



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE CIVIL

**PLAN DE DISERTACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

**MANUAL DE LABORATORIO PARA DETERMINAR PARÁMETROS
DINÁMICOS EN SUELOS, CON EL USO DE LOS EQUIPOS: TRIAXIAL
CÍCLICO, COLUMNA RESONANTE Y ELEMENTOS PIEZOELÉCTRICOS
BENDER.**

ANDRÉS JAIRO MUÑOZ BELTRÁN

DIRECTOR: ING. GUILLERMO REALPE, M.SC

Quito, 2017

DEDICATORIA

A Dios por la vida, a mi madre por su infinito amor, paciencia y sabiduría que han guiado mi vida por un camino de bien, con mucho amor le dedico todo mi esfuerzo y trabajo puesto para la realización de este trabajo.

A mi esposa Jacquito, por su amor, consejos y compañía incondicional y a toda mi familia que han hecho de mí una mejor persona, me han enseñado a crecer y ser realmente feliz.

Andrés Muñoz

AGRADECIMIENTOS

A la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, a todos los profesores y miembros de esta prestigiosa institución quienes con sus enseñanzas han sembrado en mi muchos sueños y deseos de superación.

Un agradecimiento especial a mi director al Ing. Guillermo Realpe por su apoyo y ayuda incondicional, y quien hace algunos años me brindó la oportunidad de pertenecer a esta familia que es la PUCE.

A los ingenieros, Ing. Juan Carlos Montero e Ing. Jorge Albuja quienes, con paciencia y sabiduría, han compartido sus conocimientos a lo largo de estos años.

A mis compañeros del Laboratorio de Materiales de Construcción por ser parte de este crecimiento profesional.

Muchas gracias a todos.

Andrés Muñoz

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO 1. SISMICIDAD EN ECUADOR.....	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 DESCRIPCIÓN TECTÓNICA DEL ECUADOR	1
1.3 SISMICIDAD EN ECUADOR.....	3
1.3.1 <i>Eventos sísmicos históricos</i>	6
1.4 ACTIVIDAD VOLCÁNICA EN ECUADOR	8
1.5 MAPA DE RIESGO SÍSMICO DEL ECUADOR.....	10
CAPITULO 2. DINÁMICA DE SUELOS	12
2.1 INTRODUCCIÓN	12
2.2 IMPORTANCIA DE LA DINÁMICA DE SUELOS	12
2.3 FUNDAMENTOS DE LA DINÁMICA DE SUELOS.....	13
2.3.1 <i>Definiciones básicas</i>	13
2.3.2 <i>Movimiento armónico simple (M.A.S)</i>	14
2.3.3 <i>Fundamentos de la vibración</i>	16
2.3.3.1 Grados de libertad	16
2.3.3.2 Modos de vibración.....	17
2.3.3.3 Vibraciones libres y vibraciones forzadas	18
2.3.3.4 Resonancia.....	19
2.3.3.5 Amortiguamiento.....	19
2.3.3.6 Vibraciones libres sin amortiguamiento	21
2.3.3.7 Vibraciones forzadas sin amortiguamiento	23
2.3.3.8 Vibraciones libres con amortiguamiento	25
2.3.3.9 Vibraciones forzadas con amortiguamiento	30
2.4 PROPAGACIÓN DE ONDAS EN EL SUELO	32
2.5 TIPOS DE ONDAS	32
2.5.1 <i>Ondas superficiales</i>	33
2.5.1.1 Ondas Love	33
2.5.1.2 Ondas Rayleigh	34
2.5.2 <i>Ondas internas o de cuerpo</i>	34
2.5.2.1 Ondas Primarias (P)	35
2.5.2.2 Ondas Secundarias (S).....	35
2.5.3 <i>Diferentes tipos de cargas</i>	37
2.5.3.1 Cargas dinámicas	37
2.5.3.2 Cargas cíclicas	38
2.6 EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SUELO EN CAMPO Y EN LABORATORIO.....	39
2.6.1 <i>Ensayos de campo</i>	40
2.6.1.1 Sísmica de refracción	40

2.6.1.2	Cross Hole	42
2.6.1.3	Down Hole y Up-Hole	44
2.6.2	<i>Ensayos de laboratorio</i>	46
2.6.2.1	Ensayos Cíclicos	46
2.6.2.2	Ensayos dinámicos	47
CAPITULO 3. ENSAYO DE TRIAXIAL CÍCLICO.....		48
3.1	INTRODUCCIÓN	48
3.2	CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE TRIAXIAL CÍCLICO	49
3.3	ASPECTOS TEÓRICOS DEL ENSAYO DEL TRIAXIAL CÍCLICO	50
3.3.1	<i>Número de ciclos de carga y descarga</i>	50
3.3.2	<i>curva de histéresis</i>	51
3.3.3	<i>Relación de amortiguamiento (D)</i>	52
3.3.4	<i>Módulo de Young secante (E)</i>	53
3.3.5	<i>Módulo dinámico de corte o módulo de rigidez (G)</i>	53
3.3.6	<i>Relación de Poisson</i>	54
3.3.7	<i>Deformación cortante</i>	55
3.4	REQUISITOS DE LA NORMA ASTM-D5311 - MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR DEL TRIAXIAL CÍCLICO DE CARGA CONTROLADA	56
3.5	REQUISITOS DE LA NORMA DE ENSAYO DE TRIAXIAL CÍCLICO NORMA ASTM-D3999	58
CAPITULO 4. ENSAYO DE COLUMNA RESONANTE		59
4.1	INTRODUCCIÓN	59
4.2	CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE COLUMNA RESONANTE	60
4.3	ASPECTOS TEÓRICOS DEL ENSAYO DE COLUMNA RESONANTE	62
4.3.1	<i>Deformación por corte</i>	68
4.3.2	<i>Amortiguamiento viscoso</i>	70
4.3.3	<i>Método de ancho de banda de media potencia (half-power bandwidth)</i>	72
4.3.4	<i>Calibración del equipo</i>	73
4.4	CALIBRACIÓN DEL SISTEMA DE COLUMNA RESONANTE GCTS	75
4.5	REQUISITOS DE LA NORMA DE ENSAYO DE COLUMNA RESONANTE	79
CAPITULO 5. ENSAYO DE ELEMENTOS PIEZOELÉCTRICOS BENDER ELEMENT		80
5.1	ANTECEDENTES	80
5.2	LIMITACIONES	81
5.3	RECOMENDACIONES	81
5.4	CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE BENDER ELEMENT	82
5.5	COMPONENTES DE UN BENDER ELEMENT	82
5.6	ASPECTOS TEÓRICOS DEL ENSAYO DE ELEMENTOS BENDER	84
5.6.1	<i>Medida de la propagación de la onda de corte</i>	84
5.6.2	<i>Módulo de corte</i>	85

5.6.3	<i>Relación de Poisson</i>	86
5.6.4	<i>Modulo de Young</i>	86
5.6.5	<i>Modulo Bulk</i>	87
5.6.6	<i>interpretación de la señal</i>	87
5.6.6.1	Primer tiempo de arribo	88
5.6.6.2	Método 1 - Umbral absoluto.....	89
5.6.6.3	Método 2 - umbral relativo	90
5.6.6.4	Método 3 - relativa al primer pico.....	90
5.6.6.5	Método 4 – tiempo del primer pico.....	91
5.6.6.6	Método 5 - Tangente al primer pico	91
5.6.7	<i>Geometria y tamaño de la probeta</i>	92
5.6.8	<i>Efectos de material de la probeta</i>	93
5.6.9	<i>Procesamiento de señales</i>	93

CAPITULO 6. PREPARACIÓN DE MUESTRAS Y EJECUCIÓN DE ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN 95

6.1	INTRODUCCIÓN.....	95
6.2	CARACTERÍSTICAS DE LAS PROBETAS.....	95
6.2.1	<i>Procedimientos de muestreo en campo</i>	96
6.2.2	<i>Procedimientos de preparación de probetas a partir de muestras inalteradas obtenidas en campo</i>	96
6.2.3	<i>Procedimientos de reconstitución de probetas a partir de muestras alteradas obtenidas en campo</i>	97
6.3	EJECUCIÓN DE ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE CAOLINITA.....	98
6.3.1	<i>Propiedades físicas de la caolinita</i>	99
6.3.2	<i>ensayos de propiedades mecánicas</i>	100
6.3.2.1	Ensayo de compactación.....	101
6.3.3	<i>Preparación de las muestras</i>	102
6.3.3.1	Preparación inicial de las muestras	103
6.3.3.2	Secado, humedecimiento, mezclado y tiempo de curado de las muestras.....	103
6.3.3.3	Compactación estática de las probetas	103
6.3.3.4	Homogeneidad y reproducibilidad de las probetas	105
6.3.3.5	Ensayo de compresión no confinada.....	111

CAPITULO 7. RESULTADOS DE ENSAYOS DINÁMICOS 113

7.1	INTRODUCCIÓN.....	113
7.2	DATOS INICIALES DE LAS PROBETAS	114
7.3	ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO	114
7.3.1	<i>Tabla de resultados triaxial cíclico</i>	114
7.3.2	<i>Curvas características de los ensayos realizados</i>	115
7.4	ENSAYO COLUMNA RESONANTE	116

7.4.1	Tabla de resumen de resultados	117
7.4.2	Graficas características de los ensayos	117
7.4.3	ensayo de elementos piezoeléctricos bender	120
7.5	CURVAS DEL MATERIAL ENSAYADO	121
7.5.1	Comparación de los datos obtenidos con otras investigaciones	122
7.5.2	Curva hiperbólica de ajuste de los datos obtenidos en los diferentes ensayos.....	123
7.5.3	Definición del grado de repetibilidad en los ensayos	125
7.5.3.1	Curvas N°1	125
7.5.3.2	Curvas N°2	127
7.5.3.3	Curvas N°3	128
7.5.3.4	Comparaciones de las curvas teóricas	130
BIBLIOGRAFÍA		136
ANEXO 1. NORMA ASTM D5311/D5311M – 13.....		138
ANEXO 2. NORMA D3999/D3999M – 11		164
ANEXO 3. NORMA ASTM D4015 – 15		205

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. LÍMITES DE PLACAS MOSTRANDO LA DIRECCIÓN Y VELOCIDADES DEL MOVIMIENTO, MODIFICADO DE EGO, 1995 (TAIPE, 2013, PÁG. 8)	2
FIGURA 2. FUENTES SÍSMICAS DE TIPO SUBDUCCIÓN (ALVARADO, 2012).....	4
FIGURA 3. FUENTES SÍSMICAS TIPO CORTICALES	5
FIGURA 4. EVENTOS PRINCIPALES REGISTRADOS EN EL ECUADOR.	7
FIGURA 5. EVENTOS DE MAGNITUDES SUPERIORES A Mw6.0, CLASIFICADOS POR SU ZONA Y TIPO DE ORIGEN.....	8
FIGURA 6. IZQUIERDA: GUAGUA PICHINCHA (0°10'14.88"S, 78° 6'45.36" W), 10/7/99; SUPERIOR DERECHA: TUNGURAHUA, 2002 (1°28'12.71"S, 78°26'41.28"W); CENTRO: SANGAY, 2001 (2°00'17,99"S, 78°20'26,88"W); INFERIOR DERECHO: REVENTADOR, 2002 (0°04'39,00"S, 77°39'20,87"W).....	9
FIGURA 7. ZONA DE SUBDUCCIÓN DE ECUADOR Y SU CADENA DE VOLCANES.....	9
FIGURA 8. ECUADOR, ZONAS SÍSMICAS PARA PROPÓSITOS DE DISEÑO Y VALOR DEL FACTOR DE ZONA Z (NEC-SE-DS, 2014, PÁG. 27)	10
FIGURA 9. MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE.....	15
FIGURA 10. REPRESENTACIÓN GRÁFICA M.A.S.	15
FIGURA 11. SISTEMAS CON UN SOLO GRADO DE LIBERTAD.	16
FIGURA 12. CUERPO EN EL ESPACIO CON SEIS GRADOS DE LIBERTAD	17
FIGURA 13. MODOS DE VIBRACIÓN DE UN BLOQUE	17
FIGURA 14. SISTEMA DE VIBRACIÓN LIBRE SIN AMORTIGUAMIENTO	21
FIGURA 15. SISTEMA DE VIBRACIÓN FORZADA NO AMORTIGUADA.	23
FIGURA 16. RELACIÓN DE FRECUENCIA VS FACTOR DE MAGNIFICACIÓN	25
FIGURA 17. SISTEMA MASA, RESORTE Y AMORTIGUADOR “DASTPOT”	26
FIGURA 18. MODELO MATEMÁTICO PARA VIBRACIONES LIBRES CON AMORTIGUAMIENTO.....	27
FIGURA 19. MODELO MATEMÁTICO PARA VIBRACIONES LIBRES CON AMORTIGUAMIENTO.....	29
FIGURA 20. VIBRACIÓN FORZADA CON AMORTIGUAMIENTO.....	31
FIGURA 21: ONDAS SÍSMICAS.	33
FIGURA 22: ONDAS LOVE.....	34
FIGURA 23: ONDAS RAYLEIGH.....	34
FIGURA 24: ONDAS PRIMARIAS (P).	35
FIGURA 25: ONDAS SECUNDARIAS (S).	35
FIGURA 26. ACELEROGRAMA DEL TERREMOTO DEL 18 DE MAYO, 1940, CENTRO DE CALIFORNIA, (COMPONENTE NORTE-SUR).....	38

FIGURA 27. DEFINICIÓN DE CARGA CÍCLICA	38
FIGURA 28. PERÍODOS Y NÚMERO DE CICLOS QUE CARACTERIZAN LOS EVENTOS TÍPICOS DE CARGA CÍCLICOS.	39
FIGURA 29. LISTA DE LOS ENSAYOS MÁS COMUNES EN CAMPO Y DE LABORATORIO Y AMPLITUD DE DEFORMACIÓN DE CORTE ASOCIADA A ELLOS. (CAMACHO TAUTA, 2011)	40
FIGURA 30. DISPOSICIÓN EN CAMPO DE UN SISMÓGRAFO DE 12 CANALES, QUE MUESTRA EL TRAYECTO DE LAS ONDAS SÍSMICAS DIRECTAS Y SE REFRACTA EN UN SUELO DE DOS CAPAS.	41
FIGURA 31. UNA FORMA DE ONDA SÍSMICA TÍPICA DE UN GEÓFONO INDIVIDUAL, LA FLECHA MARCA LA LLEGADA DE LA PRIMERA ONDA DE COMPRESIÓN. (ASTM D 5777).....	41
FIGURA 32. SONDEO DE FUENTE SÍSMICO (PRODUCE SOLAMENTE UN TREN DE ONDAS).....	44
FIGURA 33. ENSAYO DE CROSSHOLE.	44
FIGURA 34. FUENTE SÍSMICO (PRODUCE TREN DE ONDAS P Y S).....	45
FIGURA 35. ESQUEMA DE ENSAYO DOWN-HOLE. (LUNA & JADI, 2000).....	45
FIGURA 36. ESQUEMA DE ENSAYO UP-HOLE. (LUNA & JADI, 2000).....	46
FIGURA 37. SISTEMA DE TRIAXIAL CÍCLICO	49
FIGURA 38. NÚMEROS EQUIVALENTES DE CICLOS DE ESFUERZO UNIFORMES BASADOS EN COMPONENTES MÁS FUERTES DEL MOVIMIENTO DEL SUELO.	51
FIGURA 39. CURVAS DE HISTÉRESIS	52
FIGURA 40. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO A PARTIR DE UNA CURVA DE HISTÉRESIS.....	52
FIGURA 41: REQUISITO DE LA NORMA ASTM D5311	57
FIGURA 42. REQUISITOS DE LA NORMA ASTM D3999.....	58
FIGURA 43. SISTEMA DE COLUMNA RESONANTE.....	61
FIGURA 44. PROBETA DE COLUMNA RESONANTE SIN FIJOS IDEALIZADAS.....	63
FIGURA 45. DIFERENCIAL DE UN ELEMENTO DE SUELO.	64
FIGURA 46. DEFORMACIÓN POR ESFUERZO CORTANTE EN LA MUESTRA DE SUELO.	69
FIGURA 47. DECAIMIENTO VIBRACIÓN LIBRE.	71
FIGURA 48. AMORTIGUAMIENTO DEL MATERIAL A PARTIR DEL MÉTODO DE ANCHO DE BANDA DE MEDIA POTENCIA	73
FIGURA 49. CALIBRACIÓN DE EQUIPO DE COLUMNA RESONANTE	76
FIGURA 50. GEOMETRÍA DEL ESPÉCIMEN DE CALIBRACIÓN	76
FIGURA 51. GEOMETRÍA DE LA MASA AÑADIDA.	77
FIGURA 52. REQUISITOS DE LA NORMA ASTM-D4015	79
FIGURA 53. EQUIPO DE BENDER ELEMENT.....	82

FIGURA 54. BENDER ELEMENTS: (A) REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA; (B) TIPO EN SERIE; (C) TIPO EN PARALELO. REPRODUCIDO POR LEE Y SANTAMARÍA 2005 CON EL PERMISO DE ASCE.	83
FIGURA 55. ELEMENTO PIEZOELÉCTRICO BENDER.	83
FIGURA 56. COMPONENTES DEL ELEMENTO BENDER.	84
FIGURA 57. ILUSTRACIÓN DEL ENSAYO CON ELEMENTOS BENDER (INSTRUMENTS, 2013).....	85
FIGURA 58. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DEL PRIMER ARRIVO USANDO UNA SOLA ONDA SINUSOIDAL EN LA FUNCIÓN DE ENTRADA. EL PUNTO C SE TOMA EL PRIMER TIEMPO DE ARRIBO. REPRODUCIDO POR KANG 2014 CON EL PERMISO DE ASTM INTERNACIONAL.	88
FIGURA 59. RECEPCIÓN DE SEÑALES TÍPICAS DE ONDAS DE CORTE BAJO DIFERENTES ESFUERZOS NORMALES EN ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN BAJO LA APLICACIÓN DE ESFUERZOS NORMALES EN CAOLINITA. REPRODUCIDO POR KANG 2014 CON EL PERMISO DE ASTM INTERNACIONAL.	89
FIGURA 60. RESULTADOS UMBRAL ABSOLUTO.	89
FIGURA 61. RESULTADOS UMBRAL RELATIVE.	90
FIGURA 62. RESULTADOS RELATIVA AL PRIMER PICO.	91
FIGURA 63. RESULTADOS TIEMPOS DEL PRIMER PICO.....	91
FIGURA 64. RESULTADOS TIEMPOS DEL PRIMER PICO.....	92
FIGURA 65. RESULTADOS ENSAYOS DE COMPACTACIÓN.....	101
FIGURA 66. FOTO DE RAYOS X PARA PROBETAS SUELOS COMPACTADOS	102
FIGURA 69. EQUIPO DE COMPACTACIÓN PARA LA FABRICACIÓN DE LOS ESPECÍMENES DE PRUEBA.	104
FIGURA 74. PROBETA MOLDEADA. (A) PROBETA DIVIDIDA EN DOS PARTES, (B) SECCIONES Y DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LAS SUBSECCIONES.	106
FIGURA 75. COMPARACIÓN DE LAS DIFERENTES PROBETAS Y SUS HUMEDADES EN CADA SECCIÓN.....	108
FIGURA 76. VARIACIONES DE LOS CONTENIDOS DE HUMEDAD DE LAS PROBETAS.....	109
FIGURA 77. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA .	111
FIGURA 78. DATOS MÓDULO CORTANTE, G	116
FIGURA 79. DATOS DE AMORTIGUAMIENTO, D.....	116
FIGURA 80. RESULTADO DEL BARRIDO DE FRECUENCIAS.....	118
FIGURA 81. DATOS DE LAS VIBRACIONES FORZADAS	118
FIGURA 82. DATOS DE VIBRACIONES LIBRES	119
FIGURA 83. DATOS MÓDULO CORTANTE, G	119
FIGURA 84. DATOS MÓDULO CORTANTE, D	120
FIGURA 85. CAMBIO DEL AMORTIGUAMIENTO, D.....	121
FIGURA 86. CAMBIOS DEL MÓDULO CORTANTE, G	121

FIGURA 87. G/GMÁX VS DEFORMACIÓN DE CORTE	122
FIGURA 88. AMORTIGUAMIENTO EN COMPARACIÓN CON VARIAS CURVAS DE INVESTIGACIONES	123
FIGURA 89. G/GMÁX EN COMPARACIÓN CON VARIAS CURVAS DE INVESTIGACIONES	123
FIGURA 90. CURVA HIPERBÓLICA G/GMÁX	124
FIGURA 91. CURVA HIPERBÓLICA AMORTIGUAMIENTO	125
FIGURA 92. CURVA N°1 HIPERBÓLICA G/GMÁX.....	126
FIGURA 93. CURVA HIPERBÓLICA N°1 DE AMORTIGUAMIENTO	127
FIGURA 94. CURVA N°2 HIPERBÓLICA G/GMÁX.....	127
FIGURA 95. CURVA HIPERBÓLICA N°2 DE AMORTIGUAMIENTO	128
FIGURA 96. CURVA N°3 HIPERBÓLICA G/GMÁX.....	129
FIGURA 97. CURVA N°3 HIPERBÓLICA DE AMORTIGUAMIENTO	129
FIGURA 98. COMPARACIÓN DE CURVAS HIPERBÓLICAS G/GMÁX	131
FIGURA 99. COMPARACIÓN DE CURVAS HIPERBÓLICAS DE AMORTIGUAMIENTO	131
FIGURA 100. ESQUEMÁTICA TÍPICO DE LA CURVA DE HISTÉRESIS CÍCLICO GENERADO POR EQUIPO TRIAXIAL CÍCLICO.....	169
FIGURA 101. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA INSTALACIÓN DE UN ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO DE CARGA O DEFORMACIÓN CONTROLADA.....	171
FIGURA 102. DEFINICIÓN RELACIONADA CON CARGAS CÍCLICAS (FRECUENCIA = 1/PERÍODO = 1/T)	171
FIGURA 103. EJEMPLOS DE FORMAS DE ONDAS SINUSOIDALES DE CARGA ACEPTABLE Y NO ACEPTABLE PARA ENSAYOS TRIAXIALES CÍCLICOS DE CARGA CONTROLADA	172
FIGURA 104. CÁMARA TÍPICA DE PRESIÓN DE ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO.....	173
FIGURA 105. LÍMITES ACEPTABLES DE ALINEAMIENTO DEL PISTÓN DE CARGA Y CABEZALES: (A) EXCENTRICIDAD, (B) PARALELISMO, (C) EXCENTRICIDAD ENTRE CABEZAL SUPERIOR Y PROBETA	175
FIGURA 106. CONEXIONES TÍPICAS DE LOS CABEZALES SUPERIORES.....	175
FIGURA 107. ARREGLOS TÍPICOS DE SELLADO TRIAXIAL CÍCLICO.....	177
FIGURA 108. LAS VARIACIONES DE DISEÑO TÍPICOS DEL ALINEAMIENTO DE CÁMARAS DE PRESIÓN TRIAXIALES	178
FIGURA 109. IMPACTO DE LAS VARIABLES NO CONTROLADAS EN EL SISTEMA DEL MÓDULO FRENTE A LAS CURVAS DE DEFORMACIÓN.....	179
FIGURA 110. DIAGRAMA DEL PANEL DE CONTROL	185
FIGURA 111. MÉTODO DE APLICACIÓN DE VACÍO A LAS MUESTRAS DE SUELO	190
FIGURA 112. DEFINICIÓN DEL ERROR DE CIERRE.....	198
FIGURA 113. FORMULARIO DE CÁLCULO DEL TRIAXIAL CÍCLICO MÓDULO/COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO.....	202

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. FUENTES DE SUBDUCCIÓN	4
TABLA 2. FUENTES CORTICALES	5
TABLA 3. VALORES DEL FACTOR Z EN FUNCIÓN DE LA ZONA SÍSMICA ADOPTADA.....	10
TABLA 4. VALORES TÍPICOS DE V_p Y V_s	36
TABLA 5. RANGO DE VELOCIDADES PARA LAS ONDAS DE COMPRESIÓN EN EL SUELO Y ROCA.....	42
TABLA 6. ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO DE TRIAXIAL CÍCLICO	49
TABLA 7. VALORES REPRESENTATIVOS DE LA RELACIÓN DE POISSON	55
TABLA 8. ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO DE COLUMNA RESONANTE	61
TABLA 9. DIMENSIONES TÍPICAS DE LOS ELEMENTOS BENDER	83
TABLA 10: MODOS DE FILTRADO.....	94
TABLA 11. PROCEDIMIENTOS DE PREPARACIÓN DE PROBETAS A PARTIR DE MUESTRAS INALTERADAS.....	96
TABLA 12. PROCEDIMIENTOS DE PREPARACIÓN DE PROBETAS A PARTIR DE MUESTRAS INALTERADAS.....	97
TABLA 13. RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS	99
TABLA 14. RESULTADOS ENSAYO DE COMPACTACIÓN	101
TABLA 15. CONTENIDOS DE HUMEDAD DE LA PROBETA 1.....	106
TABLA 16. CONTENIDOS DE HUMEDAD DE LA PROBETA 2.....	107
TABLA 17. CONTENIDOS DE HUMEDAD DE LA PROBETA 3.....	107
TABLA 18. RESUMEN DE CONTENIDOS DE HUMEDAD	107
TABLA 19. VARIACIÓN DE LA DENSIDAD HÚMEDA Y SECA EN LA PROBETA N° 1	110
TABLA 20. VARIACIÓN DE LA DENSIDAD HÚMEDA Y SECA EN LA PROBETA N° 2	110
TABLA 21. VARIACIÓN DE LA DENSIDAD HÚMEDA Y SECA EN LA PROBETA N° 3	111
TABLA 22. RESULTADOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN NO CONFINADA.....	112
TABLA 23. PROGRAMA DE ENSAYOS	113
TABLA 24. EJEMPLO DE LA DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS PROBETA N°7.....	114
TABLA 25. RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRIAXIAL CÍCLICO.....	115
TABLA 26. RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COLUMNA RESONANTE	117
TABLA 27. RESUMEN DE RESULTADOS ELEMENTOS PIEZOELÉCTRICOS BENDER.....	120
TABLA 28. RESUMEN DE RESULTADOS ANÁLISIS DE REPETIBILIDAD DE LOS ENSAYOS.....	130
TABLA 29. ADQUISICIÓN DE DATOS	147
TABLA 30. ADQUISICIÓN DE DATOS, CARACTERÍSTICAS DE RESPUESTA MÍNIMOS PARA LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA TRIAXIAL CÍCLICA	181

RESUMEN

El propósito de este trabajo es brindar una guía para la utilización en laboratorio de los equipos: triaxial cíclico, columna resonante y de elementos piezoeléctricos bender, que permitan la determinación de parámetros dinámicos en suelos en laboratorio; tomando como base las Normas del American Society for Testing and Materials (ASTM).

Para el caso del ensayo Triaxial Cíclico, se tomará como referencia la norma ASTM D3999. Por otra parte, la norma ASTM D4015 para el ensayo de Columna Resonante; y algunas investigaciones propuestas por la Geotechnical Testing Journal (ASTM) y por la American Society of Civil Engineers (ASCE) para el ensayo de elementos piezoeléctricos Bender.

Palabras clave: Dinámica de suelos, triaxial cíclico, columna resonante, elementos piezoeléctricos bender, Sismicidad Ecuador

ABSTRACT

The present thesis is a guide for the use in the laboratory of the equipment: cyclic triaxial, resonant column and piezoelectric elements bender, that allow the determination of dynamic parameters in soils in laboratory; Based on the Standards American Society for Testing and Materials (ASTM).

In the case of the Cyclic Triaxial test, reference to the standard ASTM D3999. On the other hand, the standard ASTM D4015 for the Resonant Column; and some research proposed by the Geotechnical Testing Journal (ASTM) and the American Society of Civil Engineers (ASCE) for the testing of Bender element.

Key words: Soil dynamics, cyclic triaxial, resonant column, bender element, Seismicity of Ecuador

CAPITULO 1. SISMICIDAD EN ECUADOR

1.1 ANTECEDENTES

El Ecuador pertenece a la región denominada Cinturón de Fuego del Pacífico, compartida por casi todas las costas continentales e insulares bañadas por el Océano Pacífico, donde se libera el 85% de la energía sísmica principalmente en forma de terremotos.

El nivel de sismicidad en el Ecuador es relativamente alto, y con un entorno tectónico y vulcanológico único de una zona de subducción, con terremotos y difíciles condiciones subsuperficiales que pueden generar una gran amplificación de las ondas sísmicas que se propagan desde el lecho rocoso o licuarse bajo fuertes sismos. (Nikolaou, Vera, & Gilsanz, 2016)

1.2 DESCRIPCIÓN TECTÓNICA DEL ECUADOR

La información tectónica es importante para establecer las fuentes sísmicas, ya que existe una relación definida entre el movimiento de las placas y la capacidad de la generación de sismos; cuyos niveles de magnitud de momento e intensidades serán el producto de la fricción o choque; del movimiento de las placas.

El Ecuador se encuentra localizado en la parte Nor-occidental de América del Sur, la cual va desde 81°W hasta 75°W en longitud y entre las latitudes 1.25°N y 5°S, con una parte insular conformada por las islas Galápagos; se divide en cuatro regiones Costa, Sierra, Oriente y Región Insular. El movimiento tectónico que rige la amenaza en el país, se puede dividir en dos regiones (Norte y Sur).

La región Norte del territorio ecuatoriano forma parte de la microplaca denominada “Bloque andino”, la cual pertenece a la placa sudamericana definida por Pennington 1981, ver la Figura 1. (Taípe, 2013). Esta microplaca se encuentra en una interacción entre las placas de Nazca, Cocos y Caribe. El movimiento en esta zona se ha medido en un intervalo aproximado de 56 mm/año. (Alvarado, 2012)

La región Sur del Ecuador se encuentra en interacción entre la placa Sudamericana y la placa de Nazca. Este particular movimiento tectónico ha producido que en el Ecuador se presenten tres diferentes inclinaciones de la subducción de la placa de Nazca en la placa Continental (Taipe, 2013), El movimiento para la placa continental, se encuentra entre 2 y 5 mm/año. (Alvarado, 2012)

- De la latitud 1°N hacia el norte del territorio, se presenta una subducción normal con un ángulo aproximado de inclinación de 35°
- Entre la brecha conformada por las latitudes 1°N y 3°S, existe una inclinación de la subducción de 25° aproximadamente
- La tercera zona de la subducción que se forma al sur de la latitud 3°S, presenta un ángulo menor que 25°

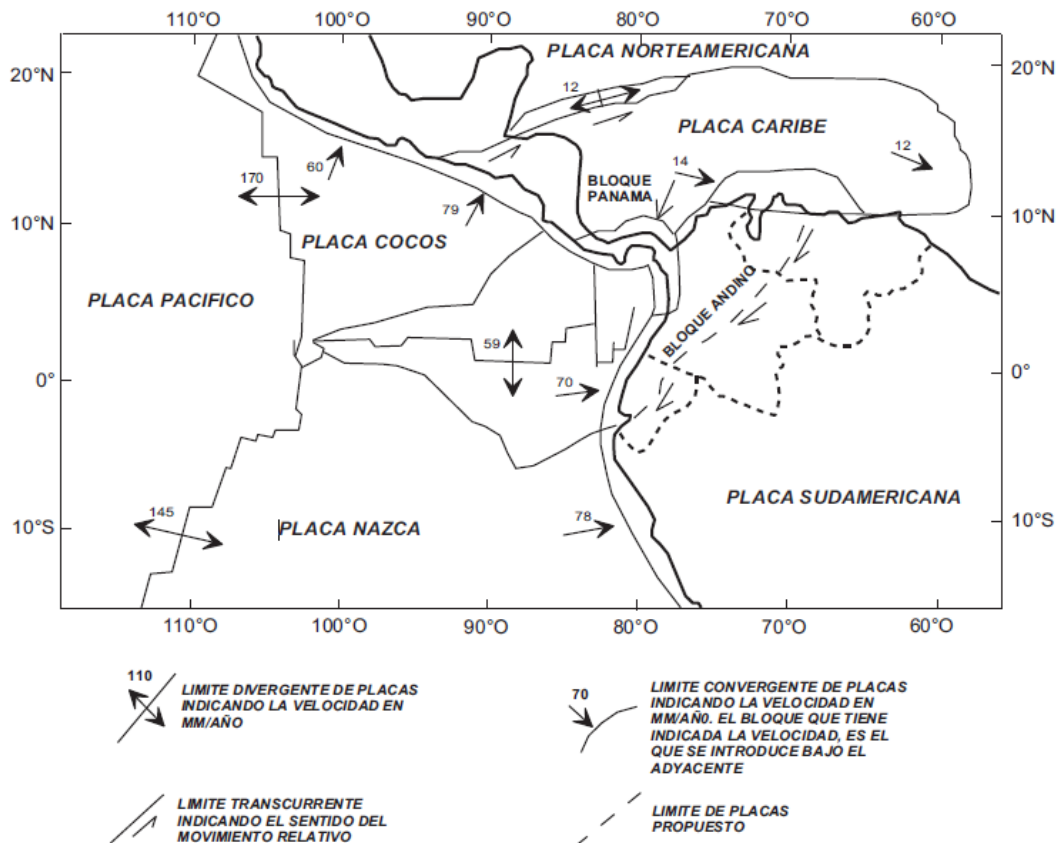


Figura 1. Límites de placas mostrando la dirección y velocidades del movimiento, modificado de Ego, 1995 (Taipe, 2013, pág. 8)
Este desequilibrio de la región ha generado un sistema de fallas denominado Sistema Mayor Dextral (Alvarado, 2012), el mismo que presenta una mayor concentración de

fallas y pliegues en la región de la Sierra ecuatoriana. Este sistema de fallas, en conjunto con la subducción presentada en la costa del país, representan las principales fuentes generadores de sismos.

Trabajos de investigación con GPS de alta precisión, presenta velocidades que van de 15-25mm/año en la costa Norte, entre 26 a 36 mm/año para la zona de la Isla de la Plata y de 5-15mm/año para la zona que va de la Península de Santa Elena hacia el Sur. La convergencia resultante relativa entre la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana es de 46mm/año. (Chlieh y otros, 2014).

1.3 SISMICIDAD EN ECUADOR

El peligro sísmico del Ecuador se encuentra regido principalmente por tres tipos de fuentes sísmicas referencia el trabajo realizado por (Alvarado, 2012)

- a) Interplaca: Se refieren a los sismos que se generan por la interacción entre la Placa de Nazca que subduce bajo la Placa Sudamericana, con profundidades menores a los 40km aproximadamente y se ubican en la zona de convergencia, ver Figura 2 .
- b) Intraplaca: Son sismos denominados de falla normal con profundidad intermedia las cuales oscilan entre los 40 y 300 km, localizados dentro de la placa oceánica de Nazca que subduce bajo la placa Sudamericana
- c) Corticales: Corresponden a sismos superficiales que ocurren dentro de la placa sudamericana debido a sistemas de fallas locales y se presentan a profundidades inferiores a los 40 km aproximadamente, ver Figura 3.

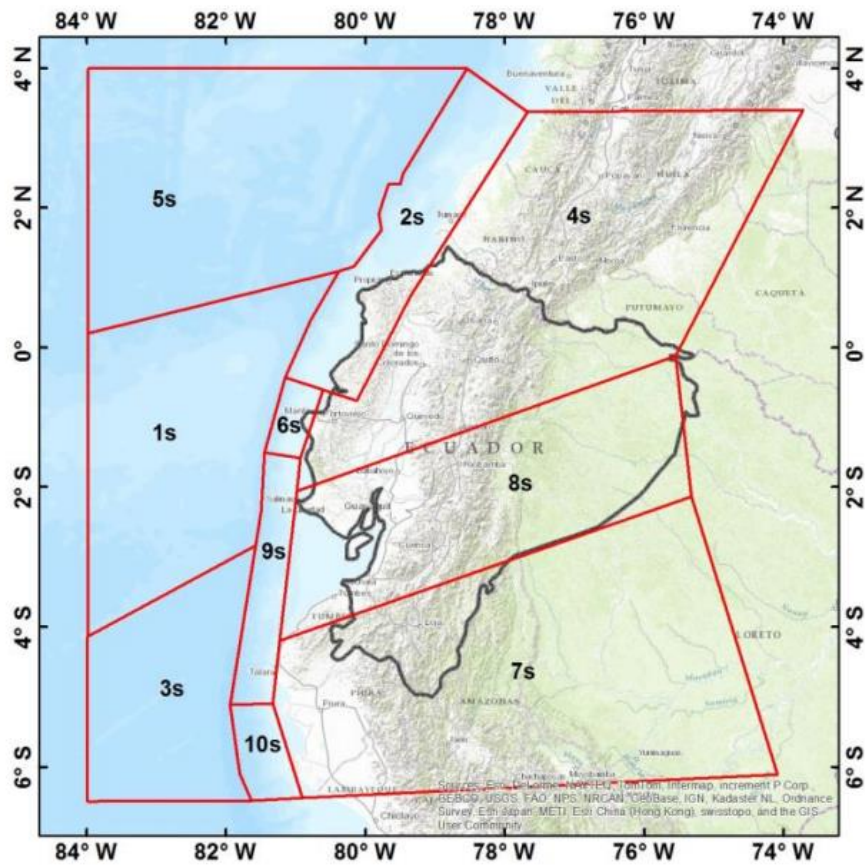


Figura 2. Fuentes sísmicas de tipo subducción (Alvarado, 2012)

Fuente: Alexandra Alvarado, Nèotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur. (2012)

Tabla 1. Fuentes de subducción

Identificación	Nombre	Tipo de falla
1s	Carnegie	Indeterminado
2s	Tumaco-Esmeraldas	Interplaca
3s	Grijalva	Indeterminado
4s	Ibarra	Intraplaca
5s	Malpelo	Indeterminado
6s	Manta	Interplaca
7s	Moyobamba	Intraplaca
8s	Puyo	Intraplaca
9s	Salinas	Interplaca
10s	Sechura	Interplaca

Fuente: Alexandra Alvarado, Nèotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur. (2012)

1.3.1 EVENTOS SÍSMICOS HISTÓRICOS

En las últimas décadas han existido eventos sísmicos de considerable magnitud, los cuales han producido daños en ciertas zonas del país, ver la Figura 4 y Figura 5. El ejemplo más reciente es el sismo del 16 de abril de 2016 a las 18h58 (tiempo local), de magnitud 7.8 (Mw escala sismológica de magnitud de momento), cuyo hipocentro se ubicó frente a Pedernales en la provincia de Manabí, a 20 km de profundidad y fue resultado del desplazamiento entre dos placas tectónicas: la placa de Nazca (placa oceánica) que se sumerge bajo la Sudamericana (placa continental). A este proceso se le conoce como subducción, y es el mismo fenómeno que originó los sismos del 31 enero 1906 (Mw 8.8), que es el más grande registrado en Ecuador y el sexto más grande a escala mundial; el del 14 mayo 1942 (Mw 7.8); 19 enero de 1958 (Mw 7.8) y del 12 diciembre de 1979 (Mw 8.1). La ubicación de las réplicas, están en relación a la magnitud del sismo principal de 7.8. Se presentan solo los eventos mayores o iguales a 3 en magnitud. (Instituto Geofísico - EPN, 2017).

El sismo del 16 de abril de 2016, es catalogado como el sismo más destructivo desde el terremoto de 1987, provocó la muerte de más de 676 personas, 28.775 personas albergadas, de acuerdo con la información del Ministerio de Desarrollo Humano y Vivienda, el sismo afectó a 35.264 viviendas, de las cuales el 53,8% se ubicaban en las zonas urbanas y el resto en áreas rurales. De las viviendas urbanas afectadas, 13962 fueron catalogadas como colapsadas o por demoler, inseguras o de uso restringido y 4960 como seguras (aunque con algunas reparaciones por realizar). De las viviendas rurales afectadas, 15710 fueron etiquetadas como colapsadas o por demoler, inseguras o de uso restringido y 632 como seguras (aunque con algunas reparaciones por realizar). La Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES), en su evaluación de costos de la reconstrucción estimó un valor de 3.344 millones de dólares aproximadamente. De este monto, un 67% (\$ 2.253 millones) será asumido por el sector público y un 33% (\$ 1.091 millones) por el sector privado.

En base a la valoración de los daños presentados por el presidente Rafael Correa en \$ 3.344 millones (Diario El Telégrafo, 2017), este dato no refleja las condiciones del

evento sísmico, ni de las condiciones de las estructuras afectadas previo al terremoto, en estudios integrales realizados por el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador las afectaciones presentadas en muchas estructuras se debió a procesos construcción inadecuados, mala calidad de los materiales empleados en la construcción, falta de diseños estructurales aprobados por la entidad reguladora, ni el correspondiente informe del estudio de mecánica de suelos.

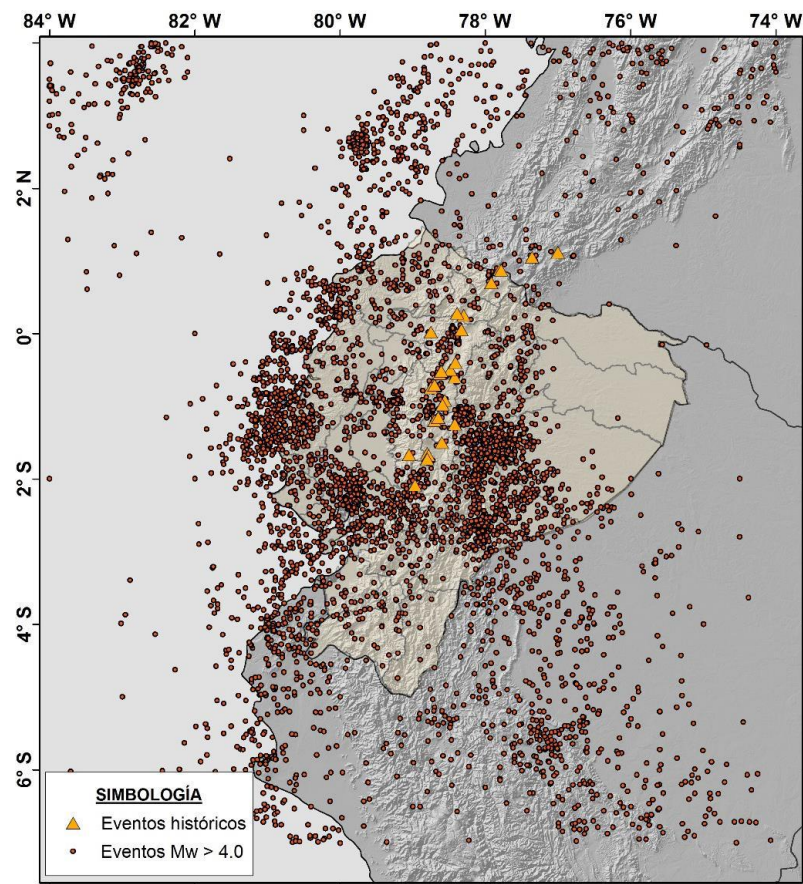


Figura 4. Eventos principales registrados en el Ecuador.

Fuente: Propuesta de actualización de la NEC-15 para el peligro sísmico probabilista en roca en el Ecuador. Vera, Quinde, Suárez, & Mera. (2016)

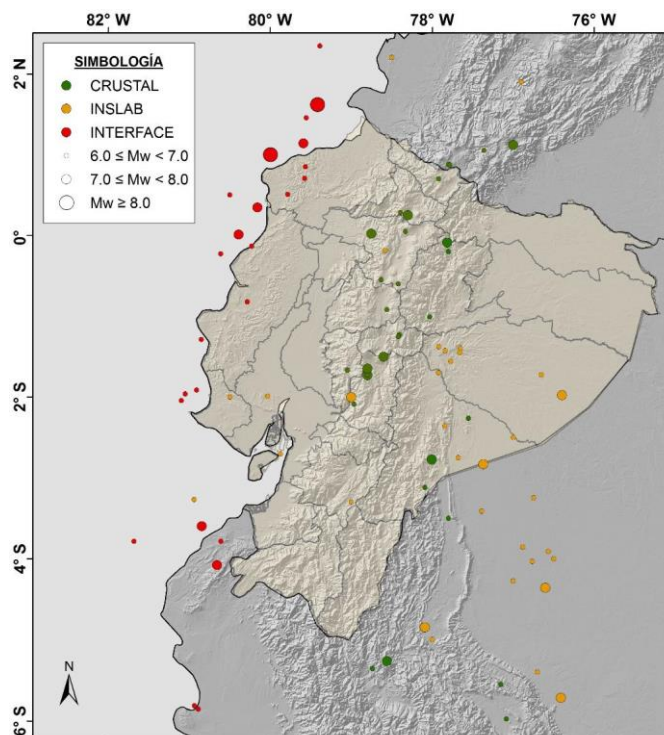


Figura 5. Eventos de magnitudes superiores a Mw6.0, clasificados por su zona y tipo de origen.

Fuente: Propuesta de actualización de la NEC-15 para el peligro sísmico probabilista en roca en el Ecuador. Vera, Quinde, Suárez, & Mera. (2016).

1.4 ACTIVIDAD VOLCÁNICA EN ECUADOR

Existen más de 250 volcanes en el frente volcánico, principal, posterior y trasero que están dentro de 4 zonas: las cordilleras Occidental, Interandina, Oriental y Subandina (Toulkeridis, 2013) y forman parte de la zona volcánica septentrional andina (Barberi, 1988; Bryant, 2006; Hall, 2008). Cerca de 20 volcanes estuvieron activos en el último siglo, 5 en actividad en los últimos 17 años, ver la Figura 6 y enumerados a continuación:

- Sangay con actividad constante (mayor intensidad registrada en 2004-11, 2013, 2016)
- Guagua Pichincha (1999-2001, 2009)
- Reventador (2002-2016 con interrupciones importantes)
- Tungurahua (1999-2016 con menos interrupciones)
- Cotopaxi (2015).



Figura 6. Izquierda: Guagua Pichincha ($0^{\circ}10'14.88''S$, $78^{\circ} 6'45.36'' W$), 10/7/99; Superior derecha: Tungurahua, 2002 ($1^{\circ}28'12.71''S$, $78^{\circ}26'41.28''W$); Centro: Sangay, 2001 ($2^{\circ}00'17,99''S$, $78^{\circ}20'26,88''W$); inferior derecho: Reventador, 2002 ($0^{\circ}04'39,00''S$, $77^{\circ}39'20,87''W$).

Fuente: Fotos de A. Speck/Anónimo (Reventador). Geer-Atc Earthquake Reconnaissance. Nikolaou, Sissy; Vera, Xavier; Gilsanz, Ramon. (2016)

La, Presenta la zona de subducción de Ecuador y cadenas volcánicas asociadas. (Toulkeridis, 2013)

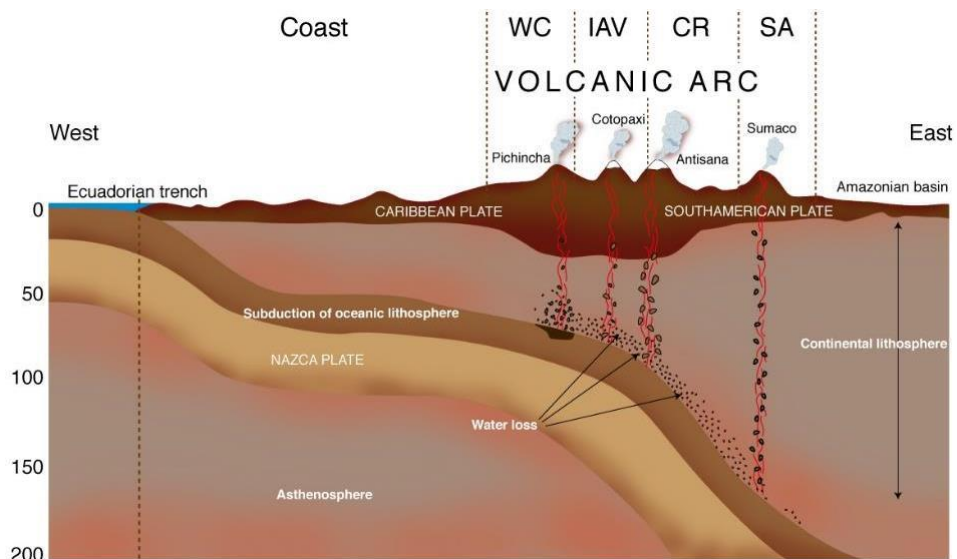


Figura 7. Zona de subducción de Ecuador y su cadena de volcanes. Fuente: Volcanes activos Ecuador. Toulkeridis, T. (2013)

1.5 MAPA DE RIESGO SÍSMICO DEL ECUADOR

En la Figura 8, la Norma Ecuatoriana de Construcción mediante su sección de peligro sísmico, establece seis zonas sísmicas caracterizada por el valor del factor de zona Z, que representa la aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad. El valor Z se usa para edificaciones de uso normal, estos valores se muestran en la Tabla 3.

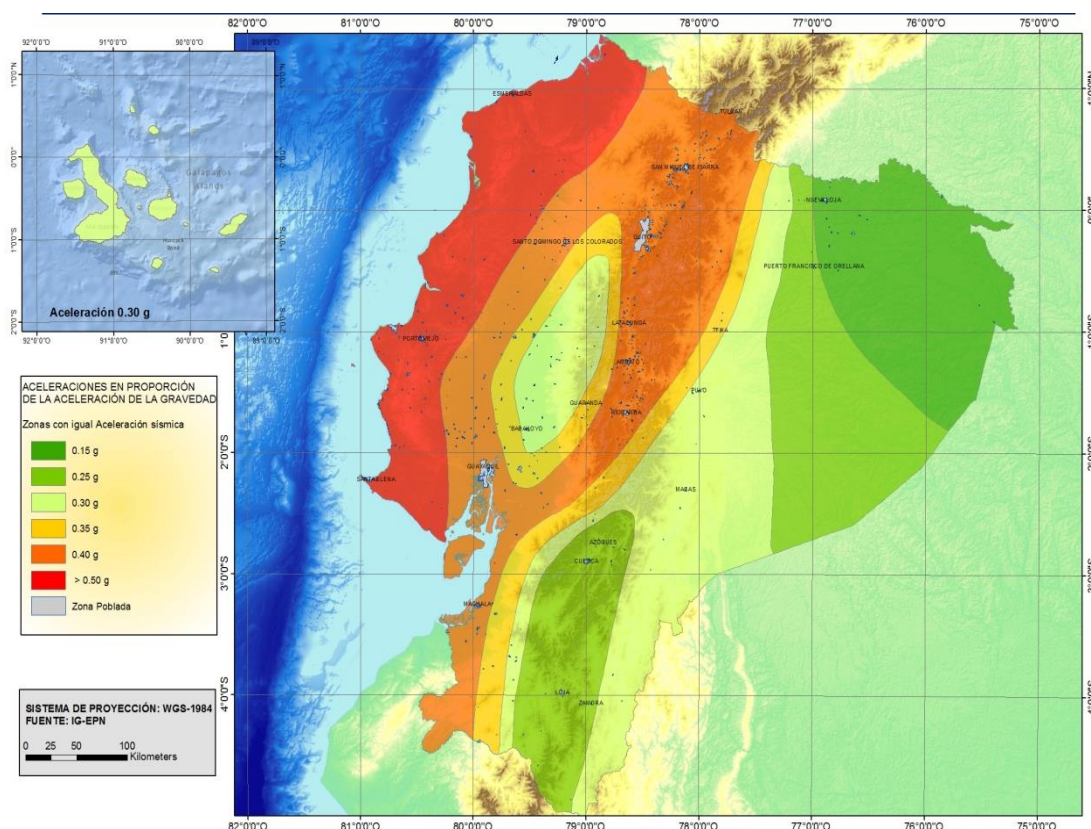


Figura 8. Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z (NEC-SE-DS, 2014, pág. 27)

“El mapa de zonificación sísmica para diseño proviene del resultado del estudio de peligro sísmico para un 10% de excedencia en 50 años (período de retorno 475 años), que incluye una saturación a 0.50 g de los valores de aceleración sísmica en roca en el litoral ecuatoriano que caracteriza la zona VI.” (NEC-SE-DS, 2014, pág. 27)

Tabla 3. Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Fuente: Código ecuatoriano de la Construcción (NEC-SE-DS, 2014, pág. 27)

De la referencia disponible en la Tabla 3, y en función de lo establecido para cada zona sísmica en Ecuador, se establece un correspondiente valor para el factor Z y la caracterización del peligro sísmico para ser usada en los diseños de estructuras y modelaciones suelo estructura.

En la actualidad la Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC) en su capítulo “Geotecnia y Cimentaciones”, contempla necesidad de la determinación de las propiedades de respuesta sísmica del suelo como el módulo de rigidez al cortante, G, y el porcentaje de amortiguamiento, a diferentes niveles de deformación, se determinarán en el laboratorio mediante ensayos de columna resonante, ensayo triaxial cíclico, corte simple cíclico u otro similar técnicamente sustentado.

CAPITULO 2. DINÁMICA DE SUELOS

2.1 INTRODUCCIÓN

La Dinámica de Suelos es un área dentro de la Mecánica de Suelos que se encarga del estudio, desde el punto de vista de ingeniería del comportamiento de los suelos, bajo fuerzas dinámicas o cíclicas y desarrollar criterios para el diseño de las fundaciones bajo tales condiciones.

El comportamiento dinámico de los suelos varía en función del tipo de fuente que genera las cargas dinámicas o cíclicas ya que estas varían en magnitud, dirección y la posición con el tiempo, por ejemplo: sismos, grandes explosiones, maquinaria en operación, procesos constructivos, tráfico vehicular y de ferrocarriles, viento, oleaje, etc. Así mismo dependerá de las condiciones del sitio donde se producen estas sollicitaciones en donde se requiere información de aspectos como geología, sismología, análisis de riesgos, ingeniería geotécnica,

Eliminé porque como introducción este enfoque es un aspecto general solo de arenas. No es el fin de la dinámica de suelos el estudio solo de arenas.

2.2 IMPORTANCIA DE LA DINÁMICA DE SUELOS

Los problemas relacionados a cargas dinámicas en suelos y en estructuras de tierra se encuentran relacionadas con la ingeniería geotécnica, pero no están limitados a lo siguiente: (Braja M. Das, 2011)

- Terremotos, vibraciones del suelo, y la propagación de las ondas a través de los suelos.
- Esfuerzos dinámicos, deformación y propiedades de resistencia dinámica de los suelos.
- Problemas de presión de la tierra dinámica.
- Los problemas de capacidad de carga dinámicas y diseño de cimentaciones.
- Los problemas en relación con la licuefacción del suelo.

- Diseño de bases para las máquinas y equipos de vibración.
- Diseño de bases y pilotaje hincado bajo cargas dinámicas.
- Estabilidad de taludes bajo cargas sísmicas.

Los diseños estructurales deben satisfacer las condiciones locales del suelo donde se proyectan, así como de los factores de operación y del medio ambiente que los rodea. Es de responsabilidad de los diseñadores satisfacer todos criterios concernientes a la resistencia a cargas estáticas o dinámicas. De ahí la importancia del conocimiento del comportamiento dinámico de los suelos.

La Dinámica de Suelos toma trascendencia en los estudios de Microzonificación Sísmica, donde se determinan las propiedades dinámicas del subsuelo, con el propósito de que sus efectos sean considerados en el análisis sísmico.

Dentro de las aplicaciones de la dinámica de suelos se puede considerar las siguientes:

- Diseño de cimentaciones de maquinaria que generan grandes vibraciones (turbinas, generadores).
- Análisis dinámico de la interacción suelo-estructura.
- Modelos de la interacción suelo-estructura en cimentaciones.
- Análisis de licuefacción de suelos.

2.3 FUNDAMENTOS DE LA DINÁMICA DE SUELOS

A continuación, se presentan algunas definiciones básicas que se requieren en el desarrollo del conocimiento de las teorías de vibración y sus conceptos de aplicación en la dinámica de suelos.

2.3.1 DEFINICIONES BÁSICAS

- (a) **Vibración u Oscilación:** Es un movimiento repetido que es dependiente del tiempo, este puede ser translacional o rotacional.

- (b) **Movimiento periódico:** Movimiento que se repite periódicamente en intervalos de tiempo iguales.
- (c) **Período:** Tiempo en el cual se repite el movimiento.
- (d) **Ciclo:** El movimiento completado en un período.
- (e) **Frecuencia:** El número de ciclos en una unidad de tiempo, expresa en Hertz (Hz) en unidades SI (ciclos por segundo).
El período y la frecuencia están así inversamente relacionados, siendo uno recíproco del otro.
- (f) **Frecuencia Natural:** En un sistema elástico que vibra por efecto de la acción de una fuerza inherente al sistema y en ausencia de una fuerza aplicada externamente, la frecuencia con la que vibra es su frecuencia natural.
- (g) **Fuerzas de vibración:** Si bajo una fuerza de excitación externa ocurren vibraciones estas son denominadas fuerzas de vibración. La frecuencia de excitación es independiente de la frecuencia natural del sistema y depende de la fuerza de excitación.
- (h) **Grado de Libertad:** Se define como el número mínimo de coordenadas independientes necesarias para describir el movimiento del sistema matemáticamente.
- (i) **Resonancia:** Si la frecuencia de excitación coincide con una de las frecuencias naturales del sistema, se dice que el sistema entra en resonancia. Las amplitudes del movimiento del sistema pueden incrementarse debido a la resonancia.

2.3.2 MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE (M.A.S)

La forma más simple de un movimiento periódico es el movimiento armónico simple. Se lo puede describir con el movimiento de un peso (W) suspendido por un resorte y ajustado en oscilación vertical, que al estirar el peso por debajo de su posición de equilibrio estático y dejándolo en libertad, el peso oscila indefinidamente alrededor de la posición de equilibrio estático, si consideramos que el resorte carece de fricción y peso; ver la Figura 9. El desplazamiento máximo con respecto a la posición de equilibrio estático se denomina amplitud (A).

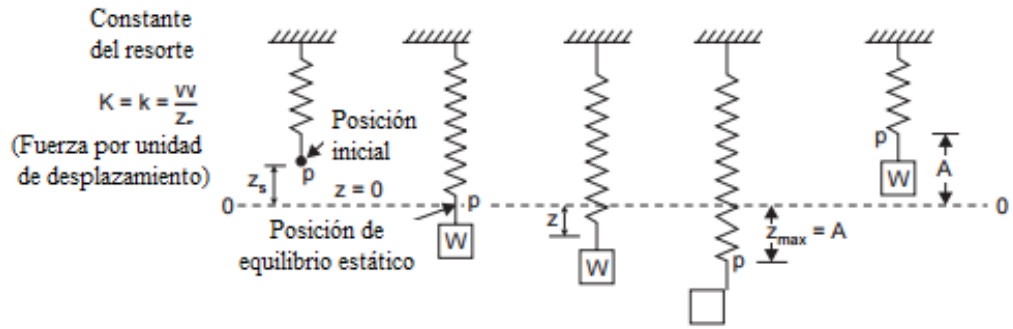


Figura 9. Movimiento armónico simple
 Fuente: Geotechnical Engineering, Venkatramaiah, C. (2006).

En la Figura 10, muestra una representación gráfica del movimiento armónico simple. La línea real de oscilación del punto p en la dirección vertical puede tomarse como la proyección sobre el diámetro vertical del punto 'a' que gira a una velocidad angular uniforme alrededor del círculo con el centro en O (Figura 10 (a)).

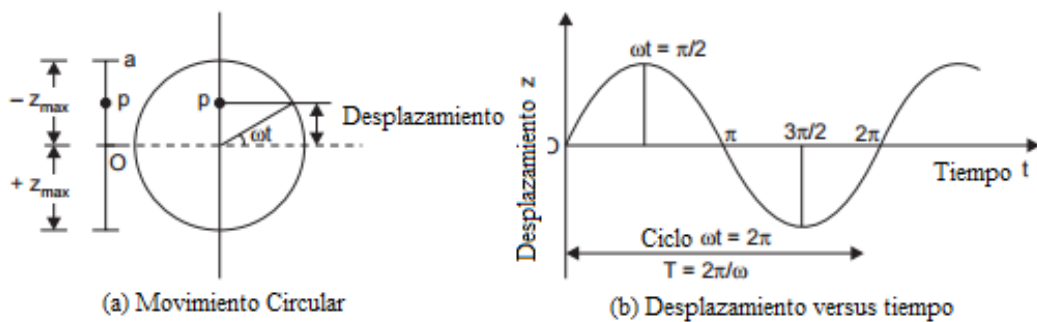


Figura 10. Representación gráfica M.A.S.
 Fuente: Geotechnical Engineering, Venkatramaiah, C. (2006).

El desplazamiento en función del tiempo se muestra en la Figura 10 (b). El movimiento es descrito por una función seno y se representa por la siguiente ecuación:

$$z = A \sin \omega t \quad \text{Ec. (1)}$$

Dónde:

z = desplazamiento

A = amplitud

ω = velocidad angular (rad por unidad de tiempo).

t = tiempo

El ciclo de movimiento se completa cuando se completa el periodo $\omega t = 2\pi$.

Por lo tanto, el periodo y la frecuencia seria:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad \text{Ec. (2)}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad \text{Ec. (3)}$$

2.3.3 FUNDAMENTOS DE LA VIBRACIÓN

Algunos aspectos fundamentales de la vibración, esenciales para el estudio de la Dinámica del Suelo que se consideran a continuación.

2.3.3.1 Grados de libertad

La Figura 11, muestra un sistema de peso soportado por un resorte y obligada a moverse en una sola dirección, es un sistema con un solo grado de libertad. De manera similar, un péndulo simple que oscila en un plano, es un ejemplo de un sistema con un solo grado de libertad.

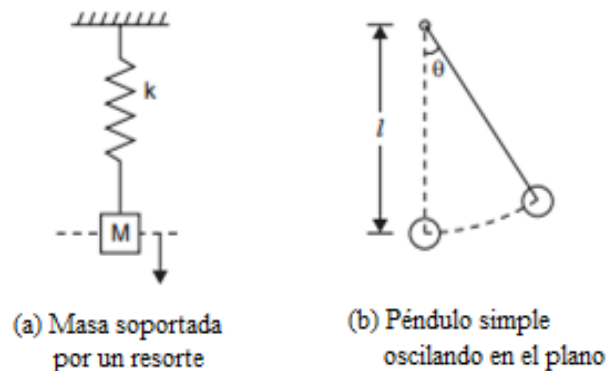


Figura 11. Sistemas con un solo grado de libertad.

Fuente: Geotechnical Engineering, Venkatramaiah, C. (2006).

Sin embargo, si la masa de la Figura 11(a) también puede girar en el plano; entonces su grado de libertad es dos.

La Figura 12, muestra un cuerpo en el espacio que tiene seis grados de libertad, que corresponde a tres de traslación y tres de rotación.

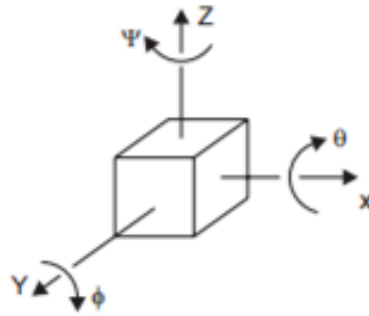


Figura 12. Cuerpo en el espacio con seis grados de libertad
 Fuente: Geotechnical Engineering, Venkatramaiah, C. (2006).

2.3.3.2 Modos de vibración

Un sistema con más de un grado de libertad es capaz de vibrar en modos complejos. Sin embargo, si cada punto del sistema sigue un patrón definido de vibración, y el modo es sistemático y ordenado, el sistema tiene un "modo principal de vibración". La vibración de un bloque puede reducirse a seis modos de vibración para su análisis. Estos son los modos principales de vibración del bloque y se muestran esquemáticamente en la Figura 13.

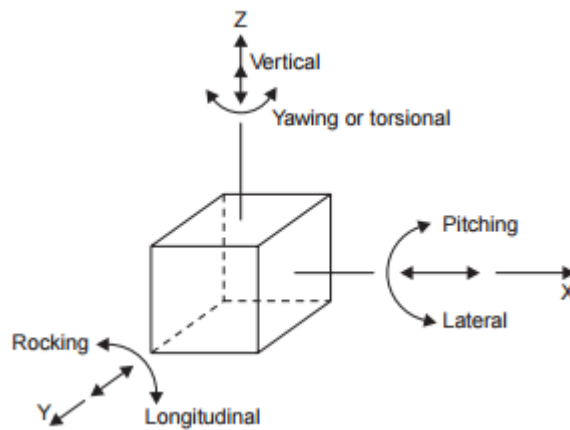


Figura 13. Modos de vibración de un bloque
 Fuente: Geotechnical Engineering, Venkatramaiah, C. (2006).

Las vibraciones verticales y torsionales pueden ocurrir independientemente pero no otras. Esto se debe a que la rotación alrededor del eje X o del eje Y siempre va acompañada de la traslación a lo largo del eje Y o X y viceversa, produciendo lo que se conoce como "movimiento acoplado".

Si en un caso particular se produce una combinación de más de un modo de vibración, se denomina "modo acoplado" de vibración. El análisis de tales modos requiere el uso de un tratamiento matemático más complejo.

2.3.3.3 *Vibraciones libres y vibraciones forzadas*

Los cuerpos que tienen tanto masa como elasticidad son capaces de experimentar vibraciones. Las vibraciones de un cuerpo o de un sistema pueden clasificarse como "Vibraciones libres" y "Vibraciones forzadas".

(a) Vibración libre

Se requiere una fuerza externa o perturbación natural aplicada a un cuerpo o a un sistema para iniciar la vibración la cual continúa sin una fuerza externa que actúe continuamente. Si la vibración no se amortigua por fricción o cualquier otra fuerza, el cuerpo o sistema experimenta una vibración libre, con una frecuencia conocida como la "frecuencia natural" del cuerpo o del sistema y se considera como la propiedad del cuerpo o del sistema.

Dependiendo del modo particular de vibración, el cuerpo o del sistema tendrá un valor particular de frecuencia natural. Así, un cuerpo o sistema puede tener tantas frecuencias naturales como los posibles modos de vibración.

(b) Vibración Forzada

Es una vibración que se produce bajo la influencia continua de una fuerza externa. La vibración depende del tipo de la fuerza externa, esta puede ser causada por una fuerza impulsiva o una fuerza periódica continua.

Golpear con un martillo un sistema produce una fuerza impulsiva que provoca la vibración forzada del sistema. La base para una máquina con masas giratorias será sometida a vibración causada por una fuerza periódica continua.

En la realidad es muy difícil encontrar un cuerpo tenga vibración libre a su frecuencia natural sin amortiguar, debido a que siempre tendrá alguna forma de Amortiguamiento.

2.3.3.4 Resonancia

Cuando la frecuencia de fuerza externa que produce una vibración forzada de un cuerpo o de un sistema, es igual, a una de las frecuencias naturales del cuerpo o del sistema, la amplitud del movimiento se modifica y tiende a ser excesivamente grande. Entonces se produce una condición de "resonancia".

El valor de la frecuencia de la fuerza externa que produce resonancia se denomina "frecuencia resonante" bajo ese modo específico de vibración. La resonancia produce amplificación de las amplitudes, esto conlleva a implicaciones peligrosas para cualquier estructura de ingeniería. Por lo tanto, las condiciones de resonancia se deben evitar.

2.3.3.5 Amortiguamiento

El amortiguamiento se define como la capacidad de resistencia al movimiento a través de un sistema físico, existen varios tipos que se los menciona a continuación:

(a) Amortiguamiento viscoso

Este tipo de Amortiguamiento se produce en las superficies deslizantes lubricadas, las manchas con pequeñas holguras, etc. La Amortiguamiento de la corriente de Foucault también es de naturaleza viscosa. La magnitud del amortiguamiento depende de la velocidad relativa y de los parámetros del sistema de Amortiguamiento.

Para un sistema particular, la fuerza de amortiguamiento es proporcional a la velocidad:

$$F = c \frac{dz}{dt} \quad \text{Ec. (4)}$$

Dónde:

F = fuerza de amortiguamiento

c = coeficiente de amortiguamiento

$$\frac{dz}{dt} = \text{velocidad}$$

Esto permite un análisis relativamente fácil del sistema, ya que la ecuación diferencial del sistema se hace lineal con este tipo de Amortiguamiento. Esta es la razón por la cual un sistema se representa a menudo para incluir un amortiguador viscoso equivalente incluso si el amortiguamiento no es verdaderamente viscoso.

(b) Amortiguamiento por fricción o Coulomb

Este tipo de amortiguamiento se produce cuando dos partes de la máquina se frotan entre sí, secas o no lubricadas. La fuerza de amortiguamiento en este caso es prácticamente constante y es independiente de la velocidad con la que las partes se frotan entre sí.

(c) Amortiguamiento sólido, interno o estructural.

Este tipo de amortiguamiento se debe a la fricción interna de las moléculas. El diagrama esfuerzo-deformación de un cuerpo vibrante no es una línea recta, sino que forma un bucle de histéresis, cuya área representa la energía disipada por fricción molecular por ciclo por unidad de volumen. El área de la curva depende del material del cuerpo vibrante, de la frecuencia y de la magnitud del esfuerzo. Dado que esto implica una pérdida interna de energía por absorción, también se denomina "Amortiguamiento interno".

(d) Amortiguamiento deslizando o interfacial.

La energía de la vibración se disipa por deslizamiento microscópico en las interfaces de las partes de la máquina en contacto bajo cargas fluctuantes. El deslizamiento microscópico también se produce en las interfaces de los elementos de la máquina que forman varios tipos de juntas. La magnitud del amortiguamiento depende, entre otras cosas, de la rugosidad superficial de las

piezas, de la presión de contacto y de la amplitud de la vibración. Este tipo de amortiguamiento es esencialmente de tipo no lineal.

(e) Amortiguamiento por radiación, dispersión o geométrica.

En el caso de la fundación de la máquina descansando sobre el suelo, la Amortiguamiento se produce debido a la pérdida de energía en dos estados. En primer lugar, una pérdida de energía se produce por la absorción de energía en el sistema, que se refleja en la histéresis en la relación esfuerzos; amortiguamiento causado por esta pérdida de energía interna se denomina "amortiguamiento interno", ya expuesta en (c). A continuación, la disipación de energía por propagación de ondas, que se irradia hacia la masa del suelo, causa un efecto amortiguador.

2.3.3.6 Vibraciones libres sin amortiguamiento

La Figura 14, describe el modelo matemático para la vibración libre sin amortiguamiento, que consiste en una masa rígida colocada sobre un resorte sin peso ni fricción y ajustado en oscilación vertical con un solo grado de libertad.

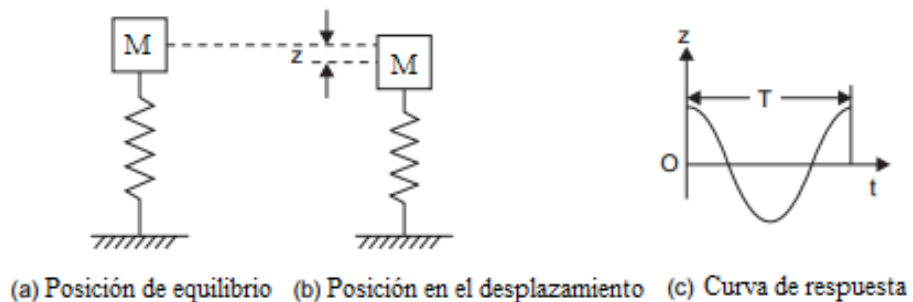


Figura 14. Sistema de vibración libre sin amortiguamiento
Fuente: Geotechnical Engineering, Venkatramaiah, C. (2006).

Aplicando la ley de movimiento de Newton, la ecuación del movimiento para la vibración libre de la oscilación de la masa es:

$$M \cdot \ddot{z} + k \cdot z = 0 \quad \text{Ec. (5)}$$

Dónde:

z = desplazamiento vertical de la masa

k = constante elástica del resorte

\ddot{z} = aceleración

M = masa

Si dividimos la ecuación (5) para la masa

$$\ddot{z} + \frac{k}{M} \cdot z = 0 \quad \text{Ec. (6)}$$

$$\ddot{z} + \omega_n^2 \cdot z = 0 \quad \text{Ec. (7)}$$

Es una ecuación diferencial lineal homogénea y la solución está dada por:

$$z = C_1 \sin \omega_n t + C_2 \cos \omega_n t \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde C_1 y C_2 son constantes de integración que pueden determinarse a partir de las condiciones iniciales del sistema. Donde ω_n es la frecuencia angular natural de la vibración libre no amortiguada. La unidad de medida es, rad/s.

$$\omega_n^2 = \frac{k}{M} \quad \text{Ec. (9)}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M}} \quad \text{Ec. (10)}$$

En donde la frecuencia y el periodo natural del sistema son:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} \quad \text{Ec. (11)}$$

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k}} \quad \text{Ec. (12)}$$

La curva desplazamiento-tiempo, que se conoce como la curva de respuesta del sistema, se muestra en la Figura 14(c). Las vibraciones libres pueden ser iniciadas

por un desplazamiento inicial o una velocidad inicial. La solución final del sistema depende de estas condiciones iniciales.

2.3.3.7 Vibraciones forzadas sin amortiguamiento

La Figura 15, describe el modelo matemático para la vibración forzada sin amortiguamiento, que consiste en una masa rígida colocada sobre un resorte sin peso ni fricción y ajustado en oscilación vertical con un solo grado de libertad, sometida a una fuerza periódica externa de excitación, el sistema experimenta vibraciones forzadas.

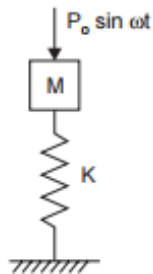


Figura 15. Sistema de vibración forzada no amortiguada.
Fuente: Geotechnical Engineering, Venkatramaiah, C. (2006).

La fuerza periódica, definida por:

$$P = P_0 \sin \omega t \quad \text{Ec. (13)}$$

Dónde:

P_0 = valor máximo de la fuerza de excitación

ω = frecuencia circular de la fuerza de excitación, rad/s.

La ecuación de movimiento para el sistema es:

$$M \cdot \ddot{z} + k \cdot z = P \quad \text{Ec. (14)}$$

Dónde:

P = fuerza periódica

z = desplazamiento vertical de la masa

k = constante elástica del resorte

\ddot{z} = aceleración

M = masa

$$M \cdot \ddot{z} + k \cdot z = P_o \sin \omega t \quad \text{Ec. (15)}$$

Si se divide la ecuación (15) para la masa:

$$\ddot{z} + \frac{k}{M} \cdot z = \frac{P_o}{M} \sin \omega t \quad \text{Ec. (16)}$$

$$\ddot{z} + \omega_n^2 \cdot z = \frac{P_o}{M} \sin \omega t \quad \text{Ec. (17)}$$

La solución puede obtenerse por partes como la suma de la función complementaria y de la integral particular. La función complementaria que representa la vibración libre no existe en esta situación y la integral particular es de interés.

Puesto que la fuerza aplicada es armónica, el movimiento del sistema puede considerarse armónico. Así, la integral particular puede tomarse como:

$$z = A \sin \omega_n t \quad \text{Ec. (18)}$$

Sustituyendo esto en la ecuación (18), podemos mostrar que:

$$A = \frac{P_o}{M(\omega_n^2 - \omega^2)} \quad \text{Ec. (19)}$$

Se deduce que la frecuencia de una vibración forzada es igual a la de la fuerza de excitación. La ecuación 19 puede ser reescrita como:

$$A = \frac{P_o}{M\omega_n^2 \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)} \quad \text{Ec. (20)}$$

Siendo:

$$\frac{P_o}{M\omega_n^2} = A_{st} \quad \text{Ec. (21)}$$

Dónde

A_{st} = Deflexión del sistema bajo P_0 , aplicado estáticamente.

La relación $\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)$ es denominada la relación de frecuencia, ξ

$$A = \frac{A_{st}}{(1-\xi^2)} \quad \text{Ec. (22)}$$

El factor $(1 - \xi^2)$ es denominado factor de magnificación, η_0 . Esto es la relación de la amplitud dinámica del desplazamiento estático. Ver la Figura 16.

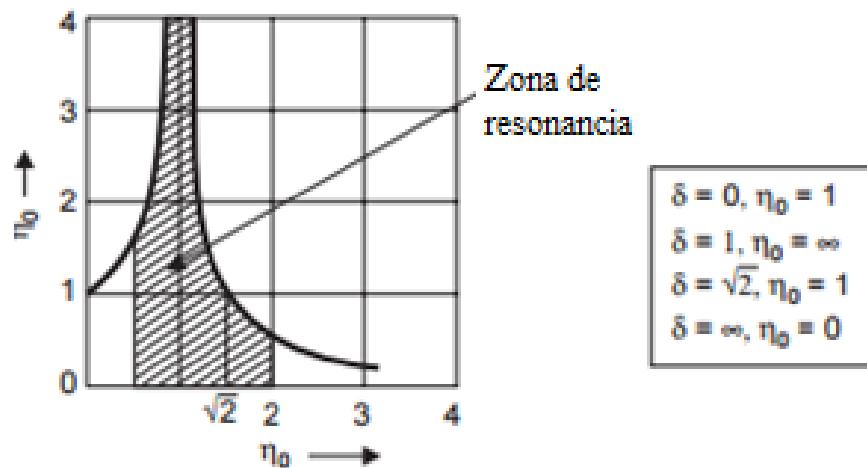


Figura 16. Relación de frecuencia vs factor de magnificación

Fuente: Geotechnical Engineering, Venkatramaiah, C. (2006).

Cuando la frecuencia de excitación se aproxima a la frecuencia natural del sistema ($\xi=1$), el factor de magnificación y, por lo tanto, la amplitud de la vibración tiende a ser infinito, produciéndose la resonancia. Si la proporción de frecuencias es superior a 1, habrá una disminución pronunciada del factor de magnificación.

2.3.3.8 Vibraciones libres con amortiguamiento

La Figura 17, describe el modelo matemático para la vibración libre con amortiguamiento, que consiste en una masa rígida colocada sobre un resorte sin peso ni fricción, un amortiguador “dastpot” que es el elemento matemático más

sencillo que simula un amortiguador viscoso y ajustado en oscilación vertical es un sistema de un solo grado de libertad.

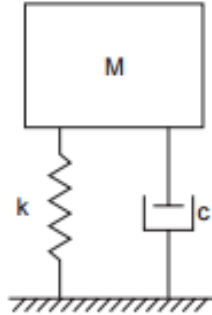


Figura 17. Sistema masa, resorte y amortiguador “dastpot”

Fuente: Geotechnical Engineering, Venkatramaiah, C. (2006).

Aplicando la ley de movimiento de Newton, la ecuación del movimiento es:

$$M \cdot \ddot{z} + c \cdot \dot{z} + k \cdot z = 0 \quad \text{Ec. (23)}$$

Dónde:

z = desplazamiento vertical de la masa

k = constante elástica del resorte

\dot{z} = velocidad de desplazamiento

c = coeficiente de amortiguamiento viscoso

\ddot{z} = aceleración

M = masa

La ecuación (23), puede ser reescrita como:

$$\ddot{z} + \frac{c}{M} \cdot \dot{z} + \frac{k}{M} \cdot z = 0 \quad \text{Ec. (24)}$$

$$\alpha = \frac{c}{M} \quad \text{Ec. (25)}$$

$$\ddot{z} + \alpha \cdot \dot{z} + \omega_n^2 \cdot z = 0 \quad \text{Ec. (26)}$$

La solución de la ecuación (26) en la forma:

$$z = e^{\lambda t} \quad \text{Ec. (27)}$$

Siendo λ una constante a determinar.

Sustituyendo esto en la ecuación (25), obtenemos:

$$(\lambda^2 + \alpha\lambda + \omega_n^2)e^{\lambda t} = 0 \quad \text{Ec. (28)}$$

$$\lambda^2 + \alpha\lambda + \omega_n^2 = 0 \quad \text{Ec. (29)}$$

Las raíces de esta ecuación serían:

$$\lambda_1 = -\frac{\alpha}{2} + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 - \omega_n^2} \quad \text{Ec. (30)}$$

$$\lambda_2 = -\frac{\alpha}{2} - \sqrt{\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 - \omega_n^2} \quad \text{Ec. (31)}$$

De estas raíces surgen tres posibles tipos de posibles formas de amortiguamiento que son:

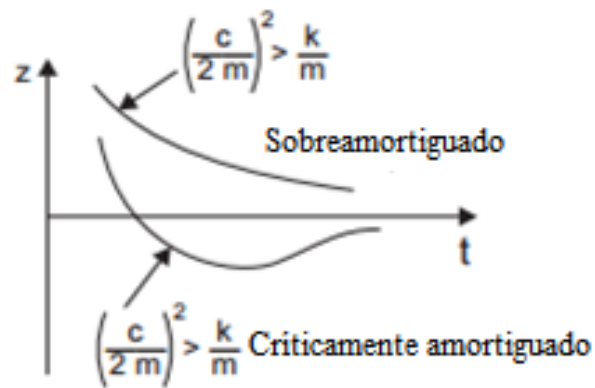


Figura 18. Modelo matemático para vibraciones libres con amortiguamiento.

Fuente: Geotechnical Engineering, Venkatramaiah, C. (2006).

Caso 1: Las raíces son reales y negativas si $\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 > \omega_n^2$, $\left(\frac{c}{2M}\right)^2 > \frac{k}{M}$

La solución general es:

$$z = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} \quad \text{Ec. (32)}$$

Puesto que tanto λ_1 como λ_2 son negativos, z disminuirá exponencialmente con el tiempo sin ningún cambio en el signo como se muestra en la Figura 18. El movimiento no es periódico y se dice que el sistema está sobreamortiguado.

Caso 2: Las raíces son iguales si $\left(\frac{c}{2}\right)^2 = \omega_n^2$ o $\left(\frac{c}{2M}\right)^2 = \frac{k}{M}$

La solución general es:

$$z = e^{\frac{c}{2M}t}(C_1 + C_2t) \quad \text{Ec. (33)}$$

Esto es similar al caso sobreamortiguado excepto que es posible que el signo cambie una vez como se muestra en la Figura 18. Esto tampoco es un movimiento periódico y con un aumento en el tiempo, se acerca a cero. El valor de c para esta condición se denomina «coeficiente de Amortiguamiento crítico», c_c

Dónde:

$$\begin{aligned} \left(\frac{c}{2M}\right)^2 &= \frac{k}{M} \\ c_c &= 2\sqrt{kM} \end{aligned} \quad \text{Ec. (34)}$$

Usando la ecuación (10) puede ser escrita:

$$c_c = 2M\omega_n$$

c_c = el valor limitado para c para el movimiento periódico

Caso 3: Las raíces son complejas y conjugadas si $\left(\frac{c}{2}\right)^2 < \omega_n^2$

$$\left(\frac{c}{2M}\right)^2 < \frac{k}{M}$$

Usando la ecuación, las raíces λ_1 y λ_2 son:

$$\lambda_1 = \omega_n(-D + i\sqrt{1 - D^2}) \quad \text{Ec. (35)}$$

$$\lambda_2 = \omega_n(-D - i\sqrt{1 - D^2}) \quad \text{Ec. (36)}$$

Dónde:

$D = \frac{c}{c_c}$, es llamado “Relación de Amortiguamiento” o “Factor Amortiguamiento”.

Sustituyendo este en la ecuación (32) y simplificando, la solución general sería:

$$z = e^{-\omega_n D t} (C_3 \sin \omega_n t \sqrt{1 - D^2} + C_4 \cos \omega_n t \sqrt{1 - D^2}) \quad \text{Ec. (37)}$$

Dónde:

C_3 y C_4 son constantes arbitrarias:

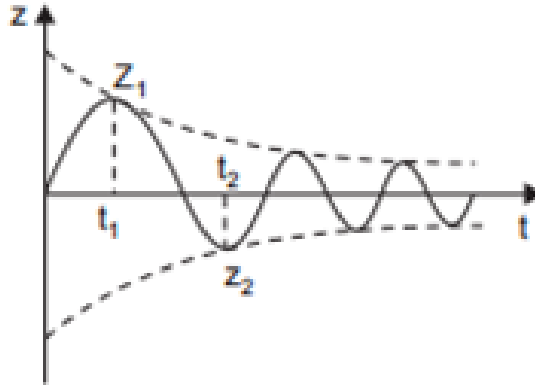


Figura 19. Modelo matemático para vibraciones libres con amortiguamiento.

Fuente: Geotechnical Engineering, Venkatramaiah, C. (2006).

La ecuación (37) indica que el movimiento es periódico y el decaimiento en amplitud será proporcional a $e^{-\omega_n D t}$ como se muestra por la curva discontinua en la Figura 19. La ecuación (37) indica que la frecuencia de vibraciones libres con amortiguamiento es menor que la frecuencia natural para vibraciones libres no amortiguadas, y que como $D \rightarrow 1$, la frecuencia se aproxima a cero. La relación entre estas dos frecuencias está dada por:

$$\omega_{dn} = \omega_n \sqrt{1 - D^2} \quad \text{Ec. (38)}$$

Dónde:

ω_{dn} = frecuencia de vibraciones libres con amortiguamiento. La figura (17) muestra que hay un decremento en las amplitudes picos sucesivos. Usando la ecuación (37), pueden encontrarse relaciones de amplitudes de pico sucesivas.

Sea z_1 y z_2 las amplitudes de los picos sucesivos a veces t_1 y t_2 , respectivamente, como se muestra en la figura (17).

$$\frac{z_1}{z_2} = \exp\left(\frac{2\pi D}{\sqrt{1-D^2}}\right) \quad \text{Ec. (39)}$$

El decremento logarítmico es definido como:

$$\delta = \ln \frac{z_1}{z_2} = \frac{2\pi D}{\sqrt{1-D^2}} \quad \text{Ec. (40)}$$

En palabras, el decremento logarítmico se define como el logaritmo natural de la relación de dos amplitudes sucesivas de un mismo signo en la curva de decaimiento obtenida en la vibración libre con amortiguamiento.

Es aproximadamente $2\pi D$, cuando D es pequeño. La ecuación (40), también indica que, en el amortiguamiento viscoso, la relación de amplitudes de cualesquiera picos sucesivos es una constante. Se deduce que el decremento logarítmico puede obtenerse a partir de cualquiera de las dos amplitudes pico z_1 y z_{1+n} de la ecuación:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{z_1}{z_{1+n}} \quad \text{Ec. (41)}$$

2.3.3.9 *Vibraciones forzadas con amortiguamiento*

Un sistema que experimenta vibraciones forzadas, y en el que está presente un amortiguamiento viscoso, puede analizarse mediante el modelo de manguito de resorte de masa mostrado en la Figura 20.

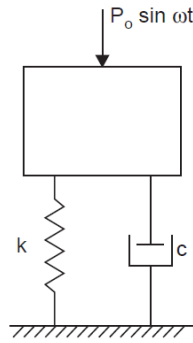


Figura 20. Vibración forzada con amortiguamiento.
 Fuente: Geotechnical Engineering, Venkatramaiah, C. (2006).

Aplicando la ley de movimiento de Newton, la ecuación del movimiento es:

$$M \cdot \ddot{z} + c \cdot \dot{z} + k \cdot z = P_0 \sin \omega t \quad \text{Ec. (42)}$$

Dónde:

P = fuerza periódica

z = desplazamiento vertical de la masa

k = constante elástica del resorte

\dot{z} = velocidad de desplazamiento

c = coeficiente de amortiguamiento viscoso

\ddot{z} = aceleración

M = masa

Esto puede ser reescrito como:

$$\ddot{z} + \frac{c}{M} \cdot \dot{z} + \frac{k}{M} \cdot z = \frac{P_0}{M} \sin \omega t \quad \text{Ec. (43)}$$

$$\ddot{z} + \alpha \cdot \dot{z} + \omega_n^2 \cdot z = \frac{P_0}{M} \sin \omega t \quad \text{Ec. (44)}$$

Dónde: $\alpha = \frac{c}{M} \quad \omega_n^2 = \frac{k}{M}$

La solución particular es una oscilación armónica de estado estacionario que tiene una frecuencia igual a la de la excitación, y el vector de desplazamiento rezaga el vector de fuerza por algún ángulo. Por lo tanto, supongamos que la solución particular es:

$$z = A \sin(\omega t - \phi) \quad \text{Ec. (45)}$$

$$A = \frac{P_o}{M\omega_n^2 \sqrt{\alpha^2 \omega^2 + (\omega_n^2 - \omega^2)}} \quad \text{Ec. (46)}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{\alpha W}{(\omega_n^2 - \omega^2)} \right\} \quad \text{Ec. (47)}$$

Puede ser expresado como:

$$A = \frac{P_o}{M\omega_n^2 \sqrt{(1-\xi^2)^2 + 4D^2\xi^2}} \quad \text{Ec. (48)}$$

Dónde:

$$\xi = \frac{\omega}{\omega_n}, \text{ la relación de frecuencia}$$

2.4 PROPAGACIÓN DE ONDAS EN EL SUELO

El estudio de la ingeniería geotécnica de terremotos requiere un entendimiento de los procesos por los cuales ocurren los sismos y los efectos del movimiento del terreno. La propagación de las ondas, se ve afectada de absorción de energía del suelo que disipa las ondas por sus propiedades de disipación.

Puesto que las vibraciones transmitidas por las cimentaciones (bien sean de las estructuras hacia el suelo, como son las fuerzas de maquinaria, o del suelo hacia las estructuras, como es el caso de sismos) se efectúan siempre a través de ondas, es muy importante conocer los distintos tipos de ondas que se producen en el suelo y sus mecanismos de propagación.

En primer lugar, se indicarán los tipos de ondas elásticas existentes en un medio infinito, posteriormente se analizará la propagación de ondas en un medio semi-infinito con características tanto homogéneas como las de un medio estratificado y finalmente se describirá la propagación de ondas en barras.

2.5 TIPOS DE ONDAS

Las ondas sísmicas o elásticas, se generan de manera natural por movimientos telúricos o de manera artificialmente por ejemplo en explosiones. Las ondas generadas en el foco viajan en todas direcciones a través de las rocas, como se puede observar en la Figura 21. Se dividen en dos grupos, ondas internas o de cuerpo y ondas superficiales.

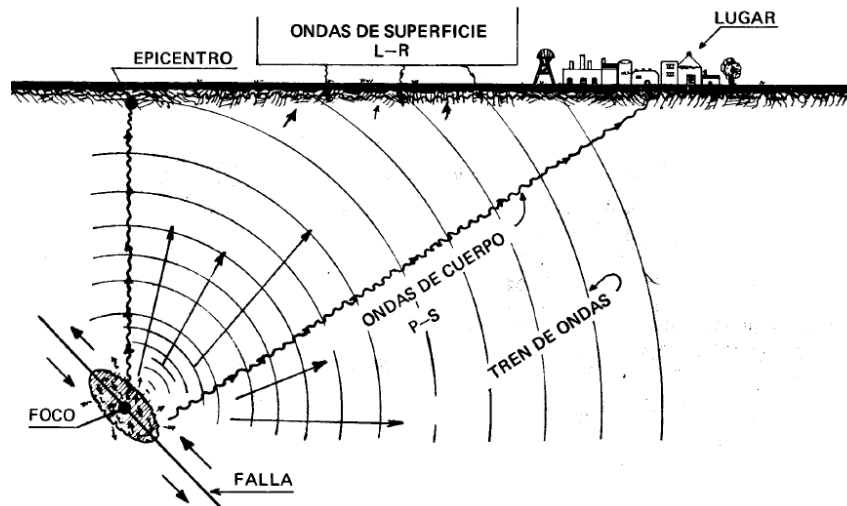


Figura 21: Ondas sísmicas.

Fuente: Dinámica de Suelos y Estructuras. Selva, R. C. (1983).

2.5.1 ONDAS SUPERFICIALES

Estas ondas se propagan por la superficie terrestre a partir del epicentro que es el punto más próximo al foco, viajan con velocidades menores en comparación a las ondas internas y debido a su frecuencia baja crean con facilidad resonancia en estructuras de gran altura en comparación de las ondas internas, siendo las más destructivas. En las ondas superficiales existen dos tipos:

2.5.1.1 Ondas Love

En 1911, Augustus Love matemático y geofísico, desarrolló un modelo matemático de las ondas superficiales que crean cortes horizontales en la superficie a las cuáles denominó como ondas Love. Viajando a menores velocidades que las ondas Rayleigh.

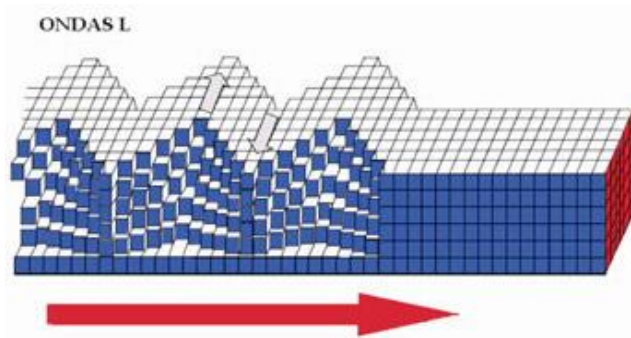


Figura 22: Ondas Love.
 Fuente: www.funvisis.gob.ve/glosario.php

2.5.1.2 Ondas Rayleigh

John William Strutt físico y profesor universitario británico, anunció la existencia de las ondas Rayleigh. Estas ondas viajan de manera similar a las encontradas en las superficies del agua y tienen su máxima amplitud en la superficie libre, la cual decrece exponencialmente con la profundidad.

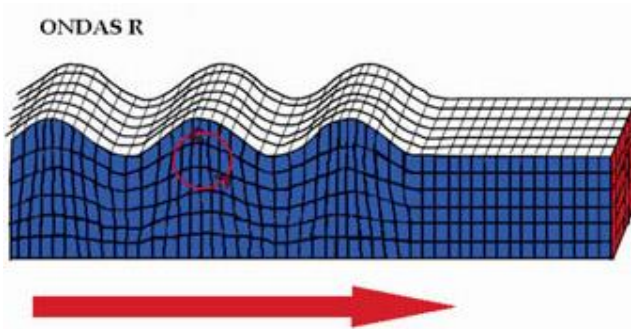


Figura 23: Ondas Rayleigh.
 Fuente: www.funvisis.gob.ve/glosario.php

2.5.2 ONDAS INTERNAS O DE CUERPO

Las ondas internas viajan a través de las rocas en el interior de la Tierra, debido a sus cambios de densidad y composición siguen trayectorias sinuosas teniendo poco poder destructivo. Se dividen en dos grupos:

2.5.2.1 Ondas Primarias (P)

Son ondas longitudinales o compresionales, al propagarse producen compresión y dilatación a su paso generando vibración de las partículas en similar sentido del tren de ondas, produciendo, debido a sus pequeñas amplitudes viajan a mayor velocidad y por tanto son las primeras que se registran en los sismógrafos.

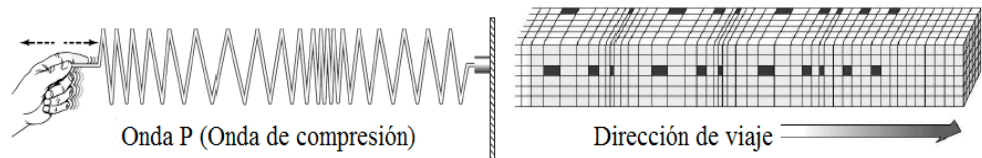


Figura 24: Ondas Primarias (P).

Fuente: www.funvisis.gob.ve

2.5.2.2 Ondas Secundarias (S)

Las ondas S son ondas de corte, que hacen vibrar las partículas en sentido perpendicular al de su propagación, alternadamente hacia un lado y hacia el otro. La velocidad de las ondas S es el 58% de la velocidad una onda P para cualquier material rocoso. Las propiedades físicas de la roca como su densidad influyen en estas velocidades. Usualmente las ondas S tiene mayor amplitud, contenido de energía y menor velocidad que las ondas P, se sienten más fuerte y pueden causar más daños en las estructuras.

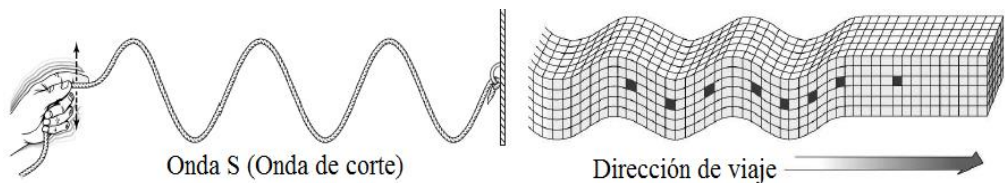


Figura 25: Ondas Secundarias (S).

Fuente: www.funvisis.gob.ve

“La velocidad de propagación de las ondas P es V_p , y de las ondas S es V_s en materiales elásticos, estas son independientes de la frecuencia y se expresan con las siguientes fórmulas:” (Rajasekaran, 2009)

$$V_P = \left[\frac{E(1+\gamma)}{\rho(1+\gamma)(1-2\gamma)} \right]^{0.5} \quad \text{Ec. (49)}$$

$$V_S = \left[\frac{E}{2\rho(1+\gamma)} \right]^{0.5} = \left(\frac{G}{\rho} \right)^{0.5} \quad \text{Ec. (50)}$$

Dónde:

E = Módulo de elasticidad,

G = Módulo de rigidez

γ = densidad

Asumiendo un comportamiento elástico lineal, donde la rigidez elástica se relaciona con la velocidad de propagación de la onda como a continuación se presenta (Benz, 2007):

$$V_P = \left[\frac{\lambda+2G}{\rho} \right]^{0.5} \quad \text{Ec. (51)}$$

$$V_P = \left[\frac{G}{\rho} \right]^{0.5} \quad \text{Ec. (52)}$$

Donde:

λ = constante Lamé's

γ = densidad

G = Módulo de rigidez

$$\lambda = \left[\frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \right]^{0.5} \quad \text{Ec. (53)}$$

En la Tabla 4 se presentan valores típicos de velocidades de cuerpo para diferentes tipos de materiales:

Tabla 4. Valores típicos de V_P y V_S

Tipo de Suelo	Velocidad de onda de compresión V_P (m/s)	Velocidad de onda de corte V_S (m/s)
Arena fina	300	90 - 150

Arena densa	460	230
Grava	762	180 - 215
Arcilla húmeda	1220 - 1370	150
Granito	3960 - 5490	2130 - 3350
Arenisca	1370 - 3960	610 - 2130

Fuente: Principles of Soil Dynamics. Braja M. Das, G. R. (2011).

2.5.3 DIFERENTES TIPOS DE CARGAS

Dentro del análisis en la dinámica de suelos se consideran dos tipos de cargas de las que se detalla a continuación:

2.5.3.1 Cargas dinámicas

“La naturaleza de la carga dinámica en el suelo o en la base de una estructura, depende de la fuente que lo produce. Las cargas dinámicas con respecto del tiempo varían en magnitud, dirección.” (Dong-Soo Kim, 1991)

“Las cargas sísmicas no pueden ser descritas como funciones definidas en el tiempo, debido a su inherente incertidumbre, en su magnitud y forma de variación con el tiempo.” (Humar 2001). Estas propiedades en el suelo, son necesarias para el análisis y diseño de estructuras, en sollicitaciones dinámicas como los sismos.

La Figura 26 muestra un acelerograma de un terremoto en Estados Unidos el cual evidencia lo citado por Humar.

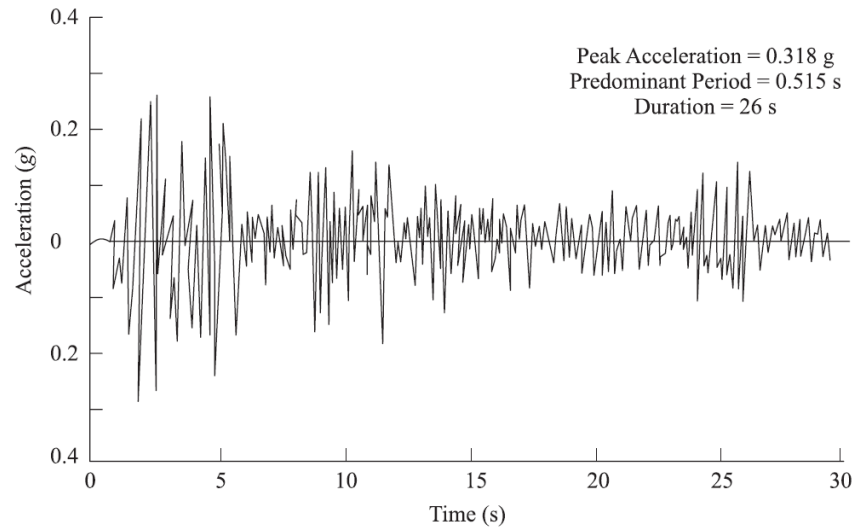


Figura 26. Acelerograma del terremoto del 18 de mayo, 1940, Centro de California, (componente norte-sur).
Fuente: Principles of Soil Dynamics. Braja M. Das, G. R. (2011).

2.5.3.2 Cargas cíclicas

“Las cargas cíclicas presentan un grado de regularidad tanto en su magnitud como en la frecuencia.” (Braja M. Das, 2011). Las cargas dinámicas esencialmente de origen ambiental (olas, mareas, corrientes, viento, sismos) o antropogénico (debido al tráfico, explosiones, operaciones de plantas o maquinaria), pueden ser transformadas en cargas cíclicas para su estudio, siendo esta la práctica más común en donde se define ciclos de carga uniforme o desplazamiento constantes, una frecuencia definida y una amplitud regular convirtiéndose. Tales consideraciones definen un número de ciclos N , un periodo (T), una carga media (Q_a), la amplitud de carga cíclica (q_{cy}), como se muestra en la Figura 27.

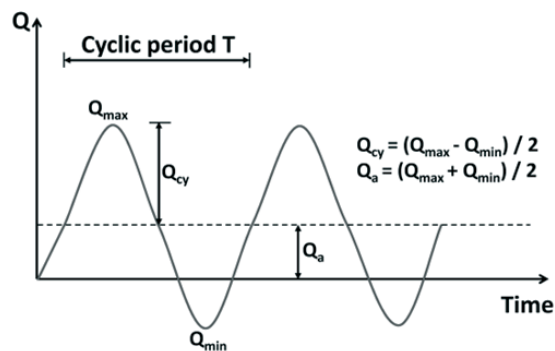


Figura 27. Definición de carga cíclica
Fuente: Principles of Soil Dynamics. Braja M. Das, G. R. (2011).

Las características de las cargas cíclicas, que varían considerablemente como se ilustra en la Figura 28. (Dong-Soo Kim, 1991)

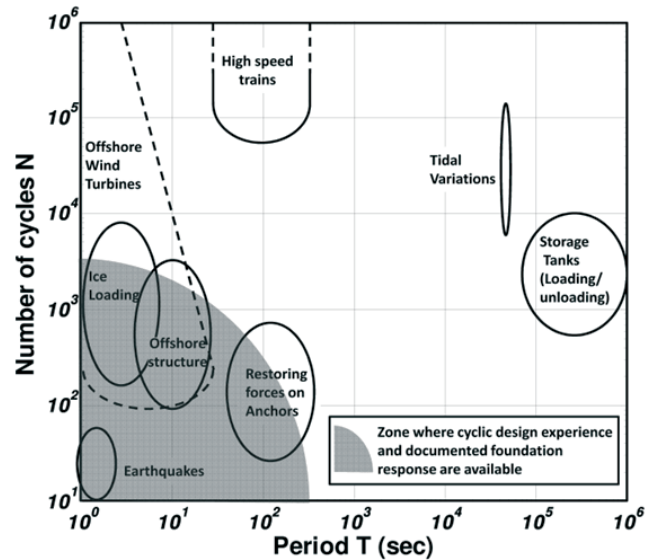


Figura 28. Períodos y número de ciclos que caracterizan los eventos típicos de carga cíclicos.

Fuente: Deformational characteristics of soils at small to intermediate strains from cyclic tests. Dong-Soo Kim, K. H. (1991).

2.6 EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SUELO EN CAMPO Y EN LABORATORIO

Los equipos y las metodologías de ensayo utilizadas tanto en campo como en laboratorio son diferentes a los aspectos teóricos mediante los cuales fueron desarrollados. Sus ventajas y desventajas en las diferentes metodologías de ensayo han sido ampliamente discutido por un gran número de investigadores. A continuación, se muestra en la Figura 29 algunas de estas metodologías utilizadas.

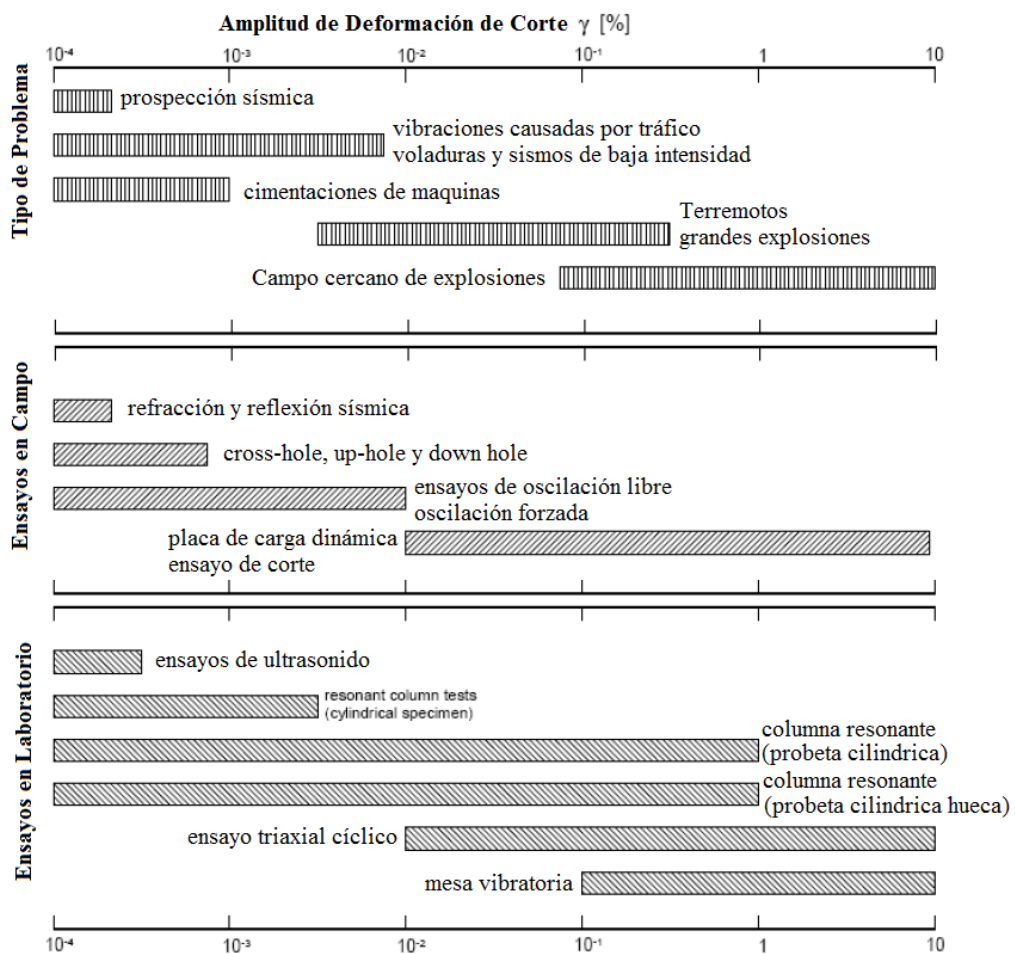


Figura 29. Lista de los ensayos más comunes en campo y de laboratorio y amplitud de deformación de corte asociada a ellos. (Camacho Tauta, 2011)

Fuente: Evaluation of the small-strain stiffness of soil by non-conventional dynamic testing methods. Camacho Tauta, J. F. (2011).

2.6.1 ENSAYOS DE CAMPO

2.6.1.1 Sísmica de refracción

La sísmica de refracción es un método estandarizado por la ASTM D5777, siendo aplicable en estudios geológicos, geotécnicos, hidrológicos, es muy adecuado para las investigaciones del sitio generales en la dinámica del suelo y propósitos de ingeniería sísmica. La cual se la utiliza para determinar las características geológicas, estratigrafía, profundidad de la roca madre, litología, estructura y fracturaciones.

El ensayo se lo realiza impactando un martillo sobre una placa de metal o utilizando explosivos, que provee una energía de onda que se trasmite a una matriz lineal de geófonos y registrando está transferencia en un osciloscopio, ver la Figura 30.

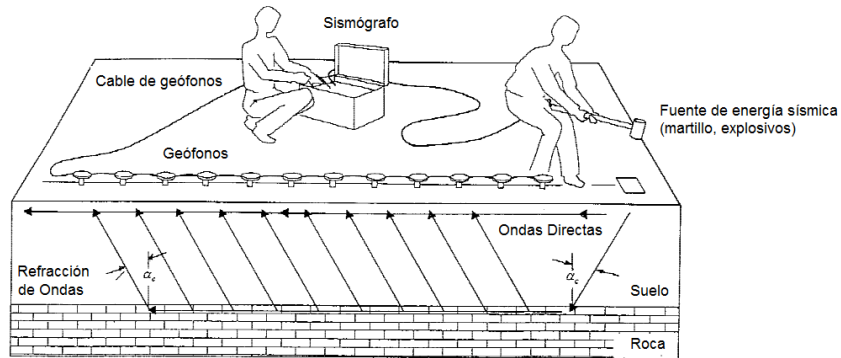


Figura 30. Disposición en campo de un sismógrafo de 12 canales, que muestra el trayecto de las ondas sísmicas directas y se refracta en un suelo de dos capas.
Fuente: ASTM D 5777 - Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation.

La velocidad de la onda calculada se relaciona con las propiedades mecánicas del material, ver Figura 31. Por lo tanto, la caracterización del material por ejemplo el tipo de roca, el grado de la intemperismo o la ripabilidad, se hace sobre la base de la velocidad de onda y de otra información geológica.

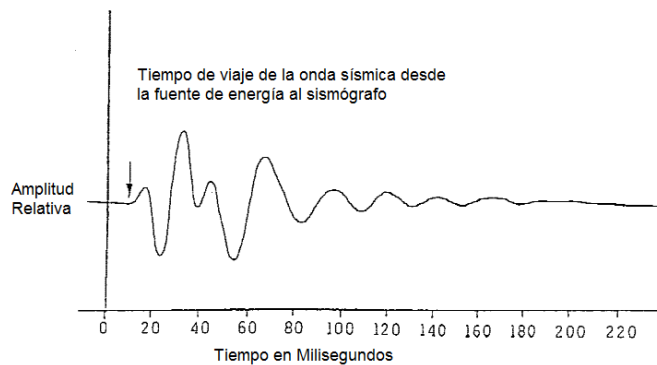


Figura 31. Una forma de onda sísmica típica de un geófono individual, la flecha marca la llegada de la primera onda de compresión. (ASTM D 5777)
Fuente: ASTM D 5777 - Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation.

Las ondas P son utilizados en los ensayos de refracción sísmica (Woods, 1978; Whiteley, 1994). Las velocidades de ondas P en o por debajo del nivel freático

dependen del grado de saturación del suelo, mientras que las velocidades de ondas S son independientes (Woods, 1978). La velocidad de la onda P (V_p) depende de la mayor parte de módulo, del módulo de cortante y la densidad de la manera siguiente:

$$V_p = \sqrt{\frac{k+4/3\mu}{\rho}} \quad \text{Ec. (54)}$$

Dónde:

V_p = velocidad de onda de compresión

K = Módulo bulk

μ = Módulo cortante

ρ = densidad

En la Tabla 5, se presenta un rango de velocidad de onda V_p .

Tabla 5. Rango de velocidades para las ondas de compresión en el suelo y roca

Materiales	Velocidad
Suelo y roca natural	(m/s)
Material de superficie degradada	240 – 610
Grava o arena seca	460 – 915
Arena (saturado)	1220 – 1830
Arcilla (saturado)	915 – 2750
Arenisca	1830 – 3960
Esquisto	2750 – 4270
Tiza	1830 – 3960
Caliza	2134 – 6100
Granito	4575 – 5800
Roca metamórfica	3050 – 7000

Fuente: ASTM D 5777 - Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation

2.6.1.2 Cross Hole

El Cross Hole es un método estandarizado por la ASTM D4428 y se limita a la determinación del viaje horizontal de las ondas sísmicas de compresión (P) y de corte (S) en los sitios de ensayo.

Considerado como uno de los mejores métodos que puede ser utilizado en proyectos que requieren de medidas con un alto grado de precisión de las velocidades de onda de corte a baja deformación y su variación con la profundidad.

Para el éxito de un ensayo hay varios requisitos, que los resumen Luna y Jadi (2000) de la siguiente manera: (Luna & Jadi, 2000)

1. A pesar de un mínimo de dos pozos de sondeo es suficiente para realizar el ensayo, tres o más perforaciones mejoran las capacidades del método crosshole.
2. La fuente de energía debe ser rica en energía cortante (ondas S) y pobre en energía de compresión (ondas P) de tal manera que la llegada de las ondas S se pueda detectar fácilmente.
3. Los geófonos en los pozos de sondeo receptor deben tener una respuesta de frecuencia adecuada y estar orientada en la dirección del movimiento de las partículas.
4. La medición del tiempo de viaje de las ondas de corte debe ser medido con precisión utilizando técnicas directas o indirectas de resolución.

En la Figura 33 y Figura 33, se puede observar un esquema de la distribución de los sondeos y un tren de ondas del ensayo.

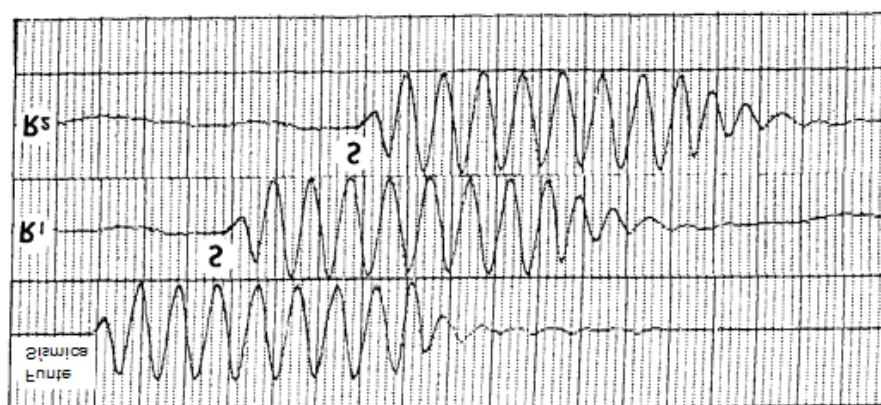


Figura 32. Sondeo de fuente sísmica (Produce solamente un tren de ondas).
 Fuente: ASTM D4428 - Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing

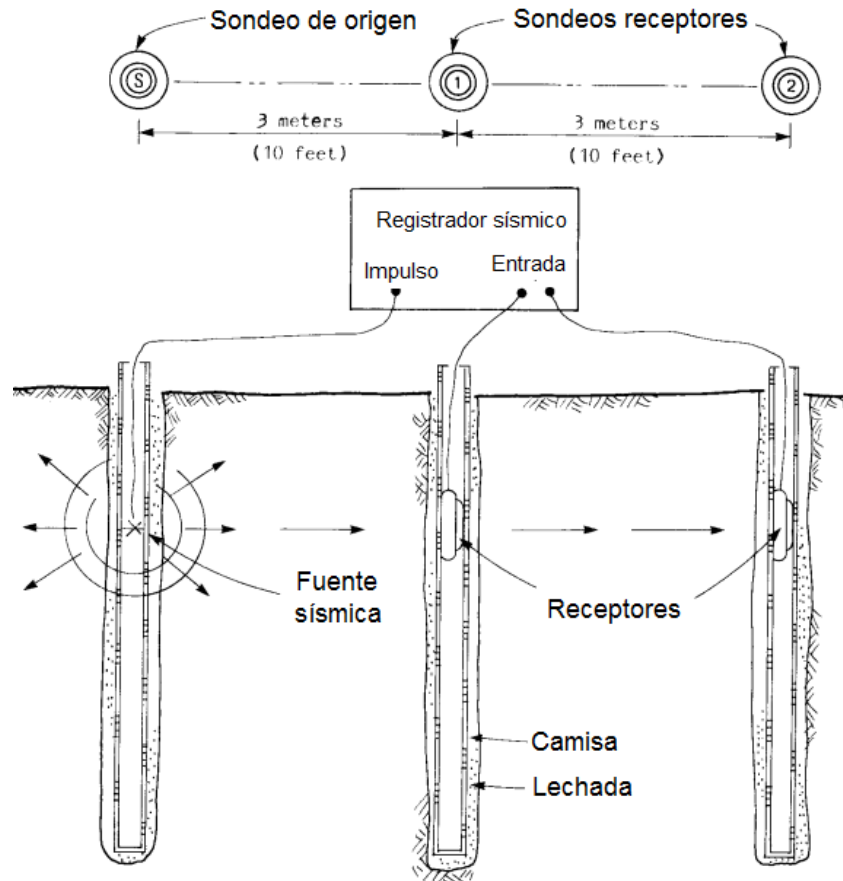


Figura 33. Ensayo de Crosshole.
 Fuente: ASTM D4428 - Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing

2.6.1.3 Down Hole y Up-Hole

Los ensayos de down-hole y up-hole son una alternativa más económica al método de ensayo del cross-hole; en donde sólo es necesario realizar un sondeo. Es normado por la ASTM D7400.

El ensayo sísmico de down-hole hace mediciones directas de las velocidades de ondas de compresión (P) o de corte (S) o ambos en un sondeo, ver Figura 35. Donde

una fuente sísmica se utiliza para generar un tren de ondas sísmicas en la superficie del suelo y que se desplazan hacia abajo para uno o un conjunto de sensores sísmicos instalados verticalmente. Es similar en varios aspectos al método de ensayo sísmico crosshole (ASTM D 4428).

Las mediciones de los tiempos de llegada (tiempo de viaje desde la fuente al sensor) de las ondas generados P y S, se hacen a baja deformación (<10-4%) in situ ver Figura 34, en donde se puede determinar las velocidades de onda P y velocidades de onda S.

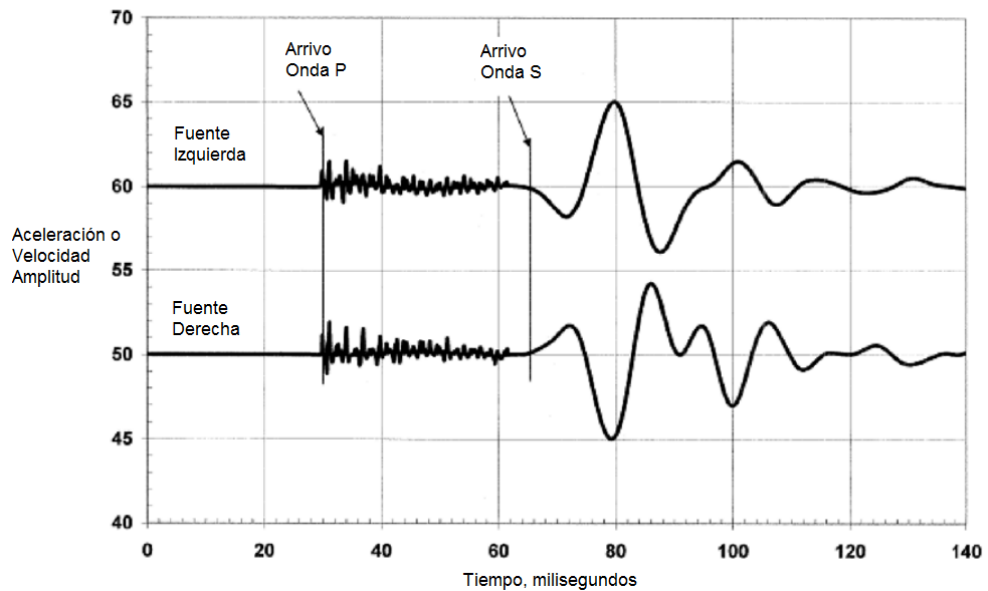


Figura 34. Fuente sísmico (Produce tren de ondas P y S)
Fuente: ASTM D 7400 - Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing

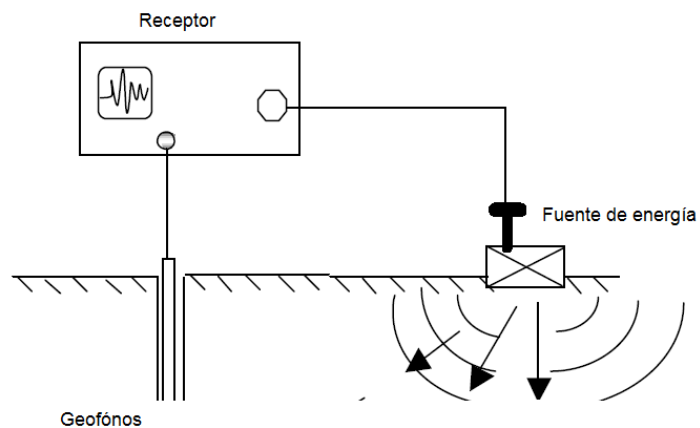


Figura 35. Esquema de ensayo Down-hole. (Luna & Jadi, 2000)

Fuente: Determination of Dynamic Soil Properties Using Geophysical Methods. International Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and. St. Louis. Luna, R., & Jadi, H. (2000).

En ensayo de up-hole, las ondas se generan en varias profundidades del sondeo y geófonos están situados a lo largo de la superficie del suelo. La Figura 36, muestra un esquema del ensayo, en donde se registra el tiempo de viaje de las ondas S y de las ondas P, entre cada geófono y la fuente de energía.

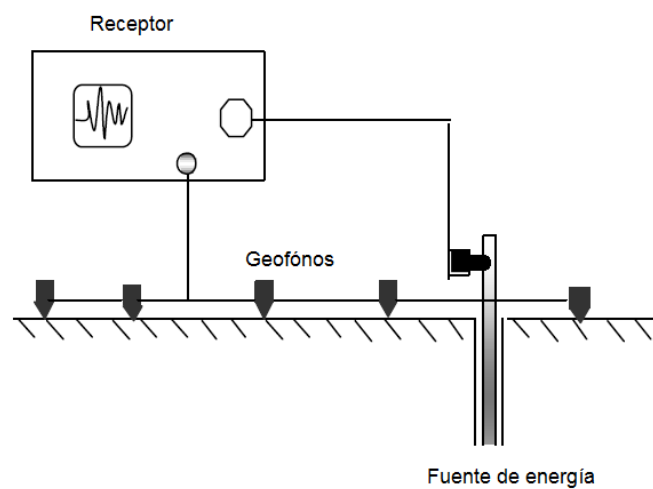


Figura 36. Esquema de ensayo Up-hole. (Luna & Jadi, 2000)

Fuente: Determination of Dynamic Soil Properties Using Geophysical Methods. International Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and. St. Louis. Luna, R., & Jadi, H. (2000).

2.6.2 ENSAYOS DE LABORATORIO

2.6.2.1 Ensayos Cíclicos

Los ensayos cíclicos son realizados a bajas frecuencias, inferiores de 10 Hz, y las relaciones de esfuerzo-deformación se obtienen a partir del módulo de elasticidad E , de las características del material, con esto se puede determinar el amortiguamiento D .

“Las características de deformación son normalmente evaluadas en diferentes estados de esfuerzos de confinamiento, de la magnitud de las cargas cíclicas y del número de ciclos de carga.” (Dong-Soo Kim, 1991)

Dentro de los ensayos con cargas cíclicas se pueden mencionar los siguientes:

- Ensayo de Triaxial cíclico
- Ensayo de Corte Simple Cíclico
- Ensayo de Corte Cíclico Torsional
- Ensayo de Mesa Vibratoria

2.6.2.2 *Ensayos dinámicos*

Los ensayos dinámicos en laboratorio, se componen de pruebas que imponen una alta frecuencia y excitaciones de estado estacionario a una muestra de suelo. Hay dos grupos de dispositivos de pruebas dinámicas: los basados en métodos resonantes y en métodos de pulso. En general, las amplitudes de deformación asociados con estas pruebas son significativamente menores que los asociados con ensayos cíclicos. (Dong-Soo Kim, 1991)

Dentro de los ensayos dinámicos se pueden mencionar los siguientes:

- Ensayo de Columna Resonante
- Ensayos de Pulso (Bender element)

CAPITULO 3. ENSAYO DE TRIAXIAL CÍCLICO

3.1 INTRODUCCIÓN

“El ensayo de triaxial cíclico es el procedimiento comúnmente utilizado para la medición de propiedades dinámicas a niveles de alta deformación en el laboratorio.” (Diana Cepeda, 2010).

En el ensayo triaxial cíclico se puede determinar el módulo de elasticidad E y el coeficiente de amortiguamiento D de los suelos. En estos ensayos, en la mayoría de los casos, la probeta de suelo se somete a una presión de confinamiento σ_3 . Después de eso, se aplica una tensión cíclica $\Delta\sigma_d$ axial a la probeta.

“Los ensayos que son llevados a cabo para la evaluación del módulo de elasticidad y coeficiente de amortiguamiento son por deformación controlada.” (Braja M. Das, 2011)

Los primeros reportes de las investigaciones sobre ensayos triaxiales cíclicos fueron los desarrollados por Seed & Lee (1966), los ensayos fueron realizados en probetas saturadas y ensayadas en condiciones no drenadas (Semilla y Lee, 1966).

Woods (1978), determinó las siguientes limitaciones para el ensayo triaxial cíclico:

- Es difícil conseguir medidas de deformación cortante por debajo de 10^{-2} %.
- Las fases de extensión y compresión de cada ciclo producen diferentes resultados (Anunnaki y Lee, 1977).
- Durante el ensayo triaxial cíclico, se producen cambios en la relación de vacíos dentro de la probeta (Castro y Poulos, 1977).
- En la parte superior y en la base de la probeta, se generan concentraciones de esfuerzos.
- El esfuerzo mayor principal, cambia de dirección en 90° durante el ensayo.

3.2 CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE TRIAXIAL CÍCLICO

En la Figura 43 se muestra el equipo utilizado en esta investigación que fue diseñado y fabricado por la compañía GCST Testing Systems de los Estados Unidos - TSH-100.



Figura 37. Sistema de Triaxial Cíclico

Fuente: User's Guide and Reference Resonant Column & Torsional Shear Test. Geotechnical Consulting & Testing Systems. (s.f.).

En el equipo GCTS TSH-100, se pueden desarrollar ensayos cíclicos para la evaluación de licuefacción y ensayos de resistencia cíclica en suelos.

En la Tabla 6 se encuentra las especificaciones del equipo GCTS TSH-100, descritas por el fabricante:

Tabla 6. Especificaciones del equipo de Triaxial Cíclico

PARTES	ESPECIFICACIONES
Accesorios de Probetas	Diámetro de la probeta: 70 mm de diámetro Altura de la probeta: 2.0 a 2.50 veces el diámetro Cabezales de la probeta: Material de metal con piedras porosas adheridas.
Cámara Triaxial	Capacidad de confinamiento: 1000 KPa Líneas de drenaje: en la parte superior e inferior.
Capacidad de Carga	Carga máxima: 10 kN.
Sensor de deformación	Deformación: ± 25 mm Linealidad.: 0,25%
Espécimen de calibración	construcción de aluminio. Incluye masa añadida extraíble.
Controlador de adquisición	Resolución: 16 bits Máx. Inputs: 8 universales Máx. Outputs: 4 Microprocesador: 850 MHz Voltaje: 90-260VAC – 50 – 60 Hz Máx. Potencia: 0.4 KW
sensor de deformación	Deformación: ± 6 mm Linealidad.: 0,25%
Panel de Control GCTS (PCP-200)	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de presión 1000KPa • Capacidad de volumen 150 cc, con una resolución de 0.01 CC. • Manómetro de presión de 0 – 1000KPa con una presión de 2.5 KPa (0.5 psi)
Dispositivo de cambio de volumen	El medidor de cambio de volumen es monitoreado usando un transductor diferencial de presión con una columna de agua en un rango de 500mm y una linealidad de 0.25%.

Fuente: User's Guide and Reference Resonant Column & Torsional Shear Test. Geotechnical Consulting & Testing Systems. (s.f.).

3.3 ASPECTOS TEÓRICOS DEL ENSAYO DEL TRIAXIAL CÍCLICO

A continuación, se definen propiedades de los suelos evaluadas en estos ensayos y se toma como base los términos relacionados a la norma de referencia ASTM D3999.

3.3.1 NÚMERO DE CICLOS DE CARGA Y DESCARGA

En la norma ASTM D3999, establece en el literal 9.5.4 que se debe cargar cíclicamente la probeta a través de 40 ciclos. Seed and Idriss (1975) definieron la equivalencia de los números de ciclos para el ensayo en función de la magnitud del terremoto, ver la Figura 38.

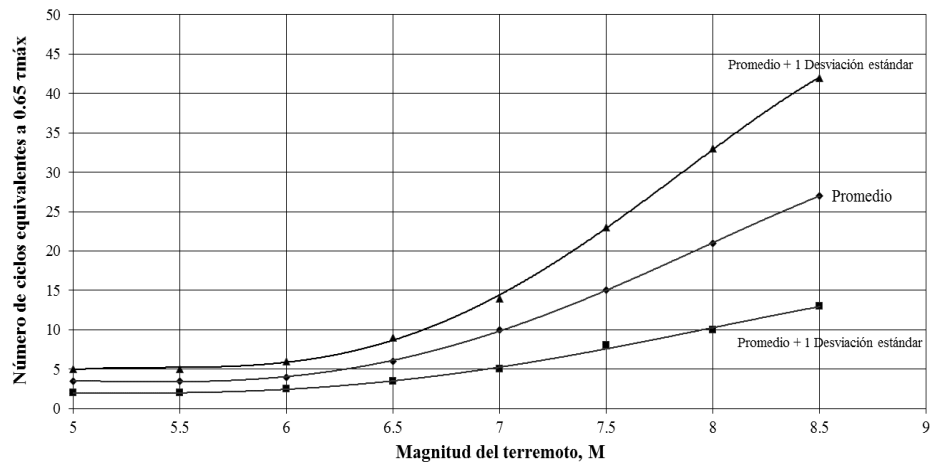


Figura 38. Números equivalentes de ciclos de esfuerzo uniformes basados en componentes más fuertes del movimiento del suelo.
Fuente: Seed. (1975)

3.3.2 CURVA DE HISTÉRESIS

La curva de histéresis es generada en un ciclo de carga y descarga, donde una probeta de suelo es sometida primero al ciclo de carga (aplicar un esfuerzo que se va incrementando gradualmente hasta un valor definido) generando una de deformación de la probeta y al momento de pasar a un ciclo de descarga (reduciendo gradualmente el esfuerzo aplicado) se genera una recuperación incompleta de la deformación debido al consumo de energía, ver Figura 39.

En un ciclo de histéresis (carga y descarga), se define un área que representa la pérdida o disipación de energía.

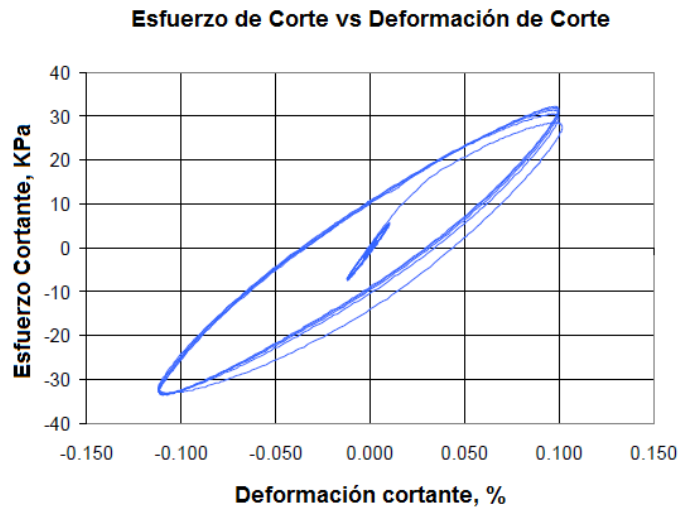


Figura 39. Curvas de Histéresis
 Fuente: User's Guide and Reference Resonant Column & Torsional Shear Test. Geotechnical Consulting & Testing Systems. (s.f.).

3.3.3 RELACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO (D)

La relación de amortiguamiento se determina mediante la curva de histéresis para cada esfuerzo cíclico o deformación cíclica aplicada en la probeta de suelo, la cual se relaciona con la pérdida o disipación de energía y su energía potencial en un ciclo, ver Figura 40.

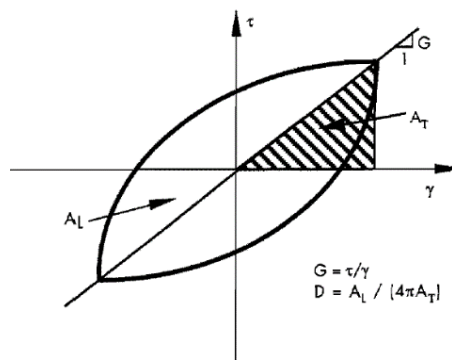


Figura 40. Determinación de la relación de amortiguamiento a partir de una curva de histéresis.
 Fuente: Deformational characteristics of soils at small to intermediate strains from cyclic tests. Dong-Soo Kim, K. H. (1991).

La relación de amortiguamiento se define por la siguiente expresión:

$$D = \frac{A_L}{4\pi A_T} \times 100\% \quad \text{Ec. (55)}$$

Dónde:

A_L = área del ciclo de histéresis,

A_T = área del triángulo rectángulo sombreada que se muestra en la Fig. 14,

D = relación de amortiguamiento, %.

3.3.4 MÓDULO DE YOUNG SECANTE (E)

El módulo de Young secante (E) es la relación entre esfuerzo y deformación, es la pendiente de una línea desde el origen hasta un punto de la curva esfuerzo deformación para un ciclo de histéresis, se lo puede definir usando la siguiente expresión:

$$E = \frac{L_{DA}}{S_{DA}} \times \frac{L_S}{A} \quad \text{Ec. (56)}$$

Dónde:

L_{DA} = carga de amplitud PP, kN

S_{DA} = deformación de amplitud PP, mm

L_S = altura de la muestra después de la consolidación, mm

A = área después de la consolidación, mm²

E = El módulo de secante Young, kPa.

3.3.5 MÓDULO DINÁMICO DE CORTE O MÓDULO DE RIGIDEZ (G)

El valor del módulo dinámico de corte o módulo de rigidez del suelo (G) para cada ciclo de histéresis, que varía con la amplitud de deformación y su inclinación en la curva de histéresis y se lo puede definir por:

$$G = \frac{E}{[2(1+\mu)]} \quad \text{Ec. (57)}$$

Dónde:

μ = relación de Poisson,

E = El módulo de secante Young, kPa,

G = módulo dinámico de corte o módulo de rigidez del suelo, kPa.

3.3.6 RELACIÓN DE POISSON

La relación de Poisson es una relación elástica que proporciona una medida de la deformación transversal con respecto a la deformación longitudinal. Para los ensayos triaxiales cíclicos se calcula este valor de la siguiente manera:

$$\mu = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a} \quad \text{Ec. (58)}$$

Dónde:

ε_r = deformación radial, %

ε_a = deformación axial, % = Deformación axial medida/Longitud de la probeta x
100

En el software del sistema de GCTS existe la posibilidad de calcular la deformación radial de cualquiera de las siguientes expresiones:

1. $\varepsilon_r = (\varepsilon_v - \varepsilon_a)/2$

En esta opción la deformación radial ε_r , es una función de la deformación axial ε_a , y de la deformación volumétrica ε_v . El software calcula la deformación volumétrica primero y usado en la formula ampliada para calcular la deformación radial ε_r .

$$\varepsilon_r = 1 - ((1 - \varepsilon_v)/(1 - \varepsilon_a))^{0.5} \quad \text{Ec. (59)}$$

$$2. \quad \epsilon_r = -1/2\epsilon_a \quad (\epsilon_v = 0)$$

En esta opción la deformación radial ϵ_r , es una función directa de la deformación axial ϵ_a , y de la deformación volumétrica ϵ_v se asume como cero. El software usara esta fórmula expandida para calcular la deformación radial ϵ_r .

$$\epsilon_r = 1 - 1/(1 - \epsilon_a)^{0.5} \quad \text{Ec. (60)}$$

$$3. \quad \epsilon_r = -1/3\epsilon_a \quad (\epsilon_v \neq 0)$$

En esta opción la deformación radial ϵ_r , es una función directa de la deformación axial ϵ_a , y de la deformación volumétrica ϵ_v no se asume como cero. El software usara esta fórmula simple para calcular la deformación radial ϵ_r .

$$\epsilon_r = 1/3 \epsilon_a \quad \text{Ec. (61)}$$

En la Tabla 7 se presenta valores representativos para diferentes materiales.

Tabla 7. Valores representativos de la Relación de Poisson

Tipo de Suelo	Relación de Poisson, μ
Arena suelta	0.20 - 0.40
Arena media	0.25 - 0.40
Arena densa	0.30 - 0.45
Arena limosa	0.20 - 0.40
Arcilla blanda	0.15 - 0.25
Arcilla media	0.20 - 0.50
Limo	0.30 - 0.35
Arcilla arenosa	0.20 - 0.30
Arcilla saturada	0.40 - 0.50
Arcilla no saturada	0.10 - 0.30

Fuente: Principles of Soil Dynamics. Braja M. Das, G. R. (2011).

3.3.7 DEFORMACIÓN CORTANTE

Las deformaciones cortantes (γ), miden los cambios de los ángulos en función de cómo el material se distorsiona en respuesta al esfuerzo cortante:

$$\gamma = \frac{\varepsilon_{SA}}{(1+\mu)} \times 100 \quad \text{Ec. (62)}$$

Dónde:

μ = Relación de Poisson,

$\varepsilon_{SA} = 0.5 S_{DA}/L_s$ = deformación axial simple amplitud, mm/mm

S_{DA} = deformación de amplitud PP, mm

L_s = Longitud de la probeta después de la consolidación, mm

γ = Deformación cortante, %

3.4 REQUISITOS DE LA NORMA ASTM-D5311 - MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR DEL TRIAXIAL CÍCLICO DE CARGA CONTROLADA

La Norma ASTM-D5311 del método de ensayo estándar del Triaxial Cíclico de carga controlada, provee la información suficiente para el desarrollo de este ensayo; en este literal se resumirá los puntos más importantes, que se describen en la norma de ensayo; ver Figura 41.

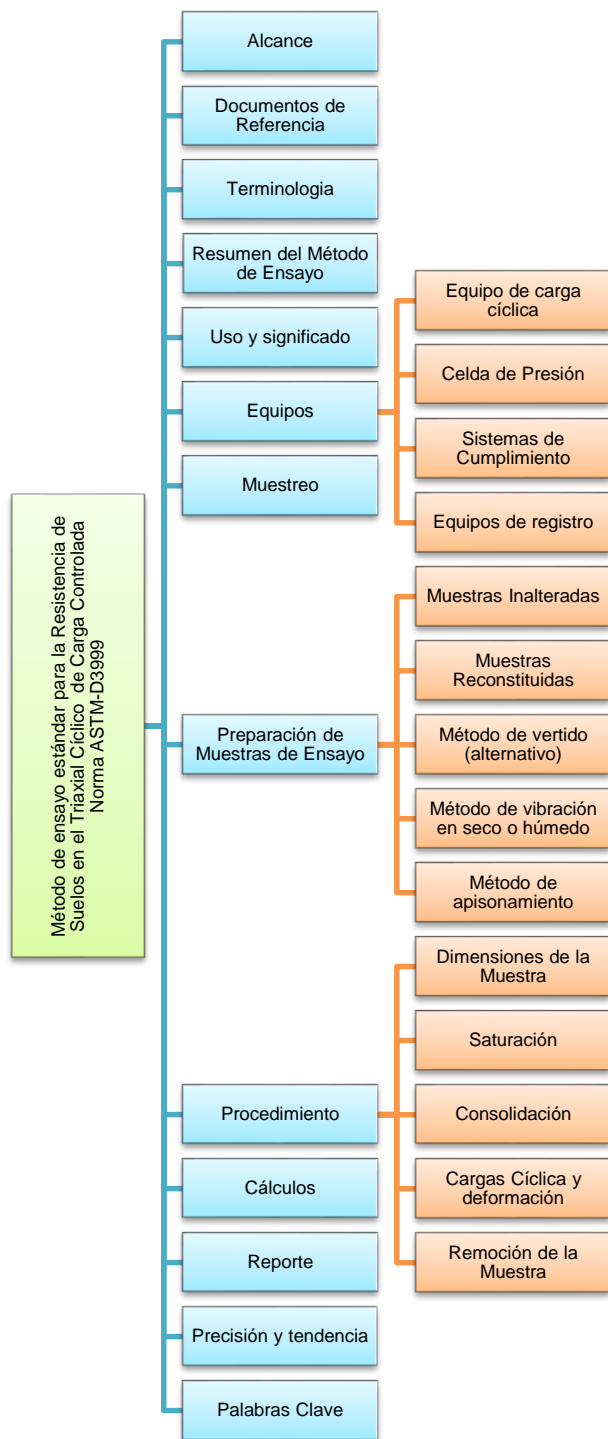


Figura 41: Requisito de la norma ASTM D5311
Fuente: ASTM International - Standards Worldwide

3.5 REQUISITOS DE LA NORMA DE ENSAYO DE TRIAXIAL CÍCLICO NORMA ASTM-D3999

La Norma ASTM-D3999/D3999M-11^{e1} es el método de ensayo estándar para la determinación de las propiedades de los suelos; módulo y amortiguamiento utilizando el aparato triaxial cíclico; ver la Figura 42.

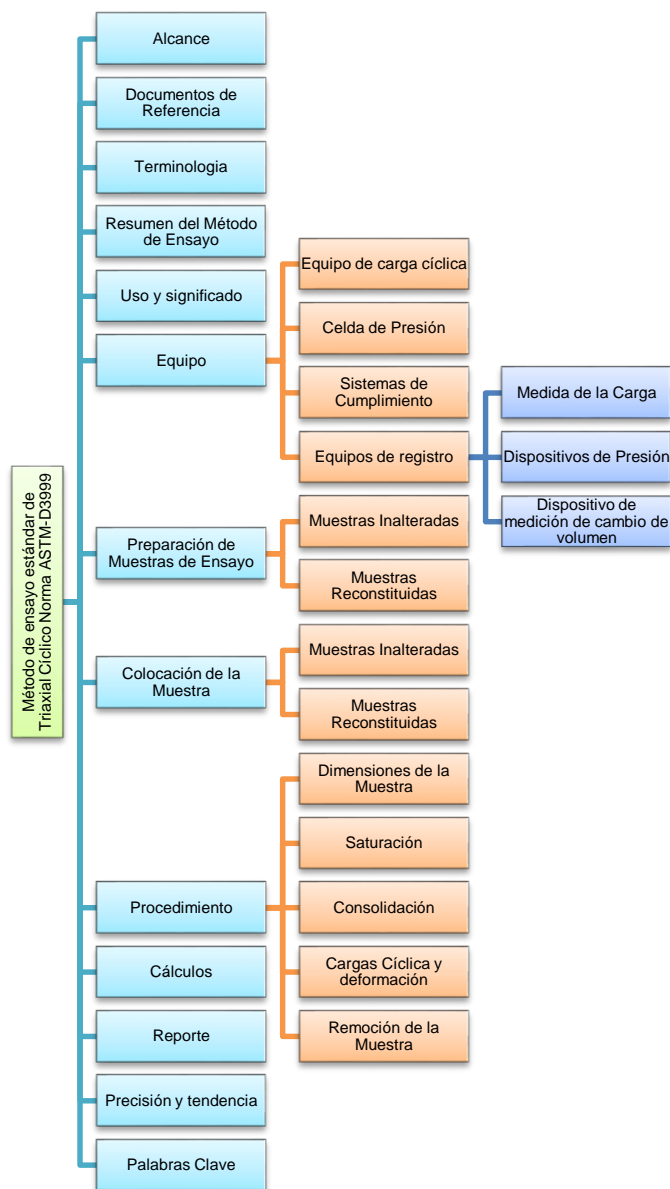


Figura 42. Requisitos de la Norma ASTM D3999
Fuente: ASTM International - Standards Worldwide

CAPITULO 4. ENSAYO DE COLUMNA RESONANTE

4.1 INTRODUCCIÓN

El método de ensayo de Columna Resonante es uno de los más utilizado en laboratorio para evaluar las propiedades dinámicas en probetas cilíndricas de suelo en un rango de baja a mediana deformación aproximadamente de 10^{-5} a 10^{-1} %. Este ensayo estandarizado por la ASTM D4015–15 “Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Fixed-Base Resonant Column Devices”.

A continuación, se hace una breve reseña del desarrollo de este método de ensayo. La técnica de la columna resonante, se aplicó por primera vez en ensayos en suelos por los ingenieros japoneses Ishimoto e Iida en 1937, así como, Iida en 1938 y 1940.

Unos 20 años más tarde, Shannon (1959) y Wilson y Dietrich (1960) diseñaron un nuevo equipo de columna resonante, analizando el sistema de adquisición de datos. En el dispositivo de "Shannon-Wilson", la muestra de suelo se colocó sobre una base vibratoria, que podría ser excitada, ya sea en movimiento longitudinal o torsional mientras que la muestra era sometida a una presión de confinamiento isotrópico.

Desde finales de 1950 hasta mediados de 1970, varios investigadores desarrollaron y utilizaron dispositivos de columnas resonantes en numerosas investigaciones (Hall y Richart, 1963, Hardin, 1965, Drnevich, 1967, Aiifi, 1970, y Anderson, 1974), donde se aplicó una excitación torsional a una muestra en ambos extremos libres, y también, se utilizaron especímenes con un extremo fijo y el otro libre.

En la actualidad, el dispositivo de columna de resonancia torsional fija a libre es ampliamente utilizado, debido a su relativa simplicidad en el ensayo y en la extracción de datos, además, se puede obtener niveles pequeños de deformación por debajo de 10^{-3} %, así como niveles intermedios de deformación inferiores a 10^{-1} %.

Hardin y Music en 1965, desarrollaron un aparato de resonancia torsional con la que se aplicaba un esfuerzo vertical adicional sobre la muestra a través de un pistón de carga vertical a más de la presión de confinamiento isotrópico.

Drnevich (1967) desarrolló el aparato de cilindro hueco para minimizar la variación de la deformación por cizallamiento a través de muestras. También se incrementó la capacidad de torque de este dispositivo, para producir una deformación por corte encima del 0,1%.

A finales de 1970 y principios de 1980, Stokoe y sus estudiantes en la Universidad de Texas, desarrollaron una nueva versión del dispositivo de columna resonante de torsión fijo a libre utilizado en varias investigaciones (Isenhowe 1979, Allen, 1982, y Lodde, 1982).

El mecanismo de accionamiento se mejoró simplificando la configuración del ensayo y para permitir una consolidación significativa en la muestra durante el ensayo. Ambos especímenes macizos y huecos podrían ser probados. Además, Isenhowe (1979) modificó el dispositivo de modo que tanto la columna resonante y ensayos de corte torsional se podrían realizar en el mismo espécimen.

Allen (1982) modificó el equipo para aplicar cargas anisotrópicas ($\sigma_1' > \sigma_2' = \sigma_3'$) a muestras sólidas.

El Doctor Ni (1987) modificó el equipo para aplicar estados de esfuerzos triaxiales a especímenes huecos, también desarrolló un sistema asistido por un ordenador con el fin de controlar el ensayo y llevar a cabo la extracción de datos de forma automática.

4.2 CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE COLUMNA RESONANTE

En la Figura 43, se muestra el equipo utilizado en esta investigación que fue diseñado y fabricado por la compañía GCST Testing Systems de los Estados Unidos - TSH-100 Resonant Column/Torsional Shear Testing System.



Figura 43. Sistema de Columna Resonante.
Fuente: Laboratorio de Materiales de Construcción

En la Tabla 8 se encuentra las especificaciones del equipo GCTS TSH-100, descritas por el fabricante:

Tabla 8. Especificaciones del equipo de Columna Resonante

PARTES	ESPECIFICACIONES
Accesorios de Probetas	Diámetro de la probeta: 70 mm de diámetro Altura de la probeta: 2.0 a 2.50 veces el diámetro Cabezales de la probeta: Material de plástico con una superficie rugosa.
Cámara Triaxial	Capacidad de confinamiento: 1000 KPa Líneas de drenaje: en la parte superior e inferior.
Servo motor eléctrico actuador	Cargas de torsión: 2.33N-m (pico) y 0,78 N-m (continua). Giro: +/- 25 grados de carrera Frecuencia: hasta 250 Hz.
Controlador del motor	Utiliza una entrada de comando de +/- 10 voltios e incluye TTL Entrada habilitada para desactivar la etapa de potencia y realizar pruebas de vibración libres con un mínimo de EMF. 110 V
Espécimen de calibración	construcción de aluminio. Incluye masa añadida extraíble.

Sensor de deformación de fibra óptica con salida dual	Rango bajo de deformación: +/- 0,1 mm Rango bajo de deformación: +/- 6.0 mm Respuesta de frecuencia plana: 0-15 kHz.
sensor de deformación	Deformación: ± 6 mm Linealidad.: 0,25%
Controlador de adquisición y sistema servo digital	Resolución: 16 bits Máx. Inputs: 8 universales Máx. Outputs: 4 Microprocesador: 850 MHz Voltaje: 90-260VAC – 50 – 60 Hz Máx. Potencia: 0.4 KW
Panel de Control GCTS (PCP-200)	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de presión 1000KPa • Capacidad de volumen 150 cc, con una resolución de 0.01 CC. • Manómetro de presión de 0 – 1000KPa con una presión de 2.5 KPa (0.5 psi)
Dispositivo de cambio de volumen	El medidor de cambio de volumen es monitoreado usando un transductor diferencial de presión con una columna de agua en un rango de 500mm y una linealidad de 0.25%.

Fuente: User's Guide and Reference Resonant Column & Torsional Shear Test. Geotechnical Consulting & Testing Systems. (s.f.).

4.3 ASPECTOS TEÓRICOS DEL ENSAYO DE COLUMNA RESONANTE

Los aspectos inherentes al desarrollo teórico del dispositivo de columna resonante TSH-100 han sido desarrollados por el Dr. J. M. Padilla presidente de la compañía Geotechnical Consulting & Testing Systems GCTS, se toma de manera textual su desarrollo para esta investigación.

El método de ensayo de columna resonante se basa en la ecuación de onda unidimensional derivado de la teoría de vibración lineal-elástica como la solución para vibraciones no lineales que es extremadamente complejo. De hecho, esto es uno de los factores que limitan el ensayo de columna resonante a amplitudes de deformación baja a media, incluso cuando el aparato es capaz de medir las deformaciones más grandes. (Geotechnical Consulting & Testing Systems)

En el dispositivo de columna resonante de base fija y de extremo libre, que se utiliza en este trabajo, se realiza lo siguiente: Primero, la probeta de suelo se consolida y luego se aplica una carga torsional cíclica en el extremo superior de la probeta. La frecuencia de carga se cambia gradualmente hasta que se encuentra la respuesta máxima (amplitud de deformación). La frecuencia más baja a la cual la amplitud de deformación se maximiza, es la frecuencia fundamental de la probeta de suelo. La frecuencia fundamental es entonces una función de la rigidez del suelo, la geometría de la probeta, y de las características del dispositivo de columna resonante. El amortiguamiento del material se determina por medio del método del decaimiento de la vibración libre “Free Vibration Decay” y el método de ancho de banda de media potencia “Half Power Bandwidth”.

El ensayo columna de resonante se basa en la ecuación de onda unidimensional derivado de la teoría de la elasticidad. El módulo cortante se obtiene mediante la medición de la frecuencia de resonancia del primer modo.

La ecuación que rige el movimiento para el ensayo de columna resonante de extremo libre a fijo como se la representa en la Figura 44, para las vibraciones de torsión con un modelo de suelo de Kelvin-Voigt que se deriva de la siguiente manera:

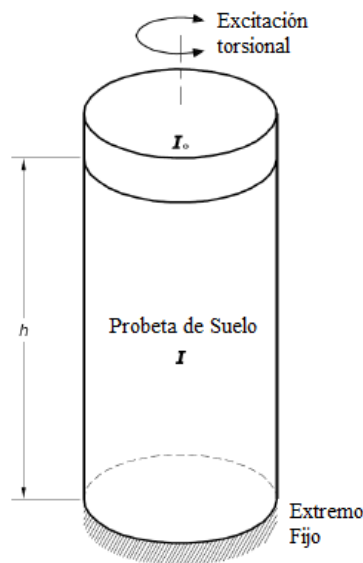


Figura 44. Probeta de columna resonante sin fijos idealizadas.
Fuente: User's Guide and Reference Resonant Column & Torsional Shear Test. Geotechnical Consulting & Testing Systems. (s.f.).

En primer lugar, aplicado un torque T a una probeta cilíndrica de suelo en el rango teórico elástico con un ángulo gradual de giro, $d\theta$, a lo largo de una longitud incremental de la muestra, dz , genera un torque T , igual a:

$$T = G J \frac{d\theta}{dz} \quad \text{Ec. (63)}$$

Dónde:

T = torque, [kN/m]

G = módulo de corte del suelo [m]

J = momento polar de inercia de la sección transversal.

A partir del diagrama mostrado en la Figura 45, el torque en las dos superficies del elemento diferencial de suelo son T y $T + \frac{\partial T}{\partial z} dz$. Usando el torque T de la ecuación (63) se obtiene:

$$\frac{\partial T}{\partial z} dz = G J \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} dz \quad \text{Ec. (64)}$$

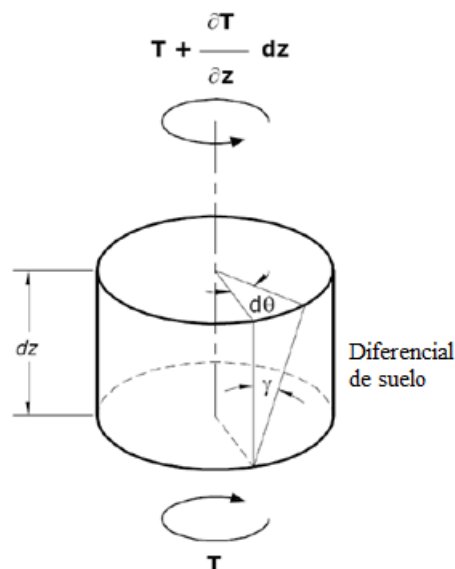


Figura 45. Diferencial de un elemento de suelo.

Fuente: User's Guide and Reference Resonant Column & Torsional Shear Test. Geotechnical Consulting & Testing Systems. (s.f.).

Aplicando la segunda ley de Newton para el movimiento de la columna de suelo e igualando el torque neto al producto del momento polar de inercia y la aceleración angular:

$$\frac{\partial T}{\partial z} dz = I \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \rho J dz \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad \text{Ec. (65)}$$

Dónde:

$I =$ momento de inercia $= \rho J dz$

$\rho =$ densidad de la masa del suelo.

Sustituyendo $\frac{\partial T}{\partial z}$ de la ecuación (63) y el uso de la relación entre la velocidad de la onda de corte V_s , el módulo de corte, y la densidad de masa ($G = \rho V_s^2$) obtenemos la ecuación de onda en torsión para una barra elástica:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{1}{V_s^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad \text{Ec. (66)}$$

La solución general de la ecuación (66) se encuentra el uso de separación de variables como:

$$\theta(z, t) = \left[A \sin\left(\frac{\omega}{V_s} z\right) + B \cos\left(\frac{\omega}{V_s} z\right) \right] \cdot e^{-i\omega t} \quad \text{Ec. (67)}$$

Dónde:

$\omega =$ frecuencia circular natural,

A y B = constantes que dependen de las condiciones límite de la columna de suelo.

Las condiciones límite en el sistema de columna resonante GCTS son:

1. El desplazamiento angular en la parte inferior (extremo fijo) es cero.
2. El torque en la parte superior de la muestra de suelo (extremo libre) es igual al momento de inercia del sistema de accionamiento, pero opuesto.

Desde la primera condición límite se encuentra el $B = 0$ mediante la sustitución de $\theta = 0$ en $z = 0$.

La segunda derivada de la solución general con respecto al tiempo es:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \left[A \sin\left(\frac{\omega z}{V_s}\right) e^{i\omega t} \right]}{\partial t^2} = -\omega^2 A \sin\left(\frac{\omega z}{V_s}\right) e^{i\omega t} \quad \text{Ec. (68)}$$

Desde la segunda condición límite, el momento de torsión en el extremo libre de la probeta de suelo es:

$$T_{z=h} = -I_o \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad \text{Ec. (69)}$$

Dónde

I_o = momento de inercia del sistema de accionamiento, y

h = altura de la muestra de suelo

Sustituyendo $\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2}$ de la ecuación (68) en la ecuación (69):

$$T_{z=h} = I_o \omega^2 A \sin\left(\frac{\omega h}{V_s}\right) e^{i\omega t} \quad \text{Ec. (70)}$$

Combinando las ecuaciones (63) y (70) obtenemos:

$$G J \frac{d\theta}{dz} = I_o \omega^2 A \sin\left(\frac{\omega h}{V_s}\right) e^{-i\omega t} \quad \text{Ec. (71)}$$

Encontrar la derivada de θ con respecto a z para $z = h$ en la ecuación (67) se traduce en:

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial z}\right)_{z=h} = \frac{A\omega}{V_s} \cos\left(\frac{\omega h}{V_s}\right) e^{-i\omega t} \quad \text{Ec. (72)}$$

Sustituyendo la ecuación (71) en la ecuación (72):

$$G J \frac{\omega}{V_s} \cos\left(\frac{\omega z}{V_s}\right) = I_o \omega^2 \sin\left(\frac{\omega h}{V_s}\right) \quad \text{Ec. (73)}$$

Utilizando de nuevo la relación $G = \rho V_s^2$ en la ecuación (73) se convierte en:

$$\rho V_s J \omega \cos\left(\frac{\omega z}{V_s}\right) = I_o \omega^2 \sin\left(\frac{\omega h}{V_s}\right) \quad \text{Ec. (74)}$$

La ecuación (74) se reduce aún más con uso de la relación $I = \rho J dz$, en la siguiente expresión:

$$\frac{I}{h} V_s \omega \cos\left(\frac{\omega z}{V_s}\right) = I_o \omega^2 \sin\left(\frac{\omega h}{V_s}\right) \quad \text{Ec. (75)}$$

Reordenando los términos de la ecuación (75) da como resultado la siguiente expresión:

$$\frac{I}{I_o} = \frac{\omega h}{V_s} \tan\left(\frac{\omega h}{V_s}\right) \quad \text{Ec. (76)}$$

Dónde:

I = momento de inercia de la probeta de suelo,

I_o = momento de inercia del sistema de accionamiento incluyendo la tapa superior.

Una vez que se determina la velocidad de la onda de corte V_s , el módulo de corte, G , se calcula como sigue:

$$G = \rho V_s^2 \quad \text{Ec. (77)}$$

Las ecuaciones (76) y (77) son utilizadas por el software GCTS para procesar los datos de los ensayos de columna resonante.

4.3.1 DEFORMACIÓN POR CORTE

La deformación por esfuerzo de corte en un espécimen cilíndrico sólido de columna resonantes cargada en torsión varía de cero en la línea central de la muestra (o desde un valor mínimo en la superficie interna de muestra hueca) hasta un valor máximo en su borde exterior, como se muestra en la Figura 46. La deformación por esfuerzo cortante, γ , se calcula como sigue:

$$\gamma(r) = \frac{r \theta_{max}}{h} \quad \text{Ec. (78)}$$

Dónde:

r = distancia radial desde el eje de la columna de suelo,

θ_{max} = ángulo máximo de giro,

h = altura de la probeta.

Debido a que la deformación de corte no es constante a lo largo de la distancia radial, una deformación cortante equivalente (γ), se requiere para representar el promedio de la deformación por corte. Esta variación de la deformación cortante hace que sea conveniente para analizar muestras huecas en lugar de los sólidos, minimizando la variación de la amplitud de deformación de corte a través de la muestra.

Independientemente del tipo de muestra, sólidas o huecas, un valor simple o único de amplitud de deformación de corte asociado con el módulo de corte medido, G , es requerido. Convencionalmente, r_{eq} se asume como $2/3$ de r_o en muestras sólidas con un radio r_o y $(r_i + r_o)/2$ para los especímenes huecos con un radio interior r_i y un radio exterior r_o . Chen y Stokoe encontraron que el valor de r_{eq} varió de $0,82 r_o$ para una deformación por esfuerzo cortante de pico por debajo de $0,001\%$ a $0,79 r_o$ para la deformación cortante pico de $0,1\%$ para las muestras sólidas.

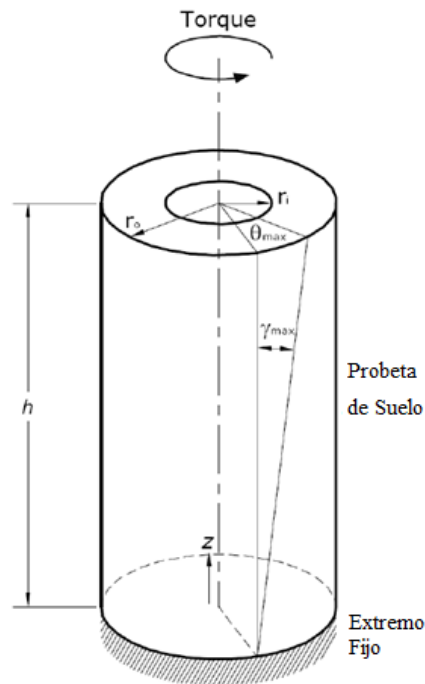


Figura 46. Deformación por esfuerzo cortante en la muestra de suelo.
 Fuente: User's Guide and Reference Resonant Column & Torsional Shear Test. Geotechnical Consulting & Testing Systems. (s.f.).

En el dispositivo de la columna Resonante de GCTS, el ángulo de torsión en la parte superior de la muestra, θ_{max} , se puede medir ya sea con un acelerómetro o un medidor de proximidad colocado en la parte superior de la probeta en un radio r_{sensor} . Si se usa un acelerómetro para medir la deformación cortante, el valor de aceleración es la doble integral del desplazamiento torsional con respecto al tiempo, de la placa de soporte del sensor en la posición del acelerómetro. El cálculo del desplazamiento torsional, x , desde la aceleración, \ddot{x} , es:

$$x = -\frac{\ddot{x}}{\omega^2} = -\frac{\ddot{x}}{4\pi^2 f^2} \quad \text{Ec. (79)}$$

Dónde:

ω = frecuencia circular,

f = es la frecuencia lineal.

Suponiendo ángulos pequeños, el ángulo de torsión de la placa superior se calcula dividiendo la salida de desplazamiento sensor por el radio en la posición del sensor,

r_{sensor} .

$$\theta_{max} = \frac{x}{r_{sensor}} \quad \text{Ec. (80)}$$

$$Y(r) = \frac{r_{eq} \theta_{max}}{h} \quad \text{Ec. (81)}$$

4.3.2 AMORTIGUAMIENTO VISCOSO

No es fácil definir el verdadero amortiguamiento del material, pero es una práctica común para expresar el amortiguamiento de los materiales reales en términos de su factor de amortiguamiento viscoso equivalente. La respuesta de vibración libre para un sistema con un único grado de libertad con amortiguamiento viscoso se puede expresar como:

$$0 = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx \quad \text{Ec. (82)}$$

Dónde:

\ddot{x} = Aceleración,

\dot{x} = velocidad,

x = desplazamiento,

m = masa,

c = coeficiente de amortiguamiento viscoso,

k = constante de resorte.

Teniendo en cuenta las siguientes relaciones:

$$D = \frac{c}{c_c} \quad \text{Ec. (83)}$$

$$c_c = 2\sqrt{km} \quad \text{Ec. (84)}$$

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m} \quad \text{Ec. (85)}$$

Dónde:

D = coeficiente de amortiguamiento viscoso,

c_c = coeficiente de amortiguamiento crítico,

ω_n = frecuencia natural (amortiguado).

De las relaciones anteriores y dividiendo la ecuación (82) por la masa, m , obtenemos:

$$0 = \ddot{x} + 2D\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x \quad \text{Ec. (86)}$$

Hay tres soluciones generales para la ecuación (86) que dependen de si el único grado de libertad del sistema es subamortiguado, críticamente amortiguado, o sobreamortiguado. Vibración libre de las muestras de suelo en el ensayo de columna resonante normalmente presenta un comportamiento subamortiguado y la solución general a este caso es:

$$x(t) = C e^{-\omega_n D t} \sin(\omega_d t + \varphi) \sin\left(\frac{\omega_n h}{V_s}\right) \quad \text{Ec. (87)}$$

Dónde:

C = constante,

ω_d = frecuencia de resonancia amortiguado,

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - D^2} \quad \text{Ec. (88)}$$

La relación de cualquiera de los dos picos, están representados en la Figura 47:

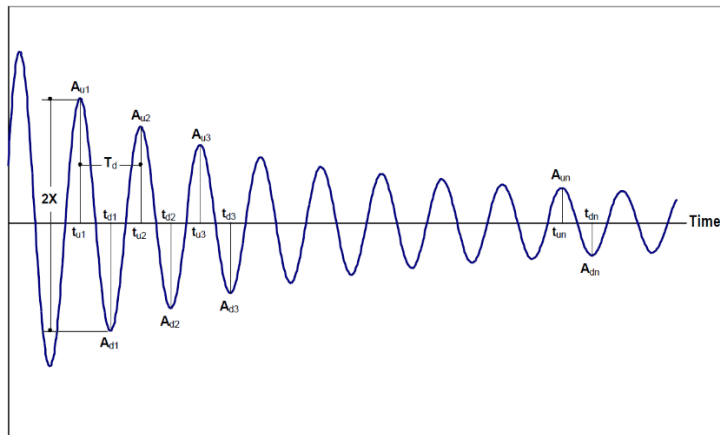


Figura 47. Decaimiento vibración libre.

Fuente: User's Guide and Reference Resonant Column & Torsional Shear Test. Geotechnical Consulting & Testing Systems. (s.f.).

$$\frac{x_n}{x_{n+1}} = e^{-\omega_n D (t_n + t_{n+1})} = e^{\frac{2\pi D}{\sqrt{1-D^2}}} \quad \text{Ec. (89)}$$

Dónde:

$t_{n+1} = t_n + 2\pi/\omega d$. El decremento logarítmico, δ , se encuentra por tomar el logaritmo natural de la ecuación (88).

$$\delta = \ln \frac{x_n}{x_{n+1}} = \frac{2\pi D}{\sqrt{1-D^2}} \quad \text{Ec. (90)}$$

El factor de amortiguamiento se calcula como:

$$D = \sqrt{\frac{\delta^2}{4\pi^2 + \delta^2}} \quad \text{Ec. (91)}$$

El software GCTS Columna resonante registra los datos de vibración libre para todos los ciclos con una amplitud de deformación de corte de al menos el 15% de la tensión tangencial máxima obtenida durante el ensayo de vibración forzada. Este programa calcula el logaritmo natural de la amplitud de decaimiento normalizado para cada ciclo y determina el decremento logarítmico usando una curva de mínimos cuadrados lineal de ajuste.

4.3.3 MÉTODO DE ANCHO DE BANDA DE MEDIA POTENCIA (HALF-POWER BANDWIDTH)

Un segundo método para medir la Amortiguamiento del material en el ensayo de columna de resonancia es el método de ancho de banda de media potencia. A partir del ensayo de vibración forzada, el decremento logarítmico se calcula mediante la medición de la anchura de la curva de respuesta de frecuencia cerca de la resonancia.

$$\delta = \frac{\pi(f_2^2 - f_1^2)}{2f_r^2} \sqrt{\frac{x^2}{x_{max}^2 - x^2}} \frac{\sqrt{1-D^2}}{1-D^2} \quad \text{Ec. (92)}$$

Dónde:

f_1 = frecuencia por debajo de la resonancia, donde la amplitud de la deformación es A

f_2 = frecuencia por encima de la resonancia cuando la amplitud de la deformación es A

f_r = frecuencia de resonancia,
 D = amortiguamiento del material.

Cuando el amortiguamiento es pequeño y la amplitud A es $\frac{A_{max}}{\sqrt{2}}$, la ecuación (28) puede simplificarse como:

$$\delta \cong \frac{\pi(f_2 - f_1)}{f_r} \quad \text{Ec. (93)}$$

A continuación, el coeficiente de amortiguamiento puede ser expresado como:

$$D \cong \frac{f_2 - f_1}{f_r} \quad \text{Ec. (94)}$$

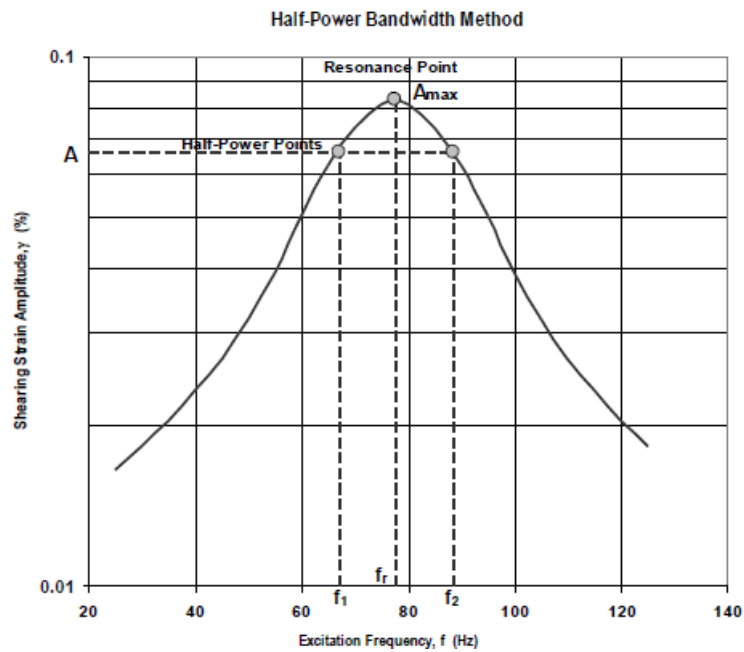


Figura 48. Amortiguamiento del material a partir del método de ancho de banda de media potencia

Fuente: User's Guide and Reference Resonant Column & Torsional Shear Test. Geotechnical Consulting & Testing Systems. (s.f.).

4.3.4 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

La calibración del equipo de columna Resonante GCTS se realiza usando un espécimen metálico en lugar de una probeta de suelo real. El espécimen metálico se supone que tiene cero, o cercano a cero el amortiguamiento y una rigidez a la torsión constante, k . Entonces siguiendo la segunda ley de Newton, el momento de inercia está relacionado con la frecuencia natural o de resonancia, ω , como sigue:

$$I = \frac{K}{\omega^2} \quad \text{Ec. (95)}$$

A pesar de que la rigidez torsional, k , del espécimen de calibración se pueden encontrar mediante la aplicación de un torque constante y la medición de la rotación angular, esto no se hace normalmente. Sin conocer la rigidez a la torsión, k , el momento de inercia, I , en la ecuación (95) no se pueden resolver.

El procedimiento recomendado para encontrar el momento de inercia del sistema de accionamiento, I_0 , es llevar a cabo dos ensayos de columna resonante con la muestra de calibración de metal, uno por sí mismo y el otro con una masa añadida. Realizar un barrido de frecuencia con una amplitud de fuerza constante para encontrar la frecuencia de resonancia para cada configuración. La amplitud de la fuerza está seleccionada para excitar la muestra de calibración dentro de los límites de los sensores instalados (proximitors o acelerómetro) pero aun así proporcionar una señal lo suficientemente grande como para medir con precisión la respuesta. Entonces la solución de la ecuación (95) para la primera etapa de calibración sin colocar la masa se convierte en:

$$I_o + I_{cal} = \frac{K}{\omega_1^2} \quad \text{Ec. (96)}$$

Dónde:

I_0 = momento de inercia de masa del sistema de accionamiento y cualquier otro accesorio que se utilizará durante la prueba real del suelo,

I_{cal} = momento de inercia de masa de la muestra de calibración, y

ω_1 = frecuencia de resonancia de la muestra de calibración sin la masa añadida.

La segunda ecuación para la segunda fase de calibración unir la masa añadida es:

$$I_o + I_{cal} + I_{masa} = \frac{K}{\omega_2^2} \quad \text{Ec. (97)}$$

Dónde:

I_{masa} = momento de inercia de la masa añadida, y

ω_2 = frecuencia de resonancia de la muestra de calibración con la masa añadida

Ahora, para encontrar el momento de inercia del sistema de avance que se utilizará para resolver la ecuación (76) y encontrar Vs se combinan las ecuaciones (96) y (35) para obtener:

$$I_o = \frac{(I_{cal} + I_{masa})\omega_2^2 - I_{cal}\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \quad \text{Ec. (98)}$$

Tenga en cuenta que para el sistema de columna resonante GCTS, el cabezal superior de la probeta no se utiliza durante el procedimiento de calibración. Por lo tanto, el momento de inercia de su masa tiene que ser añadido al resultado de la ecuación (98) para calcular el valor I_o que se introduce en el software GCTS. El momento de inercia de masa de la tapa superior se calcula a partir de su geometría y masa utilizando la fórmula correspondiente que figura en el apéndice A.

4.4 CALIBRACIÓN DEL SISTEMA DE COLUMNA RESONANTE GCTS

Para calibrar el sistema de columna resonante GCTS primero es necesario calcular el momento de inercia de la muestra de calibración, I_{cal} , y el momento de inercia de la muestra de calibración añadida la masa adicional, I_{mass} . Estos valores se calculan a partir de la geometría y de la masa respectiva de cada parte.

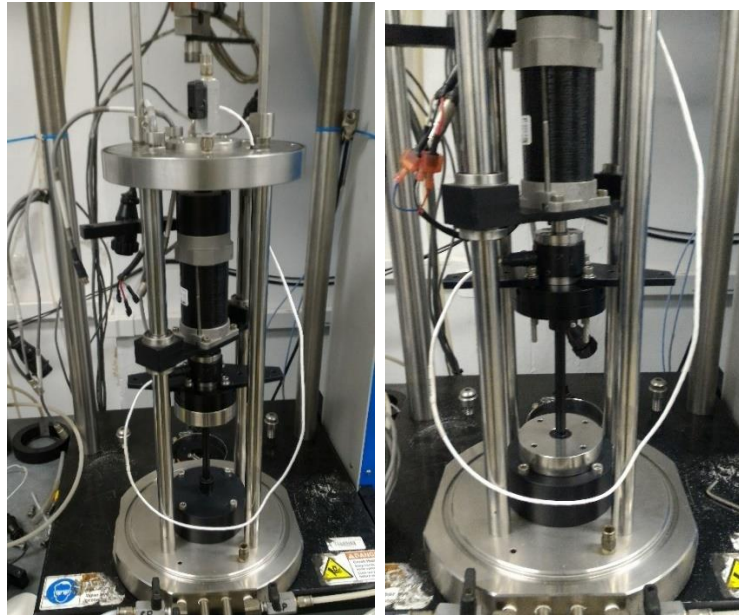


Figura 49. Calibración de equipo de columna resonante
Fuente: Laboratorio de Materiales de Construcción - PUCE

Las geometrías del espécimen de calibración y de la masa añadida se muestran en la Figura 50 y Figura 51 respectivamente. En donde el momento polar de inercia de masas del sistema de accionamiento de columna resonante es el momento polar de inercia de masas del sistema de accionamiento determinado por el procedimiento de calibración.

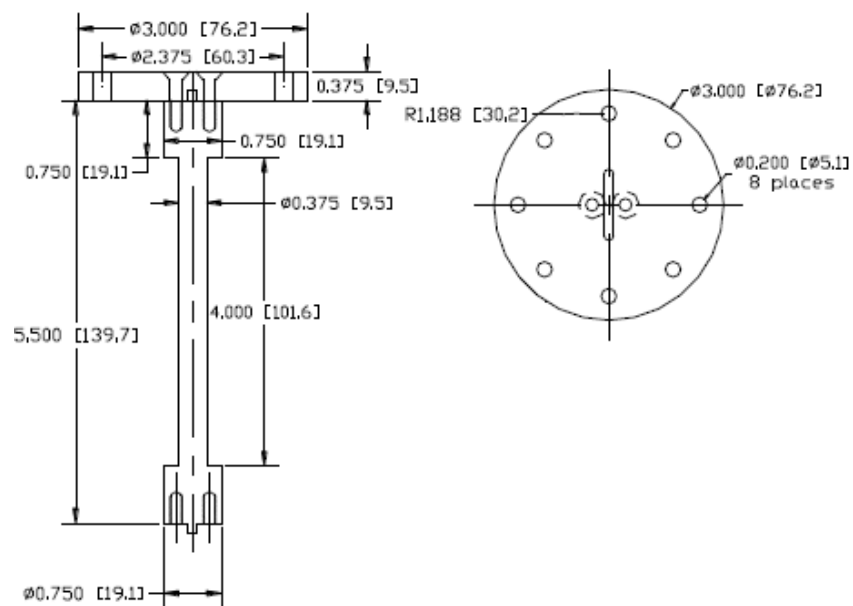


Figura 50. Geometría del espécimen de calibración
Fuente: User's Guide and Reference Resonant Column & Torsional Shear Test. Geotechnical Consulting & Testing Systems. (s.f).

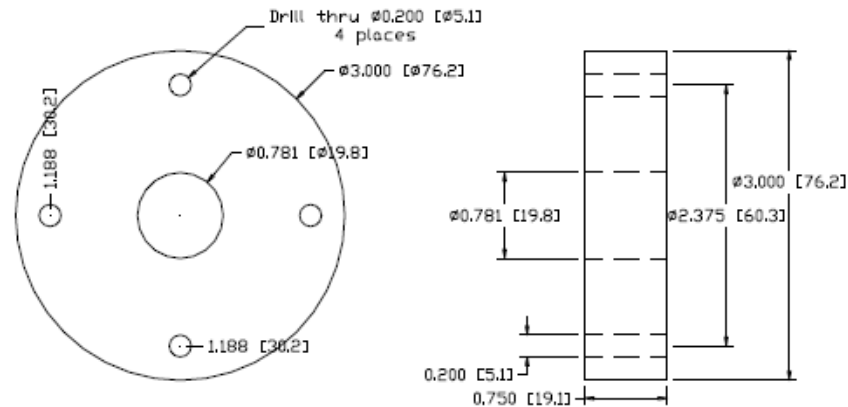


Figura 51. Geometría de la masa añadida.

Fuente: User's Guide and Reference Resonant Column & Torsional Shear Test. Geotechnical Consulting & Testing Systems. (s.f.).

En primer lugar, se calcula el momento de inercia del espécimen de calibración, que está hecho de aluminio 6061-T6 con una densidad de masa de $2,7 \text{ g/cm}^3$. Este cálculo se realiza en tres partes utilizando el principio de superposición. Entonces I_{cal} se calcula como:

$$I_{cal} = I_{cal-plate} + I_{cal-rod-end} + I_{cal-rod} - I_{cal-holes}$$

$$I_{cal-plate} = \frac{1}{2} mR^2 = \frac{1}{2} \times 0,117 \text{ kg} \times (38,1\text{mm})^2 = 84,9 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

$$I_{cal-rod-end} = \frac{1}{2} mR^2 = \frac{1}{2} \times 0,015 \text{ kg} \times (9,5\text{mm})^2 = 0,7 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

$$I_{cal-rod} = \frac{1}{2} mR^2 = \frac{1}{2} \times 0,019\text{kg} \times (4,7\text{mm})^2 = 0,20 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

$$I_{cal-holes} = 8[I_{hole} + md^2]$$

$$I_{cal-holes} = 8 \left[\frac{1}{2} \times 0,001\text{kg} \times (2,5\text{mm})^2 + 0,001\text{kg} \times (30,2\text{mm})^2 \right]$$

$$= 3,8 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

Entonces:

$$I_{cal} = 84,9 + 0,7 + 0,20 - 3,8 = 82,0 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

Hay que tener en cuenta que los agujeros roscados utilizados para fijar la placa superior de la barra del espécimen de calibración se incluyen en el cálculo. Los huecos se rellenan con los tornillos y a pesar de que tienen una densidad mayor que el aluminio, el error es insignificante.

La masa añadida es de acero inoxidable 303, con una densidad de masa de 7,7 g/cm³.

Entonces, el momento de inercia de la masa añadida se calcula como:

$$I_{masa} = I_{masa-base} - I_{masa-huecos}$$

$$I_{masa-base} = \frac{1}{2}m[R_i^2 + R_o^2] = \frac{1}{2} \times 0,624kg \times [(9,9)^2 + (38,1)^2] = 483. kg. mm^2$$

$$I_{masa-huecos} = 4[I_{huecos} + md^2]$$

$$I_{masa-huecos} = 4 \left[\frac{1}{2} \times 0,003kg \times (2,5mm)^2 + 0,003 kg \times (30,2mm)^2 \right] = 11,0 kg. mm^2$$

Entonces:

$$I_{masa} = 483,5 - 11,0 = 472,5 kg. mm^2$$

Mediante la realización de ensayos de columna resonantes sobre el espécimen de calibración, primero ensayo sin la masa añadida y luego con masa añadida obtenemos las siguientes frecuencias de resonancia:

$$w_{sin\ masa\ añadida} = w_1 = 74,5Hz$$

$$w_{con\ masa\ añadida} = w_2 = 61,0Hz$$

De la ecuación (98) se obtiene:

$$I_0 = \frac{(82,2 + 472,5) \times (61,0)^2 - (82,0) \times (74,5)^2}{(74,5)^2 - (61,0)^2} = 879.1 kg \cdot mm^2$$

Debido a que el cabezal superior de la probeta no se utilizó durante este procedimiento de calibración, el momento de inercia de masa del cabezal superior tiene que ser añadido al valor anterior. Por lo tanto, es importante utilizar la dimensión correcta del cabezal superior que se utiliza durante un ensayo real columna resonante. Para el equipo en el que se realizó esta investigación el cabezal superior tiene esta inercia.

$$I_{\text{cabezal superior}} = 206.7 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

4.5 REQUISITOS DE LA NORMA DE ENSAYO DE COLUMNA RESONANTE

La Norma ASTM-D4015 es el método de ensayo estándar para el módulo y el amortiguamiento de los suelos por los dispositivos de base fija de columnas resonantes.

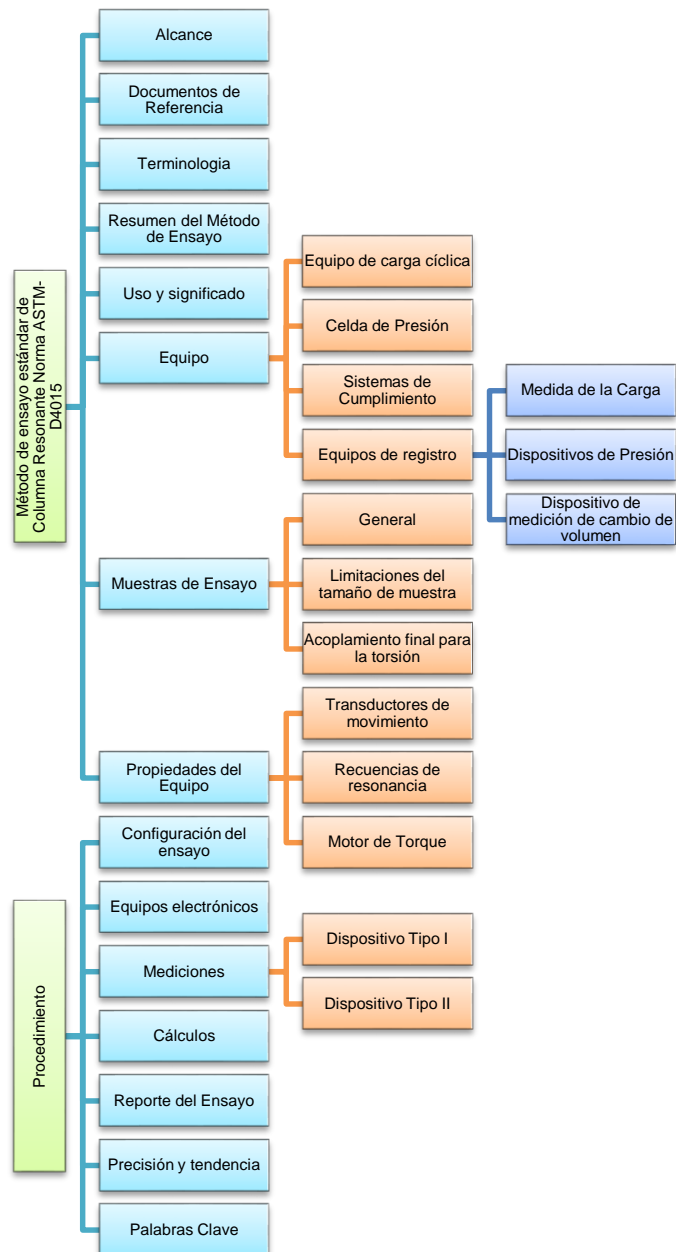


Figura 52. Requisitos de la Norma ASTM-D4015
Fuente: ASTM International - Standards Worldwide

CAPITULO 5. ENSAYO DE ELEMENTOS PIEZOELÉCTRICOS BENDER ELEMENT

5.1 ANTECEDENTES

Los Bender Element se utilizan en laboratorio para generar ondas dentro de probetas de suelos. Se utilizan dos cerámicas piezoeléctricas con un electrodo metálico intercalado entre ellos, y se refieren a menudo como un biomorph piezoeléctrico. Elementos Bender se fijaron parcialmente en placas de extremo y la porción expuesta en voladizo se incrusta en la probeta.

Tradicionalmente, los elementos piezoeléctricos bender han sido utilizados para inducir y recibir ondas en probetas de suelo en laboratorio a niveles bajos de esfuerzos, y pueden ser instalada para producir cualquiera de las ondas P o las ondas S. Utilizan en combinación un receptor, la fuente de energía, el generador de función y de señal para medir la velocidad de la onda y estiman los módulos del suelo.

Un elemento Bender se compone de un transductor piezoeléctrico de dos electrodos conductores exteriores, dos placas de cerámica y una cuña de metal conductor en el centro. La velocidad de onda de corte del suelo, se puede obtener midiendo el tiempo requerido para que la onda pueda viajar entre dos elementos Bender.

A partir de estas velocidades, los módulos se pueden calcular utilizando la teoría de propagación de ondas elásticas. Lawrence (1963) fue el primero en utilizar cristales o cerámicas piezoeléctricas para generar y detectar alteraciones de onda en una celda de ensayo triaxial tradicional.

Shirley y Hampton (1978) introdujeron el método de los “bender element” en práctica de análisis de suelos utilizando transductores piezoeléctricos.

Knox (1982) construyó un dispositivo triaxial a gran escala en la Universidad de Texas e investigó la propagación de las ondas en un medio isotrópico, biaxial y el confinamiento triaxial.

Dyvik y Madshus (1985) detalló la instalación y el uso de los elementos piezoeléctricos bender en equipos de ensayo, tales como equipos de ensayos triaxiales, de corte simple y consolidómetros. El ensayo con los “bender element” también se ha aplicado en el aparato triaxial cíclico, las celdas de “stress-path”, en los ensayos de columna resonante, centrífugas, cámaras de calibración.

Para el método de ensayo de elementos Bender, se utilizó una pieza de cerámica en forma de Cantiléver, que permitía medir las velocidades de corte V_s en el laboratorio, la cual es adaptable a una variedad de equipos de ensayo (De Alba 1984; Dyvik y Olsen 1989; Thomann y Hryciw 1990) y su uso se ha hecho más frecuente para la obtención de G_{max} . (Rajendram Arulnathan, 1998).

5.2 LIMITACIONES

Dentro de las limitaciones evaluadas en investigaciones con respecto a los resultados del ensayo de los elementos Bender, se puede mencionar las siguientes:

- La determinación del tiempo de viaje de la onda puede causar una subestimación o sobreestimación del V_s , estos errores son difíciles de cuantificar.
- Los errores de la medida del tiempo de viaje de la onda resultante dependen de la longitud elemento.
- Por otra parte, las amplitudes de deformación alcanzadas sólo son en el rango muy bajo donde el comportamiento elástico es exhibido por los suelos.

5.3 RECOMENDACIONES

Yamashita (2009), publicó los resultados de los ensayos de bender element y sobre la base de su hallazgo, se proponen las siguientes recomendaciones:

- No hay un tamaño o longitud óptima de empotramiento del elemento element.
- tiempo de retardo del sistema de prueba y la dirección del movimiento inicial debe ser medida por contacto directo con el accionador de flexión y flexión receptor.

- La frecuencia de la onda transmitida debe ajustarse de modo que sea igual a la frecuencia dominante de la señal recibida.
- Intervalo de muestreo debe ser menor que 1/100th de la hora prevista de llegada.
- Resolución de tensión debe ser superior a 1 / 100th de la mayor amplitud de la señal recibida.

5.4 CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE BENDER ELEMENT

El equipo utilizado en esta investigación es ULT-TSH Bender element son base y cabezal sólidas, deben ser utilizados con un dispositivo de medición de la velocidad ultrasónica compatible, como el GCTS ULT-100. Se lo puede utilizar tanto en muestras saturadas como parcialmente saturados. Pueden ser sumergidos completamente en el agua y con una presión nominal de 2 MPa. Medidas de las velocidades de las ondas P y S en la muestra de suelo.

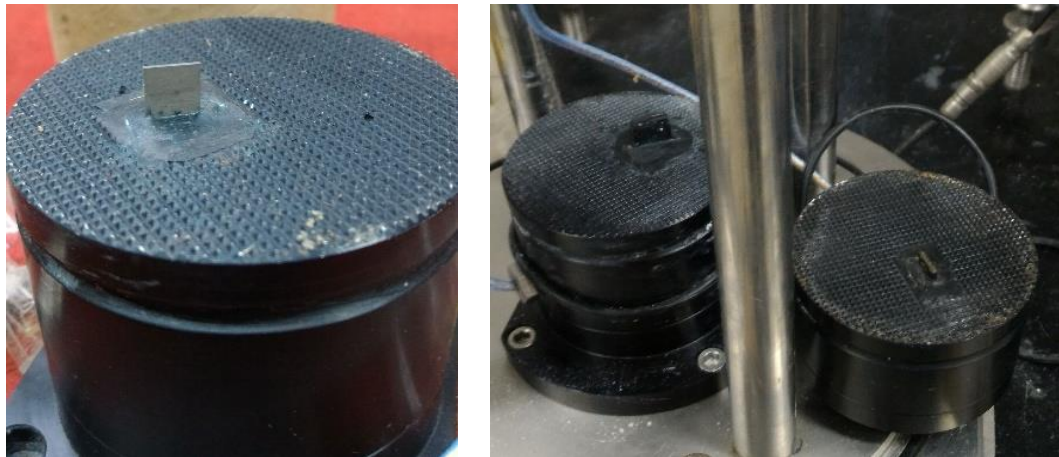


Figura 53. Equipo de Bender element
Fuente: Laboratorio de Materiales de Construcción - PUCE

5.5 COMPONENTES DE UN BENDER ELEMENT

Un “bender element” es un transductor piezoeléctrico que convierte la energía eléctrica en energía mecánica o viceversa. Están compuestos por dos placas de cerámica y entre ellas una pieza de metal conductor con dos electrodos exteriores conductores conectados en serie o en paralelo, como se muestra en la Figura 54.

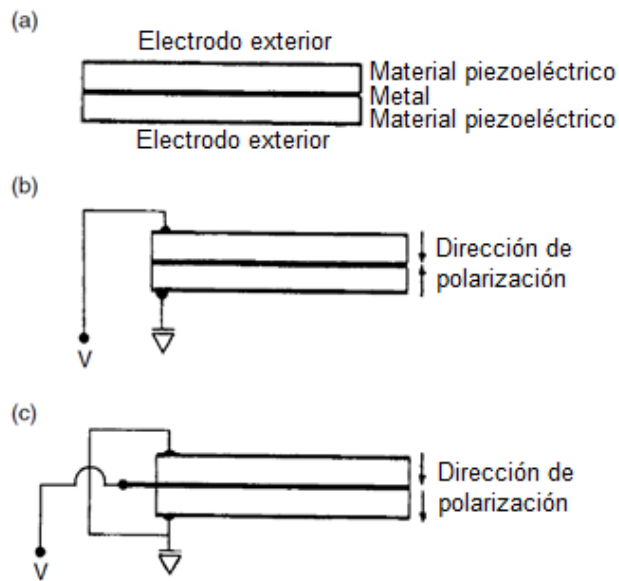


Figura 54. Bender elements: (a) Representación esquemática; (b) tipo en serie; (c) tipo en paralelo. Reproducido por Lee y Santamaría 2005 con el permiso de ASCE.

Fuente: Triaxial Testing of Soils. Lade, P. V. (2016).

Los elementos piezoeléctricos bender “Bender element” son fabricados en varios tamaños como se muestra en la Figura 55, pero generalmente son de 10x16x0,5mm. Se cortan en segmentos utilizando un cortador de borde de diamante.

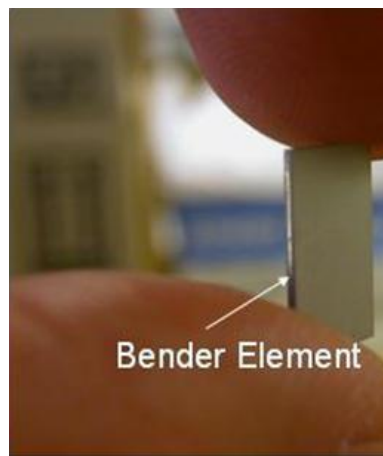


Figura 55. Elemento piezoeléctrico Bender.

Fuente: Triaxial Testing of Soils. Lade, P. V. (2016).

Tabla 9. Dimensiones típicas de los elementos Bender

Referencia	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)
Shirley and Hampton (1978)	25.4	6.4	0.5

Dyvik and Madshus (1986)	12.7	10.0	0.5
Bates (1989)	15.0	10.0	0.5
Argawal and Ishibashi (1991)	6.4	6.4	0.6
Brignoli et al. (1996)	20.0	10.0	0.5
Arulnathan et al. (1998)	15.0	15.0	1.0
Pennington et al. (2001)	12.0	10.0	1.0

Fuente: Measuring Shear Wave Velocity Using Bender Elements. Geotechnical Testing Journal, vol. 28. Leong, E. C., Yeo, S. H., & Rahardjo, H. (s.f.).

Se garantiza un acoplamiento con la muestra de suelo con la mitad de la longitud saliente del “bender element”, ver la Figura 56; se aplica al elemento un revestimiento de poliuretano y posterior una pintura conductora.

Esta pintura conductora crea un escudo eléctrico que está conectado a tierra para evitar el acoplamiento electromagnético y la diafonía entre la fuente y el receptor (Cha y Cho, 2007). Este componente se coloca entonces en la base y se fija con epoxico. Uno proporciona la señal y el otro mide la señal.

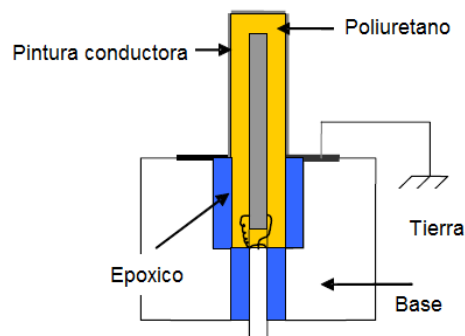


Figura 56. Componentes del elemento Bender.

Fuente: Measurements of V_p and V_S in Dry, Unsaturated and Saturated Sand Specimens with Piezoelectric Transducers. Valle-Molina, C. (mayo de 2006).

5.6 ASPECTOS TEÓRICOS DEL ENSAYO DE ELEMENTOS BENDER

5.6.1 MEDIDA DE LA PROPAGACIÓN DE LA ONDA DE CORTE

Para estudiar la propagación de la onda de corte a través de una muestra de suelo, dos elementos Bender se colocan en extremos opuestos de la muestra. Un elemento Bender genera la onda de corte mientras que el otro elemento recibe la señal en el extremo opuesto de la muestra, Este esquema se lo puede observar en la Figura 57.

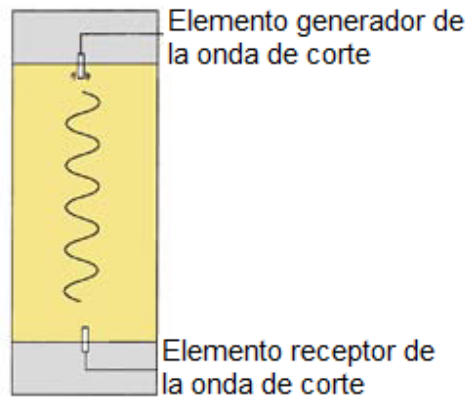


Figura 57. Ilustración del ensayo con elementos Bender (Instruments, 2013).
Fuente: Bender element test analysis software development for laboratories.
En G. Instruments. Instruments, G. (2013).

El tiempo de viaje y la longitud de desplazamiento de la onda de corte producen la velocidad de onda de corte por:

$$V_s = \frac{L}{T} \quad \text{Ec. (99)}$$

Dónde:

V_s = velocidad de onda de corte, m/s^2

L = longitud de viaje de la onda de corte, m

T = tiempo de viaje de la onda de corte, s

5.6.2 MÓDULO DE CORTE

El valor del módulo de corte dinámico máximo ($G_{m\acute{a}x}$) basados en teoría elástica isotrópica de un suelo se define por:

$$G_{m\acute{a}x} = \rho V_s^2 \quad \text{Ec. (100)}$$

Dónde:

ρ = densidad del suelo, g/cm³

V_s = velocidad de onda de corte, m/s

G = módulo de corte dinámico, kPa.

El módulo de corte dinámico máximo proporciona importante información sobre las propiedades del suelo y los factores que controlan el comportamiento del suelo en el análisis dinámico en deformaciones pequeñas. Típicamente, la dimensión de la probeta de suelo es de 7 cm de diámetro y 14 cm de altura.

5.6.3 RELACIÓN DE POISSON

La Relación de Poisson μ , depende de las velocidades de las ondas P y S de la probeta.

Se calcula con la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad \text{Ec. (101)}$$

Dónde:

V_p = velocidad de onda primaria, m/s

V_s = velocidad de onda secundaria, m/s

μ = Relación de Poisson, adimensional.

En el sistema de GCTS si el valor calculado de la Relación de Poisson es mayor que 0.5, entonces se mostrará el valor en color rojo.

5.6.4 MODULO DE YOUNG

El módulo Young, también conocido como el módulo de elasticidad, depende de las velocidades de las ondas P y S de la probeta, así como la densidad de la probeta. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\rho V_s^2 (V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad \text{Ec. (102)}$$

Dónde:

V_p = velocidad de onda primaria, m/s

V_s = velocidad de onda secundaria, m/s

ρ = densidad del suelo, g/cm³

E = módulo de Young, KPa.

5.6.5 MODULO BULK

Módulo Bulk, uno de los resultados definitivos, depende de las velocidades de las ondas P y S de la probeta, así como la densidad de la probeta. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$K = \frac{\rho (V_p^2 - 4V_s^2)}{3} \quad \text{Ec. (103)}$$

Dónde:

V_p = velocidad de onda primaria, m/s

V_s = velocidad de onda secundaria, m/s

ρ = densidad del suelo, g/cm³

K = módulo Bulk, KPa.

5.6.6 INTERPRETACIÓN DE LA SEÑAL

Se describen a continuación los métodos para determinar los tiempos de arribos de las ondas con el uso del software “CATS Ultrasonics” de GCTS, así como métodos sugeridos en bibliografía. Los tiempos de llegada está representada en unidades de tiempo previamente seleccionado por el usuario en la configuración del software, en milisegundos (ms) o microsegundos (μ s). El tiempo de llegada de la onda se puede determinar, utilizando el promedio de los métodos seleccionados manualmente. La confiabilidad de los resultados depende en gran medida de la aplicación del método,

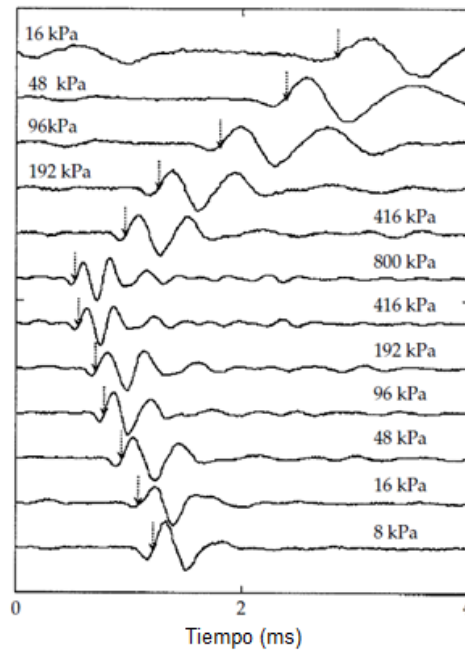


Figura 59. Recepción de señales típicas de ondas de corte bajo diferentes esfuerzos normales en ensayos de consolidación bajo la aplicación de esfuerzos normales en Caolinita. Reproducido por Kang 2014 con el permiso de ASTM Internacional.

Fuente: Triaxial Testing of Soils. Lade, P. V. (2016).

5.6.6.2 Método 1 - Umbral absoluto

El tiempo de llegada de la onda se determina como el valor del tiempo en el primer punto que pasa el valor del umbral absoluto. El umbral absoluto denominado 1 Th, está fijo en unidades de milivoltios y tiene el valor predeterminado de 10 mVolts o 0.01 volts.

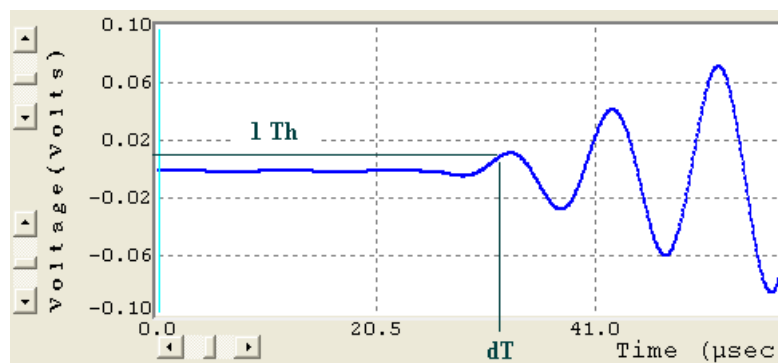


Figura 60. Resultados umbral absoluto.

Fuente: CATS Ultrasonics. Geotechnical Consulting & Testing Systems. (s.f.).

5.6.6.3 Método 2 - umbral relativo

El tiempo de llegada de la onda se determina como el valor del tiempo en el primer punto que pasa el valor umbral relativo (representado como $2 Th$). El valor umbral relativo se define como la amplitud máxima de la señal multiplicada por el umbral relativo. El umbral relativo está dado en porcentaje (%), y tiene un valor por defecto de 3%.

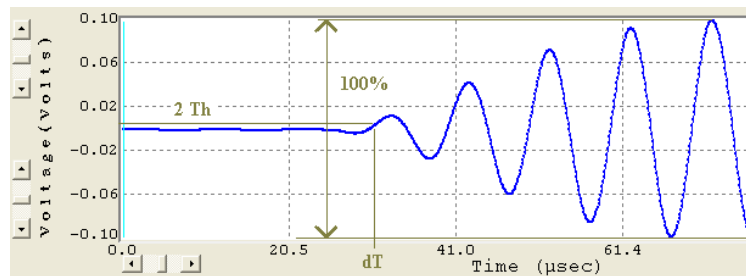


Figura 61. Resultados umbral relativo.

Fuente: CATS Ultrasonics. Geotechnical Consulting & Testing Systems. (s.f.).

5.6.6.4 Método 3 - relativa al primer pico

El tiempo de llegada de la onda se determina como el valor del tiempo en el primer nivel de amplitud para el pico, siendo un porcentaje de la amplitud del primer pico. El primer pico se determina usando el método 1 y/o el método 2. Si se selecciona ambos métodos, el valor de umbral para el primer pico será el promedio de los valores calculados de los umbrales en ambos métodos. Si sólo se selecciona un método, entonces el valor de umbral para el pico será el valor calculado por este método. El umbral relativo está en las unidades de porcentaje (%), y tiene el valor predeterminado de 10 (diez)%.

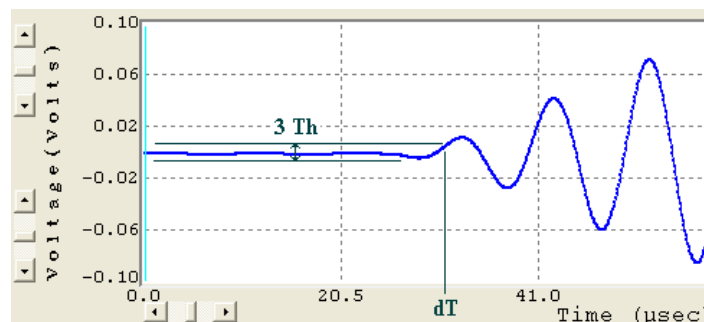


Figura 62. Resultados relativa al primer pico.
Fuente: CATS Ultrasonics. Geotechnical Consulting & Testing Systems.
(s.f.).

5.6.6.5 Método 4 – tiempo del primer pico

El tiempo de llegada de la onda se determina como el valor del tiempo en el valor máximo del primer pico. El primer pico se determina usando el Método 1 y/o el método 2. Si ambos métodos se seleccionan, el valor de umbral para el pico será el promedio de los valores calculados de los umbrales en ambos métodos. Si sólo uno de los métodos, el valor de umbral para el pico será el valor calculado por ese método, y si ninguno de los dos escenarios se selecciona, entonces el valor de umbral para el pico será el valor umbral calculado por método 2. No se recomienda este método para las ondas S.

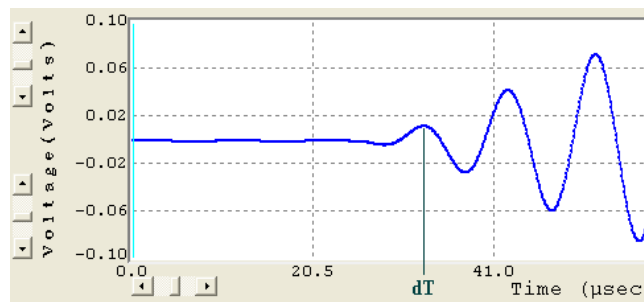


Figura 63. Resultados tiempos del primer pico.
Fuente: CATS Ultrasonics. Geotechnical Consulting & Testing Systems.
(s.f.).

5.6.6.6 Método 5 - Tangente al primer pico

El tiempo de llegada de la onda se determina como el valor de tiempo de la tangente a la línea del primer pico. El valor superior del porcentaje del primer pico se determina por el Primer Nivel de Amplitud de pico superior, y el valor más bajo del porcentaje del primer pico se determina por el Primer Nivel de pico de amplitud más baja. Por lo tanto, sólo los puntos que viven dentro del Primer Nivel de Amplitud de pico superior y el Primer Nivel de Amplitud de pico inferior serán utilizados en el cálculo de la tangente.

Primer nivel de amplitud del pico superior que está definida en porcentaje (%), y tiene el valor por defecto de 85% y tiene el valor por defecto de 15% para el nivel de amplitud inferior.

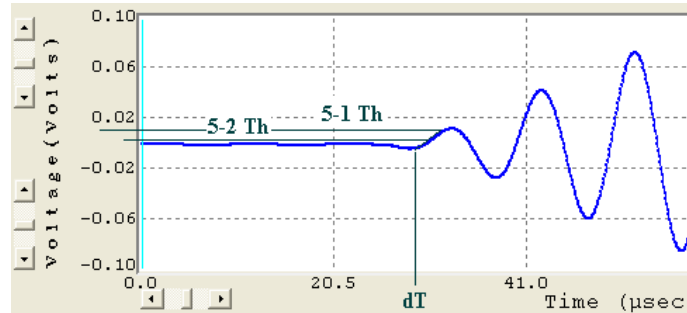


Figura 64. Resultados tiempos del primer pico.

Fuente: CATS Ultrasonics. Geotechnical Consulting & Testing Systems. (s.f.).

5.6.7 GEOMETRIA Y TAMAÑO DE LA PROBETA

Como se mencionó anteriormente, los ensayos con elementos Bender se realizan normalmente en probetas con un diámetro de 7 cm y 14 cm de altura. La relación de longitud de onda, que se define como la distancia de extremo a extremo del elemento emisor y del receptor dividido para la longitud de la onda generada, es un parámetro que limita el desarrollo y la propagación de la onda de corte. Si la muestra de suelo es demasiado corta, y la distancia entre los dos elementos Bender es relativamente pequeña, la salida resultante sería una señal precursora que es una lectura antes de la llegada de la onda S. Esto se conoce como el efecto de campo próximo. Para eliminar este fenómeno, se propone que la relación de longitud de onda no sea inferior a dos. Un parámetro ligado a la relación de longitud de onda es la frecuencia de entrada. Se determinó a través de los resultados experimentales de que la mayor amplitud del elemento receptor corresponde a una frecuencia de entrada igual a la frecuencia de resonancia del elemento Bender y que cualquier frecuencia de entrada mayor que resultaría en una respuesta de búsqueda de la frecuencia de resonancia del Bender element, pero con una amplitud disminuida. Por esta razón, se recomienda que las frecuencias superiores a la frecuencia de resonancia del elemento bender no debe ser utilizadas.

5.6.8 EFECTOS DE MATERIAL DE LA PROBETA

Se llevaron a cabo los primeros estudios en las arenas de grano fino y arcillas. Para generalizar la utilización de elementos Bender, estudios recientes han examinado la viabilidad de la medición del módulo de corte en materiales con partículas gruesas mediante la comparación de resultados entre columnas resonantes y elementos Bender (por ejemplo, Anderson y Stokoe 1978), así como la comparación de los resultados con las relaciones empíricas que se han establecido previamente. Las limitaciones de los elementos piezoeléctricos Bender con respecto a la forma y tamaño de las partículas, los rangos de densidades, el estado de esfuerzos, y las influencias de estos factores son también todas las cuestiones de interés. Tres tipos diferentes de arena, un medio angular, una angular gruesa, y un redondo, medio, así como cuentas de vidrio, se han utilizado en el examen de estas diferencias (Nazarian y Baig 1995). Los resultados se compararon con relaciones empíricas propuestas por Iwasaki y Tatsuoka (1977) y Hardin (1978), demostró que la variación de tamaño de grano y la angularidad, así como la densidad de la probeta determina que tan buenos son los resultados de la prueba de acuerdo con cada relación empírica.

5.6.9 PROCESAMIENTO DE SEÑALES

El filtrado intenta dar una señal agradable y limpia de la señal cruda, haciendo suposiciones sobre la composición de la señal original. La señal cruda (no filtrada) puede contener interferencias de fuentes externas como, por ejemplo: vibraciones o interferencia eléctrica. Se supone que estas interferencias son aleatorias y tienen una distribución gaussiana con una media de cero. El resultado de los datos filtrados puede generar una distorsión si se selecciona un sistema de ajuste incorrecto para el filtrado. Las técnicas de filtrado que pueden ser usadas en el sistema se las menciona a continuación:

- Chebyshev – Tipo 1: Transition Band Width
- Chebyshev – Tipo 2: Stop Band Rejection
- Filtro alto: Filtrará más
- Filtro menor: Filtrará menos

El software CATS Ultrasonics de GCTS, ofrece los siguientes modos de filtrado, descritos en la Tabla 8:

Tabla 10: Modos de filtrado

filtro	Descripción
Low-pass	Sin atenuación de frecuencias por debajo del valor de baja frecuencia dada. La atenuación de las frecuencias por encima del valor de baja frecuencia
High-pass	Sin atenuación de frecuencias por encima del valor dado de alta frecuencia. Atenuación de frecuencias por debajo de valor de alta frecuencia.
Bandpass	La atenuación de las frecuencias por debajo de valor dado de baja frecuencia y alta frecuencia por encima del valor dado. No atenuación de frecuencias entre los valores de frecuencia baja y alta. *
Bandstop	Sin atenuación de las frecuencias por debajo de valor dado de baja frecuencia y alta frecuencia por encima del valor dado. Atenuación de frecuencias entre los valores de frecuencia baja y alta. *

* Nota: baja frecuencia debe estar por debajo de alta frecuencia

FUENTE: Fuente: CATS Ultrasonics. Geotechnical Consulting & Testing Systems. (s.f.).

CAPITULO 6. PREPARACIÓN DE MUESTRAS Y EJECUCIÓN DE ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

6.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo se ha subdividido en tres fases, según proceso lógico a seguir para la obtención de parámetros que definan la caracterización, estas fases son:

1. Ejecución de los ensayos de caracterización de la muestra de caolinita.
2. Procedimiento utilizado para construir las probetas de caolinita en el laboratorio.
3. Características de las probetas para ensayos de caracterización dinámica en laboratorio.

Se llevaron a cabo los ensayos de caracterización basados en las normas estandarizadas por la ASTM como el análisis de la distribución de partículas, limite líquido y plástico, gravedad específica, ensayos de compactación y relaciones fundamentales.

6.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS PROBETAS

Para los ensayos de caracterización dinámica en laboratorio, uno de los aspectos más importantes es el uso de probetas que sean representativas de su condición in situ. Esto no sólo se refiere a los esfuerzos y densidad del suelo, sino también a la estructura o la disposición de las partículas dentro del suelo. (Mitchell and Soga, 2005).

La utilización de los procedimientos estandarizados de muestreo, así como de los procesos de manipulación y de transporte al laboratorio de las muestras también puede en muchos casos garantizar estas condiciones sin embargo también pueden inducir perturbaciones considerables.

Esto conlleva a menudo a ser necesario el uso de probetas reconstituidas para ser utilizadas en el caso de la investigación.

En la literatura se ha documentado que la resistencia a la licuación de arenas es fuertemente afectada por el método de preparación de la probeta utilizada en el laboratorio, por ejemplo: Ladd 1974; Mullis 1977; Ladd 1977; Mullis 1978; Tatsuoka et al. 1986. (Bradshaw and Baxter, Sample preparation of Silts for Liquefaction Testing).

6.2.1 PROCEDIMIENTOS DE MUESTREO EN CAMPO

A continuación, se resume los procedimientos estandarizados de obtención de muestras en campo, que se utiliza en nuestro medio.

- ASTM D7015-13 Prácticas estándar para la obtención de muestras de suelo en bloque Inalterado (cúbicas y cilíndricas).
- ASTM D1587/D1587M-15 Práctica estándar de muestreo con tubo de pared delgada en suelos de grano fino para propósitos geotécnicos.
- ASTM D4220/D4220M-14 Prácticas estándar para la preservación y transporte de las muestras de suelo.
- Metodología de congelamiento de suelos antes de la toma de muestras y manipulación puede proporcionar un medio fiable para preservar las características situ de arenas. Adachi (1988), Yoshimi (1978)
- Metodología de utilización de muestreadores tipo Pitcher y Denison.

6.2.2 PROCEDIMIENTOS DE PREPARACIÓN DE PROBETAS A PARTIR DE MUESTRAS INALTERADAS OBTENIDAS EN CAMPO

Es necesario establecer los procedimientos de manipulación y preparación de las probetas en laboratorio a partir de muestras inalteradas, a continuación, se describen algunos de estos procedimientos en la siguiente tabla.

Tabla 11. Procedimientos de preparación de probetas a partir de muestras inalteradas

TIPO DE MATERIAL	PROCEDIMIENTO	DETALLE
Suelos cohesivos	Tallado de muestras	Este procedimiento de preparación de probetas, se realiza utilizando una sierra con un alambre metálico y un enrasador de borde recto. El equipo de tallado tiene guías rígidas a lo largo de la cual la sierra de alambre puede ser guiada, mientras se realizan los recortes. El enrasador de borde recto se utiliza para el terminado final de la forma de la probeta. La longitud de la probeta puede ser ajustada colocando primero una bolsa de plástico alrededor de la probeta (para evitar la adherencia), para después colocarla en una cuna metálica que permite cortar las rebanadas necesarias hasta cumplir con la altura deseada.
Suelos no cohesivos	Reducción de muestra congeladas	Las muestras congeladas pueden reducirse de diámetro usando un torno para recortar las capas externas de arena congelada para producir probetas inalteradas de materiales granulares. Para la realización de este procedimiento requiere un cuarto frío con temperaturas bajo cero, para evitar que la muestra se descongele y se destruya.

Elaborado por: Andrés Muñoz
Fuente: Ensayos en Laboratorio

6.2.3 PROCEDIMIENTOS DE RECONSTITUCIÓN DE PROBETAS A PARTIR DE MUESTRAS ALTERADAS OBTENIDAS EN CAMPO

En muchos proyectos la dificultad de obtener probetas inalteradas debido a la complejidad del material o a los altos costos de los procesos de muestreo, se vuelve necesario contar con procedimientos de reconstitución de probetas que cumplan con características similares que se tiene en el campo.

A continuación, en la siguiente tabla se resumen estos métodos de reconstitución de probetas a ser usadas en ensayos en laboratorio:

Tabla 12. Procedimientos de preparación de probetas a partir de muestras inalteradas

TIPO DE MATERIAL	PROCEDIMIENTO	REFERENCIA	OBSERVACIONES
------------------	---------------	------------	---------------

suelos no cohesivos	Moist-tamping (MT) Undercompaction	Ladd, 1978	El método conduce a resultados de ensayos más consistentes y repetibles. Este procedimiento: (1) minimiza la segregación de partículas. (2) se puede utilizar para compactar la mayoría de los tipos de arenas que tienen una amplia gama de densidades relativas. (3) permite la determinación de la resistencia cíclica óptima de una arena dado un peso unitario seco.
Suelos cohesivos / no cohesivos	The Packing Pressure Test	Hafez, 2010	Es una técnica de compactación estática en el laboratorio. Una prensa hidráulica se utiliza para comprimir el suelo a través de un molde partido diseñado. La fuerza ascendente es aplicada y durante el proceso de compactación el valor de la energía varía con la cantidad de contenido de humedad.
Suelos cohesivos	The Paste-proconsolidation method	Katagiri and Imai, 1994	El propósito de este método es realizar probetas de arcilla homogéneas y repetibles. Un alto grado de homogeneidad puede ser obtenido con este método. La mezcla se prepara usualmente con un contenido de agua de dos veces o tres veces el límite líquido del material.
Suelos no cohesivos	Dry-deposition (DD)	Ishihara, 1993 Tatsuoka, 1986 Mulilis, 1977	Una muestra de arena seca se deposita usando un embudo en un molde partido. La punta del embudo se mantiene a una altura mínima de caída por encima de la superficie de la arena a lo largo del llenado con el fin de dar a la densidad más baja posible. Al tocar por la periferia de manera uniforme del molde utilizando una varilla de goma para conseguir una densidad más alta deseada.
Suelos no cohesivos	Air-Pluviation (AP)	Miura y Toki 1982; Vaid y Negussey 1984, 1988; Rad y Tumay 1987 Vaid y Negussey 1984	Este método en la arena parece simular de mejor manera la sedimentación que se lleva a la formación de depósitos de arena en la naturaleza, ya sea en el aire o en el agua. Los principales factores que controlan el comportamiento de arenas son la relación de vacíos y la estructura de la arena. Se utiliza para hacer probetas de arena directamente en el interior de una membrana realizada en un molde de conformación
Suelos no cohesivos	Wet-raining	Ronald Chaney y J. P. Mlilis 1978	Este método comprende un procedimiento para remoldear un material de suelo granular por un proceso de sedimentación. El proceso de sedimentación remoldea una estructura del suelo que se aproxima al que se produjo en un entorno natural de aluvión.

Elaborado por: Andrés Muñoz

Fuente: Ensayos en Laboratorio

6.3 EJECUCIÓN DE ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE CAOLINITA

La arcilla tipo caolinita se utilizó para la reconstitución de todas las probetas de suelo utilizadas en este estudio. Este tipo de suelo fue seleccionado debido a las numerosas

investigaciones que han realizado en el pasado, con el fin de comparar y validar los resultados obtenidos:

- Hardin and Black, 1968 – 1969
- Marcuson and Wahls, 1972
- Hardin and Drnevich, 1972
- Kokusho, 1982
- Seed, 1986
- Nicholas Thomas Rocco, 2012
- Ho Jiahui, 2013

La caolinita fue proporcionada por la empresa de Edesa S.A-Quito, que la utiliza como materia prima en la elaboración de sus productos. La caolinita es importada desde los Estados Unidos.

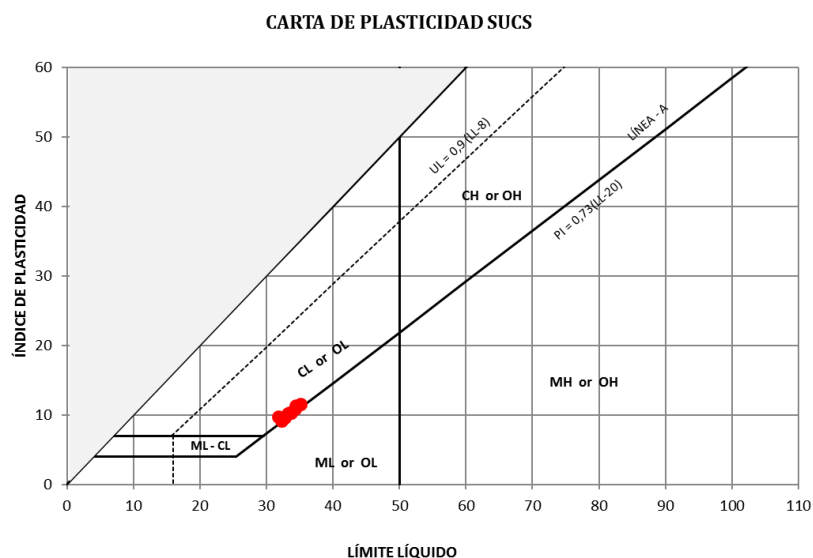
La arcilla tipo caolinita se clasifica según en el Sistema de Clasificación de Suelos unificada, SUCS como una arcilla de baja plasticidad del tipo CL, sus propiedades físico y mecánicas determinadas como parte de este estudio se presentan a continuación.

6.3.1 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA CAOLINITA

En la Tabla 13, se resumen los resultados obtenidos de los ensayos de propiedades físicas de probetas ensayadas, que han sido seleccionadas a través de números aleatorios.

Tabla 13. Resultados de las propiedades físicas

PROPIEDADES	Probeta 2	Probeta 6	Probeta 7	Probeta 10	Probeta 11	Probeta 12	Probeta 14	Probeta 15	Valor Promedio	Desviación Estándar
Clasificación SUCS	CL	CL	CL	CL	CL	CL	CL	CL	CL	.....
Límite Líquido (%)	33	34	33	33	34	32	34	32	33	0.91
Índice de plasticidad (%)	10	11	10	10	10	10	11	9	10	0.72
Límite de contracción	28	29	28	27	28	29	28	27	28	0.76
Análisis granulométrico										
Arena (%)	1	1	1	1	1	1	1	2	1	0.35
Limo (%)	28	29	30	31	29	28	28	28	29	1.13
Arcilla (%)										
menor a 0,005 mm (%)	31	32	31	31	32	31	31	32	31	0.52
menor a 0,002 mm (%)	39	40	41	40	39	39	38	37	39	1.25
Gravedad específica	2.580	2.585	2.584	2.593	2.580	2.604	2.590	2.590	2.588	0.01
Actividad (IP / % más fino 2µm)	0.26	0.27	0.25	0.24	0.27	0.25	0.30	0.25	0.26	0.02
Clase de actividad	Inactiva	Inactiva	Inactiva	Inactiva	Inactiva	Inactiva	Inactiva	Inactiva	Inactiva < 0,75	.....



Elaborado por: Andrés Muñoz

Fuente: Resultados de ensayos en Laboratorio

6.3.2 ENSAYOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS

Para la caracterización de las propiedades mecánicas de la caolinita se realizaron dos ensayos necesarios para la ejecución de este trabajo. Primero ensayos de compactación que definirán los valores determinados de densidad y humedad de las probetas a ser reconstituidas; y el ensayo de compresión no confinada que ayudará a definir el máximo esfuerzo desviador capaz de ser aplicado en el triaxial cíclico.

6.3.2.1 Ensayo de compactación

En la Tabla 14, se presenta a continuación los resultados obtenidos en el ensayo de compactación de la muestra de caolinita aplicando las normas de ensayo estandarizada ASTM D1557 - 12e1 para el método de ensayo de compactación modificado y ASTM D698 - 12e2 para el método de compactación estándar, ver

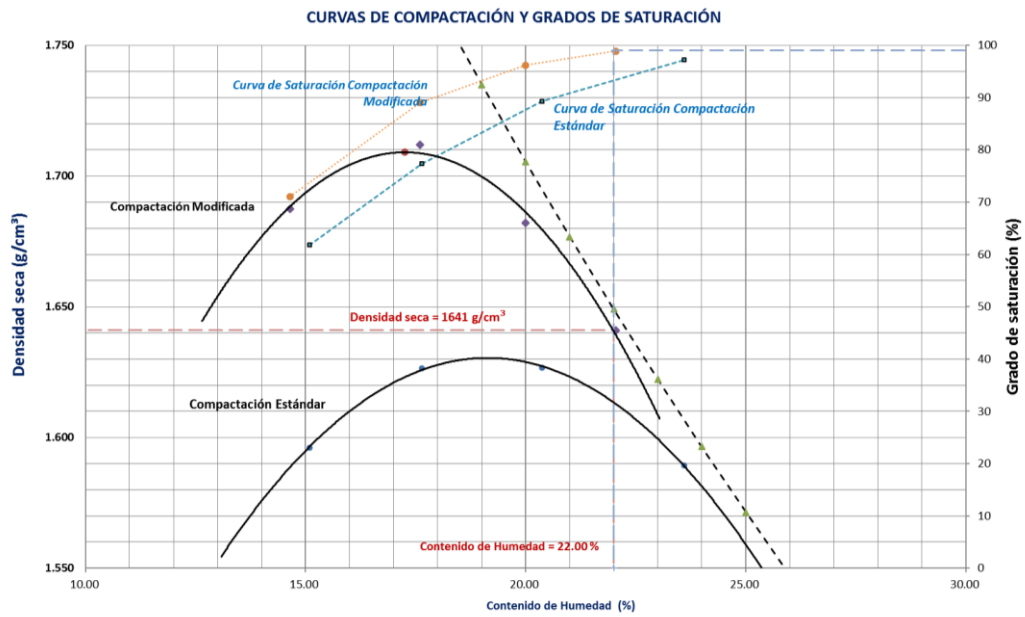


Figura 65. Resultados ensayos de compactación

Fuente: Resultados ensayos en Laboratorio

Tabla 14. Resultados ensayo de compactación

Ensayo de compactación		
Método	Estándar	Modificado
Densidad seca máxima (g/cm ³)	1.630	1.709
Humedad Óptima (%)	19.1	17.3

Elaborado por: Andrés Muñoz

Fuente: Resultados ensayos Laboratorio

De la evaluación de las curvas de compactación desarrolladas se decidió elaborar las probetas para investigación según las siguientes condiciones:

- Densidad seca = 1.641 g/cm³
- Humedad Óptima = 22.00%
- Grado de saturación = 99.0 %
- Grado de compactación = 96.0%

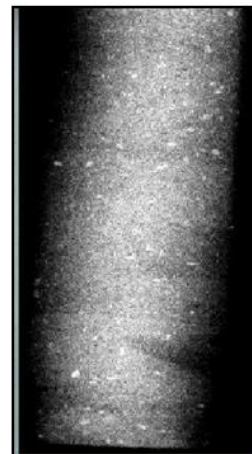
Con las características físicas de las probetas, se establece la ejecución de los ensayos dinámicos

6.3.3 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Una vez seleccionada los parámetros de reconstitución de las probetas, se describe a continuación el procedimiento de preparación y reconstitución seguido en laboratorio. En este trabajo se definió como procedimiento de reconstitución de probetas, el método de compactación estática en laboratorio. (Doris & Nurbaya, 2011) en su investigación concluyen que con este método de reconstitución de probetas se presenta mayores condiciones de homogeneidad en su estructura del suelo, en comparación con el método dinámico de compactación; a través del ensayo de rayos X de la Figura 66, se puede observar la diferencia de las estructuras de los suelos compactados por los procedimientos mencionados.



(a) Compactación estática



(b) Compactación dinámica

Figura 66. Foto de rayos X para probetas suelos compactados

Fuente: (Doris & Nurbaya, 2011, pág. 1592)

6.3.3.1 *Preparación inicial de las muestras*

Se preparó 15 fundas de muestras de caolinita, con un peso aproximado de 1250 g por muestra.

6.3.3.2 *Secado, humedecimiento, mezclado y tiempo de curado de las muestras*

Previo a la preparación de las probetas cada funda se dejó secar al horno a una temperatura controlada de 60°C por un periodo de tiempo de 24 horas. Después de este periodo se agregó la cantidad de agua necesaria para alcanzar el contenido de humedad deseado. Luego de mezclar el suelo con el agua y obtener una mezcla homogénea, se colocó la mezcla en una funda plástica para dejarla curar por un periodo de tiempo no menor de 12 horas. Periodo de tiempo en el cual se pretendía asegurar una distribución uniforme del contenido de humedad. Una vez finalizado este periodo de tiempo, se encontraba listo para compactar estáticamente la probeta.

6.3.3.3 *Compactación estática de las probetas*

El equipo utilizado para la compactación estática de las probetas está conformado por un molde partido metálico, por una base de metal, abrazaderas colocadas a lo largo del molde, guía superior para el pistón, placas de acrílico y un pisón metálico, como se muestra en la Figura 67. Las dimensiones nominales internas del molde permiten formar probetas con dimensiones de 70 x 140 mm.

La compactación de las probetas dentro del molde se realizó aplicando compactación estática. El procedimiento seguido es descrito a continuación:

- Determinar el volumen de la probeta, utilizando las dimensiones del molde y considerando una altura adicional no mayor a 5 mm para realizar el enrase de la probeta.



Figura 67. Equipo de compactación para la fabricación de los especímenes de prueba.

Fuente: Ensayos de Laboratorio

- A partir del volumen calculado se determina el peso del material húmedo que será compactado. Según la densidad según los parámetros definidos.
- Una vez colocado el molde en la base metálica, se introduce un disco de acrílico en la base para que la probeta no se adhiera a la base metálica, luego de esto se vierte el suelo al interior del molde.
- Con una esponja se humedece las paredes del molde y luego de esto se coloca el suelo.
- Posterior a esto se pone un disco de acrílico en la parte superior de la muestra y se coloca el pistón, así como los tornillos de sujeción de la barra guía.
- Armado el equipo, se coloca en la prensa de compresión y se compacta hasta la altura definida para la conformación de la probeta, El movimiento de la prensa es por desplazamiento controlado.
- Cuando el proceso de compactación se finaliza se retira la guía y el pistón de compactación. Se retira el molde de la base y se procede a extraer la probeta cuidadosamente.
- Se coloca la probeta en el molde partido para realizar los cortes que garantiza el paralelismo de las caras de la probeta.

- Se determina el peso de la probeta con aproximación de 0.01g. Las dimensiones de la probeta se realizan con la probeta colocada en la cámara, se mide la altura de la probeta en 4 lugares y para la determinación del diámetro de la probeta se realizan mediciones en la parte superior, media e inferior de la probeta con una aproximación de 0.01 mm y se registran en la hoja de campo.
- Se determina el contenido de humedad con el suelo restante de la funda plástica. Con las dimensiones y el contenido de humedad determinados, se verifica que la densidad y el contenido de humedad cumplan con el rango de variación permisible de los valores establecidos. En caso contrario, la probeta se desecha.

6.3.3.4 *Homogeneidad y reproducibilidad de las probetas*

Para la verificación de homogeneidad de las probetas compactadas estáticamente en sus condiciones de densidad y humedad controlada a lo largo de las mismas, así como de su reproducibilidad en laboratorio. Se definió la variabilidad de las probetas en un contenido de contenido de humedad de ± 0.5 % determinado acorde a la Norma ASTM D1883 y con respecto a la densidad seca de $\pm 1.0\%$, valor utilizado para esta investigación.

Para verificar esta condición se elaboró 3 probetas a las cuales se las dividió en dos partes como se muestra en la Figura 68(a) luego en 7 secciones de aproximadamente 2 cm cada parte de la probeta, como se muestra en la Figura 68(b). Las secciones de una de las partes servirán para la determinación de la masa y su volumen por desplazamiento en agua después de ser recubierta por parafina. En las secciones restantes se determinará su humedad tanto en una subsección exterior, medio e interior.



(a)

(b)

Figura 68. Probeta moldeada. (a) probeta dividida en dos partes, (b) Secciones y determinación del contenido de humedad de las subsecciones.

Fuente: Ensayos de Laboratorio

En las siguientes tablas se resumen los contenidos de humedad que se presenta a lo largo de la probeta según las mediciones realizadas. Para la probeta N° 1: El rango del contenido de humedad de las secciones fue de 21.89 % a 21.33 con un valor promedio de 22.16% y una desviación estándar de 0.12 a lo largo de la probeta.

Tabla 15. Contenidos de Humedad de la Probeta 1

PROBETA N° 1				
Humedad Exterior	Humedad Medio	Humedad Interior	Promedio de la sección	Desviación Estándar
22.17	22.33	22.31	22.27	0.09
22.22	22.32	22.19	22.24	0.07
22.03	22.28	22.20	22.17	0.13
22.16	22.24	22.19	22.20	0.04
21.90	22.09	22.05	22.01	0.10
22.22	22.33	22.22	22.26	0.06
21.89	22.16	21.92	21.99	0.15
PROMEDIO			22.16	0.12

Elaborado por: Andrés Muñoz

Fuente: Ensayos de Laboratorio

Para la probeta N° 2: El rango del contenido de humedad de las secciones fue de 21.98 % a 22.46% con un valor promedio de 22.19% y una desviación estándar de 0.13 a lo largo de la probeta.

Tabla 16. Contenidos de Humedad de la Probeta 2

PROBETA N° 2				
Humedad Exterior	Humedad Medio	Humedad Interior	Promedio de las Probetas	Desviación Estándar
22.34	22.47	22.24	22.35	0.11
22.03	22.27	22.18	22.16	0.12
21.98	22.06	22.03	22.02	0.04
22.28	22.46	22.36	22.37	0.09
22.07	22.20	22.19	22.15	0.07
22.05	22.16	22.11	22.11	0.05
22.05	22.27	22.15	22.16	0.11
PROMEDIO			22.19	0.13

Elaborado por: Andrés Muñoz
 Fuente: Ensayos de Laboratorio

Para la probeta N° 3: El rango del contenido de humedad de las secciones fue de 21.97 % a 22.42% con un valor promedio de 22.20% y una desviación estándar de 0.10 a lo largo de la probeta.

Tabla 17. Contenidos de Humedad de la Probeta 3

PROBETA N° 3				
Humedad Exterior	Humedad Medio	Humedad Interior	Promedio de las Probetas	Desviación Estándar
22.27	22.40	22.42	22.37	0.08
22.10	22.33	22.20	22.21	0.12
22.09	22.38	22.27	22.25	0.15
22.19	22.32	22.21	22.24	0.07
22.02	22.25	22.20	22.15	0.12
21.99	22.27	22.10	22.12	0.14
21.97	22.10	22.06	22.04	0.07
PROMEDIO			22.20	0.10

Elaborado por: Andrés Muñoz
 Fuente: Ensayos de Laboratorio

El rango del contenido de humedad de las probetas 1 – 3 y de sus secciones fue de 21.99% a 22.37% con un valor promedio de 22.18% y una desviación estándar de 0.09 a lo largo de las probetas.

Tabla 18. Resumen de contenidos de humedad

Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio de las Probetas	Desviación Estándar
22.27	22.35	22.37	22.33	0.05
22.24	22.16	22.21	22.21	0.04
22.17	22.02	22.25	22.15	0.11
22.20	22.37	22.24	22.27	0.09
22.01	22.15	22.15	22.11	0.08
22.26	22.11	22.12	22.16	0.08
21.99	22.16	22.04	22.06	0.08
PROMEDIO			22.18	0.09

Elaborado por: Andrés Muñoz
Fuente: Ensayos de Laboratorio

En la Figura 70 y Figura 69, se presenta los resultados obtenidos de estas mediciones.

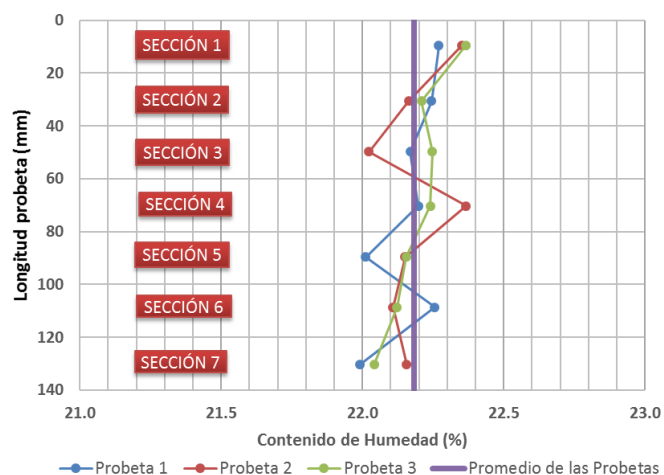


Figura 69. Comparación de las diferentes probetas y sus humedades en cada sección

Fuente: Ensayos de Laboratorio

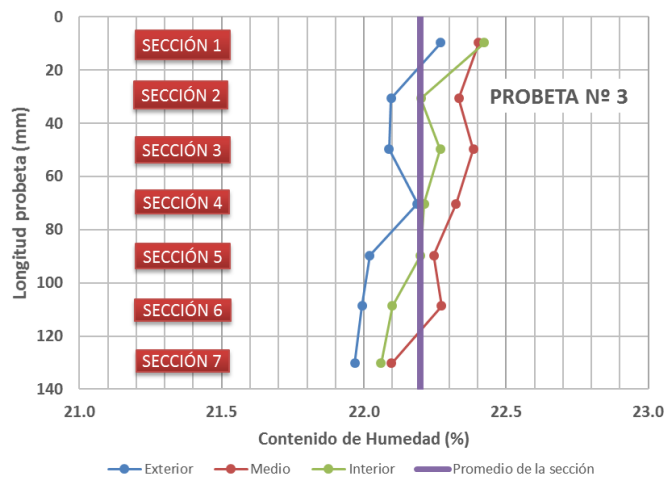
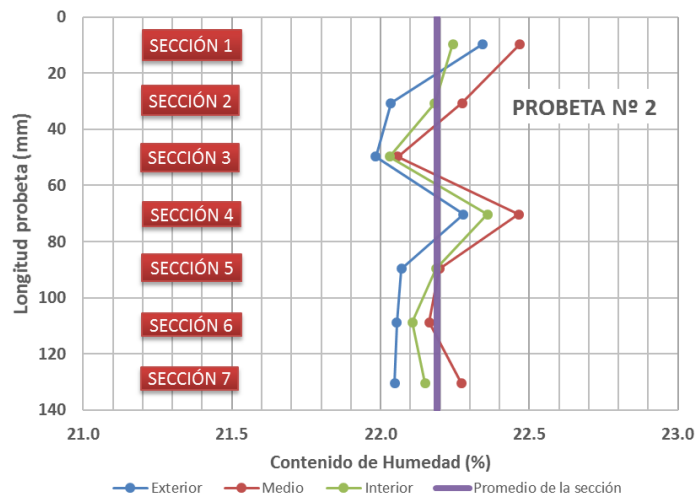
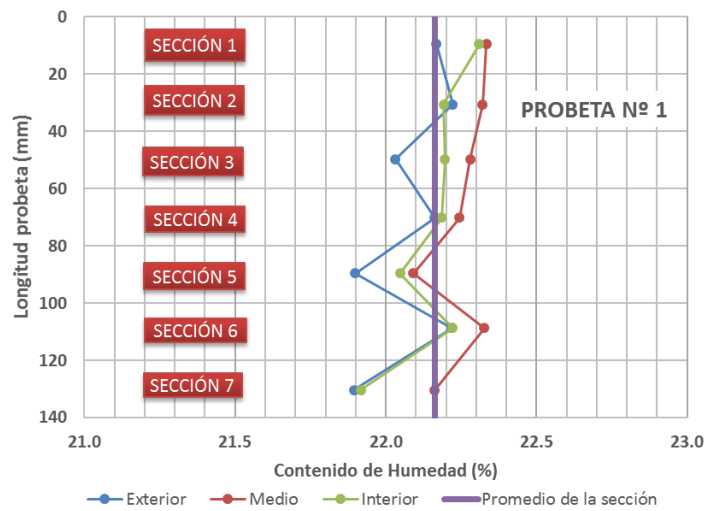


Figura 70. Variaciones de los contenidos de humedad de las probetas
 Fuente: Ensayos de Laboratorio

En las siguientes tablas se resumen los valores de densidad humedad, seca y grado de saturación que se presenta a lo largo de la probeta según las mediciones realizadas.

Las cuales están dentro de los valores definidos con variaciones menores del 1% para los valores de densidad seca y con diferencias menores al 0.5% en el contenido de humedad promedio de las muestras, y cumpliendo que todas las probetas tienen un rango de saturación mayor al 99%.

Tabla 19. Variación de la densidad húmeda y seca en la Probeta N° 1

PROBETA N° 1							
Peso	Peso suelo+parafina	Peso sumergido	Humedad %	Densidad Humeda g/cm ³	Densidad Seca g/cm ³	Grado Saturación %	Desviación Estándar
72.15	78.03	35.56	22.27	2.004	1.639	99.50	-----
83.94	91.36	41.35	22.24	2.005	1.641	99.68	-----
77.98	84.70	38.43	22.17	2.005	1.641	99.50	-----
71.82	77.81	35.43	22.20	2.006	1.642	99.69	-----
72.54	78.42	35.83	22.01	2.008	1.646	99.48	-----
71.62	78.20	35.18	22.26	2.001	1.637	99.12	-----
80.76	87.39	39.87	21.99	2.007	1.645	99.35	-----
PROMEDIO			22.16	2.005	1.641	99.47	0.19

Elaborado por: Andrés Muñoz
Fuente: Ensayos de Laboratorio

Tabla 20. Variación de la densidad húmeda y seca en la Probeta N° 2

PROBETA N° 2							
Peso	Peso suelo+parafina	Peso sumergido	humedad	Densidad Humeda g/cm ³	Densidad Seca g/cm ³	Grado Saturación %	Desviación Estándar
80.16	87.06	39.48	22.35	2.004	1.638	99.74	-----
67.15	73.51	33.09	22.16	2.009	1.644	99.93	-----
71.04	77.35	34.89	22.02	2.000	1.639	98.40	-----
62.43	69.31	30.52	22.37	1.999	1.634	99.09	-----
52.96	59.85	25.89	22.15	2.007	1.643	99.67	-----
49.37	57.81	23.94	22.11	2.007	1.644	99.62	-----
44.95	52.16	21.84	22.16	2.007	1.643	99.69	-----
PROMEDIO			22.19	2.005	1.641	99.45	0.53

Elaborado por: Andrés Muñoz
Fuente: Ensayos de Laboratorio

Tabla 21. Variación de la densidad húmeda y seca en la Probeta N° 3

PROBETA N° 3							
Peso	Peso suelo+parafina	Peso sumergido	humedad	Densidad Humeda g/cm ³	Densidad Seca g/cm ³	Grado Saturación %	Desviación Estándar
75.43	81.37	37.12	22.37	2.000	1.634	99.16	-----
77.31	83.65	38.09	22.21	2.003	1.639	99.30	-----
74.31	81.22	36.55	22.25	2.004	1.639	99.52	-----
68.67	74.91	33.81	22.24	2.005	1.641	99.66	-----
64.29	72.94	31.32	22.15	2.002	1.639	99.00	-----
68.46	73.07	33.84	22.12	2.004	1.641	99.19	-----
51.34	61.81	24.76	22.04	2.010	1.647	99.81	-----
PROMEDIO			22.20	2.004	1.640	99.38	0.30

Elaborado por: Andrés Muñoz

Fuente: Ensayos de Laboratorio

6.3.3.5 Ensayo de compresión no confinada

En la Tabla 22, se presenta los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión no confinada en suelos cohesivos realizados a tres probetas de caolinita aplicando la norma de ensayo estandarizada ASTM D2166/D2166M. Estos ensayos fueron realizados mediante un proceso de deformación controlada, en la Figura 71, se observa el comportamiento del suelo en las curvas de esfuerzo-deformación unitaria.

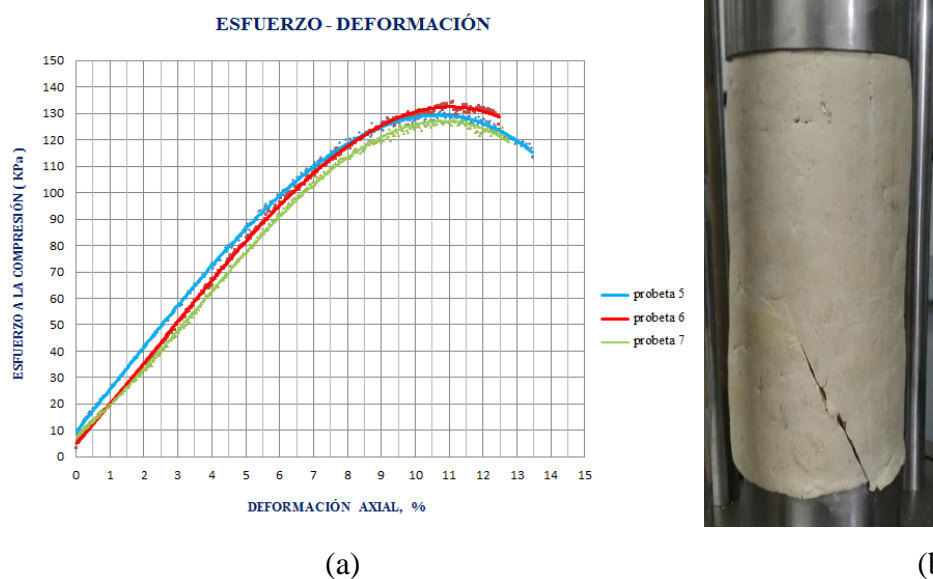


Figura 71. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión no confinada (a) Curva esfuerzo-deformación, (b) Plano de falla de probeta ensayada.

Fuente: Resultados ensayos en Laboratorio

Tabla 22. Resultados ensayos de compresión no confinada

Ensayo N°	Probeta N°	Densidad Húmeda (g/cm ³)	Humedad (%)	Densidad Seca (g/cm ³)	Grado de Saturación (%)	Relación de vacíos	Q _u (KPa)	S _u (KPa)	Deformación en la falla (%)
1	5	2.006	22.27	1.640	99.4	0.58	131	65.4	10.74
2	6	2.003	22.10	1.641	99.3	0.58	134	67.2	11.85
3	7	2.005	22.29	1.640	99.4	0.58	129	64.5	11.03
PROMEDIO		2.005	22.2	1.640	99	0.58	131	66	11.21
Desviación Estándar		0.001	0.102	0.001	0.05	0.001	2.76	1.38	0.58

Elaborado por: Andrés Muñoz

Fuente: Resultados ensayos Laboratorio

CAPITULO 7. RESULTADOS DE ENSAYOS DINÁMICOS

7.1 INTRODUCCIÓN

Para la determinación de las propiedades dinámicas de la caolinita, se definió el programa de ensayos que se muestran en la Tabla 23, las muestras fueron elaboradas según los procesos descritos en el capítulo anterior y están caracterizadas de la siguiente forma: densidad seca de $1641 \pm 16 \text{ kg/m}^3$, porcentaje de humedad de $22.0 \pm 0.5\%$ y un grado de saturación promedio de las probetas de 99% y con un esfuerzo efectivo de confinamiento σ'_3 de 101.3 KPa (1 atm).

Tabla 23. Programa de ensayos

Probeta N°	Ensayo Realizado
1	Condiciones de homogeneidad y reproducibilidad de probetas
2	Condiciones de homogeneidad y reproducibilidad de probetas
3	Condiciones de homogeneidad y reproducibilidad de probetas
4	Compresión Simple
5	Compresión Simple
6	Compresión Simple
7	Triaxial Cíclico
8	Triaxial Cíclico
9	Triaxial Cíclico
10	Columna Resonante
11	Columna Resonante
12	Columna Resonante
13	Elementos Piezoeléctricos Bender
14	Elementos Piezoeléctricos Bender
15	Elementos Piezoeléctricos Bender

Elaborado por: Andrés Muñoz
Fuente: Ensayos de Laboratorio

7.2 DATOS INICIALES DE LAS PROBETAS

Después de la preparación de la probeta y la determinación de su contenido de humedad en el proceso de moldeo, se determinó la masa de las probetas con una precisión de ± 0.01 g, luego se colocó las probetas en la cámara triaxial y colocando la membrana. Las dimensiones de las probetas fueron realizadas con un calibrador con una precisión de ± 0.01 mm, se tomó en 4 puntos la altura de la probeta incluyendo la altura del cabezal inferior de 33.13 mm y la del cabezal superior de 38.63; así mismo se determinó 4 lecturas para cada diámetro superior, central e inferior; el espesor de las membranas utilizadas es 0.3048 mm definida por el fabricante.

En la Tabla 24, se muestra un ejemplo de los datos iniciales de una de las probetas ensayadas para el ensayo triaxial cíclico.

Tabla 24. Ejemplo de la determinación de características físicas probeta N°7

PROBETA N° : 7			CARACTERÍSTICAS FÍSICAS					
CONTENIDO DE HUMEDAD	EN EL MOLDEO		Medida	Altura	D superior	D central	D inferior	Masa
	INICIO	FIN	N°	mm	mm	mm	mm	g
Pcap. (g)	17.12	18.22	1	211.98	70.81	70.79	70.83	1092.32
Pcap. + sh. (g)	64.23	65.92	2	211.97	70.83	70.83	70.79	
Pcap. + ss. (g)	55.68	57.29	3	211.97	70.85	70.83	70.81	
% Humedad	22.17	22.09	4	211.98	70.81	70.78	70.83	
Humedad Promedio	22.13		PROMEDIO	211.98		70.82		

Elaborado por: Andrés Muñoz
Fuente: Ensayos de Laboratorio

7.3 ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO

Los ensayos se realizaron acorde a la norma de ensayo ASTM D3999. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las probetas 7, 8 y 9. Las probetas se ensayaron con valores de Skempptom $B \geq 0.95$, el esfuerzo efectivo de confinamiento σ'_3 de 101.3 KPa (1 atm), una frecuencia de 1 Hz que simula el típico rango de frecuencia de un terremoto y mediante un método de ensayo de carga controlada.

7.3.1 TABLA DE RESULTADOS TRIAXIAL CÍCLICO

En la Tabla 25, se muestra los resultados obtenidos para las probetas en el ensayo triaxial cíclico.

Tabla 25. Resumen de resultados de los ensayos de Triaxial Cíclico

Probeta N°	Medición N°	Contenido de Humedad %	Densidad Húmeda g/cm ³	Densidad Seca g/cm ³	Grado Saturación %	Deformación Axial %	Deformación cortante γ %	Módulo de Corte G MPa	Amortiguamiento, D %
7	1	22.13	2.005	1.642	99.14	0.103944	0.085904	45.42	12.35
7	2	22.13	2.005	1.642	99.14	0.145482	0.120233	35.54	13.31
7	3	22.13	2.005	1.642	99.14	0.264852	0.218886	23.85	14.61
7	4	22.13	2.005	1.642	99.14	0.384561	0.317819	19.16	17.12
7	5	22.13	2.005	1.642	99.14	0.524162	0.433192	16.25	18.34
7	6	22.13	2.005	1.642	99.14	1.126542	0.931026	9.85	21.11
7	7	22.13	2.005	1.642	99.14	3.584127	2.962088	4.47	24.34
7	8	22.13	2.005	1.642	99.14	5.254312	4.342407	2.33	24.66
7	9	22.13	2.005	1.642	99.14	7.843641	6.482348	2.18	25.34
7	10	22.13	2.005	1.642	99.14	9.462140	7.819950	1.93	25.98
8	1	22.18	2.003	1.639	99.01	0.098394	0.081317	43.65	11.75
8	2	22.18	2.003	1.639	99.01	0.105776	0.087418	35.48	12.15
8	3	22.18	2.003	1.639	99.01	0.145527	0.120270	31.15	13.31
8	4	22.18	2.003	1.639	99.01	0.336422	0.278035	21.63	15.89
8	5	22.18	2.003	1.639	99.01	0.789643	0.652598	12.43	20.07
8	6	22.18	2.003	1.639	99.01	1.876417	1.550758	7.04	22.88
8	7	22.18	2.003	1.639	99.01	4.684136	3.871187	3.63	24.87
8	8	22.18	2.003	1.639	99.01	6.315436	5.219369	2.65	25.38
8	9	22.18	2.003	1.639	99.01	8.462374	6.993698	1.99	25.51
8	10	22.18	2.003	1.639	99.01	10.348670	8.552620	1.77	26.07
9	1	22.07	2.006	1.643	99.18	0.113354	0.093681	39.54	12.35
9	2	22.07	2.006	1.643	99.18	0.431561	0.356662	19.32	17.43
9	3	22.07	2.006	1.643	99.18	0.864318	0.714312	11.33	20.33
9	4	22.07	2.006	1.643	99.18	2.358461	1.949141	5.94	24.07
9	5	22.07	2.006	1.643	99.18	6.898713	5.701416	3.25	25.34
9	6	22.07	2.006	1.643	99.18	8.643134	7.143086	2.84	25.46
9	7	22.07	2.006	1.643	99.18	9.452848	7.812271	2.53	26.11
9	8	22.07	2.006	1.643	99.18	11.314452	9.350787	2.24	26.34

Elaborado por: Andrés Muñoz
Fuente: Ensayos de Laboratorio

7.3.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

En los gráficos siguientes se muestra la variación del módulo cortante y del amortiguamiento y para los ensayos triaxiales cíclicos.

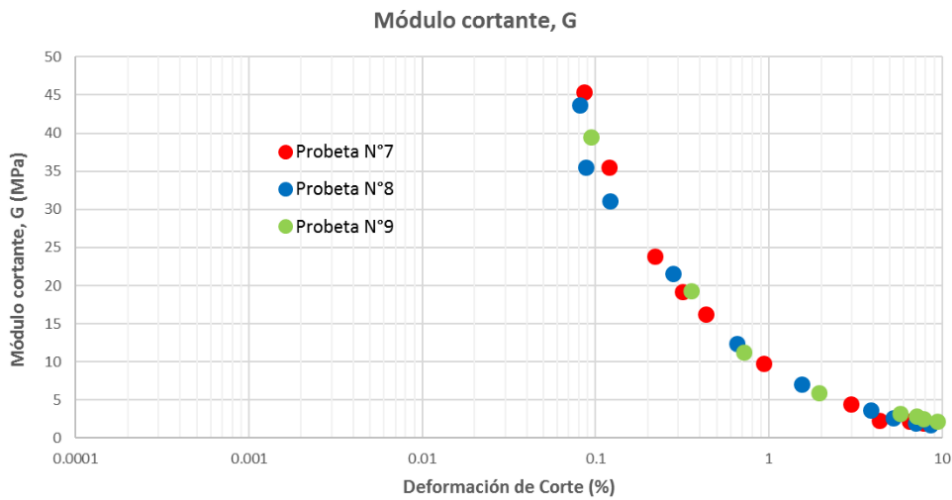


Figura 72. Datos módulo cortante, G

Fuente: Ensayos de Laboratorio

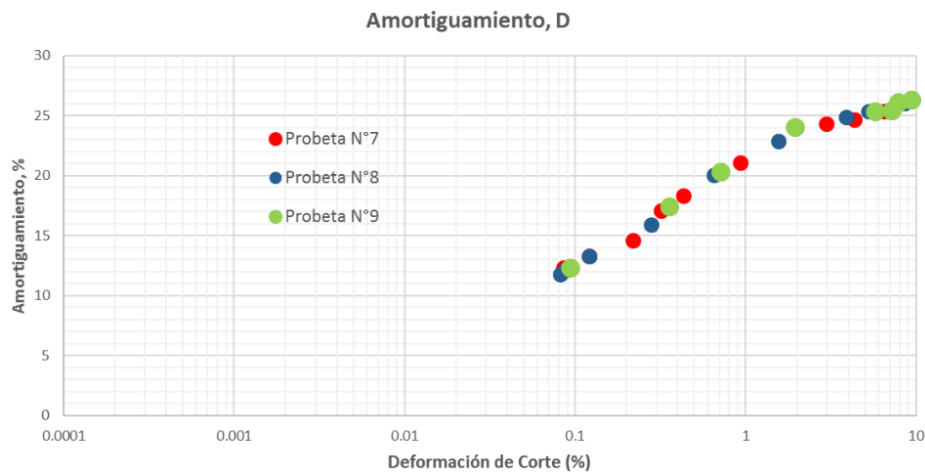


Figura 73. Datos de amortiguamiento, D

Fuente: Ensayos de Laboratorio

7.4 ENSAYO COLUMNA RESONANTE

Los ensayos se realizaron acorde a la norma de ensayo ASTM D4015, se presenta a continuación los resultados obtenidos de las probetas 10,11,12. Las probetas se ensayaron con un esfuerzo efectivo de confinamiento σ_3 de 101.3 KPa y a diferentes amplitudes de torque desde 0.030 N-m a 1.000 N-m, que permite una variación de la deformación cortante, en el rango establecido para el equipo.

7.4.1 TABLA DE RESUMEN DE RESULTADOS

En la siguiente Tabla 26, se muestra los resultados obtenidos en laboratorio para las diferentes probetas.

Tabla 26. Resumen de resultados de los ensayos de columna resonante

Probeta N°	Ensayo	Densidad Húmeda después de la consolidación	Amplitud Torque N-m	Deformación cortante (%)	Velocidad de corte (m/s)	Módulo Cortante (MPa)	Amortiguamiento Decaimiento de vibración libre	R ²	Frecuencia Natural a partir de la frecuencia de resonancia y el cambio de fase	Frecuencia Natural a partir de la frecuencia de resonancia y del decaimiento de vibración libre	Frecuencia Natural Promedio
10	1	2.129	0.03	0.00162	217.3	98.51	2.07	0.921	185.2	185.63	185.4
10	2	2.129	0.05	0.00358	205.5	93.16	2.35	0.997	178.1	179.01	178.6
10	3	2.129	0.10	0.00425	199.6	90.45	2.63	0.981	170.3	170.70	170.5
10	4	2.129	0.12	0.00563	192.8	87.40	2.84	0.991	167.7	168.25	168.0
10	5	2.129	0.14	0.00846	182.3	82.64	3.38	0.993	165.8	160.30	163.1
10	6	2.129	0.18	0.01686	157.3	71.31	4.80	0.993	162.9	160.25	161.6
10	7	2.129	0.24	0.03933	121.6	55.12	7.86	0.990	148.4	153.02	150.7
10	8	2.129	0.40	0.05981	102.3	46.39	9.56	0.970	139.1	137.91	138.5
10	9	2.129	0.80	0.09661	79.1	35.85	11.93	0.990	105.4	108.32	106.9
10	10	2.129	0.60	0.08544	81.5	36.95	12.30	0.987	97.6	98.48	98.0
10	11	2.129	1.00	0.14331	62.3	28.24	12.48	0.987	85.1	83.20	84.2
10	12	2.129	1.00	0.14173	59.7	27.04	12.89	0.935	80.9	81.12	81.0
11	13	2.131	0.02	0.00088	221.5	100.63	1.47	0.995	189.7	189.32	189.5
11	14	2.131	0.02	0.00102	220.3	100.09	1.40	0.996	186.1	187.54	186.8
11	15	2.131	0.04	0.00289	211.4	96.05	2.09	0.937	183.0	180.13	181.6
11	16	2.131	0.06	0.00387	205.9	93.56	2.32	0.999	173.6	173.99	173.8
11	17	2.131	0.06	0.00398	201.1	91.37	2.55	0.320	171.1	171.43	171.3
11	18	2.131	0.10	0.00443	198.7	90.29	2.76	0.836	172.3	170.31	171.3
11	19	2.131	0.15	0.01119	173.4	78.78	3.58	0.970	152.3	152.56	152.4
11	20	2.131	0.20	0.02139	145.5	66.12	6.24	0.951	157.7	158.90	158.3
11	21	2.131	0.30	0.00583	188.5	85.64	3.27	0.810	145.3	144.40	144.9
11	22	2.131	0.40	0.06024	106.3	48.28	9.63	1.000	139.5	137.70	138.6
11	23	2.131	0.40	0.05911	104.8	47.60	9.38	0.847	138.4	138.60	138.5
11	24	2.131	0.50	0.07032	84.8	38.52	9.81	0.928	126.3	121.30	123.8
11	25	2.131	0.50	0.06811	96.4	43.81	9.43	0.940	122.8	125.60	124.2
12	26	2.131	0.04	0.00275	210.5	95.57	2.41	0.997	183.5	182.40	183.0
12	27	2.131	0.06	0.00389	206.3	93.65	2.64	0.984	174.3	174.10	174.2
12	28	2.131	0.12	0.00533	192.4	87.31	3.44	0.997	168.4	167.40	167.9
12	29	2.131	0.15	0.01154	174.2	79.09	4.08	0.989	162.1	160.10	161.1
12	30	2.131	0.20	0.02563	140.5	63.75	6.54	0.983	155.3	158.20	156.8
12	31	2.131	0.40	0.06213	104.4	47.37	8.41	0.988	140.5	139.20	139.9
12	32	2.131	0.50	0.07276	84.3	38.24	9.13	0.961	119.8	118.40	119.1
12	33	2.131	0.60	0.08718	87.8	39.84	10.92	0.968	108.6	108.60	108.6
12	34	2.131	0.80	0.10759	72.8	33.05	12.05	0.950	105.3	106.70	106.0
12	35	2.131	0.90	0.12339	63.9	29.00	12.05	0.950	86.4	89.60	88.0
12	36	2.131	1.00	0.15816	52.6	23.88	14.42	0.986	80.0	83.80	81.9

Elaborado por: Andrés Muñoz
Fuente: Ensayos de Laboratorio

7.4.2 GRAFICAS CARACTERISTICAS DE LOS ENSAYOS

El gráfico corresponde al barrido de frecuencias, se muestra en la Figura 74.

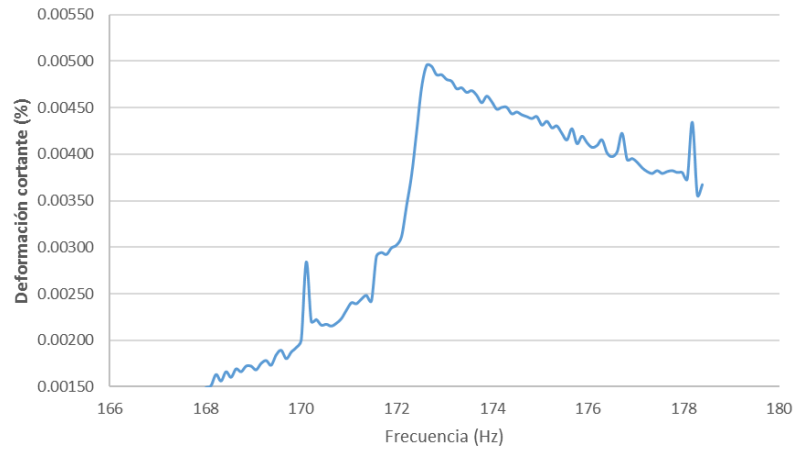


Figura 74. Resultado del barrido de frecuencias.

Fuente: Ensayos de Laboratorio

Un gráfico de los datos de las vibraciones forzadas de los ciclos de la frecuencia de resonancia se muestra en la Figura 75.

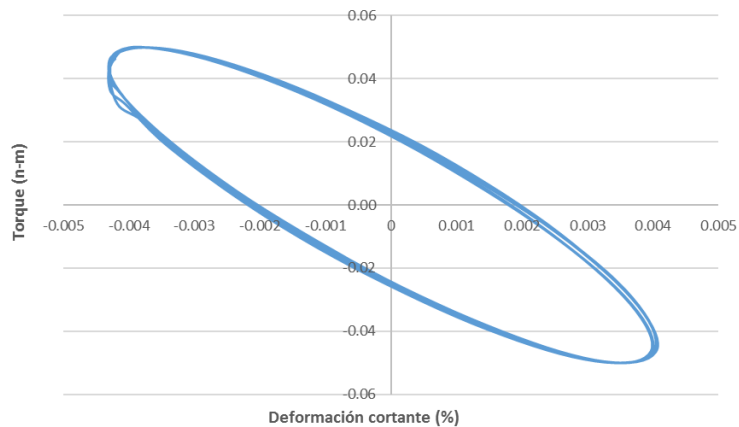


Figura 75. Datos de las vibraciones forzadas

Fuente: Ensayos de Laboratorio

El gráfico de los datos de las vibraciones libres de la frecuencia de resonancia se muestra en la Figura 76.

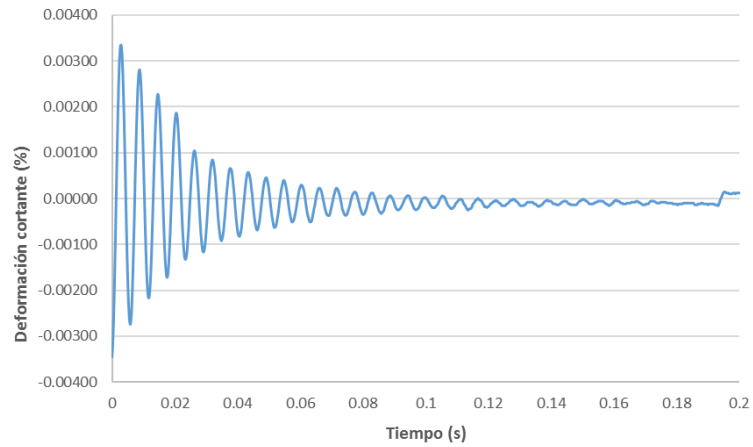


Figura 76. Datos de vibraciones libres

Fuente: Ensayos de Laboratorio

En los gráficos que se muestran a continuación se muestra la variación del módulo cortante y del amortiguamiento para los ensayos de columna resonante.

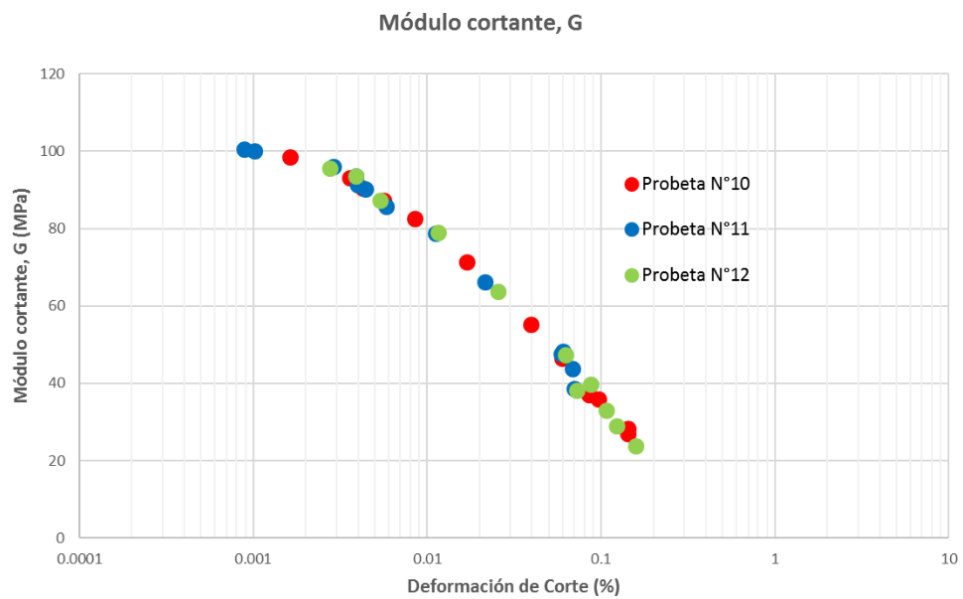


Figura 77. Datos módulo cortante, G

Fuente: Ensayos de Laboratorio

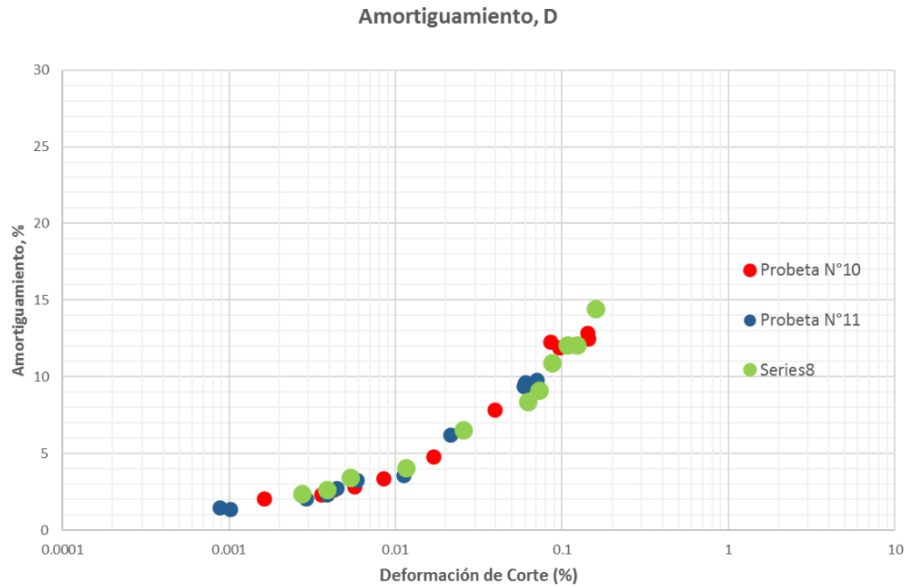


Figura 78. Datos módulo cortante, D

Fuente: Ensayos de Laboratorio

7.4.3 ENSAYO DE ELEMENTOS PIEZOELÉCTRICOS BENDER

En la Tabla 27, se presenta los resultados obtenidos de las probetas 13,14 y 15.

Tabla 27. Resumen de resultados Elementos piezoeléctricos Bender

Probeta N°	Medición N°	Contenido de Humedad %	Densidad Húmeda g/cm³	Densidad Seca g/cm³	Grado Saturación %	Longitud de probeta mm	Vs m/s	Vp m/s	Relación de Poisson μ	Módulo de Corte, G KPa	Módulo de Young, E KPa	Módulo Bulk, K KPa
13	1	22.08	2.005	1.642	99.13	140.16	230	624	0.42	106065	56039	118814
13	2	22.08	2.005	1.642	99.13	140.16	227	603	0.42	103316	52139	105258
13	3	22.08	2.005	1.642	99.13	140.16	228	607	0.42	104228	52865	107276
14	1	21.97	2.008	1.646	99.20	140.20	228	618	0.42	104384	55045	116456
14	2	21.97	2.008	1.646	99.20	140.20	230	601	0.41	106223	51544	100133
14	3	21.97	2.008	1.646	99.20	140.20	231	621	0.42	107149	55528	115257
15	1	22.11	2.004	1.641	99.03	140.11	225	611	0.42	101453	53704	114108
15	2	22.11	2.004	1.641	99.03	140.11	230	634	0.42	106012	57813	127158
15	3	22.11	2.004	1.641	99.03	140.11	227	613	0.42	103264	54031	113328
Promedio		22.05	2.01	1.64	99.12	140	228	615	0.42	104677	54301	113088
Desviación estándar		0.06	0.002	0.002	0.07	0.04	1.94	10.67	0.003	1828.31	2005.55	7990.72
Valores Mínimos		21.91	2.00	1.64	98.95	140.07	224.05	590.56	0.41	100544.9	49768.4	95028.6
Valores Máximo		22.20	2.01	1.65	99.29	140.24	232.84	638.77	0.43	108808.9	58833.4	131146.6

Elaborado por: Andrés Muñoz

Fuente: Ensayos de Laboratorio

7.5 CURVAS DEL MATERIAL ENSAYADO

Con los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, se define la nube de puntos, que se muestran en la Figura 79 y Figura 80.

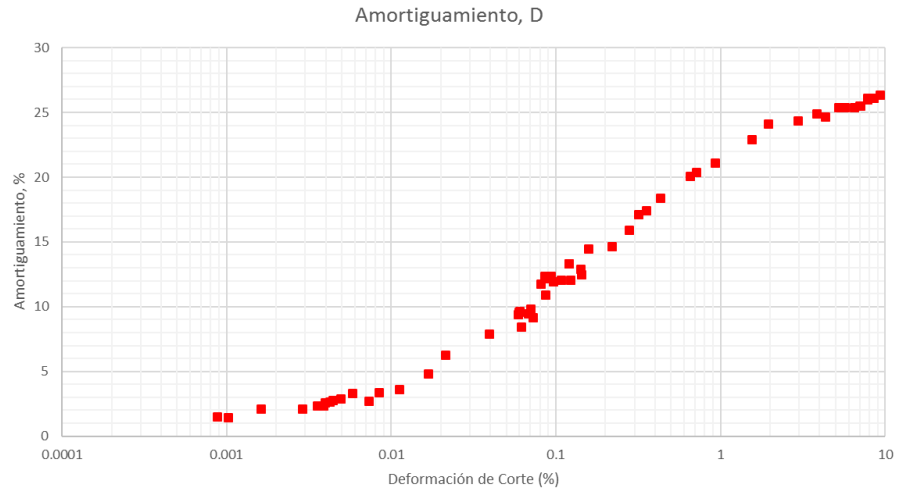


Figura 79. Cambio del amortiguamiento, D

Fuente: Ensayos de Laboratorio

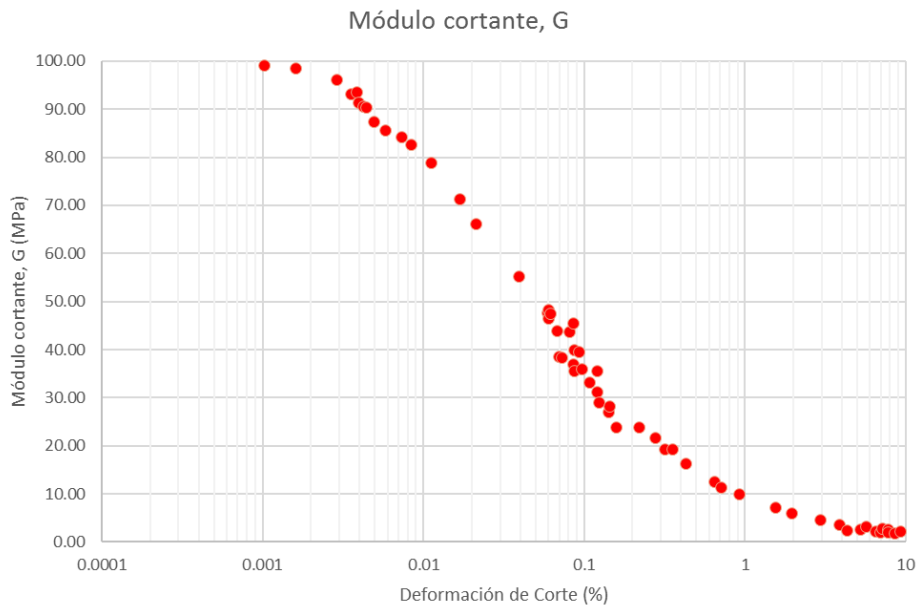


Figura 80. Cambios del módulo cortante, G

Fuente: Ensayos de Laboratorio

La siguiente curva de $G/G_{\text{máx}}$, se determinó utilizando los diferentes valores de $G_{\text{máx}}$ obtenidos en los ensayos con los elementos piezoeléctricos Bender; ver la Figura 81.

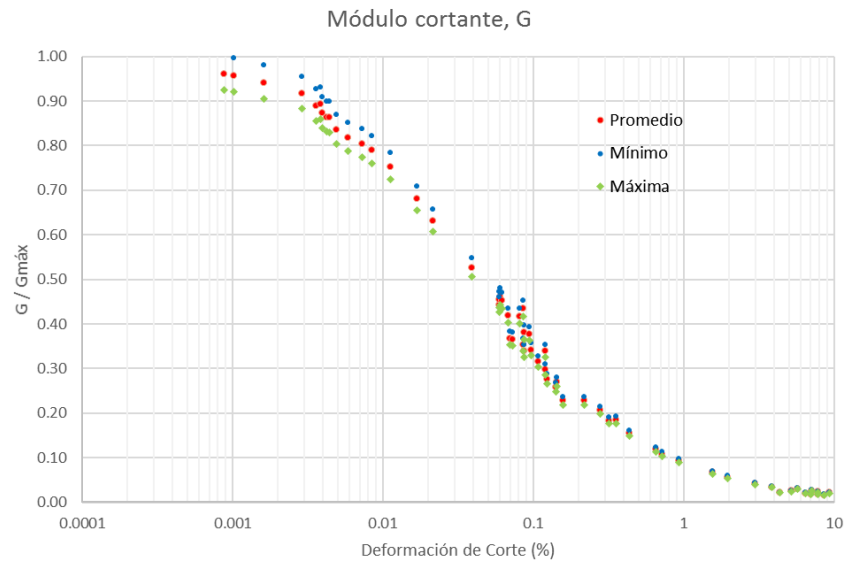


Figura 81. $G/G_{\text{máx}}$ vs Deformación de corte

Fuente: Ensayos de Laboratorio

7.5.1 COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS CON OTRAS INVESTIGACIONES

De los datos obtenidos en los ensayos en esta investigación, se realizó una comparación con diferentes curvas obtenidas en investigaciones realizadas sobre caolinita o aplicadas a suelos finos, para realizar una verificación de los datos obtenidos. Entre las curvas del comportamiento dinámico utilizadas para esta comparación se encuentran:

- Correlaciones empíricas de Seed e Idriss (1970)
- Modelo hiperbólico de Hardin y Drnevich (1972b)
- Vardanega and Bolton (2011)
- Vucetic and Dobry, 1991

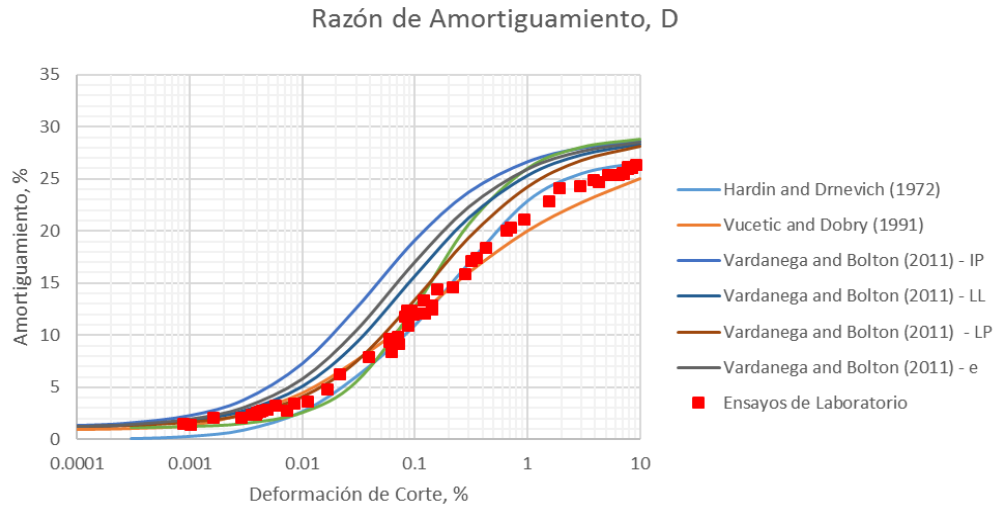


Figura 82. Amortiguamiento en comparación con varias curvas de investigaciones

Fuente: Ensayos de Laboratorio

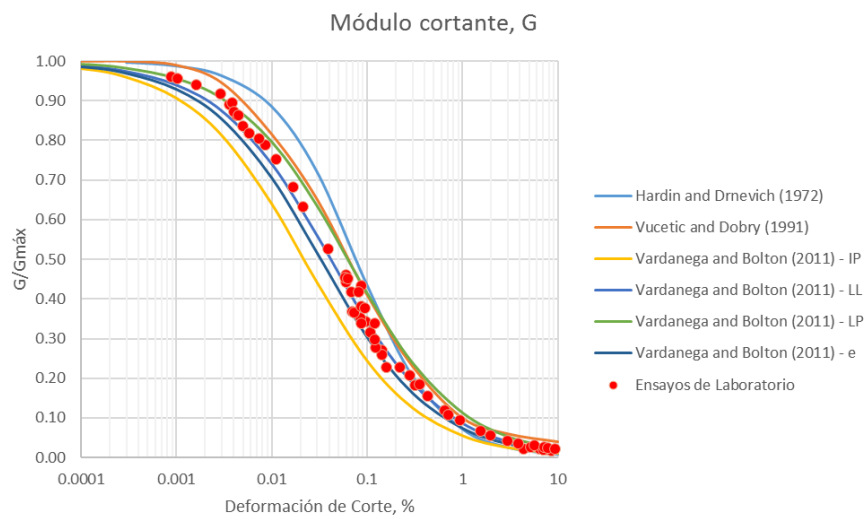


Figura 83. $G/G_{máx}$ en comparación con varias curvas de investigaciones

Fuente: Ensayos de Laboratorio

7.5.2 CURVA HIPERBÓLICA DE AJUSTE DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LOS DIFERENTES ENSAYOS

Con los datos obtenidos, se establece la ecuación en base del modelo hiperbólico propuesto por Stokoe, 1999.

$$\frac{G}{G_{m\acute{a}x}} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_{ref}}\right)^\alpha\right]} \quad \text{Ec. (104)}$$

En donde:

α = parámetro que define la curvatura de la hipérbola

γ_{ref} = deformación de referencia cuando $G/G_{m\acute{a}x} = 0.5$

La ecuación que define la curva hiperbólica que representa el comportamiento dinámico de $G/G_{m\acute{a}x}$ de la caolinita en las condiciones establecidas para esta investigación es:

$$\frac{G}{G_{m\acute{a}x}} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\gamma}{0.04692}\right)^{0.781}\right]} \quad \text{Ec. (105)}$$

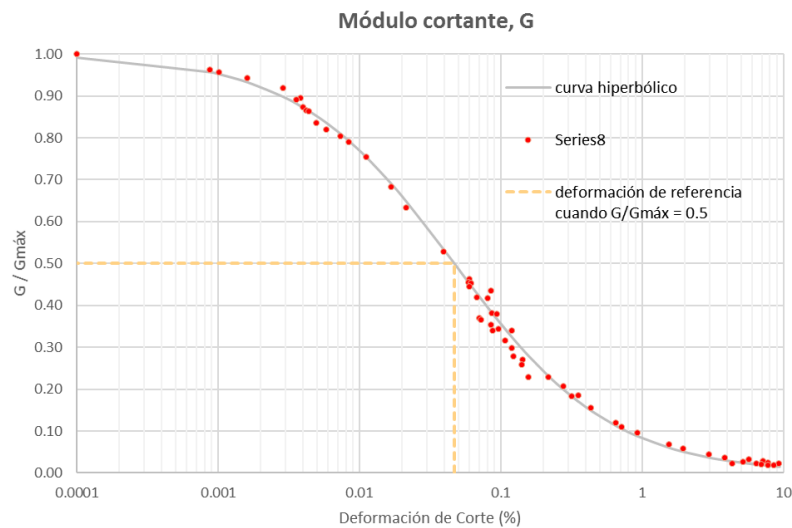


Figura 84. Curva hiperbólica $G/G_{m\acute{a}x}$

Fuente: Ensayos de Laboratorio

La ecuación que define la curva hiperbólica que representan el comportamiento dinámico del amortiguamiento de la caolinita en las condiciones establecidas para esta investigación es:

$$\frac{\lambda}{\lambda_{m\acute{a}x}} = \frac{\left(\frac{\gamma}{0.12927}\right)^{0.72327}}{\left[1 + \left(\frac{\gamma}{0.12927}\right)^{0.72327}\right]} \quad \text{Ec. (106)}$$

Donde:

λ = Amortiguamiento, %

γ = Deformación de corte, %

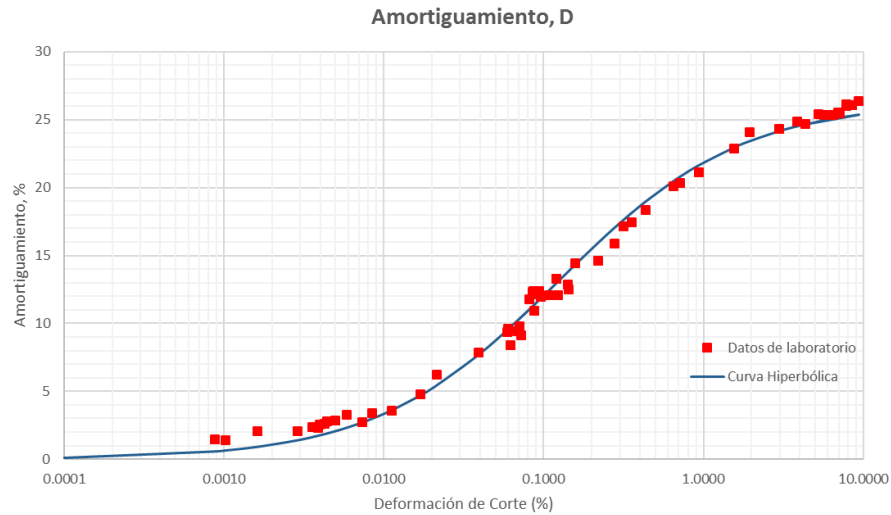


Figura 85. Curva hiperbólica Amortiguamiento

Fuente: Ensayos de Laboratorio

7.5.3 DEFINICIÓN DEL GRADO DE REPETIBILIDAD EN LOS ENSAYOS

Para definir la repetibilidad de los resultados, se estableció la siguiente metodología:

- Agrupar las probetas elaboradas de la siguiente manera:
Curva N° 1: Probetas 7,10,13
Curva N° 2: Probetas 8,11,14
Curva N° 3: Probetas 9,12,15
- Establecer el comportamiento de cada uno de estos grupos a través del modelo hiperbólico de ajuste de resultados.
- Definir las desviaciones estándar obtenidas en comparación de las tres curvas de ajuste de los modelos hiperbólicos.

7.5.3.1 Curvas N°1

La ecuación que define la curva hiperbólica N°1, que se observa en la figura 91. señala el comportamiento dinámico de $G/G_{m\acute{a}x}$ de la caolinita en las condiciones establecidas con las probetas 7,10,13:

$$\frac{G}{G_{m\acute{a}x}} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\gamma}{0.04549}\right)^{0.78353}\right]} \quad \text{Ec. (107)}$$

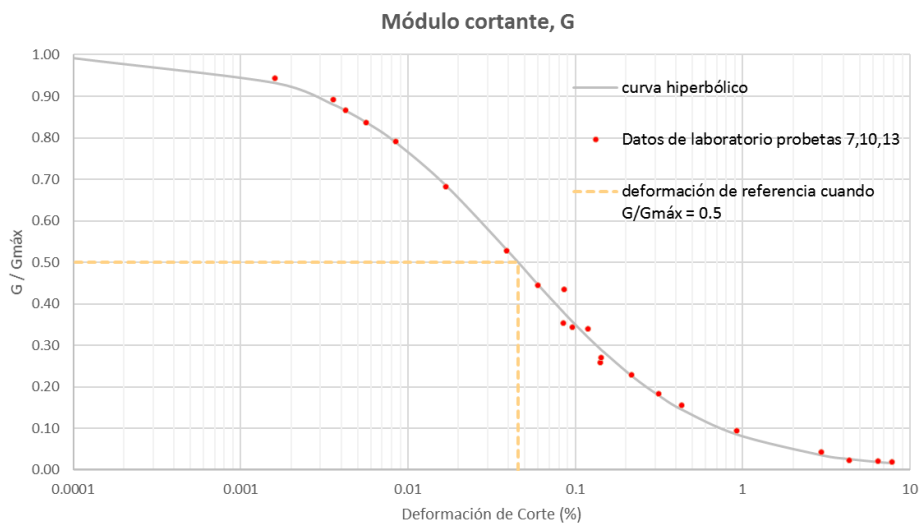


Figura 86. Curva N°1 hiperbólica $G/G_{m\acute{a}x}$

Fuente: Ensayos de Laboratorio

La ecuación que define la curva hiperbólica N°1, que se observa en la figura 91. Define el comportamiento dinámico del amortiguamiento de la caolinita en las condiciones establecidas con las probetas 7,10,13:

$$\frac{\lambda}{\lambda_{m\acute{a}x}} = \frac{\left(\frac{\gamma}{0.12208}\right)^{0.70975}}{\left[1 + \left(\frac{\gamma}{0.12208}\right)^{0.70975}\right]} \quad \text{Ec. (108)}$$

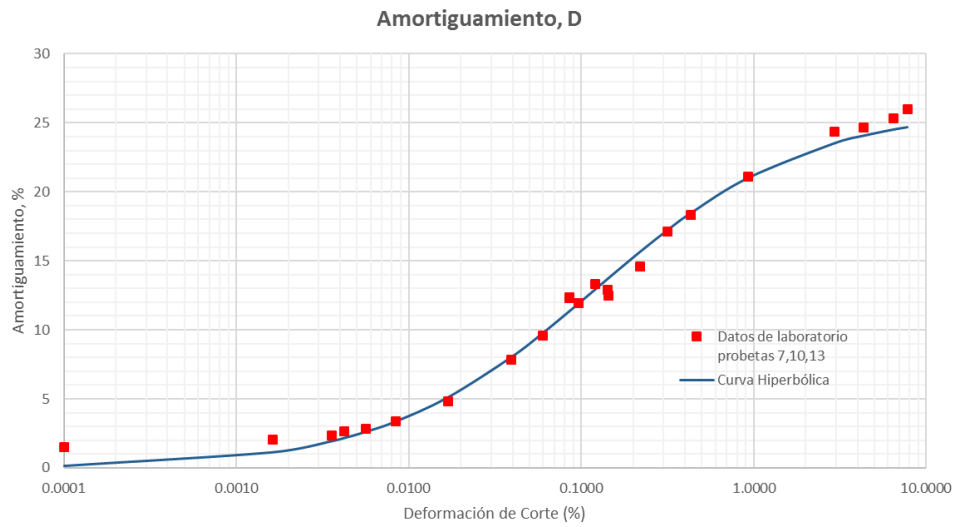


Figura 87. Curva hiperbólica N°1 de amortiguamiento

Fuente: Ensayos de Laboratorio

7.5.3.2 Curvas N°2

La ecuación que define la curva hiperbólica N°2, que se observa en la figura 91, señala el comportamiento dinámico de $G/G_{m\acute{a}x}$ de la caolinita en las condiciones establecidas con las probetas 8,11,14:

$$\frac{G}{G_{m\acute{a}x}} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\gamma}{0.04287}\right)^{0.77567}\right]} \quad \text{Ec. (109)}$$

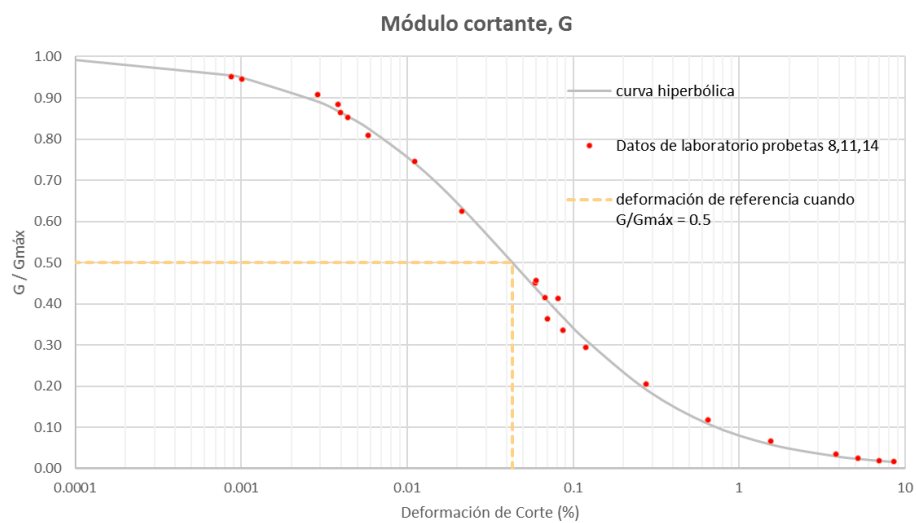


Figura 88. Curva N°2 hiperbólica $G/G_{m\acute{a}x}$

Fuente: Ensayos de Laboratorio

La ecuación que define la curva hiperbólica N°2, que se observa en la figura 91. Define el comportamiento dinámico del amortiguamiento de la caolinita en las condiciones establecidas con las probetas 8,11,14:

$$\frac{\lambda}{\lambda_{m\acute{a}x}} = \frac{\left(\frac{\gamma}{0.11962}\right)^{0.72305}}{\left[1 + \left(\frac{\gamma}{0.11962}\right)^{0.72305}\right]} \quad \text{Ec. (110)}$$

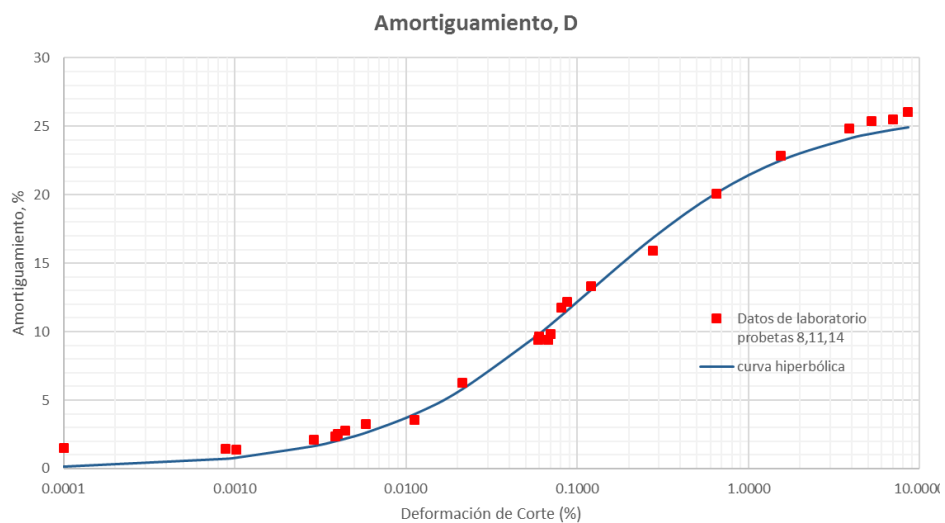


Figura 89. Curva hiperbólica N°2 de amortiguamiento

Fuente: Ensayos de Laboratorio

7.5.3.3 Curvas N°3

La ecuación que define la curva hiperbólica N°3, que se observa en la figura 91. define el comportamiento dinámico de $G/G_{m\acute{a}x}$ de la caolinita en las condiciones establecidas con las probetas 9,12,15:

$$\frac{G}{G_{m\acute{a}x}} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\gamma}{0.04250}\right)^{0.79615}\right]} \quad \text{Ec. (111)}$$

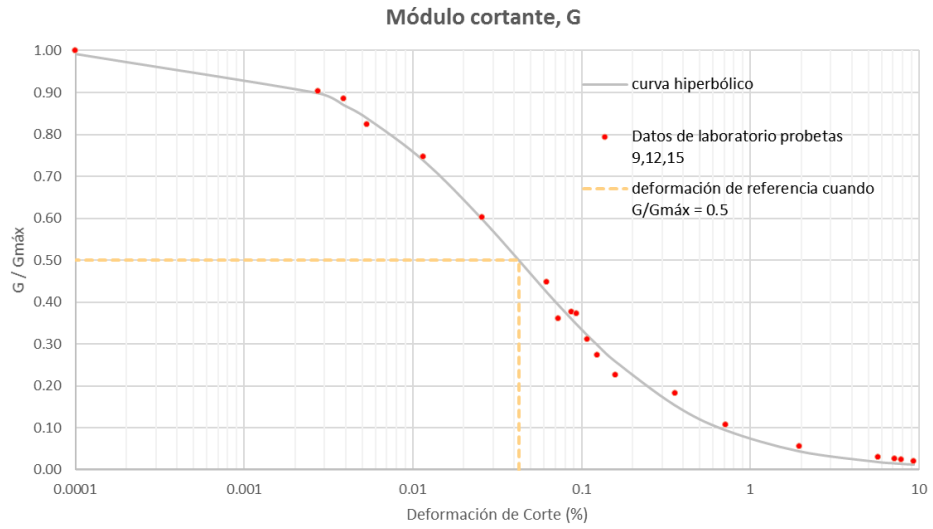


Figura 90. Curva N°3 hiperbólica $G/G_{máx}$

Fuente: Ensayos de Laboratorio

La ecuación que define la curva hiperbólica N°2, que se observa en la figura 91. Define el comportamiento dinámico del amortiguamiento de la caolinita en las condiciones establecidas con las probetas 9,12,15:

$$\frac{\lambda}{\lambda_{máx}} = \frac{\left(\frac{\gamma}{0.13298}\right)^{0.74294}}{\left[1 + \left(\frac{\gamma}{0.13298}\right)^{0.74294}\right]} \quad \text{Ec. (112)}$$

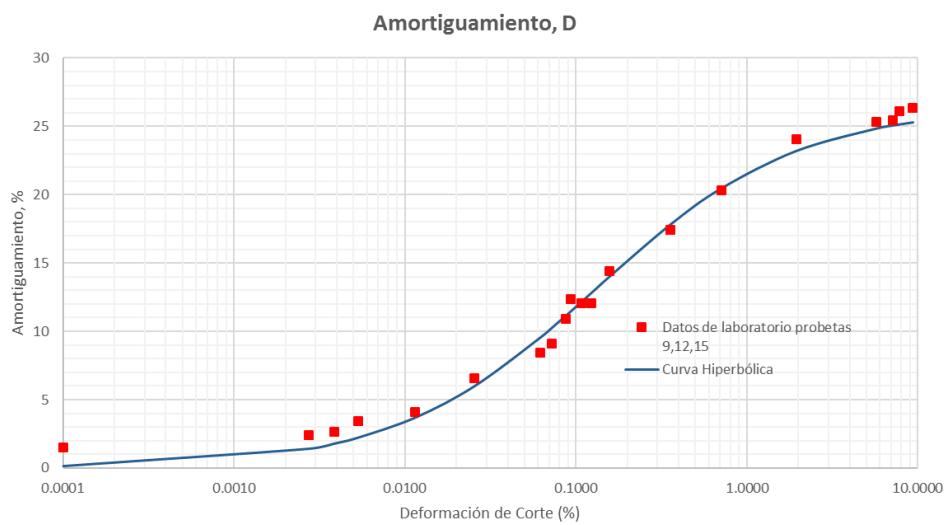


Figura 91. Curva N°3 hiperbólica de amortiguamiento

Fuente: Ensayos de Laboratorio

7.5.3.4 Comparaciones de las curvas teóricas

Para este análisis se establecieron valores definidos de deformación cortante que van de 0.001% a 10% y usando las ecuaciones de las curvas de ajuste de los modelos hiperbólicos se determina los valores correspondientes al módulo de corte y amortiguamiento, los resultados de este análisis se muestran a continuación.

Tabla 28. Resumen de resultados análisis de repetibilidad de los ensayos

Deformación cortante γ %	Curva N° 1		Curva N° 1		Curva N° 1		Desviación estándar	
	Módulo de Corte G MPa	Amortiguamiento, D %	Módulo de Corte G MPa	Amortiguamiento, D %	Módulo de Corte G MPa	Amortiguamiento, D %	Desviación estándar G	Desviación estándar D
0.0001	0.99	0.17	0.99	0.16	0.99	0.13	0.0005	0.0223
0.0002	0.99	0.27	0.98	0.26	0.99	0.21	0.0008	0.0340
0.0003	0.98	0.37	0.98	0.34	0.98	0.28	0.0010	0.0432
0.0004	0.98	0.45	0.97	0.42	0.98	0.35	0.0012	0.0511
0.0005	0.97	0.52	0.97	0.49	0.97	0.41	0.0014	0.0581
0.0006	0.97	0.59	0.96	0.56	0.97	0.47	0.0015	0.0645
0.0007	0.96	0.66	0.96	0.62	0.96	0.52	0.0016	0.0703
0.0008	0.96	0.72	0.96	0.69	0.96	0.58	0.0018	0.0758
0.0009	0.96	0.78	0.95	0.75	0.96	0.63	0.0019	0.0809
0.001	0.95	0.84	0.95	0.80	0.95	0.68	0.0020	0.0857
0.002	0.92	1.35	0.92	1.30	0.92	1.12	0.0028	0.1234
0.003	0.89	1.77	0.89	1.71	0.89	1.49	0.0034	0.1506
0.004	0.87	2.14	0.86	2.08	0.87	1.82	0.0038	0.1719
0.005	0.85	2.47	0.84	2.41	0.85	2.12	0.0042	0.1895
0.006	0.83	2.78	0.82	2.71	0.83	2.40	0.0045	0.2043
0.007	0.81	3.06	0.80	3.00	0.81	2.66	0.0047	0.2170
0.008	0.80	3.33	0.79	3.26	0.79	2.90	0.0049	0.2281
0.009	0.78	3.58	0.77	3.52	0.77	3.14	0.0051	0.2379
0.01	0.77	3.81	0.76	3.75	0.76	3.36	0.0053	0.2465
0.02	0.66	5.71	0.64	5.67	0.65	5.18	0.0064	0.2968
0.03	0.58	7.10	0.57	7.08	0.57	6.55	0.0069	0.3157
0.04	0.53	8.21	0.51	8.21	0.51	7.65	0.0072	0.3217
0.05	0.48	9.13	0.47	9.15	0.47	8.58	0.0073	0.3213
0.06	0.45	9.92	0.44	9.95	0.43	9.39	0.0074	0.3174
0.07	0.42	10.60	0.41	10.65	0.40	10.09	0.0074	0.3117
0.08	0.39	11.21	0.38	11.27	0.38	10.71	0.0074	0.3050
0.09	0.37	11.75	0.36	11.82	0.35	11.27	0.0073	0.2977
0.1	0.35	12.24	0.34	12.32	0.34	11.78	0.0073	0.2903
0.2	0.24	15.45	0.23	15.59	0.23	15.15	0.0065	0.2243
0.3	0.19	17.24	0.18	17.39	0.17	17.03	0.0058	0.1805
0.4	0.15	18.41	0.15	18.58	0.14	18.28	0.0052	0.1516
0.5	0.13	19.26	0.13	19.43	0.12	19.17	0.0048	0.1318
0.6	0.12	19.91	0.11	20.08	0.11	19.86	0.0044	0.1178
0.7	0.11	20.43	0.10	20.60	0.10	20.40	0.0041	0.1076
0.8	0.10	20.85	0.09	21.02	0.09	20.84	0.0039	0.1000
0.9	0.09	21.20	0.09	21.37	0.08	21.22	0.0037	0.0942
1	0.08	21.51	0.08	21.67	0.07	21.53	0.0035	0.0897
2	0.05	23.16	0.05	23.30	0.04	23.24	0.0024	0.0714
3	0.04	23.88	0.04	24.00	0.03	23.97	0.0019	0.0650
4	0.03	24.30	0.03	24.41	0.03	24.39	0.0016	0.0607
5	0.02	24.58	0.02	24.68	0.02	24.67	0.0014	0.0573
6	0.02	24.78	0.02	24.87	0.02	24.87	0.0013	0.0545
7	0.02	24.93	0.02	25.02	0.02	25.02	0.0012	0.0520
8	0.02	25.05	0.02	25.14	0.02	25.14	0.0011	0.0499
9	0.02	25.15	0.02	25.23	0.01	25.24	0.0010	0.0480
10	0.01	25.23	0.01	25.31	0.01	25.32	0.0009	0.0463
PROMEDIO							0.0037	0.1486
VALOR MÁXIMO							0.0074	0.3217
VALOR MÍNIMO							0.0005	0.0340

Elaborado por: Andrés Muñoz

Fuente Datos de Laboratorio

Las curvas correspondientes a los datos mostrados en la Tabla 26, se encuentra en las siguientes gráficas, donde se puede ver que la repetibilidad de los ensayos establece una diferencia entre las curvas que visualmente no definen una variación importante de los resultados para los distintos grupos de probetas de caolinita, que se usó para esta determinación.

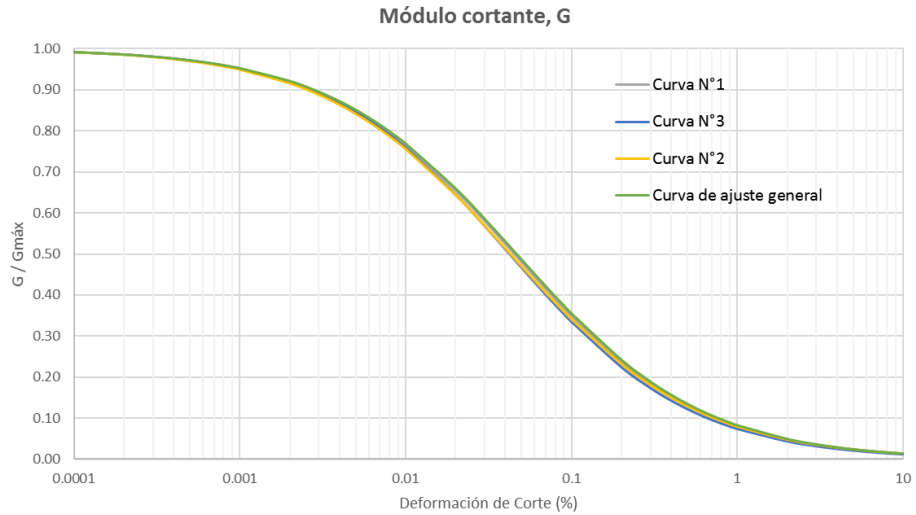


Figura 92. Comparación de curvas hiperbólicas $G/G_{m\acute{a}x}$
Fuente: Ensayos de Laboratorio

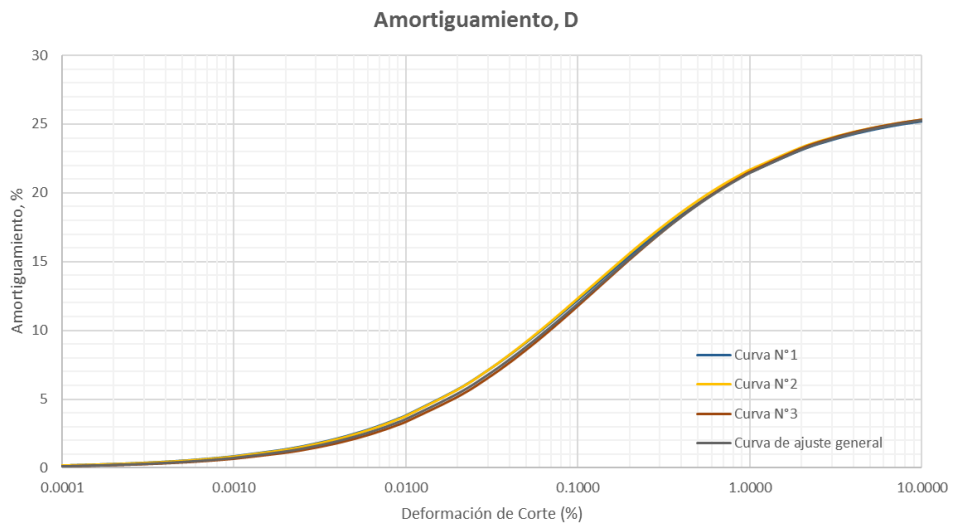
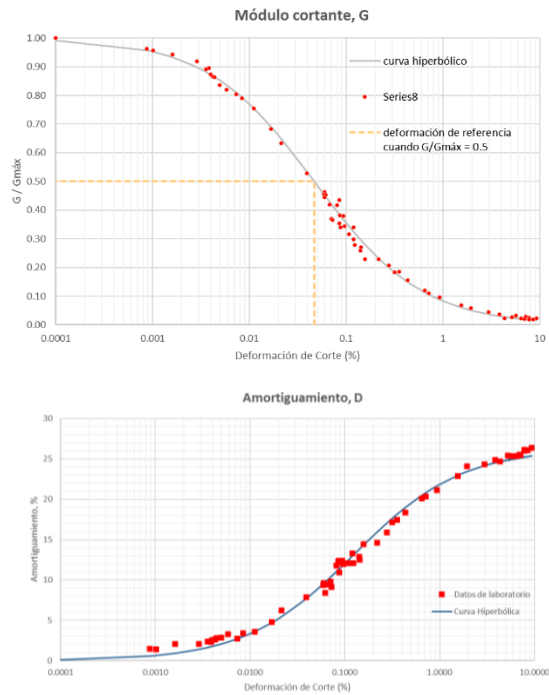


Figura 93. Comparación de curvas hiperbólicas de amortiguamiento
Fuente: Ensayos de Laboratorio

CONCLUSIONES

1. Los resultados de los ensayos realizados en laboratorio para las probetas conformadas por compactación estática de caolinita utilizada para esta investigación, se muestran a continuación:



2. A partir de los datos experimentales obtenidos en laboratorio y con la utilización de un modelo hiperbólico que permite obtener estimaciones de las propiedades dinámicas de la caolinita utilizada en esta investigación. Se presenta a continuación las ecuaciones que caracterizan el comportamiento dinámico del material, bajo las condiciones definidas para esta investigación.

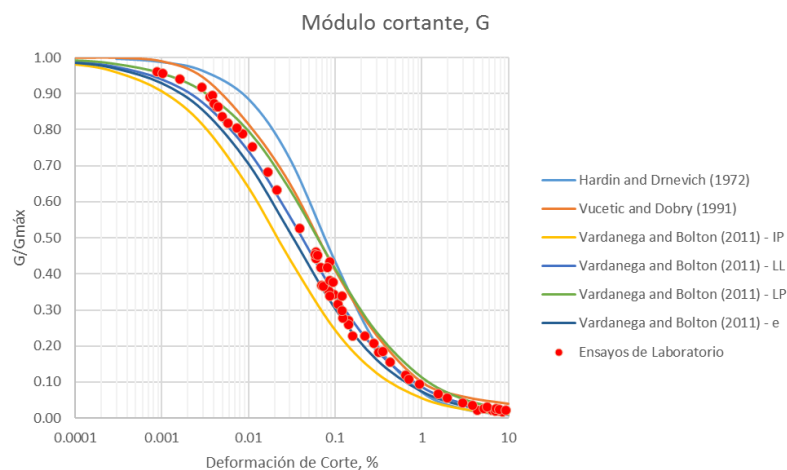
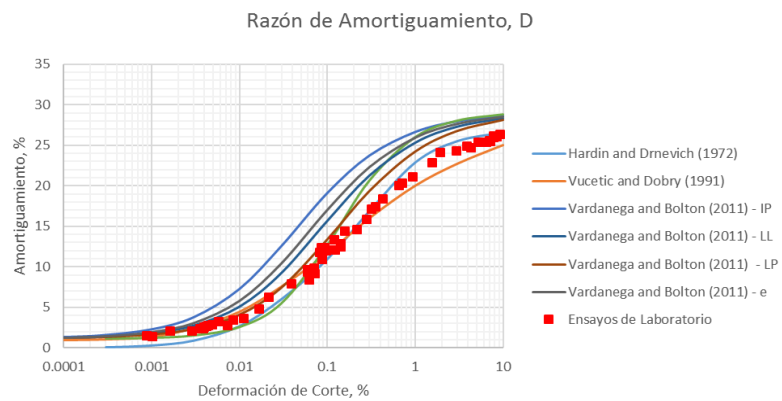
$$\frac{G}{G_{m\acute{a}x}} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\gamma}{0.04692}\right)^{0.781}\right]}$$

$$\frac{\lambda}{\lambda_{m\acute{a}x}} = \frac{\left(\frac{\gamma}{0.12927}\right)^{0.72327}}{\left[1 + \left(\frac{\gamma}{0.12927}\right)^{0.72327}\right]}$$

3. El rango de deformación cortante de la caolinita medida en esta investigación está en un rango 10^{-4} a 10^1 %, con los ensayos de columna utilizando un acelerómetro como medidor de deformaciones y ensayos triaxiales cíclicos método de carga controlada utilizando un LVDT para medir las deformaciones.
4. La elaboración del presente manual de laboratorio para la determinación de parámetros dinámicos en suelos, con el uso de los equipos: triaxial cíclico, columna resonante y de elementos piezoeléctricos Bender; proporciona información de la capacidad del laboratorio de materiales de construcción para ejecución estos ensayos y su aplicabilidad a la dinámica de suelos.
5. Se estableció los conceptos más importantes en dinámica de suelos, que intervienen en la ejecución, procesamiento y análisis de los resultados de los ensayos ejecutados, que se describe en los capítulos iniciales de este trabajo.
6. Los parámetros dinámicos del suelo, tales como: el módulo de corte, la relación de amortiguamiento y la deformación de corte representan una parte fundamental del comportamiento del suelo, estas propiedades determinadas por el ensayo de columna resonante forman parte de un gran conjunto de elementos que al relacionarse y convertirse en funciones llegan a generar información valiosa en el campo de la ingeniería geotécnica sísmica.
7. Muestras de caolinitas similares a la seleccionada como material para la realización de esta investigación han sido estudiadas en numerosas investigaciones, debido a sus propiedades con poca variabilidad en sus propiedades físicas y su reproducibilidad al momento de la elaboración de probetas para ejecución de ensayos de resistencia al corte en condiciones estáticas o dinámicas.
8. La reproducibilidad de las probetas, se debido al cuidado en el acondicionamiento de las muestras, así como de la metodología utilizada para la obtención de probetas similares, presentó variaciones menores al 1% en los valores de densidad seca y diferencias menores al 0.5% en el contenido de humedad promedio de las mismas; cumpliendo un rango de saturación mayor al 99%.

9. La repetibilidad de los resultados de los ensayos está dada sobre un análisis de tres curvas obtenidas a partir de tres diferentes grupos de datos obtenidos en laboratorio y ajustadas a un modelo hiperbólico, en donde se establece una desviación estándar máxima para la definición de la curva hiperbólica de módulo de corte $G/G_{\text{máx}}$ de 0.0074 y un valor de 0.3217 para la curva de hiperbólica de amortiguamiento D . Estos valores tienen una influencia mínima en la modificación del comportamiento dinámico por lo que se confirma su validez de la metodología empleada.

10. Se comprobó los datos obtenidos con una franja comparable de diferentes investigaciones internacionales que mantienen similares características del material, en donde se observa que los resultados se ajustan a los reportados internacionalmente.



RECOMENDACIONES

1. En medida de la complejidad de estos ensayos, se recomienda tener un check list del procedimiento ensayado para no cometer errores y controlar las variables inherentes del ensayo.
2. Para garantizar los resultados obtenidos, es necesario contar con condiciones óptimas de seguridad de los equipos ante variaciones de voltaje que creen ruido eléctrico, campos electromagnéticos en recepción de la señal de los transductores.
3. En la ejecución de los ensayos de triaxial cíclico se debe considerar las deformaciones producidas sobre la probeta en cada etapa desde la consolidación a los incrementos de los esfuerzos desviadores aplicados, para determinar con exactitud los porcentajes de deformación axial; por lo tanto, los de deformación cortante.
4. Para lograr una óptima realización de ensayos se debe colocar en cero cada transductor antes de iniciar los ensayos, como en la verificación de la conexión de los equipos y transductores.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado, A. (2012). *Nèotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur*. Français: Université de Grenoble.
- ASTM International. (s.f.). ASTM D3999/D3999M – 11. Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus.
- Benz, T. (2007). *Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences*. Germany: Universitat Stuttgart.
- Bradshaw and Baxter. (s.f.). Sample preparation of Silts for Liquefaction Testing. *Geotechnical Testing Journal*.
- Bradshaw and Baxter. (s.f.). Sample Preparation of Silts for Liquefaction Testing. *Geotechnical Testing Journal*.
- Bradshaw, A. S., & Baxter, C. D. (2007). Sample Preparation of Silts for Liquefaction Testing. *Geotechnical Testing Journal*.
- Braja M. Das, G. R. (2011). *Principles of Soil Dynamics*. Stamford: Cengage Learning.
- Camacho Tauta, J. F. (2011). Evaluation of the small-strain stiffness of soil by non-conventional dynamic testing methods. Nueva Granada.
- D. A., & N. H. (2011). Static Laboratory Compaction Method. *EJGE*, 1583 - 1593.
- Das, B. M. (2010). *Principles of Geotechnical Engineering*. Stamford: Cengage Learning.
- Diario El Telégrafo. (2017). www.eltelegrafo.com.ec. Obtenido de <http://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/ecuador/3/comite-rindio-cuentas-sobre-reconstruccion-tras-terremoto>
- Dong-Soo Kim, K. H. (1991). *DEFORMATIONAL CHARACTERISTICS OF SOILS AT SMALL TO INTERMEDIATE STRAINS FROM CYCLIC TESTS*. Texas: U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.
- Geotechnical Consulting & Testing Systems. (s.f.). *User's Guide and Reference Resonant Column & Torsional Shear Test*. Tempe, Arizona.
- Instituto Geofísico - EPN. (2017). www.igepon.edu.ec. Obtenido de <http://www.igepon.edu.ec/mapas/mapa-ec20160416.html>
- Instruments, G. (2013). *BENDER ELEMENT TEST ANALYSIS SOFTWARE DEVELOPMENT FOR LABORATORIES*. En G. Instruments.

- Katagiri and Imai, M. G. (1994, June). A new in-laboratory method to make homogeneous clayey samples and their mechanical properties. *Soils and foundations*, 87-93.
- Lade, P. V. (2016). *Triaxial Testing of Soils*. Oxford: Wiley Blackwell.
- Leong, E. C., Yeo, S. H., & Rahardjo, H. (s.f.). Measuring Shear Wave Velocity Using Bender Elements. *Geotechnical Testing Journal*, vol. 28.
- Luna, R., & Jadi, H. (2000). Determination of Dynamic Soil Properties Using Geophysical Methods. International Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and. St. Louis.
- Mitchell and Soga. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*,. JohnWiley & Sons.
- NEC-SE-DS. (2014). PELIGRO SÍSMICO DISEÑO SISMO RESISTENTE.
- Nikolaou, S., Vera, X., & Gilsanz, R. (2016). GEER-ATC EARTHQUAKE RECONNAISSANCE. Muisne.
- Ortiz, A. F. (Mayo de 2014). Análisis Geotécnico de Respuesta Dinámica. Mèxico D.F, Mèxico.
- Rajasekaran, S. (2009). *Structural dynamics of earthquake engineering*. Florida: CRC Press.
- Selva, R. C. (1983). *Dinámica de Suelos y Estructuras*. México: Limusa.
- Sze, H. Y., & Yang, J. (2014). Failure Modes of Sand in Undrained Cyclic Loading: Impact of Sample Preparation. *JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING ASCE*, 152-169.
- Taípe, L. (2013). Análisis de las ecuaciones de predicción de movimientos de suelo para el Ecuador, utilizando datos registrados durante el periodo 2000-2011 en estaciones sísmicas de banda ancha y acelerógrafos. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Toulkeridis, T. (2013). *Volcanes activos Ecuador*. Ecuador: Santa Rita.
- Valle-Molina, C. (mayo de 2006). Measurements of Vp and VS in Dry, Unsaturated and Saturated Sand Specimens with Piezoelectric Transducers. Dissertation. Texas.
- Venkatramaiah, C. (2006). *Geotechnical Engineering*. New Delhi: New Age International (P) Limited.
- Vera, X., Quinde, P., Suárez, M., & Mera, W. (2016). Propuesta de actualización de la NEC-15 para el peligro sísmico probabilista en roca en el Ecuador. Guayaquil: UCSG.

ANEXO 1. Norma ASTM D5311/D5311M – 13

Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil¹

Método de ensayo estandarizado para la determinación de la resistencia triaxial del suelo con carga cíclica controlada

1. Alcance

1.1. Este método de ensayo cubre la determinación de la resistencia cíclica (a veces llamado el potencial de licuefacción) de suelos saturados, mediante el ensayo triaxial cíclico de carga controlada, en muestras inalteradas o reconstituidas.

1.2. La resistencia cíclica de un suelo se evalúa en relación a un número de factores como el desarrollo de la deformación axial, la magnitud del esfuerzo cíclico aplicado, el número de esfuerzos ciclos aplicados, el desarrollo del exceso de la presión de poros, y los estados de esfuerzos efectivos. Una revisión exhaustiva de los factores que afectan a los resultados de los ensayos triaxiales cíclicos está descrita en la bibliografía **(1)**².

1.3. El ensayo de resistencia triaxial cíclica se lleva a cabo en condiciones no drenadas, para simular las condiciones de campo durante un terremoto u otra carga cíclica.

1.4. Los ensayos de resistencia triaxial cíclico son destructivos. La falla puede ser definida en base de un número de esfuerzos ciclos requeridos para alcanzar una deformación definida o llegar una relación de presión de poros del 100%. Ver la Terminología en la sección 3.

1.5. Este método de ensayo es generalmente aplicado en suelos no cohesivos de alta permeabilidad. Al ensayar suelos bien graduados, limos o arcillas, la presión de poros medidas en los extremos de la probeta no suelen representar los valores de la presión de poro en toda la probeta. Sin embargo, este método de ensayo puede ser utilizado en la mayoría de tipos de suelo, teniendo cuidado en el momento del ensayo y cuando se evalúan los resultados de los ensayos.

1.6. Todos los valores observados y calculados se ajustarán según lo establecido en la Norma D6026: Guía para los dígitos significativos y redondeo. Los procedimientos de la

¹ Este método de ensayo está bajo la jurisdicción del Comité D18 de ASTM sobre el suelo y la roca y es responsabilidad directa del Subcomité D18.09 sobre Propiedades cíclicas y dinámicas de los suelos. Edición actual aprobada el 1 de noviembre de 2013. Publicado en diciembre de 2013. aprobado originalmente en 1992. Última edición anterior, aprobado en 2011 como D5311-11. DOI: 10.1520/D5311_D5311M-13.

² Los números en negrita entre paréntesis se refieren a una lista de referencias al final de esta norma.

Norma D6026 se utilizan para especificar cómo se recogen los datos, registrarlos, calculados y son considerados como el estándar de la industria. Además, ellos son representativos de los dígitos significativos que deben ser retenidos en general. Los procedimientos no consideran la variación del material, el propósito de la obtención de los datos, estudios de propósito especial, o cualquier consideración de los objetivos del usuario. El aumento o la reducción de las cifras significativas de los datos reportados sean acordes con estas consideraciones es una práctica común. El examen de las cifras significativas que se utilizará en los métodos de análisis para el diseño de ingeniería está más allá del alcance de esta norma.

1.6.1. El método utilizado para especificar cómo se recogen los datos, calculados o registrados en esta norma no está directamente relacionada con la exactitud de los datos que se pueden aplicar en el diseño u otros usos, o ambas cosas. El uso de los resultados obtenidos con esta norma está más allá de su alcance.

1.7. Los valores indicados en unidades SI o en unidades pulgada-libra [presentados entre corchetes] han de ser considerados como los estándares. Los valores indicados en cada sistema pueden no son exactamente equivalentes; por lo tanto, cada sistema debe ser utilizado independientemente del otro. La combinación de valores de los dos sistemas puede resultar en una no conformidad con la norma. El reporte de los resultados del ensayo en unidades distintas del SI no se considerará como una no conformidad con este método de ensayo.

1.8. Esta norma no pretende considerar todos los problemas de seguridad, si los hay, asociados con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma establecer las prácticas de seguridad y salud y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reglamentarias antes de su uso.

2. Documentos de Referencia

2.1. Normas ASTM:¹

D 422 Método de ensayo para el análisis del tamaño de las partículas de suelos.

D 653 Terminología relacionada a suelos, rocas y fluido contenido en ellos.

D 854 Método de ensayo para la gravedad específica de sólidos de suelo por el picnómetro y agua.

¹ Para las normas ASTM citadas, visite el sitio web de ASTM, www.astm.org, o el contacto de cliente en ASTM_service@astm.org. Para Annual Book of ASTM información Standardsvolume, consulte la página Resumen de documentos de la serie en el sitio web de ASTM.

D1587 Práctica para el muestreo de suelos en tubos de pared delgada para propósitos de geotecnia.

D2216 Método de ensayo para la determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) en suelos y rocas por masa.

D2850 Método de ensayo de compresión triaxial en suelos cohesivos no consolidado-no drenado.

D3740 Práctica de los requisitos mínimos para organismos encargados de pruebas y/o inspección de suelos y roca que se utiliza en diseño de ingeniería y construcción

D4220 Práctica para la preservación, muestreo y transporte de suelos.

D4253 Método de ensayo para la determinación del índice de densidad máximo y peso unitario de suelos usando mesa vibratoria.

D4254 Método de ensayo para la determinación del índice de densidad mínimo, peso unitario de suelos y cálculo de la densidad relativa.

D4767 Método de ensayo de compresión triaxial consolidado-no drenado para suelos cohesivos.

D4318 Métodos de ensayo para el límite líquido, límite plástico, y el índice de plasticidad de los suelos.

D6026 Práctica para el uso de dígitos significativos en los datos geotécnicos.

3. Terminología

3.1. Definiciones:

3.1.1. Definiciones de los términos utilizados en este método de ensayo (incluyendo la licuefacción) están de acuerdo con la terminología D653.

3.2. Definiciones de los términos específicos para esta Norma:

3.2.1. *Relación total o 100% de la presión de poros.* - una condición en la cual Δu es igual a σ'_{3c} .

3.2.2. *Relación de la presión de poro pico.* - La máxima relación de la presión de poros medido durante una secuencia de carga particular.

3.2.3. *Deformación pico (simple amplitud).* - La máxima deformación axial (desde el origen o la etapa inicial), ya sea en la compresión o extensión producido durante una secuencia de carga particular.

3.2.4. *Deformación pico a pico (doble amplitud)*. - La diferencia entre la máxima deformación axial en compresión y extensión producida durante un ciclo dado en condiciones de carga cíclica.

3.2.5. *Relación de la presión de poros*. – La relación, expresada como un porcentaje, del cambio del exceso de la presión de poros, Δu , al menor esfuerzo principal efectivo, σ'_{3c} , al final de la consolidación primaria.

3.2.6. *Relación del esfuerzo cíclico*. – La relación del esfuerzo desviador aplicado a la presión de confinamiento efectiva (la incorporación de los cambios en el exceso de presión de poros) durante la carga cíclica.

4. Resumen del Método de Ensayo

4.1. Una probeta cilíndrica de suelo, sellada con una membrana de goma hermética al agua y confinada en una cámara triaxial donde se somete a una presión de confinamiento. Una carga axial es aplicada a la parte superior de la muestra por una varilla de carga.

4.2. Las probetas se consolidan isotrópicamente (igual esfuerzo axial y radial). Conexiones de tubería en la parte superior e inferior de los cabezales de las probetas permiten el flujo de agua durante la saturación, la consolidación y la medición de la presión de poros durante la carga cíclica.

4.3. Después de la saturación y de la consolidación, la probeta se somete a una carga axial que varía sinusoidalmente por medio de la barra de carga conectada al cabezal superior de la probeta. Se controla con respecto al tiempo la carga cíclica, la deformación axial y la presión de poros desarrollados en la probeta.

4.4. El ensayo se realiza en condiciones no drenadas para aproximarse a las condiciones del campo esencialmente sin drenar durante el terremoto u otra carga dinámica. La carga cíclica generalmente provoca un aumento en la presión de poros en la probeta, lo que resulta en una disminución del esfuerzo efectivo y en un aumento en la deformación axial cíclica de la probeta.

4.5. La falla se puede definir cuando el pico del exceso de la presión de poros es igual a la presión efectiva de confinamiento inicial, el total o el 100% de la relación de la presión de poros (a veces llamado licuefacción inicial), o en términos de una deformación cíclica definida o una deformación permanente.

5. Significado y uso

5.1. Los resultados de ensayos de resistencia triaxial cíclica se utilizan para evaluar la capacidad de un suelo de resistir los esfuerzos de corte inducidos debido a un terremoto u otra carga cíclica en una masa de suelo.

5.1.1. Para proporcionar los datos necesarios para la estimación de la estabilidad cíclica de un suelo, los ensayos de resistencia triaxial cíclica se pueden realizar con diferentes valores de presión de confinamiento efectivo en probetas consolidadas isotrópicamente.

5.1.2. Los ensayos de resistencia triaxial cíclica se pueden realizar con una presión de confinamiento efectivo, generalmente igual a 100 KN/m^2 [$14,5 \text{ lb/pulg}^2$], o presiones alternativas según sea apropiado en probetas isotrópicamente consolidadas para comparar los resultados de la resistencia cíclica para un tipo de suelo particular con la de otros suelos, Referencia (2).

5.2. El ensayo triaxial cíclico es una técnica utilizada comúnmente para la determinación de la resistencia cíclica del suelo.

5.3. La resistencia cíclica depende de muchos factores que incluye la densidad, la presión de confinamiento, la aplicación del esfuerzo de corte cíclico, la historia de los esfuerzos, la estructura del grano, la edad del depósito de suelo, el procedimiento de preparación de la probeta, la frecuencia, uniformidad y forma de la onda cíclica. Por lo tanto, se debe prestar mucha atención a los detalles y en el equipo de ensayo.

5.4. Existen ciertas limitaciones inherentes al uso de los ensayos triaxiales cíclicos para simular las condiciones de esfuerzo y deformación de un elemento de suelo en el campo durante un terremoto.

5.4.1. Las condiciones de esfuerzos no uniformes dentro de la probeta de ensayo se imponen por los cabezales a los extremos de la probeta. Esto puede causar una redistribución de la relación de vacíos dentro de la probeta durante el ensayo.

5.4.2. Un cambio de 90° en la dirección del esfuerzo mayor principal ocurre durante las dos mitades del ciclo de carga en probetas isotrópicamente consolidadas.

5.4.3. El esfuerzo de corte cíclico máximo que puede ser aplicado a la muestra se controla por las condiciones de esfuerzos al final de la consolidación y por las presiones de poros generadas durante el ensayo. Para una contracción en consolidación isotrópica (volumen decreciente) ensayado a compresión cíclica, el máximo esfuerzo de corte cíclico que puede ser aplicado a la probeta es igual a la media de la presión axial total inicial. Como los suelos no cohesivos son incapaces de tomar tensión, los esfuerzos cortantes cíclicos mayores que este valor tiende a levantar el cabezal superior de la probeta de suelo. Además, la presión de

poros aumenta durante los ensayos realizados en probetas consolidadas isotrópicamente, se reduce la presión de confinamiento efectivo, lo que contribuye a la tendencia de la probeta a comprimirse durante la porción del ciclo de carga de extensión, invalidando los resultados de ensayo más allá de ese punto.

5.4.4. Si bien se recomienda que se obtengan en lo posible las mejores probetas inalteradas para los ensayos de resistencia cíclica, a veces es necesario reconstituir las probetas de suelo. Se ha demostrado que los diferentes métodos de reconstitución de probetas a la misma densidad, pueden dar lugar a diferencias significativas de la resistencia cíclica. Además, las probetas inalteradas casi siempre serán más fuertes que las probetas reconstituidas.

5.4.5. La interacción entre la probeta, la membrana, y el fluido de confinamiento tiene una influencia en el comportamiento cíclico. Los efectos del cumplimiento de la membrana no se pueden explicar fácilmente por el procedimiento de ensayo o en la interpretación de los resultados de los ensayos. Los cambios en la presión de poros pueden causar cambios en la penetración de la membrana en muestras de suelos no cohesivos. Estos cambios pueden influir significativamente en los resultados del ensayo.

5.4.6. La presión promedio de confinamiento total es asimétrica durante la aplicación esfuerzo de compresión y extensión cuando la presión de la cámara es constante. Esto es totalmente diferente desde el esfuerzo simétrico en el caso de corte simple del nivel de licuefacción del suelo.

NOTA 1. La calidad de los resultados producidos por esta norma depende de la competencia del personal que lo realiza, de la idoneidad de los equipos y de las instalaciones utilizadas. Los organismos que cumplan los criterios de la Norma D3740 generalmente se consideran capaces con competencia y objetividad de ensayar / muestrear / inspeccionar / etc. Los usuarios de esta norma se advierten que el cumplimiento de la Norma D3740 en sí mismo no aseguran resultados fiables. Los resultados confiables dependen de muchos factores; la norma D3740 proporciona un medio de evaluar algunos de estos factores.

6. Equipos

6.1. En muchos aspectos, el equipo adecuado para los ensayos de resistencia triaxial cíclica es similar al equipo utilizado para los ensayos de compresión triaxial no consolidada - no drenada (ver Método de Ensayo D2850) y la del ensayo de compresión triaxial consolidada - no drenada (ver Método de Ensayo D4767). Sin embargo, hay características

especiales que se describen en las siguientes subsecciones que se requieren para llevar a cabo ensayos triaxiales cíclicos. Una representación esquemática aceptable de la configuración típica del ensayo de resistencia triaxial cíclica de carga controlada se muestra en la Fig. 1.

6.2. *Cámara de compresión triaxial.* - Las principales consideraciones en la selección de la cámara son las tolerancias para el pistón, tapa superior, y el sello del pistón de baja fricción.

6.2.1. Dos rodamientos lineales de bolas (bushing) o similares se utilizarán para orientar la barra de carga para minimizar la fricción y mantener la alineación.

6.2.2. El diámetro de la varilla de carga deberá ser lo suficientemente grande para minimizar la flexión lateral. En muchos laboratorios ha sido utilizado con éxito un diámetro mínimo de la varilla de carga de 1/6 del diámetro de la probeta.

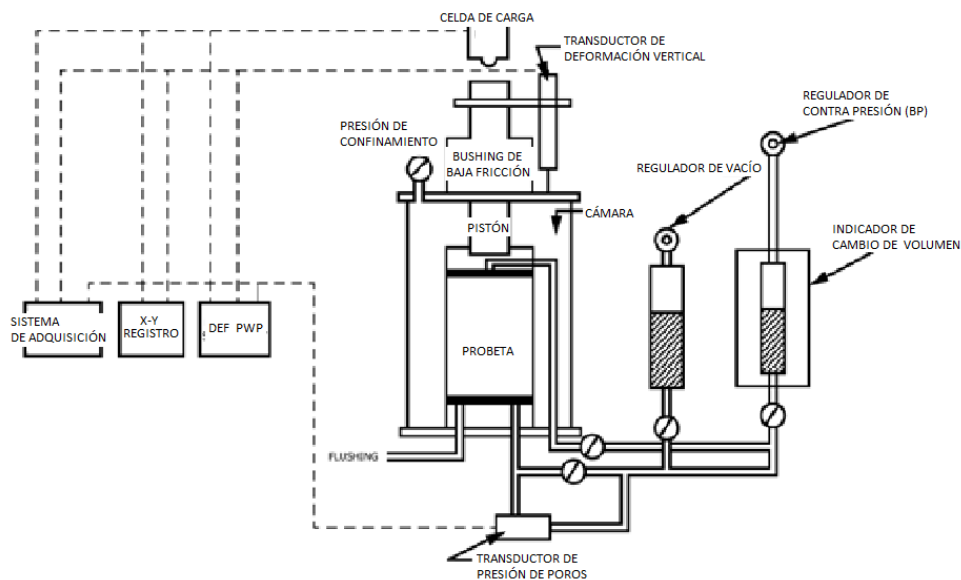


Figura 1. Representación esquemática del equipo del ensayo de resistencia triaxial de carga cíclica controlada

6.2.3. El sello de la varilla de carga es un elemento crítico en el diseño de la cámara triaxial para los ensayos cíclicos en suelos. El sello debe ejercer una fricción insignificante en la barra de carga. La máxima fricción aceptable y tolerable del pistón sin aplicar correcciones de carga se considera comúnmente que el $\pm 2\%$ de la carga cíclica máxima de simple amplitud aplicada en el ensayo. El uso de un bushing de aire tal como se propone en la referencia (3) cumple o exceden estos requisitos.

6.2.4. Es crítica la alineación de los cabezales superior e inferior, se debe evitar la falla prematura de la probeta causada por la aplicación de un estado no uniforme de esfuerzos a la probeta. Se ha encontrado que en algunos laboratorios trabajan con guías internas que permiten el ajuste de la alineación antes de la colocación de la cámara. Estas cámaras permiten la colocación de la pared de la cámara después de que la muestra esté en su lugar entre los cabezales de carga. Los límites aceptables de excentricidad de los cabezales y paralelismo se muestran en la Fig. 2.

6.2.5. En los ensayos triaxiales cíclicos, cargas de extensión, así como de compresión se pueden ejercer sobre la probeta, la varilla de carga debe estar conectada al cabezal superior por roscas rectas respaldadas una contratuerca que se aprieta contra el cabezal.

6.2.6. Tanto en los cabezales superior e inferior, habrá una provisión para el drenaje de las probetas.

6.2.7. *Los discos porosos.* – La probeta debe ser separada del cabezal superior e inferior por discos porosos rígidos de un diámetro igual a la de la probeta. El coeficiente de permeabilidad de los discos aproximadamente será similar a la arena fina (1×10^{-4} cm/s [$3,9 \times 10^{-5}$ pulg. /s]). Los discos porosos se comprobarán periódicamente para determinar si están obstruidos.

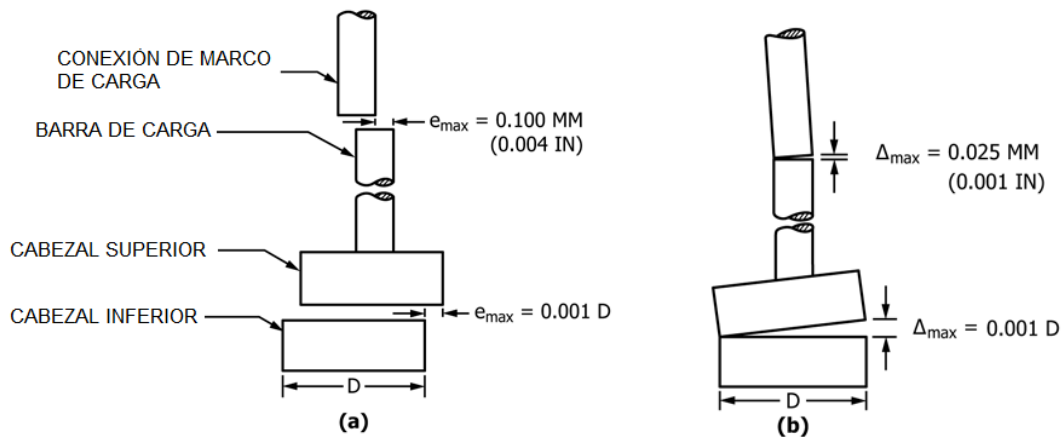


Figura 2. Límites aceptables de alineamiento del cabezal superior e inferior y la barra de carga (a) Excentricidad y (b) Paralelismo

6.3. Los equipos de carga dinámica se utilizada para ensayos triaxiales cíclicos de carga controlada será capaz de aplicar una carga sinusoidal uniforme en un rango de frecuencia de 0,1 a 2,0 Hz. Se prefiere la frecuencia de 1,0 Hz. El dispositivo de carga deberá ser capaz de mantener cargas cíclicas uniformes de por lo menos el 20% de las deformaciones de pico a pico. Picos de carga asimétricos de compresión-extensión, no uniformidad de la duración

del pulso "sonando", o caída de carga en grandes deformaciones no deberán exceder la tolerancia se ilustra en la Fig. 3. El equipo también deberá ser capaz de aplicar la carga cíclica sobre una carga estática inicial sobre la varilla de carga. Evaluar la uniformidad de la traza de carga en el estado de falla para garantizar que los criterios de uniformidad de la carga presentados en las secciones anteriores sean logrados. Mostrar esto en forma adecuada mediante el cálculo del porcentaje de deriva de la carga ($Error_{\Delta P}$) entre la carga máxima (ΔP_{max}) basado en el ciclo de carga inicial y la carga medida en el ciclo n (ΔP_n) como sigue:

$$\begin{aligned}\Delta P_{max} &= (\Delta P_c + \Delta P_e)_{max} \\ \Delta P_n &= (\Delta P_c + \Delta P_e)_n \\ Error_{\Delta P} &= \frac{\Delta P_{max} - \Delta P_n}{\Delta P_{max}} \times 100\%\end{aligned}$$

Dónde:

ΔP_{max} = cambio máximo en el pico cargas aplicadas,

ΔP_c = cambio en el pico de carga aplicada en la compresión,

ΔP_e = cambio en el pico de carga aplicada en extensión,

ΔP_n = carga en el ciclo de orden n, y

$Error_{\Delta P}$ = porcentaje de deriva de carga, deberá ser inferior al 5% de las deformaciones axiales de $\pm 5\%$.

NOTA 2. Para las probetas con un alto contenido de finos en menos de 20 ciclos, puede resultar una distribución no uniforme de la presión de poros.

6.4. *El equipo de registro.* – Los transductores de carga, de desplazamiento y de presión de poros, se requieren para monitorear el comportamiento de la probeta durante la carga cíclica; disposiciones para el control de la presión de la cámara durante la carga son opcionales (ver Tabla 1).

6.4.1. *Medición de carga axial.* - El dispositivo de medición de la carga cíclica máxima deseada puede ser una celda de carga electrónica o cualquier otro dispositivo de medición de carga capaz de medir la carga axial con una precisión de $\pm 1\%$ de la carga axial.

En general, la capacidad de la celda de carga no será mayor de cinco veces la carga máxima total aplicada a la probeta de ensayo para asegurar que se consigue la precisión de la medida necesaria. Las características mínimas del rendimiento de la celda de carga se presentan en la Tabla 1.

6.4.2. *Medición de la deformación axial.* – Los dispositivos de medida de desplazamiento como el transductor de desplazamiento lineal (LVDT), transductores de deformación de tipo potenciómetro, y los sensores de corriente de Foucault pueden utilizarse siempre que tengan una precisión de $\pm 0,02\%$ de la altura inicial de la muestra (véase la Tabla 1).

Las mediciones precisas de deformación requieren que el transductor se monte correctamente para evitar la excesiva compresión del sistema mecánico entre el bastidor de carga, la cámara triaxial, la celda de carga, y el pistón de carga.

Tabla 29. Adquisición de datos

Características de respuesta mínimas para los ensayos de resistencia triaxiales cíclica			
1) <i>Registadores analógicos</i> Velocidades de registro: 0,5 a 50 cm/s [0.2 a 20 pulg. /s] La precisión del sistema (incluyendo linealidad e histéresis): 0,5% ^A Respuesta de frecuencia: 100 Hz			
2) <i>Registadores Digitales</i> Frecuencia de muestreo mínimo: 40 puntos de datos por ciclo			
3) <i>Transductores de medida:</i>			
	Celda de Carga	Transductores de desplazamiento (LVDT) ^B	Presión de Poros
<i>Mínimo de sensibilidad, mv/v</i>	2	0.2 mv/0.025 mm/v [0.2 mv/0.001 pulg./v] (AC LVDT) 5 mV/0.025 mm/v [5 mv/0.001 pulg./v] (DC LVDT)	2
<i>No linealidad, % de la escala completa</i>	±	±0.25	±0.5
<i>Histéresis, % de la escala completa</i>	±0.25	0.0	±0.5
<i>Repetitividad, % de la escala completa</i>	±0.10	±0.01	±0.5
<i>Los efectos térmicos sobre el desplazamiento de cero o la sensibilidad, % de la escala completa / ° C [° F]</i>	±0.005 [±0.025]	....	±0.02 [±0.01]
<i>Deflexión máxima valor nominal en mm [pulg.]</i>	0.125 [0.005]	....	....
<i>Características de cambio de volumen cm³/KPa [pulg³/psi]</i>	....	....	< 0.24 x10 ⁻⁴ [1.0 x 10 ⁻⁴]
^A Sistema de respuesta de frecuencia, la sensibilidad y la linealidad son funciones de la interfaz sistema electrónico, el rendimiento del sistema de acondicionamiento de la señal utilizado, y otros factores. Por lo tanto, es una necesidad para controlar y calibrar los parámetros anteriores como un sistema total y no sobre una base de componentes.			
^B LVDT, a diferencia de medidores de deformación, no se puede suministrar con los datos de calibración significativos. la sensibilidad del sistema es una función de la frecuencia de excitación, la carga de cable, características de la fase del amplificador, y otros factores. Es necesario calibrar cada LVDT sistema de cable-instrumento después de la instalación, utilizando un estándar de entrada conocida.			

6.4.3. *Transductor de presión de poros.* - La presión de poros de la probeta se medirá dentro de ± 2 KPa [0.25 psi]. Durante la carga cíclica la presión de poros se medirá de tal

manera que con poca agua como sea posible se le permite entrar o salir de la probeta. Para lograr este requisito para la carga cíclica, se debe utilizar un transductor de presión electrónico muy rígido. El dispositivo de medición debe tener un cumplimiento de todas las piezas montadas del sistema de medición de la presión de poros con respecto al volumen total de la muestra que satisfacen el siguiente requisito:

$$\frac{\Delta V/V}{\Delta u} < 3.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{kN}/\text{lb} [2.2 \times 10^{-5} \text{ pulg}^2]$$

Dónde:

ΔV = cambio en el volumen de la medición de la presión de poros del sistema debido a un cambio de presión de poro, m³ [pulg³],

V = volumen total de la probeta, m³ [pulg³], y

Δu = Cambio en la presión de poros, KPa [psi].

Las presiones de poros se medirán mediante la línea de drenaje(s) que conduce a uno (o ambos) en el cabezal superior o inferior de la muestra.

6.4.4. Registradores. – El comportamiento de la probeta se evaluó a partir de los registros de tiempo continuo de carga aplicada, la deformación axial, y el cambio en la presión de poros. La rápida respuesta del sistema de registro es esencial si el comportamiento de la probeta se va a supervisar con precisión cuando se abordan las condiciones de falla. características de respuesta requeridos se dan en la Tabla 1. En la resolución de cada variable debe ser superior al 2% del valor máximo que se mide.

6.4.5. *Dispositivo de medición de cambio de volumen.* - El volumen de agua que entra o que salga de la probeta se mide con una precisión de $\pm 0,05\%$ del volumen total de la probeta. El dispositivo de medición de volumen es por lo general una bureta, pero puede ser cualquier otro dispositivo que satisface el requisito de precisión. El dispositivo debe ser capaz de soportar la presión máxima de la cámara.

6.5. *Válvulas.* - Los cambios en el volumen debido a la apertura y cierre de válvulas pueden producir medidas inexactas del cambio de volumen y de la presión de poros. Por esta razón, las válvulas en el sistema de drenaje espécimen debe ser del tipo que producen cambios mínimos de volumen debido a su operación. Una válvula se puede asumir que puede producir un cambio mínimo del volumen al abrir o cerrar la válvula en una posición cerrada,

un sistema saturado de presión de poros no induce un cambio de presión de más de 60,7 kPa [60,1 psi]. Todas las válvulas deben ser capaces de soportar presiones aplicadas sin fugas.

NOTA 3. Se han encontrado que las válvulas de bola pueden proporcionar las características mínimas de cambio de volumen; sin embargo, cualquier otro tipo de válvula que tenga características adecuadas de cambio de volumen puede ser utilizado.

6.6. *Dispositivos de pesaje.* - El dispositivo de pesaje de la muestra, debe determinar la masa de la muestra con una precisión de $\pm 0.05\%$ de la masa total de la muestra.

6.7. *Dispositivo de desaireación del agua.* - La cantidad de gas disuelto (aire) en el agua utilizada para saturar la muestra puede ser reducida por la ebullición, por calentamiento y pulverización en vacío, o por cualquier otro método que satisfaga el requisito para saturar la muestra dentro de los límites impuestos por la presión máxima de retorno BP y el tiempo para realizar el ensayo.

6.8. *Entorno del ensayo.* - La parte del ensayo de la consolidación y el corte, se llevará a cabo en un ambiente donde las fluctuaciones de temperatura sean menores de ± 4 °C [$\pm 7,2$ °F] y sin contacto directo con la luz solar.

6.9. *Varios Aparatos.* - Las herramientas de recorte y tallado de la probeta que incluye un hilo de sierra, una regla de acero, caja de ingletes, de corte vertical, aparato para preparar especímenes compactados, la membrana y expansor de o-rings, capsulas del contenido de humedad y hojas de datos deben proporcionarse según sea necesario.

7. Muestreo

7.1. Tenga especial cuidado en el muestreo y transporte de muestras, que se utilizará para ensayos triaxiales cíclicos como la calidad de los resultados disminuye en gran medida con la perturbación de la muestra. Las normas D1587 y D4220 cubren los procedimientos y aparatos que pueden ser utilizados para obtener muestras satisfactorias para los ensayos.

8. Preparación de las muestras

8.1. Las muestras deberán ser cilíndrica y tener un diámetro mínimo de 51 mm [2.0 in.]. La relación altura-diámetro estará entre 2,0 y 2,5. El tamaño de la partícula más grande deberá ser menor que 1/6 del diámetro de la probeta. Si después de la finalización de un

ensayo, en la inspección visual se descubre que están presentes partículas de mayor tamaño, se reportara en las observaciones del informe del ensayo.

8.2. El corte de las probetas inalteradas para el ensayo puede ser de cualquier forma que reduzca al mínimo la perturbación de la probeta, disminuir los cambios en la densidad de la probeta, y reducir al mínimo los cambios en el contenido humedad inicial. No importa qué método utilice en el corte, tener mucho cuidado para asegurar que los extremos de la probeta sean planos y paralelos. Un procedimiento que ha demostrado que lograr estos criterios para los especímenes congelados de arenas limpias (GP, SP-SM) es el siguiente:

8.2.1. Si una máquina de fresado está disponible, cortar el tubo de muestreo a lo largo en dos lugares diametralmente opuestos (véase la Nota 4), usando un avance rápido, y luego se corta en secciones con una sierra de arco eléctrico. No cortar toda la longitud del tubo. Si no se utiliza una máquina de fresado, corte la sección deseada con una sierra de arco eléctrico o un cortador de tubo con los collares de refuerzo. A continuación, limpiar las rebabas de los extremos cortados del tubo, y empuje la muestra del tubo. Recorte los extremos de la probeta dejando las superficies lisas y perpendiculares a la longitud usando una caja de recortes. Tener cuidado para asegurar que la probeta permanezca congelada durante la operación de recorte. Colocar la probeta en la cámara triaxial y cubrirla con una membrana de goma. Aplicar un vacío parcial de 35 kPa [5 psi] a la probeta y medir el diámetro de la probeta y la altura de acuerdo con el método dado en 9,2 para calcular el volumen inicial de la probeta. Después de que la probeta se ha descongelado, volver a medir la muestra para determinar las condiciones de la probeta inmediatamente antes de la saturación. Cambios de volumen durante la descongelación indica que pueden haber sido utilizadas técnicas inadecuadas de muestreo o preparación de probetas.

8.2.2. *Las probetas inalteradas.* – Para preparar probetas inalteradas de grandes muestras inalteradas o a partir de muestras obtenidas acuerdo con el Método D1587 u otros procedimientos aceptables de tubos de muestreo, conservados y transportados de acuerdo con las prácticas de las muestras del Grupo C y Grupo D, según corresponda en las Prácticas D4220. Las muestras obtenidas por un tubo de muestreo pueden ser ensayados sin cortar, excepto para el corte de las superficies extremas del plano perpendicular al eje longitudinal de la probeta, las características del suelo previstas son tales que ninguna perturbación significativa resulta del muestreo. Maneje las probetas cuidadosamente para minimizar la perturbación, los cambios en la sección transversal, o un cambio en el contenido de humedad. Las probetas deben ser capaces de soportarse por sí solos. Si la compresión o cualquier tipo

de perturbación perceptible sería causado por el dispositivo de extrusión, dividir el tubo de la muestra longitudinalmente o cortar el tubo en secciones adecuadas para facilitar la extracción de la muestra con una perturbación mínima. Preparar las probetas recortadas, en un ambiente, así como un cuarto controlado de alta humedad, donde se reduce al mínimo el cambio en el contenido de humedad del suelo.

8.3. *Probetas reconstituidas.* - Hay varios métodos para la reconstitución de probetas, el método de reconstitución afecta en gran medida a los resultados de los ensayos. El método utilizado se debe especificar en el informe del ensayo. Unos de los siguientes métodos pueden ser utilizados.

8.3.1. *Pouring Method - Método de colada (Alternativo).* - Para esta técnica de preparación de probetas, saturar el suelo inicialmente en un contenedor, se vierte a través del agua en un molde lleno de agua, y luego densificar a la densidad requerida por la vibración (4).

8.3.2. *Método de vibración en seco o húmedo (Alternativo).* - En este procedimiento, se compacta el material seco en el horno, seco al aire, o húmedo en capas (típicamente de seis a siete capas) con una membrana cubriendo el molde partido unido a la placa inferior de la celda triaxial. Compactar el material previamente pesado para cada capa por vibración al peso unitario seco requerido para obtener la densidad establecida. La superficie del suelo debe ser escarificada entre capas. Para obtener capas que tengan densidades iguales, las capas inferiores deben ser menos compactadas (5), ya que la compactación de cada capa sucesiva densifica la arena en la capa por debajo de ella. Después de que la última capa esté parcialmente compactada, coloque la tapa superior en su lugar y continuar la vibración hasta que se consigue el peso específico seco deseado.

8.3.3. *Método del apisonamiento (Alternativo).* - Para este procedimiento (5), apisonar el suelo secado al aire o húmedo en capas en un molde. La única diferencia entre el método de apisonamiento es que cada capa se compacta por pistón con una base de compactación en lugar de un vibrador mano.

8.3.4. Después de que se haya elaborado la probeta, coloque el cabezal superior en la cara superior de la probeta y después levante la membrana cubriendo el cabezal superior e inferior y sellar la probeta con "o-rings" o bandas de goma. A continuación, aplicar un vacío parcial de $\leq 35\text{KPa}$ [5 psi] a la probeta y retire el molde. Si en el ensayo la presión de confinamiento es mayor que 103 kPa [14,7 psi], aplicar un vacío completo a la muestra antes del retiro del molde. La aplicación de un gran vacío puede causar grandes cambios en el

volumen la probeta. El volumen de la probeta se mide antes y después de la aplicación del vacío para verificar los cambios.

9. Procedimiento

9.1. Debido a la amplia variedad de equipos triaxiales para ensayos cíclicos en suelos actualmente en uso, no es posible establecer un procedimiento de ensayo paso a paso que sea compatible con las características de todos los equipos. Los siguientes procedimientos, sin embargo, serán normales a cualquier ensayo de resistencia triaxial cíclica en muestras saturadas.

9.2. *Medición de probetas.* - Debido a que la densidad influye en gran medida a la resistencia triaxial cíclica, es imperativo hacer una determinación precisa de la densidad y del cambio de volumen durante la saturación y la consolidación. Establecer las condiciones iniciales de las probetas tomando las mediciones después de retirar el molde (con la probeta aplicada vacío). Tomar medidas del diámetro utilizando un medidor tipo circunferencial¹ al 0,025 mm [0.001 pulg.] más cercano. Tomar las mediciones de la altura en cuatro lugares usando calibradores o equipos de medición similares, a los 0.025 mm [0.001 pulg.] más cercanos, y la masa al 0,01 g más cercano para probetas con un diámetro 63,5 mm [2,5 pulg.] o menos y de 0,1 g para probetas que tienen diámetros mayores de 63,5 mm [2,5 in.]. Determinar el contenido de humedad al 0,1% tomando los cortes de la probeta (véase el método de ensayo D2216).

9.3. *Saturación.* - El objetivo de la fase de saturación dentro del ensayo es llenar con agua todos los vacíos sin presforzar la probeta o permitiendo que el espécimen se expanda (a menos que la probeta se expanda bajo el esfuerzo efectivo de consolidación deseado). La saturación se logra generalmente mediante la aplicación de una presión de retorno (BP) a la probeta para conducir el agua en el poro lleno de aire: aplicar un vacío a la probeta y al sistema de drenaje seco (mangueras, discos porosos, dispositivo de la presión de poro, discos o tiras de papel filtro) y permitiendo que el agua desaireada saturar el sistema mientras se mantiene el vacío; o saturar el sistema de drenaje los discos porosos en agua en ebullición y permitiendo que el agua fluya a través del sistema antes de montar la probeta. Tiempo suficiente se asignará para disolver el aire en la solución. En consecuencia, la eliminación

¹ La única fuente de suministro de este material conocido por el comité en este momento del Pi Tape, Box 398, Lemon Grove, CA 92045. Si usted está enterado de los proveedores alternativos, por favor proporcione esta información a oficinas de ASTM International. Sus comentarios recibirán una cuidadosa consideración en una reunión del comité técnico responsable, que usted podrá asistir.

de tanto aire como sea posible antes de la aplicación de la presión de retorno disminuirá la cantidad de aire que tendrá que ser colocado en solución y también disminuirá la presión de retorno requerida para la saturación. Además, el aire que queda en el sistema de drenaje y la probeta y justo antes de la aplicación de la presión de retorno se disuelva más fácilmente si se utiliza agua desaireada para la saturación. El uso de agua desaireada también disminuirá el tiempo y la presión de retorno (BP) requeridas para la saturación. Muchos procedimientos se han desarrollado para llevar a cabo la saturación. A continuación, se sugieren los siguientes procedimientos:

9.3.1. *A partir del Sistema de drenaje inicialmente seco.* - Aumentar el vacío parcial que actúa sobre la parte superior de la probeta de 35 KPa [5 psi] al vacío máximo disponible. Si el esfuerzo efectivo de consolidación en la que la fuerza ha de ser determinado es menor que el vacío parcial máximo, aplicar un vacío parcial inferior a la cámara.

La diferencia entre el vacío parcial aplicado a la probeta y la presión de la cámara no podrá ser superior al esfuerzo efectivo de consolidación del ensayo y nunca será inferior a 35 KPa [5 psi]. Aproximadamente después de 2 h, permita que el agua desaireada se filtre de la parte inferior a la parte superior de la probeta bajo un vacío diferencial de menos de 20 KPa [3 psi]. Para las probetas de suelos cohesivos, el tiempo bajo el vacío máximo disponible puede tener que ser reducido a evitar los efectos debido a secado resultante de sublimación. Para arcillas saturadas, percolación puede no ser necesario y el agua puede ser añadido simultáneamente en la parte superior e inferior.

9.3.1.1. Habrá siempre un esfuerzo efectivo positivo de al menos 13 KPa [2 psi] en la parte inferior de la probeta durante esta parte del procedimiento. Cuando el agua aparece en la bureta conectado a la parte superior de la muestra, cierre la válvula a la parte inferior de la muestra y llenar la bureta con agua desaireada.

A continuación, reducir el vacío que actúa en la parte superior de la muestra a través de la bureta a la presión atmosférica al mismo tiempo aumentar la presión de la cámara en una cantidad igual. Durante este proceso, la diferencia entre la presión de poro medido en la parte inferior de la muestra y la presión de la cámara no se le permitirá superar la presión efectiva de consolidación deseada. Cuando la presión de poros en la parte inferior de la probeta se estabilice, proceder con la presión de retorno a la muestra cómo se describe en 9.3.3. Para comprobar la igualdad, cerrar las válvulas de drenaje de la probeta y medir el cambio de presión de poros en un intervalo de 1 min. Si el cambio es inferior al 1% de la presión de la cámara, la presión de poro se puede suponer que ha de estabilizarse.

9.3.1.2. En los casos en que el vacío es limitado, CO₂ se puede permitir que se filtre lentamente hacia arriba desde la parte inferior de la muestra, mientras se forma la muestra o después de que se ha confinado en la cámara triaxial. El CO₂ se desplazará el aire en la muestra y, al ser mucho más soluble en agua que el aire, permitirá pasos de saturación posteriores para ser llevado a cabo con éxito.

9.3.2. *Comenzando con el sistema de drenaje inicialmente saturado.* - Después de llenar la bureta conectado a la parte superior de la probeta con agua desaireada, aplique una presión en la cámara de 35 kPa [5 psi] o menos, y abrir las válvulas de drenaje de la probeta. Cuando la presión de poros en la parte inferior de la probeta se estabilice, de acuerdo con el método descrito en 9.3.1, o cuando la lectura de la bureta se estabiliza, iniciar la presión de retorno (BP) a la probeta.

9.3.3. *La aplicación de presión de retorno.* - Aumentar simultáneamente la presión de la cámara y la presión de retorno en los pasos con válvulas de drenaje de muestras abiertas para que el agua desaireada de la bureta conectado a la parte superior e inferior de la muestra puede fluir en la probeta. Para evitar presforzado de la muestra mientras se aplica presión de retorno, las presiones deben aplicarse gradualmente con el tiempo adecuado entre los incrementos para permitir la igualación de la presión de poros de agua en toda la probeta. Por ejemplo, el tamaño de cada incremento podría ser de 35 kPa [5 psi], 70 kPa [10 psi], o incluso 140 kPa [20 psi], dependiendo de la capacidad de compresión de la muestra de suelo, la magnitud del esfuerzo efectiva consolidación deseado, y el grado de saturación de la probeta justo antes de la adición del incremento. La diferencia entre la presión de la cámara (CP) y la presión de retorno (BP), durante la presión de retorno no será superior a 35 kPa [5 psi] a menos que se considere necesario para controlar el hinchamiento de la probeta durante el procedimiento. Las diferencias entre la cámara y la presión de retorno también deben permanecer dentro de $\pm 5\%$ cuando las presiones son aumentadas y dentro de $\pm 2\%$ cuando las presiones son constantes. Para comprobar la igualdad después de la aplicación de un incremento de la presión de retorno o después de que se ha aplicado la totalidad del valor de la presión de retorno, cerrar las válvulas de drenaje de la probeta y medir el cambio en la presión de poro en un intervalo de 1 min. Si el cambio en la presión de poro es inferior al 1% de la diferencia entre la presión de la cámara y la presión de retorno, añadir otro incremento de presión de retorno o tomar una medición del parámetro de presión de poros B (Sección 9.3.4) para determinar si se ha completado la saturación. se considerarán

especímenes saturado si el valor de B es igual o mayor que 0,95, o si B se mantiene sin cambios con la adición de los incrementos de presión de retornos.

NOTA 4. La presión de retorno total requerida para saturar una probeta compactada puede ser tan alta como 1400 kPa [200 psi] Si se utiliza el método de montaje húmedo.

NOTA 5. Muchos laboratorios utilizan reguladores de presión diferencial y transductores para alcanzar los requisitos para las pequeñas diferencias entre la presión de la cámara y la presión de retorno.

9.3.4. *Medición del parámetro de la presión de poro B .* - El parámetro de presión de poro B se define por la siguiente ecuación:

Dónde:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3}$$

Dónde:

Δu = Cambio de la presión de poros de la probeta, que se produce como resultado de un cambio en la presión de celda cuando las válvulas de drenaje de la muestra están cerradas, y
 $\Delta \sigma_3$ = el cambio en las presiones de celda.

El B -valor se determinará de la siguiente manera:

9.3.4.1. Cierre las válvulas de drenaje de la probeta y aumentar la presión de la cámara a 70 KPa [10 psi].

9.3.4.2. Determinar y registrar el valor máximo de la presión de poros. Para muchas probetas, la presión de poro puede disminuir después de la respuesta inmediata y luego aumentar ligeramente con el tiempo. Si esto ocurre, grafique los valores de Δu con el tiempo y la presión de poros asintótica para calcular el cambio en la presión del agua intersticial. Un gran aumento en el valor de Δu medido con el tiempo o la medición de los valores de Δu mayores que $\Delta \sigma_3$ indicar una fuga de fluido de la cámara a la probeta o al sistema de medición de presión de poros. La disminución de los valores de Δu con el tiempo puede indicar una fuga en la parte del sistema de medición de la presión poros situado fuera de la cámara.

9.3.4.3. Calcular el valor B usando la ecuación 3.

9.3.4.4. Volver a aplicar la misma presión de confinamiento efectivo (presión de la cámara menos la presión de retorno, CP - BP) como existía antes de la verificación del valor B, mediante la reducción de la presión de la cámara en un 70 kPa [10 psi] o, alternativamente, mediante el aumento de la presión de retorno en un 70 kPa [10 psi]. Si el valor B sigue aumentando a medida que aumenta la presión de retorno, proceder a la saturación de la contrapresión. Si el valor B es igual o superior a 0,95 o si el valor B versus la gráfica de la presión de retorno indica ningún aumento adicional en el valor de B con el aumento de la presión de retorno, iniciar el proceso de consolidación.

9.3.4.5. Durante el proceso de saturación, medir el cambio en la altura de la muestra al 0,025 mm más próximo [0.001 pulg.]. Además, durante la saturación se aplica una carga axial al pistón (que se atornilla al cabezal superior) para compensar la fuerza de levantamiento en la varilla de carga de modo que la probeta se mantiene isotrópica u otro estado conocido de esfuerzos. Calcular la carga estática para mantener una condición isotrópica de la siguiente ecuación:

$$P_s = \sigma_3 A_r - M_{\text{varilla-cabezal}} g$$

Dónde:

P_s = La corrección de pistón de carga estática,

$M_{\text{varilla-cabezal}} g$ = peso de la barra de carga y la parte superior de platina,

σ_3 = la presión de la celda, y

A_r = el área de la sección transversal de la barra de carga.

9.4. Consolidación:

9.4.1. Consolidar la probeta isotrópicamente.

9.4.2. La consolidación isotrópica se define como el estado en el que el esfuerzo de consolidación efectivo vertical (σ'_{1c}) es igual al esfuerzo efectivo de consolidación lateral (σ'_{3c}). Para consolidar la probeta isotrópicamente, mantener la presión de retorno constante aplicada y aumentar la presión de la cámara hasta que la diferencia entre la presión de la cámara y la presión de retorno es igual a la presión de consolidación deseada. Aplicar una carga axial para contrarrestar la elevación debido al aumento de la presión de la cámara. Esto puede requerir la aplicación de incrementos la presión de consolidación para proporcionar el tiempo suficiente para aplicar y ajustar la carga de contrapeso elevación. Medir los

cambios en la altura de la probeta durante la consolidación a los 0,025 mm [0,001 in.] más cercano, y el cambio en el volumen de la probeta al 0,1 ml más próximo.

9.4.3. Después de la consolidación, cierre las válvulas de drenaje y observe la presión de los poros durante un periodo de tiempo para comprobar que no se han producido fugas en el sistema de la membrana o la presión de los poros. Si el momento de la consolidación es superior a 8 h, volver a determinar el valor de B antes de la carga cíclica.

9.5. Carga cíclica:

9.5.1. La estimación de la magnitud de la carga cíclica que se aplicará para la relación de esfuerzos deseada. La relación de esfuerzos deseada, SR, es la relación del esfuerzo desviador deseada al doble del esfuerzo de consolidación. En consecuencia, la magnitud de la carga cíclica se puede estimar, con la siguiente ecuación:

$$\Delta P_c = 2 \times \sigma'_{3c} \times SR_{deseado} \times A_c$$

Dónde:

ΔP_c = estimación de carga cíclica a ser aplicada a la probeta,

σ'_{3c} = presión de consolidación (presión de la cámara menos la presión de retorno),

$SR_{deseado}$ = relación deseada esfuerzos $[\Delta\sigma_a] / [2\sigma_c']$, y

A_c = área de la probeta después de la consolidación.

9.5.2. Si no existe ya, formar una bolsa de aire grande en la parte superior de la cámara triaxial mediante el drenaje del agua de la cámara sin permitir la disminución de la presión de la cámara. La bolsa de aire es necesario para que el movimiento del pistón dentro y fuera de la cámara durante la carga cíclica no cree fluctuaciones de la presión de la cámara. No permita que el nivel del agua baje de la parte superior de la probeta.

9.5.3. Cierre las válvulas de drenaje y cargue cíclicamente la probeta con el primer medio ciclo de compresión de una forma de carga sinusoidal utilizando de 0,1 a 2 Hz, donde el esfuerzo varía entre los valores pico de compresión y pico de extensión. Durante la carga cíclica mantener constante la presión de la cámara y registrar la carga axial, la deformación axial, y el cambio en la presión de los poros con el tiempo.

9.5.4. La carga realiza un ciclo con la primera onda de esfuerzo que se aplica en compresión.

9.5.5. La carga realiza un ciclo hasta que la amplitud de la deformación vertical doble cíclica no supere el 20%, la amplitud simple de deformación en cualquier extensión o compresión es superior al 20%, a 500 ciclos de carga o el número de ciclos de carga requeridos en el programa de ensayos se superan, o la forma de la onda de carga se deteriora más allá de los valores aceptables.

NOTA 6. Gilbert (4) ha encontrado que por encima del 5% de la deformación de amplitud doble en las arenas, un aumento de la densidad puede observarse, haciendo que los resultados sean cuestionables.

9.6. *Retiro de las probetas.* - Tras los ensayos cíclicos, retire con cuidado la probeta de la cámara triaxial sin perder las partículas, a continuación, secar y determinar la masa para el cálculo del peso unitario seco.

10. Cálculo

10.1. Para evaluar los datos del ensayo obtenidos a partir del ensayo de resistencia triaxial cíclico individual, es necesario primero convertir el historial del tiempo de la carga y la deformación del esfuerzo cíclico y la deformación y reducir el historial del tiempo de la presión de poros de una forma conveniente.

10.2. Se calcula la relación estrés, la tensión y la presión del agua intersticial cíclico definido en la figura. 4 utilizando las siguientes relaciones:

$$\sigma_c = P_c / A_c$$

$$\sigma_e = P_e / A_c$$

$$\sigma_a = (\sigma_c + \sigma_e) / 2$$

y

$$\varepsilon_c = \delta_c / H_c$$

$$\varepsilon_e = \delta_e / H_c$$

$$\varepsilon_{da} = \varepsilon_c + \varepsilon_e$$

$$U = \mu_{\max} / \sigma_{3c} \text{ isotrópica}$$

Dónde:

$$\sigma_c = \Delta P_c / A_c = \text{esfuerzo cíclico pico en compresión,}$$

$$\sigma_e = \Delta P_e / A_c = \text{esfuerzo cíclico pico en extensión,}$$

- ΔP_c = cambio en la carga pico aplicada en compresión,
 ΔP_e = cambio en la carga pico aplicada en extensión,
 A_c = V_c / H_c = área de la probeta después de la consolidación (área consolidada),
 σ_a = promedio de la amplitud simple del esfuerzo axial cíclico,
 $\pm\sigma_{dc}$ = promedio de la amplitud simple del esfuerzo desviador cíclico,
 ϵ_c = deformación axial en compresión,
 ϵ_e = deformación axial en extensión,
 δ_c = deformación axial cíclica en compresión,
 δ_e = deformación axial cíclica en extensión,
 H_c = altura de la probeta después de la consolidación,
 ϵ_{da} = amplitud doble deformación axial, porcentaje,
 U = relación de presión de poros cíclica,
 U_{max} = exceso de la presión de poros máxima inducida durante un ciclo, y
 σ'_{3c} = esfuerzo de consolidación isotrópica.

10.3. Tabular los valores discretos de la carga, la deformación y la presión de poros para diferentes ciclos de interés y calcular los valores resultantes del esfuerzo, la deformación, y la relación de la presión de poros para cada ciclo. Los valores del esfuerzo y la deformación se calculan en base a las dimensiones de la probeta consolidada. Evaluar la uniformidad de la traza de carga en el estado de falla para asegurar que los criterios de uniformidad de carga presentados en las secciones anteriores se logran. Mostrar esto en una forma adecuada mediante el cálculo de la desviación de carga en porcentaje (P_{error}) usando la ecuación en 6.3.

11. Informe: Registros

11.1. La metodología utilizada para especificar cómo los datos se registran los datos del ensayo en la hoja(s)/forma(s), tal como se indica a continuación, se trata en 1.6.

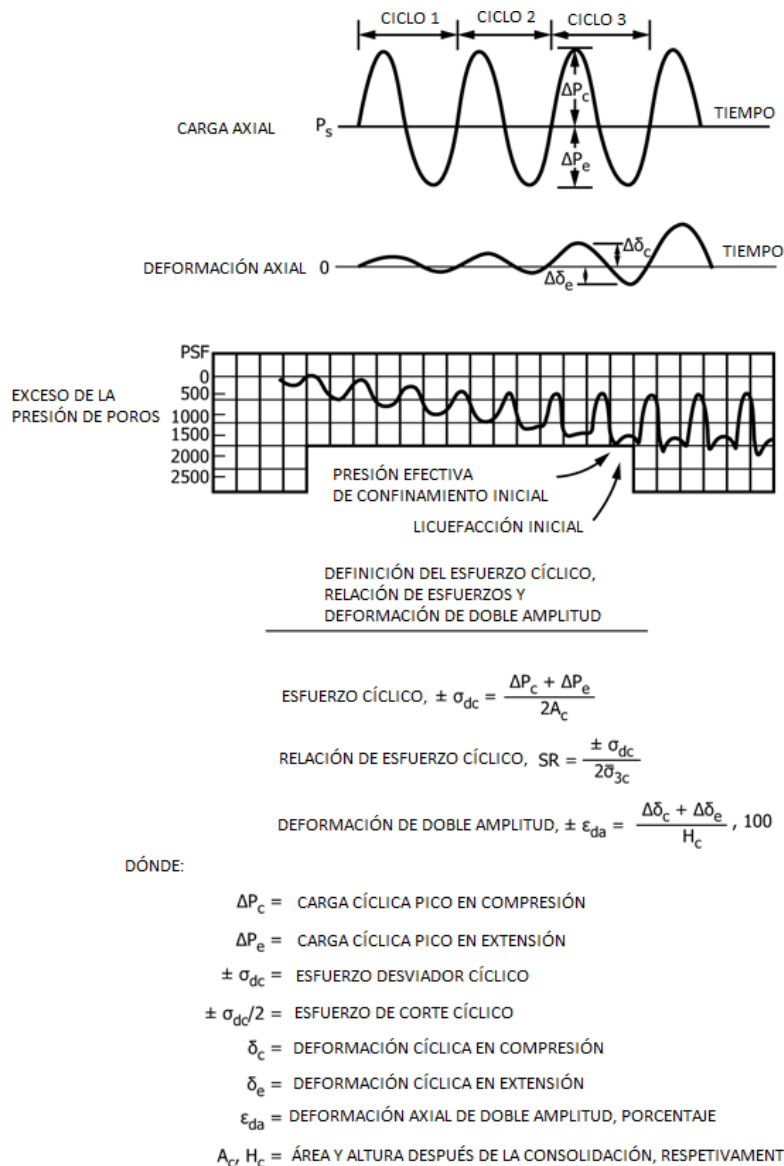


Figura 4. Definición de los valores medidos de carga-deformación y los valores calculados de esfuerzo-deformación para los ensayos de resistencia triaxial cíclico

11.2. Presente suficientes datos de referencia para cada ensayo para definir adecuadamente el tipo de equipo de ensayo utilizado, las características de la cámara triaxial y el sistema de control de la presión de poros, así como de las características de frecuencia de repetición de carga y forma de la onda de carga, y el método de preparación de las probetas. información de referencia necesaria para cada ensayo (o de la serie de ensayos si los métodos de ensayo se mantienen constantes) se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Información requerida de la probeta para cada ensayo

1. Nombre del proyecto

2.	Perforación y número de muestra
3.	Clasificación del suelo y descripción
4.	Propiedades índices (granulometría, límites de Atterberg, gravedad específica, y la densidad mínima y máxima cuando es viable)
5.	Método usado de preparación de probetas
6.	Diámetro, área y altura inicial y consolidada
7.	Contenido de humedad inicial y consolidada
8.	Peso unitario seco inicial y consolidada
9.	Densidad relativa inicial y consolidada (cuando es viable)
10.	Esfuerzos de consolidación (σ_{1c} y σ_{3c})
11.	Grado de saturación (Valores de B)
12.	Gráficos trazados de la carga, deformación y presión de poros con el historial del tiempo

11.3. Las historias de tiempo o presentación de los datos de tabla de la Tabla 3 se pueden utilizar para trazar cualquiera de las siguientes curvas que se han encontrado para ser útil en la evaluación de resultados de las pruebas individuales:

11.3.1. ϵ_{da} versus al número de ciclos (N),

11.3.2. ϵ_c versus N,

11.3.3. ϵ_e versus N,

11.3.4. $\Delta\sigma_a$ versus N,

11.3.5. $\Delta\sigma_c$ versus N,

11.3.6. $\Delta\sigma_e$ versus N,

11.3.7. Δu versus N,

11.3.8. U versus N,

11.3.9. $\sigma_{3(\min)}/\sigma_{3c}$ versus N, y

11.3.10. P_{error} versus N.

11.3.11. En la mayoría de los casos, graficar 1, 4, 8 y 10 serán adecuados para definir el comportamiento de la probeta en los ensayos de resistencia triaxiales cíclicos.

Tabla 3. Típica tabla de resultados de resistencia triaxial dinámica

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
			Esfuerzo cíclico	

Número del ciclo	Máxima presión de poros	Relación de presión de poros		Promedio del esfuerzo vertical cíclico
	ΔU_{max}	$U = \frac{\Delta U_{max}}{\sigma'_{3c}}$	Compresión $\Delta\sigma_c$ Extensión $\Delta\sigma_e$	$\Delta\sigma_a$
(6)	(7)	(8)	(9)	
Deformación vertical cíclica	Deformación vertical de doble amplitud	Relación de esfuerzo cíclico	Relación promedio del esfuerzo de este ciclo	
Compresión ε_c Tensión ε_a	ε_{da}	$CSR = \frac{\Delta\sigma_a}{2\sigma'_c}$	$CSR_{promedio}$	
(10)			(11)	
Diferencia porcentual de la carga programada			Desempeño observado	
ΔP_{error}			(Esfuerzo uniforme, deformación de cuello, etc.)	

11.4. En informar los resultados de una serie de ensayos de resistencia cíclicos de muestras isotrópicamente consolidadas, el número de ciclos necesarios para una probeta para llegar a diversos valores de la deformación axial de amplitud doble a menudo se grafican versus la relación de esfuerzos cíclica (CSR), calculado de la siguiente manera:

$$SR = \frac{\sigma_a}{2\sigma'_{3c}}$$

De esta manera es posible normalizar los valores de resistencia de las muestras a una densidad dada probado en un número de presiones de confinamiento. Sin embargo, los valores de la relación de esfuerzo cíclico (CSR) para cada ciclo de carga, que se muestran en la columna 8 de la Tabla 3, no son tan significativos como algún tipo de valor medio que presenta, como un promedio ponderado, la relación de esfuerzo cíclico aplicado en ciclos anteriores. Calcular un promedio de la relación de esfuerzo cíclico como sigue:

$$CSR_{promedio} = \left(\frac{1}{m}\right) \sum_{n=1}^m CSR_n$$

Donde $CSR_{promd.}$ es el promedio de la relación esfuerzo cíclico al ciclo m y CSR_n es la relación de esfuerzo cíclico en el ciclo n. Para cada ensayo de resistencia cíclica, la relación

promedio de esfuerzo cíclico inicial para licuefacción y para valores de deformación de amplitud doble de 2,5, 5, 10 y 20%. Tales datos de los ensayos en el mismo material a la misma densidad se pueden combinar y se representa como *CSR* versus *N* los valores, que son comúnmente llamados cíclicos fuerza de ensayo triaxial curvas. *CSR* es necesaria sólo cuando *PE* se produce al hacer fuerza.

12. Precisión y repetitividad

12.1. La precisión sobre los datos del ensayo no se presenta debido a la naturaleza de los materiales probados por este método de ensayo (introducción del tipo suelo o roca, o ambos). O bien no es viable o es muy costoso en este momento para tener diez o más laboratorios participan en un programa de pruebas de round robin. Además, o bien no es viable o es muy costoso de producir múltiples muestras que tienen propiedades físicas uniformes. Cualquier variación observada en los datos es tan probable que sea debido a la variación del espécimen como a la variación de las pruebas de operador o de laboratorio.

12.2. Subcomité D18.09 está buscando todos los datos de los usuarios de este método de ensayos que podrían ser utilizados para hacer una declaración sobre la limitación de la precisión.

12.3. Repetitividad. - No hay un valor de referencia aceptado para este método de ensayo, por lo tanto, el sesgo no se puede determinar.

13. Palabras clave

13.1. pruebas sin escurrir consolidadas; suelos no cohesivos; Pruebas de laboratorio; licuefacción; ensayos triaxiales

REFERENCIAS

- (1) Chan, C. K., "Low Friction Seal System," Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 101, GT4, Sept. 1975.
- (2) Silver, M. L., Chan, C. K., Ladd, R. S., Lee, K. L., Tiedmann, D. A., Townsend, F. C., Valera, J. E., and Wilson, J. H., "Cyclic Triaxial Strength of Standard Test Sand," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 102, GT5, May, 1976.
- (3) Chaney, R., and Mullis, J., "Wet Sample Preparation Techniques," ASTM, Geotechnical Testing Journal, Vol 1, No. 2, June, 1978.

(4) Gilbert, P., “Investigation of Density Variation in Triaxial Test Specimens of Cohesionless Soil Subjected to Cyclic and Monotonic Loading,” Tech. Rept. GL-84-10, USA/COE, 1984.

(5) Ladd, R. S., “Preparing Test Specimens Using Undercompaction,” ASTM, Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol 1, No. 1, 1978.

Anexo 2. Norma D3999/D3999M – 11

Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus¹

Método de ensayo estandarizado para la determinación de las propiedades de módulo y amortiguamiento de suelos usando un equipo Triaxial cíclico

1. Alcance

1.1. Estos métodos de ensayo cubren la determinación del módulo y de las propiedades de amortiguamiento en suelos, en condiciones inalteradas o reconstituidas, las técnicas en los ensayos triaxiales cíclicos son por carga o deformación controlada. La norma se centra

¹ Este método de ensayo está bajo la jurisdicción del Comité D18 de ASTM sobre el suelo y la roca y es responsabilidad directa del Subcomité D18.09 sobre Propiedades cíclicas y dinámicas de los suelos. Edición actual aprobada el 1 de noviembre de 2011. Publicado en enero de 2012. aprobado originalmente en 1991. Última edición anterior, aprobado en 2003 como D3999-91 (2003). DOI: 10.1520/D3999-11E01.

en la determinación de estas propiedades para suelos normalmente consolidados y en condiciones no drenadas.

1.2. Las propiedades triaxiales cíclicas en probetas de suelo no saturadas o inicialmente saturadas, son evaluadas con relación a un número de factores que incluyen: el nivel de deformación, la densidad, el número de ciclos, el tipo de material, y el esfuerzo efectivo.

1.3. Estos métodos de ensayo son aplicables tanto a suelos de grano fino o de grano grueso, como define la Norma D2487 del sistema de clasificación unificada de suelos. Las probetas de ensayo pueden ser inalteradas o reconstituidas por compactación en el laboratorio.

1.3.1. Para determinar el módulo de Young secante (E) y coeficiente de amortiguamiento (D) para probetas de suelo, se proporcionan de dos métodos de ensayo para el uso de una carga cíclica. El primero método de ensayo (A) permite la determinación de E y D usando un equipo de carga constante. El segundo método de ensayo (B) permite la determinación de E y D usando un equipo de desplazamiento constante. Los métodos de ensayo son los siguientes:

1.3.2. *Método de Ensayo A.* - Este método de ensayo requiere la aplicación de una carga cíclica constante a la probeta de ensayo. Se utiliza para determinar el módulo de Young secante y el coeficiente de amortiguamiento bajo una condición de carga constante.

1.3.3. *Método de Ensayo B.* - Este método de ensayo requiere la aplicación de una deformación cíclica constante a la probeta de ensayo. Se utiliza para determinar el módulo de Young secante y el coeficiente de amortiguamiento bajo una condición de desplazamiento constante.

1.4. El desarrollo de las relaciones que ayudan en la interpretación y evaluación de resultados de los ensayos se dejan al ingeniero u oficina que solicita el ensayo.

1.5. *Limitaciones.* - Existen ciertas limitaciones inherentes al uso de los ensayos triaxiales cíclicos para simular las condiciones de esfuerzo y deformación de un elemento de suelo en el campo durante un terremoto, en las siguientes secciones hay varios resúmenes. Con la debida consideración de los factores que influyen en los resultados y cuidadosamente realizados, los ensayos triaxiales cíclicos pueden proporcionar datos sobre el comportamiento cíclico de los suelos con un grado de precisión adecuado para evaluaciones significativas del módulo y el coeficiente de amortiguamiento por debajo de un nivel de deformación cortante de 0,5%.

1.5.1. Condiciones de esfuerzo no uniformes dentro de la probeta de ensayo son atribuidas a los cabezales de la muestra.

1.5.2. Se produce un cambio de 90° en la dirección del esfuerzo mayor principal, durante las dos mitades del ciclo de carga en probetas isotrópicamente confinadas.

1.5.3. El esfuerzo axial cíclico máximo que puede ser aplicado a una probeta saturada, es controla por las condiciones de esfuerzos, después de la aplicación de esfuerzo de confinamiento y de la presión de poros generada durante la compresión no drenada. Para una probeta isotrópicamente confinada y ensayada a una compresión cíclica, el esfuerzo axial cíclico máximo que puede ser aplicado a la probeta es igual a la presión efectiva de confinamiento. Los suelos no cohesivos no pueden resistir tensión, el esfuerzo axial cíclico más grande que este valor, tienden a levantar el cabezal superior de la probeta de suelo. También, a medida que aumenta la presión de poros durante los ensayos realizadas en probetas isotrópicamente confinadas, la presión efectiva de confinamiento se reduce, contribuyendo a la tendencia de la probeta a un estrangulamiento durante la extensión de la porción del ciclo de carga, invalidando los resultados de la prueba más allá de ese punto.

1.5.4. Lo más aconsejable para los ensayos cíclicos es obtener muestras inalteradas, pero a veces es necesario reconstituir las muestras de suelo. Se ha demostrado que los diferentes métodos de reconstitución de probetas a la misma densidad pueden resultar en un comportamiento cíclico significativamente diferente. Además, las probetas inalteradas casi siempre serán más fuertes y más rígidas que las probetas reconstituidas a la misma densidad.

1.5.5. La interacción entre la probeta, la membrana, y el fluido de confinamiento tiene una influencia sobre el comportamiento cíclico. Los efectos del comportamiento de la membrana no pueden explicarse fácilmente en el procedimiento del ensayo o en la interpretación de los resultados. Cambios en la presión poros pueden causar cambios en la penetración de la membrana en probetas de suelos no cohesivos. Estos cambios pueden influir significativamente en los resultados de los ensayos.

1.6. Los valores indicados están en unidades SI o en unidades libra-pulgada [mostrados entre corchetes] han de ser considerados como estándares. Los valores indicados en cada sistema que pueden no ser exactamente equivalentes; Por lo tanto, cada sistema debe ser utilizado independientemente del otro. La combinación de valores de los dos sistemas puede resultar en una no conformidad con la norma. No se considerará como una no conformidad con esta norma, unidades distintas del SI, en un reporte de los resultados del ensayo.

1.7. Todos los valores observados y calculados se ajustarán según la Norma D6026 - Guía para establecer los dígitos significativos y el redondeo. Los procedimientos de la Norma D6026 que se utilizan para especificar cómo se recogen, registran y calculan los datos, son considerados como estándares en la industria. Además, son representativos de los dígitos significativos que generalmente debe ser conservados. Los procedimientos no consideran la variación del material, el propósito de la obtención de los datos, de los estudios de propósito especial, o cualquier consideración de los objetivos del usuario. Es una práctica común el aumento o reducción de las cifras significativas de los datos reportados que sean acordes con estas consideraciones. El exámen de las cifras significativas que se utilizará en los métodos de análisis para el diseño de ingeniería está más allá del alcance de esta norma.

1.7.1. El método utilizado para especificar cómo se recogen los datos, los cálculos o registros, no está directamente relacionados en esta norma con la exactitud de los datos que se pueden aplicar en el diseño u otros usos, o ambas cosas. Está más allá de su ámbito de aplicación cómo uno aplica los resultados obtenidos usando esta norma.

1.8. Esta norma no pretende considerar todos los problemas de seguridad, si los hay, asociados con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma establecer prácticas de seguridad y salud y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reglamentarias antes de su uso.

2. Documentos de Referencia

2.1. Normas ASTM:²

D422 Método de ensayo para el análisis del tamaño de las partículas de suelos.

D653 Terminología relacionada a suelos, rocas y fluido contenido en ellos.

D854 Método de ensayo para la gravedad específica de sólidos de suelo por el picnómetro y agua.

D1587 Práctica para el muestreo de suelos en tubos de pared delgada para propósitos de geotecnia.

D2216 Método de ensayo para la determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) en suelos y rocas por masa.

D2487 Práctica de clasificación de suelos para propósitos de ingeniería (Sistema de Clasificación Unificada de Suelos SUCS).

² Para las normas ASTM citadas, visite el sitio web de ASTM, www.astm.org, o el contacto de cliente en [ASTM service@astm.org](mailto:ASTM_service@astm.org). Para Annual Book of ASTM Standards información de volumen, consulte la página Resumen de documentos de la serie en el sitio web de ASTM.

D2488 Práctica para la descripción e identificación de suelos (Clasificación Manual Visual).

D3740 Práctica de los requisitos mínimos para organismos encargados de pruebas y/o inspección de suelos y roca que se utiliza en diseño de ingeniería y construcción

D4220 Práctica para la preservación, muestreo y transporte de suelos.

D4767 Método de ensayo de compresión triaxial consolidado-no drenado para suelos cohesivos.

D4318 Métodos de ensayo para el límite líquido, límite plástico, y el índice de plasticidad de los suelos.

D6026 Práctica para el uso de dígitos significativos en los datos geotécnicos.

2.2. Normas USBR:³

USBR 5210 Práctica para la preparación de especímenes compactados en laboratorio.

3. Terminología

3.1. Definiciones:

3.1.1. Las definiciones de los términos utilizados en este método de ensayo deben estar de acuerdo con la terminología D653.

3.1.2. *Presión de retorno.* – Una presión aplicada a los poros de la probeta para hacer desplazar el aire del espacio poroso y pasar agua en el espacio intersticial, es decir, para saturar la muestra.

3.2. Definiciones de los términos específicos para esta Norma:

3.2.1. *Duración del ciclo.* – Es el intervalo de tiempo entre las aplicaciones sucesivas de un esfuerzo desviador.

3.2.2. *Esfuerzo desviador* [FL^{-2}]. – Es la diferencia entre el esfuerzo principal mayor y el menor en un ensayo triaxial.

3.2.3. *Esfuerzo efectivo de confinamiento.* – Es la diferencia entre la presión de celda y la presión de poros, antes de corte de la probeta.

3.2.4. *Fuerza efectiva (F).* – La fuerza transmitida a través de una masa de suelo o roca por presiones intergranulares.

3.2.5. *Curva de histéresis.* – El trazo de la carga versus de la deformación resultante de la aplicación de un ciclo completo, ya sea una carga o deformación cíclica. El área dentro de la curva resultante es debido a la energía disipada por la probeta y el equipo, véase la Figura 94.

³ Disponible en el Departamento del Interior de EE.UU., Bureau of Reclamation de 1849 C St NW Washington, DC 20240, <http://www.doi.gov>.

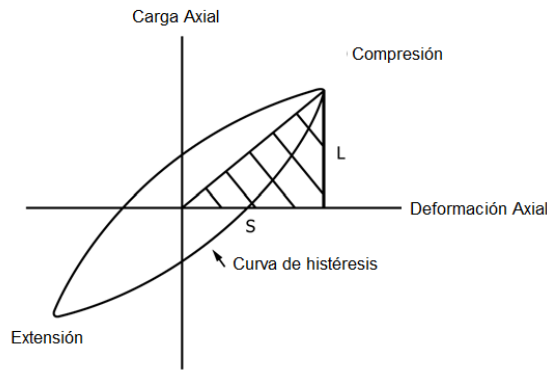


Figura 94. Esquemática típico de la curva de histéresis cíclico generado por equipo triaxial cíclico

3.2.6. *Duración de la carga.* – Es el intervalo de tiempo donde la probeta se somete a un esfuerzo desviador cíclico.

4. Resumen del Método de Ensayo

4.1. El ensayo triaxial cíclico consiste en aplicar un esfuerzo desviador axial cíclico de magnitud fija (carga controlada) o de deformación axial cíclica (desplazamiento controlado) a una probeta cilíndrica de suelo, hidrostáticamente consolidada y en condiciones no drenadas. La deformación axial resultante y esfuerzo axial medido, se utilizan para calcular módulo secante y coeficiente amortiguamiento ya sea por esfuerzo dependiente o desplazamiento dependiente.

5. Significado y uso

5.1. El ensayo triaxial cíclico permite la determinación del módulo secante y el coeficiente de amortiguamiento para una carga axial cíclica de una probeta prismática de suelo hidrostáticamente consolidada y en condiciones no drenadas. El módulo secante y coeficiente de amortiguamiento de este ensayo pueden ser diferentes de los obtenidos a partir de un ensayo de corte torsional en el mismo material.

5.2. El módulo secante y coeficiente de amortiguamiento son parámetros importantes utilizados en dinámica, la evaluación del desempeño estructuras naturales y ingenieriles bajo cargas dinámicas o cíclicas, como los causados por terremotos, olas del océano, o explosiones. Estos parámetros se pueden utilizar en los análisis de respuesta dinámica

incluyendo, elementos finitos, diferencias finitas, y métodos de análisis lineales o no lineales.

NOTA 1.- La calidad de los resultados producidos por este método de ensayo, depende de la competencia del personal que lo realiza, de la idoneidad de los equipos y de las instalaciones utilizadas. Los organismos que cumplan los criterios de la Norma D3740 generalmente se consideran capaces de cumplir los objetivos de muestrear/ensayar/inspeccionar/etc. Se advierte que cumplimiento por los usuarios de esta norma, los requisitos de la norma D3740 no aseguran resultados fiables. Los resultados confiables dependen de muchos factores; la norma D3740 proporciona un medio de evaluar algunos de estos factores.

6. Equipos

6.1. *Generalidades.* – El equipo triaxial adecuado para los ensayos triaxiales cíclicos es similar a los equipos utilizados para el ensayo de compresión triaxial consolidada-no drenada (ver Método de ensayo D4767). Sin embargo, hay características especiales que se describen en las siguientes secciones que se requieren para llevar a cabo ensayos triaxiales cíclicos aceptables. Una representación esquemática de los diversos componentes que comprenden una configuración del ensayo triaxial cíclico se muestra en la Figura 95.

6.2. Equipo de carga cíclica:

6.2.1. El equipo de carga cíclica utilizado para los ensayos triaxiales cíclicos de carga controlada debe ser capaz de aplicar una carga sinusoidal uniforme a una frecuencia dentro del intervalo de 0,1 a 2 Hz.

6.2.2. El equipo debe ser capaz de aplicar la carga cíclica sobre una carga estática inicial sobre el pistón de carga.

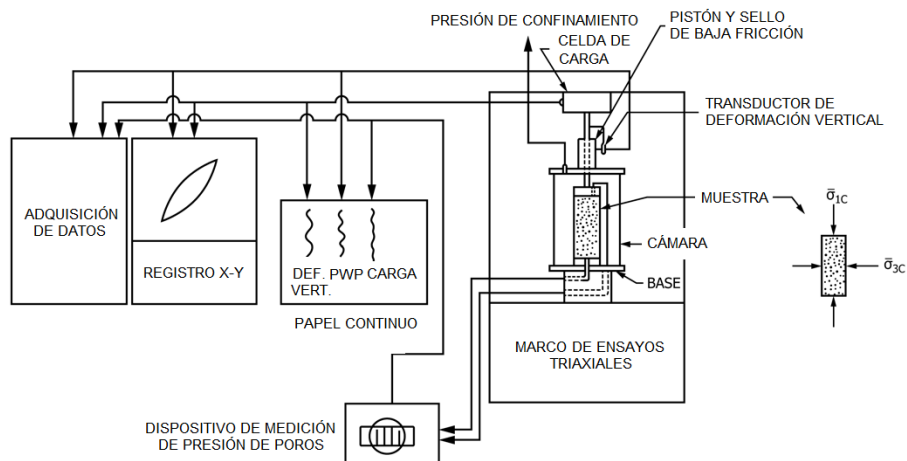


Figura 95. Representación esquemática de la instalación de un Ensayo Triaxial Cíclico de Carga o Deformación controlada.

6.2.3. El dispositivo de carga debe ser capaz de mantener cargas cíclicas uniformes por lo menos a 0,5% del esfuerzo de amplitud, tal como se define en la Figura 96. El patrón de carga utilizado en la presente norma deberá ser armónico, como se muestra en la Fig. 4 (a). Patrones de carga inaceptables, tales como picos asimétricos de compresión-extensión de carga, la no uniformidad de la duración del pulso, "resonando", o caída de la carga a grandes deformaciones se ilustran en la Fig. 4 (b) a la Fig. 4 (f). El patrón de carga deberá ser comparado con las tolerancias que se muestran en la Figura 97 para evaluar si es aceptable para su uso en la presente norma.

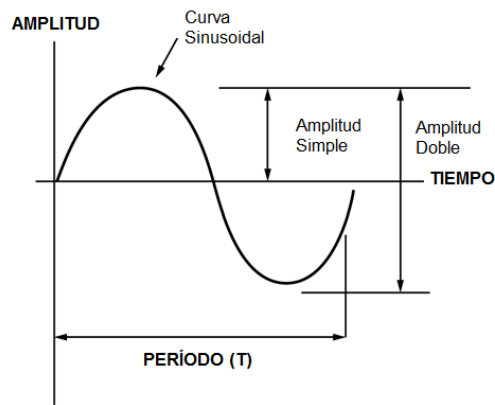


Figura 96. Definición relacionada con cargas cíclicas (Frecuencia = 1/PERÍODO = 1/T)

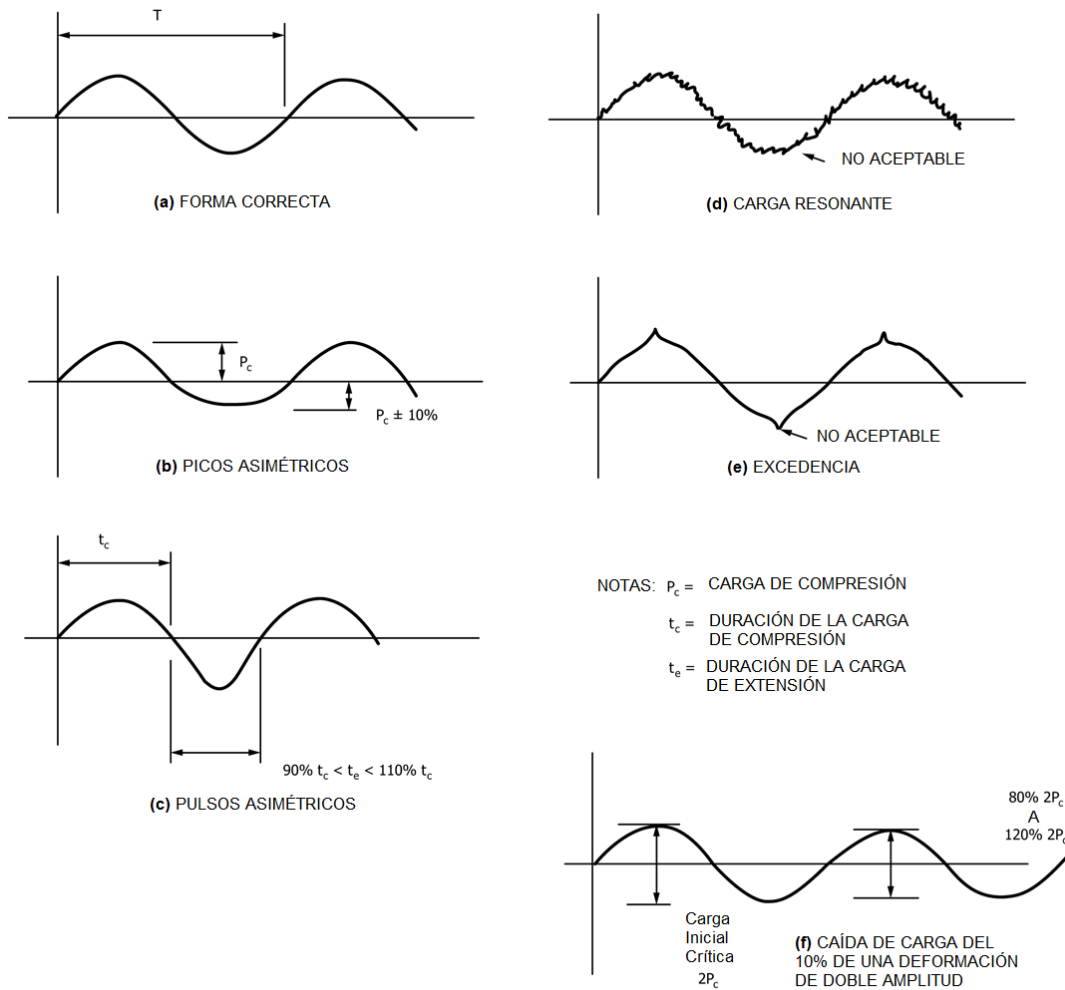


Figura 97. Ejemplos de formas de ondas sinusoidales de carga aceptable y no aceptable para Ensayos Triaxiales Cíclicos de carga controlada

6.2.4. El equipo de carga cíclica utilizado para los ensayos triaxiales cíclicos de deformación controlada debe ser capaz de aplicar una deformación sinusoidal uniforme en un rango de frecuencia de 0,1 a 2 Hz. El equipo también debe ser capaz de aplicar la deformación cíclica sobre o bien desde un punto de referencia inicial o siguiendo la probeta, ya que esta se deforma. El tipo de equipo típicamente empleado puede variar desde una leva simple o un sistema electro-hidráulico de circuito cerrado.

6.3. *La Cámara Triaxial.* - Las principales consideraciones en la selección de la cámara son tolerancias para el pistón, el cabezal superior, y el sello de baja fricción del pistón, como se resume en la Figura 98.

6.3.1. Dos rodamientos lineales bushing o rodamientos similares deben utilizarse para guiar el pistón de carga minimizando la fricción y manteniendo la alineación.

6.3.2. El diámetro del pistón de carga debe ser lo suficientemente grande para minimizar la flexión lateral. En muchos laboratorios ha sido utilizado con éxito un diámetro mínimo del pistón de carga de 1/6 con respecto al diámetro de la probeta.

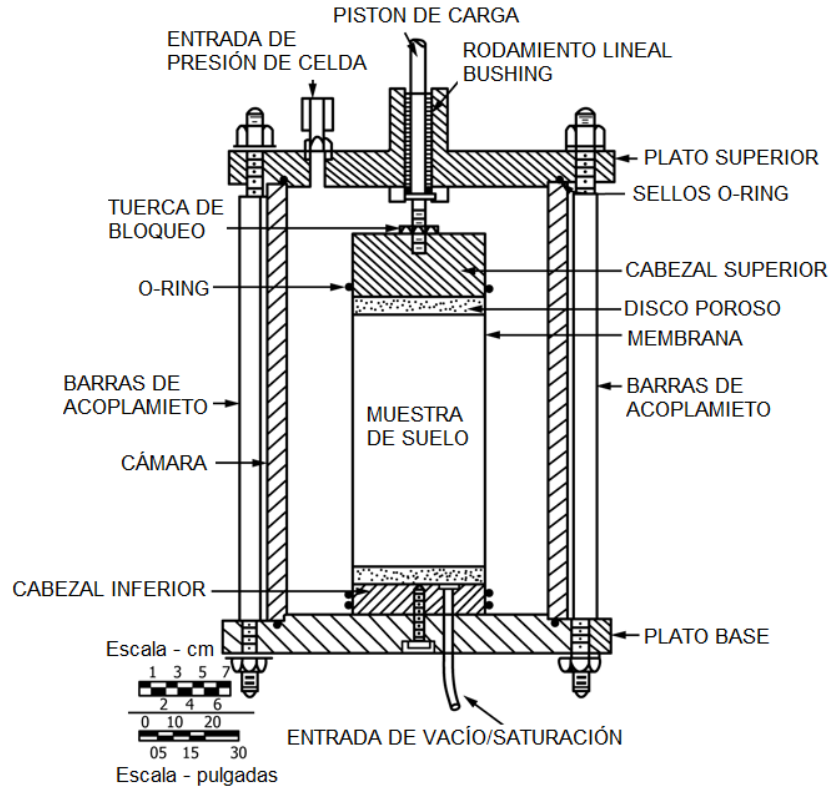


Figura 98. Cámara Típica de presión de Ensayo Triaxial Cíclico

6.3.3. El sello de pistón de carga es un elemento crítico en el diseño de la cámara triaxial para los ensayos cíclicos en suelos, si se emplea una celda de carga externa conectada a la barra de carga. El sello debe ejercer una fricción insignificante sobre el pistón de carga. La fricción máxima tolerable del pistón sin aplicar correcciones de carga se considera comúnmente que es de $\pm 2\%$ de la carga cíclica de única amplitud máxima aplicado en el ensayo, consulte la Figura 96. El uso de un sello se describe en 6.4.9 y por Ladd y Dutko,⁴ y Chan⁵ deberá cumplir con estos requisitos.

6.3.4. La alineación del cabezal superior e inferior es crítica, para evitar el aumento de estados de esfuerzos no uniformes en la probeta. Las Cámaras triaxiales con barras internas

⁴ Ladd, R. S., and Dutko, P., "Small Strain Measurements Using Triaxial Apparatus," Advances in The Art of Testing Soils Under Cyclic Conditions, V. Khosla, ed., American Society of Civil Engineers, 1985.

⁵ Chan, C. K., "Low Friction Seal System" Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, Vol 101, GT-9, 1975, pp. 991-995.

de acoplamiento han funcionado bien en una serie de laboratorios. Estas cámaras permiten la colocación de la pared de la cámara, después de que la probeta está en su lugar entre los cabezales de carga. Los límites aceptables de la excentricidad y el paralelismo de los cabezales se muestran en la Figura 99.

6.3.5. Dado que la carga axial en los ensayos triaxiales cíclicos está en extensión como en compresión, el pistón de carga deberá estar conectada rígidamente al cabezal superior por uno de los métodos que se muestran en la Figura 100.

6.3.6. Habrá una provisión para el drenaje de las probetas, tanto en los cabezales superior e inferior, para la saturación y la consolidación de la probeta antes aplicación de la carga cíclica.

6.4. *Variables no controladas del ensayo:*

6.4.1. *Sistema.* - El cumplimiento del sistema de carga, que consiste en todas partes (cabezal superior, cabezal inferior, piedras porosas, conexiones), donde se determinará la deformación de la muestra. Esta determinación deberá estar bajo ambas cargas de tensión y compresión.

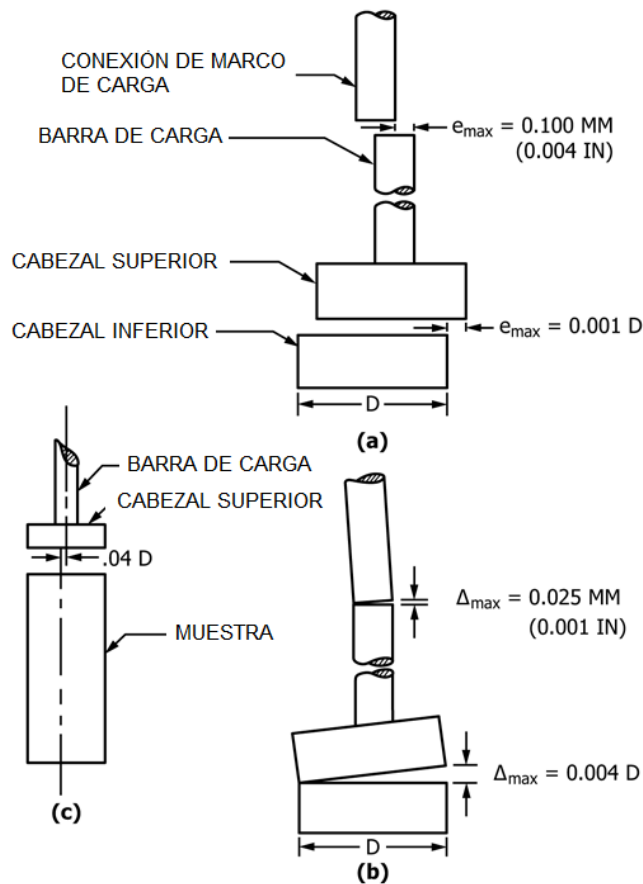


Figura 99. Límites aceptables de alineamiento del Pistón de Carga y Cabezales:
 (a) Excentricidad, (b) Paralelismo, (c) Excentricidad entre Cabezal superior y probeta

6.4.2. Inserte una muestra cilíndrica artificial de tamaño y longitud similar a la que se probara, en el lugar normalmente ocupado por la muestra. El módulo de Young secante de la muestra artificial debe ser un mínimo de diez veces el módulo secante de los materiales que se está probando. Los extremos de la muestra artificial deben ser planos y cumplir con las tolerancias de paralelismo como se muestra en la Figura 99(b).

Los materiales típicos usados para hacer las muestras artificiales son el aluminio y el acero. Las muestras artificiales deben fijarse rígidamente al sistema de carga. Esto se generalmente se realiza mediante cementación la muestra artificial a las piedras porosas o utilizando un epóxico, mortero o su equivalente. Antes del ensayo permitir que el cemento se seque completamente.

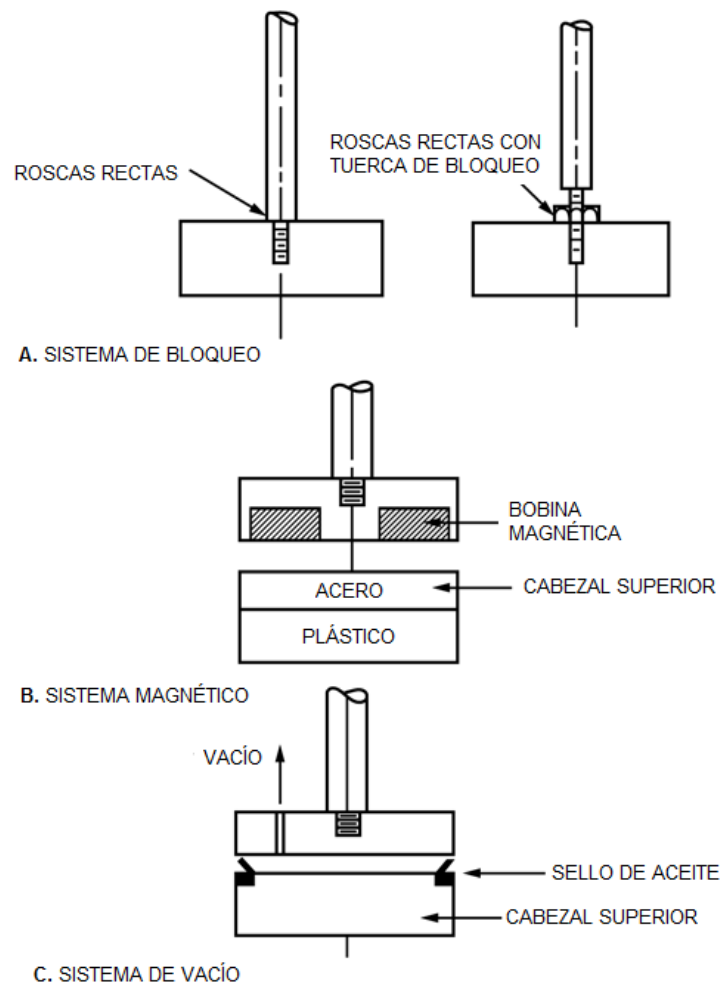


Figura 100. Conexiones típicas de los cabezales superiores

6.4.3. En la Figura 100 se muestran las conexiones típicas del cabezal superior que se han empleado. La conexión tiene como propósito proporcionar una fijación rígida, que es fácil de montar. Para los ensayos en materiales rígidos es necesario sistemas de bloqueo que se muestran en la Figura 100(a), pero la tuerca requiere que sea apretada con una llave. Si no es posible emplear una llave o si los ensayos son en materiales relativamente blandos, entonces se puede utilizar un sistema magnético (véase la Figura 100(b)) o un sistema de vacío (véase la Figura 100(c)).

6.4.4. Aplicar una carga estática tanto en tracción y compresión a la muestra artificial en incrementos de hasta dos veces la carga del ensayo previsto y tener en cuenta la deformación resultante.

6.4.5. Utilice la deformación máxima del sistema que se produce en cualquier carga ya sea en tensión o compresión.

6.4.6. Para cualquier carga dada ya sea en tensión o compresión, la mínima deformación que se puede monitorear y registrar durante un ensayo real es diez veces la deformación del sistema correspondiente, véase la

6.4.7.

6.4.8. NOTA 2.

NOTA 2. - Ejemplo de cálculo del cumplimiento de medida del sistema. Una deformación del sistema de 0,0001 mm se mide para una carga dada (ya sea tensión o compresión), entonces el mínimo cumplimiento del sistema de medición para una carga dada, es diez veces mayor (0,0001 mm \times 10 = 0,001 mm). Por lo tanto, si el espécimen real que se está ensayando tiene una altura de 127 mm [5,0 pulg.]. Entonces el mínimo correspondiente de la deformación axial (ϵ_a) que puede ser medido y reportado con este sistema es la siguiente:

$$\epsilon_a = \frac{0.001 \text{ mm}}{127 \text{ mm}} \times 100\% = 7.9 \times 10^{-4} \%$$

6.4.9. *El acoplamiento entre el cabezal superior y la muestra.* - El incumplimiento del acoplamiento puede ser reducirse por los siguientes métodos: el logro de la altura final deseada de muestras reconstituidas golpeando ligeramente y girando el cabezal en la parte superior de la muestra, o para ambas muestras reconstituidas e inalteradas, llenar vacíos entre

el cabezal de la muestra y la muestra con yeso de París, o un material poroso similar (referencia 7.3.3).

En el equipo triaxial cíclico se emplean dos dispositivos típicos del sellado del pistón que se muestran en la Figura 101. Tales arreglos son necesarios si se utilizan dispositivos de medición de carga externa. El rodamiento lineal / o-ring de cierre es el más común, véase la Figura 101. La principal dificultad con este sello es la fricción desarrollada entre la o-ring y la superficie del pistón de carga. Para reducir esta fricción pueden ser empleados dos métodos. Estos métodos son el sobredimensionamiento del o-ring y la congelación de o-ring con rociado electrónico luego descongelar y el pistón de carga cromado. El conjunto de sellado de soporte de aire se muestra en la Figura 101, produce la fricción mínima en el pistón de carga. La principal dificultad con este sello es el mantenimiento de la estrecha tolerancia entre las diapositivas y el pistón de carga. La acumulación de suciedad o la sal tiende a bloquear esta zona o aumentar la fricción. La limpieza es absolutamente necesario para el funcionamiento de este sello.

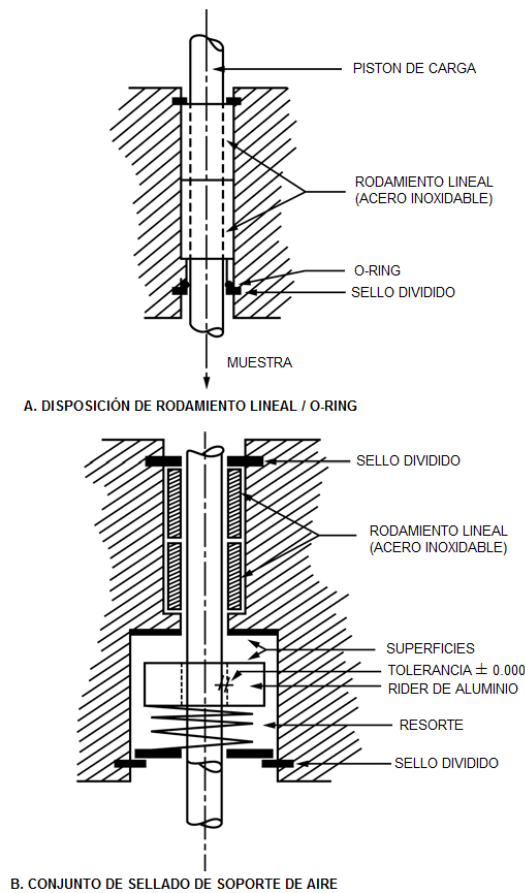
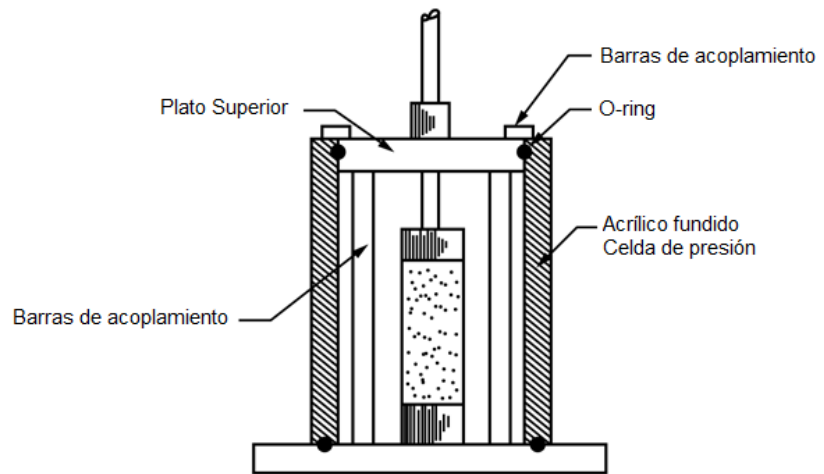


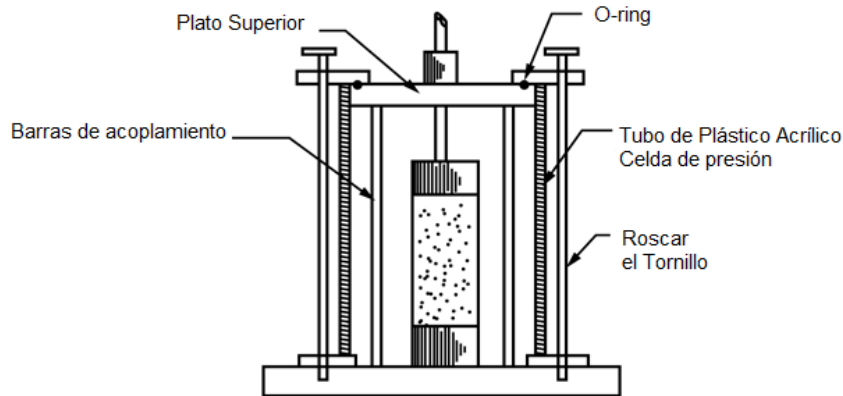
Figura 101. Arreglos típicos de sellado triaxial cíclico

6.4.10. En los diseños de celdas triaxiales los requisitos para alcanzar la alineación y reducir el cumplimiento de los cabezales se muestran en la Figura 102.

6.4.11. La implicación de un mal sistema de acoplamiento se ilustra en los resultados de los ensayos con un hipotético módulo secante normalizado frente a la magnitud de los resultados mostrados en la Figura 103. indica que a medida que aumenta el sistema del acoplamiento en el ensayo triaxial cíclico, mayor es la desviación de los valores del módulo de ensayo a baja deformación, como en el ensayo de columna resonante.



(a) Configuración de la celda de presión externa



(b) Configuración de la celda de presión integral

Figura 102. Las variaciones de diseño típicos del alineamiento de cámaras de presión triaxiales

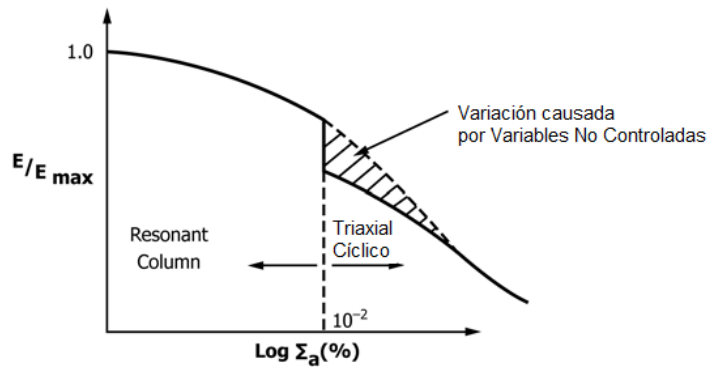


Figura 103. Impacto de las variables no controladas en el Sistema del Módulo frente a las curvas de deformación

6.5. Equipos de Registro:

6.5.1. Para monitorear el comportamiento de la muestra durante la carga cíclica son requeridos transductores de carga, de desplazamiento y de presión de poros; los dispositivos para el control de la presión de la cámara durante la carga cíclica son opcionales.

6.5.2. *Medición de la Carga.* - En general, para asegurar que se logra la precisión de la medida necesaria, la capacidad de la celda de carga no debe ser superior a cinco veces la carga total máxima aplicada a la muestra en el ensayo. Las características mínimas de rendimiento de la celda de carga se presentan en la Tabla 1.

6.5.3. *Medición de la deformación axial.* - Dispositivos de medida de desplazamiento como los transductores diferenciales de variación lineal (LVDT), transductores de deformación de tipo Potenciómetro y sensores de corriente de Foucault pueden usarse si cumplen los criterios requeridos de rendimiento (ver Tabla 1). Mediciones de deformación precisas requieren que el transductor puede montar correctamente para evitar la excesiva compresión del sistema mecánico entre el bastidor de carga, la célula triaxial, la célula de carga, y el pistón de carga.

6.5.4. *Dispositivos de Control de presión y vacío.* - La presión de la cámara (CP) y los dispositivos de control de la presión de retorno (BP) será capaz de aplicar y controlar las presiones dentro de ± 14 kPa [2 psi] para presiones efectivas de consolidación. El dispositivo de control de vacío será capaz de aplicar y controlar vacíos parciales dentro de ± 14 kPa [2 psi]. Los dispositivos pueden consistir en macetas de mercurio de auto-compensación, reguladores de presión neumática, presión combinación neumática y reguladores de vacío, o cualquier otro dispositivo capaz de aplicar y controlar las presiones o vacíos parciales a las tolerancias requeridas.

6.5.5. *Dispositivos de medición presión y al vacío.* - La presión de la cámara (CP), presión de retorno (BP), y los dispositivos de medición de vacío deberá ser capaz de medir presiones o vacíos parciales a las tolerancias indicadas en la Tabla 1. Pueden consistir en manómetros de presión, transductores de presión electrónicos, o cualquier otro dispositivo capaz de medir la presión, o vacíos parciales a las tolerancias establecidas. Si se utilizan dispositivos independientes para medir la presión de la cámara (CP) y la presión de retorno (BP), los dispositivos deben ser calibrados de forma simultánea y comparando con la misma fuente de presión. Dado que la presión de la cámara y la presión de retorno son las presiones tomadas en la mitad de la altura de la muestra, puede ser necesario ajustar la calibración de los dispositivos para reflejar la carga hidráulica de líquido en los sistemas de cámara y de control de presión de retorno (ver Figura 95).

6.5.6. *El dispositivo de presión de poros.* - La presión de poro de la muestra también se medirá según las tolerancias indicadas en la Tabla 30. Durante la carga cíclica en una muestra saturada la presión del intersticial se mide de una manera tal que el menor se permite agua como sea posible para ir dentro o fuera de la muestra. Para lograr este requisito un transductor de presión electrónico muy rígida debe ser utilizado. Con un transductor de presión electrónico de la presión del agua intersticial se lee directamente. El dispositivo de medición debe tener una rigidez de todas las piezas montadas del sistema de medición de la presión de agua de los poros con relación al volumen total de la muestra que cumplan el siguiente requisito:

$$\text{Ecuación 1: } \frac{\Delta V/V}{\Delta u} = 3.2 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{kN}} \quad (2.2 \times 10^{-5} \frac{\text{in}^2}{\text{lb}})$$

Dónde:

ΔV = cambio en el volumen del sistema medición del agua intersticial debido a un cambio de presión de poro, mm³ [pulg³],

V = volumen total de la muestra, mm³ [in.³], y

Δu = cambio en la presión de poro, kPa [psi].

NOTA 3. - Para cumplir con el requisito de la rigidez, la tubería entre la muestra y el dispositivo de medición debe ser corto y grueso de paredes con agujeros pequeños. Termoplástico, cobre y tubo de acero inoxidable se han utilizado con éxito en muchos laboratorios.

6.5.7. *Los dispositivos de medición de cambio de volumen.* - El volumen de agua que entra o sale de la muestra se medirá con una precisión de $\pm 0,05\%$ del volumen total de la muestra. El dispositivo de medición de volumen es por lo general una bureta, pero puede ser cualquier otro dispositivo que satisfacen el requisito de precisión. El dispositivo debe ser capaz de soportar la presión máxima de la cámara.

Tabla 30. Adquisición de datos, características de respuesta mínimos para los Ensayos de Resistencia triaxial cíclica

1. Registradores analógicos}
 Velocidades de registro: 0,5 a 50 cm/s [0.2 a 20 pulg./s]
 La precisión del sistema (incluyendo linealidad e histéresis): 0,5%^A
 Respuesta de frecuencia: 100 Hz
 2. Registradores Digitales
 Frecuencia de muestreo mínimo: 40 puntos de datos por ciclo
 3. Transductores de medida

	Celda de Carga	Transductores de desplazamiento (LVDT) ^B	Presión de Poros
Mínimo de sensibilidad, mv/v	2	0.2 mv/0.025 mm/v (AC LVDT) 5 MV/0.025 MM/V (DC LVDT)	2
No linealidad, % de la escala completa	± 0.25	± 0.25	± 0.5
Histéresis, % de la escala completa	± 0.25	0.0	± 0.5
Los efectos térmicos sobre el desplazamiento de cero o la sensibilidad	± 0.005	± 0.02
% de la escala completa / ° C [° F]	[± 0.025]	[± 0.01]
Deflexión máxima	0.125	....	....
valor nominal en mm [pulg.]	[0.005]		
Características de cambio de volumen mm ³ /KPa [pulg ³ /psi]	....	....	0.24 [1.0x10 ⁻⁴]

^A Sistema de respuesta de frecuencia, la sensibilidad y la linealidad son funciones de la interfaz sistema electrónico, el rendimiento del sistema de acondicionamiento de la señal utilizado, y otros factores. Por lo tanto, es una necesidad para controlar y calibrar los parámetros anteriores como un sistema total y no sobre una base de componentes.

^B LVDT, a diferencia de medidores de deformación, no se puede suministrar con los datos de calibración significativos. la sensibilidad del sistema es una función de la frecuencia de excitación, la carga de cable, características de la fase del amplificador, y otros factores. Es necesario calibrar cada LVDT sistema de cable-instrumento después de la instalación, utilizando un estándar de entrada conocida.

6.6. *Cabezal del espécimen y base.* - El cabezal superior de la muestra y la base se diseñarán para proporcionar un drenaje por ambos extremos de la muestra. Serán construidos de un material rígido, no corrosivo, e impermeable, y cada uno deberá, a excepción de la disposición de drenaje, tener una superficie plana circular de contacto con los discos porosos y una sección transversal circular. El peso del cabezal superior y de la piedra porosa superior

del espécimen deberá ser inferior a 0,5% de la carga axial aplicada en la falla de la muestra determinada a partir de un ensayo triaxial estático no drenado. El diámetro del cabezal superior y de la base será igual al diámetro inicial de la muestra. Para evitar el movimiento lateral o la inclinación la base del espécimen debe estar conectado a la cámara de compresión triaxial, y el cabezal superior de la muestra deberá ser diseñado de tal manera que la excentricidad al contacto entre el pistón y el cabezal superior con respecto al eje vertical de la muestra no exceda $0,04 D$ ($D =$ diámetro de la muestra) como se muestra en la Figura 99(c). La superficie cilíndrica de la base de la muestra y el cabezal superior que hace contacto con la membrana para formar un sello deberá ser lisa y libre de ralladuras.

6.7. *Piedras porosas.* – La muestra debe estar separada del cabezal superior y de la base por piedras porosas rígidas incrustadas o fijadas usando un epóxico sobre el cabezal superior y la base y de un diámetro igual al de la muestra (evitando cuidadosamente el área alrededor de los conductos de drenaje de los cabezales) o tornillos en el caso de discos porosos de metal sinterizado. El coeficiente de permeabilidad de las piedras porosas deberá ser aproximadamente igual a la de la arena fina 1×10^{-3} mm/s [$3,9 \times 10^{-5}$ in/s]. Las piedras porosas se probarán regularmente haciendo pasar aire o agua a presión a través de ellas para determinar si han obstruirse. Se debe tener cuidado para asegurar que los elementos porosos de los cabezales de extremo están abiertos lo suficiente para no impedir el drenaje o poro movimiento del agua a partir de la muestra en el cambio de volumen o presión de poro dispositivos de medición, y con aberturas suficientemente fina para evitar el movimiento de la muestra.

6.8. *Papeles de filtro.* - Al determinar los valores de módulos de especímenes rígidos, los discos de papel de filtro de un diámetro igual a la de la muestra no pueden ser colocados entre los discos porosos y espécimen para reducir al mínimo la obstrucción de los discos porosos para evitar la inclusión de una capa blanda en el sistema. Los papeles de filtro se pueden usar siempre y cuando no causen variables no controladas al sistema (

6.9.

6.10. NOTA 2).

6.11. *Tiras de papel de filtro.* - son utilizados por muchos laboratorios para disminuir el tiempo requerido para el ensayo. Si se utilizan tiras de filtro, estas deberán ser insolubles en agua. El coeficiente de permeabilidad del papel de filtro no deberá ser inferior a 1×10^{-4} mm/s [$3,9 \times 10^{-6}$ in./s] para una presión normal de 550 kPa [80 psi]. Para evitar la tensión

circunferencial, las tiras de papel filtro no deben cubrir más de 50% del perímetro de la muestra.

6.12. *Membrana de caucho.* - La membrana de caucho utilizada para envolver la muestra deberá proporcionar una protección íntegra contra fugas. Para comprobar si hay fugas en una membrana, la membrana se colocará alrededor de un cilindro sellado en ambos extremos con o-rings, sometidos a una pequeña presión de aire en el interior y sumergidas en agua. Si aparecen burbujas de aire en cualquier punto de la membrana esta deberá ser rechazada. Para ofrecer una restricción mínima para la muestra, el diámetro de la membrana sin estirar será de entre 90 y 95% de la de la muestra. El espesor de la membrana no será superior a 1% del diámetro de la muestra. La membrana se sella en el cabezal y en la base de la muestra con o-rings, el diámetro interior sin tensión debe ser entre 75 y 85% del diámetro del cabezal y base, o por otros medios que proporcionen un sello positivo.

6.13. *Válvulas.* – Los cambios en el volumen debido a la apertura y cierre de las válvulas puede producir mediciones inexactas de cambio de volumen y presión de poro. Por esta razón, las válvulas en el sistema de drenaje de la muestra deben ser del tipo que produce cambios mínimos de volumen debido a su operación. Se puede suponer que una válvula produce un cambio mínimo de volumen si se abre o se cierra la válvula en un sistema cerrado, sistema de presión de poros saturado no induce un cambio de presión mayor que 0,7 kPa [0,1 psi]. Todas las válvulas deben soportar presiones aplicadas sin fugas.

NOTA 4: Se han encontrado que las válvulas de bola pueden proporcionar las características mínimas del cambio de volumen; sin embargo, puede ser utilizadas cualquier otro tipo de válvula que tenga las características requeridas de cambio de volumen.

6.14. *Dispositivos de medida del tamaño de la probeta.* - Los dispositivos utilizados para determinar la altura y el diámetro de la muestra deberán medir las dimensiones respectivas dentro de 0,1% de la dimensión total, y estarán contruidos de tal manera que su uso no altere la muestra.

NOTA 5: Las cintas circunferenciales de medición se recomiendan sobre los calibradores para medir el diámetro. Mida la altura con una dial montado en un soporte.

6.15. *Extractor de muestras.* - Si una extractora de muestra es usada para extraer la muestra del tubo de muestreo, la extractora deberá ser capaz de extraer el núcleo del suelo

desde del tubo de muestreo a una velocidad uniforme en el mismo sentido de recorrido como la muestra entró en el tubo y con la mínima perturbación de la muestra, véase 7.3.2. Si el núcleo del suelo no se extrae verticalmente, se debe tener cuidado para evitar esfuerzos de flexión en el núcleo debido a la gravedad. Las condiciones al momento de retirar las muestras pueden dictar la dirección de extracción, pero la preocupación principal es minimizar el grado de perturbación.

6.16. *Reloj automático.* - Se utilizará un dispositivo temporizador que indique el tiempo transcurrido del ensayo al 1s más cercano, para obtener datos de consolidación (véase 9.4.2).

6.17. *Dispositivo de pesaje.* - El dispositivo de pesaje de la muestra deberán determinar la masa de la muestra con una precisión de $\pm 0,05\%$ de la masa total de la muestra.

6.18. *Dispositivo de desaireación de Agua.* -, El agua que se utiliza para saturar la muestra, se puede reducir la cantidad de gas disuelto (aire) en el agua por ebullición, por calentamiento y la aplicación de vacío, proceso de cavitación en vacío, o por cualquier otro método que va a satisfacer el requisito para saturar la muestra dentro de los límites impuestos por la presión de retorno máxima disponible y el tiempo para realizar el ensayo.

6.19. *Entorno del Ensayo.* - La consolidación y la carga cíclica del ensayo se llevará a cabo en un ambiente donde las fluctuaciones de temperatura sean menores de $\pm 4^{\circ}\text{C}$ [$\pm 7.2^{\circ}\text{F}$] y sin contacto directo con la luz solar.

6.20. *Varios Aparatos.* – Herramientas de recorte de la muestra y herramientas de tallado que incluye un hilo de sierra, regla de acero, molde dividido en dos partes, aparato para preparar especímenes compactados, herramienta de colocación o-rings, dispositivo de succión de membrana, capsulas de contenido de humedad, y la hoja de datos se facilitará cuando sea necesario.

6.21. *Unidades de Adquisición de datos.* - El comportamiento de las muestras se podrá registrar por grabadores electrónicos digitales o analógicos x-y. Será necesario calibrar el dispositivo de medición a través de la grabadora utilizando los estándares de entrada conocidos.

6.22. *Panel de Control de presión Se requiere.* - Un sistema para presurizar la celda de presión y la muestra. Un sistema de tuberías típico para este aparato se presenta en la Figura 104.

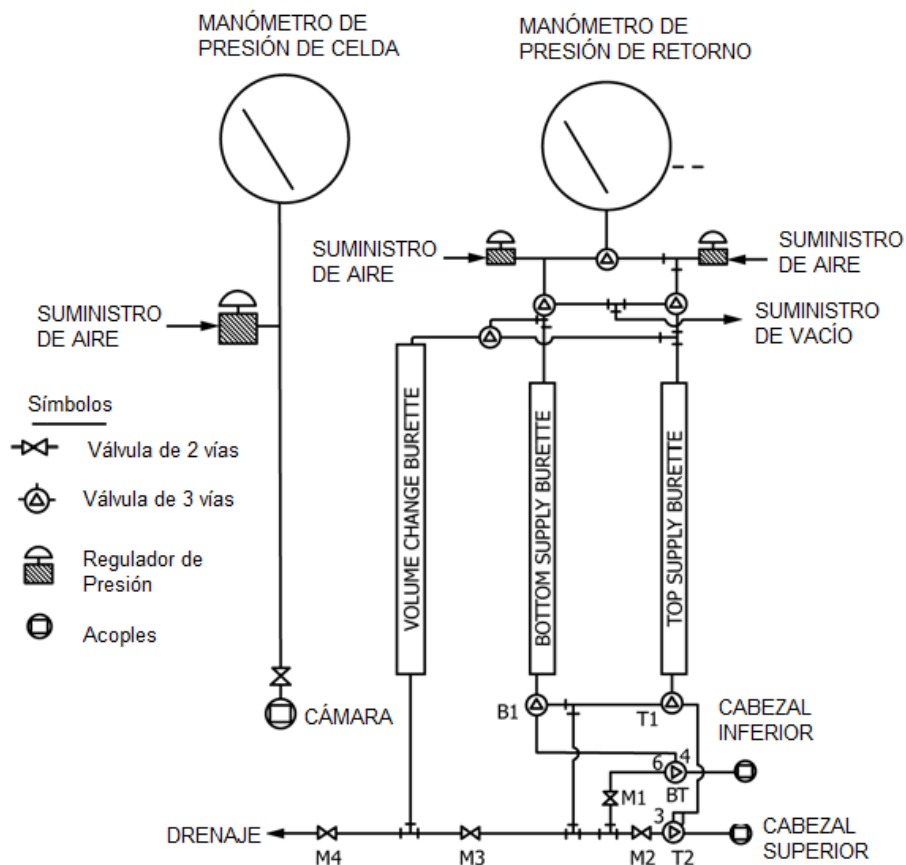


Figura 104. Diagrama del panel de control

6.23. *EL agua de los poros.* - A menos que se especifique lo contrario por el usuario, el agua potable se utilizará como el agua de los poros en todos los ensayos.

7. Preparación de los especímenes

7.1. La probeta debe ser cilíndrica y tener un diámetro mínimo de 36 mm [1.4 in.]. La relación altura-diámetro estará entre 2 y 2,5. El tamaño de máximo de partícula debe ser menor que 1/6 del diámetro de la muestra. Si, después de completar el ensayo, se encuentra partículas de mayor tamaño, basado en la observación visual, indicar esta información en el informe del ensayo en virtud de las observaciones.

NOTA 6: Si se encuentran partículas de mayor tamaño en la muestra después del ensayo, se puede realizar un ensayo de granulometría de acuerdo con la norma ASTM D422 para confirmar la observación visual y los resultados se aportan con el informe del ensayo (véase 12.1.4).

7.2. Tenga un cuidado especial en el muestreo y transporte de las muestras que se utilizará para ensayos triaxiales cíclicos ya que la calidad de los resultados disminuye en

gran medida con la perturbación de la muestra. La Norma D1587 cubre los procedimientos y equipos que pueden usarse para obtener muestras inalteradas para los ensayos.

NOTA 7: Información sobre la preservación y el transporte de muestras de suelo se puede encontrar en las Prácticas D4220.

7.3. *Muestras inalteradas.*

7.3.1. Para el ensayo las muestras inalteradas pueden ser cortados de cualquier manera que minimiza su perturbación, manteniendo la densidad y el contenido inicial de agua de la muestra. No importa qué método de corte se utilice, las caras superior e inferior de la muestra deben ser planas y paralelas como se muestra en la Figura 99. Para lograr estos criterios se ha demostrado un procedimiento para especímenes congelados que es la siguiente:

NOTA 8: Si es posible, preparar muestras talladas en una habitación de humedad controlada. Si las muestras no se preparan en una habitación con control de humedad, esto debe tenerse en cuenta en el informe de resultados del ensayo en virtud de las observaciones. Haga todo lo posible para evitar que cualquier cambio en el contenido de humedad del suelo.

7.3.2. Si una fresadora está disponible, el tubo de muestreo se puede cortar longitudinalmente en dos lugares diametralmente opuestos usando una alimentación rápida, y luego se corta en secciones con una sierra de arco eléctrico. Si no se utiliza una máquina de fresado, la sección deseada se corta con una sierra de arco eléctrico o un cortador de tubo con los collares de refuerzo. Los extremos cortados del tubo se limpian de las rebabas, y el espécimen es empujado desde el tubo. Los extremos de la muestra deben ser recortadas lisas y perpendicular a la longitud usando un molde dividido en dos partes. Se debe tener cuidado para asegurar que la muestra permanece congelada durante la operación de recorte. Coloque la muestra en la cámara triaxial y coloque una membrana de goma. Aplicar un vacío parcial de 35 kPa [5 psi] para la muestra y medir el diámetro y la altura de la muestra de acuerdo con el método dado en el literal 9.1 a fin de calcular el volumen inicial de la muestra. Después de que el espécimen ha descongelado, volver a medir la muestra para determinar condiciones inmediatamente antes de la saturación. Cambio de volumen durante la descongelación indica que pueden haber sido utilizadas técnicas de preparación de muestras o especímenes inadecuados.

7.3.3. Si la compresión o cualquier tipo de perturbación apreciable sería causado por el dispositivo de eyección, dividir el tubo de muestra longitudinal o cortarla en pequeñas secciones para facilitar la extracción de la muestra con la perturbación mínima.

7.3.4. Las muestras deben ser de sección transversal circular uniforme con extremos perpendiculares al eje de la muestra. Dónde guijarros o desmoronamiento resultado de irregularidad excesiva en los extremos, paquete de tierra de los adornos en las irregularidades para producir la superficie deseada. Un procedimiento alternativo sería la de limitar los especímenes con un espesor mínimo de yeso de París, Hydrostone, o material similar. En este caso, disposiciones para el drenaje de muestras tendrían que ser proporcionada por los agujeros en la tapa. Cuando las condiciones de especímenes permiso, un torno vertical del suelo que se acomoda a la muestra total puede ser utilizado como un ayudante en el tallado de la muestra al diámetro requerido.

7.4. *Muestras reconstituidas:*

7.4.1. Método a través del flujo de agua. - Este método de preparación de muestras de un suelo granular donde se satura inicialmente en un recipiente, se vertió a través del agua en una membrana llena de agua colocada en un molde de conformación, y luego densificada a la densidad requerida por la vibración, consulte referencia por Chaney y Mulilis.⁶

NOTA 9: A una muestra se puede hacer vibrar ya sea en el lado del molde o de la base de la celda usando una variedad de aparatos. Estos incluyen los siguientes: golpecitos con un implemento de algún tipo tal como una varilla o cuchara de metal, vibrador neumático, o herramienta de grabado eléctrica.

7.4.2. *Método de proyección en seco (Dry Screening Method).* - Para este método un tubo con una pantalla unida a un extremo se coloca dentro de una membrana estirada sobre un molde de formación. Una arena seca uniforme se vierte entonces en el tubo. El tubo luego se retira lentamente de esta membrana / molde permitiendo que la arena pase a través de la pantalla de la formación de un espécimen. Si se desea una mayor densidad de la arena del molde se puede hacer vibrar.

7.4.3. *Método de vibraciones seco o húmedo (Dry or Moist Vibration Method).* - En este procedimiento de compactación de materiales granulares húmedos o secados en horno, en

⁶ Chaney, R., and Mulilis, J, "Wet Sample Preparation Techniques," Geotechnical Testing Journal, ASTM, 1978, pp. 107–108.

capas (típicamente de seis a siete capas) en un molde partido con una membrana unida al cabezal inferior de la celda triaxial. Pesar previamente el material para cada capa y compactar por vibración a la densidad seca requerida para obtener el valor prescrito. Escarifique la superficie del suelo entre las capas. Cabe señalar que, para obtener una densidad uniforme, las capas inferiores tienen que ser ligeramente menos compactadas, ya que la compactación de cada capa densifica la arena de las capas inferiores. Después de la última capa parcialmente compactada, poner la tapa superior en su lugar y continuar con la vibración hasta que se obtiene la densidad de masa seca deseada.

7.4.4. *Método de apisonamiento (Tamping Method)*. - Para este procedimiento aplicado en suelos cohesivo o granulares, secos al aire o húmedos, apisonar en capas dentro de un molde. La única diferencia entre el método de apisonamiento y el método de vibración es que cada capa se compacta por apisonamiento con un pie de compactación en lugar de con un vibrador lateral, se refiere a la referencia por Ladd, R. S.⁷

7.4.5. Después de conformar la muestra, coloque el cabezal en su lugar y sellar la muestra con o-rings o bandas de goma después de colocar la membrana sobre el cabezal superior y la base. A continuación, aplicar un vacío parcial de 35 kPa [5 psi] a la muestra y quitar el molde de la formación. Si la prueba de confinamiento a la presión es mayor que 103 kPa [14,7 psi], un vacío completo se puede aplicar a la muestra en etapas previas a la separación del molde.

8. Colocación de la probeta

8.1. Las variaciones en las técnicas de configuración de muestra dependerán principalmente de si la muestra está inalterada o remodelada. Si la muestra está inalterada que se va a recortar y luego se coloca en la celda triaxial. Por el contrario, si se remodela la muestra esta puede ser recompactada dentro o fuera del cabezal inferior de la celda triaxial. La determinación de qué procedimiento a utilizar dependerá de si la muestra puede mantenerse a sí misma independiente de la membrana de goma de caucho y si puede someterse a un manejo limitado sin sufrir alteraciones.

8.2. Probeta inalterada:

8.2.1. Coloque la probeta en el cabezal inferior de la celda triaxial.

8.2.2. Coloque el cabezal superior sobre la probeta.

⁷ Ladd, R. S., "Preparing Test Specimens Using Under-Compaction," Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol 1, No. 1, March, 1978, pp. 16–23.

8.2.3. Estirar una membrana de caucho con fuerza sobre la superficie interior de colocador de membranas. Aplicar un vacío para obligar a la membrana se pegue contra la superficie interior del colocador de membranas y luego deslizar cuidadosamente sobre la muestra. Retire el vacío desde colocador de membranas. Deslice la membrana del colocador de membranas el cabezal superior e inferior, véase la

8.2.4.

8.2.5. NOTA 10.

NOTA 10: La muestra deberá ser colocada en la membrana de caucho y la membrana debe sellar el espécimen en los cabezales superior e inferior inmediatamente después de proceso de corte para evitar pérdida de humedad. Alternativamente, se pueden utilizar cabezales de plástico superiores e inferiores hasta que la celda triaxial esté disponible.

8.2.6. Retire el colocador de membranas.

8.2.7. Colocar los o-rings alrededor de los cabezales superior e inferior.

8.2.8. Fijar las líneas de presión del cabezal superior e inferior al panel de control de presiones.

8.3. *Probetas Reconstituidas:*

8.3.1. *Probetas no saturadas densas.* - Si espécimen se compacta en un aparato alejado de la cámara triaxial, a continuación, tratar la muestra de manera similar a la descrita en 8.2 a 8.3

8.3.2. *Para otras probetas.* - Para evitar la alteración de muestras sueltas no saturadas, muestras sueltas o densas saturadas, Es necesario que sean recompartadas directamente sobre el cabezal inferior de la cámara triaxial.

8.3.2.1. Coloque la membrana de caucho en la placa inferior de la cámara triaxial.

8.3.2.2. Asegurar la membrana al cabezal inferior con o-rings.

8.3.2.3. Colocar el molde dividido encima del cabezal inferior con la membrana en su interior.

8.3.2.4. Estirar la membrana con fuerza sobre la superficie interior del molde dividido (tensado la membrana) y sobre el extremo superior del molde.

8.3.2.5. Aplicar un vacío al molde para mantener la membrana herméticamente contra el molde durante la operación de compactación.

8.3.2.6. Compactar el espécimen dentro de la membrana utilizando cualquiera de las técnicas descritas en 7.4.

8.3.2.7. Después de que la muestra es terminada, coloque el cabezal superior sobre la muestra y estire la membrana sobre el cabezal.

8.3.2.8. Asegurar la membrana al cabezal superior con o-rings.

8.3.2.9. Asegurar las mangueras de presión al cabezal superior e inferior para al panel de control.

8.3.2.10. Retire el molde dividido.

NOTA 11: Si la muestra no es capaz de sostenerse por sí mismo, será necesario aplicar un pequeño vacío a través de una cámara de burbujas, ver Figura 105. Se recomienda aplicar un vacío menor que la mitad del esfuerzo efectivo final deseado. Si siguen burbujas presentes, comprobar si hay fugas causadas por malas conexiones, agujeros en la membrana, o sello imperfecto en los cabezales superior o inferior. Las fugas a través de agujeros en la membrana con frecuencia se pueden eliminar mediante el uso de una segunda membrana. Si las burbujas están ausentes, se ha obtenido un sello hermético.

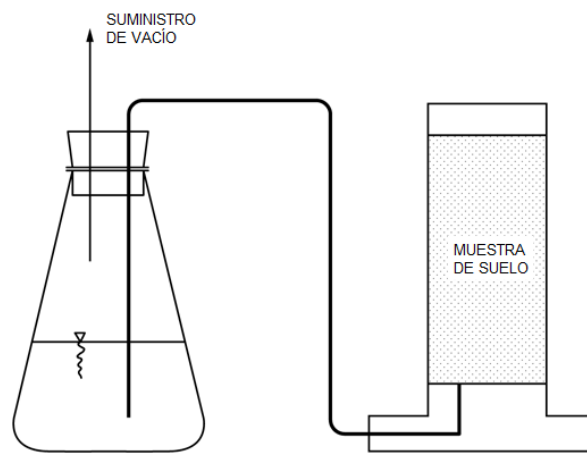


Figura 105. Método de aplicación de vacío a las muestras de suelo

8.3.2.11. Coloque barras de acoplamiento y el plato superior.

8.3.2.12. Insertar el pistón de carga a través del rodamiento y conectan al cabezal superior. Es importante que la conexión del pistón de carga a el cabezal superior sea ajustada para eliminar cualquier variable no controlada.

8.3.2.13. Coloque y fije la cámara en su posición.

8.3.2.14. Coloque la cámara triaxial en el marco de la carga cíclica.

8.3.2.15. Llene la cámara con el fluido de presión.

9. Procedimiento

9.1. *Generalidades.* - Debido a la amplia variedad de equipos triaxiales actualmente en uso para ensayos cíclicos en suelos, no es posible fijar un procedimiento de ensayo paso a paso que sea compatible con las características de todos los equipos. Los siguientes procedimientos, sin embargo, serán comunes a cualquier ensayo triaxial cíclico en especímenes saturados o no saturados.

9.2. *Medición de las probetas.* - Debido a que la densidad influye significativamente en la resistencia cíclica, es necesario la determinación precisa de la densidad y cambio de volumen durante la saturación y la consolidación. Base se retiran las condiciones iniciales de muestras de mediciones tomadas después de que el molde (con el espécimen al vacío). Tomar las medidas de diámetro para especímenes de hasta 150 mm [6 pulg.] usando una cinta circunferencial con una aproximación de 0,025mm [0.001 pulg.]. Para especímenes más grandes se miden con una aproximación de 0,25mm [0,01 pulg.]. Tomar mediciones de la altura con una aproximación de 0.025mm [0.001 pulg.] para las muestras de 150mm [6 pulg.] O menos de diámetro y 0,25 mm [0,01 pulg.]. Para especímenes que tienen diámetros mayores de 150 mm en cuatro lugares, y las masas de medida de 0,01 g de muestras de 63,5 mm [2,5 pulg.] o menos de diámetro y 0,1 g de especímenes que tienen diámetros mayores de 63,5 mm [2,5 pulg.]. Determinar el contenido de humedad de las muestras recortadas con una aproximación de 0,1% (ver Métodos de Ensayo D2216).

9.3. *Saturación.* - Siga los procedimientos que se describen en esta sección si se desea ensayar una muestra saturada. Si se desea ensayar una muestra en una condición no saturadas proceder a la sección 9.3.2.5. El objetivo de la etapa de saturación en el ensayo es llenar todos los vacíos de la muestra con agua sin crear presiones internas en la muestra o permitiendo que el espécimen se expanda (a menos que la muestra se expanda bajo el esfuerzo efectivo de consolidación deseado). La saturación se logra generalmente mediante la aplicación de una presión de retorno para que el agua de muestras de poro para conducir el aire en la solución después de cualquiera de: aplicar vacío al sistema de la muestra y el drenaje seco (líneas, discos porosos, dispositivo de presión de poro, filtro de tiras o jaula, y discos) y permitiendo que el agua desaireada para inundar el sistema mientras se mantiene el vacío; o saturar el sistema de drenaje por ebullición los discos porosos en agua y permitiendo que el agua-de aireado fluya a través del sistema antes de montar el espécimen.

Cabe señalar que el tiempo se requiere para que el aire se disuelva en la solución. En consecuencia, la eliminación de tanto aire como sea posible del agua de los poros y el sistema antes de aplicar de nuevo la presión disminuirá la cantidad de aire que debe disolverse en solución, disminuyendo potencialmente la contrapresión requerida para la saturación. Además, el aire que queda en el sistema de drenaje de muestras y justo antes de la aplicación de la presión de retorno se disuelva más fácilmente si desaireación-se utiliza agua. Muchos procedimientos se han desarrollado para llevar a cabo la saturación con la presión de retorno. Se ha encontrado el siguiente procedimiento eficaz para ensayar muestras bajo esfuerzos efectivos de consolidación superiores a 103 kPa [14,7 psi]. Para las muestras que requieren esfuerzos de consolidación menores a 103kPa [14,7 psi], todos los esfuerzos dados en los literales 9.3.2 - 9.3.2.5 deben reducirse a un nivel que no cause sobre consolidación.

9.3.1. Aplicar el más alto vacío a disposición de la muestra a través del cabezal superior de la muestra y después del montaje y llenado de la cámara triaxial con el líquido, permiten que el agua desaireada se filtre lentamente a través de la muestra desde la parte inferior. El movimiento ascendente del agua debe ser lo suficientemente lento para minimizar el atrapamiento de las posibles burbujas de aire y para evitar pretensado significativo de la muestra. También tenga cuidado asegurando que los finos no se laven de la muestra.

9.3.2. Cuando el agua aparece en la bureta conectada al cabezal superior de la muestra, llenar el resto de la bureta con agua desaireada y reducir al mismo tiempo el vacío y aumentar la presión de la cámara hasta que el agua de poro de muestras se encuentra a presión atmosférica y la presión de la cámara sea por lo menos en 103 kPa [14,7 psi]. La presión de retorno del espécimen en etapas, manteniendo un esfuerzo de confinamiento efectivo lo suficiente para minimizar los cambios de volumen (hinchazón) de la muestra durante la saturación. Condiciones isotrópicas de esfuerzos se pueden mantener durante de nuevo presionando mediante la adición de carga axial al pistón de acuerdo con el procedimiento descrito en 9.4. Evaluar el grado de saturación a intervalos apropiados mediante la medición del parámetro B de Skempton.

9.3.2.1. *Medición del parámetro B de la presión de poros.* - El parámetro B se define por la siguiente ecuación:

Ecuación 2:
$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3}$$

Dónde:

Δu = Cambio de la presión de poros de la muestra, que se produce como resultado de un cambio en la presión de celda cuando las válvulas de drenaje de la muestra están cerradas, y

$\Delta\sigma_3$ = el cambio en las presiones de celda.

9.3.2.2. El valor del parámetro B de la presión de poro se determinará de la siguiente manera: Cierre las válvulas de drenaje de la muestra y aumentar la presión de la celda a 35 kPa [5 psi].

NOTA 12: El valor del incremento de la presión de celda debe ser inferior al esfuerzo efectivo deseado.

9.3.2.3. Determinar y registrar después de 2 minutos aproximadamente el valor máximo de la presión de poros inducida. Para muchas muestras, la presión de poro puede disminuir después de la respuesta inmediata y luego aumentar ligeramente con el tiempo. Si esto ocurre, los valores de Δu deben ser trazados con el tiempo y se utiliza la presión de poro asintótica como el cambio en la presión de poro. Un gran aumento de Δu con tiempo con valores de Δu superiores a $\Delta\sigma_3$, puede indicar una fuga de fluido de la celda a la muestra. La disminución de los valores de Δu con el tiempo puede indicar una fuga en una parte del sistema de medición de la presión de poro se encuentra fuera de la celda o incompleta saturación.

9.3.2.4. Calcular el valor de B usando la ecuación.

9.3.2.5. volver a aplicar la misma presión de confinamiento (presión de celda menos presión de retorno) como existía antes de la indicación de valor B mediante la reducción de la presión de la cámara en un 35 kPa [5 lb / pulg²] o, alternativamente, el aumento de la presión de retorno de 35 kPa [5 lb / pulg²]. Si B sigue aumentando a medida que aumenta la presión de retorno continuar con la saturación de contrapresión. Si B es igual o mayor que 0,95 o si se gráfica B frente a la presión retorno indica que no hay más aumento de B con el aumento de la presión de retorno, iniciar la consolidación.

9.4. *Consolidación.* - El objetivo de la etapa de consolidación en el ensayo es permitir a la muestra para alcanzar un equilibrio en un estado drenado por el esfuerzo efectivo de

consolidación para el que se requiera en el ensayo. Se obtienen los datos durante la consolidación para determinar que se ha completado la consolidación.

9.4.1. Durante el proceso de consolidación, medir el cambio en la altura de la muestra con una aproximación de 0,025mm [0.001 pulg.]. Además, durante la consolidación una carga axial se debe aplicar al pistón (que se atornilla en el cabezal superior) con el fin de compensar la fuerza de levantamiento sobre el pistón de carga de modo que la muestra se mantiene isotrópica u otro estado conocido de esfuerzos. La carga estática para mantener una condición isotrópica puede calcularse a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 3:
$$P_s = \sigma_3 A_r - M_{\text{varilla-cabezal}}g$$

Dónde:

$M_{\text{varilla-cabezal}}g$ = peso del pistón de carga y el cabezal superior,

P_s = carga de corrección de pistón estático,

σ_3 = presión de celda, y

A_r = área de la sección transversal del pistón de carga.

9.4.2. Con las válvulas de drenaje de la muestra cerradas, mantenga constante la máxima presión de retorno y aumentar la presión de celda hasta que la diferencia entre la presión de celda y la presión de retorno sea igual a la presión efectiva de consolidación deseada.

NOTA 13-En los casos en que cantidades significativas de finos pueden ser lavados de la muestra debido a los altos gradientes hidráulicos iniciales, que se pueden aumentar gradualmente la presión de la cámara a la presión total deseada durante un periodo de hasta 10 minutos con las válvulas de drenaje abierto. Si se hace esto, el registro de datos debe comenzar inmediatamente después de que se alcanza la presión total.

NOTA 14-En ciertas circunstancias, la consolidación por etapas puede ser deseable, especialmente cuando se utiliza el drenaje radial.

9.4.3. Obtener una lectura inicial de la bureta y luego abrir las válvulas de drenaje adecuadas para que la muestra puede bajar desde ambos extremos en la bureta, ver 6.5.7. Observar y registrar las lecturas de bureta en los intervalos de tiempo (0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 4, 8, 15 y 30 minutos y a 1, 2, 4, y 8 h, etc.) y después de 15 minutos del registro de la lectura, la deformación que acompañan lecturas del indicador de obtienen acoplando

cuidadosamente el pistón con el cabezal superior de la muestra. Si las lecturas de bureta e indicador de deformación se que se representan frente a la raíz cuadrada del tiempo, los intervalos de tiempo en el que se toman las lecturas pueden ser ajustados para esas raíces cuadradas que han obtenido fácilmente, por ejemplo, 0,09, 0,25, 0,49, 1, 4, 9 min, etc. Dependiendo del tipo de suelo, los intervalos de tiempo se pueden cambiar a intervalos de tiempo convenientes que permiten la definición adecuada de cambio de volumen en función del tiempo.

9.4.4. El gráfico de las lecturas del indicador de bureta y deformación frente ya sea el logaritmo o raíz cuadrada del tiempo transcurrido. Si las lecturas se trazan en función del logaritmo del tiempo transcurrido, permitirá la consolidación continúe durante al menos un ciclo de registro de tiempo o un periodo durante la noche después de una marcada reducción en la pendiente muestra que 100% de consolidación primaria se ha logrado. Si las lecturas se representan frente a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido, permitir que la consolidación continúe al menos 2 horas después de haber logrado el 100% de la consolidación primaria. Una desviación marcada entre las pendientes de las curvas de deformación y el indicador de bureta hacia el final de la consolidación con base en el indicador de deformación lecturas indica la fuga de fluido desde la cámara al espécimen y el ensayo debe ser terminado.

9.4.5. Determinar el tiempo para el 50% de la consolidación primaria t_{50} , de acuerdo con uno de los procedimientos descritos en los Métodos de Ensayo D2435.

9.5. *Deformación y carga cíclica.* - El suelo normalmente se comporta como un sólido elástico que exhibe un método no destructivo respuesta a la aplicación de la carga cíclica debajo de un umbral menor de $10^{-2}\%$ del nivel de deformación cortante. Por encima de este nivel de deformación de la respuesta de la muestra es elastoplástica o plástica y por lo tanto destructiva. El umbral actual del nivel de deformación depende de la rigidez inicial de la muestra. Un material que es suave tendrá un mayor umbral de deformación, mientras que un material rígido tendrá menor umbral de deformación. Para desarrollar una curva de módulo y de amortiguamiento frente a deformación requiere o bien una serie de las muestras sean ensayadas cada uno a un nivel de deformación específica o un solo espécimen a someterse a la carga por etapas. carga por etapas implica la aplicación de un aumento progresivo de los niveles de uno u otro carga cíclica o deformación. En cada nivel o etapa de carga cíclica o deformación realizar una secuencia del ensayo se describe en 9.5.1 a 9.5.3. Después de la operación como se describe en 9.5.3 ha sido completado el operador en la dirección del ingeniero puede entonces o bien abrir las válvulas de drenaje de muestras para restablecer el

esfuerzo efectivo de consolidación o mantener el existente el exceso de presión de poros antes de pasar a la siguiente carga cíclica o el nivel de deformación más alta.

9.5.1. Para la carga cíclica constante (véase el método de ensayo A) del ensayo, el primer paso es para estimar la magnitud de la carga cíclica. Esta carga dependerá de la relación de esfuerzos deseados, $SR_{deseado}$, que es la relación del esfuerzo desviador deseada para duplicar el esfuerzo efectivo de consolidación. En consecuencia, la magnitud de la carga cíclica puede ser estimada con la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 4:} \quad P_s = 2 \times \sigma'_{3C} \times SR_{deseado} \times A_c$$

Donde:

P_c = Carga cíclica estimada a ser aplicada a la muestra.

σ'_{3C} = Presión de consolidación (presión de celda CP – presión de retorno BP)

$SR_{deseado}$ = Relación de esfuerzos deseado ($\pm\sigma_d$) / ($2 \sigma_{3C}$)

A_c = Área de la muestra después de la consolidación, mirar la Nota 15.

NOTA 13: Véase 11.2.2 para los procedimientos para calcular A_c .

9.5.2. Para la deformación cíclica constante (véase el método de ensayo B) seleccionar una amplitud de deformación de corte deseada (γ_{SA}) y calcular la deformación axial requerida (ϵ_{SA}) multiplicando por 2. Determinar la amplitud de la deformación resultante utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 5:} \quad I_{SA} = \epsilon_{SA} \times L_s$$

Dónde:

L_{SA} = amplitud simple de deformación, mm [pulg.],

ϵ_{SA} = amplitud simple deformación axial (sin dimensiones), y

L_s = longitud de la muestra de ensayo, mm [pulg.].

9.5.3. Formar un espacio de aire grande en la parte superior de la cámara triaxial mediante el drenaje de agua de cámara sin permitir bajar la presión de la cámara. Se requiere que la cámara de aire de modo que no se creen fluctuaciones de presiones en la cámara por

el movimiento del pistón dentro y fuera de la cámara durante la carga cíclica o deformación cíclica.

L_s = longitud de la muestra de ensayo, mm [pulg.].

9.5.4. Formar un espacio de aire grande en la parte superior de la cámara triaxial mediante el drenaje de agua de cámara sin permitir bajar la presión de la cámara. Se requiere que la cámara de aire de modo que no se creen fluctuaciones de presiones en la cámara por el movimiento del pistón dentro y fuera de la cámara durante la carga cíclica o deformación cíclica.

9.5.5. Para imponer una condición no drenada, cierre las válvulas de drenaje de la muestra, y cargar cíclicamente la muestra a través de 40 ciclos con la primera mitad del ciclo de compresión utilizando de 0,5 a 1 Hz los valores sinusoidales de carga o de extensión de la deformación.

9.5.6. Durante la carga cíclica no drenada o deformación cíclica mantener constante la presión de la celda y registrar la carga axial, la deformación axial, y el cambio en la presión de poro versus el tiempo.

9.5.7. Bajo el control de carga de suelos de dureza media a suaves será sometido a una deformación permanente. La deformación permanente puede ser causada normalmente por cualquiera de una carga cíclica ligeramente desequilibrada (ver 9.4). Como resultado de esta compresión un gráfico de carga versus deformación (Δ), como se muestra esquemáticamente en la Fig.13 (ciclos de histéresis), tenderán a moverse a lo largo del eje de deformación. Debido a que la determinación de módulo de secante Young y coeficiente de amortiguamiento en cualquier nivel de deformación depende de la capacidad de identificar un diferente ciclo de histéresis, es necesario limitar el máximo error de cierre (Δc) entre dos picos sucesivos, como se muestra en la Figura 106, aproximadamente 0,00254 mm [0,0001 in.]. Para una muestra con una altura de 127 mm [5 in.], esto corresponde a una deformación axial de 0,2%. Si el error de cierre es superior a este valor los datos no son válidos.

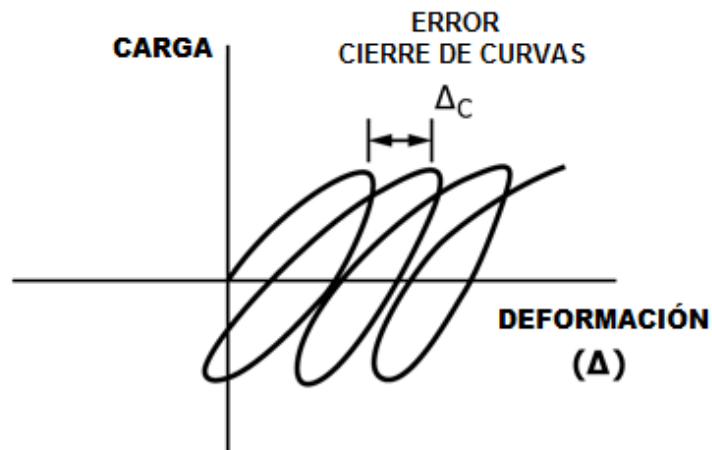


Figura 106. Definición del error de cierre

Para la carga por etapas vuelva a 9.5.1 o 9.5.2, según el caso, después de asegurar la disipación del exceso de presión de poros generados durante la etapa de carga anterior.

10. Retiro de la probeta

10.1. Después de los ensayos cíclicos realizados lleve a cabo los siguientes pasos:

10.1.1. Retire la carga axial desde el pistón de carga y reducir la presión cámara y de retorno a cero.

10.1.2. Cierre las válvulas de drenaje de muestras.

10.1.3. Permaneciendo las válvulas de drenaje de la muestra cerradas, retirar rápidamente la muestra desde el equipo de manera que la muestra no tenga tiempo para absorber el agua desde las piedras porosas.

10.1.4. Retire la membrana (y las tiras o jaula de papel de filtro de la muestra si se utilizan) y determinar de la muestra total el contenido de agua, de conformidad con el procedimiento descrito en el Métodos de Ensayo D2216. (después de retirar la membrana en muestras de suelos cohesivos debe ser secada el agua libre restante antes de obtener el contenido de agua.) En los casos donde hay material insuficiente material para los ensayos de las propiedades índice, es decir, cuando las muestras tienen el mismo diámetro que el tubo de muestreo, la muestra se debe pesada antes de retirar el material para ensayos de propiedades de índice y una porción representativa de la muestra que se utilizan para determinar el contenido de agua final. Antes de colocar la muestra (o parte del mismo) en el horno para secar, dibujar una imagen o tomar una fotografía de la muestra.

11. Cálculo

11.1. *Propiedades iniciales de la muestra.* - Utilizando la masa seca total de la muestra, calcular y registrar en la hoja de datos apropiada el contenido de agua inicial, volumen de sólidos, relación de vacíos inicial, el grado de saturación inicial y la densidad seca inicial. Calcular el volumen de la muestra a partir de los valores medidos en 6.12. Calcular el volumen de sólidos dividiendo la masa seca de la muestra por la gravedad específica de los sólidos y dividiendo por la densidad del agua. Calcular la relación de vacíos dividiendo el volumen de vacíos para el volumen de sólidos, donde se supone que el volumen de vacíos que ser la diferencia entre el volumen de la muestra y el volumen de sólidos. Calcular la densidad seca dividiendo la masa seca de la muestra por el volumen de la muestra.

NOTA 14: La gravedad específica de los sólidos puede determinarse de acuerdo con los métodos de ensayo D854 o se puede suponer en base a los resultados de prueba anteriores.

11.2. Propiedades de la muestra después de la consolidación:

11.2.1. Calcular la altura de la probeta y el área después de la consolidación de la siguiente manera:

Ecuación 6:
$$H_c = H_o - \Delta H$$

Dónde:

H_o = altura inicial de la muestra, mm [pulg.]

ΔH = cambio en la altura de la muestra al final de la consolidación, mm [pulg.].

11.2.2. El área de la sección transversal de la muestra, después de la consolidación, A_c , se calculará utilizando una de los siguientes enfoques:

11.2.2.1. Enfoque 1. - Este enfoque se utiliza para calcular el área de la sección transversal antes de que se realice el ensayo.

Ecuación 7
$$A_c = \frac{(V_o - \Delta V_{sat} - \Delta V_c)}{H_c}$$

Dónde:

V_o = volumen inicial de la muestra, mm^3 [in.^3],

ΔV_{sat} = cambio del volumen de la muestra durante la saturación, mm^3 [in.^3].

Ecuación 8:
$$\Delta V_{sat} = 3V_o \Delta H_s / H_o$$

Dónde:

ΔH_s = cambio en la altura de la muestra durante la saturación, mm [pulg.],

ΔV_c = cambio del volumen de la muestra durante la consolidación, como se indica por las lecturas de bureta, mm³ [in.³].

11.2.2.2. Enfoque 2. - Este enfoque se utiliza para calcular el área de la sección transversal después de que se realiza el ensayo.

Ecuación 9:
$$A_c = \frac{(V_{AF} + V_s)}{H_c}$$

Dónde:

V_{AF} = volumen de agua final (basado en el contenido de agua final), mm³ [in.³],

V_s = volumen de sólidos, mm³ [in.³],

Ecuación 10:
$$V_s = m_s / (G_s \rho_w)$$

Dónde:

m_s = masa seca de la muestra, kN [libras],

G_s = gravedad específica de sólidos,

ρ_w = densidad del agua, mg/m³ [lb/pulg³].

11.2.3. Utilizando las dimensiones calculadas de la muestra después de la consolidación y suponiendo que el contenido de agua después de la consolidación es el mismo que el contenido de agua final, calcular la relación de vacíos consolidada y el grado de saturación.

NOTA 15. En este método de ensayo, las ecuaciones se escriben de tal manera que la compresión y consolidación se consideran positivas.

11.3. Cálculos del ciclo de histéresis. Los cálculos individuales se realizan en cada ciclo de histéresis usando la forma mostrada en la Figura 107 o su equivalente.

11.3.1. Calcular el coeficiente de amortiguamiento (D) para un ciclo de histéresis dado usando la siguiente ecuación y registrar estos valores en la hoja de datos en la Figura 107:

Ecuación 11:
$$D = \frac{A_L}{4\pi A_T} \times 100\%$$

Dónde:

A_L = área del ciclo de histéresis,

A_T = área del triángulo rectángulo sombreada que se muestra en la Fig. 14,

D = coeficiente de amortiguamiento, %.

11.3.2. Calcular el módulo de Young de la secante (E) para un ciclo de histéresis dado usando la siguiente ecuación, y registrar estos valores en la hoja de datos en la Figura 107:

Ecuación 12:
$$E = \frac{L_{DA}}{S_{DA}} \times \frac{L_s}{A}$$

Dónde:

L_{DA} = carga de amplitud PP, kN [libras],

S_{DA} = deformación de amplitud PP, mm [pulg.],

L_s = altura de la muestra después de la consolidación, mm [pulg.],

A = área de la muestra definen utilizando 11.2.2.1 o 11.2.2.2, mm² [pulg²],

E = El módulo de secante Young, kPa [lb/pulg²].

11.3.3. Calcular la deformación axial de amplitud PP (ϵ_{DA}) para un ciclo de histéresis dado usando la siguiente ecuación y registrar este valor en la Figura 107:

Ecuación 13:
$$\epsilon_{DA} = \frac{S_{DA}}{L_s}$$

Calcular la deformación axial de amplitud P (ϵ_{SA}) para un ciclo de histéresis dado usando la siguiente ecuación y registrar este valor en la Figura 107:

Ecuación 14:
$$\epsilon_{SA} = \frac{\epsilon_{DA}}{2}$$

Dónde:

ϵ_{DA} = amplitud doble deformación axial (sin dimensiones),

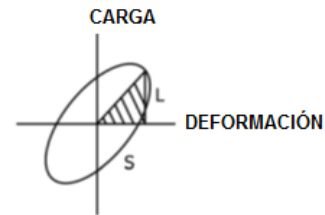
ϵ_{SA} = amplitud simple de la deformación axial (sin dimensiones).

Cálculos Módulo/Amortiguamiento (Triaxial Cíclico)

Número de Ensayo _____	Corrida _____
Número de Perforación _____	Trazo _____
Número de Muestra _____	L_s _____ mm
Calculado por _____	A_s _____ mm ²

Coefficiente de Amortiguamiento

A_L = Área de ciclo _____	KN-m
S _____	m
L _____	KN
$A_T = 0.5 \times S \times L$ _____	KN-m
$D = A_L / (4\pi A_T) \times 100\%$ _____	%



Módulo Secante

L_{DA} _____	KN/mm
S_{DA} _____	mm
$E = (L_{DA} / S_{DA} \times L_s / A_s)$ _____	kPa
μ = Relación de Poisson _____	
$G = E / [2(1 + \mu)]$ _____	kPa

Deformación

$\epsilon_{DA} = S_D / L_s$ _____	mm/mm
$\epsilon_{SA} = \epsilon_D / 2$ _____	mm/mm
$\gamma_{SA} = \epsilon_{SA} / (1 + \mu) \times 100\%$ _____	%

Figura 107. Formulario de Cálculo del Triaxial Cíclico Módulo/Coefficiente de Amortiguamiento

12. Informe

12.1. Se reporta la siguiente información:

12.1.1. Datos de identificación y descripción visual de la muestra, incluyendo la clasificación del suelo de acuerdo con el Método de ensayo D2488 y si la muestra inalterada, o reconformada (indicar método de preparación). Indicar si se emplea cualquier método para reducir la restricción final.

12.1.2. Los valores de límite plástico y el límite líquido, si se determina de acuerdo con los Métodos de Ensayo D4318.

12.1.3. Valor de la gravedad específica de los sólidos y la notación si se determinó el valor obtenido según el método de prueba D854 o asumido.

12.1.4. Análisis del tamaño de partículas, si se determina de acuerdo con la norma ASTM D422.

12.1.5. Densidad seca de la muestra inicial, la relación de vacíos, contenido de agua, y el grado de saturación.

12.1.6. Altura inicial y el diámetro de la muestra.

12.1.7. Método seguido para la saturación de la muestra (es decir, método húmedo o seco).

12.1.8. Presión de retorno total (BP).

12.1.9. La presión de poro parámetro B al final de saturación.

12.1.10. Esfuerzo efectivo de consolidación.

12.1.11. Tiempo al 50% para la consolidación primaria.

12.1.12. Hora del último incremento de consolidación duración.

12.1.13. Densidad seca de la muestra, la relación de vacíos, contenido de agua, y el grado de saturación después de la consolidación.

12.1.14. Área de sección transversal después de la consolidación y el método utilizado para la determinación.

12.1.15. Ciclo de histéresis para cada carga o nivel de deformación en los números de ciclo 1 a 5, 10, 20, y 40.

12.1.16. Grafique el módulo secante Young E y el coeficiente de amortiguamiento D en función del logaritmo de la amplitud simple deformación axial utilizando datos de un ciclo $n^{\circ} 1$, a menos que solicite lo contrario.

12.1.17. Dibujo o fotografía de la muestra después del ensayo.

12.1.18. Observaciones y anotaciones respecto a cualquier condición inusual u otra información necesaria para interpretar correctamente los resultados obtenidos, incluyendo cualquier desviación del procedimiento descrito.

13. Precisión y tendencia

13.1. La variabilidad del suelo y la incapacidad resultante para determinar un verdadero valor de referencia prevenir el desarrollo de una declaración significativa de sesgo. El subcomité está buscando los datos pertinentes de los usuarios de este método de ensayo para establecer la precisión y el sesgo de este método de ensayo.

14. Palabras clave

Triaxial cíclico; coeficiente de amortiguamiento; ensayo de laboratorio; propiedades físicas; módulo secante

Anexo 3. Norma ASTM D4015 – 15

Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Fixed-Base Resonant Column Devices¹

Método de ensayo estandarizado para la el módulo y amortiguamiento de suelos usando un equipo Columna Resonante

1. Alcance

1.1. Este método de ensayo cubre la determinación del módulo de corte y del amortiguamiento cortante en función de la amplitud de la deformación de corte para probetas cilíndricas sólidas del suelo en condiciones inalteradas y remodeladas por vibración utilizando dispositivos de columna resonante. La vibración de la probeta puede ser superpuesta sobre un estado estático de esfuerzos controlados en la probeta. El aparato de la vibración y la probeta puede estar dentro de una cámara triaxial y se someten a una presión de confinamiento y una carga axial. Además, la muestra puede ser sometido a otras condiciones controladas (por ejemplo, la presión de poro, el grado de saturación, la temperatura). Este método de ensayo de la determinación del módulo y amortiguamiento se consideran no destructiva cuando las amplitudes de deformación cortante son de menores que 10⁻²% (10⁻⁴ pulg. /pulg.), muchas mediciones se pueden hacer en la misma probeta y con diversos cambios de esfuerzos estáticos.

1.2. Dos configuraciones de los dispositivos están cubiertas por este método de ensayo: Dispositivo Tipo 1, donde se aplica un momento torsional conocido en la parte superior de la probeta y el movimiento rotacional resultante se mide en la parte superior de la probeta. Dispositivo Tipo 2, donde se aplica un momento torsional sin calibrar a la parte superior de la probeta y el momento torsional transmitido a través de la probeta se mide mediante un transductor de momento torsional en la base de la probeta. Para ambos dispositivos, el momento torsional se aplica al extremo activo (por lo general la parte superior) de la probeta y el movimiento de rotación también se mide en el extremo activo de la probeta.

1.3. Este método de ensayo se limita a la determinación del módulo de corte y de amortiguamiento, preparación de las probetas y los procedimientos relacionados con la

¹ Este método de ensayo está bajo la jurisdicción del Comité D18 de ASTM sobre el suelo y la roca y es responsabilidad directa del Subcomité D18.09 sobre Propiedades cíclicas y dinámicas de los suelos. Edición actual aprobada el 1 de noviembre de 2011. Publicado en enero de 2012. aprobado originalmente en 1991. Última edición anterior, aprobado en 2003 como D3999-91 (2003). DOI: 10.1520/D3999-11E01.

vibración, etc., y no cubren la aplicación, medición o control de los esfuerzos normales estáticos laterales y axiales. Los últimos procedimientos pueden ser cubiertos por, pero no se limitan a, Método de ensayo D2850, D3999 / D3999M, D4767, D5311 / D5311M, o D7181.

1.4. *Dígitos significativos.* - Todos los valores registrados y calculados serán conformes a la guía de dígitos significativos y redondeo establecido en Norma D6026.

1.4.1. Los procedimientos utilizados para especificar el método de recolección y registro de datos, los cálculos en esta norma se consideran como el estándar de la industria. Además, son representativos de los dígitos significativos que generalmente debe ser retenido. Los procedimientos utilizados no tienen en cuenta la variación de materiales, los fines de obtención de los datos, estudios de propósito especial, o los objetivos considerados por el usuario; y es una práctica común para aumentar o reducir dígitos significativos de los datos reportados a estar en consonancia con estas consideraciones. Está más allá del alcance de esta norma, tener en cuenta las cifras significativas utilizadas en los métodos de análisis para diseños de ingeniería.

1.4.2. Las mediciones realizadas a más de los dígitos significativos o la mejor sensibilidad que se especifica en esta norma no se considerarán una no conformidad con esta norma.

1.5. *Unidades.* - Los valores indicados deben ser considerados como los estándares en unidades SI. Los valores entre paréntesis son conversiones matemáticas a unidades pulgada-libra, que se proporcionan sólo para información y no se consideran como estándar. El informe de los resultados de las pruebas en unidades distintas del SI no se considerará como una no conformidad con estos métodos de ensayo.

1.5.1. La conversión de unidades pulgada-libra utilizan el sistema de unidades gravitacional. En este sistema, una unidad de fuerza (peso) se representa por la libra (lb), mientras que la unidad de masa es slug ($\text{lb}\cdot\text{s}^2/\text{ft}$). No se da la unidad conversión de slug ($\text{lb}\cdot\text{s}^2/\text{ft}$), a menos que los cálculos dinámicos estén involucrados ($F = ma$).

1.5.2. Es una práctica común en la profesión de ingeniería / construcción de utilizar simultáneamente libras para representar tanto una unidad de masa (lb) y de fuerza (lbf). Esto se combina de forma implícita dos sistemas separados de unidades; es decir, el sistema absoluto y el sistema gravitacional. Científicamente es deseable combinar el uso de dos conjuntos separados de unidades pulgada-libra dentro de un único estándar. Como se ha indicado, esta norma incluye el sistema gravitacional de unidades pulgada-libra y no utiliza

/ presente la unidad de masa slug ($\text{lb}\cdot\text{s}^2/\text{ft}$). Sin embargo, el uso de balanzas o escalas de registro de libras de masa (lb) o registrando la densidad en lb/ft^3 no se considerará como una no conformidad con esta norma.

1.6. *Esta norma no pretende considerar todos los problemas de seguridad, si los hay, asociados con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma establecer las prácticas de seguridad y salud y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reglamentarias antes de su uso.*

2. Documentos de Referencia

2.1. Normas ASTM:²

D653 Terminología relacionada a suelos, rocas y fluido contenido en ellos.

D2166/D2166M Método de ensayo para la resistencia a la compresión no confinada de suelos cohesivos.

D2216 Método de ensayo para la determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) en suelos y rocas por masa.

D2850 Método de ensayo para la compresión triaxial no confinada no drenada de suelos cohesivos.

D3740 Práctica de los requisitos mínimos para organismos encargados de pruebas y/o inspección de suelos y roca que se utiliza en diseño de ingeniería y construcción

D3999/D3999M Método de ensayo para la determinación de las propiedades de suelos de módulos y amortiguamiento usando el equipo triaxial cíclico.

D4753 Práctica para el muestreo de suelos en tubos de pared delgada para propósitos de geotecnia.

D4767 Método de ensayo de compresión triaxial consolidado-no drenado para suelos cohesivos.

D5311/D5311M Método de ensayo resistencia triaxial de suelos para carga controlada.

D6026 Práctica para el uso de dígitos significativos en los datos geotécnicos.

D4318 Métodos de ensayo para el límite líquido, límite plástico, y el índice de plasticidad de los suelos.

² Para las normas ASTM citadas, visite el sitio web de ASTM, www.astm.org, o el contacto de cliente en [ASTM service@astm.org](mailto:ASTM_service@astm.org). Para Annual Book of ASTM Standards información de volumen, consulte la página Resumen de documentos de la serie en el sitio web de ASTM.

3. Terminología

3.1. *Definiciones.* - Para las definiciones de otros términos utilizados en estos métodos de ensayo, véase la terminología D653.

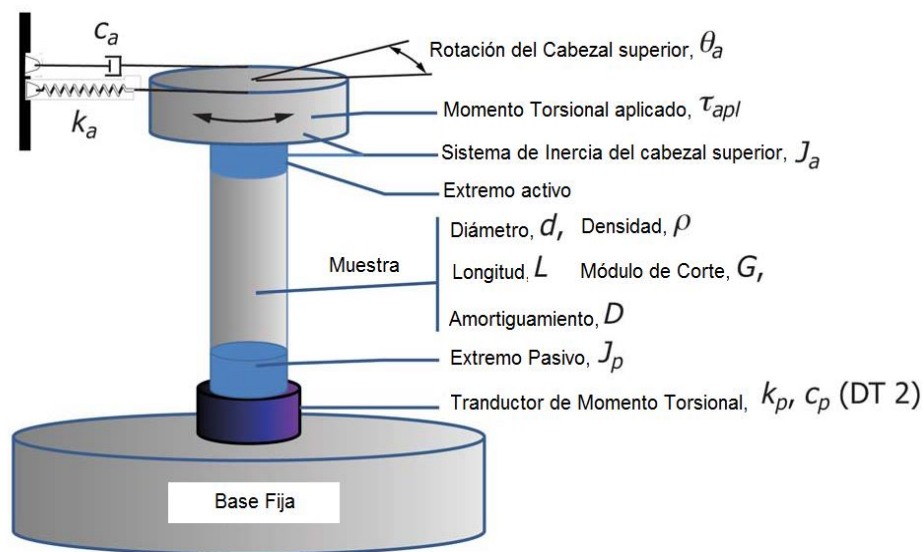
3.2. *Definiciones de los términos específicos para esta Norma:*

3.2.1. *Capacidad de amortiguamiento D* [sin unidades, típicamente expresado en %], n - en los sistemas de columna resonante, está relacionado con el componente del módulo de corte dinámico que se retrasa la aplicación del esfuerzo de corte a 90° .

3.2.2. *Dispositivo de Tipo 1, DT1, n* - en los sistemas de columna resonante, que se muestra en la Fig. 1, es un sistema de columna resonante donde el cabezal del extremo pasivo está conectado directamente a la base fija (sin transductor de momento torsional), un momento torsional vibratorio calibrado se aplica al extremo activo, y la rotación se mide en el extremo activo.

3.2.2.1. *Discusión.* - el dispositivo de excitación de vibración puede incorporar resortes y amortiguadores conectados al cabezal del extremo activo, donde se deben conocer las constantes de los resortes y los coeficientes de amortiguamiento viscoso. La inercia de rotación del cabezal del extremo activo y partes del dispositivo de excitación de vibración que se desplazan con él debe ser conocido.

3.2.3. *Dispositivo de Tipo 2, DT2, n* - en los sistemas de columna resonante, en la Fig. 1 se muestra un sistema de columna resonante, donde el extremo del cabezal pasivo está conectado a un transductor de momento torsional, un momento torsional no calibrado se aplica al extremo activo, el momento torsional se mide por el transductor en el extremo pasivo, y la rotación se mide en el extremo activo.



Para un dispositivo de Tipo 1, no se necesita ningún transductor de momento torsional y el extremo del cabezal pasivo está conectado a la base fija.

Figura 1. Esquema de ambos dispositivos del Tipo 1 y 2 Columna Resonante

3.2.3.1. *Discusión*- El dispositivo de excitación de vibración puede incorporar resortes y amortiguadores conectados al extremo del cabezal activo, pero las constantes de los resortes y los coeficientes de amortiguamiento viscoso no son necesarias. La inercia rotacional del extremo del cabezal activo y las partes del dispositivo de excitación de vibraciones que se desplazan con ella también no son necesarios.

3.2.4. *Módulo de corte dinámico*, $G^* [FL^{-2}]$, n - en sistemas de columna resonante, es la relación de esfuerzos de corte a deformaciones de corte bajo condiciones vibratorias (también conocido como módulo de corte complejo).

3.2.5. *Equivalente elástico del módulo de corte* $G [FL^{-2}]$, n - en sistemas de columnas resonantes, es la componente del módulo dinámica de corte que es en la etapa con el esfuerzo de corte aplicado.

3.2.6. *Sistema de columna resonante*, n - un sistema como se muestra en la Fig.1 que consiste en una probeta cilíndrica o columna de suelo sellado con una membrana flexible que se ha unido por cabezales en cada extremo y donde un dispositivo de excitación de vibración sinusoidal es unido al cabezal del extremo activo y donde el otro extremo del cabezal pasivo que está fijado rígidamente.

3.2.7. *Deformación de corte de la probeta* γ , [sin unidades, expresado con frecuencia como %], n - en los sistemas de columna resonante, es el promedio de la deformación por corte en la probeta donde la deformación por corte en cada cruz de la sección varía de cero a lo largo del eje de rotación a un máximo en el perímetro de la probeta.

3.2.7.1. *Discusión*. - El radio para el cálculo del promedio de las deformaciones por corte varían en función del tipo de suelo, nivel de deformación, el esfuerzo de confinamiento, etc. El valor por defecto del radio para el cálculo de deformación media es 0.4* de diámetro, pero los valores en el rango de 0,33 a 0.40 * diámetro puede ser usado si el valor se documenta en el informe.

3.2.8. *Sistema de frecuencia de resonancia* $f_r [s^{-1}]$, n - en los sistemas de columna resonante, para el dispositivo de Tipo 1 es la más baja frecuencia a la que la velocidad de rotación en el extremo activo está en ciclo con el momento torsional de excitación sinusoidal

y para el dispositivo de Tipo 2, es la más baja frecuencia a la que el movimiento de rotación en el extremo activo es máximo.

4. RESUMEN DEL MÉTODO

4.1. Se muestra esquemáticamente en la Fig. 1. el dispositivo de columna resonante. En el ensayo de columna resonante, una muestra de suelo, generalmente cilíndricos cerrados con una membrana delgada, se somete a condiciones impuestas de esfuerzo estático axial y lateral. Vibraciones sinusoidales de torsión se aplican en la parte superior de la muestra de suelo y se mide la respuesta de rotación. La frecuencia de excitación se varía hasta que se alcanza el sistema frecuencia de resonancia como se describe en 2.2.8. Teniendo en cuenta los parámetros de la geometría, masa y del sistema, el equivalente módulo elástico de corte y capacidad de amortiguamiento se pueden determinar a un nivel medido de la vibración de excitación. La amplitud de la vibración (que está relacionada con la deformación cortante) se suele variar para medir la variación del módulo y de amortiguamiento en función de la deformación por esfuerzo cortante. El ensayo se lleva a cabo normalmente a niveles de deformación de corte entre 0,00001% y 0,2%. (El límite superior de deformación de corte depende de la rigidez de muestra y la capacidad del momento torsional máximo del sistema de excitación.) Para las muestras donde la deformación máxima de corte medida en el orden de 0,01%, el ensayo se realiza a menudo en varias etapas diferentes de condiciones esfuerzos estáticos laterales y axiales para medir la variación de los módulos y el amortiguamiento con estados estáticos de esfuerzos. Los resultados de los ensayos dependen de la calidad de la muestra y de su perturbación, que están más allá del alcance de esta norma.

5. Importancia y Uso

5.1. El módulo elástico de corte equivalente y el amortiguamiento capacidad de un suelo dado, tal como se mide por la técnica de la columna resonante en el presente documento se describe, dependerá de la amplitud de la deformación por vibración, el estado de esfuerzo efectivo, y de la relación de vacíos del suelo, temperatura, tiempo, etc. Dado que la aplicación y el control de los esfuerzos estáticos laterales y axiales y de la relación de vacíos, no se prescriben en estos métodos, la aplicabilidad de los resultados a condiciones de campo dependerá del grado en que la aplicación y el control de esfuerzos estáticos laterales y axiales y de la relación de vacíos, así como otros parámetros tales como la estructura del suelo, las condiciones de campo duplicado. Las técnicas utilizadas para simular las condiciones de

campo dependen de muchos factores y es hasta el ingeniero de decidir en qué técnicas se aplican a una situación dada y tipo de suelo. Los resultados de estos ensayos son útiles para los cálculos que implican la interacción suelo-estructura y la respuesta sísmica de los depósitos de suelo.

NOTA 1. - La calidad de los resultados producidos por esta norma depende de la competencia del personal que lo realiza, y la idoneidad de los equipos e instalaciones. Los organismos que cumplan los criterios de la Norma D3740 generalmente se consideran capaces de competente y objetiva de ensayo/ muestreo/inspección/etc. El usuario de esta norma se advierte que el cumplimiento de la Norma D3740 en sí mismo no aseguran resultados fiables. Los resultados confiables dependen de muchos factores; Norma D3740 proporciona un medio de evaluar algunos de estos factores.

6. Aparato

6.1. *General.* - Se muestra esquemáticamente en la Fig. 1, el equipo completo del ensayo e incluye los cabezales para contener la muestra en la celda de presión, el dispositivo de excitación de vibración (motor de momento torsional), los transductores de medición de la respuesta, la instrumentación de control y lectura, y equipo auxiliar para la preparación de muestras. La teoría de la columna resonante se proporciona en el anexo A1. Todo el aparato se encierra generalmente dentro de una cámara de presión (comúnmente conocida como cámara triaxial). Para algunos aparatos que puede aplicar una carga axial a la muestra, la tapa de la celda de presión puede estar equipado con un pistón que pasa a través de la parte superior.

6.2. *Los cabezales de la muestra,* tanto el cabezal activo como el pasivo estarán fabricados con materiales no corrosivos que tiene un módulo de al menos diez veces el módulo del material a ensayar. Cada cabezal deberá tener una sección transversal circular y una superficie plana de contacto con la muestra, excepto que la superficie plana de contacto puede ser rugosa para proporcionar un acoplamiento más eficiente con los extremos de la muestra. La rugosidad y el flujo de los fluidos hacia o desde la muestra puede conseguirse mediante la fijación de manera rígida piedras porosas a los cabezales. El diámetro de los cabezales será igual a o mayor que el diámetro de la muestra. La fabricación de los cabezales debe ser tal que su rigidez sea por lo menos diez veces la rigidez de la muestra.

6.2.1. El cabezal activo puede tener una parte de los dispositivos de excitación, transductores, resortes y amortiguadores conectados a él. Los transductores y partes móviles

del dispositivo de excitación deben estar conectados al cabezal de tal manera que se han de considerar parte del cabezal, que hacer frente para mantener la simetría de rotación y tienen el mismo movimiento que el cabezal para la gama completa de frecuencias que se produzcan al ensayar los suelos.

6.2.2. El modelo teórico utilizado para el sistema de columna resonante representa el cabezal de extremo activo, con todos los accesorios, como una masa rígida que está unida a la muestra; esta masa también puede tener resortes sin masa y amortiguadores unidos a él, como se muestra en la Fig. 1. Si se utilizan resortes, el dispositivo de excitación y cabezal de extremo activo (sin el espécimen en su lugar) forman un sistema de un solo grado de libertad que tiene una frecuencia natural no amortiguada, f_a .

6.2.3. El cabezal extremo pasivo debe fijarse de forma rígida. Se puede suponer fijada de forma rígida cuando la inercia de la misma y la masa (s) unido a él por lo menos 500 veces la inercia de la placa de extremo activo (1) 3.

6.2.4. Para dispositivos de tipo 2, un transductor de momento torsional se coloca entre el cabezal extremo pasivo y la base rígidamente fija. El transductor de momento torsional, aunque relativamente rígido a la torsión (véase 6.4), debe permitir algún pequeño giro del cabezal extremo pasivo con el fin de registrar el momento torsional transmitido. La inercia del sistema del cabezal extremo pasivo, J_p debe incluir la inercia de la cabeza de detección del transductor de momento torsional que está fijada rígidamente a la misma. Sin la muestra en su lugar, el sistema de inercia del cabezal extremo pasivo, J_p , junto con la rigidez, k_p , y el coeficiente de amortiguamiento, c_p , del transductor de momento torsional constituyen un sistema de un solo grado de libertad que son registrados en la ecuación A1.3.

6.3. *Dispositivo de excitación de vibración (motor de momento torsional)*. - este debe ser un dispositivo capaz de aplicar una vibración torsional sinusoidal al extremo del cabezal activo a las que las partes móviles del dispositivo están acopladas rígidamente. La frecuencia de excitación deberá ser variable continuamente y tener un rango que típicamente cerca de 10 Hz a 1 kHz. Para el dispositivo Tipo 1, en el que el momento torsional se mide en el extremo activo, el dispositivo de excitación deberá tener un medio para medir el momento torsional aplicado al dispositivo de excitación que tiene al menos 5% de precisión de la salida de la escala completa. Si se utiliza un dispositivo de excitación electromagnética, la caída de tensión a través de una, resistencia de potencia de temperatura y frecuencia estable fijo en serie con el dispositivo de excitación es proporcional a momento torsional aplicado (Nota

2). Para el dispositivo Tipo 2, el momento torsional se mide al extremo pasivo con un transductor de momento torsional, véase 6.4.

NOTA 2. La calibración en más de una frecuencia puede ser necesaria cuando las frecuencias de ensayo varían en un amplio rango. Puede ser necesario el uso de varias barras de calibración con diferentes rigideces torsionales.

6.4. *Transductor de momento torsional del extremo pasivo.* - Este transductor de momento torsional para el dispositivo tipo 2 para los valores esperados debe ser impermeable y no sensible a los cambios de presión y temperatura ambiental. Puede ser un transductor que mide también la fuerza axial. El transductor de momento torsional debe tener una capacidad de torsión de al menos el doble de la capacidad de momento torsional máximo del dispositivo de excitación de vibraciones, una linealidad del $\pm 0,5\%$ de la escala completa de salida, la histéresis menor que $\pm 0,1\%$ de la escala completa de salida, y la repetitividad mejor que el $\pm 0,5\%$ de la escala completa de salida. Si se utiliza el transductor para medir la fuerza axial, las especificaciones deben ser similares a las del momento torsional. El transductor debe estar conectada rígidamente a la base de la cámara y la cabeza de detección del transductor del momento torsional se conecta rígidamente al extremo del cabezal pasivo.

6.5. *Generador de onda sinusoidal.* - El generador de onda sinusoidal es un instrumento eléctrico capaz de producir una corriente sinusoidal con un medio de ajuste de la frecuencia en toda la gama de frecuencias de utilización previstas. Este instrumento debe proporcionar suficiente energía para producir la amplitud de la vibración deseada o su salida puede ser amplificada electrónicamente para proporcionar una potencia suficiente.

6.6. *Dispositivos de Medición de vibraciones e instrumentos de lectura.* - Estos dispositivos e instrumentos deben ser calibrados con una precisión del 5% y deben ser trazables a los estándares de una agencia gubernamental. Los dispositivos de medición de vibraciones serán de aceleración, velocidad o transductores de desplazamiento que se pueden unir y convertirse en parte del extremo del cabezal activo. El transductor(es) se monta para producir una salida eléctrica calibrada que es proporcional a la rotación de aceleración, velocidad o desplazamiento. Los instrumentos de lectura deben tener una resolución de frecuencia de al menos 0,1 Hz. También es necesario disponer de un dispositivo electrónico para establecer la diferencia de fase entre el par aplicado y/o medido y dando como resultado el movimiento de rotación para el establecimiento del sistema de frecuencia de resonancia.

6.6.1. *Para el dispositivo Tipo 1*, un osciloscopio de x-y-tiempo se puede usar para este propósito. El dispositivo electrónico debe tener amplificadores con ganancia suficiente para observar las salidas de entrada del motor de momento torsional y de transductor de movimiento en toda la gama de las frecuencias previstas. Para la medición del amortiguamiento por el método libre de vibraciones, y para la calibración del aparato de amortiguamiento, el instrumento de lectura será capaz de grabar la decadencia de la vibración libre con tiempo de respuesta adecuado. Un osciloscopio x-y-tiempo digital puede ser utilizado para este propósito. Para el dispositivo del tipo 2, un dispositivo de lectura de canal dual o un analizador de espectro deben ser utilizados para medir la magnitud y fase (real o imaginaria) componentes de la θ_a / τ_{TT} medido a la frecuencia de resonancia.

6.7. *Soporte para los dispositivos de vibración de excitación*. Puede que sea necesario para soportar la totalidad o una parte del peso del cabezal activo y el dispositivo de excitación para prevenir el esfuerzo axial o la falla a la compresión de la muestra. Este apoyo puede ser proporcionado por un resorte, contrapesos, o dispositivo neumático siempre que el sistema de soporte no impide el movimiento axial de la placa de extremo activo y siempre que no altera las características de vibración del dispositivo de excitación.

6.8. *Dispositivo de soporte temporal del cabezal*. - El soporte temporal del extremo del cabezal activo puede ser cualquier dispositivo de sujeción que se puede utilizar para apoyar el cabezal durante la unión de dispositivo de excitación de vibraciones para evitar la perturbación de muestras durante el montaje del aparato. Este dispositivo debe ser eliminado antes de la aplicación de la vibración.

6.9. *Dispositivos de medición* - Dimensiones de la muestra. Se necesitan dispositivos para medir porciones del aparato durante la calibración y el diámetro y la longitud de la muestra. Cualquier dispositivo adecuado puede ser utilizado para hacer estas mediciones, excepto que el dispositivo (s) que se utiliza para medir la longitud y el diámetro de la muestra no debe deformarse o afectar la muestra de otra manera. Especialmente diseñadas las cintas perimétricas⁴ que mide la circunferencia, lectura de diámetro se prefieren para la medición de los diámetros de muestras. exactitudes de medición se especifican en el apartado 7.2.

6.10. *Balanzas*. - Los dispositivos para determinar la masa de las muestras de suelo, así como porciones del dispositivo durante la calibración. Todas las mediciones de la masa deben ser precisos a 0,1%. (Guía D4753).

6.11. *Preparación de las muestras y Equipo triaxial*. - Estos métodos abarcan la preparación y los procedimientos relacionados con la vibración de la muestra de espécimen

y no cubren la aplicación y el control de estática axial y esfuerzos laterales. Cualquiera o todos los aparatos descritos en el Método de Ensayo D2166 / D2166M, D2850, D4767 o pueden ser utilizados para la preparación de muestras y la aplicación de axial estática y las fuerzas laterales. aparato adicional se puede usar para estos propósitos, según sea necesario.

6.12. Varios Aparatos. - El aparato de varios consisten en muestras de recorte y herramientas de talla, una expansión de membrana, aparatos remoldeo, y latas de contenido de humedad según se requiera.

7. Espécimen de ensayo

7.1. *Generalidades.* - Estos métodos están limitados a los procedimientos especiales de preparación de muestras, relacionadas con la técnica de vibración y de columna resonante. Dado que el ensayo de columna resonante puede llevarse a cabo en conjunto con esfuerzos controlados estáticos laterales y axiales, las disposiciones para la preparación de los especímenes en el Método de Ensayo D2166 / D2166M, D2850 o D4767 pueden ser aplicables o pueden ser utilizados como una guía en relación con otros métodos de aplicación y control de esfuerzos estáticos laterales y axiales.

7.2. *Limitaciones del Tamaño de la muestra.* – Las muestras deberá ser de sección transversal circular uniforme con extremos perpendiculares al eje de la muestra. Las muestras deben tener un diámetro mínimo de 33 mm (1,3 pulg.). La partícula más grande contenida dentro de la muestra de la muestra será de una sexta parte del diámetro de la muestra. Si, después de la finalización de una prueba, se encontró presentes partículas más grandes que las permitidas, indicar esta información en el informe de los datos del ensayo en "Observaciones". La relación entre longitud y diámetro no deberá ser inferior a 2 o más de 7 excepto que, cuando un esfuerzo axial estático mayor que el esfuerzo lateral aplicada a la muestra, la relación entre la longitud y el diámetro estará entre 2 y 3. Las medidas del diámetro lleve al 0,25 mm más cercano (0,01 pulg.), en la tercera puntos a lo largo de la longitud de la muestra y los media. Tomar mediciones de altura, a la 0.25 mm más cercano (0,01 pulg.), En cuatro cuadrantes y un promedio de ellos. Para la determinación del contenido de humedad (Método de Ensayo D2216), asegure un ejemplar representativo de los cortes a partir de muestras intactas, o del suelo adicional para las muestras remoldeadas, poniendo inmediatamente la muestra en un recipiente tapado.

7.3. *Fin de acoplamiento para la torsión.* - Para el movimiento de torsión, el acoplamiento completo de los extremos de la muestra el cabezal y la base de la muestra debe estar asegurada. Acoplamiento de torsión puede suponer si el coeficiente de fricción entre movilizada los cabezales finales y la muestra es de menos de 0,2 para todas las amplitudes de deformación de corte. El coeficiente de fricción viene dado aproximadamente por:

$$\text{Coeficiente de rozamiento movilizado} = \frac{\gamma G}{\sigma'_a}$$

Dónde:

γ = amplitud de deformación de corte (ver sección Cálculos),

G = módulo de corte (ver sección Cálculos), y

σ'_a = esfuerzo efectivo axial

Nota 3. La deformación de corte no está en % para este cálculo.

7.3.1. Cuando este criterio no se cumple, otras disposiciones, como el uso de adhesivos u otras medidas de fricción creciente se debe hacer con el fin de asegurar el acoplamiento completo (2). En tales casos, la eficacia de las disposiciones de acoplamiento se evaluó mediante el ensayo de dos muestras del mismo material, pero de diferente longitud. Las longitudes de estos especímenes se diferir en al menos un factor de 1,5. Las disposiciones de acoplamiento de extremo pueden considerarse satisfactorios si los valores del módulo de corte para estas dos muestras de diferente longitud no difieren en más de un 10%.

8. Propiedades de los aparatos (véase la Nota 4)

NOTA 4. La norma D3740 proporciona información sobre los intervalos de calibración, registros y control de calidad.

8.1. *Los transductores de movimiento.* - Los transductores de movimiento deben ser calibrados con un método independiente para asegurar la exactitud de la calibración dentro del 5% y deben ser trazables por una agencia de normas gubernamentales.

8.1.1. *Transductor de los Movimientos de rotación.* - El movimiento de rotación en el extremo libre de la muestra de suelo se mide normalmente usando transductor de movimiento lineal (s) montado en una distancia radial r_t desde el eje de rotación. Los transductores de movimiento lineal que son sensibles a la aceleración, velocidad o

desplazamiento puede ser utilizado. transductores de medición de rotación también son aceptables. (Ver 6.6).

8.1.1.1. La sensibilidad del transductor de rotación S_{θ} en términos de milivoltios / radián se calcula como sigue:

Para un transductor de acelerómetro con sensibilidad S_a [mV/g] de la sensibilidad del transductor de rotación a la frecuencia f [Hz] es:

$$S_a = S_{\theta} r_t (2\pi f)^2 (1/9.81)$$

Para un transductor de velocidad con sensibilidad S_v [mV/(m/s)] la sensibilidad del transductor de rotación es:

$$S_{\theta} = S_v r_t (2\pi f)$$

Para un transductor de desplazamiento con sensibilidad S_d [mV/m] la sensibilidad del transductor de rotación es:

$$S_{\theta} = S_d r_t$$

La rotación de la parte superior de la muestra está dada por:

$$\theta[\text{rad}] = \frac{RTrdg[\text{mV}]}{S_{\theta} \left[\frac{\text{mV}}{\text{rad}} \right]}$$

Dónde:

RTrdg es la salida del transductor de rotación.

8.2. *Inercia rotacional extremo activo (sólo necesaria para el dispositivo tipo 1).* - La inercia rotacional J_a , del cabezal del extremo activo se determinará con todos los transductores y fijaciones rígidas, incluyendo porciones unidas del dispositivo de excitación de vibraciones, de forma segura en su lugar. La inercia de rotación de los componentes sólidos cilíndricos concéntricos del cabezal del extremo activo y sus anexos se calcula a partir de:

$$(J_a)_1 = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^n M_i d_i^2$$

Dónde:

M_i = masa del componente cilíndrico sólido i ,

d_i = diámetro del componente cilíndrico sólido i , y

n = número de componentes cilíndricos sólidos.

Transductores y otras masas adjuntas a este cabezal se pueden explicar por:

$$(J_a)_2 = \sum_{i=1}^n (J_i + M_i r_i^2)$$

Dónde:

J_i = inercia de rotación del componente i ,

M_i = masa del componente i ,

r_i = distancia desde el eje del cabezal al centro de masa del componente i , y

n = número de componentes conectados al extremo del cabezal activo y que no están cubiertos en la determinación de $(J_a)_1$.

La inercia de rotación total para el extremo activo está dada por:

$$J_a = (J_a)_1 + (J_a)_2$$

8.2.1. Se proporcionan en A2.1, procedimientos alternativos aceptables para determinar J_a .

8.3. *Aparato de Frecuencias de resonancia, constantes de resorte y constantes de amortiguamiento (sólo necesarios para el dispositivo Tipo 1)* - (ver Nota 5) Aparato de frecuencias de resonancia y constantes de resorte se definen sólo para el dispositivo Tipo 1 que tiene resortes unidos al sistema del extremo del cabezal activo. Para determinar las frecuencias de resonancia, La instalación del equipo completo con extremo del cabezal activo y los o-rings utilizadas para sellar las membranas, pero sin la muestra. Vibrar a baja amplitud y ajustar la frecuencia de vibración hasta que el momento torsional de entrada está en fase con la velocidad del sistema extremo del cabezal activo. Esta frecuencia de resonancia es f_a del aparato. La constante de resorte aparato, k_a , se calcula de:

$$K_a = (2\pi f_a)^2 J_a$$

Donde J_a se define en la sección anterior.

NOTA 5. Aparato para el dispositivo del Tipo 2 puede o no puede tener resortes y amortiguadores unidos al extremo del cabezal activo, pero por la ecuación A1.3, estos y al extremo del cabezal activo no afectará a la determinación de módulo de corte y amortiguamiento del suelo.

8.3.1. Aparato coeficiente de amortiguamiento para el dispositivo Tipo 1 aparato sin resortes unidos al extremo del cabezal activo. Tipo de dispositivo 1 sin resortes todavía puede tener una constante de amortiguamiento para dar cuenta de los EMF de nuevo, la resistencia aerodinámica, la vibración de los cables conectados a la placa, y las corrientes de Foucault. Para medir las constantes de amortiguamiento para el aparato, coloque la misma masa, tal como se utiliza para la determinación de las frecuencias de resonancia del aparato. Para los aparatos sin resortes unidos al extremo del cabezal activo, inserte la barra de calibración descrito en la sección anterior. Vibrar el sistema a la frecuencia resonante y medir el momento torsional y el movimiento de rotación. El coeficiente de amortiguamiento aparato está dado por:

$$C_a = \frac{\tau_{apli}}{\theta_w} = \frac{\tau_{apli}}{\frac{d\theta}{dt}} = \frac{\tau_{apli}\omega}{\frac{d^2\theta}{dt^2}}$$

Dónde:

τ_{apli} = amplitud de momento torsional aplicado,

θ = amplitud de rotación,

$\frac{d\theta}{dt}$ = amplitud de la velocidad de rotación,

$\frac{d^2\theta}{dt^2}$ = amplitud de la aceleración de la rotación, y

ω = frecuencia circular de resonancia del sistema de calibración ($=2\pi f$).

8.3.2. Un método alternativo aceptable para calcular el coeficiente de amortiguamiento aparato, c_a , se da en A2.2. Referencia (3) proporciona un método conveniente para determinar tanto J_a y c_a que hace uso del programa dado en el Apéndice X1.

8.4. *Características actuales del motor de momento torsional (sólo es necesario para el dispositivo Tipo 1).* – Para el dispositivo Tipo 1, el aparato sin resortes unidos al extremo del cabezal activo, inserte la barra de calibración como se ha descrito anteriormente. Para el dispositivo Tipo 1, el aparato con resortes unidos, configurar el aparato completo con al extremo del cabezal activo y los o-rings, pero sin muestra. Para cualquier configuración, determinar la frecuencia de resonancia de un sistema de un solo grado de libertad, que consta el aparato de un extremo del cabezal activo y el resorte (o barra de calibración) mediante el uso del mismo procedimiento que se describe más adelante en la sección de procedimientos. A continuación, establezca la frecuencia a 0.707 veces la frecuencia de resonancia y aplicar

el momento torsional de manera que la salida del transductor de vibración para el dispositivo de lectura de salida tiene una señal de al menos diez veces la señal debido a las vibraciones ambientales y ruido eléctrico cuando no se aplica momento torsional. Leer y registrar la salida del transductor de vibraciones y la entrada de corriente al instrumento de generación del momento torsional (motor). A continuación, establezca la frecuencia de 1.414 veces la frecuencia de resonancia del sistema y obtener las lecturas similares a los de 0.707 veces la frecuencia de resonancia. Calcula C_1 y C_2 a partir de:

$$C_1 = \frac{\theta_1}{2CR_1}$$

$$C_2 = \frac{\theta_2}{CR_2}$$

Dónde:

θ_1 = rotación de extremo activo a 0.707 veces la frecuencia de resonancia (Nota 6),

CR_1 = momento torsional de entrada del motor (amperios) a 0.707 veces la frecuencia de resonancia (Nota 7),

θ_2 = salida del transductor del extremo activo a 1.414 veces la frecuencia de resonancia (Nota 6), y

CR_2 = momento torsional de entrada del motor (amperios) a 1.414 veces la frecuencia de resonancia (Nota 7).

NOTA 6. θ_1 y θ_2 serán funciones de la frecuencia de la velocidad y la aceleración medida en los transductores (véase la sección 8.1).

NOTA 7. Si se utiliza un instrumento de medición de corriente, las unidades estarán en amperios. Alternativamente, la caída de voltaje a través de una resistencia fija también puede medirse y las unidades serán entonces voltios.

Mediante el uso de C_1 y C_2 , la potencia del motor de momento torsional, TMR, se obtiene a partir de:

$$TMR = 0.5k (C_1 + C_2)$$

Dónde:

k = constante de resorte del equipo, k_a (o para equipos sin resorte, la calibración de constante del resorte de barra, K_{rod}).

El momento torsional aplicado al cabezal superior por el generador del momento torsional viene dado por:

$$\tau_{apli} = TMR \cdot Trdg$$

Dónde:

Trdg = entrada amplifica al motor de momento torsional

TMR = Características del motor del momento torsional ecuación 12.

8.5. *Calibración del transductor de momento torsional y la inercia extrema pasiva (sólo es necesario para Tipo de dispositivo 2):*

8.5.1. Un transductor de momento torsional se compone generalmente de una caja metálica que contiene un "resorte" instrumentos para medir la deformación, donde la deformación es proporcional al momento torsional aplicado. El momento torsional se aplica al resorte a través de un cabezal de detección sobresale de la carcasa del transductor. La cabeza del sensor debe ser conectado rígidamente al cabezal extremo pasiva y proporcionan la base para la inercia de rotación pasiva final:

$$J_p = J_{cabezal\ pasivo} + J_{sens\ cabeza}$$

Dónde

Jcabezal pasivo = calculado utilizando la ecuación 6-8, y

Jsens cabeza = frecuencia es proporcionada por el fabricante del transductor.

8.5.2. Métodos alternativos previstos en A2.3.

8.5.3. La sensibilidad del transductor de momento torsional está dado por el fabricante y debe ser trazable a una agencia de las normas gubernamentales. El momento torsional medido por el transductor se calcula a partir de:

$$\tau_{apli} = \frac{TTrdg}{TTsen}$$

Dónde:

TTsens = sensibilidad del transductor del motor de momento torsional típicamente en unidades de mV/(N-m)

TTrdg = lectura de voltaje (mV) para el transductor de momento torsional.

9. Procedimiento

9.1. *Configuración del ensayo.* - El procedimiento exacto a seguir durante la configuración del ensayo dependerá del equipo y equipo electrónico utilizado y sobre los métodos utilizados para la aplicación, la medición y el control de la axial estática y las fuerzas laterales. Sin embargo, las muestras se colocan en el aparato por medio de procedimientos que reduzcan al mínimo la perturbación de la muestra. Debe tenerse especial cuidado al fijar los cabezales extremos a la muestra y al colocar el dispositivo de excitación de vibración de los cabezales. Un soporte temporal como se discutió anteriormente puede ser necesario. Para los casos en esfuerzos isotrópicos estáticos son para ser aplicado a una muestra sellada por una membrana, los medios de comunicación por líquido o el aire de confinamiento se pueden utilizar para los especímenes secos o parcialmente saturados. En los ensayos en la saturación completa es importante, un medio líquido de confinamiento debe ser utilizado. Cuando el dispositivo de excitación de vibración se encuentra dentro de la cámara de presión, una interfaz aire-líquido es aceptable siempre que el líquido cubre toda la membrana que confina la muestra.

9.2. *Material electrónico.* - La potencia suministrada al motor de momento torsional debe estar apagado. Conectar el motor de momento torsional al generador de onda sinusoidal (con amplificador, si es necesario). Conectar los transductores de vibración de los instrumentos de lectura. Gradualmente aplique energía al motor de momento torsional y ajustar los instrumentos de lectura de acuerdo con las instrucciones de uso de estos instrumentos.

9.3. *Medidas:*

9.3.1. *Dispositivo de Tipo 1:*

9.3.1.1. *Medición de la frecuencia de resonancia.* - El movimiento del cabezal de extremo activo en unión con el momento torsional aplicado se utiliza para establecer la resonancia. La resonancia se define como la frecuencia más baja en el que el momento torsional es de 90 grados fuera de fase con la aceleración de rotación o desplazamiento. Esta relación de periodo puede ser detectado por observación de la figura de Lissajous en un osciloscopio con la señal de entrada de par y la aceleración de rotación o desplazamiento representa como x-y. (Nota 8) En la relación de período de 90 grados la cifra será una elipse con sus ejes vertical y horizontal. Si se utiliza un transductor de velocidad para la medición de rotación, la resonancia del sistema se produce cuando la figura de Lissajous forma una línea recta, inclinada. Se recomienda que la frecuencia se mide con un medidor de frecuencia electrónica digital y se grabará en al menos tres cifras significativas.

9.3.1.2. La determinación de la resonancia más baja se puede hacer mediante el establecimiento de la frecuencia de excitación de momento torsional (por ejemplo, 10 Hz) y la potencia a un valor tan bajo como sea práctico. A continuación, aumentar la frecuencia de excitación hasta que se obtiene la frecuencia de resonancia del sistema.

NOTA 8. La relación de ciclo entre dos señales también puede ser calculado por medición de la diferencia de tiempo entre los cruces por cero de las dos señales divididas por el período de las oscilaciones (período = 1 frecuencia) multiplicado por 360 da el ciclo en grados. Si las señales no están limpias ondas sinusoidales, a continuación, un análisis espectral tendrá que llevar a cabo para obtener valores precisos de magnitud y ciclo (o componentes reales e imaginarios) de la relación de rotación / momento torsional. La magnitud de la relación de rotación / momento torsional multiplicado por el coseno del ciclo da la componente real de la relación de rotación / momento torsional y la misma relación multiplicada por el seno del ciclo da la componente imaginaria de la relación de rotación / momento torsional.

9.3.1.3. *Medición de la deformación.* - Las mediciones de amplitud de deformación se hará sólo en los sistemas frecuencias de resonancia. Por lo tanto, para un momento torsional dado, los resultados de los transductores de movimiento de vibración registrados en el sistema de frecuencia de resonancia proporcionan información suficiente para calcular amplitud de deformación. Para aumentar o disminuir la amplitud de la deformación, el momento torsional aplicado debe ser aumentado o disminuido. Después de hacer un cambio en el momento torsional, el procedimiento de 9.3.1.1 debe ser seguido para establecer el sistema de frecuencia de resonancia correspondiente antes de la salida del transductor de rotación se puede utilizar para establecer el nuevo valor de amplitud de deformación de corte.

9.3.1.4. *Medición del sistema de amortiguamiento.* - Asociado a cada amplitud de deformación de corte y el sistema de frecuencia de resonancia es un valor de amortiguamiento. Hay dos métodos disponibles para la medición de la amortiguamiento del sistema: el método de vibración de estado estable y el método de decaimiento de la amplitud. Ambos métodos deben dar resultados similares. El método de estado estacionario es más fácil y más rápido. Por lo general, siempre se utiliza el método y decaimiento de la amplitud se utiliza para de vez en cuando a comprobaciones al azar. Para el método de estado estacionario, la salida del transductor de gama activa y el par aplicado se deben medir en cada frecuencia de resonancia. Los cálculos se resumen en la siguiente sección. Para el método de libre vibración, con el sistema de vibración en el sistema de frecuencia de

resonancia, corte la alimentación del dispositivo de excitación de vibración (véase la Nota 9) y registrar la salida del transductor de rotación utilizado en el establecimiento de resonancia como una función del tiempo. Esto le da la curva de caída libre de vibraciones. Los cálculos para el amortiguamiento se describen en la siguiente sección.

NOTA 9. El mecanismo de cierre debe crear un circuito abierto con el dispositivo de excitación de vibración y no puede ser realizado por la desconexión de la alimentación al amplificador. Sin un circuito abierto, el amortiguamiento será inducida por el flujo de corriente en el circuito.

9.3.2. Dispositivo de tipo 2:

9.3.2.1. Medición de la frecuencia de resonancia. - Esta es la frecuencia más baja a la que la rotación extremo activo es un máximo. Además de la medición de la frecuencia, la magnitud de movimiento y la magnitud del momento torsional, el ciclo entre el movimiento en el extremo activo y el momento torsional en el extremo pasivo debe ser determinada (véase la Nota 8).

9.3.2.2. Medición de la amplitud de la deformación. - Las mediciones de amplitud de deformación se realicen exclusivamente en las frecuencias de resonancia del sistema. Por lo tanto, para un momento torsional dado, los resultados de los transductores de movimiento de vibración registrados en la frecuencia de resonancia proporcionan información suficiente para calcular amplitud de deformación. Para aumentar o disminuir la amplitud de la deformación, el momento torsional aplicado debe ser aumentado o disminuido. Después de hacer un cambio en el motor de momento torsional, el procedimiento de 8.3.2.1 debe ser seguido para establecer la frecuencia de resonancia correspondiente antes de la salida del transductor de rotación se puede utilizar para establecer el nuevo valor de amplitud de deformación de corte.

9.3.2.3. Sistema de medición del amortiguamiento. - El amortiguamiento se determina a partir de mediciones de estado estable del par medido en la base de la muestra (fin pasivo), la amplitud de movimiento del extremo activo y la diferencia de ciclo entre ellos como se describe en la siguiente sección.

10. Cálculo

10.1. Generalidades. - Los cálculos requieren los factores de calibración del aparato y las dimensiones físicas y la masa de la muestra en el momento en que se realicen mediciones

de resonancia. Además, para cada condición de esfuerzo estático axial y lateral, un conjunto de datos debe ser medida para cada amplitud de deformación de vibración. Un conjunto de datos consta de: la duración de la vibración (esta vez se puede utilizar para calcular el número de ciclos de vibración), sistema de frecuencia de resonancia, de salida del transductor de extremo activo tanto para los dos tipos de dispositivos.

Para el dispositivo Tipo 1, además, la lectura asociada con el momento torsional aplicado, y si el método de decaimiento de la amplitud de la medición del amortiguamiento también va a ser utilizado, la curva de decaimiento de la amplitud de la vibración libre. Para Tipo de dispositivo 2, es necesario medir el momento torsional, así como la fase entre el momento torsional a la salida del transductor y el movimiento en el extremo activo de la muestra (Nota 8).

10.1.1. Todos los cálculos descritos en esta sección, pueden ser realizados por los programas en un ordenador. Para el dispositivo Tipo 1, una aplicación que permite realizar los cálculos se proporciona en el Apéndice X1. Para el dispositivo Tipo 2, el programa se da en el Apéndice X2. Otros programas pueden ser utilizados para hacer una parte o la totalidad de los cálculos, siempre que proporcionan resultados idénticos. Las unidades para los símbolos de esta sección se dan en el anexo A3.

10.2. *Densidad de la masa de suelo.* - La densidad de la masa de suelo, ρ , está dada por:

$$\rho = \frac{M}{V}$$

Dónde:

M = Masa total de la muestra, y

V = Volumen de la muestra.

10.3. *Inercia rotacional de la muestra.* - La inercia rotacional de la muestra alrededor del eje de rotación viene dada por:

$$J = \frac{Md^2}{8}$$

Dónde:

d = diámetro de la muestra.

10.4. *Factores de inercia del extremo activo:*

10.4.1. El factor de inercia del extremo activo, T_a , sólo es necesario para el dispositivo Tipo 1 y viene dada por:

$$T_a = \frac{J_a}{J} \left[1 - \left(\frac{f_a}{f_r} \right)^2 \right]$$

Dónde:

J_a = inercia rotacional del sistema del cabezal extremo activo según lo calculado anteriormente,

J = inercia rotacional de la muestra calculado anteriormente,

f_a = aparato de frecuencia de resonancia (por aparato sin resortes unidos al cabezal del extremo activo, este factor es cero), y

f_r = frecuencia de resonancia del sistema.

10.5. Factores del equipo amortiguamiento:

10.5.1. El factor del equipo amortiguamiento, para el dispositivo Tipo 1 se calcula a partir de:

$$ADF_a = \frac{c_a}{2\pi f_r J}$$

Dónde:

c_a = coeficiente del equipo de amortiguamiento como se describe por la ecuación 10 o A2.2.

10.6. Factor modificado de magnificación:

10.6.1. El factor de ampliación modificado medido se utiliza para calcular tanto el módulo y el amortiguamiento. Para el dispositivo Tipo 1, se calcula a partir de:

$$(MMF_{medido})_{DT1} = J\omega^2 \left[\text{Re} \left(\frac{\theta_a}{\tau_{apli}} \right) + i \text{Im} \left(\frac{\theta_a}{\tau_{apli}} \right) \right]$$

Dónde:

θ_a = movimiento de rotación en el extremo activo,

τ_{TT} = momento torsional medido por el transductor al extremo activo, y

ω = frecuencia de resonancia como se define en 9.3.1.1 o 9.3.1.2.

En la resonancia, donde la fase es -90 grados, la parte real se convierte en cero.

10.6.2. Para el dispositivo Tipo 2, el factor de ampliación medido viene dado por:

$$(MMF_{medido})_{DT2} = J\omega^2 \left[\text{Re} \left(\frac{\theta_a}{\tau_{TT}} \right) + i \text{Im} \left(\frac{\theta_a}{\tau_{TT}} \right) \right]$$

Dónde:

θ_a = movimiento de rotación en el extremo activo,

τ_{TT} = momento torsional medido por el transductor en el extremo pasivo, y

ω = frecuencia de resonancia como se describe en 9.3.2.1.

10.7. Módulo de corte y de amortiguamiento:

10.7.1. *Administración de ecuaciones.* Para el dispositivo Tipo 1, sustituyendo la ecuación 17 y 18 en la ecuación A1.2 con un poco de reordenación da la ecuación gobernante del sistema de columna de resonancia en forma no dimensional:

$$(MMF_{medido})_{DT1} = \frac{1}{-T_a + iADF_a + \frac{1}{\lambda^* \tan(\lambda^*)}}$$

Dónde:

λ^* es definido por la ecuación A1.4

Para el dispositivo Tipo 2, multiplicando la ecuación A1.3 por $\omega 2J$ y con la suposición de que $\omega_{cp} \ll k_p$ a partir de:

$$(MMF_{calculado})_{DT2} = \frac{J}{J_p} \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^2 \cos \lambda^* + \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^2 \right] \lambda^* \sin \lambda^*$$

Dónde:

λ^* es definido por la ecuación A1.4

$$\omega_p = \sqrt{\frac{k_p}{J_p}}$$

10.7.2. *Factor de frecuencia adimensional.* - El factor de frecuencia adimensional, λ^* , es complejo que tiene tanto una componente real, $\text{Re}(\lambda^*)$, y un componente imaginario, $\text{Im}(\lambda^*)$. Se utiliza en el cálculo de módulo y el amortiguamiento mediante la resolución de la ecuación 22 para el dispositivo Tipo 1 o la ecuación 23 para dispositivo Tipo 2.

10.7.3. Para el dispositivo Tipo 1, definir el factor de amortiguamiento:

$$DF = \frac{1}{MMF_{medido}} - ADF_a$$

Dónde:

MMF_{medido} = valor calculado a partir de la ecuación 20 y

ADF_a = aparato de amortiguamiento factor calculado a partir de la ecuación 19 para el dispositivo Tipo1.

10.7.3.1. T_a y ADF_a se utilizan en la ecuación 22 para determinar λ^* . Estos tres factores se utilizan para determinar tanto el módulo de corte y la relación de amortiguamiento. El programa de ordenador en el Apéndice X1, que está escrito en Excel, resuelve la ecuación 22 mediante la comparación de los resultados con la ecuación 20.

10.7.4. Para el dispositivo Tipo 2, $(MMF_{calc})_{DT2}$ por la ecuación 23 es una función de J_p / J , ω_r / ω_p , y λ^* . El programa de ordenador en el Apéndice X2, que está escrito en Excel,

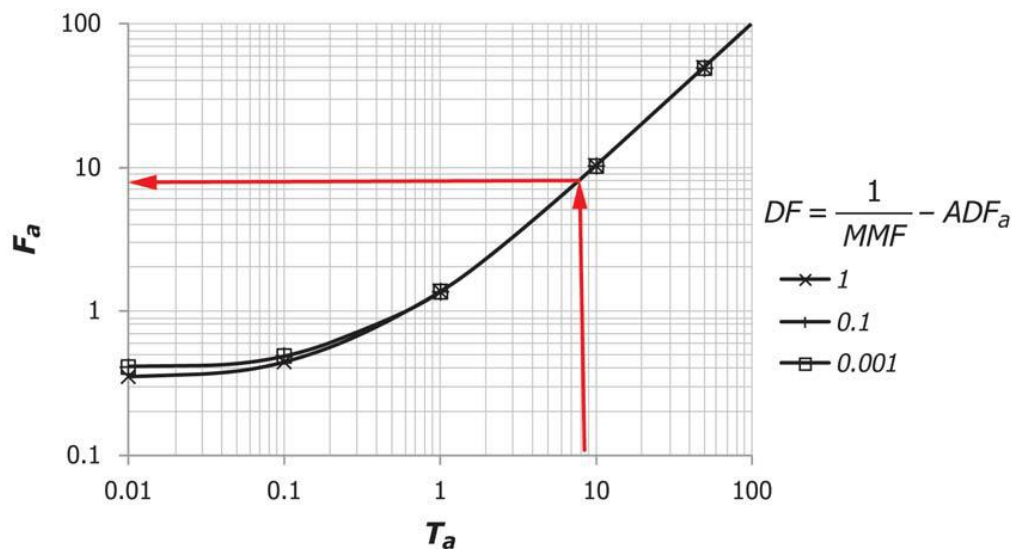
compara los valores de $(MMF_{calc})_{DT2}$ utilizando la ecuación 23 con los valores medidos $(MMF_{medido})_{DT2}$ por la ecuación 21 calcula y proporciona valores de λ^* .

10.7.5. El factor adimensional del módulo se define como:

$$F_a = \frac{\lambda_{Re}^2 - \lambda_{Im}^2}{(\lambda_{Re}^2 + \lambda_{Im}^2)^2}$$

Dónde:

Los subíndices "Re" y "Im" se refieren a los componentes real e imaginaria de λ^* . La figura 2 proporciona los valores de F_a versus los valores de T_a y DF y para el dispositivo Tipo 1. También se da por el programa Excel en el Apéndice X1 para el dispositivo Tipo 1 y el programa en el Apéndice X2 para el dispositivo Tipo 2.



El programa de computador en el Apéndice X1 proporciona valores de F_a y se recomienda. Para valores de T_a por debajo de 1,0, el programa de computador debe ser utilizado para obtener valores precisos de F_a . Para valores de T_a por encima de 10, $F_a \approx T_a$ (Las flechas muestran cómo se utiliza el gráfico donde T_a corresponde al valor en el Apéndice X1.)

Figura 2. El factor adimensional del módulo F_a para su uso en la ecuación 27 para calcular módulo de corte.

10.7.6. El módulo de corte. El módulo de corte para ambos tipos de dispositivo 1 y 2 se calcula a partir de:

$$G = \rho(\omega L)^2 F_a$$

Dónde:

ρ = densidad de la muestra de suelo,

L = longitud de la muestra,

ω_r = sistema resonante de frecuencia circular = $2\pi f_r$, y

Fa = El factor adimensional del módulo de la ecuación 26 para ambos tipos de dispositivo 1 y 2.

10.8. Factor de amortiguamiento:

10.8.1. *Coefficiente de amortiguamiento del Estado vibración constante.* - El coeficiente de amortiguamiento para ambos dispositivos se calcula a partir de:

$$D = \frac{-\lambda_{Re}^2 \lambda_{Im}^2}{(\lambda_{Re}^2 + \lambda_{Im}^2)}$$

10.8.2. *Coefficiente de amortiguamiento de vibración libre.* - Este método sólo se aplica al dispositivo tipo 1. El transductor que se utiliza para determinar la resonancia debe ser utilizado para obtener la curva de decaimiento de la amplitud. Determinar el sistema de decremento logarítmico a partir de:

$$\delta = \left(\frac{1}{n}\right) \ln \left(\frac{A_1}{A_{n+1}}\right)$$

Dónde:

A1 = amplitud de vibración para el primer ciclo después del corte de la energía,

A_{n+1} = amplitud de la vibración para la (n+1) n ciclo de la vibración libre, y

n = número de ciclos de vibración libres que debe ser 10 o menos.

10.8.2.1. Para el equipo donde el cabezal extremo activo está sujeto por un resorte, la relación de energía del sistema, debe calcularse a partir de:

$$S_T = F_a \left(\frac{J_a}{J}\right) \left(\frac{f_a}{f_r}\right)^2$$

Dónde:

Fa = El factor adimensional del módulo para el movimiento de torsión del programa de computador o figura. 2.

Por otro aparato, la relación de energía del sistema es cero. Sistema de amortiguamiento por decaimiento de la amplitud viene dada por:

$$\delta_{sistema} = [\delta(1 + S_T) - S_T\delta]$$

Calcula D sistema desde δ sistema por:

$$D_{sistema} = \frac{\delta_{sistema}}{\sqrt{\delta_{sistema}^2 + (2\pi)^2}}$$

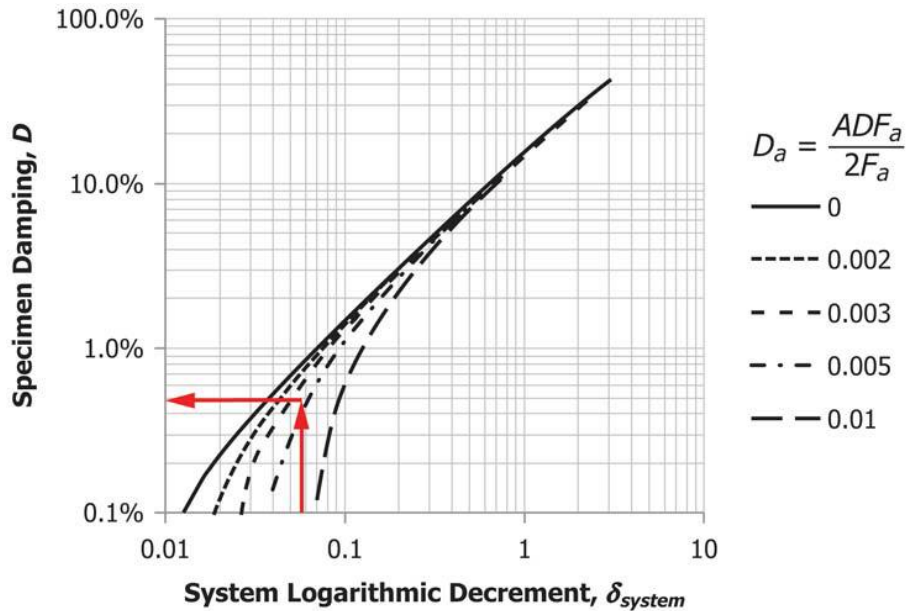
El amortiguamiento en la muestra se calcula a partir de:

$$D = [D_{sistema} - D_g]100\%$$

Dónde:

$$D_a = \frac{ADF_a}{2F_a}$$

Fa está dada por la ecuación 26 con ADFa de la ecuación 19. Los valores de D% por la ecuación 33 en comparación con el sistema decremento logarítmico se puede obtener por el uso de la fig. 3. Soluciones vibración libre no se aplican al dispositivo Tipo 2.



Las flechas muestran cómo se utiliza la gráfica.

Figura 3. Especímen coeficiente de amortiguamiento D como una función del sistema logarítmica decremento δ_{system} y Da para Tipo de dispositivo 1.

10.9. La amplitud de deformación:

10.9.1. La amplitud media de deformación cortante, γ_{avg}, se calcula a partir de:

$$\gamma_{prom.}(\%) = \frac{r_{prom.}}{L} (\theta_a - \theta_p) 100\%$$

Dónde:

θ_a = magnitud del movimiento de rotación en el extremo activo,

θ_p = τTT / k_p Para el dispositivo Tipo (para el tipo de dispositivo 1, θ_p = 0),

L = longitud de la muestra,

$R_{prom.} = 0.4d$ es el valor por defecto (valores entre $0,33d$ a $0.40d$ se pueden utilizar si se documenta en el informe,

d = diámetro de la muestra

11. Informe: datos del ensayo Hoja(s) / Formatos (s)

11.1. La metodología utilizada para registrar los datos como se indica a continuación, electrónicamente o en la hoja (s) de datos de prueba / forma (s), con referencia a 1.4.

11.2. Registro mínimo, con la siguiente información general (datos):

11.2.1. Fecha de la prueba, nombre del operador, el lugar del ensayo.

11.3. Registro de, como mínimo, los siguientes datos de las características aparato para Tipo de dispositivo: 1

11.3.1. Nombre del aparato, número de modelo y número de serie;

11.3.2. Active-final inercia de rotación (J_a);

11.3.3. Aparato frecuencia de resonancia (FA) para aparatos con un resorte unido a la platina superior;

11.3.4. Aparato coeficiente de amortiguamiento (c_a);

11.3.5. La calificación de par motor (TMR);

11.3.6. El factor de calibración del transductor de movimiento (S_θ).

11.4. Registro de, como mínimo, los siguientes datos de las características aparato para Tipo de dispositivo 2:

11.4.1. Nombre del aparato, número de modelo y número de serie;

11.4.2. La rigidez transductor de par (k_p);

11.4.3. La sensibilidad del transductor de par (adolescentes);

11.4.4. La inercia pasiva final (J_p);

11.4.5. El factor de calibración del transductor de movimiento (S_0).

11.5. Registro, como mínimo, los siguientes datos de muestras Características:

11.5.1. Una descripción visual y origen del suelo se expresará, incluyendo el nombre, símbolo del grupo, y si intacto o moldeados de nuevo.

11.5.2. Masa del espécimen inicial y final, diámetro, longitud, relación de vacíos, contenido de agua, y el grado de saturación.

11.5.3. Los procedimientos de preparación de muestras y procedimientos de configuración de prueba deben estar señalados.

11.6. Registro, como mínimo, los siguientes datos de condiciones de verificación estática:

11.6.1. Una descripción completa de las condiciones de estrés laterales axial estática y se le concederán, incluyendo tensiones totales y presiones de poro de agua, condiciones de drenaje, y los procedimientos utilizados para medir tensiones aplicadas, presiones de poro, cambio de longitud, y el cambio de volumen.

11.7. Registro como mínimo los siguientes datos para cada conjunto de datos:

11.7.1. El tiempo aproximado de la vibración en esta amplitud de deformación,

11.7.2. Presión de la célula, la presión hacia atrás contra la presión de poro, tensión axial, longitud.

11.7.3. volumen y densidad de muestras,

11.7.4. Radio utilizado para el cálculo de deformación por esfuerzo cortante promedio si es diferente de $0.4D$, y

11.7.5. Sistema de frecuencia de resonancia, amplitud de deformación, módulo de corte y factor de amortiguamiento.

12. Precisión y Reproducibilidad

12.1. *Precisión.* - Datos del ensayo con la precisión no se presentan debido a la naturaleza del suelo o de la roca, o ambos materiales ensayados por esta norma. O bien no es viable o es muy costoso en este momento para tener diez o más laboratorios participan en un programa de pruebas de todos contra todos. Además, o bien no es viable o es muy costoso de producir múltiples muestras que tienen propiedades físicas uniformes. Cualquier variación observada en los datos es tan probable que sea debido a la variación del espécimen como a la variación de las pruebas de operador o de laboratorio.

12.2. Subcomité D18.09 está buscando todos los datos pertinentes de los usuarios de estos métodos de prueba que podrían ser utilizados para hacer una declaración sobre la precisión limitada.

12.3. Repetitividad. - valor de referencia no hay aceptadas para estos métodos de ensayos, por lo tanto, la repetitividad no se puede determinar.

13. Palabras clave

13.1. Amplitud; presión de confinamiento; mojadura; la carga dinámica; ondas elásticas; frecuencia; Pruebas de laboratorio; ensayos no destructivos; resonancia; módulo de corte;

ensayos de corte; suelos; tensión; estrés; oscilaciones de torsión; transferir método de la función; tensión en tres ejes

ANEXOS DE LA NORMA

(Información obligatoria)

A1. TEORÍA

INTRODUCCIÓN

El módulo de corte se define como el módulo uniforme de corte elástico, linealmente visco elástico (modelo Voigt) la muestra de la misma densidad de masa y dimensiones que la muestra de suelo necesarias para producir una columna resonante que tiene el sistema de medición de frecuencia y la respuesta de resonancia debido a una dada entrada de par vibratorio. Las propiedades de la muestra pueden caracterizarse por una matriz de función de transferencia rigidez de la muestra (4, 5, 6, 7), que simplifica en gran medida la solución al sistema.

La relación de esfuerzo-deformación para un estado de vibración estable en la columna resonante en una curva de histéresis. Este módulo, G , corresponderá a la pendiente de una línea a través de los puntos finales de la curva de histéresis. La sección sobre cálculos prevé cálculo de módulo de corte de las frecuencias de resonancia del sistema de medida de torsión. La energía disipada por el sistema es una medida del amortiguamiento del suelo.

El amortiguamiento se describirá por el coeficiente cortante de amortiguamiento, D , que es análoga al coeficiente crítico viscoso de amortiguamiento, c/c_c , para un sistema de un solo grado de libertad (3).

A1.1 Los valores de amortiguamiento determinado de este modo se corresponden a la zona de la curva de histéresis de esfuerzo-deformación dividido por cuatro veces la energía de deformación elástica almacenada en la muestra a la deformación máxima. Los métodos para determinar el factor de amortiguamiento se prescriben a continuación. En teoría viscoelástica, es común el uso de módulos complejos para expresar tanto el módulo y el amortiguamiento. El módulo de corte complejo está dado por:

$$G^* = G(1 + i2D)$$

Dónde:

$$i = \sqrt{-1}$$

A1.2 Ecuaciones de Equilibrio

A1.2.1 La ecuación que describe la rotación del cabeza extremo activo para un momento torsional aplicado al extremo activo (dispositivo Tipo 1) viene dado por (5, 7):

$$\frac{\theta_a}{\tau_{aplicado}} = \frac{1}{\frac{\omega^2 J}{\lambda^* \tan \lambda^*} - \omega^2 J_a + i\omega c_a + k_a}$$

θ_a = la rotación en el extremo activo (arriba),

$\tau_{aplicado}$ = el momento torsional aplicado al extremo activo,

ω = la frecuencia circular de excitación (= $2\pi f$),

J = el momento de masa de inercia polar de la muestra,

J_a = el momento de masa de inercia polar total de la parte del sistema del cabezal superior incluida la contribución de inercia aparato calculado a partir de la calibración,

c_a = el aparato coeficiente de amortiguamiento para el extremo activo,

k_a = la rigidez del aparato, y

λ^* = la frecuencia compleja adimensional

A1.2.2 La ecuación que describe la rotación del cabeza extremo activo para un momento torsional aplicado al extremo pasivo (dispositivo Tipo 2) está dado por (5, 7):

$$\frac{\theta_a}{\tau_{TT}} = \frac{\frac{\omega^2 J}{\lambda^* \tan \lambda^*} - \omega^2 J_a + k_p}{k_p \frac{\omega^2 J}{\lambda^* \sin \lambda^*}}$$

Dónde:

θ_a = la rotación en el extremo activo (arriba),

τ_{TT} = el momento torsional medido por el transductor en el extremo pasivo,

J = el momento de masa de inercia polar de la muestra,

J_p = el momento de masa de inercia polar total del sistema del cabezal inferior incluyendo la contribución de inercia transductor de momento torsional calculado a partir de la calibración,

k_p = el transductor de la rigidez de torsión, y

λ^* = la frecuencia compleja adimensional.

A1.2.3 La frecuencia compleja adimensional, λ^* , es un parámetro que caracteriza las propiedades de la muestra cómo se define en (5, 6, 7):

$$\lambda^* = \frac{\omega L}{\sqrt{\frac{G[1 + i 2 D]}{\rho}}}$$

dónde:

G = módulo de corte de la muestra,

D = coeficiente de amortiguamiento de la muestra,

L = longitud de la muestra, y

ρ = densidad de la muestra

A2. PROPIEDADES DE LOS EQUIPOS

A2.1. Procedimientos alternativos para la Inercia del cabezal del extremo activo

A2.1.1 Si todos los componentes no tienen una geometría simple, un procedimiento alternativo que implica una barra de calibración de metal de rigidez conocido al momento torsional puede ser utilizado. Un extremo de la varilla se fija de forma rígida y el otro extremo se sujeta rígidamente al cabezal del extremo activo. Puesto que puede ser muy difícil para sujetar la barra de calibración a la placa sin la adición de inercia de rotación, se recomienda que una placa auxiliar sea monolítica con la barra de calibración o estar fijado de forma permanente por soldadura, etc. La rigidez torsional de la barra de calibración debe ser elegido de tal manera que la frecuencia de resonancia del sistema con la barra de calibración en su lugar se encuentra cerca del centro de la gama de frecuencias de resonancia del sistema previstos para análisis de suelos. Varias barras de calibración pueden ser necesarias para tener en cuenta los diferentes tamaños de probetas o muestras muy diversas rigideces. Con la barra de calibración en su lugar, determinar el sistema de baja amplitud frecuencia de resonancia, a partir. La inercia de rotación del sistema de placa de extremo activo con platina auxiliar, J_1 , se calcula de:

$$J_1 = \frac{k_{varilla}}{(2\pi)^2 [f_{varilla}^2 - f_a^2]}$$

Dónde:

K_{rod} = rigidez al momento torsional de la barra de calibración,
= (IPG) / L

I_p = momento polar de inercia de la barra de calibración, = $(\pi d^4) / 32$,

d = diámetro de barra de calibración,

G = módulo de corte para el material de barra de calibración,

fa = aparato frecuencia de resonancia torsional como se describe en 8.3, y
L = Longitud de la barra de calibración.

A2.1.1.1 Si la placa auxiliar no es idéntica a la que se utilizará en las pruebas, la diferencia entre su inercia de rotación y la de la placa para las pruebas de suelo debe ser tenido en cuenta por el uso de la ecuación A2.2 para determinar el valor de J_a para su uso en el análisis de muestras.

$$J_a = J_1 - J_2 + J_3$$

dónde:

J_1 = inercia de rotación del sistema de platina extrema activo con placa auxiliar,

J_2 = inercia de rotación de la platina barra de calibración, y

J_3 = inercia de rotación de la platina para probar el suelo.

Las ecuaciones anteriores asumen que la inercia de rotación de las barras de calibración es mucho menor que los valores correspondientes para el sistema de placa de extremo activo.

A2.1.2. Segundo procedimiento alternativo es para acoplar la barra de calibración de metal para las placas en lugar de la muestra y a continuación, utilizar los procedimientos de los cálculos en la sección 10 a la parte posterior-figura las inercias extremo activo de los módulos conocido de la varilla.

A2.1.3 Una tercera alternativa sería seguir el procedimiento en A2.3, sustituyendo K_{rod} para k_p y J_a para J_p .

A2.2 Método alternativo para determinar el coeficiente de amortiguamiento del equipo

A2.2.1 Con el equipo vibrando a la frecuencia de resonancia, cortó la energía al dispositivo de excitación y registrar la curva de caída de la vibración del equipo. A partir de la curva de decaimiento, calcular el decremento logarítmico para el equipo δ_a , como sigue:

$$\delta_a = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{A_1}{A_{n+1}} \right)$$

Dónde:

A_1 = amplitud de la vibración para el primer ciclo después de que la energía se corta,

A_{n+1} = amplitud de $(n + 1)^{\text{a}}$ enésimo ciclo, y

n = número de ciclos de vibración libres

El aparato coeficiente de amortiguamiento, c_a , está dada por:

$$c_a = 2f_a J_a \delta_a$$

dónde:

f_a = movimiento de torsión frecuencia de resonancia medida durante aparato de amortiguamiento determinación,

J_a = inercia de rotación de extremo activo para condiciones de calibración, y

δ_a = aparato de decremento logarítmico.

A2.3. Procedimiento alternativo para determinar el pasivo J_p de rotación por inercia, J_p , y el par del transductor Rigidez

A2.3.1. Este procedimiento (5) hace uso de masas con inercias conocidos fija de uno en uno a la placa final pasiva. El procedimiento consiste en montar el transductor en una base fija y la medición de las frecuencias de vibración libres con dos inercias conocidos diferentes unidos a la placa inferior. vibración libre es iniciado por manualmente "tocando" las inercias conectados y el de salida del transductor de par se utiliza para medir las frecuencias. Los resultados proporcionan las dos ecuaciones siguientes:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_p}{J_1 + J_p}}$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_p}{J_2 + J_p}}$$

Dónde

f_1 y f_2 son las frecuencias medidas correspondientes a J_1 y J_2 , k_p es la rigidez del transductor y J_p es la inercia pasiva. Una de las inercias conocidas es bastante grande en relación con J_p y el otro en el mismo orden de magnitud. Resolviendo la ecuación A2.5 para eliminar k_p ofrece:

$$f_p = \frac{f_2^2 J_2 - f_1^2 J_1}{f_1^2 - f_2^2}$$

$$k_p = (2\pi f_1)^2 (J_1 + J_p) = (2\pi f_2)^2 (J_2 + J_p)$$

El valor de J_p debe ajustarse a las condiciones de ensayo; por ejemplo, la inercia de los discos porosos que no se incluyeron en la inercia en el momento de la calibración se debe

agregar a JP similar a los procedimientos descritos por la ecuación A2.2 para la inercia extremo activo.