9,47196285
0,47042	10,33583732
0,51245	10,65830401
0,59998	11,23788207
0,64556	11,49875436
0,64854	11,51496214
0,72852	11,91560772
0,84496	12,39996974
0,92774	12,68849217
1,018935	12,96408087
1,254785	13,52447469
1,385215	13,76538853

ESTRATO III – (ML-CL)

Procedimiento Arcillas

Esfuerzo Confinante Promedio: 55.53 kPa

IP: 6.89

Según Darendeli (2001)

$$\alpha = 0.0025 * IP + 1.08 = 1.0972$$

$$\gamma_r = \alpha * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^k + c = 0.7421$$

$$k = 0.6903 * e^{-0.005 * IP} = 0.6670$$

$$c = 0.0006 * e^{(0.072 * IP)} \text{ para } IP \leq 45 = 0.0010$$

$$\left(\frac{G}{G_{max}} \right) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^\alpha} = 1$$

Para el resto de Deformaciones:

Deformaciones	G/Gmax
0,00184	1
0,00369	0,99466917
0,00482	0,992854722
0,00851	0,986703714
0,00971	0,984652418
0,02052	0,965634049
0,03348	0,942434942
0,05024	0,912752958
0,05887	0,897781177
0,06809	0,882079052
0,08834	0,848769574
0,10352	0,824915886
0,11525	0,807146947
0,15231	0,75471763
0,21734	0,675161813
0,37621	0,531509857
0,64633	0,384400348
0,9031	0,301529514
1,11925	0,2541133
1,13547	0,251116016
1,15854	0,246965435
1,16875	0,245169354
1,18168	0,242929666
1,0265	0,272624963
1,35401	0,216379031
1,43419	0,205809555
1,44866	0,204004934
1,46839	0,201591801
1,47231	0,201118742
1,4635	0,202184862
1,46839	0,201591801

Amortiguamiento:

$$(D_{max} - D_{min}) = (-0.008 * IP + 0.334) * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right) + 13.5 = 13.7161$$

$$\alpha_D = 0.0025 * IP + 1.08 = 1.0972$$

$$Y_{rD} = \alpha_D * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^{k_D} + c_D = 0.5162$$

$$k_D = 1.14 * e^{0.0013 * IP} = 1.1479$$

$$c_D = 0.0027 * IP - 0.0609 = -0.0423$$

$$D_{min} = (-0.246) * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right) + 2.75 = 2.6134$$

$$D = (D_{max} - D_{min}) * \left[1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{Y}{Y_{rD}} \right)^{\alpha_D}} \right] + D_{min} = 2.64$$

Para el resto de Deformaciones:

<u>Deformaciones</u>	<u>Amortiguamiento</u>
0,00184	2,64159963
0,00369	2,673773082
0,00482	2,694216565
0,00851	2,763432478
0,00971	2,78650403
0,02052	3,00060765
0,03348	3,262919845
0,05024	3,60106109
0,05887	3,772831924
0,06809	3,95390931
0,08834	4,341325058
0,10352	4,621625393
0,11525	4,832033566
0,15231	5,461178616
0,21734	6,440819231
0,37621	8,292810295
0,64633	10,31281025
0,9031	11,51204302
1,11925	12,21984502
1,13547	12,26513961
1,15854	12,3279733
1,16875	12,35520328
1,18168	12,38919258
1,0265	11,94157021
1,35401	12,79502195
1,43419	12,95808758
1,44866	12,98601645
1,46839	13,02340282
1,47231	13,03073724
1,4635	13,01421036
1,46839	13,02340282

ESTRATO V – (SM)

Procedimiento Arenas

Esfuerzo Confinante Promedio: 72.12 kPa

$$\gamma_r = 0.0156 * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right) + 0.0277 = 0.0390$$

$$\alpha = 1.08$$

$$\left(\frac{G}{G_{max}} \right) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^\alpha} = 1$$

Para el resto de Deformaciones:

Deformaciones	G/Gmax
0,00048	1
0,00056	0,989864109
0,00093	0,982598726
0,00161	0,968960045
0,00172	0,966739894
0,00221	0,956845247
0,00365	0,928040753
0,00499	0,90196492
0,00768	0,85240276
0,00824	0,842581253
0,0108	0,799852255
0,01758	0,702488927
0,02485	0,619020935
0,03895	0,500004991
0,06215	0,376452317
0,08452	0,302237383
0,10788	0,249698672
0,16578	0,173040007
0,22412	0,131258709
0,30212	0,098641661
0,52154	0,057213616

0,61122	0,048641565
0,91521	0,032002831
0,99545	0,02930741
1,12524	0,025767632
1,24807	0,023102952
1,25851	0,022900776
1,27807	0,022531012
1,36895	0,02095373
1,45727	0,019612425
1,4567	0,019620551
1,45748	0,019609433

Amortiguamiento:

$$\alpha_D = 1.85$$

$$Y_{rD} = 0.0393 * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right) + 0.0346 = 0.0629$$

$$D_{\min} = 1.3492 * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^{-0.262} = 1.4698$$

$$D_{\max} - D_{\min} = -0.3221 * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right) + 16 = 15.9717$$

$$D = (D_{\max} - D_{\min}) * \left[1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{Y}{Y_{rD}} \right)^{\alpha_D}} \right] + D_{\min} = 1.47$$

Para el resto de Deformaciones:

<u>Deformaciones</u>	<u>Amortiguamiento</u>
0,00048	1,471755272
0,00056	1,472392042
0,00093	1,47638394
0,00161	1,487915033
0,00172	1,490264684
0,00221	1,502299441
0,00365	1,551729171
0,00499	1,615306657
0,00768	1,789301406
0,00824	1,832718727
0,0108	2,059734104
0,01758	2,848245853
0,02485	3,896812339
0,03895	6,126211201
0,06215	9,361982841
0,08452	11,58058984
0,10788	13,13584978
0,16578	15,15949447
0,22412	16,05014407
0,30212	16,60999872
0,52154	17,12828226
0,61122	17,2067838
0,91521	17,32940094
0,99545	17,34544279
1,12524	17,36483223
1,24807	17,37814816
1,25851	17,37911292
1,27807	17,38086063
1,36895	17,38807092
1,45727	17,39388738
1,4567	17,39385302
1,45748	17,39390003

ESTRATO VI – (SM)

Procedimiento Arenas

Esfuerzo Confinante Promedio: 77.54 kPa

$$\gamma_r = 0.0156 * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right) + 0.0277 = 0.03980$$

$$\alpha = 1.08$$

$$\left(\frac{G}{G_{max}} \right) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^\alpha} = 1$$

Para el resto de Deformaciones:

<u>Deformaciones</u>	<u>G/Gmax</u>
0,00056	1
0,00083	0,984579502
0,00152	0,970775104
0,00199	0,961286928
0,00252	0,950597111
0,00421	0,917042195
0,00604	0,882155741
0,00792	0,848172437
0,00888	0,831567214
0,01144	0,789712909
0,01458	0,742930926
0,01851	0,690723739
0,02106	0,66018427
0,02501	0,617384924
0,02798	0,588379871
0,0311	0,560476614
0,03493	0,529382929
0,04036	0,490404855
0,04478	0,462415653
0,04961	0,435057246

0,05684	0,399348966
0,06519	0,364424954
0,07324	0,335823987
0,08255	0,307635808
0,09693	0,27197462
0,11631	0,234786422
0,14215	0,198109457
0,19512	0,149284625
0,3452	0,086560557
0,79524	0,037052808
0,98545	0,029619216
1,44955	0,019723032
1,44825	0,019741775
1,44563	0,019779655

Amortiguamiento:

$$\alpha_D = 1.85$$

$$Y_{rD} = 0.0393 * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right) + 0.0346 = 0.0650$$

$$D_{\min} = 1.3492 * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^{-0.262} = 1.4421$$

$$D_{\max} - D_{\min} = -0.3221 * \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right) + 16 = 15.9695$$

$$D = (D_{\max} - D_{\min}) * \left[1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{Y}{Y_{rD}} \right)^{\alpha_D}} \right] + D_{\min} = 1.44$$

Para el resto de Deformaciones:

<u>Deformaciones</u>	<u>Amortiguamiento</u>
0,00056	1,444596796
0,00083	1,447180061
0,00152	1,457476658
0,00199	1,467342547
0,00252	1,48109082
0,00421	1,542342045
0,00604	1,636318847
0,00792	1,760167111
0,00888	1,833288518
0,01144	2,058076404
0,01458	2,386214106
0,01851	2,863578872
0,02106	3,204603528
0,02501	3,768334751
0,02798	4,211933827
0,0311	4,688609247
0,03493	5,279738079
0,04036	6,111869951
0,04478	6,771418515
0,04961	7,464038441
0,05684	8,433016766
0,06519	9,440189871
0,07324	10,2967079
0,08255	11,1561673
0,09693	12,24363642
0,11631	13,34633168
0,14215	14,366484
0,19512	15,56026235
0,3452	16,71464689
0,79524	17,25755744
0,98545	17,30771249
1,44955	17,36061138
1,44825	17,36052676
1,44563	17,36035557