



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**EFFECTO DE FINOS NO PLÁSTICOS EN LOS PARÁMETROS
DINÁMICOS DE ARENAS DE RELAVE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FELIPE ALEJANDRO SAAVEDRA SALAZAR

PROFESOR GUÍA:
FELIPE OCHOA CORNEJO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
CAROLINA SMITH GUERRA
FRANCISCO HERNANDEZ PRADO

SANTIAGO DE CHILE

2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

POR: FELIPE SAAVEDRA SALAZAR

FECHA: ENERO 2021

PROF.GUÍA: FELIPE OCHOA CORNEJO

EFFECTO DE FINOS NO PLÁSTICOS EN LOS PARÁMETROS DINÁMICOS DE ARENAS DE RELAVE

El estudio del comportamiento dinámico ante sollicitaciones sísmicas en Chile es fundamental, al considerar que Chile uno de los países más sísmicos del mundo. Uno de los parámetros fundamentales para entender la respuesta dinámica del comportamiento de una estructura, es el módulo de corte (G) y su amortiguamiento (D).

Este trabajo corresponde a un estudio experimental sobre el efecto de los finos no plásticos, en los parámetros dinámicos de la arena de relaves “El Torito”. El principal objetivo es analizar las propiedades dinámicas de una arena de relave, para distintos contenidos de finos mediante el uso de Columna Resonante y Bender Element.

El estudio tiene tres etapas: 1) Caracterización geotécnica del material a utilizar a través de granulometrías, determinación de índice de vacíos máximos y mínimos, microscopía, y gravedad específica. 2) Ensayos de Bender Element en carga y descarga para confinamientos entre 1 a 5 [kgf/cm²], para un índice de vacío inicial de confección entre 0,75 a 0,85 y con un contenido de finos entre 1% a 30%. 3) Ensayos de Columna Resonante para una arena de relave con un contenido de finos entre 1% a 20%, con el mismo estado de carga e índice de vacío de confección que los ensayos de Bender Element.

Dentro de los principales resultados se obtiene la dependencia de los parámetros dinámicos (G y D) con el estado de carga, el índice de vacío inicial y la deformación al corte, tal y como se señala en la literatura, adicionalmente se han encontrado relaciones entre el contenido de finos y las propiedades dinámicas, definiendo relaciones lineales y exponenciales.

Finalmente, se ha estudiado la diferencia de resultados de G_{max} mediante columna resonante y bender element, obteniendo un valor levemente mayor en este último. Esto se asocia a una deformación más pequeña que se alcanza en bender element, por otro lado, para el estudio del comportamiento drenado y no drenado, se ha encontrado una diferencia, la cual se incrementa al aumentar la deformación al corte. Este fenómeno es posible asociarlo principalmente al estado de carga, donde en el comportamiento no drenado, existe una disminución de la tensión efectiva de la muestra de suelo ensayada debido a la generación de presiones de poros. Ante esto se estudia una corrección del valor de G asociado al comportamiento no drenado mediante el estado de carga.

~We spend our lives waiting for
something to happen and the only
thing that happens is life. ~

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Contexto General.....	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General.....	2
1.2.2. Objetivo Específicos	2
1.3. Metodología	2
1.4. Organización de la Memoria	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Preámbulo.....	4
2.1.1. Propiedades dinámicas de los suelos	4
2.1.1.1. Módulo de Corte (G).....	4
2.1.1.2. Relación de Amortiguamiento (D).....	7
2.1.1.3. Degradación de la rigidez y disipación de energía	9
2.1.1.4. Parámetros que afectan a G y D	10
2.1.1.5. Rangos de deformaciones.....	12
2.1.2. Medición de las Propiedades dinámicas de los suelos.....	13
2.1.2.1. Ensayos Geofísicos.....	14
2.1.2.1.1. Down Hole	14
2.1.2.1.2. Cross Hole	14
2.1.2.1.3. SASW	15
2.1.2.2. Ensayos de Laboratorio.....	15
2.1.2.2.1. Bender Element	15
2.1.2.2.2. Columna Resonante	16
2.1.2.2.3. Ensayo Triaxial Cíclico.....	17
2.1.2.2.4. Corte Simple Cíclico	18
2.1.3. Fábrica del Medio Granular	18
2.2. Implementación.....	21
2.2.1. Modelo Hiperbólico.....	21
2.2.2. Regla de Masing.....	21
2.3. Propiedades dinámicas de las arenas	22
2.3.1. Propiedades dinámicas de arenas limpias	24
2.3.2. Propiedades dinámicas de arenas con finos	27

2.4.	Resumen.....	35
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	36
3.1.	Descripción de los materiales	36
3.1.1.	Torito Natural.....	36
3.1.2.	Torito con finos.....	38
3.1.3.	Microscopía Relave El Torito.....	38
3.2.	Equipos Utilizados.....	41
3.2.1.	Mastersizer 2000	41
3.2.2.	SEM.....	41
3.2.3.	Bender Element.....	42
3.2.3.1.	Base Cámara Triaxial y Cámara Triaxial	42
3.2.3.2.	Osciloscopio PiscoScope 4224	43
3.2.3.3.	Generador de Señales	44
3.2.4.	Columna Resonante.....	45
3.2.4.1.	Controlador Presión/Volumen Standard	46
3.2.4.2.	Equipo Columna Resonante (RCA).....	46
3.3.	Metodologías de los Ensayos	47
3.3.1.	Confección de probetas.....	48
3.3.2.	Saturación de la probeta	48
3.3.3.	Consolidación de la probeta	49
3.3.4.	Bender Element.....	49
3.3.5.	Columna Resonante.....	49
3.4.	Programa Experimental	49
4.	MÓDULO DE CORTE	52
4.1.	Resultados Pre-Ensayo	52
4.1.1.	Comparación Entre BE y CR.....	57
4.2.	Resultados para distintos estados de carga	59
4.2.1.	Bender Element.....	59
4.2.1.1.	Carga.....	59
4.2.1.2.	Descarga.....	63
4.2.2.	Columna Resonante.....	65
4.2.2.1.	Carga.....	65
4.2.2.2.	Descarga.....	71

4.3.	Comparación entre BE y CR.....	73
4.4.	Discusión	75
4.4.1.	Efecto del Estado de Carga.....	80
4.4.2.	Efecto del Índice de Vacío.....	81
4.4.3.	Efecto del Contenido de Finos	82
4.4.4.	Parámetros α y β	84
4.4.5.	Parámetros C_g y n en carga.....	86
4.4.6.	Parámetros C_g y n en descarga.....	88
4.4.7.	Parámetros A_D y n_D	90
5.	DEGRADACIÓN DRENADA	92
5.1.	Resultados para Arena Limpia.....	92
5.2.	Resultados para Arenas con Finos	96
5.2.1.	Resultados para 5% Contenido de Finos	96
5.2.2.	Resultados para 10% Contenido de Finos	100
5.2.3.	Resultados para 17% Contenido de Finos	104
5.2.4.	Resultados para 20% Contenido de Finos	106
5.3.	Discusión	110
5.3.1.	Efecto del Estado de Carga.....	124
5.3.2.	Efecto del Índice de vacío	128
5.3.3.	Efecto del Contenido de finos.....	134
5.3.4.	Estimación de la Degradación de la Rigidez	138
5.3.5.	Estimación del Amortiguamiento (Damping)	143
5.3.6.	G/G_{max} vs D	146
6.	DEGRADACIÓN NO DRENADA.....	148
6.1.	Resultados para Arena Limpia.....	148
6.2.	Resultados para Arenas con Finos	153
6.2.1.	Resultados para 5% Contenido de Finos	153
6.2.2.	Resultados para 10% Contenido de Finos	158
6.2.3.	Resultados para 20% Contenido de Finos	163
6.3.	Discusión	168
6.3.1.	Análisis Resultados	182
6.3.2.	Comparación Resultados Drenados y No Drenados.....	186
6.3.3.	Corrección G_{nd}	191

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	194
7.1. Conclusiones Generales	194
7.2. Recomendaciones para Trabajos Futuros	197
8. BIBLIOGRAFÍA	199

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Valores de la función del índice de vacío, $f(e)$	12
Tabla 2-2: Valores obtenidos por distintos autores para c_g y n	19
Tabla 2-3: Valores obtenidos por distintos autores para α y β	20
Tabla 2-4: Trabajos de G_{max} para arenas limpias.....	25
Tabla 2-5: Trabajos de G_{max} para arenas con finos.....	28
Tabla 3-1: Resumen Caracterización Geotécnica.	37
Tabla 3-2: Parámetros del suelo para distintos contenidos de finos.	38
Tabla 3-3: Ubicación y ensayos realizados.	50
Tabla 4-1: Resumen parámetros obtenidos por bender element para índice de vacío inicial de confección 0,75.	75
Tabla 4-2: Resumen parámetros obtenidos por bender element para índice de vacío inicial de confección 0,80.	76
Tabla 4-3: Resumen parámetros obtenidos por bender element para índice de vacío inicial de confección 0,85.	77
Tabla 4-4: Resumen parámetros obtenidos por columna resonante para índice de vacío inicial de confección 0,75.....	78
Tabla 4-5: Resumen parámetros obtenidos por columna resonante para índice de vacío inicial de confección 0,80.....	79
Tabla 4-6: Resumen parámetros obtenidos por columna resonante element para índice de vacío inicial de confección 0,85.	80
Tabla 4-7: Relación del Contenido de Finos en función del confinamiento	82
Tabla 4-8: Relación del Contenido de Finos en función de α y β para cada índice de vacío de confección inicial.....	84
Tabla 4-9: Relación del Contenido de Finos en función C_g y n	86
Tabla 4-10: Coeficientes de la potencial en descarga.....	89
Tabla 4-11: Valor de k según OCR y %CF.....	90
Tabla 4-12: Resumen parámetros A_D y n_D	91
Tabla 5-1: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena limpia para $e_i=0,75$	111
Tabla 5-2: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena limpia para $e_i=0,80$	112
Tabla 5-3: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena limpia para $e_i=0,85$	113
Tabla 5-4: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena con 5%CF para $e_i=0,75$	114
Tabla 5-5: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena con 5%CF para $e_i=0,80$	115
Tabla 5-6: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena con 5%CF para $e_i=0,85$	116
Tabla 5-7: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena con 10%CF para $e_i=0,75$	117
Tabla 5-8: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena con 10%CF para $e_i=0,80$	118
Tabla 5-9: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena con 10%CF para $e_i=0,85$	119
Tabla 5-10: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena con 17%CF para $e_i=0,75$	120
Tabla 5-11: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena con 20%CF para $e_i=0,75$	121
Tabla 5-12: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena con 20%CF para $e_i=0,80$	122

Tabla 5-13: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena con 20%CF para $e_i=0,85$	123
Tabla 5-14: Deformación Referencial Hardin and Drnevich (1972b).	139
Tabla 5-15: Deformación Referencial Stokoe et al. (1999).....	140
Tabla 5-16: Coeficiente curvatura obtenidos según metodología de Stokoe et al. (1999).....	140
Tabla 5-17: Coeficiente k obtenidos según metodología de Zhang et al. (2005).	142
Tabla 6-1: Resumen Ensayo CR No Drenado 1%CF para $e_i=0,75$	170
Tabla 6-2: Resumen Ensayo CR No Drenado 1%CF para $e_i=0,80$	171
Tabla 6-3: Resumen Ensayo CR No Drenado 1%CF para $e_i=0,85$	172
Tabla 6-4: Resumen Ensayo CR No Drenado 5%CF para $e_i=0,75$	173
Tabla 6-5: Resumen Ensayo CR No Drenado 5%CF para $e_i=0,80$	174
Tabla 6-6: Resumen Ensayo CR No Drenado 5%CF para $e_i=0,85$	175
Tabla 6-7: Resumen Ensayo CR No Drenado 10%CF para $e_i=0,75$	176
Tabla 6-8: Resumen Ensayo CR No Drenado 10%CF para $e_i=0,80$	177
Tabla 6-9: Resumen Ensayo CR No Drenado 10%CF para $e_i=0,85$	178
Tabla 6-10: Resumen Ensayo CR No Drenado 20%CF para $e_i=0,75$	179
Tabla 6-11: Resumen Ensayo CR No Drenado 20%CF para $e_i=0,80$	180
Tabla 6-12: Resumen Ensayo CR No Drenado 20%CF para $e_i=0,85$	181
Tabla 6-13: Valores de n	192

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Ciclo de Histéresis (Kramer, 1996).	5
Figura 2-2: Resultado G vs γ para Toyoura Sand (Iwasaki, 1978).	6
Figura 2-3: Resultado G vs γ para Toyoura Sand (Iwasaki, 1978).	6
Figura 2-4: Decrecimiento de la amplitud de la oscilación con el tiempo (Ishihara, 1996).	7
Figura 2-5: Obtención del amortiguamiento (Ishihara, 1996)	8
Figura 2-6: Razón de amortiguamiento para Arenas (Seed & Idriss, 1970).	8
Figura 2-7: Parámetros que afectan a G y D (Hardin and Drnevich, 1972).	11
Figura 2-8: Valores de la función del índice de vacío, $f(e)$	12
Figura 2-9: Variación del módulo de corte (G) versus el nivel de deformación (D) (Sawangsurriya, 2012).	13
Figura 2-10: Down Hole	14
Figura 2-11: Cross Hole	15
Figura 2-12: SASW (Spectral Analysis of Surface Waves).	15
Figura 2-13: Bender Element (Arulnathan et al., 1998).	16
Figura 2-14: Esquema Columna Resonante (ASTM D4015, 2015).	17
Figura 2-15: a) Esquema del ensayo triaxial cíclico. b) Curva histerética y obtención de resultados (Ishihara, 1996).	17
Figura 2-16: a) Esquema del ensayo de corte simple cíclico. b) Curva histerética y obtención de resultados. (Ishihara, 1996)	18
Figura 2-17: Valores de C_g y n para distintos autores.	19
Figura 2-18: Valores de α y β para distintos autores.	20
Figura 2-19: Regla de Masing.	21
Figura 2-20: Resultados Empíricos para G/G_{max} y D (Modificado de Seed and Idriss, 1970).	22
Figura 2-21: Resultados Empíricos para G/G_{max} y D de distintos tipos de suelo (EPRI 1993).	23
Figura 2-22: Resultados Torito Viertel (2003) y Sánchez (2002).	24
Figura 2-23: Módulo de corte normalizado en función del confinamiento normalizado para distintos autores de arenas limpias.	26
Figura 2-24: G_o vs e para arenas limpias.	26
Figura 2-25: Efecto del confinamiento en arenas limpias en G/G_{max} y amortiguamiento.	27
Figura 2-26: Módulo de corte normalizado en función del confinamiento normalizado para distintos autores de arenas con finos.	29
Figura 2-27: G_o vs e para arenas con finos (10%CF y 20%CF).	29
Figura 2-28: Efecto del confinamiento en una arena con finos en G/G_{max} y amortiguamiento (Kokusho, 1980).	30
Figura 2-29: Variación de G/G_{max} y amortiguamiento en función del confinamiento para cinco tipos de arenas (Bayat, 2020).	30
Figura 2-30: Variación de D para distintos contenidos de finos de una arena angular (Payan et al., 2017).	31
Figura 2-31: G/G_{max} y Damping vs deformación al corte para suelos cuaternarios y las curvas de Vucetic and Dobry (1991), (Zhang et al. 2005).	31

Figura 2-32: Comparación de G/G_{max} para arenas con diferentes contenidos de finos (Wichtmann et al. 2015).	32
Figura 2-33: G/G_{max} vs Deformación según modelos teóricos.	32
Figura 2-34: D vs Deformación según modelos teóricos.	33
Figura 2-35: D vs G/G_{max} según autores para arenas con finos.	33
Figura 2-36: Comparación resultados drenado y no drenado (El Mohtar et al., 2013).	34
Figura 2-37: Exceso presión de poro normalizada por el confinamiento inicial (El Mohtar et al., 2013).	35
Figura 3-1: Esquema Tranque de relave El Torito.	36
Figura 3-2: Granulometría láser y mecánica para Torito Natural y fracción fina.	37
Figura 3-3: Microscopía óptica de la arena de relave natural. (a) Malla #40, (b) Malla #50, (c) Malla #100 y (d) Malla #200.	39
Figura 3-4: SEM de la arena de relave natural. (a) Malla #40, (b) Malla #100, (c) Malla #200 y (d) Finos.	40
Figura 3-5: Equipo de análisis granulométrico. (a) Equipo Mastersizer 2000. (b) Sistema de circulación de mezcla arena-solución (Maureira, 2012).	41
Figura 3-6: Microscopio SEM (Rodríguez, 2019).	42
Figura 3-7: Deformación del Bender Element en un extremo (Leong, Yeo y Rahardjo (2005)).	42
Figura 3-8: Base cámara triaxial (izquierda) y cámara triaxial (derecho).	43
Figura 3-9: Elemento piezoeléctrico cubierto en un material plástico impermeable.	43
Figura 3-10: Osciloscopio PicoScope 4224.	43
Figura 3-11: Software PicoScope 6.	44
Figura 3-12: Generador de señales TG4001.	44
Figura 3-13: Esquema Bender Element (Viggiani, Atkinson 1995).	45
Figura 3-14: Equipo Columna Resonante IDIEM.	45
Figura 3-15: Controlador Presión/Volumen Standard (STDDPC) V2. (GDSSLAB v2.5.4, 2015).	46
Figura 3-16: Cámara Triaxial y componentes internos Columna Resonante. (GDSSLAB v2.5.4, 2015).	47
Figura 3-17: Equipo externo a la celda triaxial.	47
Figura 3-18: Programa Experimental Pre-Ensayos.	50
Figura 3-19: Programa Experimental para distintos estados de carga y caracterización.	51
Figura 4-1: Resultados velocidad de onda de corte en pre-ensayos en bender element (a) $e_i = 0,75$, (b) $e_i = 0,80$, y (c) $e_i = 0,85$.	53
Figura 4-2: Resultados velocidad de onda de corte en pre-ensayos en columna resonante (a) $e_i = 0,75$, (b) $e_i = 0,80$, y (c) $e_i = 0,85$.	54
Figura 4-3: Resultados módulo de corte máximo en pre-ensayos en bender element (a) $e_i = 0,75$, (b) $e_i = 0,80$, y (c) $e_i = 0,85$.	55
Figura 4-4: Resultados módulo de corte máximo en pre-ensayos en columna resonante (a) $e_i = 0,75$, (b) $e_i = 0,80$, y (c) $e_i = 0,85$.	56
Figura 4-5: Resultados damping en pre-ensayos. (a) $e_i = 0,75$, (b) $e_i = 0,80$, y (c) $e_i = 0,85$.	57

Figura 4-6: Comparación resultados velocidad de onda de corte en Columna Resonante y Bender Element para el Pre-Ensayo.....	58
Figura 4-7: Comparación resultados módulo de corte máximo en Columna Resonante y Bender Element para el Pre-Ensayo.....	58
Figura 4-8: Resultados Ensayos Bender Element – Carga: Velocidad de Onda de Corte.	59
Figura 4-9: Resultados Ensayos Bender Element – Carga: Velocidad de Onda de Corte Normalizado versus el confinamiento normalizado.	60
Figura 4-10: Resultados Ensayos Bender Element – Carga: Módulo de Corte Máximo.....	60
Figura 4-11: Resultados Ensayos Bender Element – Carga: Módulo de Corte Máximo Normalizado versus el confinamiento normalizado.....	61
Figura 4-12: Velocidad de Onda de Corte Normalizado vs Contenido de finos. ...	61
Figura 4-13: Módulo de Corte Máximo Normalizado vs Contenido de finos.....	62
Figura 4-14: Alfa (α) vs Beta (β) en Bender Element.....	62
Figura 4-15: Cg (α) vs n (β) en Bender Element.....	63
Figura 4-16: (a) Cg y (b) n vs Contenido de finos en Bender Element.	63
Figura 4-17: Velocidad de onda de corte vs Estado de Carga en Bender Element - Descarga.....	64
Figura 4-18: Módulo de Corte Máximo vs Estado de Carga en Bender Element - Descarga.....	64
Figura 4-19: (a) Ecuación de Hardin vs OCR, y (b) k vs Contenido de finos en Bender Element.....	65
Figura 4-20: Resultados Ensayos Columna Resonante – Carga: Velocidad de Onda de Corte.....	66
Figura 4-21: Resultados Ensayos Columna Resonante – Carga: Velocidad de Onda de Corte Normalizado versus el confinamiento normalizado.	66
Figura 4-22: Resultados Ensayos Columna Resonante – Carga: Módulo de Corte Máximo.....	67
Figura 4-23: Resultados Ensayos Columna Resonante – Carga: Módulo de Corte Máximo Normalizado versus el confinamiento normalizado.....	67
Figura 4-24: Velocidad de Onda de Corte vs Contenido de finos en Columna Resonante.....	68
Figura 4-25: Módulo de Corte Máximo vs Contenido de finos en Columna Resonante.....	68
Figura 4-26: Alfa (α) vs Beta (β) en Columna Resonante.....	69
Figura 4-27: Cg (α) vs n (β) en Columna Resonante.....	69
Figura 4-28: Cg (α) y n (β) vs Contenido de finos en Columna Resonante.	70
Figura 4-29: Damping vs Confinamiento normalizado en Columna Resonante. ...	70
Figura 4-30: A _D y n _D vs Contenido de Finos en Columna Resonante.	71
Figura 4-31: Velocidad de onda de corte vs Estado de Carga en Columna Resonante - Descarga.....	71
Figura 4-32: Módulo de Corte Máximo vs Estado de Carga en Columna Resonante - Descarga.....	72
Figura 4-33: (a) Ecuación de Hardin vs OCR, y (b) k vs Contenido de finos en Columna Resonante.....	72

Figura 4-34: Comparación resultados de Velocidad de onda de corte en BE y CR.	73
Figura 4-35: Comparación resultados de Módulo de Corte en BE y CR.	73
Figura 4-36: Comparación resultados de parámetros (a) alfa y (b) beta en BE y CR.	74
Figura 4-37: Comparación resultados de Parámetros C_g y n en BE y CR.	74
Figura 4-38: Efecto del Estado de Carga en G_{max} .	81
Figura 4-39: Efecto del índice de vacío en G_{max} .	82
Figura 4-40: Efecto del Contenido de Finos en G_{max} .	83
Figura 4-41: G_{max} en función del Contenido de Finos, para distintos estados de carga, según: (a) $e_i=0,75$, (b) $e_i=0,80$, y (c) $e_i=0,85$.	83
Figura 4-42: Parámetros α y β respecto a otros autores.	85
Figura 4-43: Parámetro α respecto al contenido de finos.	85
Figura 4-44: Parámetros β respecto al contenido de finos.	85
Figura 4-45: Modulo de corte normalizado en función del confinamiento normalizado.	86
Figura 4-46: C_g y n obtenidos y según autores.	87
Figura 4-47: C_g en función del contenido de finos.	88
Figura 4-48: n en función del contenido de finos.	88
Figura 4-49: Modulo de corte normalizado en función del confinamiento normalizado para descarga.	89
Figura 4-50: Parámetro A_D en función del contenido de finos.	91
Figura 4-51: Parámetro n_D en función del contenido de finos.	91
Figura 5-1: Resultados de G vs γ , para una arena limpia ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	93
Figura 5-2: Resultados de G/G_{max} vs γ , para una arena limpia ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	94
Figura 5-3: Resultados de D/D_{min} vs γ , para una arena limpia ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	95
Figura 5-4: Resultados de D/D_{min} vs G/G_{max} , para una arena limpia ensayada a diferentes estados de carga.	96
Figura 5-5: Resultados de G vs γ , para una arena con 5% CF, ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	97
Figura 5-6: Resultados de G/G_{max} vs γ , para una arena con 5%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	98
Figura 5-7: Resultados de D/D_{min} vs γ , para una arena con 5%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	99
Figura 5-8: Resultados de D/D_{min} vs G/G_{max} , para una arena con 5%CF ensayada a diferentes estados de carga.	100

Figura 5-9: Resultados de G vs γ , para una arena con 10% CF, ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	101
Figura 5-10: Resultados de G/G_{max} vs γ , para una arena con 10%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	102
Figura 5-11: Resultados de D/D_{min} vs γ para una arena con 10%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	103
Figura 5-12: Resultados de D/D_{min} vs G/G_{max} , para una arena con 10%CF ensayada a diferentes estados de carga.	104
Figura 5-13: Resultados para Torito Natural (17%CF) a un índice de confección inicial de 0,75, para (a) G vs g , (b) G/G_{max} vs g , y (c) D/D_{min} vs γ	105
Figura 5-14: Resultados de D/D_{min} vs G/G_{max} , para una arena con 17%CF ensayada a diferentes estados de carga.	106
Figura 5-15: Resultados de G vs γ , para una arena con 20% CF, ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	107
Figura 5-16: Resultados de G/G_{max} vs γ , para una arena con 20%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	108
Figura 5-17: Resultados de D/D_{min} vs γ para una arena con 20%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	109
Figura 5-18: Resultados de D/D_{min} vs G/G_{max} , para una arena con 20%CF ensayada a diferentes estados de carga.	110
Figura 5-19: Efecto del confinamiento en G	124
Figura 5-20: Efecto del confinamiento en G/G_{max}	125
Figura 5-21: Efecto del confinamiento en G/G_{max} de diversos autores.....	125
Figura 5-22: Efecto del confinamiento en Amortiguamiento (D).	126
Figura 5-23: Efecto del confinamiento en Amortiguamiento (D) de diversos autores.	127
Figura 5-24: G/G_{max} y D en función de la deformación al corte.	127
Figura 5-25: Efecto del índice de vacío en G : (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.	128
Figura 5-26: Efecto del índice de vacío en G/G_{max} (1%CF)	129
Figura 5-27: Efecto del índice de vacío en G/G_{max} para 98 kPa: (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.	130
Figura 5-28: Efecto del índice de vacío en G/G_{max} para 294 kPa: (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.	130
Figura 5-29: Efecto del índice de vacío en G/G_{max} para 490 kPa: (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.	131
Figura 5-30: Efecto del índice de vacío en el amortiguamiento (D) (1%CF)	132
Figura 5-31: Efecto del índice de vacío en D para 98 kPa: (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.	133

Figura 5-32: Efecto del índice de vacío en D para 294 kPa: (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.	133
Figura 5-33: Efecto del índice de vacío en D para 490 kPa: (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.	134
Figura 5-34: Efecto del contenido de finos en G para 98 kPa: (a) $e_i=0,75$, (b) $e_i=0,80$, y (c) $e_i=0,85$	135
Figura 5-35: Efecto del contenido de finos en G para 490 kPa: (a) $e_i=0,75$, (b) $e_i=0,80$, y (c) $e_i=0,85$	135
Figura 5-36: Efecto del contenido de finos en G/G_{max} para 98 kPa: (a) $e_i=0,75$, (b) $e_i=0,80$, y (c) $e_i=0,85$	136
Figura 5-37: Efecto del contenido de finos en G/G_{max} para 490 kPa: (a) $e_i=0,75$, (b) $e_i=0,80$, y (c) $e_i=0,85$	136
Figura 5-38: Efecto del contenido de finos en D para 98 kPa: (a) $e_i=0,75$, (b) $e_i=0,80$, y (c) $e_i=0,85$	137
Figura 5-39: Efecto del contenido de finos en D para 490 kPa: (a) $e_i=0,75$, (b) $e_i=0,80$, y (c) $e_i=0,85$	138
Figura 5-40: Estimación G/G_{max} según Hardin and Drnevich (1972b).	139
Figura 5-41: Estimación G/G_{max} según Stokoe et al. (1999).	141
Figura 5-42: Estimación G/G_{max} según Zhang et al. (2005)	142
Figura 5-43: Estimación G/G_{max} : (a) 98 kPa, (b) 294 kPa, y (c) 490 kPa.	143
Figura 5-44: Estimación D según Ishibashi and Zhang (1993).	144
Figura 5-45: Estimación D según Zhang et al. (2005).	145
Figura 5-46: Estimación D según Zhang et al. (2005) modificado.	145
Figura 5-47: Estimación D: (a) 98 kPa, (b) 294 kPa, y (c) 490 kPa.	146
Figura 5-48: G/G_{max} vs D para: (a) $e_i=0,75$, (b) $e_i=0,80$, y (c) $e_i=0,85$	147
Figura 5-49: G/G_{max} vs D para: (a) 98 kPa y (b) 490 kPa.	147
Figura 6-1: Resultados de G vs γ , para una arena limpia ensayada en condición no drenada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	149
Figura 6-2: Resultados de G/G_{max} vs γ , para una arena limpia ensayada en condición no drenada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	150
Figura 6-3: Resultados de D/D_{min} vs γ , para una arena limpia ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	151
Figura 6-4: Resultados de $\Delta u/\sigma_o$ vs γ , para una arena limpia ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	152
Figura 6-5: Resultados de D/D_{min} vs G/G_{max} , para una arena limpia ensayada a diferentes estados de carga.	153
Figura 6-6: Resultados de G vs γ , para una arena con 5% CF, ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	154
Figura 6-7: Resultados de G/G_{max} vs γ , para una arena con 5%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	155

Figura 6-8: Resultados de D/D_{min} vs γ , para una arena con 5%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	156
Figura 6-9: Resultados de $\Delta u/\sigma_o$ vs γ , para una arena con 5%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	157
Figura 6-10: Resultados de D/D_{min} vs G/G_{max} , para una arena con 5%CF ensayada a diferentes estados de carga.	158
Figura 6-11: Resultados de G vs γ , para una arena con 10% CF, ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	159
Figura 6-12: Resultados de G/G_{max} vs γ , para una arena con 10%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	160
Figura 6-13: Resultados de D/D_{min} vs γ para una arena con 10%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	161
Figura 6-14: Resultados de $\Delta u/\sigma_o$ vs γ , para una arena 10%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	162
Figura 6-15: Resultados de D/D_{min} vs G/G_{max} , para una arena con 10%CF ensayada a diferentes estados de carga.	163
Figura 6-16: Resultados de G vs γ , para una arena con 20% CF, ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	164
Figura 6-17: Resultados de G/G_{max} vs γ , para una arena con 20%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	165
Figura 6-18: Resultados de D/D_{min} vs γ para una arena con 20%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	166
Figura 6-19: Resultados de $\Delta u/\sigma_o$ vs γ , para una arena con 20%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.	167
Figura 6-20: Resultados de D/D_{min} vs G/G_{max} , para una arena con 20%CF ensayada a diferentes estados de carga.	168
Figura 6-21: Resultados de G/G_{max} , D vs Deformación según estado de carga.	168
Figura 6-22: Resultados de G/G_{max} , $\Delta u/\sigma'$ vs Deformación según estado de carga.	169
Figura 6-23: Efecto de %CF, e_i y estado de carga en G : (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.	182
Figura 6-24: Efecto de %CF, e_i para 98 kPa en G/G_{max} : (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.	183
Figura 6-25: Efecto de %CF, e_i para 490 kPa en G/G_{max} : (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.	184

Figura 6-26: Efecto de %CF, e_i para 98 kPa en Amortiguamiento: (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.	184
Figura 6-27: Efecto de %CF, e_i para 490 kPa en Amortiguamiento: (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.	185
Figura 6-28: Efecto de %CF, e_i para 98 kPa y 490 kPa en $\Delta u/\sigma'$: (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.	185
Figura 6-29: Comparación G_{drenado} y $G_{\text{no drenado}}$ para $e_i=0,75$	186
Figura 6-30: Comparación D_{drenado} y $D_{\text{no drenado}}$ para $e_i=0,75$	187
Figura 6-31: Comparación G_{drenado} y $G_{\text{no drenado}}$ a $e_i=0,75$, para: (a) $1 \times 10^{-4}\%$, (b) $5 \times 10^{-3}\%$, (c) $1 \times 10^{-2}\%$, y (d) Última Medición.	188
Figura 6-32: Comparación G_{drenado} y $G_{\text{no drenado}}$ a $e_i=0,85$, para: (a) $1 \times 10^{-4}\%$, (b) $5 \times 10^{-3}\%$, (c) $1 \times 10^{-2}\%$, y (d) Última Medición.	189
Figura 6-33: Comparación D_{drenado} y $D_{\text{no drenado}}$ a $e_i=0,75$, para: (a) $1 \times 10^{-4}\%$, (b) $5 \times 10^{-3}\%$, (c) $1 \times 10^{-2}\%$, y (d) Última Medición.	190
Figura 6-34: Comparación D_{drenado} y $D_{\text{no drenado}}$ a $e_i=0,85$, para: (a) $1 \times 10^{-4}\%$, (b) $5 \times 10^{-3}\%$, (c) $1 \times 10^{-2}\%$, y (d) Última Medición.	191
Figura 6-35: Comparación G_{drenado} y $G_{\text{no drenado}}$ a $e_i=0,75$	192
Figura 6-36: Comparación G_{drenado} y $G_{\text{corregido}}$ a $e_i=0,75$	193

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto General

La actividad minera siempre ha existido a lo largo de la historia de Chile, siendo los atacameños los primeros en explotar los minerales en nuestro país, quienes extraían cobre en la zona donde hoy se ubica Chuquicamata y oro del volcán Incahuasi. Hoy en día, Chile es el primer productor en el mundo de cobre, yodo y renio, y segundo lugar en molibdeno y litio, lo que se traduce en grandes cantidades de material que se explota año a año.

Del material explotado, solo una parte tiene fines económicos, el cual se extrae mediante procesos mineros. El resto del material se denomina relave, que se define como un sólido finamente molido, que se descarta de las operaciones mineras y se debe depositar de forma segura y ambientalmente responsable en un depósito de relave. Estas obras de ingeniería multidisciplinaria tienen como objetivo aislar completamente el relave depositado del ecosistema circundante.

El colapso del depósito de relave de la mina El Soldado en la región de Valparaíso en el año 1965, dio origen a través de una serie de estudios al decreto supremo N°86 (1970), en donde se precisaron buenas prácticas y exigencias en la construcción de estas obras, creando el reglamento de construcción y operación de tranques de relave. Esta normativa estuvo vigente hasta el año 2007, luego se desarrolla el decreto supremo N°248 del ministerio de minería, el cual se encuentra vigente hasta el día de hoy.

Dentro de las exigencias del D.S. N°248, para tener la aprobación del diseño, construcción y operación de un depósito de relave, se debe presentar entre otras cosas, un análisis dinámico basado en ensayos de las propiedades dinámicas de los suelos, cuyo objetivo es verificar la funcionalidad del depósito de manera segura. Existen diversos softwares que permiten realizar este análisis, que se basan en el método de elementos finitos y los parámetros del suelo (velocidad de onda de corte, módulo de poisson, módulo de corte, módulo de deformación, curvas de degradación de la rigidez y amortiguamiento) con el fin de realizar una correcta modelación del comportamiento dinámico de los materiales y la disipación de energía que se produce, al ser sometido el depósito a una sollicitación sísmica.

El ensayo de columna resonante permite obtener los parámetros dinámicos del suelo: módulo de rigidez inicial, razón de amortiguamiento, ambos para pequeñas deformaciones ($\sim 10^{-6} \%$ a $10^{-4} \%$) y curvas de degradación de estos parámetros en función del corte cíclico. Estos parámetros son fundamentales para entender el comportamiento del suelo ante sollicitaciones cíclicas.

De esta forma, la motivación de este Trabajo de Título es contribuir al estudio de las propiedades dinámicas de arenas de relaves chilenos, comparando sus resultados con la bibliografía especializada.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

El objetivo principal de la memoria es el análisis de las propiedades dinámicas de una arena de relave. Para lograr este objetivo se realizarán ensayos de columna resonante y bender element, considerando diferentes porcentajes de finos, índice de vacío inicial y estados de carga.

1.2.2. Objetivo Específicos

Los objetivos específicos consisten:

- Evaluar el parámetro “Gmax” mediante Bender Element de una arena de relave en un rango de diferentes contenidos de finos, estados de carga e índices de vacíos.
- Obtener curvas de degradación de rigidez y amortiguamiento para la arena de relave estudiada a diferentes contenidos de finos, que se ensayarán a un mismo índice de vacío de confección inicial, a distintos niveles de cargas.
- Comparar los resultados obtenidos con respecto a otros ensayos realizados anteriormente por otros autores.
- Estudiar el comportamiento dinámico a pequeñas deformaciones drenado y no drenado mediante el equipo de columna resonante.
- Estudiar la curva carga-descarga para pequeñas deformaciones, comprobando el rango lineal del ensayo.
- Estudiar la relación entre el módulo de corte (o velocidad de onda de corte) con el confinamiento, comparando con otros autores clásicos.
- Desarrollar la teoría de la columna resonante.

1.3. Metodología

La metodología experimental consiste en ensayos de laboratorio con columna resonante, Bender Element y caracterización del suelo. De esta forma, los ensayos a realizar son:

- Ensayos Bender Element en arena con 1%, 5%, 10%, 17%, 20% y 30% de finos no plásticos preparados por medio de compactación húmeda y confinamientos efectivos entre 1 kg/cm² y 5 kg/cm² para el nivel de carga y de 4 kg/cm² a 1 kg/cm² para descarga, para tres índices de vacíos de confección inicial.
- Ensayos Columna Resonante en arena con 1%, 5%, 10%, 20% de finos no plásticos preparados por medio de compactación húmeda y confinamientos efectivos entre 1 kg/cm² y 5 kg/cm² para el nivel de carga y de 4 kg/cm² a 1 kg/cm² para descarga, para tres índices de vacíos de confección inicial en condición drenada y no drenada.
- Caracterización del suelo, realizando ensayos de granulometría mecánica y láser, peso específico (Gs) y densidades mínimas y máximas.

1.4. Organización de la Memoria

El presente trabajo de título se encuentra constituido por nueve capítulos, cuyas descripciones generales se encuentran detalladas a continuación.

- **Capítulo 1: Introducción.** Contiene el resumen, introducción y motivación que dieron origen a esta investigación, como también la tabla de contenidos y objetivos del presente trabajo.
- **Capítulo 2: Revisión Bibliográfica.** Presenta una descripción detallada de los estudios previos que respaldan esta investigación y que conforman su revisión bibliográfica, abordando dos grandes temas, como son las propiedades dinámicas de los suelos y los ensayos dinámicos de los suelos, tanto para arenas limpias, como arenas con finos.
- **Capítulo 3: Programa Experimental.** Se describen los equipos utilizados en esta investigación, la caracterización geotécnica desarrollada y el programa experimental.
- **Capítulo 4: Módulo de Corte.** Se exponen los resultados del estudio del módulo de corte en arenas de relave obtenidos mediante columna resonante y bender element.
- **Capítulo 5: Comportamiento Drenado.** Corresponde al estudio del comportamiento drenado de las arenas de relaves al ser sometidas a un aumento de la deformación al corte.
- **Capítulo 6: Comportamiento No Drenado.** Presenta el estudio del comportamiento no drenado de las arenas de relave al ser sometidas a un aumento de la deformación al corte.
- **Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones.** Se presentan conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.
- **Capítulo 8: Bibliografía.** Se enlista la bibliografía utilizada en la investigación.
- **Capítulo 9: Anexos.** Se muestran los anexos de la tesis, donde se puede encontrar los manuales detallados de bender element y columna resonante, como también los resultados de los ensayos.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Preámbulo

Durante años se han realizado estudios para entender el comportamiento dinámico del suelo, frente a cargas cíclicas donde el suelo se ve afectado como por ejemplo, el caso de un terremoto, esfuerzos generados producto del funcionamiento de una maquinaria o la tronadura de roca en la minería. Mediante el estudio de estos parámetros es posible construir un espectro sísmico de respuesta, por medio de la estimación de la amplificación de ondas sísmicas a través de los suelos. De esta forma, no solo es posible el estudio de la respuesta sísmica de depósitos y estructuras de tierra, si no también, la estabilidad sísmica de estructura, el estudio de la licuefacción, fundaciones de maquinarias y vibraciones en obras viales, entre otros.

La historia evidencia que los primeros intentos de medir propiedades dinámicas de los suelos fueron desarrollados por los japoneses Ishimoto y Lida con su trabajo en determinar constantes elásticas de los suelos mediante métodos vibratorios, sin embargo, los pioneros y grandes referentes en el tema son los estudios realizados por Hardin y Richart (1963) y Drnevich et al. (1967). El estudio de esta área contempla el análisis tanto del comportamiento, como la respuesta del suelo durante la aplicación de cargas cíclicas, junto al estudio de sus propiedades dinámicas, como el módulo de corte y amortiguamiento.

En el tema de dinámica de suelos, existen numerosas publicaciones e investigaciones hasta el día de hoy donde los estudios teóricos y experimentales han avanzado, donde el estudio pionero y referenciado hasta la actualidad corresponde a Hardin y Drnevich (1972a y 1972b), sin embargo, aún falta información sobre diversos aspectos para ayudar a contribuir al conocimiento científico. De esta forma, el completo estudio de esta área contribuye a la correcta ejecución de proyectos y a la resolución de problemas que actualmente podemos observar en el mundo de la ingeniería.

2.1.1. Propiedades dinámicas de los suelos

2.1.1.1. Módulo de Corte (G)

Uno de los parámetros más importante para el análisis de la respuesta dinámica y sísmica en un depósito de suelo, así como en otras aplicaciones en la dinámica de suelos, es el módulo de corte (G). Este parámetro es fundamental en un amplio rango de aplicaciones ingenieril, como son los casos de: diseño de fundaciones, predicciones de asentamiento, mejoramiento del control del suelo y evaluación de licuefacción.

El módulo de corte está asociado a la resistencia del suelo ante sollicitaciones cíclicas por corte y también es posible definirlo como la razón entre el corte (τ) alcanzado en un ciclo de carga y la deformación angular (γ) alcanzada para ese nivel de tensión. Este parámetro es afectado por gran cantidad de parámetros (Hardin y Drnevich, 1972b) y podemos observar, a través de un modelo sencillo

viscoelástico y un ciclo histérico (diagrama de tensión-deformación), la posibilidad de representar un depósito de suelo sujeto a cargas cíclicas.

La respuesta típica en un gráfico tensión-deformación de un suelo sometido a una sollicitación cíclica completa de carga y descarga, evidencia la existencia de un loop cerrado, como en el ciclo de histéresis presentado en la Figura 2-1, donde podemos observar que este ciclo no es lineal y que la inclinación del ciclo depende de la rigidez del suelo, la cual puede ser definida en cualquier punto del ciclo de carga a través del módulo de corte tangente, el cual varía a lo largo del ciclo de carga (G_{tan}). Por otro lado, al considerar los puntos extremos del ciclo histérico, obtenemos un módulo de corte que puede representar a un ciclo, llamado módulo de corte secante (G_{sec}).

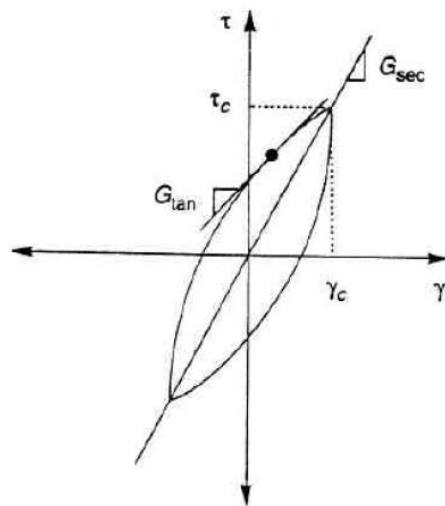


Figura 2-1: Ciclo de Histéresis (Kramer, 1996).

En la Figura 2-1, podemos observar una clara relación entre el módulo de corte y la deformación al corte, de esta forma tenemos que este módulo no es constante, debido a su degradación frente a las deformaciones inducidas ante sollicitaciones dinámicas. Ante pequeñas deformaciones, es posible definir el módulo de corte mediante la siguiente expresión en función del Módulo de Young (E), el coeficiente de Poisson del suelo (ν), derivando de la ley de Hooke, tenemos:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{E. 2-1})$$

$$G = \tau/\gamma \quad (\text{E. 2-2})$$

Por otro lado, es posible expresar que el módulo de corte máximo (G_{max}), el cual se define en el rango elástico del suelo y se relaciona a partir de la densidad de la masa del suelo y la velocidad de propagación de onda de corte, siendo directamente proporcional G con V_s , mediante la siguiente expresión:

$$G_o = \rho \cdot V_s^2 \quad (\text{E. 2-3})$$

Al tener en cuenta la variabilidad que tiene el módulo de corte respecto a la deformación, podemos definir el módulo de corte máximo (G_{max}), el cual está asociado a pequeñas deformaciones ($\gamma \leq 10^{-4}$) y un comportamiento lineal. De esta forma, es común encontrar en la literatura la gráfica del módulo de corte versus la deformación al corte (Figura 2-2), observando una disminución del módulo de corte a medida que aumentamos la deformación.

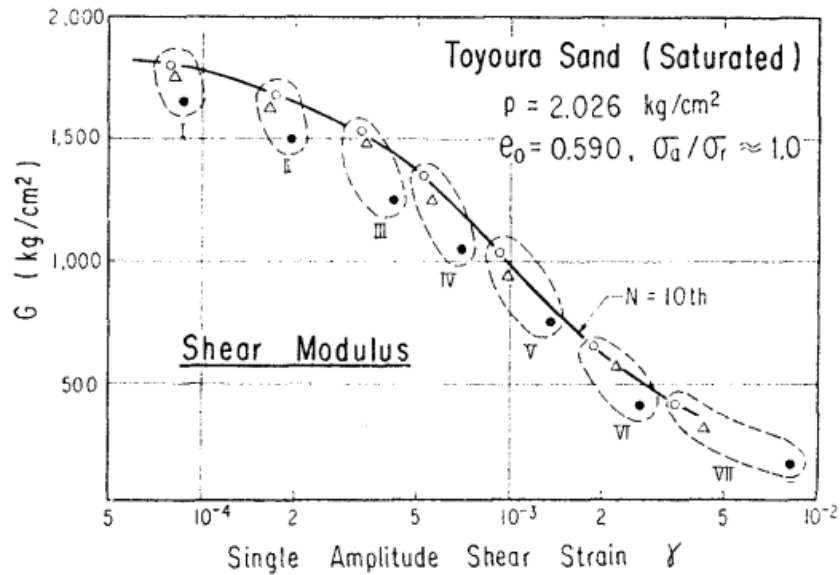


Figura 2-2: Resultado G vs γ para Toyoura Sand (Iwasaki, 1978).

Al tomar como referencia el valor del módulo de corte máximo y realizar una razón entre el módulo medido y este, obtenemos la curva de degradación del módulo de rigidez (Figura 2-3), en el cual se observa que se mantiene relativamente constante hasta cierto valor de deformación, donde se considera que el suelo desarrolla deformaciones elásticas. En secciones posteriores se desarrolla el tema relacionado a los rangos de deformación y los límites de deformaciones.

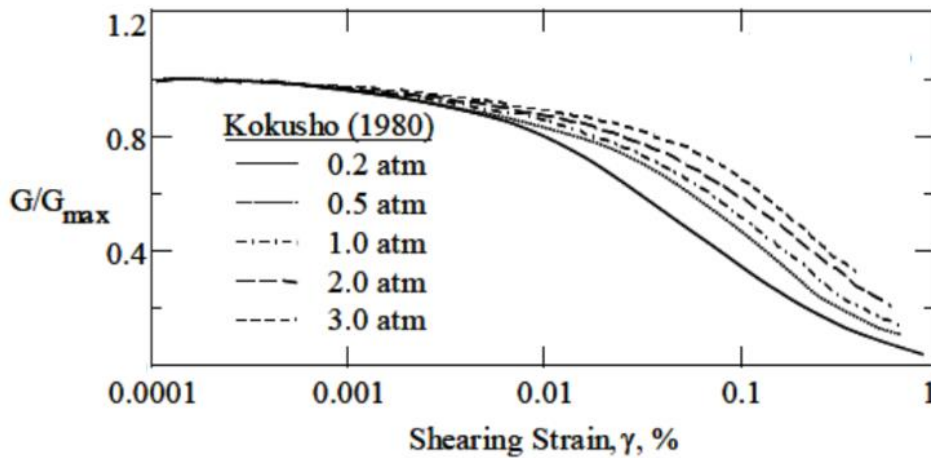


Figura 2-3: Resultado G vs γ para Toyoura Sand (Iwasaki, 1978).

2.1.1.2. Relación de Amortiguamiento (D)

Otro parámetro fundamental, además del módulo de corte, corresponde al amortiguamiento del suelo (damping), el cual se puede asociar a la disipación de energía que presenta el suelo ante solicitaciones cíclicas. Físicamente, esta disipación está relacionada con el decrecimiento de la amplitud de la oscilación de un material con el tiempo, llamando a esta medida de atenuación amortiguamiento. En la Figura 2-4 podemos observar la disminución en amplitud de la vibración de un material hasta desaparecer la oscilación. Considerando pequeñas deformaciones, es posible medir el amortiguamiento mediante la teoría de vibración, siendo descrita por el decremento logarítmico, que se define como el logaritmo natural de dos amplitudes sucesivas de movimiento, tenemos la siguiente ecuación donde “y” es la amplitud.

$$D = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{y_{n-1}}{y_n} \quad (\text{E. 2-4})$$

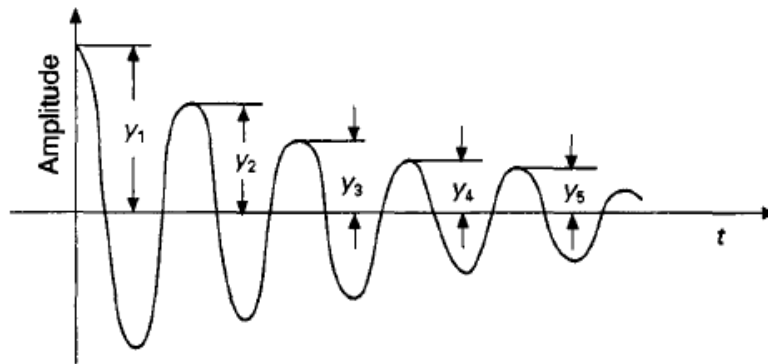


Figura 2-4: Decrecimiento de la amplitud de la oscilación con el tiempo (Ishihara, 1996).

A partir de la amplitud del ciclo histerético mostrado anteriormente en la Figura 2-1, se tiene un área, que es una medida de la disipación de la energía definida como la razón de amortiguamiento (D), expresada mediante:

$$D = \frac{\text{Área ciclo histerético}}{2 \cdot \pi \cdot G_{sec} \cdot \gamma_{sec}^2} \quad (\text{E. 2-5})$$

Por otro lado, tomando en cuenta la Figura 2-5, al expresar ΔW como el área del ciclo carga-descarga, que es equivalente a la energía disipada, W como la energía de deformación equivalente, definida por $\frac{1}{2} \tau_{max} \cdot \gamma_{max}$, el cual es equivalente a la energía entregada por el suelo por unidad de volumen para causar la deformación máxima, es posible definir la razón de amortiguamiento mediante:

$$D = \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \quad (\text{E. 2-6})$$

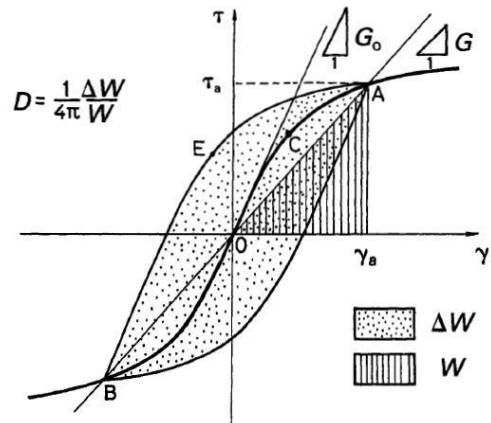


Figura 2-5: Obtención del amortiguamiento (Ishihara, 1996)

Al igual que el módulo de corte, podemos observar una variabilidad de la razón de amortiguamiento respecto a la deformación al corte. Al analizar el diagrama de carga-descarga de diferentes suelos, se evidencia que la razón de amortiguamiento, D , aumenta cuando la deformación máxima aumenta. Tanto para D y G , la respuesta que se obtiene del suelo es en función del nivel de sollicitación, mientras mayor sea la tensión solicitante, menor será su rigidez y mayor será su capacidad de amortiguamiento, tal y como se aprecia en la Figura 2-6, en la cual podemos observar la razón de amortiguamiento para de arenas.

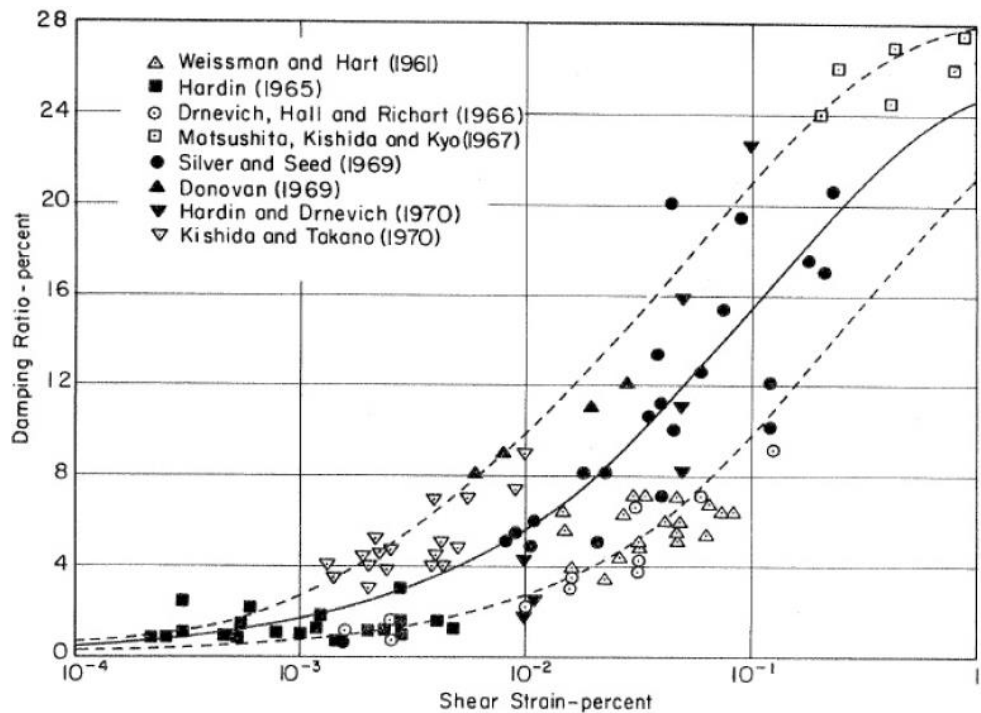


Figura 2-6: Razón de amortiguamiento para Arenas (Seed & Idriss, 1970).

2.1.1.3. Degradación de la rigidez y disipación de energía

La evidencia experimental señala que hay una fuerte relación entre la rigidez y el amortiguamiento con el nivel de deformación. La respuesta del suelo es no lineal, y esto se puede observar al estudiar la degradación de la rigidez y la capacidad de disipar energía a medida que aumenta el nivel de deformación. En cuanto a la degradación de la rigidez, Hardin and Drnevich (1972b) proponen a partir del modelo hiperbólico la siguiente relación:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_{ref}}} \quad (E. 2-7)$$

$$\gamma_{ref} = \frac{\tau_{max}}{G_0} \quad (E. 2-8)$$

La ecuación anterior es ampliamente usada en la dinámica de suelos, sin embargo, solo posee una variable para ajuste (γ_{ref}), por lo que no necesariamente representa el comportamiento para distintos tipos de suelos. Stokoe et al (1999), realizó un ajuste de la ecuación anterior con buenos resultados, a través de un coeficiente de curvatura (α) y un γ_{ref} definido como el valor para el cual G/G_{max} es igual a 0,5, proponiendo la siguiente expresión:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_{ref}}\right)^\alpha} \quad (E. 2-9)$$

Posteriormente, a partir de distintos ensayos, Zhang et al. (2005), normalizó el parámetro γ_{ref} a partir del valor obtenido para un ensayo a 100 kPa, por lo que propuso las siguientes expresiones:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^\alpha} \quad (E. 2-10)$$

$$\gamma_r = \gamma_{r1} \cdot \left(\frac{\sigma'_m}{p_a}\right)^k \quad (E. 2-11)$$

Por otro lado, Hardin and Drnevich (1972b) y Tatsuoka et al (1978) definieron una relación entre el amortiguamiento (D) y la degradación de la rigidez (G/G_{max}), dada por:

$$D = f\left(\frac{G}{G_{max}}\right) \quad (E. 2-12)$$

De esta forma, a raíz del modelo hiperbólico, Hardin and Drnevich (1972b) han definido la siguiente relación:

$$D = D_{max} \cdot \left(1 - \frac{G}{G_{max}}\right) \quad (E. 2-13)$$

A partir de la relación anterior y un set de ensayos, Ishibashi and Zhang (1993), proponen una ecuación según el índice de plasticidad, donde para una arena con finos no plásticos se define mediante la siguiente expresión:

$$D_{arena} = 0,333 \cdot \left\{ 0,586 \cdot \left(\frac{G}{G_{max}} \right)^2 - 1,547 \left(\frac{G}{G_{max}} \right) + 1 \right\} \quad (E. 2-14)$$

Finalmente, de forma más general, Zhang et al. (2005), propuso una función polinómica para la estimación del damping.

$$D - D_{min} = k_1 \cdot \left(\frac{G}{G_{max}} \right)^2 + k_2 \cdot \left(\frac{G}{G_{max}} \right) + k_3 \quad (E. 2-15)$$

Es muy relevante mencionar, la importancia del parámetro γ_{ref} , donde se destaca las investigaciones de Darendeli (2001), Menq (2003), Senetakis et al. (2013), Wichtmann y Triantafyllidis (2013) y Wichtmann et al. (2015), quienes definen este parámetro y lo relacionan con el coeficiente de uniformidad del suelo.

2.1.1.4. Parámetros que afectan a G y D

Los parámetros dinámicos son afectados por una gran cantidad de parámetros (Hardin y Drnevich 1972) y a lo largo de los años, se han realizado diversos trabajos de investigación para entender los factores que afectan al módulo de corte máximo y el amortiguamiento. Hardin and Richart (1963) ha definido una dependencia entre G_{max} y el estado de carga y el índice de vacío, mediante la siguiente expresión:

$$G_{max} = A \cdot f(p') \cdot f(e) \quad (E. 2-16)$$

Por otro lado, Hardin and Drnevich (1972) presentaron los parámetros que más inciden en el módulo de corte y el amortiguamiento (Figura 2-7), donde para arenas limpias se destaca que la deformación al corte, el estado de carga y el índice de vacíos son los parámetros más importantes.

Numerosos estudios se han realizado hasta la fecha, donde de forma empírica han documentado la incidencia del estado de carga y el índice de vacíos (Seed and Idriss, 1970; Hardin y Drnevich, 1972; Ishibashi and Zhang, 1993; Stokoe et al., 1999; Assimaki y Kausel, 2000; Payan et al., 2016), donde los resultados evidencian una clara tendencia para el valor de G_{max} , donde éste aumenta con el estado de carga y disminuye al aumentar el índice de vacío, mientras que el damping tiende a disminuir tanto al aumentar el estado de carga o el índice de vacío, aunque este último no es tan evidente como la tendencia para el módulo de corte.

Respecto al contenidos de finos, no muchos trabajos tratan explícitamente el contenido de finos, destacando los trabajos de Wichtmann et al., 2015; Yang and Liu, 2016; Goudarzy et al, 2016; Payan et al, 2017; Cheng et al. 2019. Otras investigaciones han realizados esfuerzos en estudiar el efecto de la distribución granulométrica, expresado a través del término D_{50} y del coeficiente de uniformidad

(c_u), como son los autores Iwasaki and Tatsuoka, 1977; Ishihara, 1996; Menq, 2003; Wichtmann and Triantafyllidis, 2009, Wichtmann et al., 2011.

Parameter (1)	IMPORTANCE TO ^a			
	Modulus		Damping	
	Clean sands (2)	Cohesive soils (3)	Clean sands (4)	Cohesive soils (5)
Strain Amplitude	V	V	V	V
Effective Mean Principal Stress	V	V	V	V
Void Ratio	V	V	V	V
Number of Cycles of Loading	R ^b	R	V	V
Degree of Saturation	R	V	L	U
Overconsolidation Ratio	R	L	R	L
Effective Strength Envelope	L	L	L	L
Octahedral Shear Stress	L	L	L	L
Frequency of Loading (above 0.1 Hz)	R	R	R	L
Other Time Effects (Thixotropy)	R	L	R	L
Grain Characteristics, Size, Shape, Gradation, Mineralogy	R	R	R	R
Soil Structure	R	R	R	R
Volume Change Due to Shear Strain (for strains less than 0.5 %)	U	R	U	R

^a V means Very Important, L means Less Important, and R means Relatively Unimportant except as it may affect another parameter; U means relative importance is not clearly known at this time.

^b Except for saturated clean sand where the number of cycles of loading is a Less Important Parameter.

Figura 2-7: Parámetros que afectan a G y D (Hardin and Drnevich, 1972).

Por otro lado, se ha demostrado que la plasticidad es un parámetro igual de relevante que los mencionados anteriormente, donde destaca principalmente los trabajos realizados por Seed and Idriss (1970) y Vucetic and Dobry (1991), en el cual se nota que el módulo de corte aumenta con el índice de plasticidad, al igual que G/G_{max} , mientras que decrece el amortiguamiento con el aumento de la plasticidad. Adicionalmente, a pesar de tener un menor efecto, no se puede despreciar el efecto del grado de saturación, la sobreconsolidación (OCR), la cementación, la edad geológica, la condición de drenaje, la frecuencia de la carga y el número de ciclos.

Al considerar la ecuación 2-16 y de manera más explícita, Hardin (1978) ha definido una expresión para G_{max} , la cual es ampliamente usada y aceptada a nivel mundial definida por:

$$G_{max} = c_g \cdot (OCR)^k \cdot f(e) \cdot p_a^{1-n} \cdot (\sigma'_o)^n \quad (E. 2-17)$$

Donde c_g y n son una constante adimensional explicadas en el acápite 2.1.3, k es un exponente asociado a la razón de sobreconsolidación, $f(e)$ es una función del índice de vacío, p_a es la presión atmosférica (100 kPa) y σ'_o es el estado de carga. Respecto a la forma de la expresión $f(e)$, en la Tabla 2-1 se muestran las principales expresiones utilizadas, mientras que en la Figura 2-8 se observa su gráfica.

Tabla 2-1: Valores de la función del índice de vacío, $f(e)$.

$f(e)$	Característica	Referencias
$\frac{(2,17 - e)^2}{1 + e}$	Partículas Redondeadas	Hardin and Black (1968)
$\frac{(2,97 - e)^2}{1 + e}$	Partículas Angulares	
$\frac{0,67 - e}{1 + e}$	Arenas Limpias	Shibata and Soelarno (1975)
$\frac{1}{e^{1,3}}$	Arenas Limpias	Lo Presti et al. (1997)
$\frac{1}{0,3 + 0,7 \cdot e^2}$	Arenas y Arcillas	Hardin (1978)

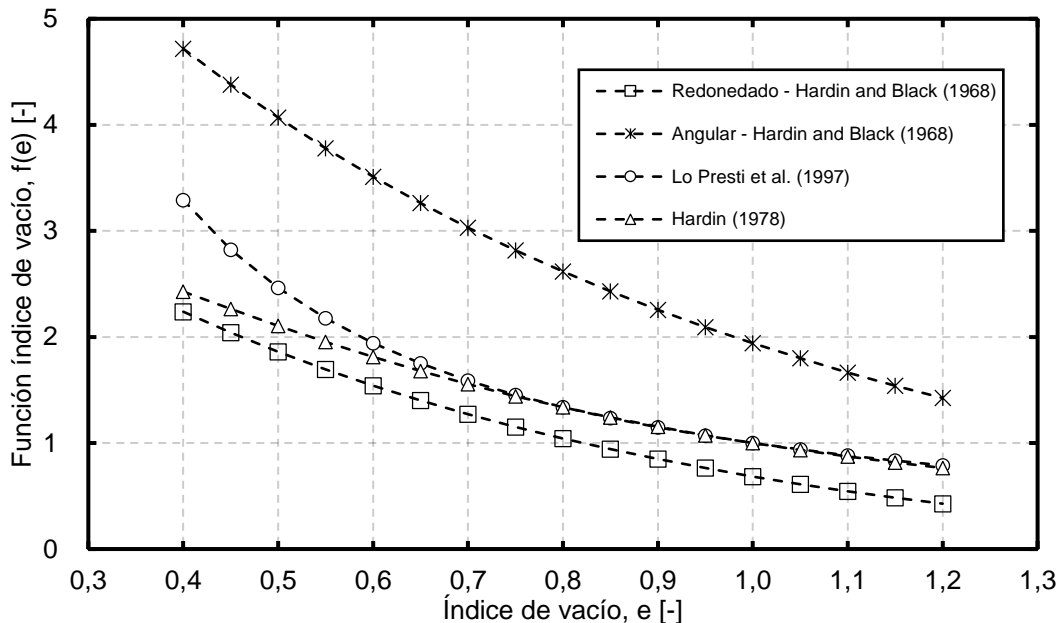


Figura 2-8: Valores de la función del índice de vacío, $f(e)$.

A partir de la Figura 2-8, se puede observar que para partículas más angulosas se tienen mayores valores de $f(e)$ y se debe destacar que la expresión para arenas angulares de Hardin and Black (1968) será utilizada en este trabajo.

2.1.1.5. Rangos de deformaciones

A través de la evidencia experimental (Vucetic and Dobry 1991, EPRI 1991, Vucetic 1994, Ishihara 1996), se ha encontrado que la deformación al corte es una variable con gran influencia en las propiedades dinámicas. Ante esto, es posible definir cuatro rangos de deformaciones: muy pequeñas (γ_c^l), pequeñas (γ_c^v), medianas (γ_c^{pf}) y grandes deformaciones (γ_c^f). En este trabajo de título se ha trabajado en el rango de muy pequeñas deformaciones a pequeñas deformaciones. En la Figura

2-9 se ilustra a modo referencial tres rangos de deformaciones, el módulo de corte y su aplicación en la ingeniería.

Para el rango de muy pequeñas deformaciones, se considera la respuesta del suelo lineal y viscoelástica ante una excitación cíclica, ya que incluso en este rango existe una pequeña disipación de energía (Lo Presti et al. 1997). No existe una degradación notoria de la rigidez (entre el 1% al 5%), donde para arenas el valor de la deformación es del orden de 10^{-4} a 10^{-3} %, mientras que para una arcilla normalmente consolidada con una plasticidad de 50 es del orden de 10^{-2} %.

Por otro lado, el rango de pequeñas deformaciones se caracteriza por la observación experimental, donde la respuesta del suelo ante una carga cíclica genera cambios irreversibles en el volumen en ensayos drenados, y el desarrollo de exceso de presiones de poros en ensayos no drenados (Vucetic 1994). La respuesta del suelo se caracteriza por ser inelástica y no lineal, sin embargo, las propiedades del material no cambian dramáticamente con el aumento de la deformación al corte. El valor de las pequeñas deformaciones para arenas es del orden de 10^{-2} %, mientras que para una arcilla es del orden de 10^{-1} %.

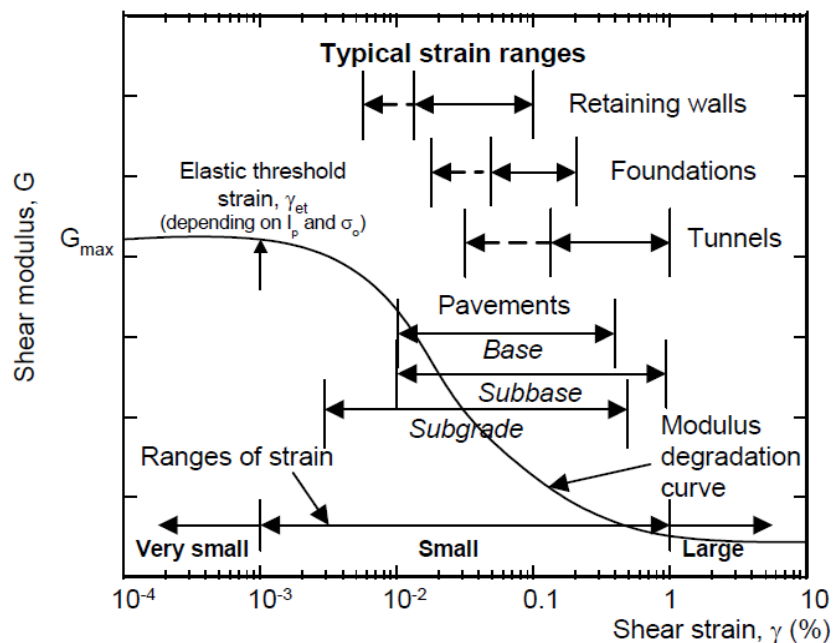


Figura 2-9: Variación del módulo de corte (G) versus el nivel de deformación (D) (Sawangsuriya, 2012).

2.1.2. Medición de las Propiedades dinámicas de los suelos

Actualmente, se han desarrollado diversos ensayos reconocidos mundialmente para obtener el módulo de corte y el amortiguamiento, existiendo mecanismos in situ y de laboratorio para medir las propiedades dinámicas de los suelos, donde es importante destacar que no existe un ensayo único que abarque todos los rangos de deformaciones, es decir, desde muy pequeñas deformaciones a grandes deformaciones.

La ventaja de los ensayos in situ (geofísicos) es que son ensayos no invasivos, por lo que no se altera el material ensayado, por otro lado, los ensayos de laboratorio son útiles para una mejor comprensión del suelo y sus parámetros, ya que permiten realizar pruebas bajo condiciones controladas, sin embargo, la muestra puede no ser representativa respecto al depósito de suelo.

Particularmente para los ensayos geofísicos, la onda sísmica más utilizada en la caracterización es la velocidad de onda de corte (V_s), debido a que permite obtener la rigidez, además de ser crítico para evaluar la amplificación sísmica (efecto de sitio) y no se ve afectada por la presencia de agua. Entre las metodologías destacadas tenemos Down Hole, Cross Hole y SASW. Para los ensayos de laboratorio, destacan los ensayos de bender element, columna resonante y ensayos triaxiales.

2.1.2.1. Ensayos Geofísicos

2.1.2.1.1. Down Hole

A través de la generación de ondas sísmicas en la superficie (fuente sísmica, como golpes en una placa), se registran las ondas a través de un sensor puesto en profundidad (geófono) en un único sondaje. El resultado obtenido corresponde a una velocidad promedio del viaje de la onda, complicando su interpretación si existen más de un estrato de suelo.

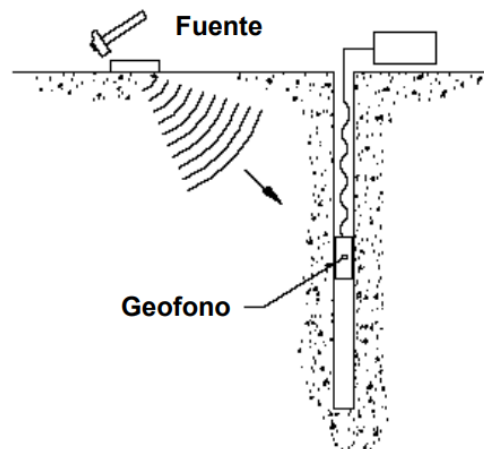


Figura 2-10: Down Hole.

2.1.2.1.2. Cross Hole

A partir de dos sondajes, separados a una distancia D , se genera una perturbación en un sondaje, captando la señal que ha viajado horizontalmente, en el otro sondaje. A partir del tiempo de viaje entre los dos sondajes y la distancia entre ellos, se obtiene la velocidad de onda de corte.

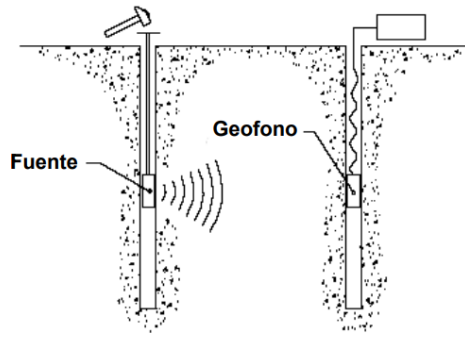


Figura 2-11: Cross Hole.

2.1.2.1.3. SASW

Mediante este método geofísico es posible determinar las curvas de dispersión de un sitio, donde adicionalmente mediante un análisis inverso es posible estimar el perfil de velocidad de ondas de corte en profundidad, a partir de la propagación de ondas superficiales (específicamente ondas Rayleigh), donde la velocidad de propagación depende de la frecuencia o longitud de la onda, observando dispersión en medios estratificados.

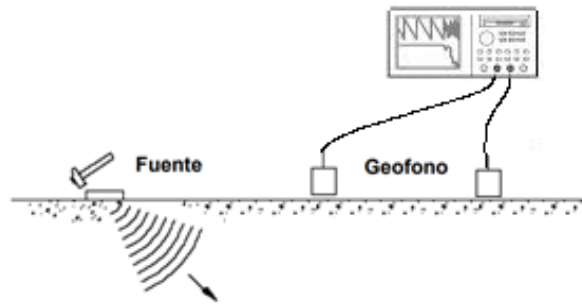


Figura 2-12: SASW (Spectral Analysis of Surface Waves).

2.1.2.2. Ensayos de Laboratorio

Como se ha mencionado anteriormente, para estudiar la degradación de la rigidez, es decir el módulo de corte a medida que se aumenta la deformación al corte, es necesario realizar mediciones en laboratorio. Para pequeñas deformaciones, existen el ensayo de columna resonante y bender element, sin embargo, éste último se utiliza para la medición del módulo de corte máximo y no su degradación directamente. Para medianas y grandes deformaciones, se tiene los ensayos triaxiales cíclicos y corte directo cíclico.

2.1.2.2.1. Bender Element

Este equipo es un transductor electromecánico que es capaz de convertir energía eléctrica en energía mecánica. Tanto su emisor como receptor, ubicados en la parte superior e inferior de la probeta respectivamente, están confeccionados por dos

placas piezocerámicas unidas rígidamente que actúan como electrodos, de tal manera que, al ser excitadas, una placa se extiende y la otra se contrae, generando una señal. Esta onda de corte es producida por el transmisor y recibida por el receptor. La diferencia de tiempo entre las dos señales es calculable (t) y la distancia recorrida por la onda es conocida (L_{tt}), entregando así la velocidad de la onda de corte “ V_s ” de la muestra de suelo (ecuación 2-18). A pesar de su aparente simplicidad, aún no existe una norma para este ensayo. Un esquema de bender element se muestra en la Figura 2-14.

$$V_s = \frac{L_{tt}}{t} \quad (\text{E. 2-18})$$

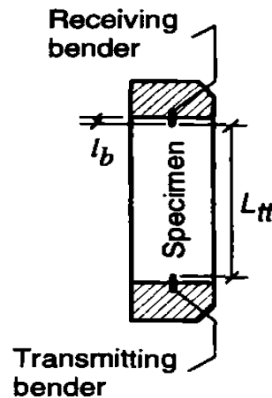


Figura 2-13: Bender Element (Arulnathan et al., 1998).

Con fin de evitar la subjetividad del ensayo bender element, debido a que la fuente mayor de error de este ensayo es la estimación del tiempo de llegada de la onda (Viggiani y Atkinson, 1995), varios autores han realizado investigaciones para proponer métodos de interpretación de los resultados del ensayo y correcciones debido a interferencias de ondas, desfase o distorsión de la señal y el efecto de campos cercanos (Arulnathan et al., 1998).

2.1.2.2.2. Columna Resonante

El ensayo de columna resonante es utilizado para determinar las propiedades dinámicas de los suelos para pequeñas deformaciones. El equipo somete cilindros sólidos o huecos, en condiciones alteradas o inalteradas, a cargas torsionales o de flexión mediante un sistema electromagnético. La frecuencia y amplitud de las cargas pueden ser controladas, la carga puede ser armónica, aleatoria o de impulso (Kramer, 1996). El ensayo está normalizado bajo la designación ASTM D4015-15 (2015).

Con el ensayo de columna resonante (esquema en la Figura 2-14) se puede obtener la frecuencia fundamental del suelo ensayado (f_r), a partir de la cual se consiguen los parámetros de degradación de rigidez y amortiguamiento.

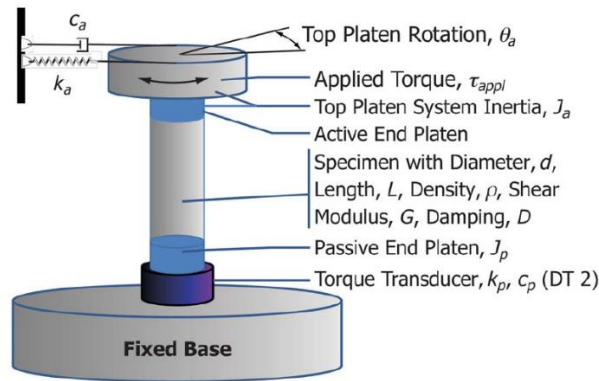


Figura 2-14: Esquema Columna Resonante (ASTM D4015, 2015).

2.1.2.2.3. Ensayo Triaxial Cíclico

Los ensayos triaxiales cíclicos (Figura 2-15) intentan modelar las cargas aplicadas a una masa de suelo por un sismo y es utilizado para medir las propiedades dinámicas de los suelos para medianas y grandes deformaciones. Este ensayo es muy popular mundialmente para estudiar el comportamiento cíclico de suelos debido a su simpleza de operatorio, facilidad de preparación y saturación de las probetas.

En este ensayo se hace variar el cíclicamente esfuerzo axial, pasando desde la compresión a la tracción la probeta. El esfuerzo de corte aplicado a la probeta a un estado de carga dado, se denomina razón de esfuerzo cíclico. Adicionalmente, el esfuerzo de corte aplicado sobre el plano de interés es tomado como la mitad del esfuerzo desviador aplicado, de esta forma se puede definir la razón de esfuerzo cíclico (CRR) como la razón entre el esfuerzo desviador aplicado y dos veces la presión de confinamiento efectiva.

$$CRR = \frac{\tau_{cy}}{\sigma'_o} = \frac{\sigma_d}{2 \cdot \sigma'_o}$$

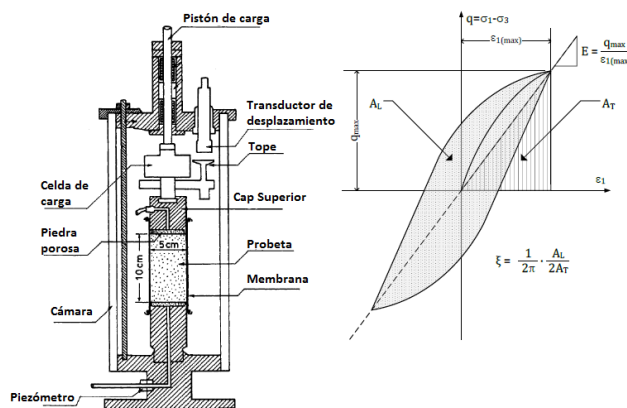


Figura 2-15: a) Esquema del ensayo triaxial cíclico. b) Curva histerética y obtención de resultados (Ishihara, 1996).

2.1.2.2.4. Corte Simple Cíclico

Al igual que el ensayo de triaxial cíclico, con el ensayo de corte simple cíclico (Figura 2-16) se intenta modelar las cargas aplicadas a una masa de suelo generadas por un sismo, sin embargo, al utilizar anillos rígidos para evitar su expansión lateral se producen ensayos con mayor precisión, al ser sometido a la propagación vertical de las ondas de esfuerzo cortante. Las fuerzas de corte horizontales son aplicadas por el cap superior o inferior, donde la muestra de suelo se deforma bajo deformación volumétrica constante de una manera similar a la de un suelo sometido a ondas de corte propagadas verticalmente.

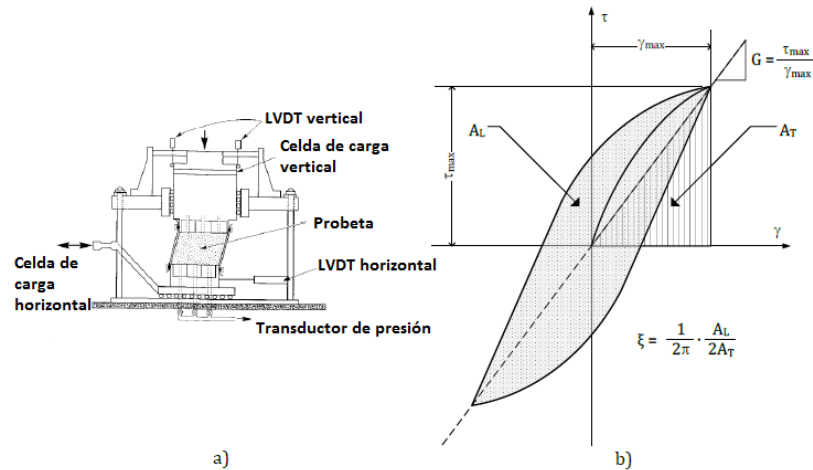


Figura 2-16: a) Esquema del ensayo de corte simple cíclico. b) Curva histerética y obtención de resultados. (Ishihara, 1996)

2.1.3. Fábrica del Medio Granular

A partir de la ecuación empírica ampliamente validada y utilizada a través del tiempo de Hardin and Richart (1963) y Hardin (1978) para estimar el módulo de corte máximo (G_0) en arenas (ecuación 2.17), es posible definir los parámetros intrínsecos del suelo c_g y n . Distintos autores han estudiado estas constantes (Sawangsurriya 2012, Salgado et al. 2000, Ochoa 2015), proporcionando una dependencia de la característica del grano, la naturaleza del suelo y la fábrica o microestructura del material.

En la Tabla 2-2 se pueden observar los valores obtenidos de distintos autores para los parámetros c_g y n , donde se aprecia una clara tendencia para el parámetro c_g , donde se tienen valores más altos para partículas redondeadas y menores valores para partículas angulares. Adicionalmente, en la Figura 2-17 se grafican los distintos valores de c_g y n .

Tabla 2-2: Valores obtenidos por distintos autores para c_g y n .

c_g	n	Característica	Referencias
690	0,5	Arena Grano redondeado	Hardin and Black (1968)
327	0,5	Arena Grano angular	Hardin and Black (1968)
900	0,4	Arena Limpia (Toyouura Sand)	Iwasaki et al. (1978)
840	0,5	Toyouura Sand (Sub-angular a sub-redondeado)	Kokusho (1980)
710	0,4	Ticino Sand (Sub-angular)	Lo Presti et al. (1993)
611	0,44	Ottawa Sand (redondeado a sub-redondeado)	Salgado et al. (2000)
107	0,55	Arena de Relave Torito natural	Viertel (2003) *
235	0,75	Ottawa Sand con 15% de finos	Carraro et al. (2009)
563	0,52	Ottawa Sand (redondeado a sub-redondeado)	Ochoa-Cornejo (2015)
592	0,43	Quarzo natural (sub-angular)	Wichtmann et al. (2015)
227	0,46	Arena de Relave Torito Limpio	Verdugo (2016) *
837	0,44	Hostun Sand (Sub-angular a sub-redondeado)	Goudarzy et l. (2016)
600	0,46	White Sand (redondeada)	Payan et al (2017)
420	0,55	Crushed Blue Sand 1 (Sub-angular a sub-redondeado)	Payan et al (2017)
370	0,60	Crushed Blue Sand 2 (angular) (Sub-angular a sub-redondeado)	Payan et al (2017)
280	0,60	Taiyuan Sand (sub-angular)	Chen et al (2019)

*Valores no mostrados directamente, calculados a partir de sus resultados

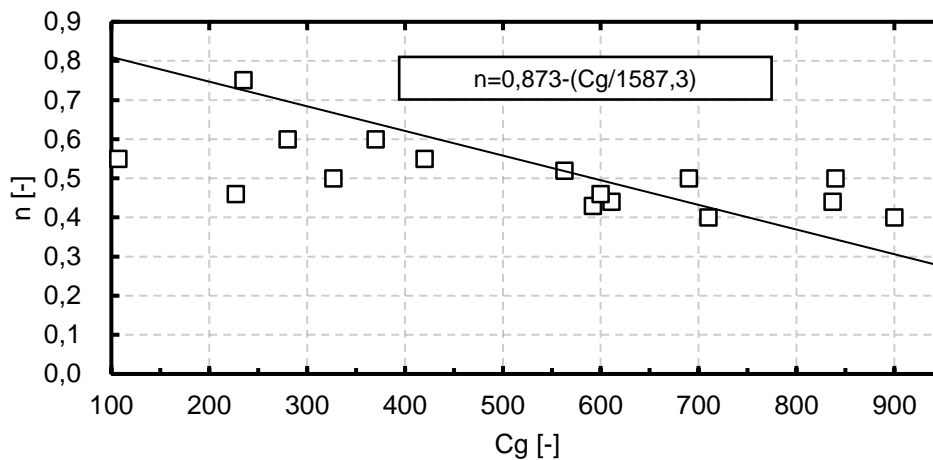


Figura 2-17: Valores de C_g y n para distintos autores.

Otros parámetros asociados a la fábrica del medio granular vienen a partir de la evidencia experimental y estudios analíticos, donde existe una relación entre la velocidad y el esfuerzo efectivo, expresado mediante una función potencial, con dos parámetros relevantes: α y β , mediante la siguiente relación (Roesler 1979, White 1983, Sawangsuriya 2012):

$$V_s = \alpha \cdot \left(\frac{\sigma'_o}{p_a}\right)^\beta \quad (\text{E. 2-19})$$

Donde el parámetro α está asociado a la naturaleza y característica de las partículas del suelo, mientras que β se relaciona con el contacto de partículas y su sensibilidad al cambio de esfuerzo (Sawangsuriya 2012). En la Figura 2-18 y Tabla 2-3 se muestran los valores de α y β para distintos autores. Existe una relación inversamente proporcional entre estos dos parámetros, dada por (Santamarina et al. 2001):

$$\beta = 0,36 - \frac{\alpha}{700} \quad (\text{E. 2-20})$$

Tabla 2-3: Valores obtenidos por distintos autores para α y β .

α	β	Característica	Referencias
35	0,30	Arena de Relave Torito natural (e=0,68)	Viertel (2003)
29	0,31	Arena de Relave Torito natural (e=0,80)	
70	0,26	Ottawa Sand	Ochoa-Cornejo (2015)
204	0,23	Arena de Relave Torito Limpio (e=0,85)	Verdugo (2016)
196	0,24	Arena de Relave Torito Limpio (e=0,90)	
173	0,12	Acero	Santamarina et al. (2001)
58	0,17	Arena Suelta	
143	0,12	Arena Densa	

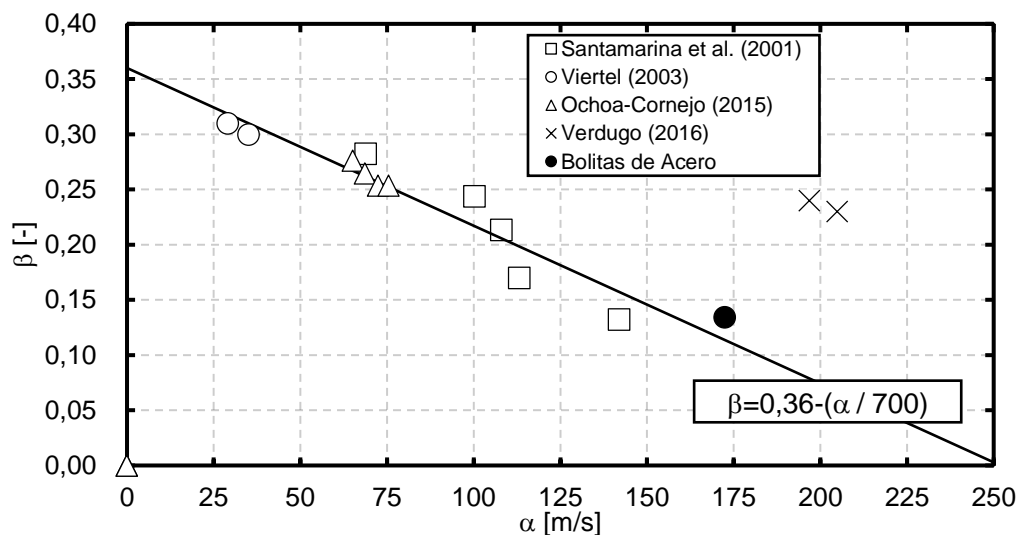


Figura 2-18: Valores de α y β para distintos autores.

2.2. Implementación

2.2.1. Modelo Hiperbólico

Hardin and Drnevich (1972), a partir de la curva tensión-deformación, ha definido una ecuación de tipo hiperbólica, propuesta originalmente por Kondner et al. (1963), mediante la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{\gamma}{a+b\cdot\gamma} \quad (\text{E. 2-21})$$

Donde a y b son parámetros de ajuste, y se observa que, para deformaciones grandes, el esfuerzo de corte tiende a un valor máximo, que corresponde cuando falla el suelo.

2.2.2. Regla de Masing

Corresponde a un método de ajuste de curvas, mediante el uso de una ley constitutiva tensión-deformación que se aproxime a lo observado experimentalmente bajo cargas cíclicas, implementando alguna técnica numérica de solución del medio continuo deformable (como elementos finitos o diferencias finitas). En la Figura 2-19, se muestra cómo se construye un loop de carga y descarga a partir de la curva tensión-deformación virgen utilizando la regla de Masing.

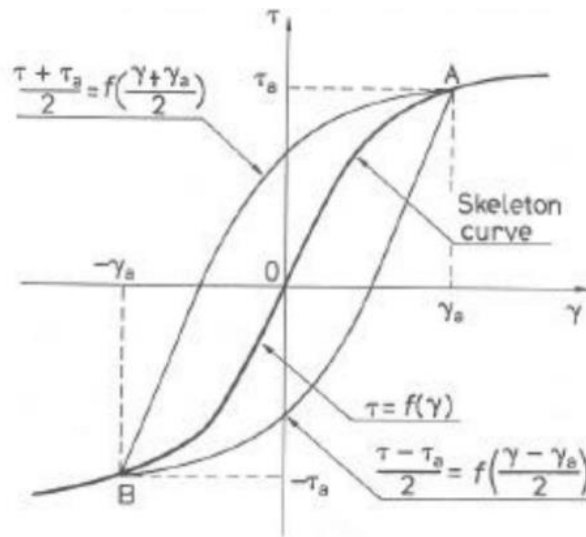


Figura 2-19: Regla de Masing.

El defecto de este método es que las ecuaciones de ajuste carecen de todo significado físico y, solo funcionan para la trayectoria de tensiones que se trata de ajustar. Las principales ventajas de este procedimiento son la simplicidad y los razonables resultados que se pueden lograr.

2.3. Propiedades dinámicas de las arenas

A lo largo del tiempo, distintos autores han realizado investigaciones enfocados en la obtención de los parámetros dinámicos de los suelos, en su mayoría influenciado por la investigación de Hardin y Drnevich (1972a y 1972b), intentando refinar, mejorar y generalizar sus resultados. Estos resultados son ampliamente aceptados en la actualidad y utilizados en la práctica ingenieril.

Existen autores que de forma general muestran rangos de resultados para arenas, quienes destacan la influencia del confinamiento, la precisión en la medición, el comportamiento no lineal del suelo y la variabilidad de las características de las partículas (tamaño, forma, gradación y mineralogía) (Darendeli 2001). A modo de introducción, se ilustran las primeras curvas propuestas para arenas de Seed and Idriss (1970) en la Figura 2-20, mientras que en la Figura 2-21 se muestran las bandas propuestas para distintos tipos de suelos (EPRI 1993), las cuales corresponden a 35 muestras de suelo de 5 sitios distintos.

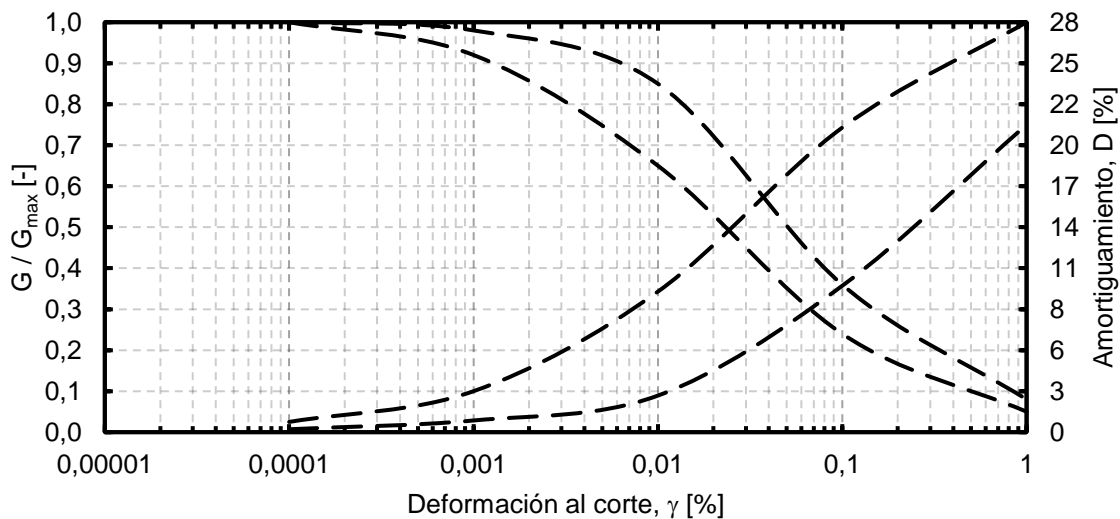


Figura 2-20: Resultados Empíricos para G/G_{max} y D (Modificado de Seed and Idriss, 1970).

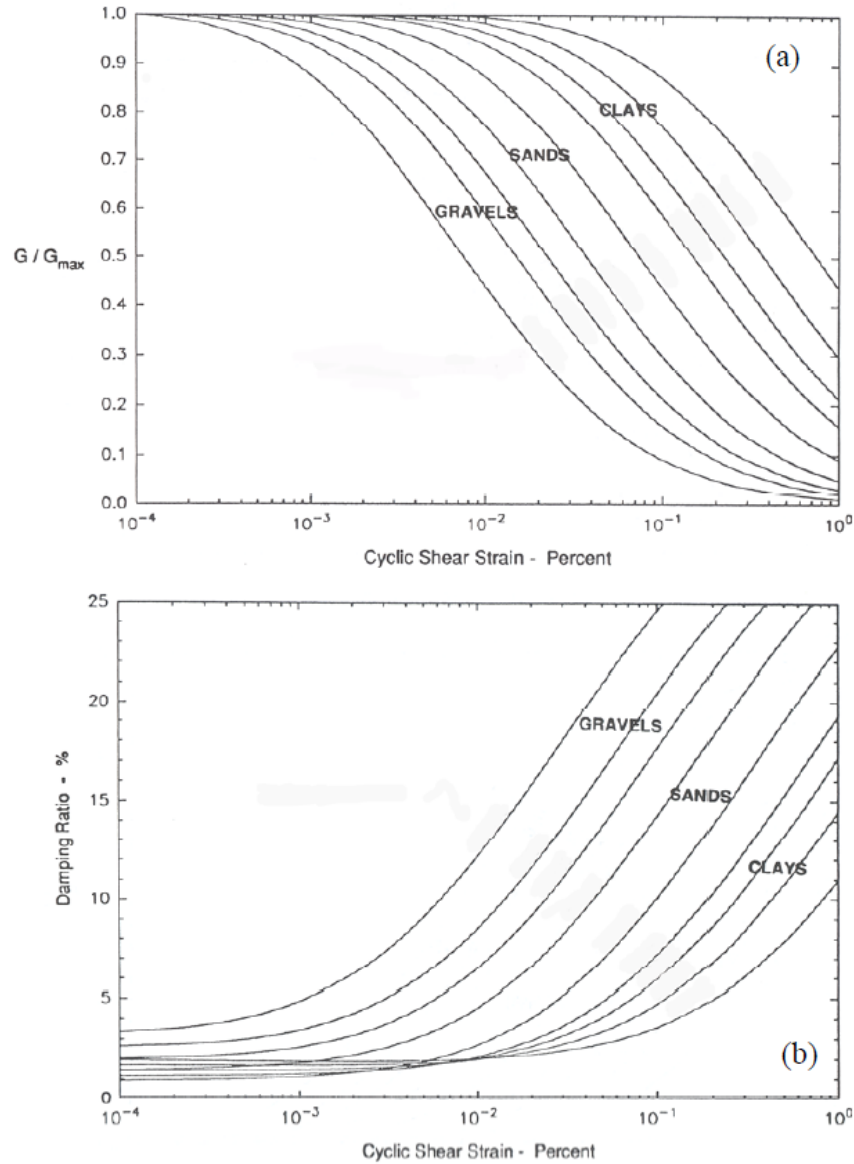


Figura 2-21: Resultados Empíricos para G/G_{max} y D de distintos tipos de suelo (EPRI 1993).

En ambos gráficos mostrados anteriormente se obtiene la misma tendencia, a medida que se aumenta la deformación al corte, se obtiene una degradación de la rigidez y un aumento del amortiguamiento. Se puede observar un rango lineal hasta una deformación del orden de 10^{-3} %, a excepción de las arcillas, el cual aumenta hasta una deformación del orden de 10^{-2} %, esto coincide con lo expresado en el acápite 2.1.1.5. Para un mismo nivel de deformación, se obtiene una menor degradación (mayor G/G_{max}) para arcillas y un menor valor para gravas, mientras que para el amortiguamiento ocurre el efecto contrario, para un mismo nivel de deformación se tiene un mayor valor en gravas.

A modo de comparación, se muestran los resultados de Torito Natural (17%CF) y Torito Limpio de autores que han trabajado previamente con este material en la Figura 2-22 (Viertel 2003, Sánchez 2002), donde se observa una tendencia de un aumento de V_s a medida que disminuye el contenido de finos, como también a medida que aumenta el confinamiento y disminuye el índice de vacíos.

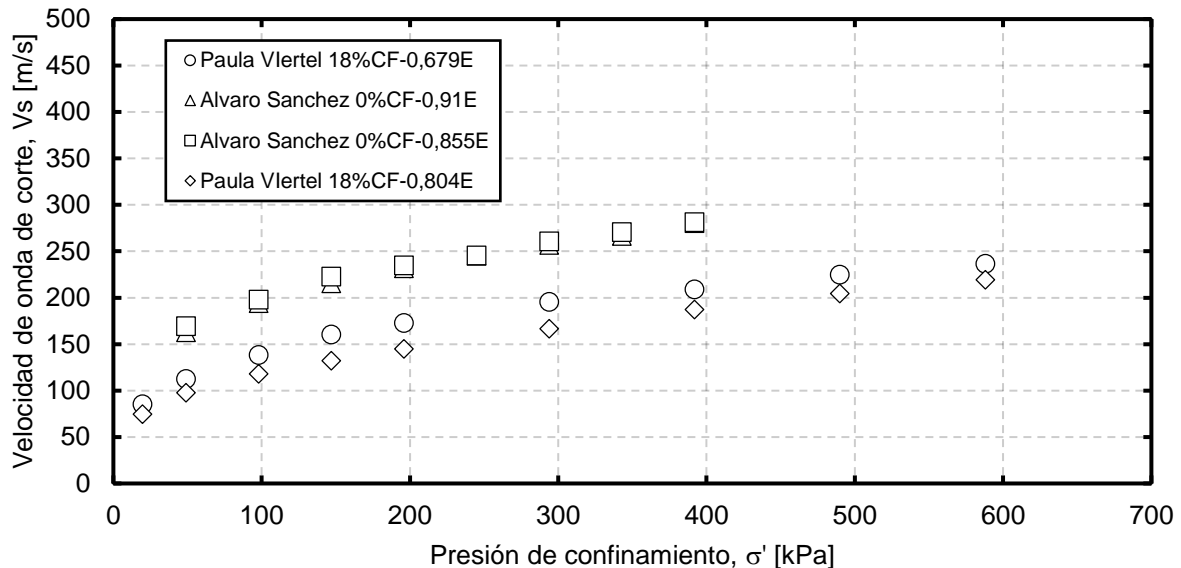


Figura 2-22: Resultados Torito Viertel (2003) y Sánchez (2002).

En las siguientes secciones se hace una distinción de resultados para arenas limpias (2.3.1) y arenas con finos (2.3.2).

2.3.1. Propiedades dinámicas de arenas limpias

Como primer antecedente para arenas limpias, se tiene las propiedades de G_{max} , donde distintos autores han realizados sus trabajos en base a la ecuación de Hardin (1968) (Eq. 2-17), de esta forma se presentan los trabajos en la Tabla 2-4, donde se destaca que para partículas angulosas el valor de C_g tiende a ser menor y el valor de n tiende en un rango acotado entre 0,4 a 0,6.

En el gráfico de la Figura 2-23, se muestran los resultados de cuatro autores, donde todas son para arenas angulares, exceptuando los valores de Ochoa (2015), que corresponden a una arena redondeada a sub-redondeada, como es la arena de Ottawa. A partir de estos datos, es posible definir la clara tendencia del estado de carga sobre el módulo de corte máximo, donde a mayor confinamiento, se tiene un mayor G_{max} .

Tabla 2-4: Trabajos de Gmax para arenas limpias.

Tipo Material	f(e)	Cg	n	Autor
Ottawa Sand (partícula redondeada a sub-redondeada)	$\frac{1}{0,3 + 0,7 \cdot e^2}$	579,3	0,503	Ochoa - Cornejo, F. A. (2015)
Hostun Sand (sub-redondeada a angular)	$\frac{(2,123 - e)^2}{1 + e}$	837	0,441	Goudarzy, M., et. al. (2016)
Commercial Kaolinite (angular)	$\frac{(2,973 - e)^2}{1 + e}$	327	0,5	Hardin, B. O. and Black, W. L. (1968)
Clean Sand (Cu<1,8) (Toyoura Sand)	$\frac{(2,17 - e)^2}{1 + e}$	1410	0,4	Iwasaki, T. and Tatsuoka, F. (1977)
Clean Sand (Ban-nosu Sand)	$\frac{(2,17 - e)^2}{1 + e}$	900	0,4	Iwasaki, T., Tatsuoka, F., and Takagi, Y. (1978)
Clean Sand (Toyoura Sand)	$\frac{1}{e^{1,3}}$	724	0,45	Lo Presti, D. C. F., et. al. (1997)
White Sand (partículas redondeadas)	$\frac{1}{e^{1,29}}$	600	0,46	Payan, et. al. (2017).
Crushed Blue Sand 1 (angular)		420	0,55	
Crushed Blue Sand 2 (angular)		370	0,60	
Toyoura y Osaka Morinomiya	$\frac{0,67 - e}{1 + e}$	4160	0,5	Shibata, T. and Soelarno, D. S. (1975)
Arena de Relave Torito Limpio	$\frac{(2,973 - e)^2}{1 + e}$	227	0,46	Verdugo, R. (2016)
Toyoura Sand (sub-angular a sub-redondeado)	$\frac{(2,17 - e)^2}{1 + e}$	953,9	0,37	Yang, J., & Liu, X. (2016)
Ottawa Sand, Brazil Sand y Toyoura Sand	Mismos que Hardin, 2,97 para angular (Brazil Sand) y 2,17 para redondeado (Ottawa Sand)			Yu, P. and Richart, F. E., Jr. (1984)

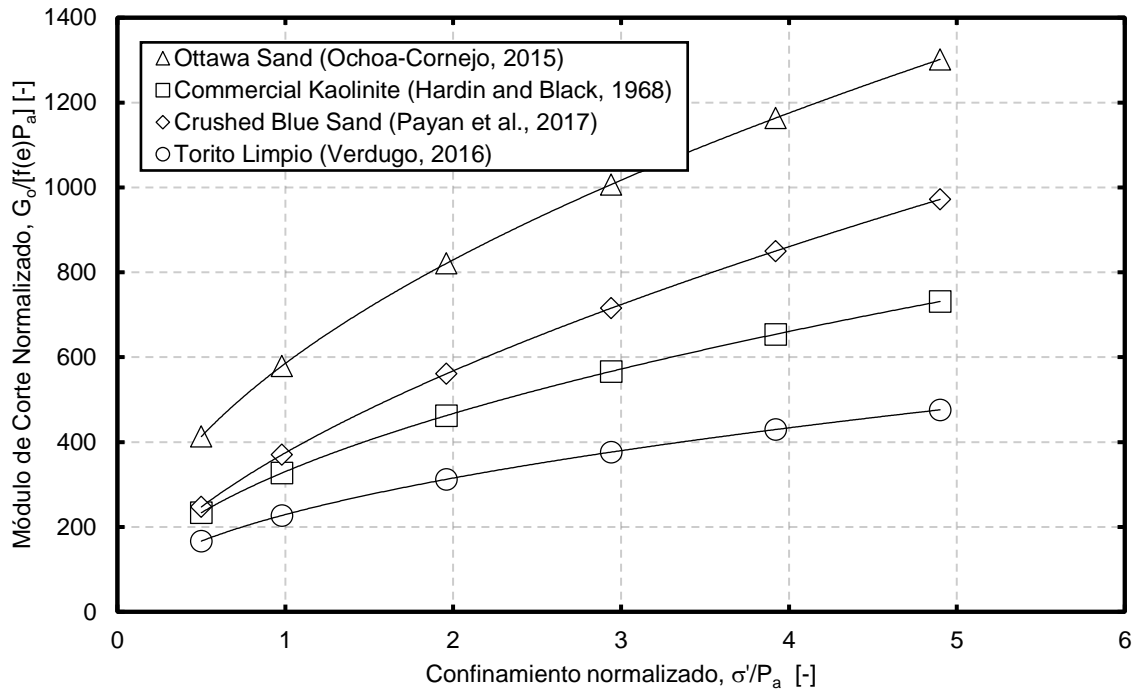


Figura 2-23: Módulo de corte normalizado en función del confinamiento normalizado para distintos autores de arenas limpias.

Para evidenciar el efecto del índice de vacío sobre el módulo de corte máximo, en la Figura 2-24, se muestran los resultados de distintos autores para arenas limpias, donde se observa la clara tendencia de que a medida que aumenta el índice de vacío, disminuye el módulo de corte máximo.

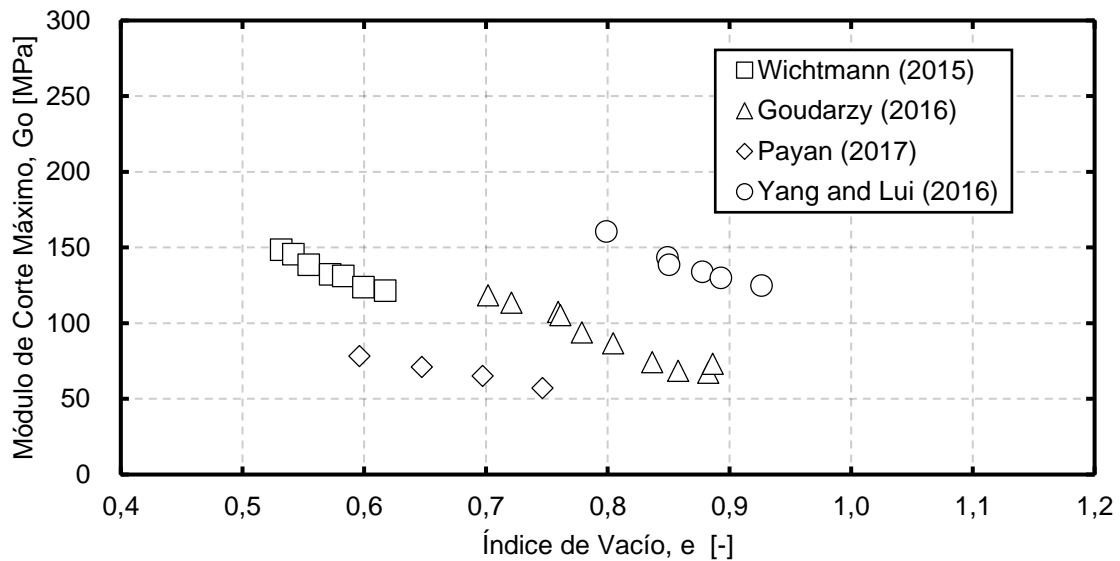


Figura 2-24: G_o vs e para arenas limpias.

Para los valores de G/G_{max} y amortiguamiento (D), se presentan los resultados originales de los autores Iwasaki et al (1978) y Ni (1987), en la Figura 2-25, quienes estudian el efecto del confinamiento en arenas limpias a través del equipo de columna resonante y triaxial cíclico. Se observa que a medida que aumenta el estado de carga, disminuye la degradación de la rigidez (aumenta G/G_{max}) y tiende a disminuir el damping.

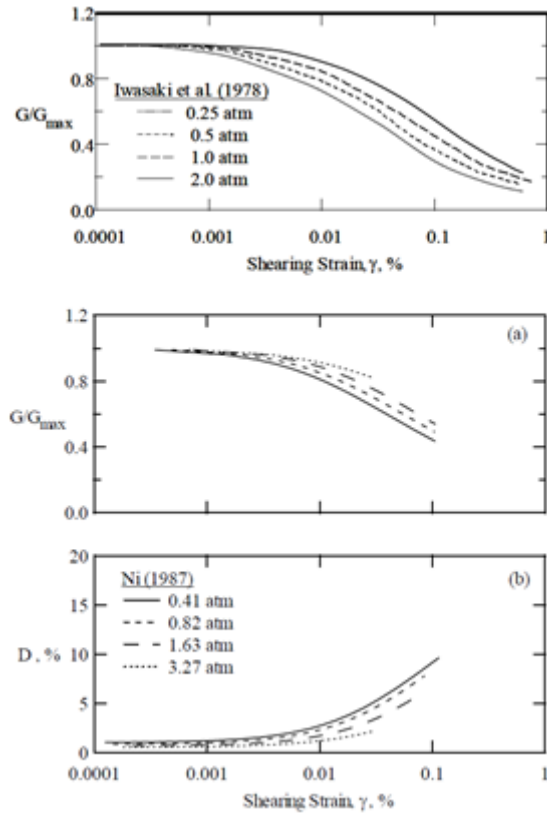


Figura 2-25: Efecto del confinamiento en arenas limpias en G/G_{max} y amortiguamiento.

2.3.2. Propiedades dinámicas de arenas con finos

Al igual que los antecedentes mostrados para arenas limpias, se muestran los distintos trabajos realizados en arenas con finos, donde se ha canalizado en la obtención de G_{max} en función del estado de carga. Los resultados obtenidos por los distintos autores es posible agruparlos y expresarlos según la ecuación de Hardin (1968) (Eq. 2-17), tal y como se muestran en la Tabla 2-5. Los valores de C_g y n varían según el contenido de finos, pero se tiene la misma tendencia, donde para partículas angulosas se presentan menores valores de C_g y el valor de n oscila en un rango acotado que no supera el valor de 0,61.

Tabla 2-5: Trabajos de G_{max} para arenas con finos.

Tipo Material	f(e)	Cg	n	Trabajo
Ottawa Sand with several silty or clayed sand	$\frac{(2,17 - e)^2}{1 + e}$	611 a 235	0,437 a 0,751	Carraro, J. A. H., Prezzi, M., & Salgado, R. (2009)
Taiyuan Sand + Taiyuan loess Fujian Sand + Taiyuan loess	$\frac{1}{e^{1,1}}$	348 a 280	0,63 a 0,60	Cheng, K., Zhang, J., Miao, Y., Ruan, B., & Peng, T. (2019)
Hostun Sand with non-plastic fines	$\frac{(2,12 - e)^2}{1 + e}$	837	0,441	Goudarzy, M., et. al. (2016)
Sand and Clay	$\frac{1}{0,3 + 0,7 \cdot e^2}$	625	0,5	Hardin, B. O. (1978)
Toyoura Sand	$\frac{(2,17 - e)^2}{1 + e}$	840	0,5	Kokusho, T. (1980)
Ticino Sand (Arena limpia uniforme de sílice) Quiou Sand (Arena Calcárea bien graduada 2%CF)	$\frac{(2,27 - e)^2}{1 + e}$	710	0,4	Lo Presti, D. C. F., et. al. (1993)
White Sand (partículas redondeadas) + Silica Silt	$\frac{1}{e^{1,29}}$	433 a 236	0,49 a 0,60	Payan, et. al. (2017).
Crushed Blue Sand 1 (angular) + Silica Silt		355 a 260	0,54 a 0,61	
Crushed Blue Sand 2 (angular) + Silica Silt		303 a 229	0,60 a 0,61	
Ottawa Sand with Kaolin Clay	$\frac{(2,17 - e)^2}{1 + e}$	611 a 560	0,437 a 0,470	Salgado, R., Bandini, P., & Karim, A. (2000)
Arena de Relave Torito Natural	$\frac{(2,973 - e)^2}{1 + e}$	106,8	0,55	Viertel (2003)
Toyoura Sand with Silica Fines	$\frac{(2,17 - e)^2}{1 + e}$	105 a 85	0,39 a 0,40	Yang, J., & Liu, X. (2016)
Natural Quartz sand	$\frac{(a - e)^2}{1 + e}$ a=2,2 - 6	592 a 27,4	0,43 a 0,57	Wichtmann, T., et. al. (2015)

En el gráfico de la Figura 2-26, se muestran los resultados de arenas con finos. A partir de estos datos, es posible definir la clara tendencia del estado de carga sobre el módulo de corte máximo, donde a mayor confinamiento, se tiene un mayor G_{max} . Además, a mayor contenido de finos, menor es el G_{max} .

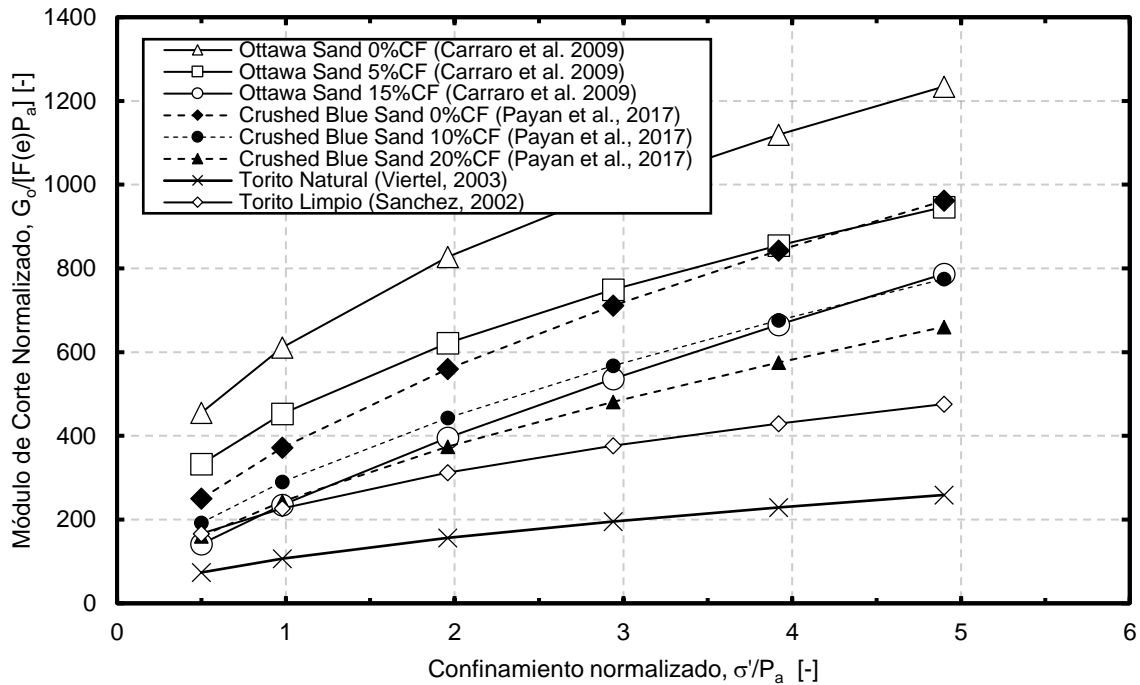


Figura 2-26: Módulo de corte normalizado en función del confinamiento normalizado para distintos autores de arenas con finos.

Para evidenciar el efecto del índice de vacío sobre el módulo de corte máximo, en la Figura 2-27, se muestran los resultados de distintos autores para arenas con finos, donde se observa la clara tendencia de que a medida que aumenta el índice de vacío, disminuye el módulo de corte máximo.

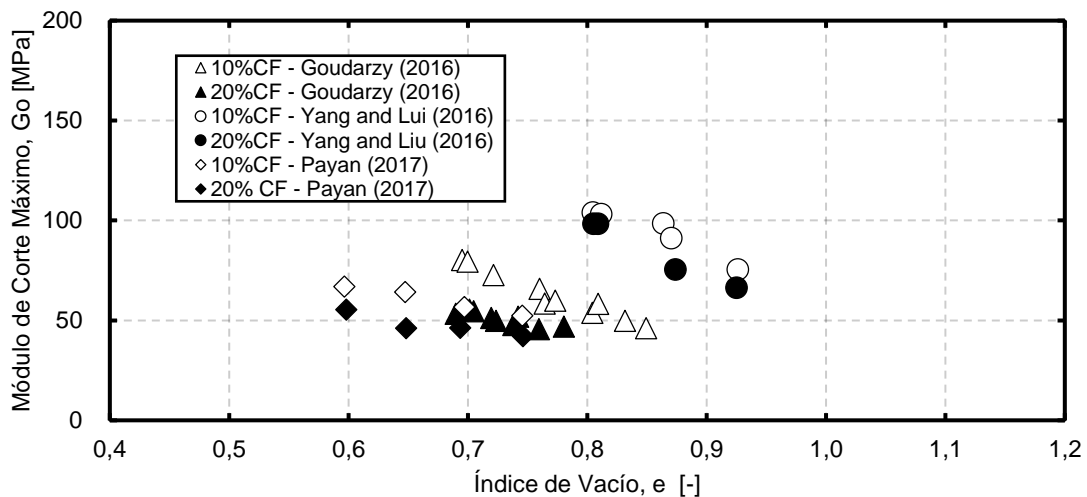


Figura 2-27: G_0 vs e para arenas con finos (10%CF y 20%CF).

Para los valores de G/G_{\max} y amortiguamiento (D), se presentan los resultados originales en la Figura 2-28 del autor Kokusho (1980) quien trabajó con Toyura, mientras que en la Figura 2-29, Bayat (2020) presenta cinco tipos de suelo clasificados como SP, donde va variando el valor de d_{50} .

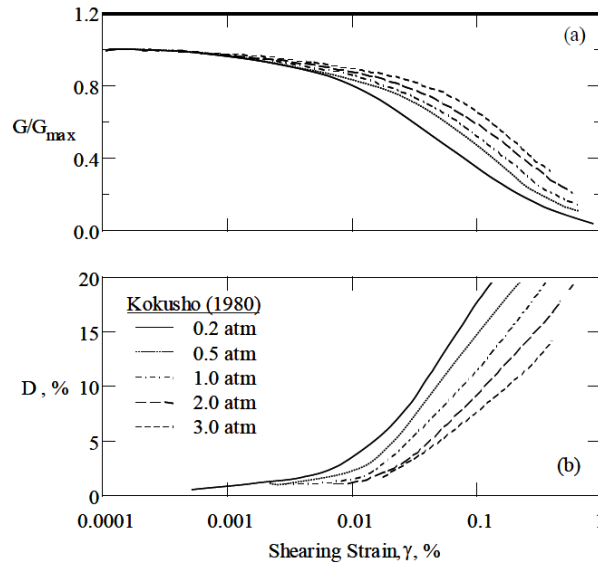


Figura 2-28: Efecto del confinamiento en una arena con finos en G/G_{\max} y amortiguamiento (Kokusho, 1980).

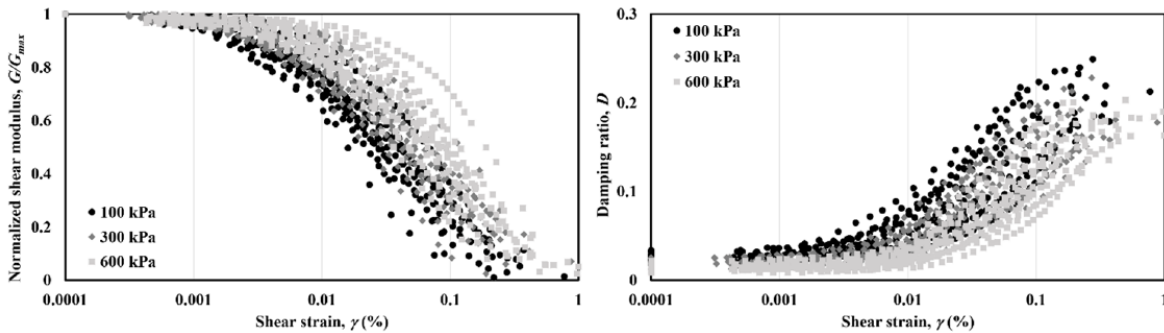


Figura 2-29: Variación de G/G_{\max} y amortiguamiento en función del confinamiento para cinco tipos de arenas (Bayat, 2020).

En la Figura 2-30 se muestra la variación del amortiguamiento (D) de una arena angular para distintos contenidos de finos, observando una leve tendencia que a medida que aumenta el contenido de finos aumenta el amortiguamiento, mientras que en la Figura 2-31 se observa la variación según el índice de plasticidad de la arena.

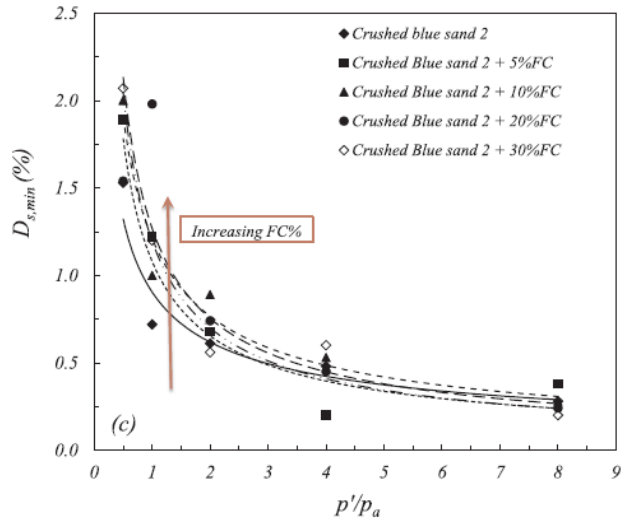


Figura 2-30: Variación de D para distintos contenidos de finos de una arena angular (Payan et al., 2017).

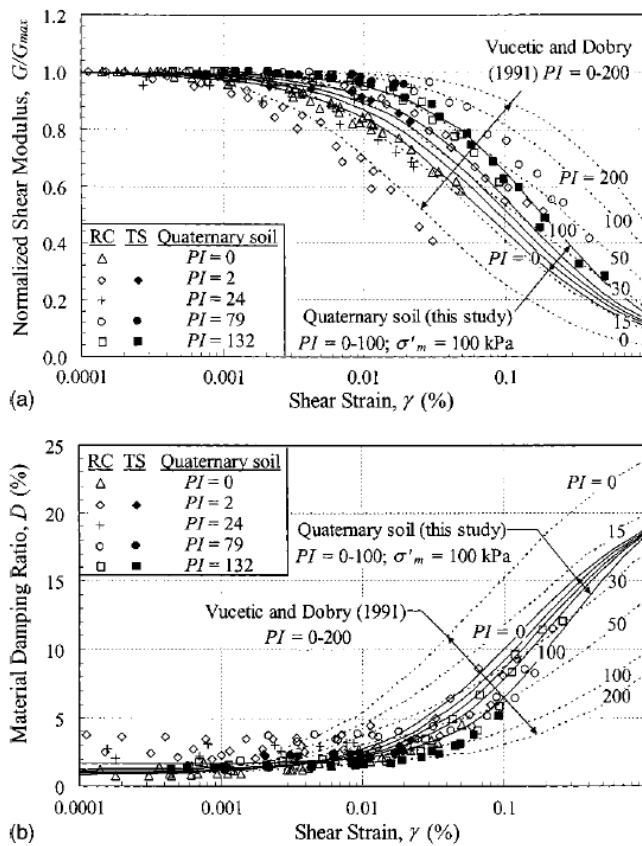


Figura 2-31: G/G_{max} y Damping vs deformación al corte para suelos cuaternarios y las curvas de Vucetic and Dobry (1991), (Zhang et al. 2005).

En la Figura 2-32, se observa la curva de G/G_{max} para distintos contenidos de finos, donde se observa que existe una tendencia a una única curva, independiente al contenido de finos.

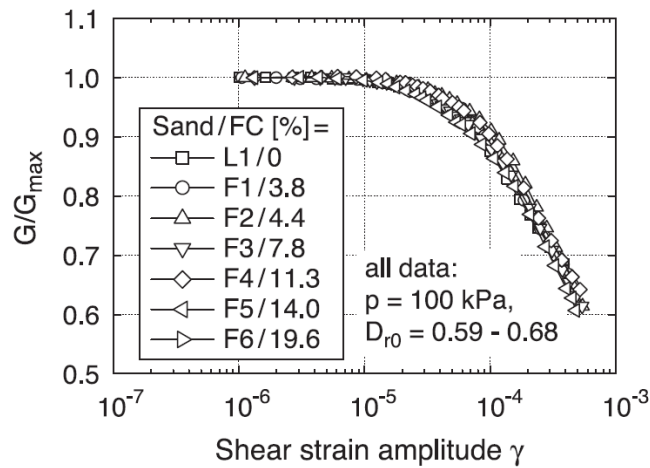


Figura 2-32: Comparación de G/G_{max} para arenas con diferentes contenidos de finos (Wichtmann et al. 2015).

En la Figura 2-33 y Figura 2-34, se grafican los modelos teóricos descritos en el acápite 2.1.1.3, tanto para la estimación de G/G_{max} y D .

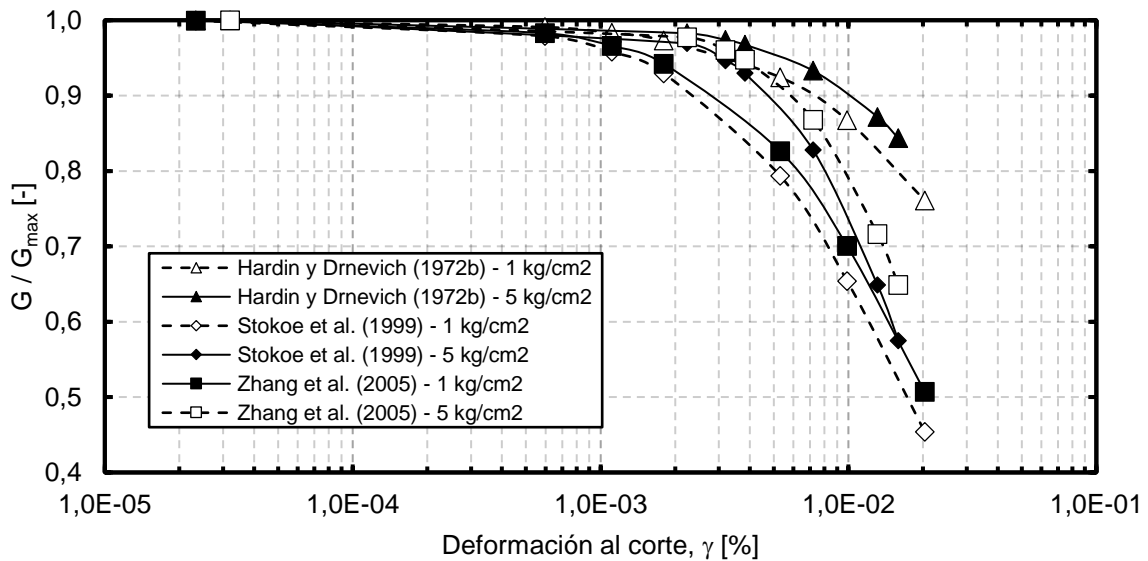


Figura 2-33: G/G_{max} vs Deformación según modelos teóricos.

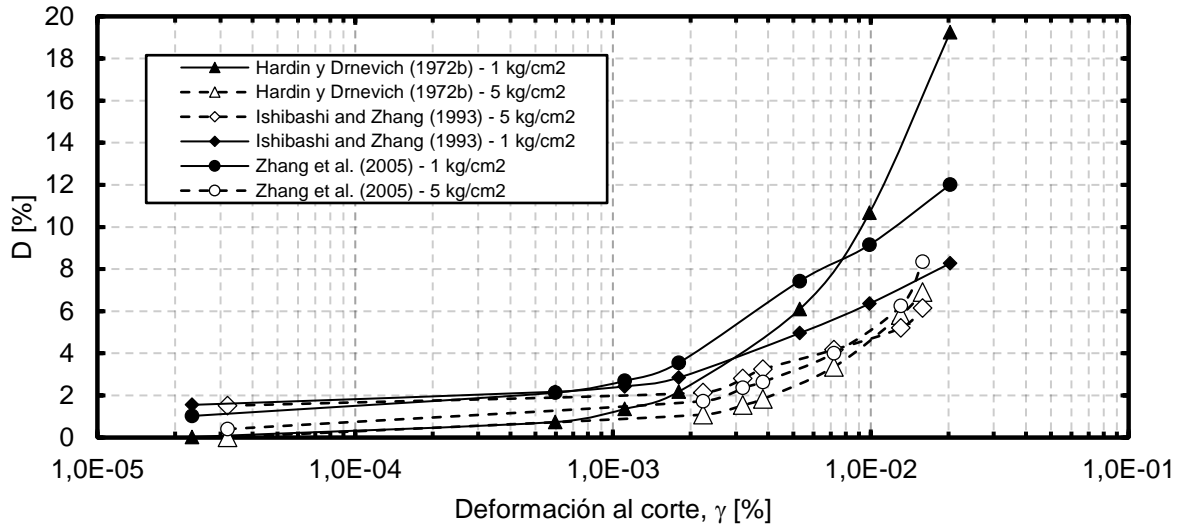


Figura 2-34: D vs Deformación según modelos teóricos.

Por otro lado, en la Figura 2-35 se observa el gráfico del amortiguamiento respecto a la degradación de la rigidez para distintas arenas con finos.

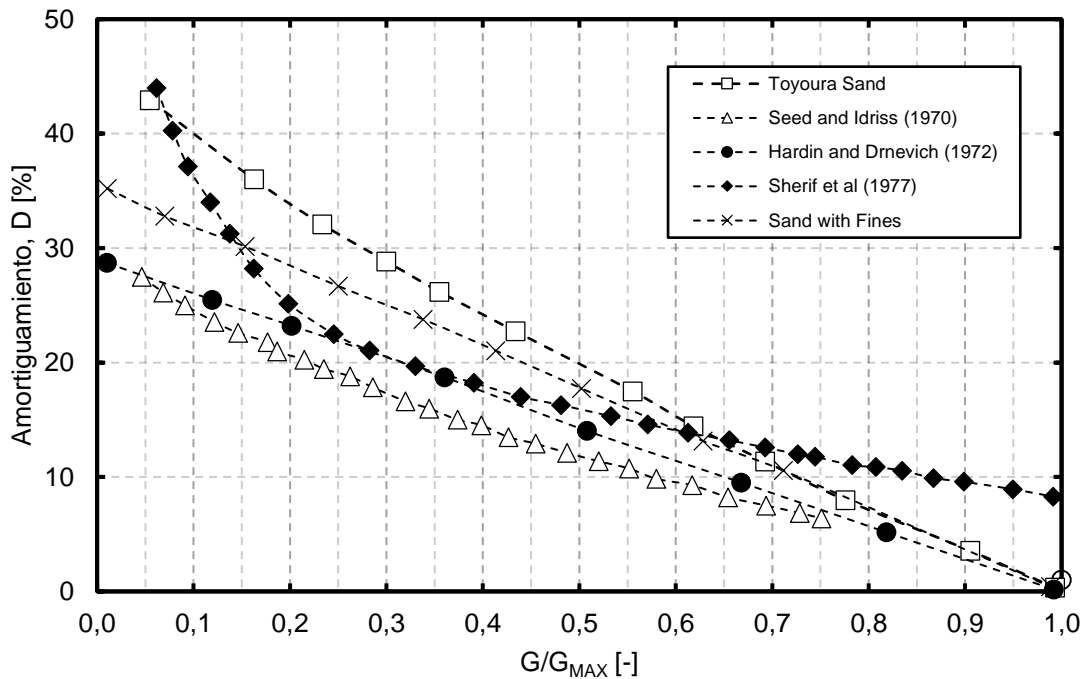


Figura 2-35: D vs G/G_{max} según autores para arenas con finos.

Finalmente, se muestra el resultado para una arena Ottawa (C778), la cual ha sido ensayada en forma drenada y no drenada, donde se puede observar una diferencia del valor de G/G_{max} a medida que aumenta la deformación entre el comportamiento

drenado y no drenado, siendo mayor en drenado (Figura 2-36). El Mohtar et al. (2013) ha propuesta una corrección de los datos no drenado por la pérdida de la presión de confinamiento basado en la ecuación de Hardin (1978), dada por:

$$G_{U-corrected} = G_u \cdot \left(\frac{\sigma'_0}{\sigma'} \right)^n$$

Dónde:

$G_{U-corrected}$: Módulo de corte no drenado a cierta deformación corregido por la pérdida de esfuerzo efectivo.

G_u : Módulo de corte no drenado obtenido.

σ' : Esfuerzo efectivo obtenido para la determinación de G_u .

σ'_0 = presión de confinamiento inicial (100 kPa en este caso), y

n = constante que relaciona el módulo de corte con la presión de confinamiento.

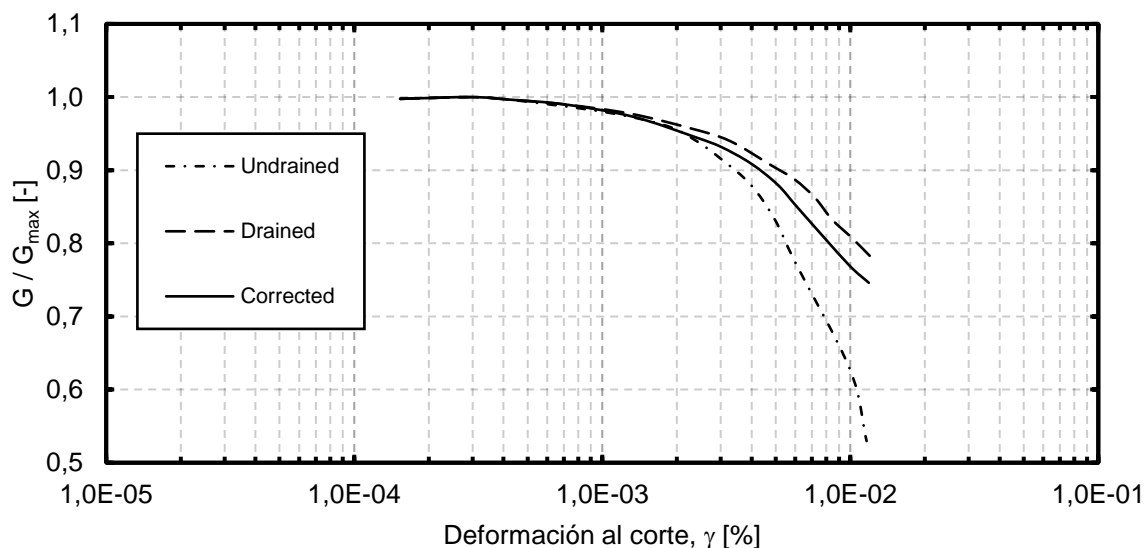


Figura 2-36: Comparación resultados drenado y no drenado (El Mohtar et al., 2013).

Al realizar un ensayo en condición no drenada, se observa un incremento de las presiones de poro (Figura 2-37), lo que se traduce en una disminución del esfuerzo efectivo. En el rango lineal del suelo (muy pequeñas deformaciones), no se aprecia un aumento notorio, sin embargo, a partir de cierto nivel de deformación, se disparan el exceso de presiones de poros, en especial a bajos estados de carga y a medida que aumentas las deformaciones.

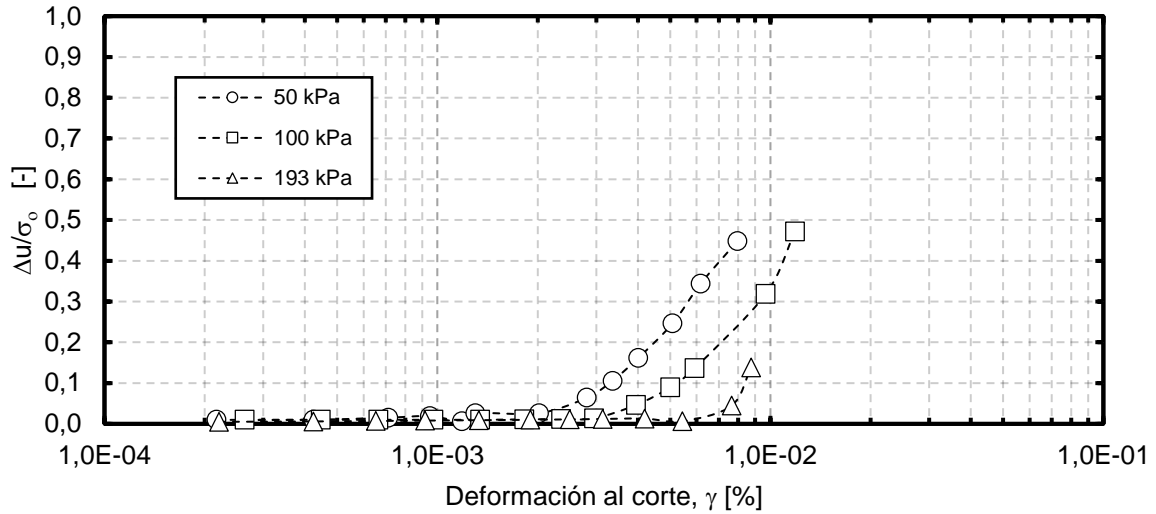


Figura 2-37: Exceso presión de poro normalizada por el confinamiento inicial (El Mohtar et al., 2013).

2.4. Resumen

El módulo de corte (G) y el amortiguamiento (D) son dos parámetros muy sensibles al nivel de deformación, estado de carga, índice de plasticidad e índice de vacío. Tanto G como D son parámetros dinámicos muy importantes y sirven para la estimación de la respuesta sísmica del suelo. Estos parámetros se pueden obtener en pruebas de campo o laboratorio. Se han propuestos numerosos modelos empíricos y cuantitativos a lo largo del tiempo para predecir las propiedades dinámicas de los suelos, entre los que destacan:

-Velocidad de Onda de Corte: $V_s = \alpha \cdot \left(\frac{\sigma'_v}{p_a}\right) \beta$

-Módulo de Corte Máximo: $G_{max} = c_g \cdot (OCR)^k \cdot f(e) \cdot p_a^{1-n} \cdot (\sigma'_v)^n$

-Degradación de la Rigidez: $G/G_{max} = 1/1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_{ref}}\right)^\alpha$

-Deformación al corte de referencia: $\gamma_{ref} = \frac{\tau_{max}}{G_0}$ y $\gamma_r = \gamma_{r1} \cdot \left(\frac{\sigma'_m}{p_a}\right)^k$

-Amortiguamiento (Damping): $D - D_{min} = k_1 \cdot \left(\frac{G}{G_{max}}\right)^2 + k_2 \cdot \left(\frac{G}{G_{max}}\right) + k_3$

-Corrección comportamiento no drenado: $G_{U-corrected} = G_u \cdot \left(\frac{\sigma'_0}{\sigma'_v}\right)^n$

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se presentan los materiales y equipos utilizados para desarrollar este trabajo. Adicionalmente, se describen las metodologías de los ensayos.

3.1. Descripción de los materiales

El material utilizado corresponde a un suelo extraído del muro del tranque de relave El Torito, que pertenece a la mina El Soldado de Anglo American Sur, la cual es una mina a rajo abierto cuyos minerales a extraer son procesados en una planta de molienda y flotación convencional que produce concentrados de cobre que ha sido explotada desde 1989. El tranque de relave El Torito (Figura 3-1), se ubica en la región de Valparaíso, Provincia de Quillota, comuna de Nogales, y abarca una superficie total de aproximadamente 280 ha, y se encuentra a 25 km al noreste de la ciudad de Quillota y a 20 km al sureste de La Ligua.

Esta arena corresponde a la fracción gruesa del relave producido y fue extraído en el año 2015 por Marcelo Vargas para su tesis de magister y almacenado en el Laboratorio de Sólidos, Medios Particulados y Estructuras perteneciente a la facultad de ciencias físicas y matemáticas de la Universidad de Chile. Hasta la fecha numerosos trabajos de títulos se han desarrollado con este material.



Figura 3-1: Esquema Tranque de relave El Torito.

3.1.1. Torito Natural

Este material corresponde a una arena limosa (SM) mal graduada de color gris con partículas angulosas y sub angulosas, que posee un 17% de finos no plásticos, un tamaño medio de partículas (D_{50}) de 0,166 mm, un coeficiente de uniformidad (C_u) de 4,90 y un coeficiente de curvatura (C_c) de 1,52. En Figura 3-2 se muestra la distribución granulométrica de la arena estudiada, comparando el resultado de una granulometría láser y mecánica del material, junto a su fracción fina.

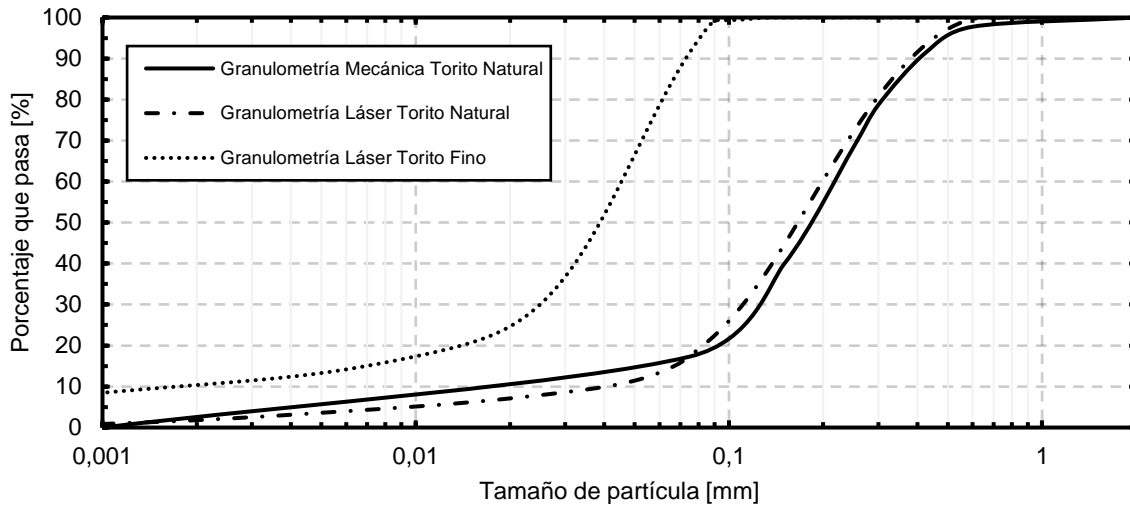


Figura 3-2: Granulometría láser y mecánica para Torito Natural y fracción fina.

Adicional a los ensayos granulométricos manual y láser mostrados anteriormente, se realiza la medición de plasticidad de los finos del material mediante la norma ASTM D4318, las densidades máximas y mínimas del material, su gravedad específica según la norma ASTM D854 y sus índices de vacíos totales máximos y mínimos (e_{bulk}). En la Tabla 3-1 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos mencionados.

La muestra de relave natural presenta un 20% de cuarzo, 15% de feldespato potásico, 20% de mineral volcánico, y 30% de partículas ígneas. Además, el 5% corresponde a minerales máficos (anfíbolos y piroxenos) con diámetro medios menores a 0.5 mm. También se observan cristales de magnetita de tamaños menores a 0.5 mm de forma angulosa (Vargas, 2015).

Tabla 3-1: Resumen Caracterización Geotécnica.

Característica	Resultado
Porcentaje Finos [%]	17
D50 [mm]	0,166
Cu	4,90
Cc	1,52
IP Finos	NP
Clasificación USCS	Arena Limosa (SM)
Densidad Máxima [g/cm ³]	1.804
Densidad Mínima [g/cm ³]	1,276
e_{max}	1,138
e_{min}	0,524
G_s	2,75

3.1.2. Torito con finos

Este material corresponde a un suelo confeccionado en base a la fracción gruesa y fracción fina del material. Para obtener un mejor resultado de tamizado para confeccionar el material, se ha optado por trabajar con 200 gramos de material en cada tamizado. De esta forma, para obtener la fracción fina, se realiza en primer lugar el tamizado del material sobre la malla #200. Luego, el material pasante, corresponde a la fracción fina de Torito.

La fracción gruesa de Torito, se obtiene al tamizar el material en la malla #200. El material retenido corresponde a la fracción gruesa y para eliminar la mayoría de los finos se lava el material.

Con la fracción gruesa y la fracción fina del material, se confecciona un suelo con distintos contenidos de finos en base a su peso, los cuales van desde 1% a 30% de contenido de finos. En la Tabla 3-2 muestra los parámetros característicos de los suelos confeccionados, junto al suelo natural (17% contenido de finos).

La muestra de relave natural presenta un 20% de cuarzo, 15% de feldespato potásico, 20% de mineral volcánico, y 30% de partículas ígneas. Además, el 5% corresponde a minerales máficos (anfíbolos y piroxenos) con diámetro medios menores a 0.5 mm. También se observan cristales de magnetita de tamaños menores a 0.5 mm de forma angulosa (Vargas, 2015).

Tabla 3-2: Parámetros del suelo para distintos contenidos de finos.

Parámetros	Contenido de finos (%)					
	1	5	10	17	20	30
D ₅₀ (mm)	0,227	0,211	0,207	0,166	0,183	0,146
C _u	2,59	2,68	3,14	4,90	5,08	7,87
C _c	0,92	1,02	0,99	1,52	1,086	1,71
e _{max}	1,267	1,208	1,193	1,138	1,118	1,076
e _{min}	0,597	0,574	0,549	0,524	0,498	0,445
G _s	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75

3.1.3. Microscopía Relave El Torito

Trabajos anteriores realizados por Bravo (2018) y Rodríguez (2019) muestran la microscopía óptica y de barrido electrónico (SEM) del material El Torito. En la Figura 3-3 muestra la microscopía óptica de partículas en distintas mallas de tamizado, mientras que en la Figura 3-4 se presentan fotografías obtenidas por microscopio SEM en distintas mallas de tamizado.

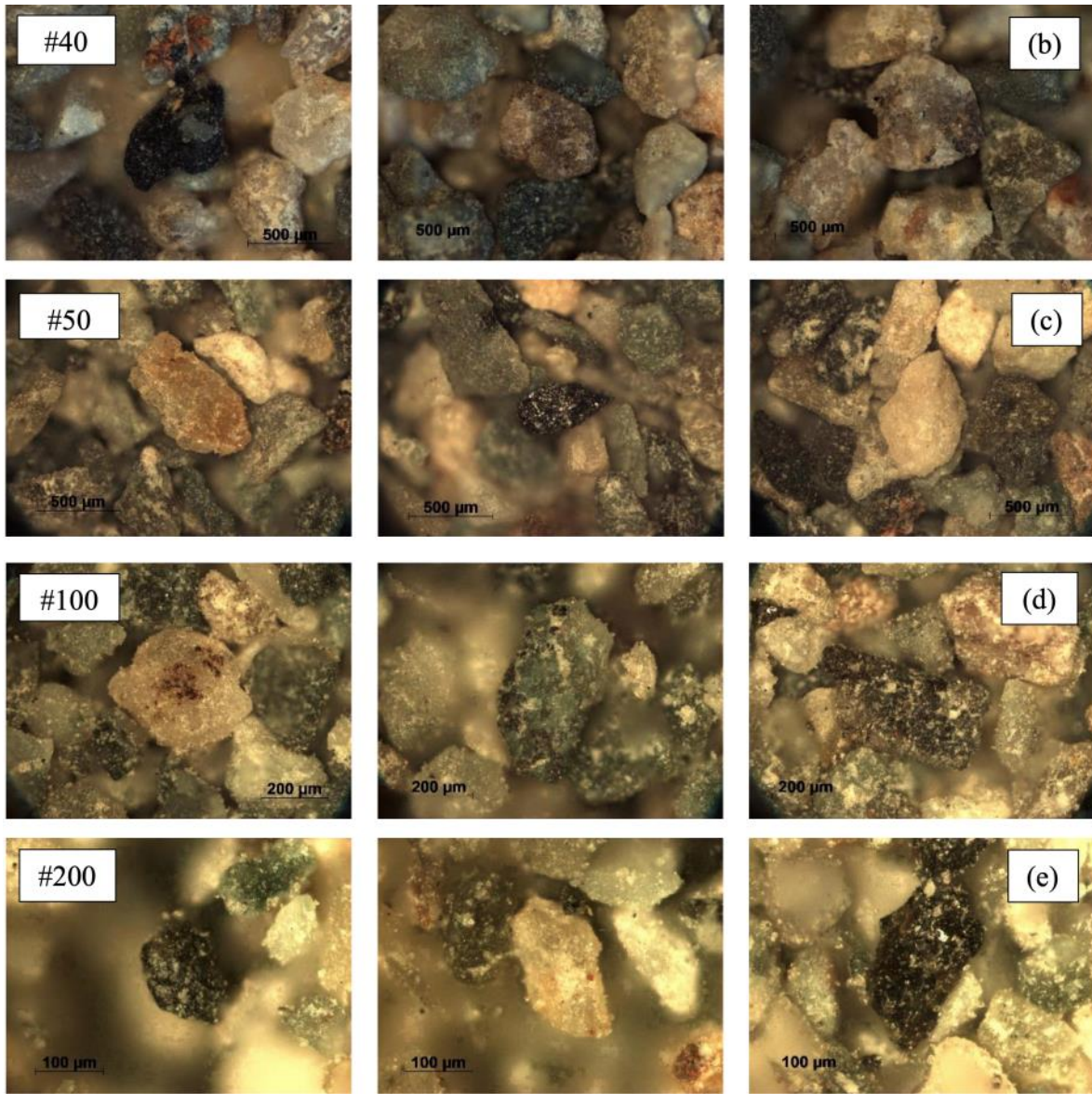


Figura 3-3: Microscopía óptica de la arena de relave natural. (a) Malla #40, (b) Malla #50, (c) Malla #100 y (d) Malla #200.

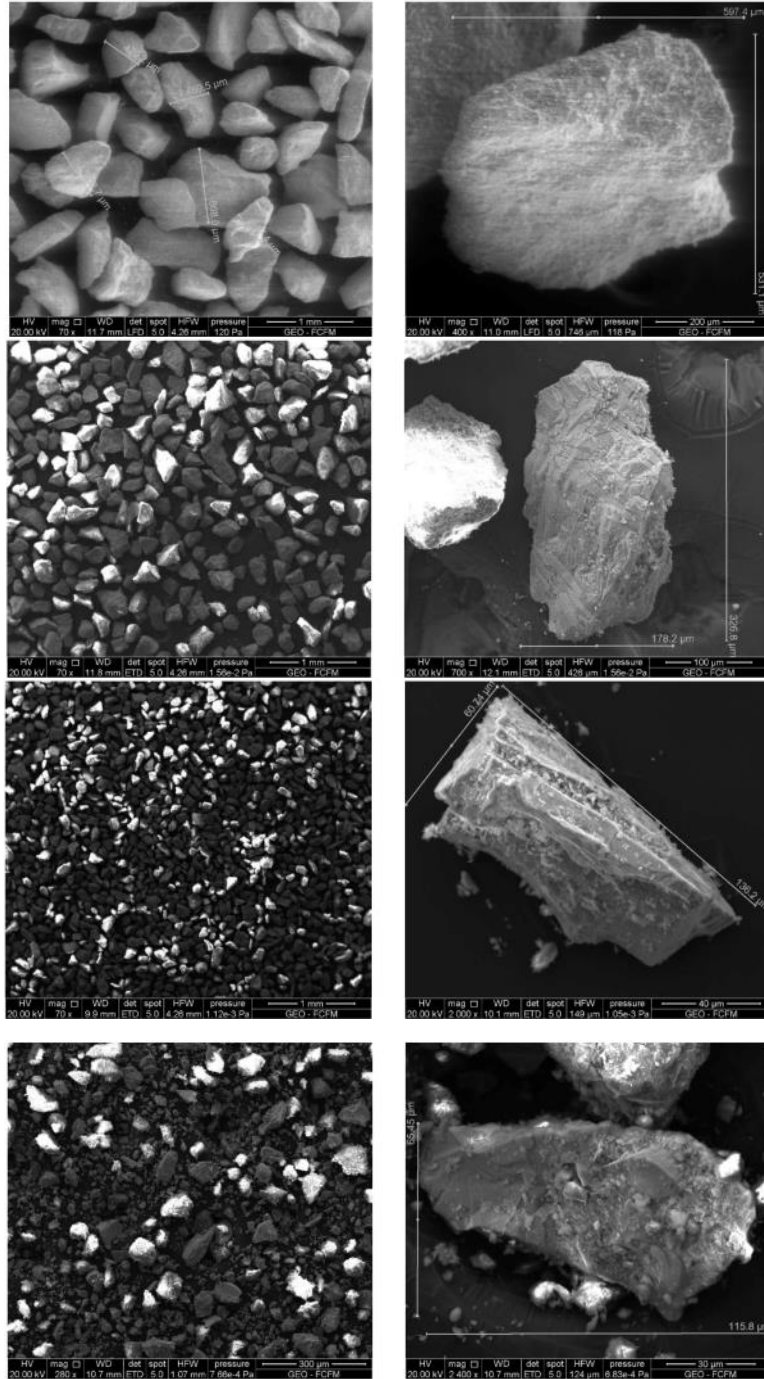


Figura 3-4: SEM de la arena de relave natural. (a) Malla #40, (b) Malla #100, (c) Malla #200 y (d) Finos.

3.2. Equipos Utilizados

3.2.1. Mastersizer 2000

El análisis granulométrico se realizó con el equipo Mastersizer 2000 ubicado en el Laboratorio de Sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile (Figura 3-5).

A través de este equipo es posible realizar un análisis del tamaño de partículas, mediante el paso de partículas entre dos cristales circulares suspendidas en un líquido dispersante. A través de la difracción de un láser calibrado según el tipo de dispersante y tamaño de partículas, el equipo entrega una frecuencia de distribución de tamaños respecto al volumen total de la muestra.



Figura 3-5: Equipo de análisis granulométrico. (a) Equipo Mastersizer 2000. (b) Sistema de circulación de mezcla arena-solución (Maureira, 2012).

3.2.2. SEM

Para observar la morfología de las partículas pertenecientes al material analizado, se utiliza el microscopio electrónico de barrido (Scanning Electron Microscope, SEM), ubicado en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile y Centro de Excelencia de Geotermia de Los Andes (CEGA).

El funcionamiento de este equipo es a través de un haz de electrones que iluminan la muestra y con distintos detectores se recogen las diferentes señales, las cuales proporcionan información de la naturaleza de la muestra. Entre los detectores utilizados destaca el de electrones secundarios (SE), el cual proporciona una imagen de la morfología superficial de la muestra. Para mejorar la calidad y resolución de las fotografías, las partículas se metalizan con carbono, para luego ser colocadas en una placa, tal y como se observa en la Figura 3-6.

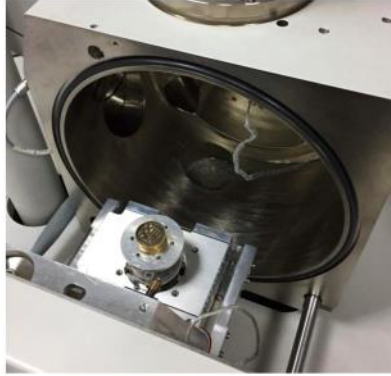


Figura 3-6: Microscopio SEM (Rodríguez, 2019).

3.2.3. Bender Element

Este equipo está compuesto por una cámara triaxial, donde en su interior posee dos caps (superior e inferior), los cuales contienen los Bender Element (Elemento Flector), que consisten en dos placas piezoeléctricas delgadas, cuyas caras internas y externas están unidas a superficies conductoras que actúan como electrodos.

Al aplicar un voltaje (mediante un generador de señales), se produce un alargamiento y un acortamiento del elemento piezoeléctrico (Figura 3-7) debido a la polarización del cristal del material en presencia de las superficies conductoras. Esta acción genera una señal eléctrica que puede ser medida mediante los cables conductores a través de un osciloscopio, permitiendo la medición de la velocidad de ondas de corte en probetas confinadas, saturadas y consolidadas, a través del tiempo de viaje de la onda a través de la probeta.

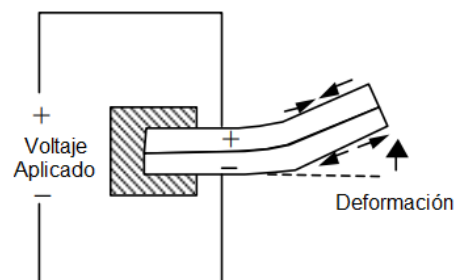


Figura 3-7: Deformación del Bender Element en un extremo (Leong, Yeo y Rahardjo (2005)).

3.2.3.1. Base Cámara Triaxial y Cámara Triaxial

El equipo de Bender Element está inmerso en una cámara triaxial (Figura 3-8), donde en su base se encuentra empotrado el elemento piezoeléctrico receptor (Figura 3-9), mientras que el elemento piezoeléctrico emisor se puede ajustar al tamaño de la probeta.

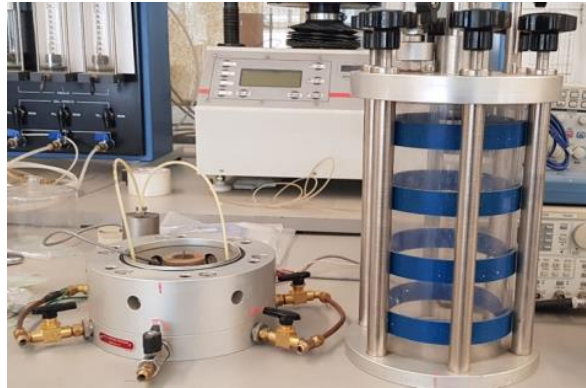


Figura 3-8: Base cámara triaxial (izquierda) y cámara triaxial (derecho).

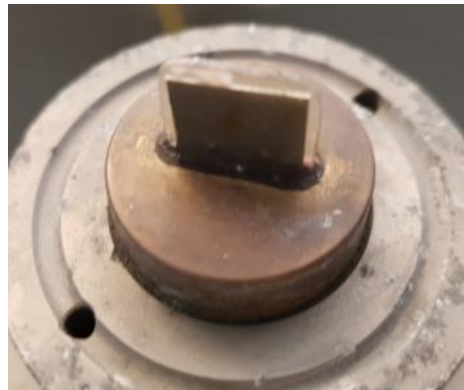


Figura 3-9: Elemento piezoeléctrico cubierto en un material plástico impermeable.

3.2.3.2. Osciloscopio PicoScope 4224

El osciloscopio contiene dos entradas BNC (Figura 3-10), con una resolución máxima de 16 bits y una sensibilidad de 10 mV/div, el cual se conecta mediante USB al computador tanto para transferir la información como para la obtención de energía. A través del Software PicoScope 6 (Figura 3-11), se obtienen los tiempos de llegada de forma sencilla y con la posibilidad de exportar datos en una variedad de formatos gráficos y textuales.

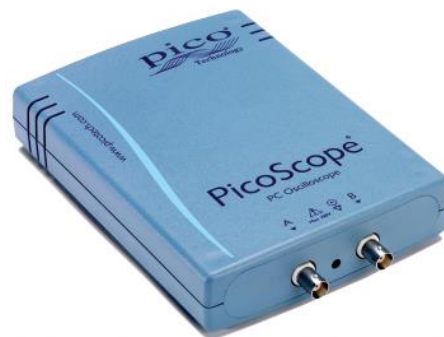


Figura 3-10: Osciloscopio PicoScope 4224.

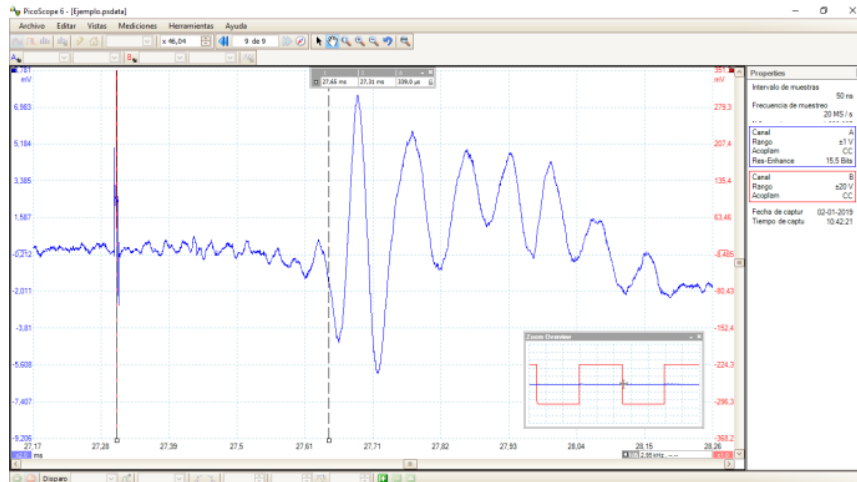


Figura 3-11: Software PicoScope 6.

3.2.3.3. Generador de Señales

Externo a la cámara triaxial y ajeno a los elementos piezoeléctricos, se ha utilizado un generador de señales que entregue cierto voltaje para excitar al elemento piezoeléctrico. En este ensayo se utiliza un generador de función TTI TG4001 (Figura 3-12), el cual nos permite generar ondas sinusoidales, cuadradas o triangulares, con una frecuencia de hasta 50 MHz de muy buena resolución.

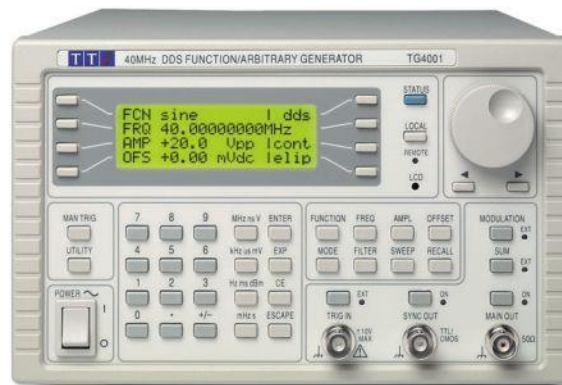


Figura 3-12: Generador de señales TG4001.

De esta forma, con los componentes descritos en los acápite anteriormente, se tiene la configuración de la Figura 3-13.

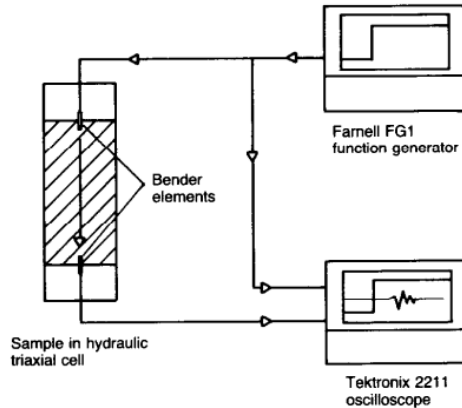


Figura 3-13: Esquema Bender Element (Viggiani, Atkinson 1995).

3.2.4. Columna Resonante

Este ensayo se realiza en base a la norma ASTM D4015-15 y se ha utilizado el equipo ubicado en las dependencias de IDIEM (Figura 3-14), donde mediante cargas sinusoidales de torsión en la parte superior de una probeta de 50mmx100mm, aplicadas mediante un sistema de accionamiento electromagnético, es posible determinar la frecuencia principal de resonancia. Considerando una respuesta elástica, homogénea e isotrópica a pequeñas deformaciones, el módulo de corte (G) se obtiene mediante (Richart et al., 1970):

$$G = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot H \cdot f_r}{\beta} \right)^2 \cdot \rho$$

Donde f_r es la frecuencia de resonancia obtenida, ρ es la densidad de la probeta, H es la altura de la probeta y β es un parámetro que depende del momento polar de inercia del equipo y de la probeta.



Figura 3-14: Equipo Columna Resonante IDIEM.

Adicionalmente, es posible determinar la razón de amortiguamiento (Damping, D) a partir del decremento logarítmico (free vibration decay). A continuación, se detallan los elementos de la columna resonante.

3.2.4.1. Controlador Presión/Volumen Standard

Es un dispositivo polivalente que permite controlar la presión de agua y el cambio de volumen, que trabaja hasta presiones admisibles de 3 MPa y contiene un volumen de agua máximo de 200 cc (Figura 3-15). Cuenta con un motor paso a paso y un tornillo sin fin que activan un pistón, que presuriza directamente el agua, regulando y midiendo de forma precisa ($<0,15\%$) la presión del líquido en su interior.

Este controlador debe ser llenado con agua, cada vez que se realiza el ensayo, o en su defecto verificar un nivel de agua suficiente para realizar un ensayo.



Figura 3-15: Controlador Presión/Volumen Standard (STDDPC) V2. (GDSELAB v2.5.4, 2015).

3.2.4.2. Equipo Columna Resonante (RCA)

Cuenta con una celda triaxial que resiste presiones hasta 1 MPa (Figura 3-16), debido a su gran peso, posee un sistema de montaje, que ayuda al movimiento de esta. En el interior de la cámara se encuentra la probeta junto a otros elementos necesarios para el ensayo, como son:

- Cámara interna de agua, donde el agua envuelve a la probeta.
- Marco interno, el cual sostiene el sistema electromagnético.
- Sistema electromagnético, que incluye imanes de tierras raras (NdReB).
- Acelerómetro y transductor de desplazamiento LVDT.



Figura 3-16: Cámara Triaxial y componentes internos Columna Resonante. (GDSELAB v2.5.4, 2015).

Externo a la celda triaxial, encontramos los siguientes elementos (Figura 3-17):

- Panel de control de presión.
- Un sistema de Generador de señales, el cual envía una señal sinusoidal al sistema electromagnético de la columna resonante.
- Amplificador de aceleración, que permite la lectura del voltaje entregado a través de un cambio en la impedancia entregada.
- Osciloscopio digital, que se encargará de recibir la señal en volts.
- Sistema de adquisición de datos y Computador (Software).



Figura 3-17: Equipo externo a la celda triaxial.

3.3. Metodologías de los Ensayos

La descripción de cada una de las etapas que se desarrollan para la preparación de las probetas y su respectivo ensayo es presentado a continuación. Cabe destacar que el procedimiento es similar a ensayos triaxiales, muy comunes en el campo de la geotecnia.

3.3.1. Confección de probetas

En la sección 3.1.1 y 3.1.2 se describe como confeccionar el material para distintos contenidos de finos. Este material es usado para armar las probetas mediante el método de compactación húmeda o “wet tamping”, donde se utiliza el material previamente secado de masa conocida y se mezcla con agua para alcanzar un porcentaje del 5% de humedad, de esta forma se garantiza generar una cohesión aparente suficiente y así modelar las probetas.

Una vez obtenido el material con 5% de humedad, se confecciona la probeta en cinco capas compactadas de igual masa dentro de un molde de bronce cilíndrico, donde esta masa se determina según la densidad deseada (índice de vacío inicial de confección).

La compactación al interior del molde de bronce cilíndrico se realiza homogéneamente mediante una vara de madera. Para evitar pérdida de material durante la confección y la realización del ensayo se utiliza un geotextil y papel filtro en ambos extremos, además de una geomembrana para aislar la probeta de la cámara.

Finalizada la confección de la probeta, ésta se coloca en la base del equipo a utilizar, donde posteriormente se llena la cámara que lo contiene con agua destilada.

3.3.2. Saturación de la probeta

Una vez terminada la instalación de la probeta en la celda triaxial, se aplica una presión de cámara de 0,2 kg/cm² para aplicar el proceso de saturación de la probeta, el cual consiste inicialmente en la aplicación de dióxido de carbono (CO₂) con el fin de reemplazar y desplazar el aire contenido (vacíos) al interior de la probeta.

Luego del paso de CO₂ durante 30 minutos, se hace circular al menos 200 ml de agua destilada y des-aireada a través de la probeta mediante un flujo de un gradiente hidráulico gravitacional igual a 1 metro aproximadamente.

Este proceso de saturación reemplaza el CO₂ con agua en los espacios intersticiales entre las partículas del material. Luego se procede a verificar si la probeta se satura correctamente mediante el cálculo del parámetro B-value, definido por:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3}$$

Esta relación es un indicador de la saturación mecánica en términos de presión, donde Δu corresponde al incremento de la presión de poros debido al incremento en la presión de confinamiento ($\Delta \sigma_3$). Esta medición se realiza previa a aumentar tanto la presión de la cámara y contrapresión, con una diferencia de 1 kg/cm².

3.3.3. Consolidación de la probeta

En esta etapa se lleva a la probeta al estado de carga que se desea ensayar. En este caso se desea estudiar un estado tensional isotrópicamente consolidado, así las tensiones principales son iguales a lo largo del proceso de disipación del exceso de presión de poros, cambio volumétrico y previniendo la existencia de corte. La consolidación se realiza durante un máximo de 30 minutos.

3.3.4. Bender Element

Una vez consolidada la probeta al estado de carga deseado. En el Anexo 1 se detalla en profundidad los pasos a seguir, donde en forma general son:

- Generar una onda con el generador de señales.
- Captar la señal emitida y recibida mediante el osciloscopio.
- Obtener el tiempo de llegada de la onda (peak de la señal recibida).
- Calcular V_s y G .

3.3.5. Columna Resonante

Una vez consolidada la probeta al estado de carga deseado, se procede a realizar los siguientes pasos:

- Realizar un barrido grueso para tener una noción de donde se ubica la frecuencia de resonancia.
- Realizar un barrido fino en base al barrido grueso realizado anteriormente para obtener la frecuencia de resonancia.
- Obtener G y deformación de la probeta al corte.
- Obtener D a través de un decaimiento con el voltaje asociado a la frecuencia de resonancia.

Estos pasos son detallados en el Anexo 2, el cual forma parte del manual de columna resonante realizado durante la confección de este trabajo de título, el cual considera variaciones respecto a metodologías empleadas en trabajos anteriores.

3.4. Programa Experimental

Durante este estudio se realizan ensayos de caracterización geotécnica, ensayos bender element y columna resonante (Tabla 3-3). El plan experimental considera 18 ensayos de bender element y 125 ensayos de columna resonante (65 en condición drenada y 60 en condición no drenada), adicionalmente se realizan ensayos durante el montaje de la probeta en los equipos (Pre-Ensayos), en particular previo a la consolidación y durante la consolidación.

Tabla 3-3: Ubicación y ensayos realizados.

Ensayo	Lab. Sedimentología	Lab. de Sólidos	Lab. IDIEM
Granulometría Mecánica		X	
Granulometría Láser	X		
Gravedad Específica		X	
Índice de vacío Máximo		X	
Índice de vacío Mínimo		X	
Bender Element		X	X
Columna Resonante			X

A modo de resumen, en la Figura 3-18 se presenta un diagrama de flujo para el programa experimental de los pre-ensayos (montaje del ensayo y durante la consolidación), donde se obtienen un total de 13 lecturas, donde las primeras ocho son del montaje de la probeta y las siguientes cinco de la etapa de consolidación.

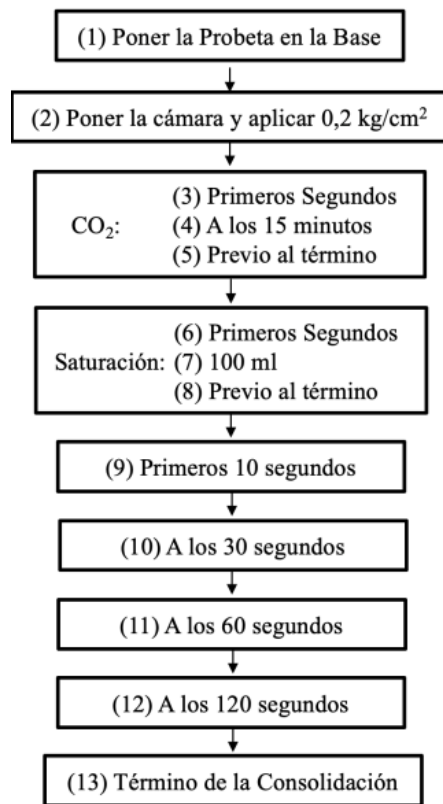


Figura 3-18: Programa Experimental Pre-Ensayos.

En la Figura 3-19 se presenta un diagrama de flujo con el resumen del programa experimental, el cual abarca los ensayos de caracterización y los ensayos post-consolidación tanto para bender element, como columna resonante. Para este

último ensayo, se aprecia un mayor número de ensayos dado que se estudia la degradación de la rigidez en condición drenada y no drenada.

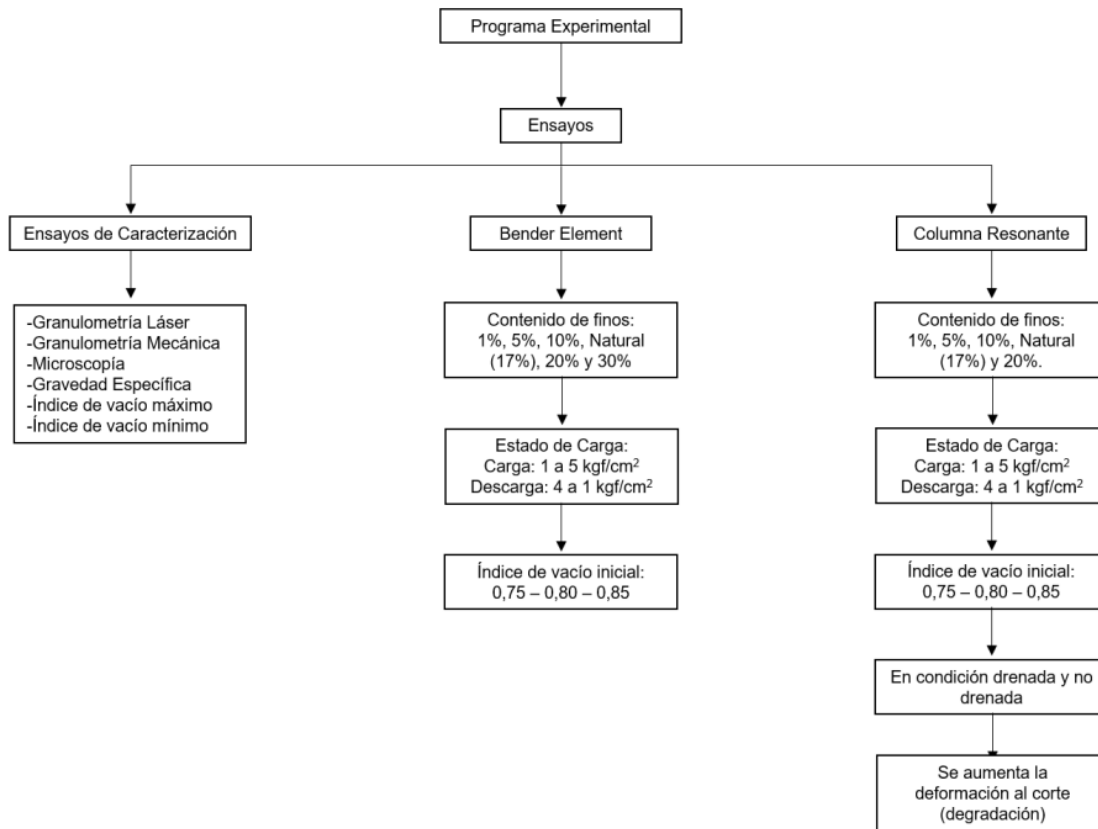


Figura 3-19: Programa Experimental para distintos estados de carga y caracterización.

Dada la gran cantidad de ensayos, se presenta un código para identificar cada resultado en el desarrollo del trabajo, definido por:

PR/BE/CR-XXCFYYE-D/ND

Donde:

BE/CR/PR: Ensayo de Bender Element (BE) o Columna Resonante (CR) o Pre-Ensayo (PR).

CF: Contenidos de finos, donde XX hace referencia al porcentaje.

E: Índice de vacíos, donde YY hace referencia al valor.

D/DN: Referencia a condición drenada (D) o no drenada (ND).

De esta forma, el ensayo CR-17CF75E-D hace referencia al ensayo de Columna Resonante con una muestra con un 17% de contenidos de finos y confeccionada con un índice de vacíos inicial de 0,75 en condición drenada.

4. MÓDULO DE CORTE

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los ensayos de Bender Element y Columna Resonante para el estudio del módulo de corte. En el acápite 4.1 se muestran los resultados para las etapas de la confección del ensayo (pre-ensayos), mientras que en el acápite 4.2 se presentan los resultados para distintos niveles de carga.

4.1. Resultados Pre-Ensayo

Existen registros para nueve probetas con distintos contenidos de finos y distintos índices de vacío de confección inicial en la etapa pre-ensayos, donde se obtienen los parámetros velocidad de onda de corte (V_s) y módulo de corte máximo (G_o). En la Figura 4-1 y Figura 4-2, se muestran los resultados de V_s obtenidos mediante el equipo bender element y columna resonante respectivamente.

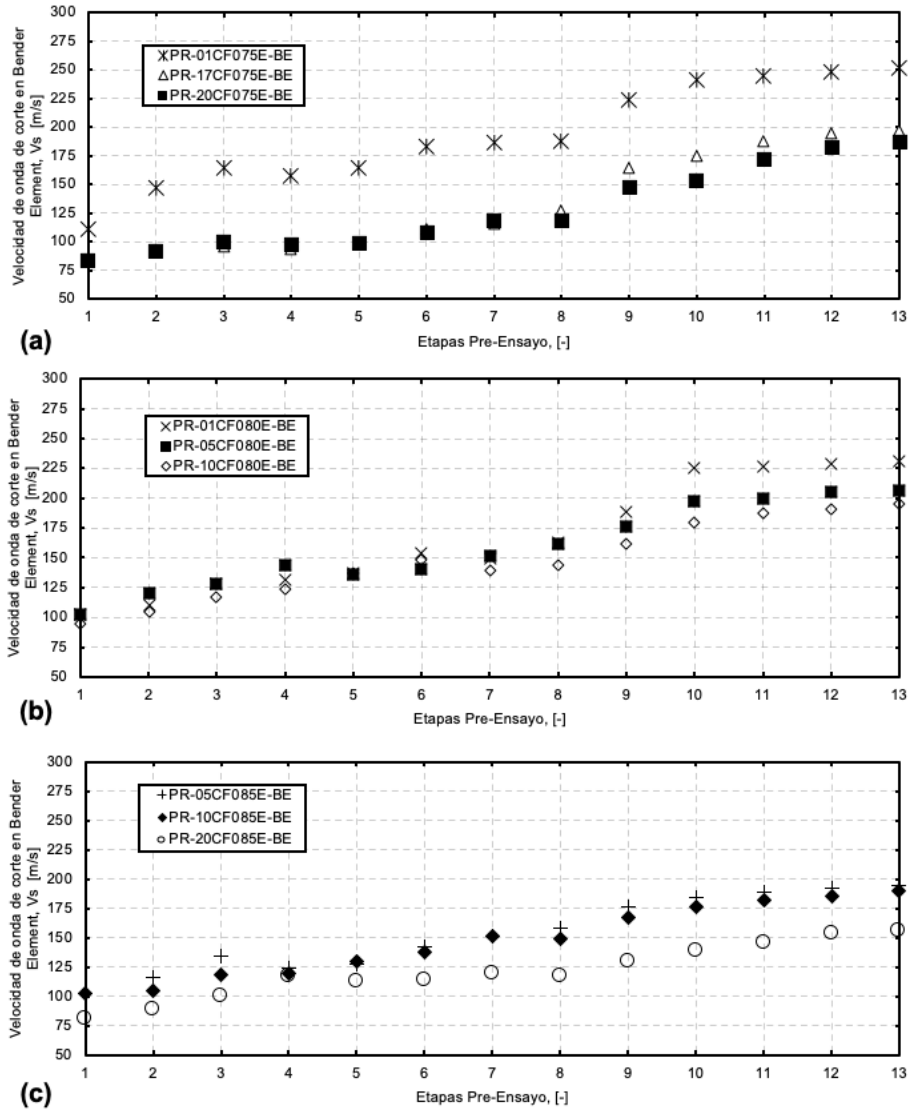


Figura 4-1: Resultados velocidad de onda de corte en pre-ensayos en bender element (a) $e_i = 0,75$, (b) $e_i = 0,80$, y (c) $e_i = 0,85$.

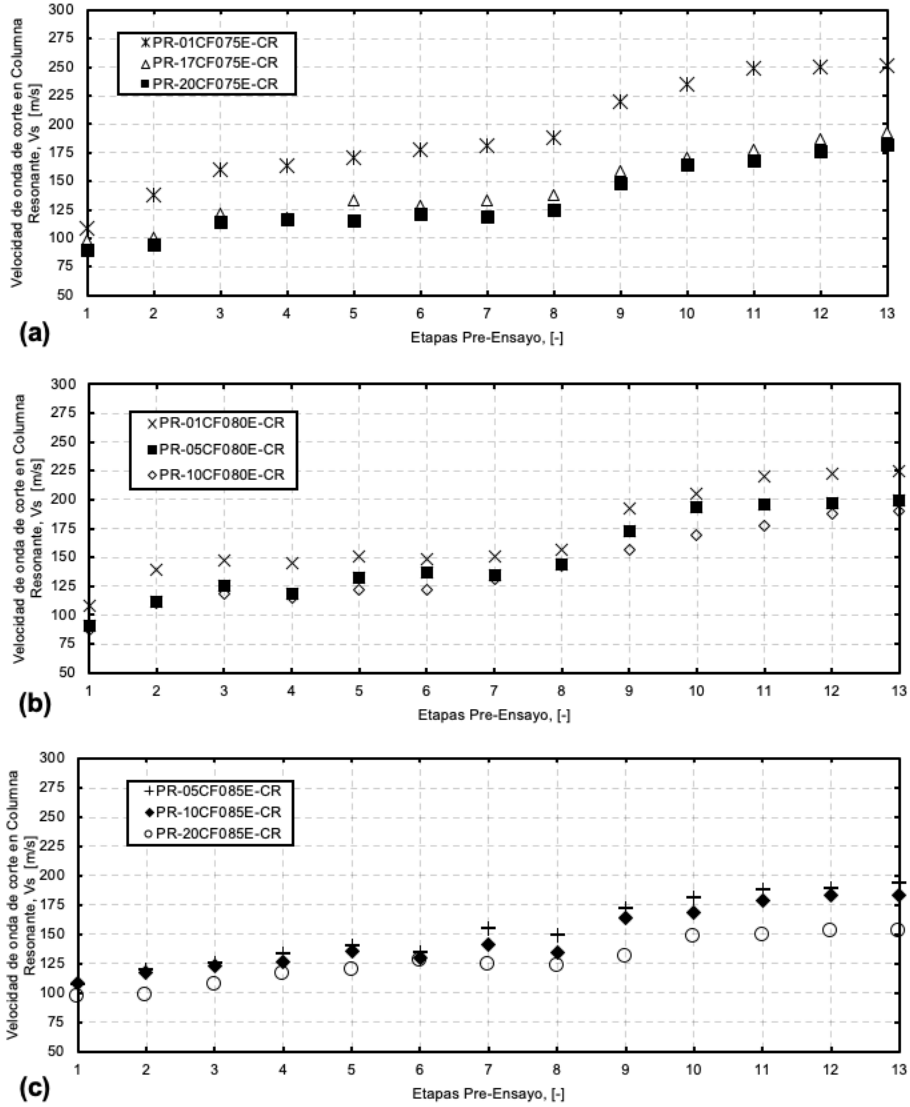


Figura 4-2: Resultados velocidad de onda de corte en pre-ensayos en columna resonante (a) $e_i = 0,75$, (b) $e_i = 0,80$, y (c) $e_i = 0,85$.

En la Figura 4-3 y Figura 4-4, se muestran los resultados para el módulo de corte máximo (G_0), obtenidos mediante el ensayo de bender element y columna resonante respectivamente.

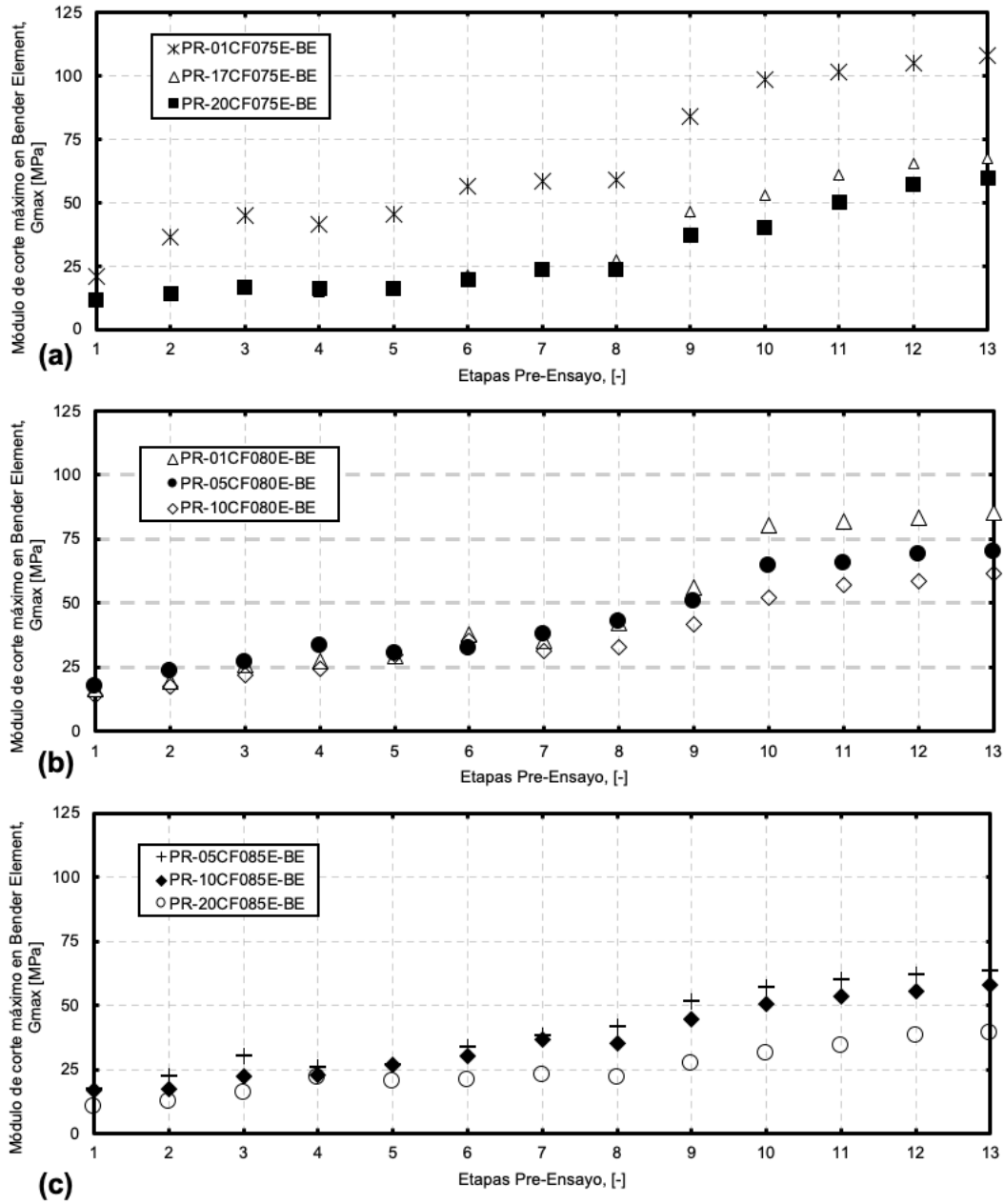


Figura 4-3: Resultados módulo de corte máximo en pre-ensayos en bender element (a) $e_i = 0,75$, (b) $e_i = 0,80$, y (c) $e_i = 0,85$.

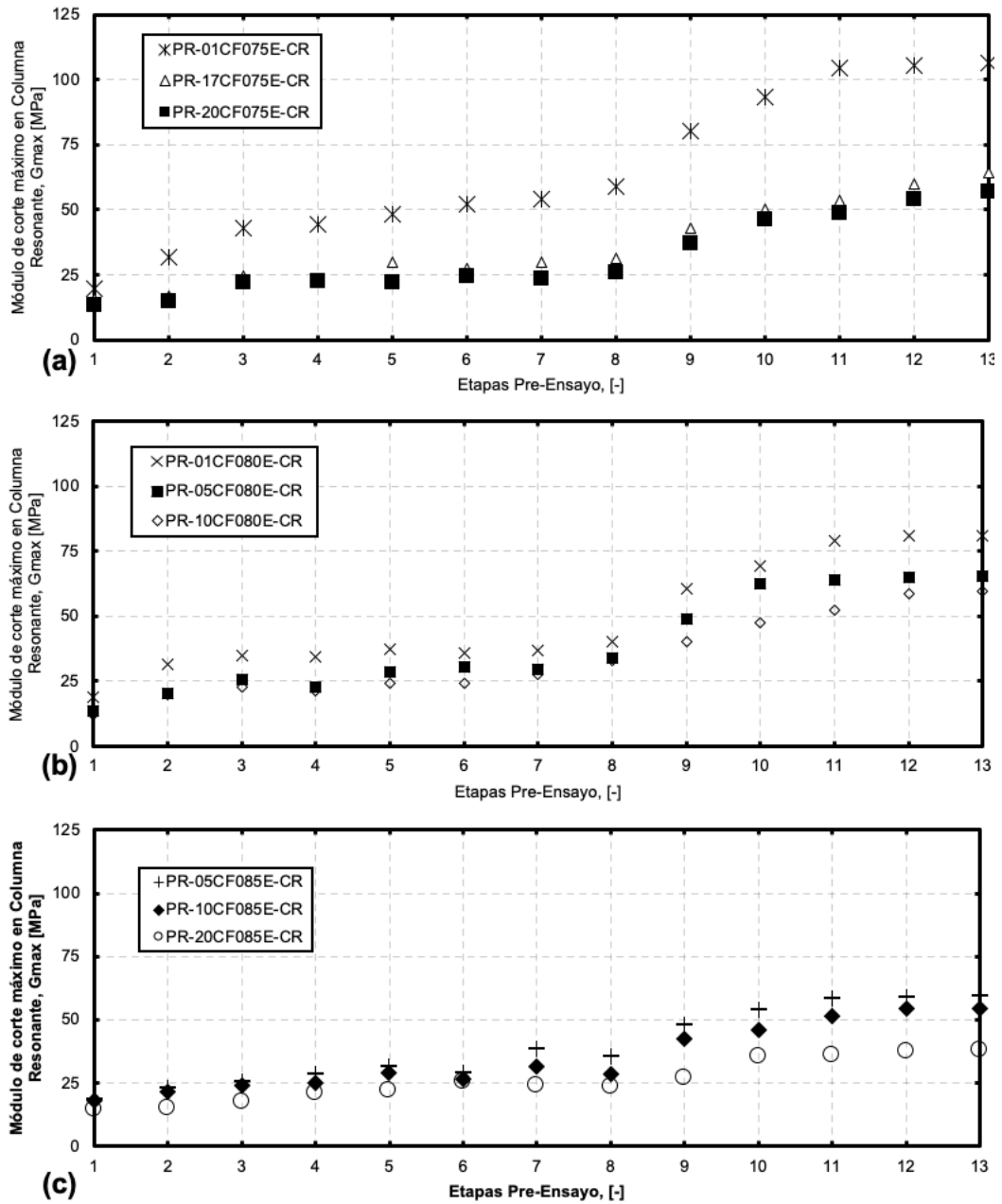


Figura 4-4: Resultados módulo de corte máximo en pre-ensayos en columna resonante (a) $e_i = 0,75$, (b) $e_i = 0,80$, y (c) $e_i = 0,85$.

Adicionalmente, se muestra el Damping (D) obtenido mediante columna resonante para la etapa de pre-ensayos en la Figura 4-5.

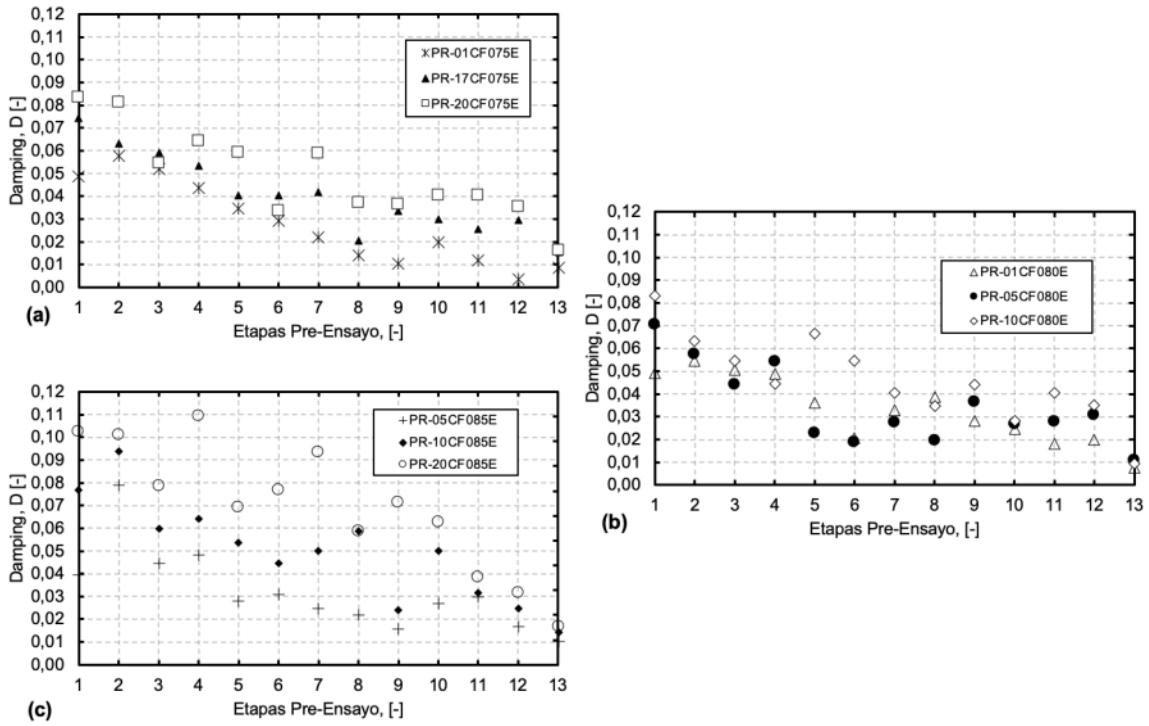


Figura 4-5: Resultados damping en pre-ensayos. (a) $e_i = 0,75$, (b) $e_i = 0,80$, y (c) $e_i = 0,85$.

4.1.1. Comparación Entre BE y CR

Anteriormente se muestran los resultados obtenidos para dos parámetros (V_s y G_o), mediante dos ensayos distintos. En la Figura 4-6 se muestra la comparación del parámetro velocidad de onda de corte y en Figura 4-7 la comparación del módulo de corte máximo.

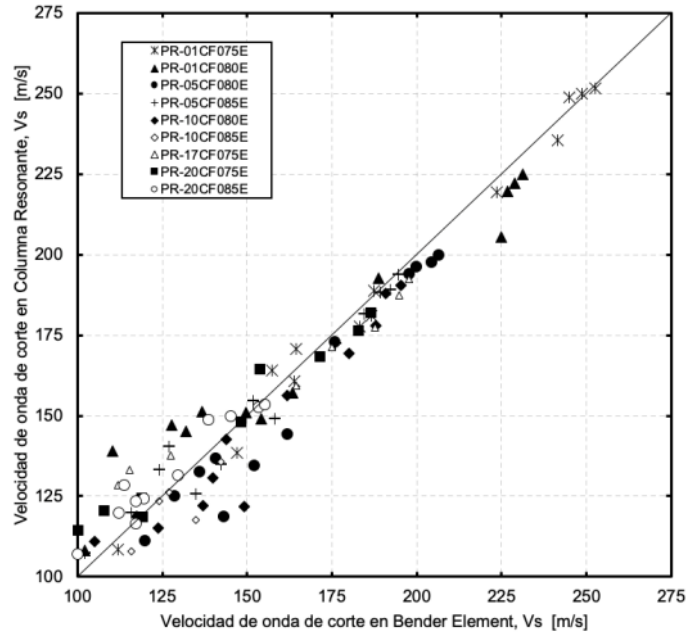


Figura 4-6: Comparación resultados velocidad de onda de corte en Columna Resonante y Bender Element para el Pre-Ensayo.

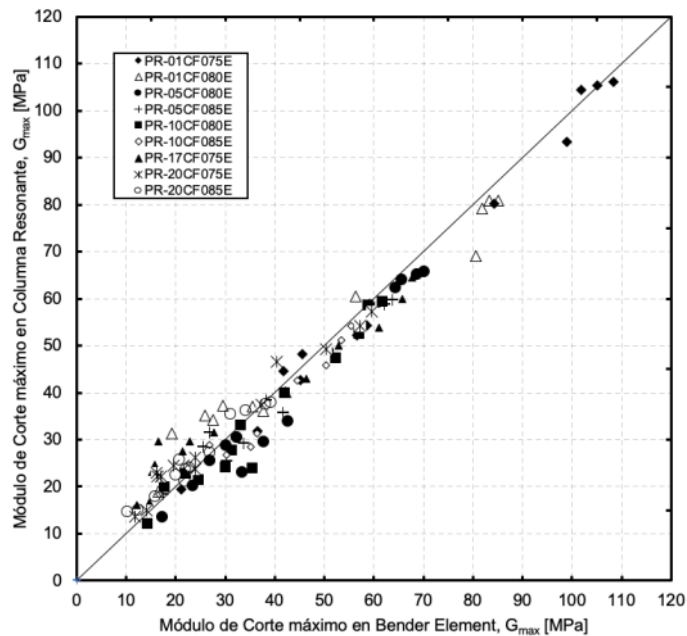


Figura 4-7: Comparación resultados módulo de corte máximo en Columna Resonante y Bender Element para el Pre-Ensayo.

4.2. Resultados para distintos estados de carga

Tanto para bender element como columna resonante se realizan mediciones de velocidad de onda de corte (V_s) y módulo de corte (G_o) para distintos estados de carga, que en carga van desde 1 kg/cm^2 a 5 kg/cm^2 , y en descarga desde 5 kg/cm^2 a 1 kg/cm^2 . Para columna resonante, se tiene la medición adicional del damping (D_o), el cual se mide para la carga.

4.2.1. Bender Element

Los resultados del ensayo Bender Element se dividen en el estado de carga y descarga, teniendo como resultado la velocidad de onda de corte y el módulo de corte máximo.

4.2.1.1. Carga

Los resultados obtenidos del ensayo bender element para la velocidad de onda de corte a medida que va aumentando el estado de carga se muestran en la Figura 4-8, mientras que su gráfico normalizado se muestra en la Figura 4-9. El módulo de corte máximo respecto al estado de carga se muestra en la Figura 4-10, mientras que en la Figura 4-11 se normalizan sus resultados.

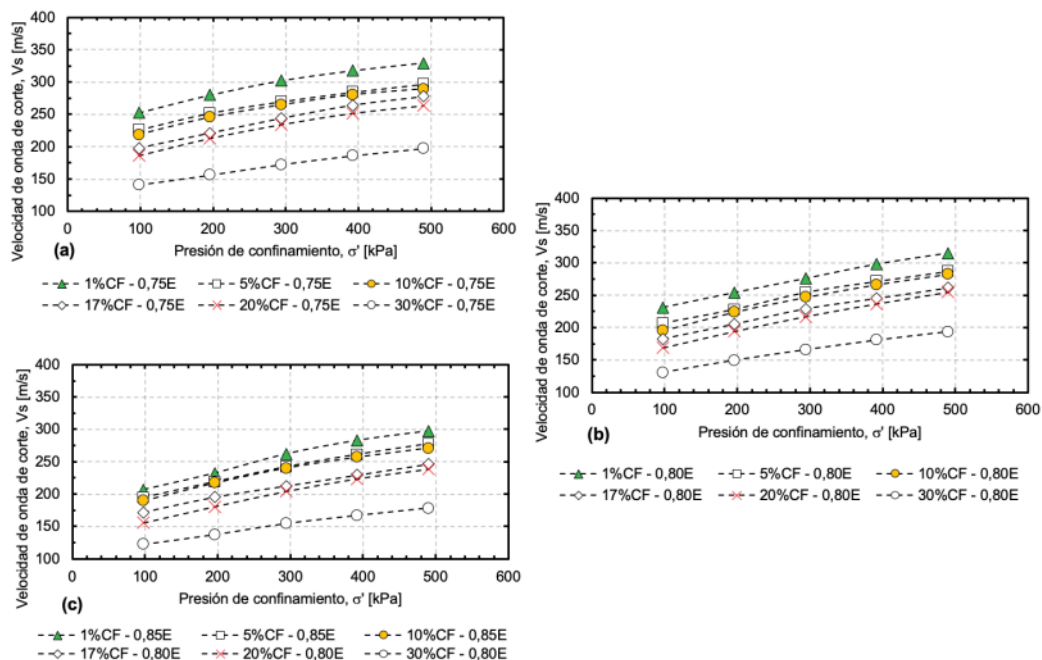


Figura 4-8: Resultados Ensayos Bender Element – Carga: Velocidad de Onda de Corte.

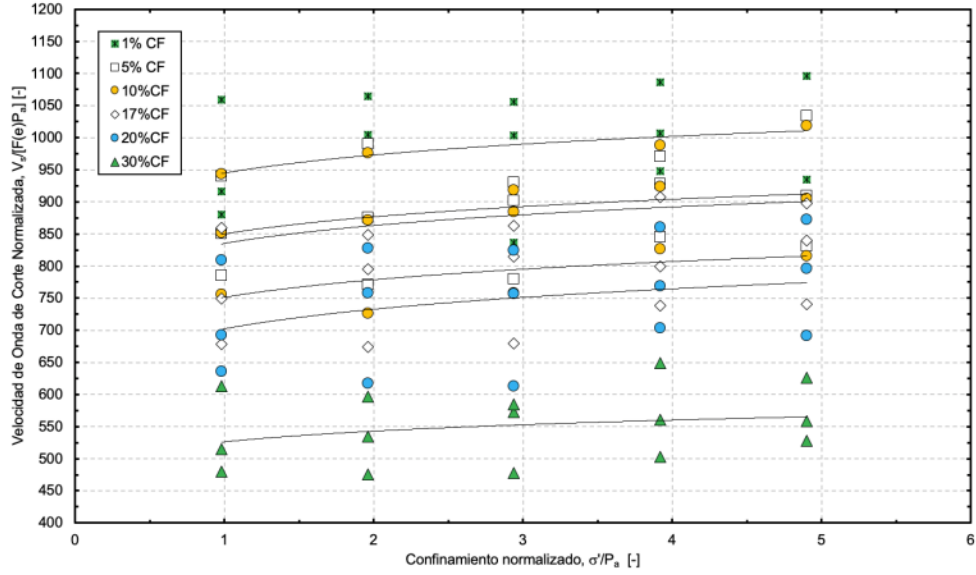


Figura 4-9: Resultados Ensayos Bender Element – Carga: Velocidad de Onda de Corte Normalizado versus el confinamiento normalizado.

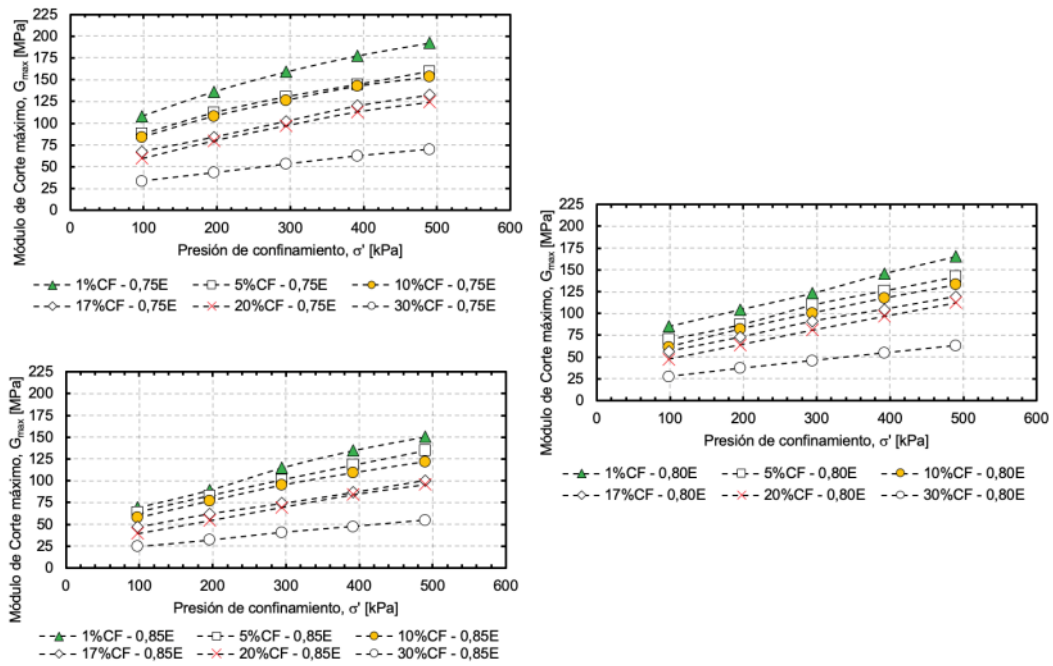


Figura 4-10: Resultados Ensayos Bender Element – Carga: Módulo de Corte Máximo.

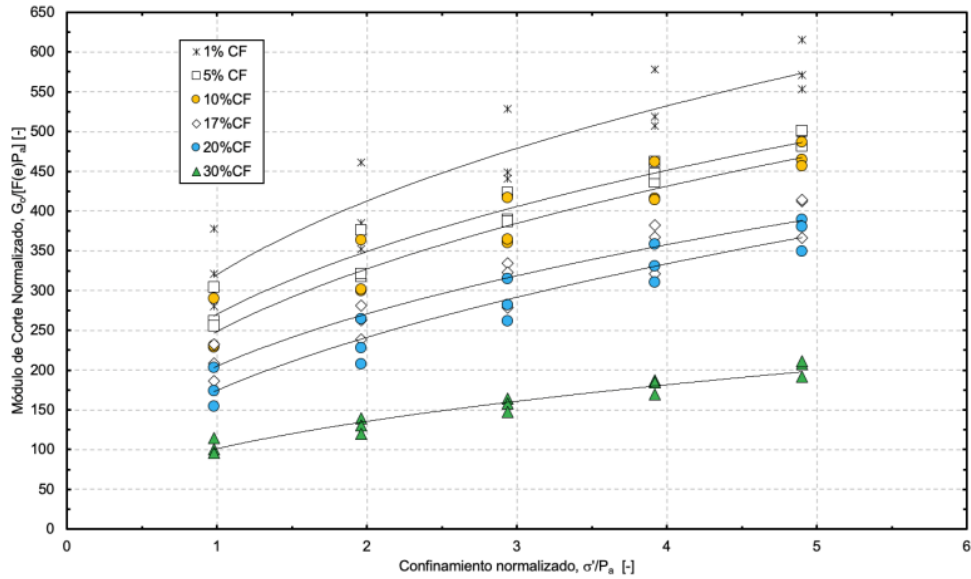


Figura 4-11: Resultados Ensayos Bender Element – Carga: Módulo de Corte Máximo Normalizado versus el confinamiento normalizado.

Para estudiar el efecto de los contenidos de finos no plásticos en la Figura 4-12 y Figura 4-13 se observa la variación de la velocidad de onda de corte normalizada y el módulo de corte máximo normalizado respectivamente, respecto al contenido de finos para distintos estados de carga.

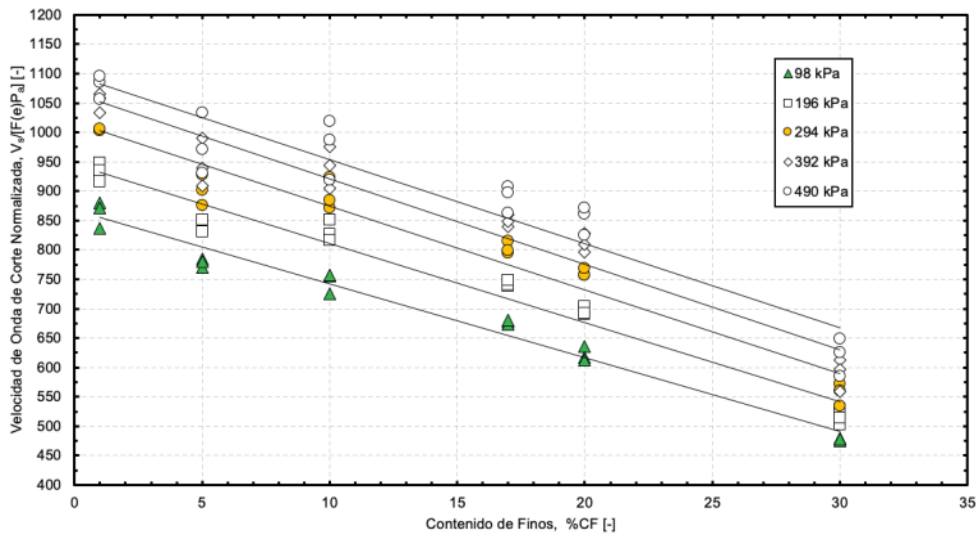


Figura 4-12: Velocidad de Onda de Corte Normalizado vs Contenido de finos.

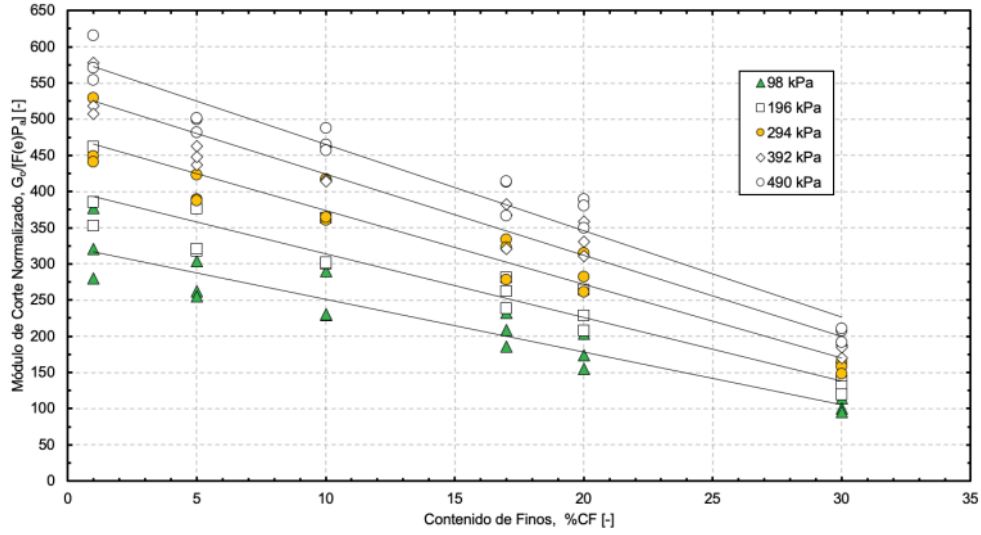


Figura 4-13: Módulo de Corte Máximo Normalizado vs Conteúdo de finos.

De los resultados obtenidos para Bender Element, se obtienen los parámetros característicos α y β (Figura 4-14), como también los parámetros C_g y n (Figura 4-15). De este último gráfico, se realiza una tendencia de cada parámetro respecto al contenido de finos (Figura 4-16).

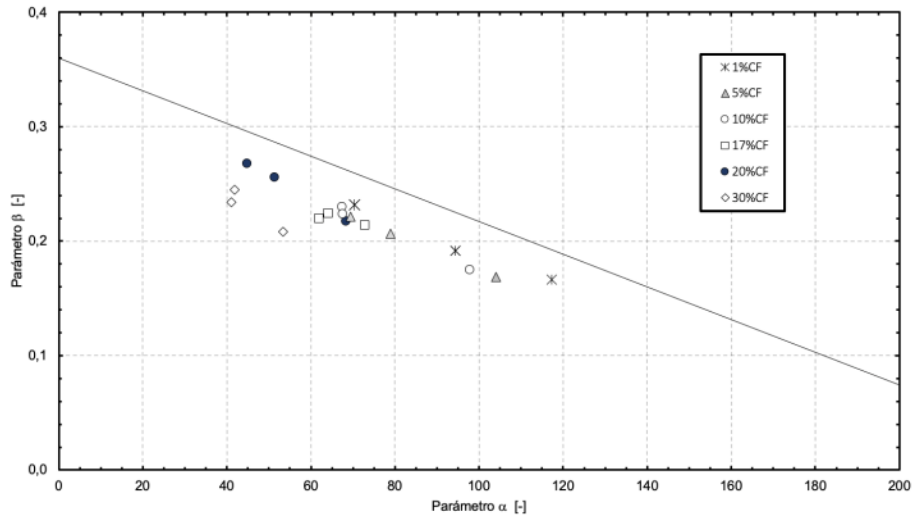


Figura 4-14: Alfa (α) vs Beta (β) en Bender Element.

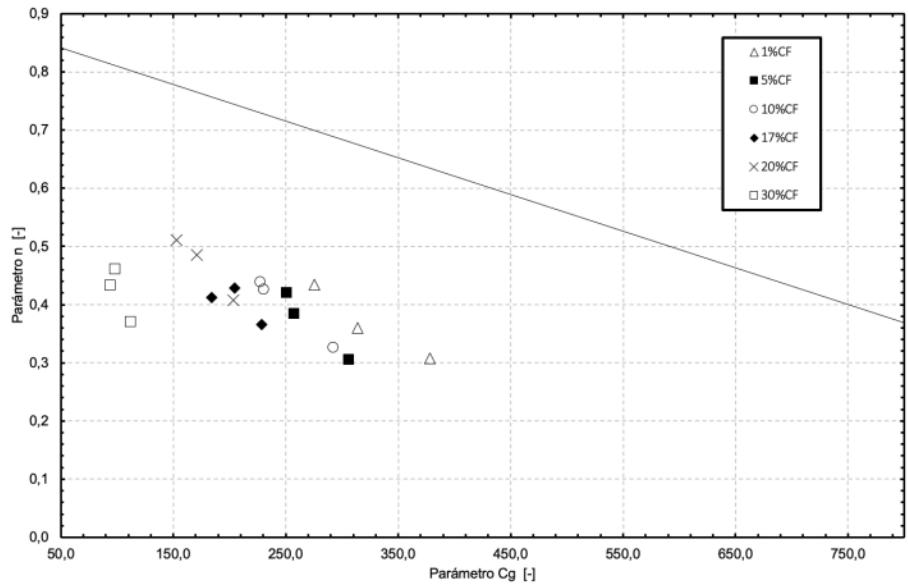


Figura 4-15: C_g (α) vs n (β) en Bender Element.

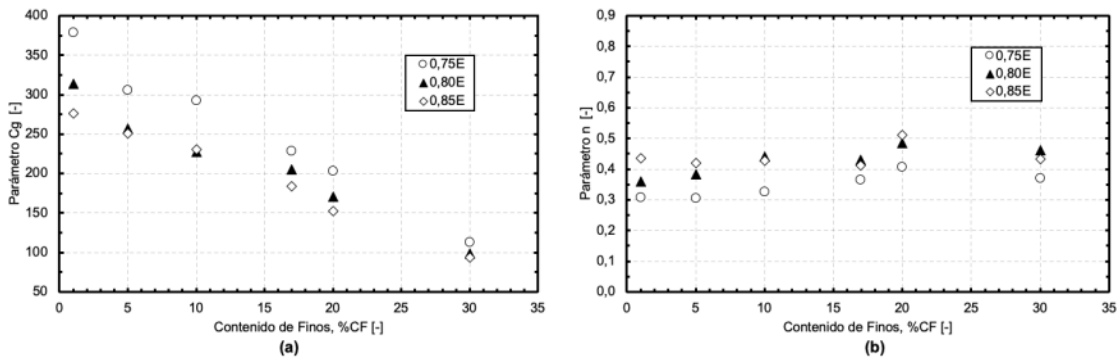


Figura 4-16: (a) C_g y (b) n vs Contenido de finos en Bender Element.

4.2.1.2. Descarga

Una vez llegado al estado de carga máximo ensayado (5 kg/cm^2), se realiza la descarga, obteniendo el módulo de corte y velocidad de onda de corte para los estados de carga de 4, 3, 2 y 1 kg/cm^2 . En la Figura 4-17 y Figura 4-18, se muestran los resultados de la velocidad de onda de corte y módulo de corte respectivamente.

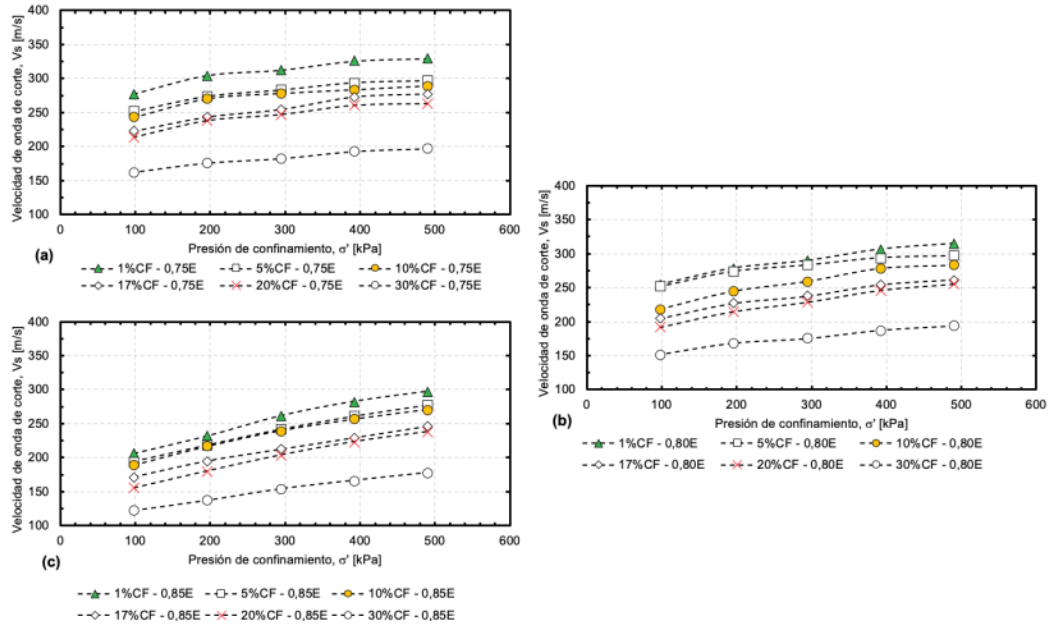


Figura 4-17: Velocidad de onda de corte vs Estado de Carga en Bender Element - Descarga.

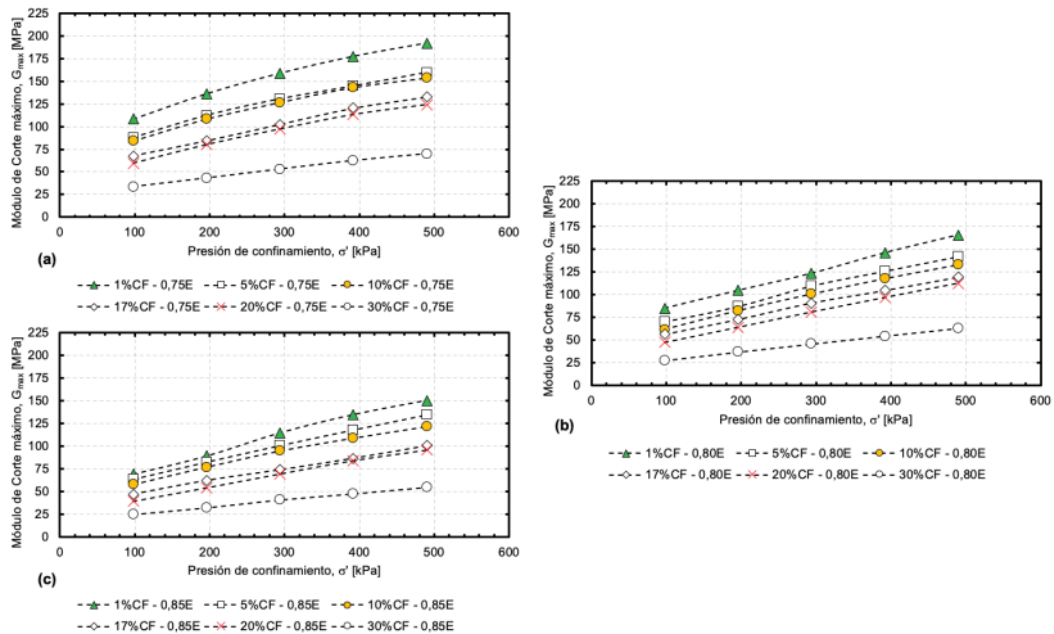


Figura 4-18: Módulo de Corte Máximo vs Estado de Carga en Bender Element - Descarga.

Al considerar la ecuación de Hardin and Richart (1963), se analiza la influencia del OCR, el cual en varía al descargar la probeta. En la Figura 4-19 muestra el gráfico de la siguiente expresión (a), como también la variabilidad del parámetro k respecto al contenido de finos (b).

$$\frac{G_o}{C_g \cdot F(e) \cdot P_a^{1-n} \cdot \sigma_o'^n} = OCR^k$$

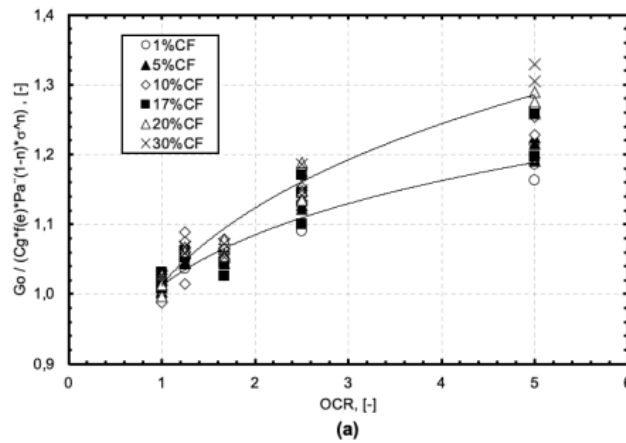


Figura 4-19: (a) Ecuación de Hardin vs OCR

4.2.2. Columna Resonante

Los resultados del ensayo columna resonante se dividen en el estado de carga y descarga, teniendo como resultado la velocidad de onda de corte, el módulo de corte máximo y el damping.

4.2.2.1. Carga

Los resultados obtenidos del ensayo columna resonante para la velocidad de onda de corte a medida que va aumentando el estado de carga se muestran en la Figura 4-20, mientras que su gráfico normalizado se muestra en la Figura 4-21. El módulo de corte máximo respecto al estado de carga se muestra en la Figura 4-22, mientras que en la Figura 4-23 se normalizan sus resultados.

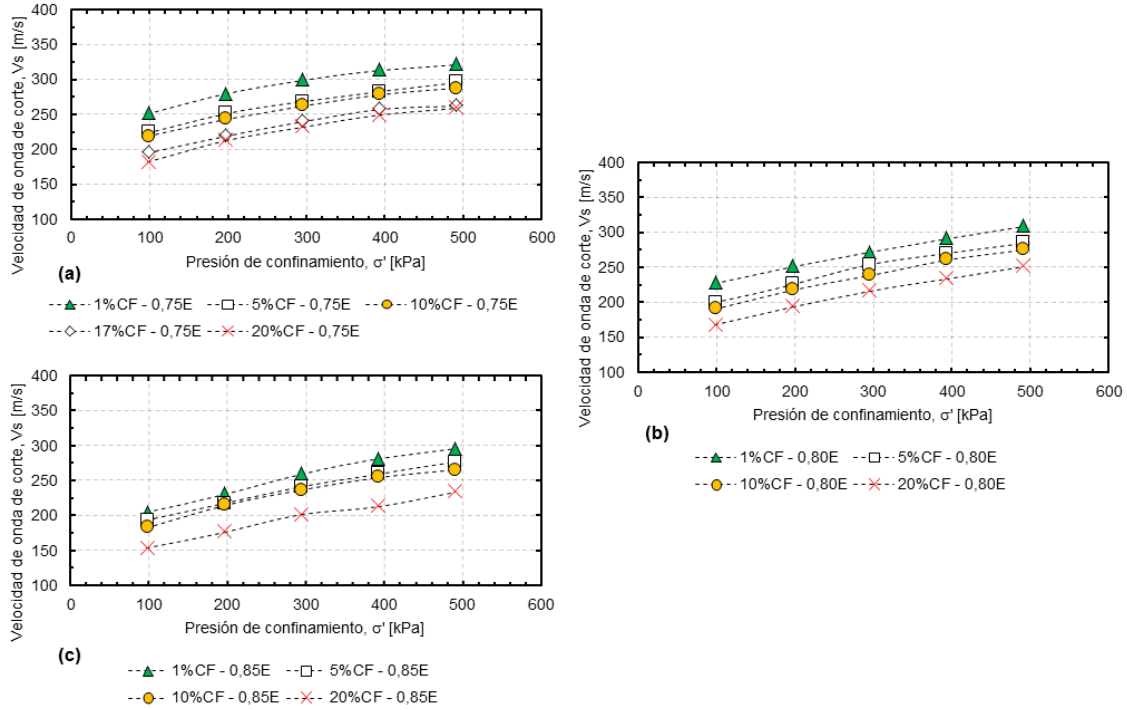


Figura 4-20: Resultados Ensayos Columna Resonante – Carga: Velocidad de Onda de Corte.

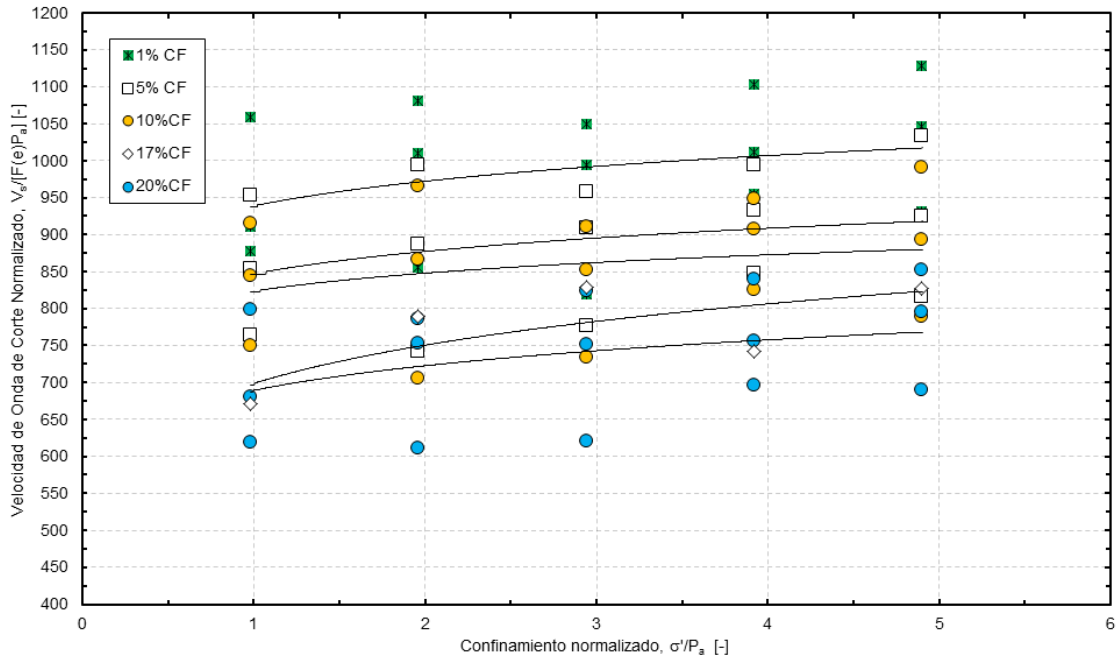


Figura 4-21: Resultados Ensayos Columna Resonante – Carga: Velocidad de Onda de Corte Normalizado versus el confinamiento normalizado.

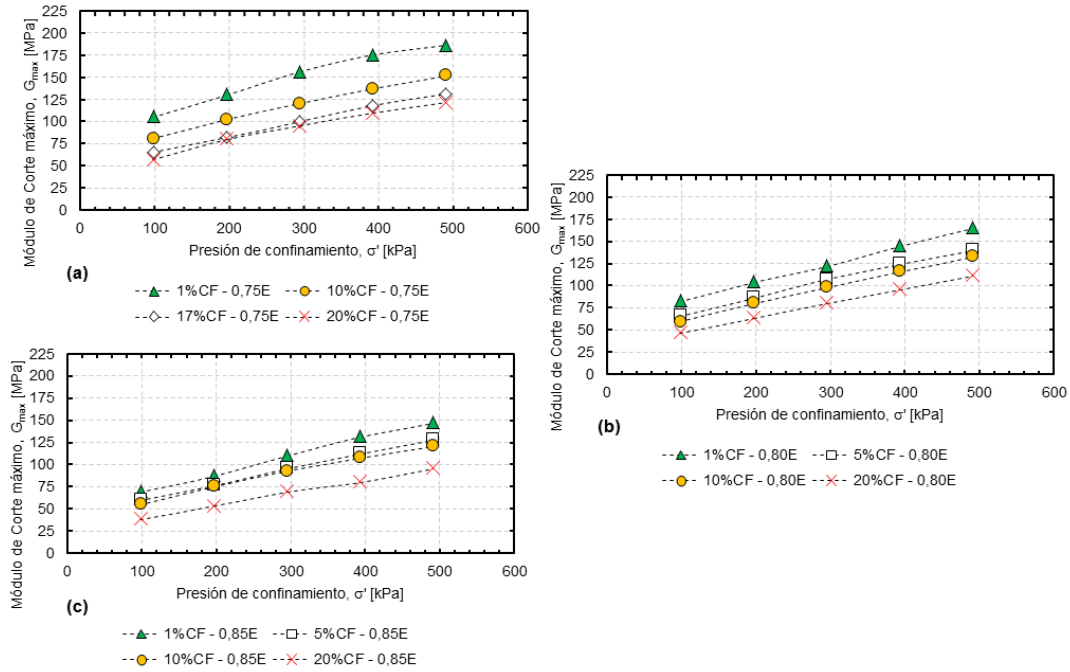


Figura 4-22: Resultados Ensayos Columna Resonante – Carga: Módulo de Corte Máximo.

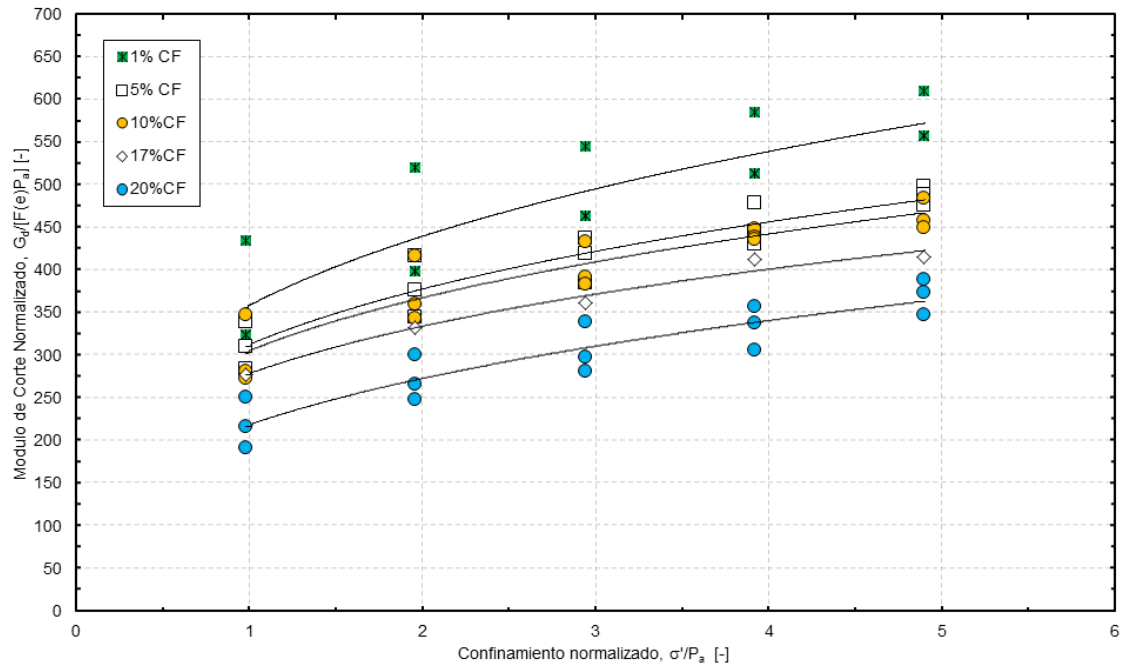


Figura 4-23: Resultados Ensayos Columna Resonante – Carga: Módulo de Corte Máximo Normalizado versus el confinamiento normalizado.

Para estudiar el efecto de los contenidos de finos no plásticos en la Figura 4-24 y Figura 4-25 se observa la variación de la velocidad de onda de corte normalizada y

el módulo de corte máximo normalizado respectivamente, respecto al contenido de finos para distintos estados de carga.

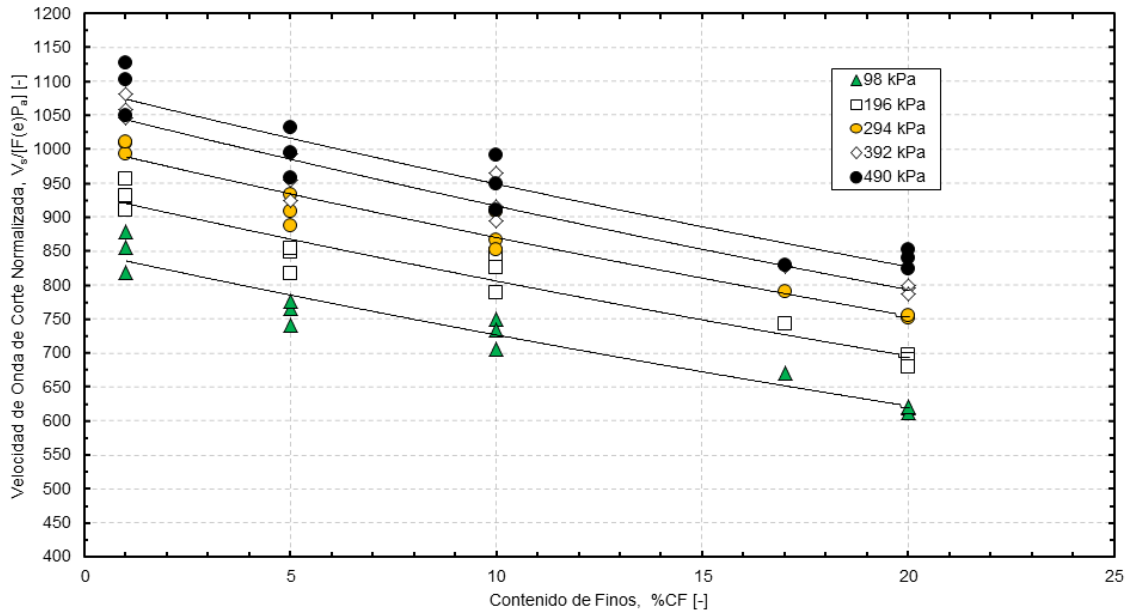


Figura 4-24: Velocidad de Onda de Corte vs Contenido de finos en Columna Resonante.

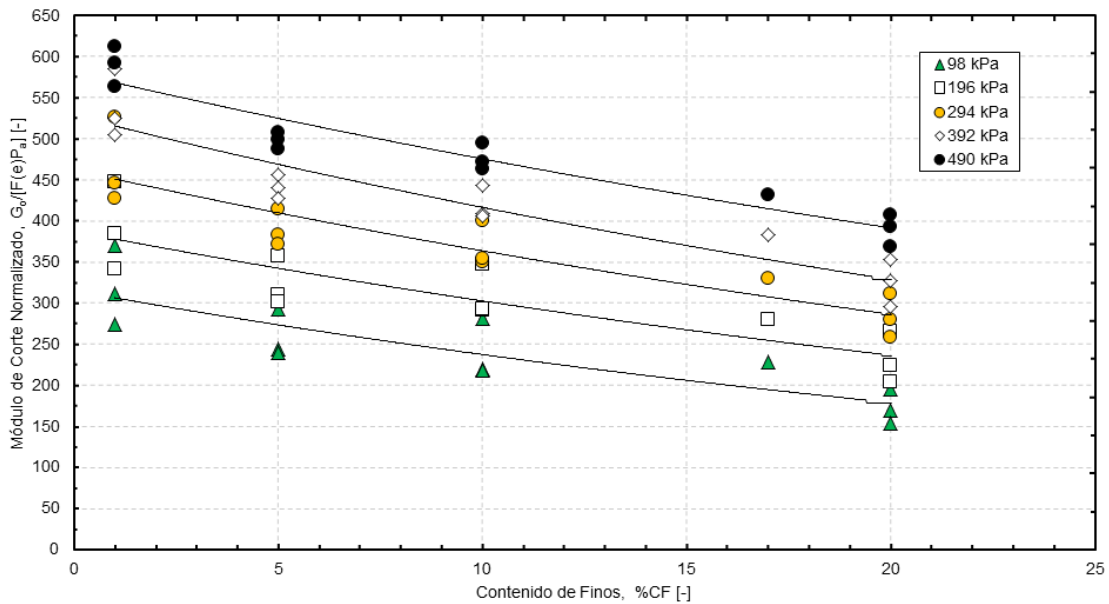


Figura 4-25: Módulo de Corte Máximo vs Contenido de finos en Columna Resonante.

De los resultados obtenidos para Bender Element, se obtienen los parámetros característicos α y β (Figura 4-26), como también los parámetros C_g y n (Figura 4-27). De este último gráfico, se realiza una tendencia de cada parámetro respecto al contenido de finos (Figura 4-28).

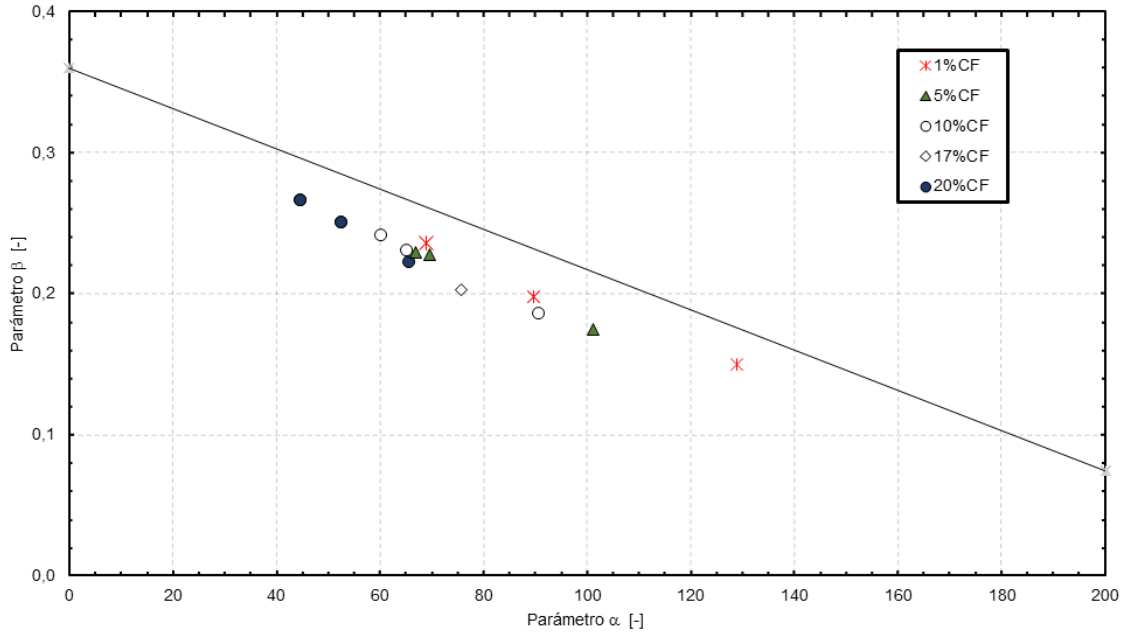


Figura 4-26: Alfa (α) vs Beta (β) en Columna Resonante.

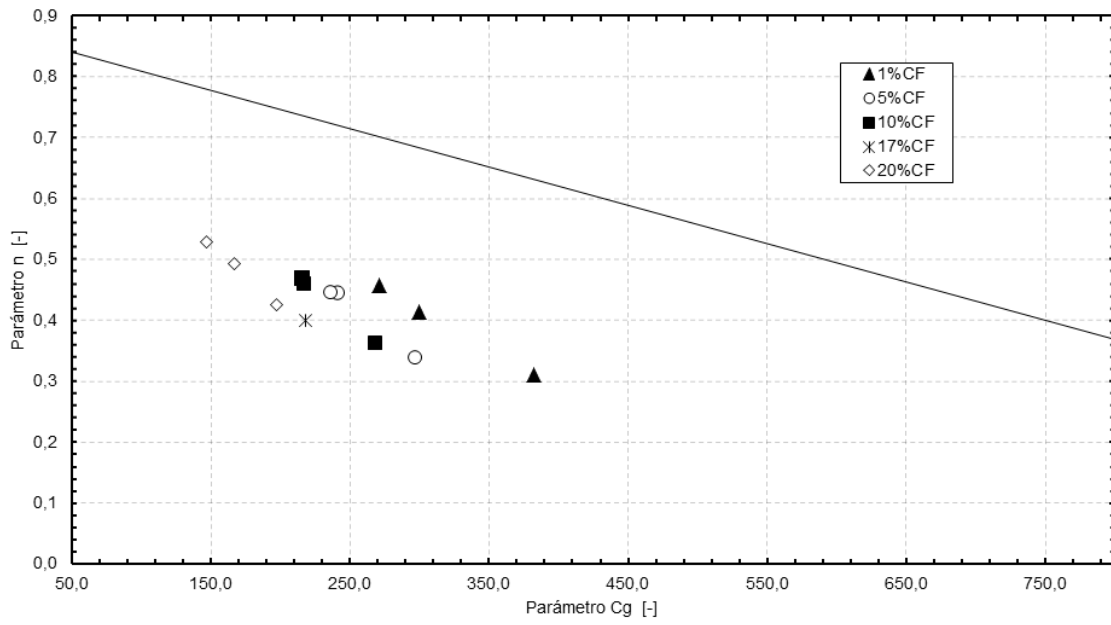


Figura 4-27: C_g (α) vs n (β) en Columna Resonante.

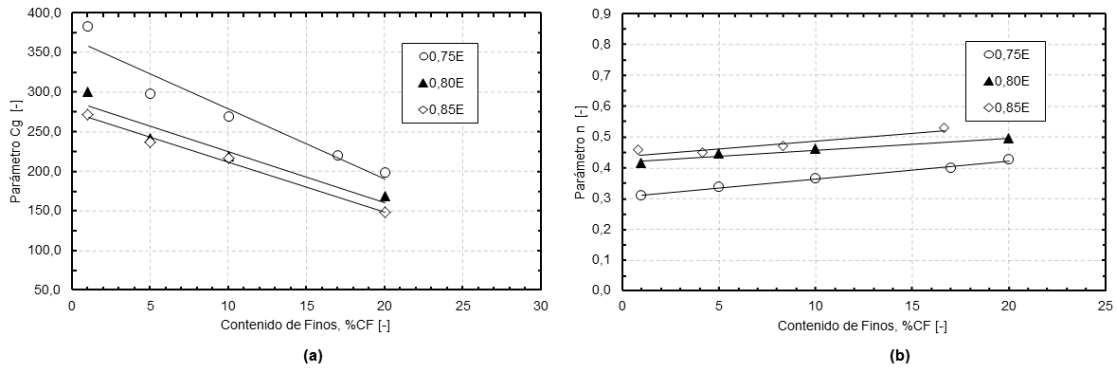


Figura 4-28: Cg (α) y n (β) vs Contenido de finos en Columna Resonante.

Los valores obtenidos para el damping en el estado de carga se muestran en la Figura 4-29 para distintos contenidos de finos. Autores como Laird (1994), Stokoe et al. (1995), Menq (2003), sugieren una relación para el damping asociado a pequeñas deformaciones ($\gamma \leq 10^{-6}\%$) definida por:

$$D_{min} = A_D \cdot \left(\frac{\sigma'}{P_a}\right)^{n_D}$$

De esta forma, al extraer la potencial de los resultados de damping, se puede extraer directamente los parámetros A_D y n_D , donde se observa una variación con el contenido de finos (Figura 4-30).

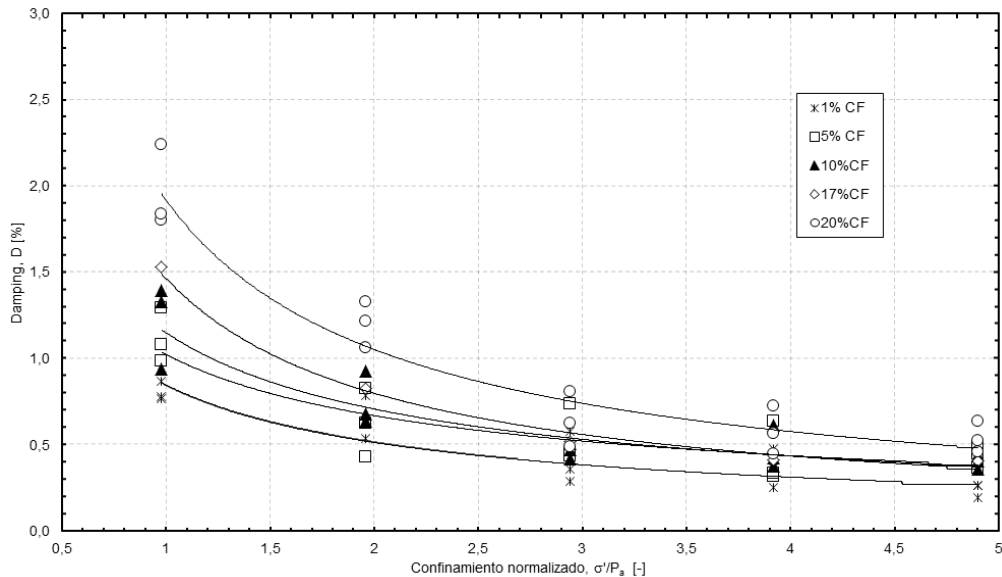


Figura 4-29: Damping vs Confinamiento normalizado en Columna Resonante.

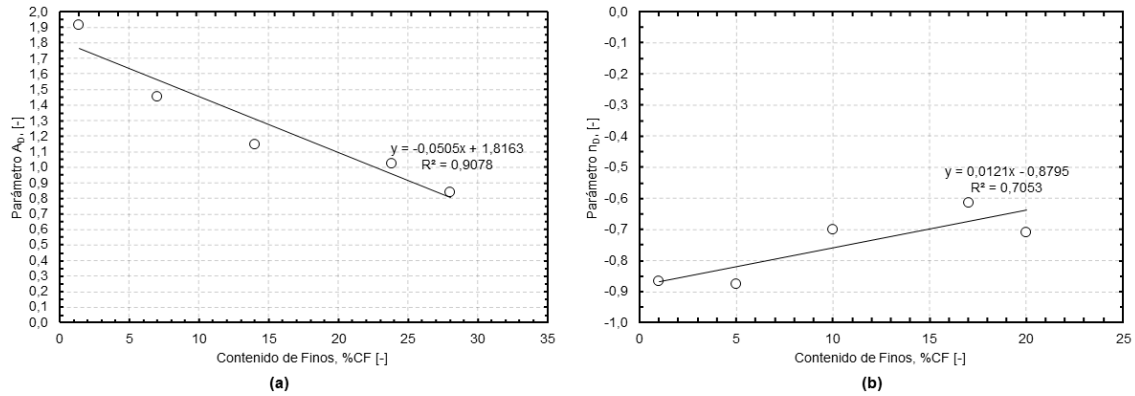


Figura 4-30: A_D y n_D vs Contenido de Finos en Columna Resonante.

4.2.2.2. Descarga

Una vez llegado al estado de carga máximo ensayado (5 kg/cm^2), se realiza la descarga, obteniendo el módulo de corte y velocidad de onda de corte para los estados de carga de 4, 3, 2 y 1 kg/cm^2 . En la Figura 4-31 y Figura 4-32, se muestran los resultados de la velocidad de onda de corte y módulo de corte respectivamente.

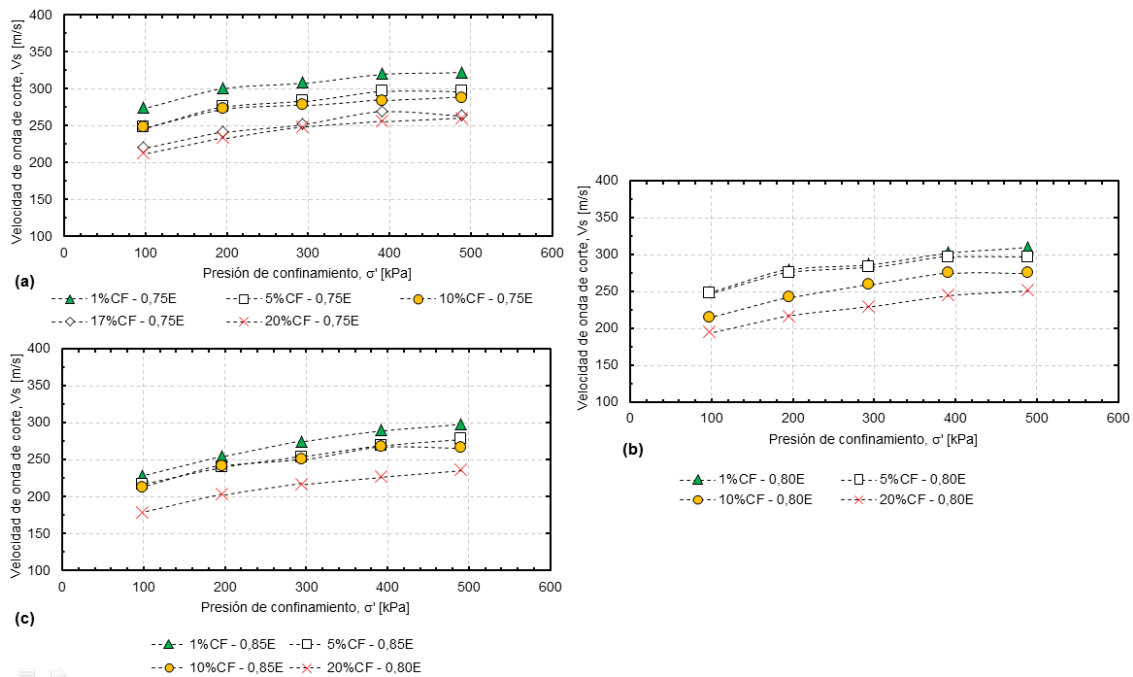


Figura 4-31: Velocidad de onda de corte vs Estado de Carga en Columna Resonante - Descarga.

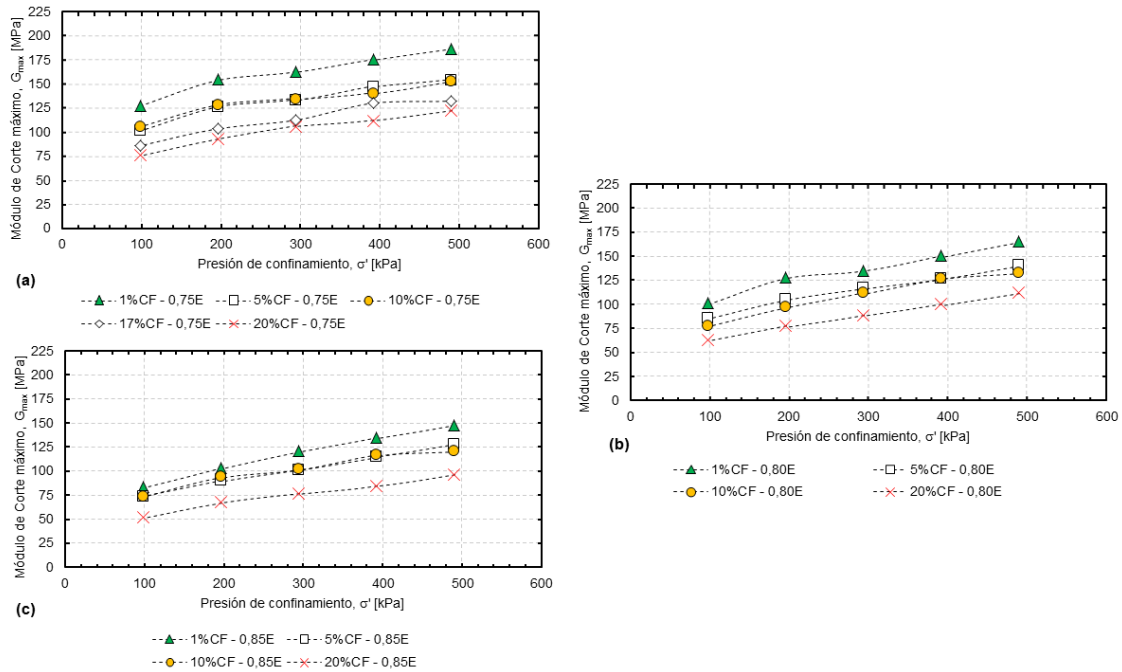


Figura 4-32: Módulo de Corte Máximo vs Estado de Carga en Columna Resonante - Descarga.

Al igual como se mostró en el acápite 4.2.1.2, se analiza la influencia del OCR de los datos obtenidos por columna resonante. En la Figura 4-33 muestra el gráfico de la potencial obtenida de la ecuación de Hardin and Richart (1963), como también la variabilidad del parámetro k respecto al contenido de finos.

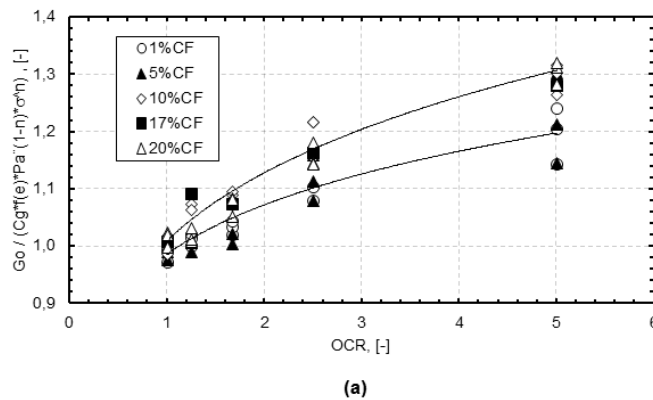


Figura 4-33: (a) Ecuación de Hardin vs OCR, y (b) k vs Contenido de finos en Columna Resonante.

4.3. Comparación entre BE y CR

A continuación, se comparan los valores obtenidos de los parámetros de velocidad de onda de corte y módulo de corte que se obtienen de los ensayos de bender element y columna resonante. En la Figura 4-34 se muestra la comparación de V_s y en la Figura 4-35 la comparación del módulo de corte.

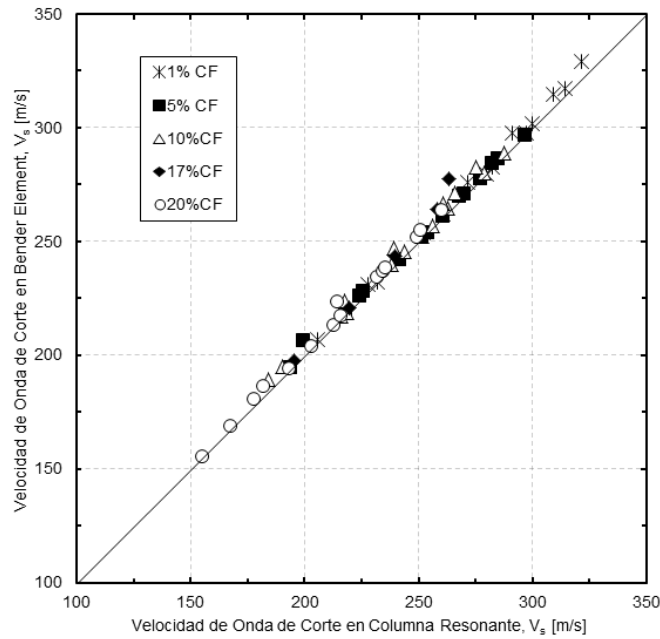


Figura 4-34: Comparación resultados de Velocidad de onda de corte en BE y CR.

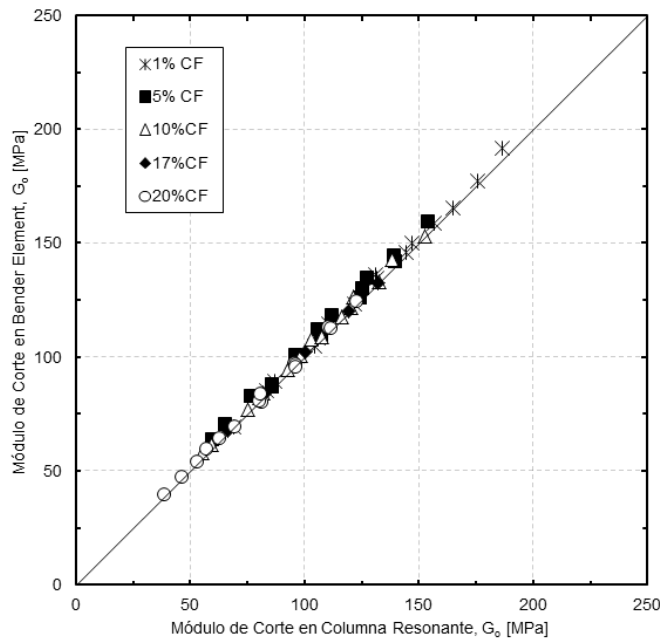


Figura 4-35: Comparación resultados de Módulo de Corte en BE y CR.

Adicionalmente, en la Figura 4-36 se comparan los parámetros de estudio alfa y beta, mientras que en la Figura 4-37 se comparan los parámetros C_g y n .

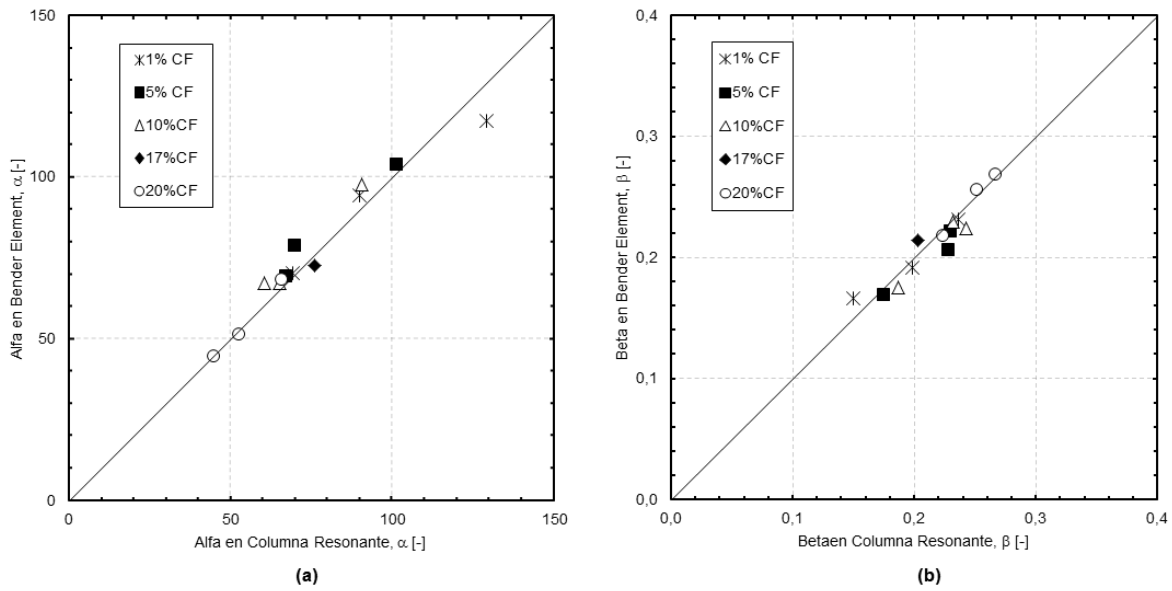


Figura 4-36: Comparación resultados de parámetros (a) alfa y (b) beta en BE y CR.

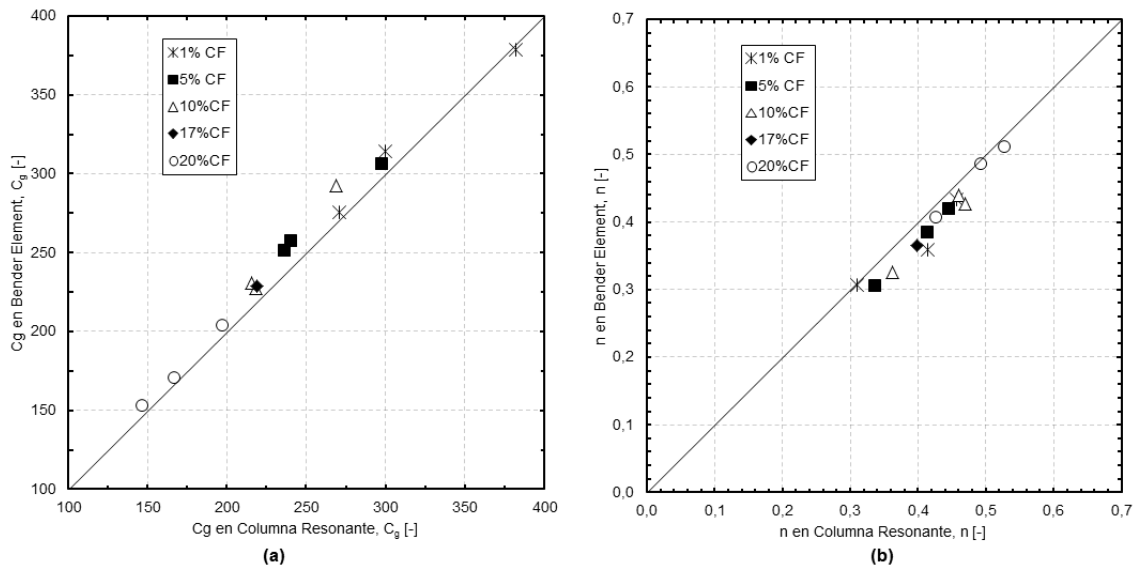


Figura 4-37: Comparación resultados de Parámetros C_g y n en BE y CR.

4.4. Discusión

A continuación, se presenta una tabla de resumen con los parámetros obtenidos mediante bender element, en la Tabla 4-1, Tabla 4-2 y Tabla 4-3 se muestran los resultados obtenidos con bender element para una confección de índice de vacío inicial de 0,75, 0,80 y 0,85 respectivamente.

Tabla 4-1: Resumen parámetros obtenidos por bender element para índice de vacío inicial de confección 0,75.

%CF	σ' [kPa]	Vs [m/s]	G [MPa]	σ'/P_a	G/(f(e)*P _a)	α	β	Cg	n
1	98	252,6	108,3	0,98	377,4	117,33	0,166	378,43	0,3073
	196	279,9	136,2	1,96	461,3				
	294	301,9	158,8	2,94	528,7				
	392	317,3	177,3	3,92	578,0				
	490	329,3	192,0	4,9	615,7				
5	98	226,0	87,6	0,98	304,3	103,97	0,169	305,85	0,3052
	196	251,9	112,1	1,96	376,1				
	294	269,7	130,3	2,94	423,1				
	392	284,2	144,5	3,92	462,4				
	490	296,8	159,4	4,9	499,7				
10	98	219,0	84,1	0,98	228,9	97,78	0,175	292,56	0,3264
	196	245,6	108,2	1,96	299,7				
	294	264,6	126,4	2,94	360,4				
	392	280,1	142,8	3,92	416,1				
	490	289,2	153,3	4,9	464,3				
17	98	197,6	67,6	0,98	232,1	72,94	0,214	228,37	0,3653
	196	220,8	84,1	1,96	281,2				
	294	243,7	102,4	2,94	334,1				
	392	264,0	120,3	3,92	382,4				
	490	277,5	132,7	4,9	412,7				
20	98	186,4	59,7	0,98	203,4	68,34	0,217	203,58	0,4073
	196	213,0	80,1	1,96	264,4				
	294	234,3	97,3	2,94	314,6				
	392	251,7	113,3	3,92	358,6				
	490	263,5	124,2	4,9	388,9				
30	98	141,2	33,7	0,98	114,4	53,35	0,208	112,32	0,3707
	196	156,2	43,2	1,96	139,0				
	294	172,4	53,0	2,94	164,4				
	392	185,9	62,4	3,92	187,4				
	490	197,0	69,9	4,9	207,3				

Tabla 4-2: Resumen parámetros obtenidos por bender element para índice de vacío inicial de confección 0,80.

%CF	σ' [kPa]	Vs [m/s]	G [MPa]	σ'/P_a	G/(f(e)*P _a)	α	β	Cg	n
1	98	231,3	85,1	0,98	320,8	94,35	0,192	313,84	0,359
	196	254,1	104,6	1,96	385,1				
	294	275,8	123,4	2,94	448,7				
	392	298,0	146,0	3,92	518,6				
	490	315,0	165,5	4,9	570,8				
5	98	206,6	70,2	0,98	262,1	78,88	0,206	257,24	0,384
	196	227,9	87,1	1,96	317,6				
	294	254,2	109,7	2,94	389,5				
	392	271,2	126,0	3,92	436,7				
	490	286,6	142,0	4,9	481,2				
10	98	195,3	61,6	0,98	228,9	67,45	0,230	227,47	0,440
	196	223,9	82,3	1,96	299,7				
	294	247,0	100,6	2,94	360,4				
	392	266,6	117,6	3,92	416,1				
	490	282,7	132,9	4,9	464,3				
17	98	182,3	56,3	0,98	208,1	64,15	0,225	204,67	0,429
	196	205,1	72,6	1,96	262,4				
	294	229,0	90,8	2,94	323,0				
	392	245,2	104,7	3,92	367,0				
	490	261,5	119,4	4,9	414,3				
20	98	168,6	47,4	0,98	173,5	51,39	0,256	170,64	0,485
	196	193,9	64,1	1,96	228,4				
	294	217,0	80,8	2,94	281,9				
	392	236,6	96,8	3,92	331,1				
	490	254,8	112,5	4,9	380,1				
30	98	130,5	27,4	0,98	99,9	41,83	0,245	98,373	0,461
	196	149,4	36,8	1,96	130,2				
	294	165,8	45,7	2,94	157,7				
	392	180,7	54,5	3,92	184,8				
	490	193,9	63,0	4,9	210,9				

Tabla 4-3: Resumen parámetros obtenidos por bender element para índice de vacío inicial de confección 0,85.

%CF	σ' [kPa]	Vs [m/s]	G [MPa]	σ'/P_a	G/(f(e)*P _a)	α	β	Cg	n
1	98	206,8	69,3	0,98	280,3	70,36	0,232	275,77	0,434
	196	232,3	89,2	1,96	352,1				
	294	261,9	114,7	2,94	440,8				
	392	282,9	134,7	3,92	506,8				
	490	297,5	150,2	4,9	553,7				
5	98	194,6	63,7	0,98	255,3	69,51	0,221	250,84	0,420
	196	218,8	82,6	1,96	321,1				
	294	242,0	100,8	2,94	386,8				
	392	261,2	118,0	3,92	447,3				
	490	277,5	134,6	4,9	501,2				
10	98	189,6	57,8	0,98	230,9	67,51	0,224	230,51	0,427
	196	217,2	77,0	1,96	301,7				
	294	240,2	94,8	2,94	364,8				
	392	257,1	109,0	3,92	413,7				
	490	271,2	121,7	4,9	457,0				
17	98	171,8	47,0	0,98	186,2	61,97	0,220	184,04	0,412
	196	195,2	62,2	1,96	238,8				
	294	212,4	74,0	2,94	278,3				
	392	229,3	86,6	3,92	320,7				
	490	246,3	100,4	4,9	366,3				
20	98	155,6	39,3	0,98	154,8	44,87	0,268	152,72	0,511
	196	180,6	54,1	1,96	207,6				
	294	204,1	69,3	2,94	261,2				
	392	223,7	83,9	3,92	310,7				
	490	238,5	95,6	4,9	349,5				
30	98	122,6	24,6	0,98	95,9	41,14	0,234	93,809	0,433
	196	137,5	32,0	1,96	119,7				
	294	154,4	40,7	2,94	147,7				
	392	166,8	47,5	3,92	169,8				
	490	178,2	54,6	4,9	191,9				

Los parámetros obtenidos mediante columna resonante se muestran en la Tabla 4-4, Tabla 4-5 y Tabla 4-6 para una confección de índice de vacío inicial de 0,75, 0,80 y 0,85 respectivamente.

Tabla 4-4: Resumen parámetros obtenidos por columna resonante para índice de vacío inicial de confección 0,75.

%CF	σ' [kPa]	Vs [m/s]	G [MPa]	σ'/P_a	G/(f(e)*P _a)	α	β	Cg	n
1	98	251,6	106,1	0,98	370,7	128,87	0,150	382,32	0,310
	196	279,7	131,3	1,96	448,6				
	294	300,0	156,7	2,94	527,4				
	392	314,2	175,7	3,92	585,6				
	490	321,5	186,5	4,9	609,4				
5	98	224,2	85,8	0,98	292,8	101,09	0,175	297,57	0,337
	196	251,8	106,2	1,96	357,8				
	294	268,2	125,7	2,94	415,6				
	392	282,6	139,5	3,92	456,6				
	490	296,6	154,0	4,9	497,6				
10	98	218,8	82,1	0,98	281,7	90,52	0,187	268,56	0,363
	196	244,1	102,8	1,96	347,9				
	294	262,9	121,5	2,94	400,4				
	392	278,8	138,4	3,92	443,9				
	490	287,6	152,8	4,9	483,8				
17	98	195,5	66,5	0,98	228,1	75,68	0,203	218,66	0,399
	196	219,4	82,7	1,96	279,9				
	294	239,9	100,4	2,94	330,5				
	392	258,0	119,3	3,92	382,8				
	490	263,3	132,0	4,9	415,7				
20	98	182,1	57,3	0,98	195,1	65,56	0,223	197,48	0,427
	196	212,9	81,1	1,96	265,6				
	294	232,3	95,8	2,94	311,1				
	392	249,3	110,7	3,92	353,7				
	490	260,1	122,7	4,9	388,8				

Tabla 4-5: Resumen parámetros obtenidos por columna resonante para índice de vacío inicial de confección 0,80.

%CF	σ' [kPa]	Vs [m/s]	G [MPa]	σ'/P_a	G/(f(e)*P _a)	α	β	Cg	n
1	98	228,0	83,2	0,98	312,1	89,79	0,198	299,79	0,414
	196	252,2	104,2	1,96	385,4				
	294	271,7	121,9	2,94	446,2				
	392	291,3	144,6	3,92	525,6				
	490	309,1	164,9	4,9	588,2				
5	98	199,6	65,6	0,98	243,7	69,61	0,228	240,59	0,445
	196	226,0	85,9	1,96	310,4				
	294	253,9	107,3	2,94	384,1				
	392	270,2	124,6	3,92	440,1				
	490	285,1	140,0	4,9	488,6				
10	98	190,6	59,4	0,98	219,9	65,16	0,231	218,05	0,459
	196	217,8	80,4	1,96	291,4				
	294	239,4	98,4	2,94	350,2				
	392	260,9	116,4	3,92	408,6				
	490	275,2	132,9	4,9	458,5				
20	98	167,7	46,4	0,98	169,3	52,44	0,251	166,93	0,493
	196	193,6	63,1	1,96	224,9				
	294	216,3	80,4	2,94	279,6				
	392	234,5	96,2	3,92	327,7				
	490	251,1	111,8	4,9	374,2				

Tabla 4-6: Resumen parámetros obtenidos por columna resonante element para índice de vacío inicial de confección 0,85.

%CF	σ' [kPa]	Vs [m/s]	G [MPa]	σ'/P_a	G/(f(e)*P _a)	α	β	Cg	n
1	98	205,9	69,1	0,98	275,0	69,03	0,236	271,16	0,457
	196	232,2	87,0	1,96	341,5				
	294	260,7	110,4	2,94	428,2				
	392	282,3	131,9	3,92	505,2				
	490	297,3	147,0	4,9	558,0				
5	98	194,2	59,9	0,98	239,4	67,00	0,229	236,43	0,446
	196	218,1	76,9	1,96	301,5				
	294	241,9	96,3	2,94	371,6				
	392	261,0	112,4	3,92	428,2				
	490	277,5	127,7	4,9	475,6				
10	98	184,4	55,0	0,98	219,1	60,26	0,242	215,76	0,470
	196	216,3	75,1	1,96	293,2				
	294	238,1	92,8	2,94	354,1				
	392	256,1	107,7	3,92	406,3				
	490	266,0	120,5	4,9	449,3				
20	98	155,5	38,6	0,98	154,0	44,55	0,266	147,1	0,528
	196	177,8	53,3	1,96	204,0				
	294	203,0	69,3	2,94	258,3				
	392	214,5	80,6	3,92	295,6				
	490	235,4	96,1	4,9	347,9				

4.4.1. Efecto del Estado de Carga

Se observan en todos los resultados, al aumentar el estado de carga, se obtienen mayores resultados del Módulo de Corte Máximo (G_{max}), tanto en columna resonante como en bender element.

Esta tendencia se observa para todos los ensayos realizados para distintos índices de vacío de confección inicial, como para el contenido de finos. En la Figura 4-38, se observan los resultados de bender element, donde a mayor estado de carga (color amarillo corresponde a 490 kPa), se obtiene un mayor G_{max} , para los distintos contenidos de finos e índice de vacío de confección inicial.

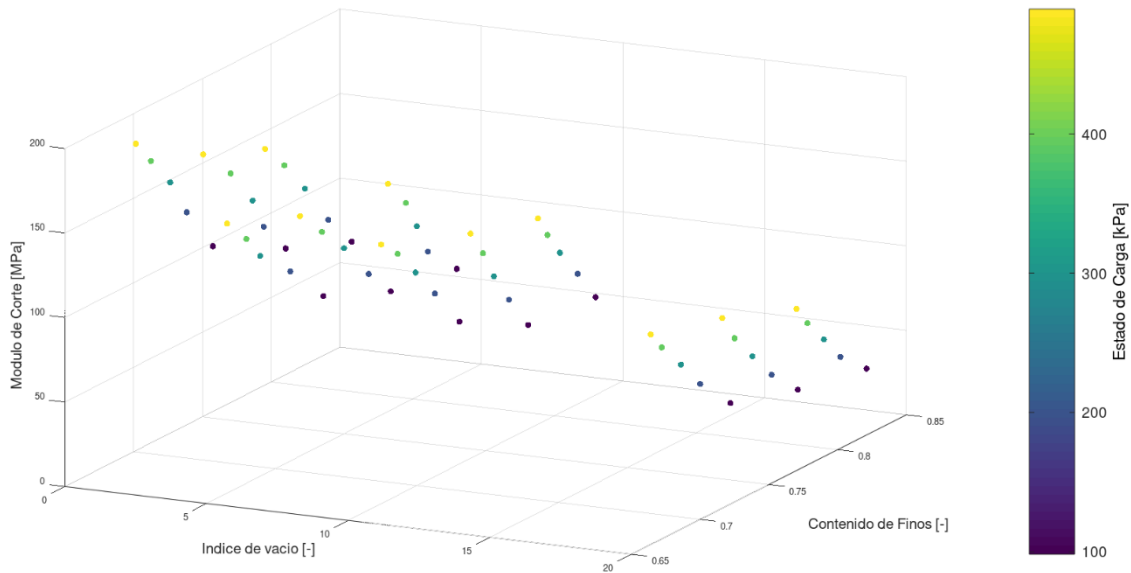


Figura 4-38: Efecto del Estado de Carga en G_{max}

4.4.2. Efecto del Índice de Vacío

Se observan en todos los resultados, mientras menor sea el índice de vacío (mayor Densidad Relativa), se obtienen mayores resultados del Módulo de Corte Máximo (G_{max}), tanto en columna resonante como en bender element.

Esta tendencia se observa para todos los ensayos realizados para distintos estados de carga, como para el contenido de finos. En la Figura 4-39, se observan los resultados de bender element, donde a menor índice de vacío (color oscuro corresponde a $\sim 0,70$), se obtiene un mayor G_{max} , para los distintos contenidos de finos y estado de carga.

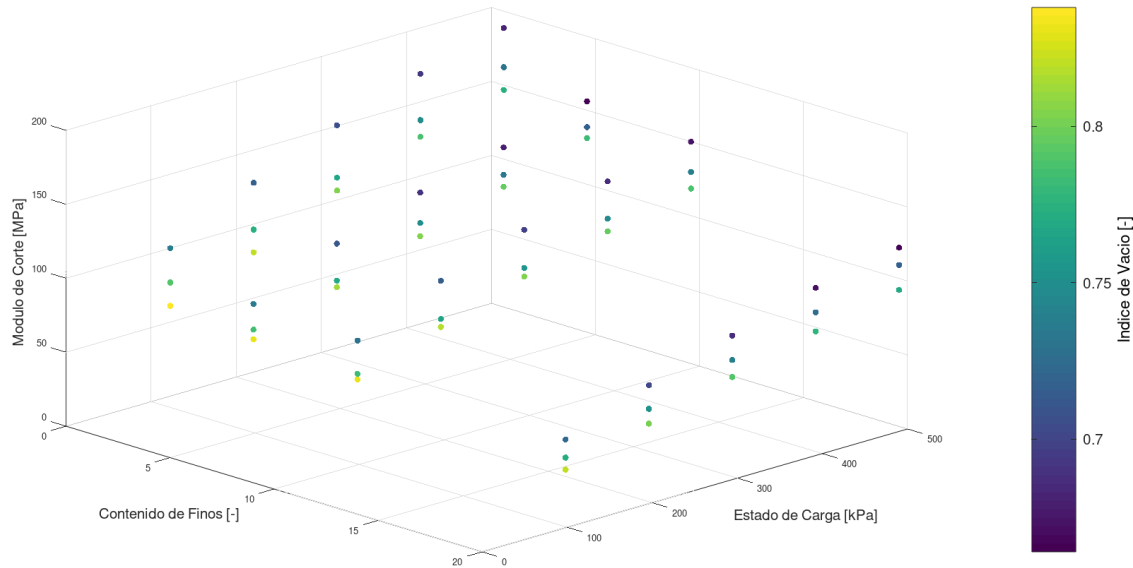


Figura 4-39: Efecto del índice de vacío en G_{max}

4.4.3. Efecto del Contenido de Finos

Al estudiar el efecto del contenido de finos sobre G_{max} , se observa una clara tendencia que al aumentar el contenido de finos (en este caso hasta un 20%CF), disminuye G_{max} .

Esta tendencia se observa para todos los ensayos realizados para distintos estados de carga e índice de vacío. En la Figura 4-40, se observan los resultados de bender element, donde a mayor contenido de finos (color amarillo claro corresponde a 20%CF), se obtiene un menor G_{max} , para los distintos índices de vacío y estado de carga.

Finalmente, se observa una tendencia lineal del módulo de corte máximo (G_{max}) y del contenido de finos (%CF) en la Figura 4-41, donde no se considera el efecto del índice de vacío y se ha graficado por separado. Se tiene la siguiente relación lineal: $G_{max} = m \cdot \%CF + A$, donde G_{max} corresponde al módulo de corte máximo, %CF, el contenido de finos y m y A, dos parámetros obtenidos de la línea de tendencia, que son descritos en la Tabla 4-7.

Tabla 4-7: Relación del Contenido de Finos en función del confinamiento

Confinamiento [kPa]	$e_i=0,75$		$e_i=0,80$		$e_i=0,85$	
	m	A	m	A	m	A
98	-2,3	106,0	-1,9	83,0	-1,6	71,7
196	-2,8	133,8	-2,0	102,3	-1,8	92,3
294	-3,0	154,9	-2,2	123,0	-2,3	115,6
392	-3,0	171,6	-2,4	143,4	-2,6	134,4
490	-3,2	186,3	-2,6	161,5	-2,8	150,8

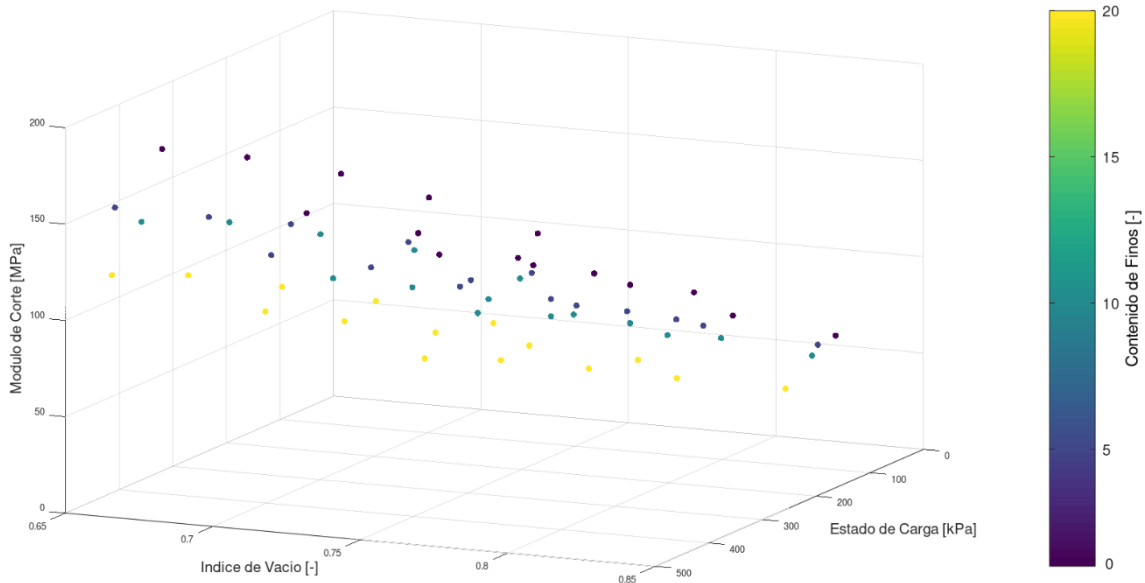


Figura 4-40: Efecto del Contenido de Finos en G_{max}

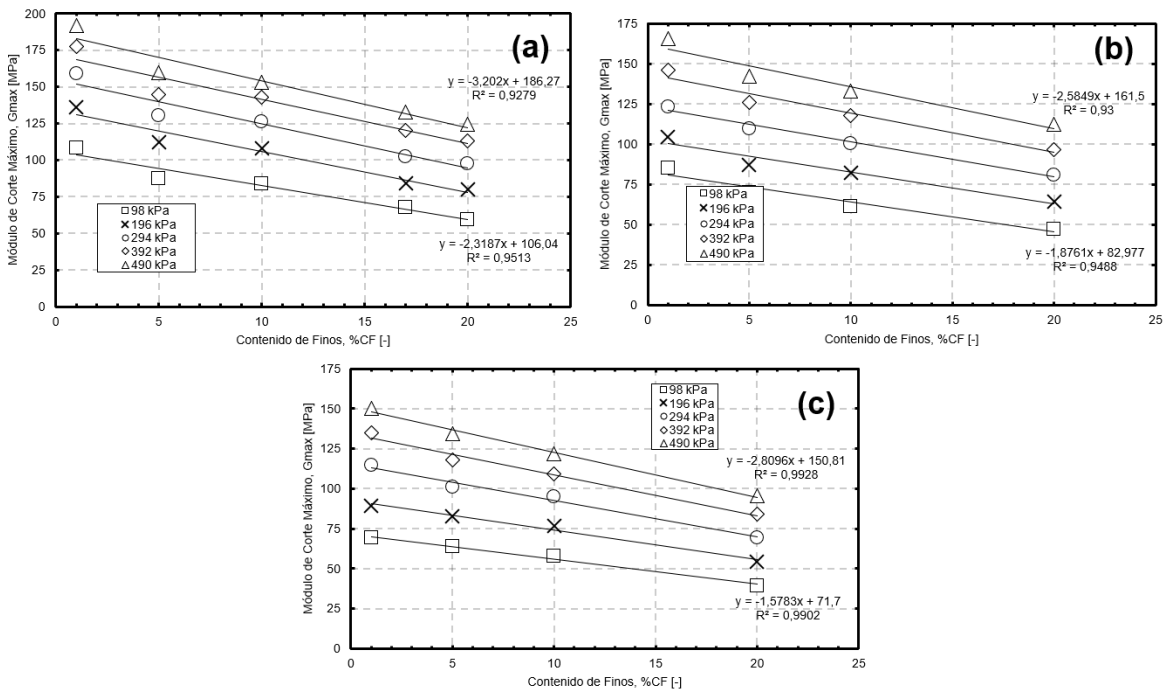


Figura 4-41: G_{max} en función del Contenido de Finos, para distintos estados de carga, según: (a) $e_i = 0.75$, (b) $e_i = 0.80$, y (c) $e_i = 0.85$.

En el acápite 4.4.5 se realiza un análisis similar, pero incorporando el índice de vacío a través de una función $f(e)$, definida por Hardin (1968) para partículas angulares mediante:

$$f(e) = \frac{(2,973 - e)^2}{1 + e}$$

4.4.4. Parámetros α y β .

Considerando la diferencia mínima entre los resultados de bender element y columna resonante (menor al 5%), se procederá a utilizar los valores de velocidad de onda de corte (V_s) obtenidos mediante bender element. Basado en evidencia experimental y estudios analíticos (Sawangsurriya, 2012), la relación velocidad-esfuerzo efectivo para materiales granulares se expresa como una potencial que tiene dos parámetros físicamente significativos: α y β , donde α se relaciona con el índice de vacío, las propiedades del material y la fábrica del medio granular, mientras que β se relaciona con lo efectos del comportamiento del contacto entre partículas. A través del gráfico de velocidad de onda de corte (V_s) en función del confinamiento (σ') es posible obtener una potencial, obteniendo la siguiente fórmula:

$$V_s = \alpha \cdot \sigma'^{\beta}$$

Al realizar este análisis para cada índice de vacío de confección inicial, se obtienen parámetros de α y β (Tabla 4-8), donde α tiende a disminuir a medida que aumenta el contenido de finos, mientras que β tiende a aumentar al aumentar el contenido de finos. La misma tendencia se obtiene respecto al índice de vacío de confección inicial, es decir, α tiende a disminuir a medida que aumenta el índice de vacíos, mientras que β tiende a aumentar al aumentar el índice de vacíos. Esta última relación concuerda con lo expuesto por Santamarina et al. (2001), donde para arenas más densas (mayor densidad relativa, menor índice de vacío), el valor de α es mayor y el valor de β es menor.

Tabla 4-8: Relación del Contenido de Finos en función de α y β para cada índice de vacío de confección inicial

	$e_i=0,75$		$e_i=0,80$		$e_i=0,85$	
	α	β	α	β	α	β
1%CF	117,33	0,166	94,34	0,192	70,36	0,232
5%CF	103,97	0,168	78,88	0,206	69,51	0,221
10%CF	97,78	0,175	67,45	0,229	67,51	0,224
17%CF	72,94	0,214	64,15	0,225	61,97	0,22
20%CF	68,34	0,217	51,39	0,226	44,87	0,267

En la Figura 4-42, se observa la comparación con otros autores, donde se observa una clara tendencia mencionada anteriormente respecto al contenido de finos y el índice de vacío. Para probetas más densas (menor índice de vacíos), se encuentran más hacia la izquierda inferior.

Por otro lado, en la Figura 4-43 y Figura 4-44, se observa una relación lineal entre el contenido de finos los parámetros α y β , respectivamente, donde a medida que aumenta el contenido de finos, aumenta el parámetro α y disminuye β , para los distintos índice de vacíos de confección inicial.

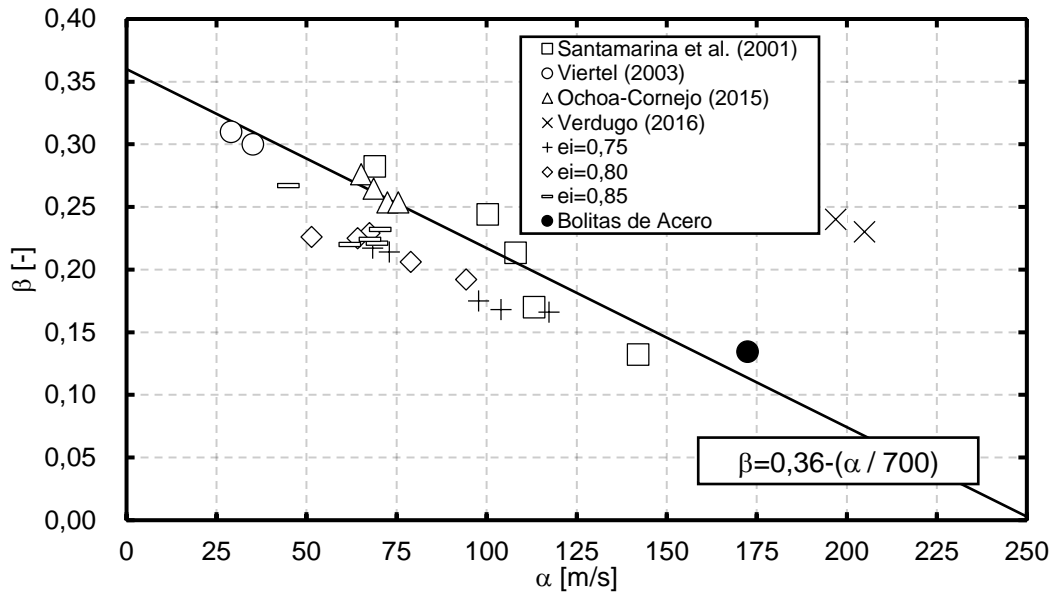


Figura 4-42: Parámetros α y β respecto a otros autores.

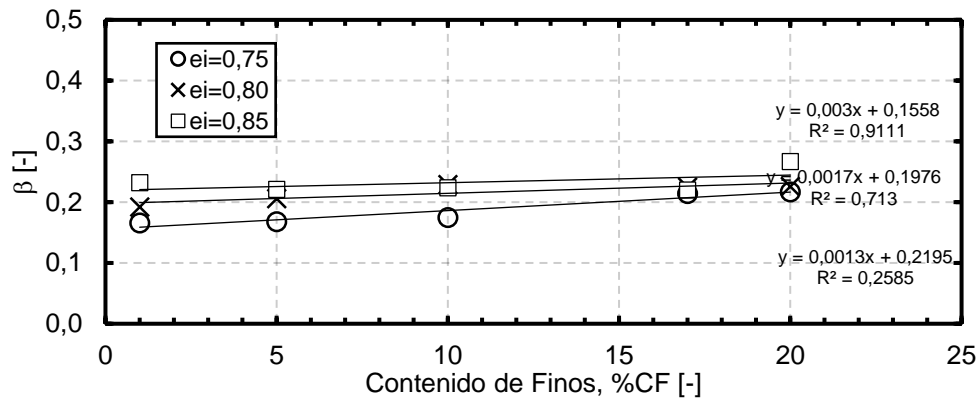


Figura 4-43: Parámetro β respecto al contenido de finos

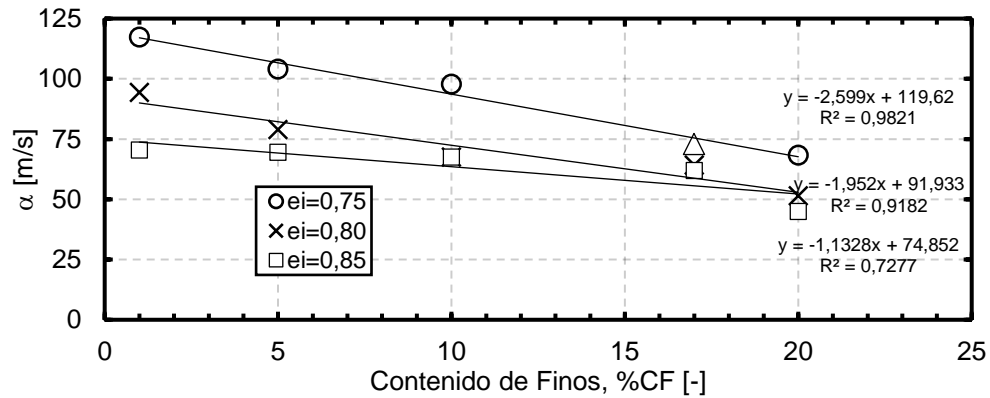


Figura 4-44: Parámetros α respecto al contenido de finos

4.4.5. Parámetros C_g y n en carga

Los parámetros C_g y n en carga, se obtienen mediante la siguiente ecuación:

$$G_{max} = C_g \cdot f(e) \cdot p_a^{(1-n)} \cdot (\sigma'_o)^n$$

Al reordenar la ecuación, es posible generar una ecuación del tipo potencial ($y = C_g \cdot x^n$), de la siguiente forma:

$$\frac{G_{max}}{f(e) \cdot p_a} = C_g \cdot \left(\frac{\sigma'_o}{p_a}\right)^n$$

El módulo de corte máximo se encuentra normalizado por la función del índice de vacío, $f(e)$ y por la presión atmosférica, mientras que el confinamiento se encuentra normalizado por la presión atmosférica, al graficar todos los resultados y realizando un ajuste potencial por contenido de finos, se obtienen los resultados mostrados en la Figura 4-45, donde en general, a mayor contenidos de finos, se obtiene un C_g menor y un n mayor, estos valores se encuentran tabulados en la Tabla 4-9.

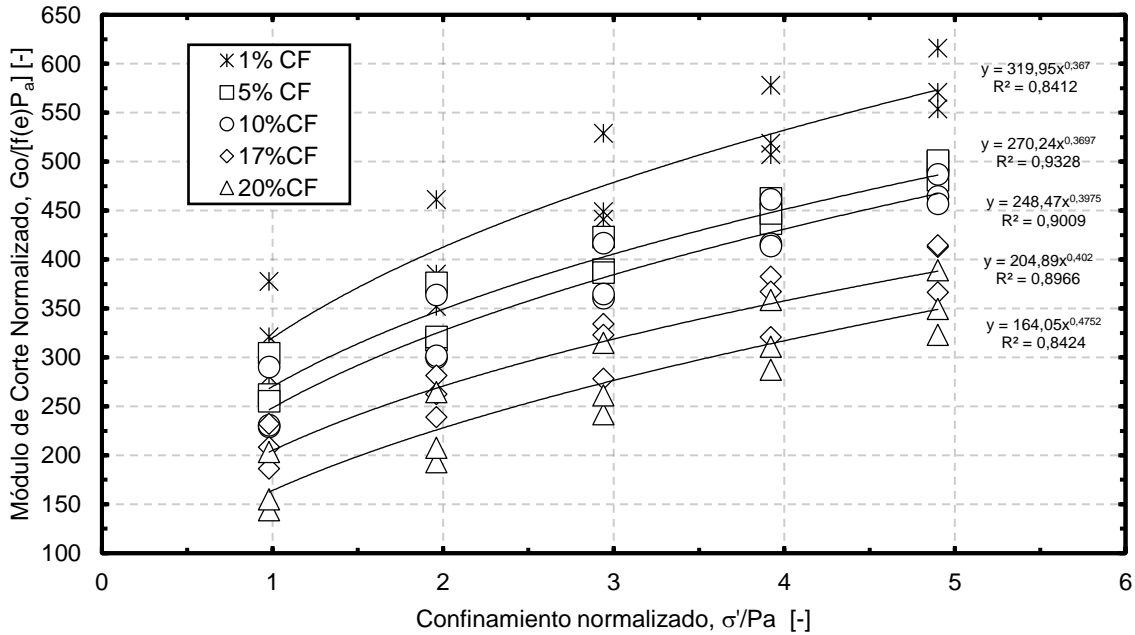


Figura 4-45: Módulo de corte normalizado en función del confinamiento normalizado

Tabla 4-9: Relación del Contenido de Finos en función C_g y n

Contenido de Finos	C_g	n
1	319,95	0,367
5	270,24	0,369
10	248,47	0,397
17	204,89	0,402
20	164,05	0,475

Al graficar los valores de C_g y n obtenidos y compararlos con la literatura especializada, como se ha mostrado en la Tabla 2-4 y Tabla 2-5, para arenas limpias y con finos, se puede destacar que a medida que aumenta el contenido de finos, el valor de C_g es menor, mientras que el parámetro n es mayor (Carraro et. al, 2009). Por otro lado, el valor de C_g y n depende principalmente de la naturaleza y forma de la partícula, siendo para partículas angulares valores menores que para partículas redondeadas. Diversos autores han establecido la relación entre C_g y n de la siguiente forma:

$$n = 0,873 - \frac{C_g}{1587}$$

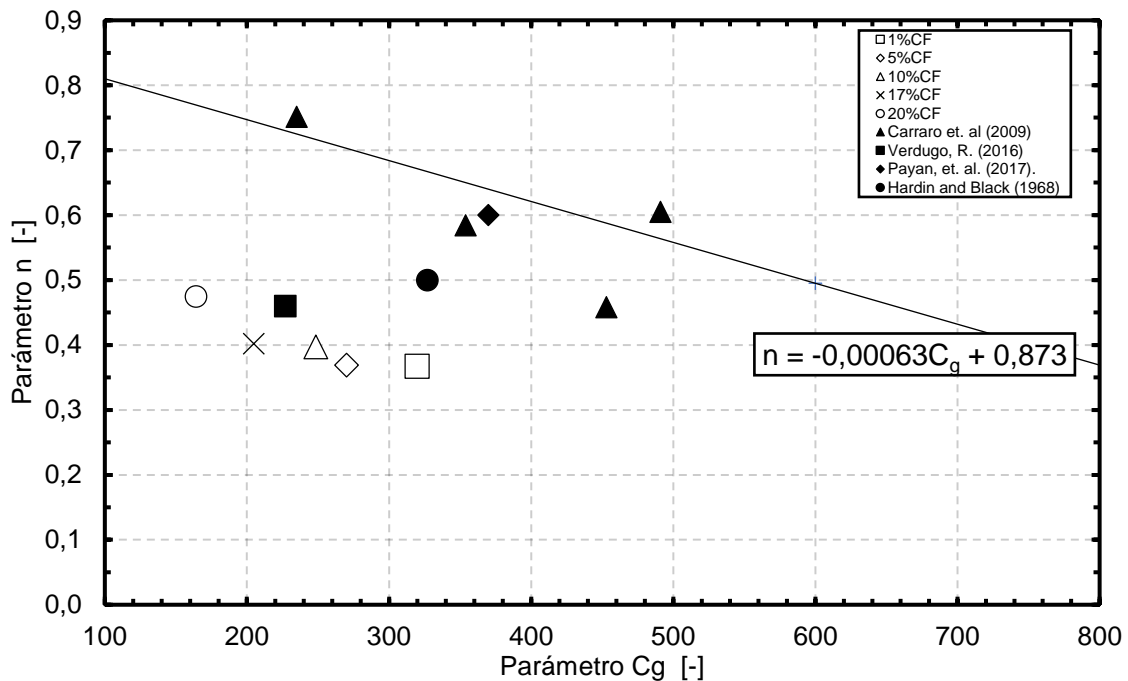


Figura 4-46: C_g y n obtenidos y según autores.

En la Figura 4-47, se muestra la relación entre el contenido de finos y C_g , donde se observa una relación inversamente proporcional, mientras que en la Figura 4-48 se observa la relación entre el contenido de finos y el parámetro n , donde si bien son directamente proporcionales, es posible ver que el parámetro fluctúa en el valor de 0,4.

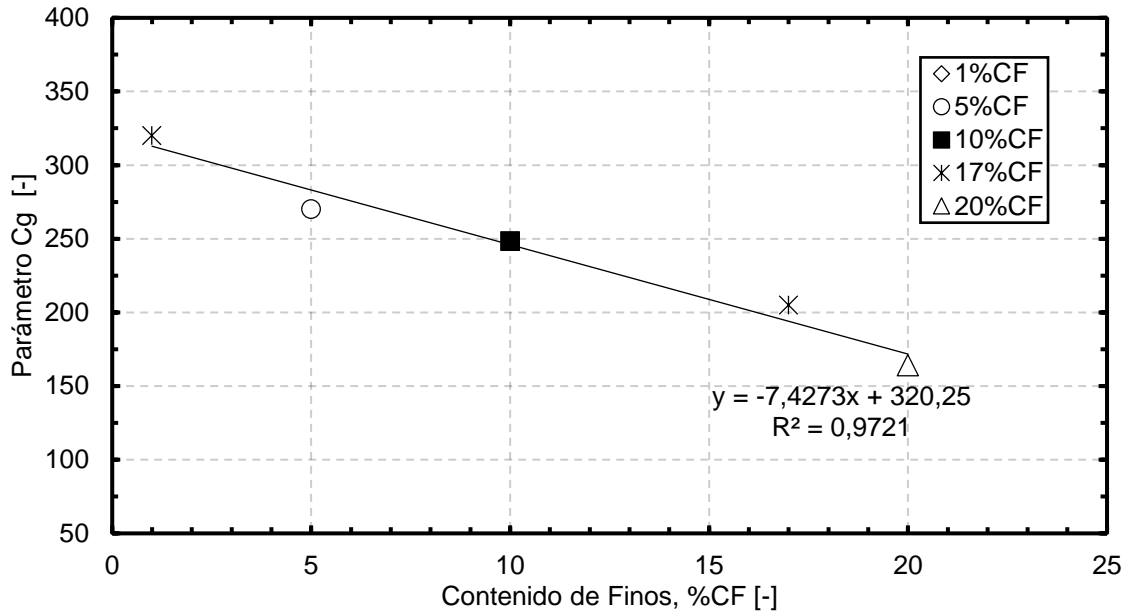


Figura 4-47: Cg en función del contenido de finos

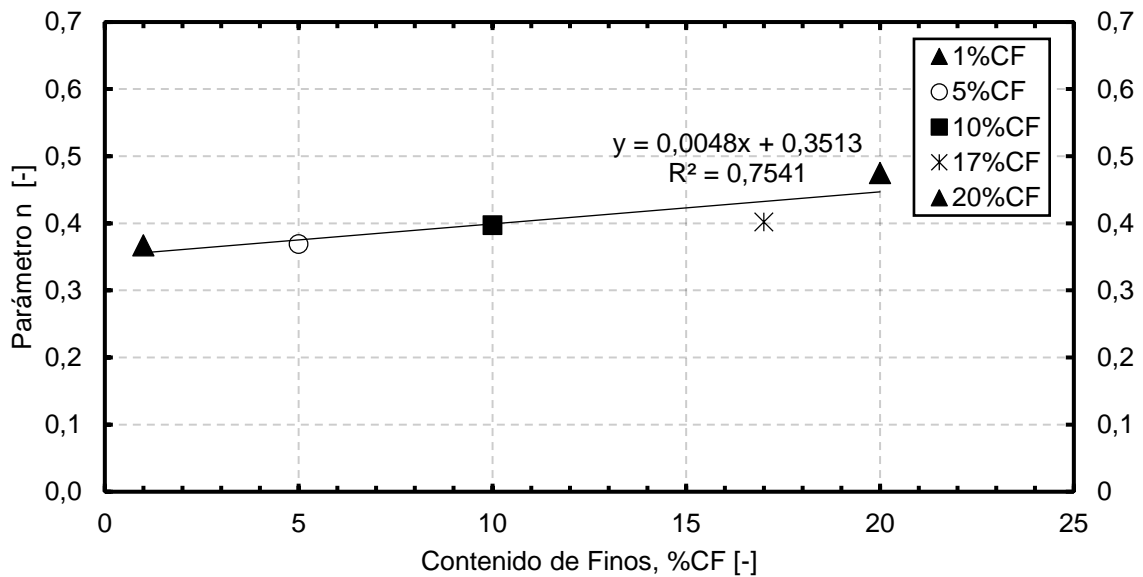


Figura 4-48: n en función del contenido de finos

4.4.6. Parámetros Cg y n en descarga

De forma similar a la carga descrita en el acápite anterior, los parámetros C_g y n en descarga, se obtienen mediante la siguiente ecuación:

$$G_{max} = C_g \cdot OCR^k \cdot f(e) \cdot p_a^{(1-n)} \cdot (\sigma'_o)^n$$

Donde aparece un término explícito en la ecuación, OCR y k, donde la relación de sobreconsolidación es igual a 1 para la carga analizada anteriormente y el

coeficiente k, al igual que n son parámetros que dependen de las características del suelo (como la naturaleza de los contactos entre las partículas). Al reordenar la ecuación, es posible generar una ecuación del tipo potencial ($y = (C_g \cdot OCR^k)x^n$), de la siguiente forma:

$$\frac{G_{max}}{f(e) \cdot p_a} = C_g \cdot OCR^k \cdot \left(\frac{\sigma'_o}{p_a}\right)^n$$

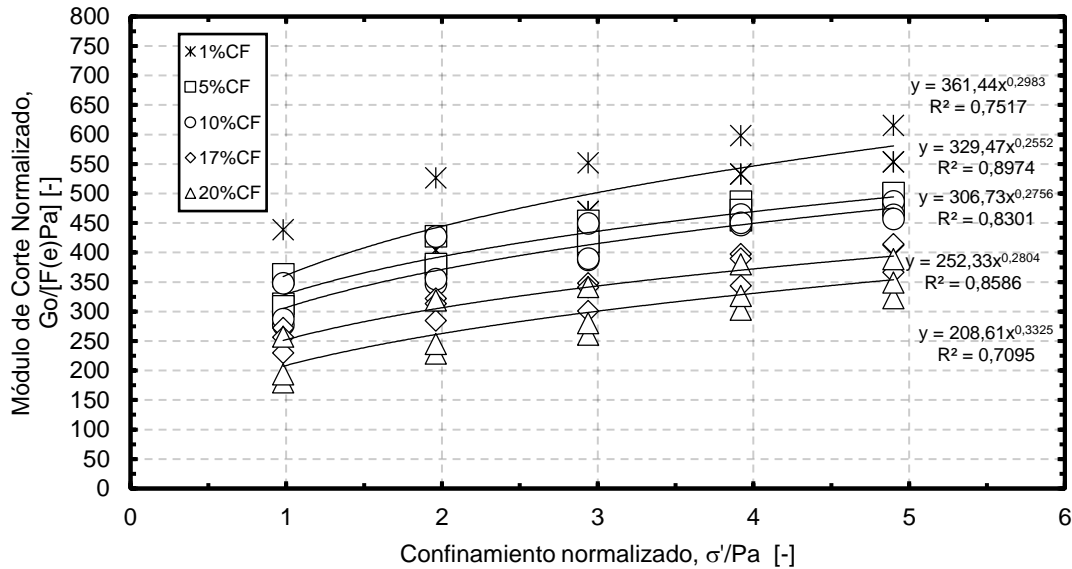


Figura 4-49: Modulo de corte normalizado en función del confinamiento normalizado para descarga.

Tabla 4-10: Coeficientes de la potencial en descarga

Contenido de Finos	$C_g \cdot OCR^k$	n
1	361,44	0,298
5	329,47	0,255
10	306,73	0,276
17	252,33	0,280
20	208,61	0,333

Para obtener el valor de k y C_g , se debe tener en cuenta que OCR va variando en la descarga, donde en este caso varía entre 1 a 5, por lo que se debe hacer una consideración para obtener un resultado, considerando que C_g es el mismo valor obtenido para carga, solo queda resolver el valor de k, el cual varía según el OCR.

Tabla 4-11: Valor de k según OCR y %CF

%CF	OCR	k	Cg'·OCR ^k	Cg·OCR ^k	Error (%)
1	1	-	361,44	319,95	11,5
	1,25	0,547		361,48	0,01
	1,67	0,239		361,49	0,02
	2,5	0,133		361,41	0,01
	5	0,076		361,57	0,03
5	1	-	329,47	270,24	17,9
	1,25	0,889		329,53	0,02
	1,67	0,388		329,47	0,01
	2,5	0,216		329,38	0,03
	5	0,123		329,40	0,02
10	1	-	306,73	248,47	18,9
	1,25	0,941		306,52	0,07
	1,67	0,412		306,67	0,02
	2,5	0,229		306,48	0,08
	5	0,131		306,78	0,02
17	1	-	252,33	204,89	18,8
	1,25	0,935		252,42	0,04
	1,67	0,412		252,88	0,21
	2,5	0,228		252,49	0,06
	5	0,129		252,16	0,06
20	1	-	208,61	164,05	21,3
	1,25	1,078		208,67	0,03
	1,67	0,471		208,56	0,03
	2,5	0,262		208,56	0,02
	5	0,149		208,51	0,05

4.4.7. Parámetros A_D y n_D

Respecto al damping (D), para pequeñas deformaciones ($\gamma < \sim 10^{-6}$) se tiene la siguiente relación propuesta por Santamarina et al. (2001):

$$D = A_D \cdot \left(\frac{\sigma'_o}{1 \text{ kPa}} \right)^{n_D}$$

Los parámetros obtenidos al realizar la potencial, para distintos contenidos de finos se muestran en la Tabla 4-12.

Tabla 4-12: Resumen parámetros A_D y n_D .

%CF	A_D	n_D
1	1,92	-0,865
5	1,46	-0,875
10	1,15	-0,698
17	1,03	-0,612
20	0,85	-0,707

De esta forma, se observa que el parámetro A_D es inversamente proporcional al valor del contenido de finos (Figura 4-50), mientras que en general, el valor de n_D es directamente proporcional al %CF (Figura 4-51).

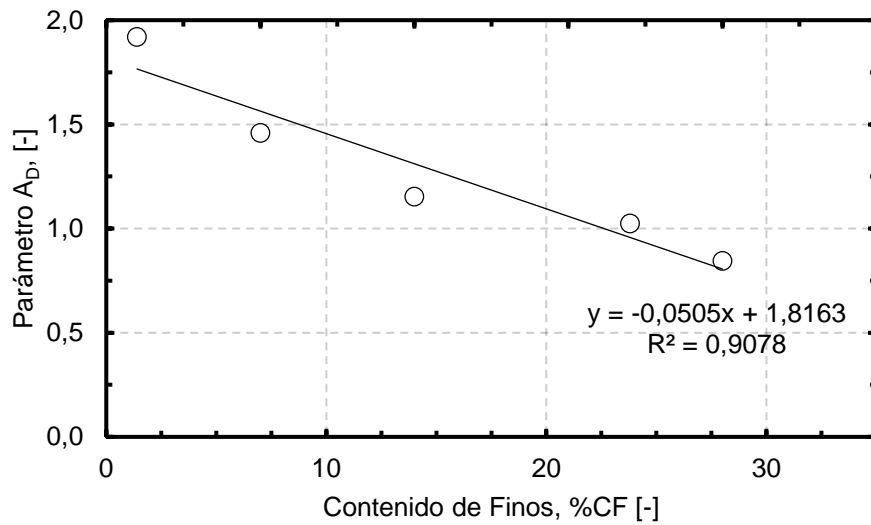


Figura 4-50: Parámetro A_D en función del contenido de finos

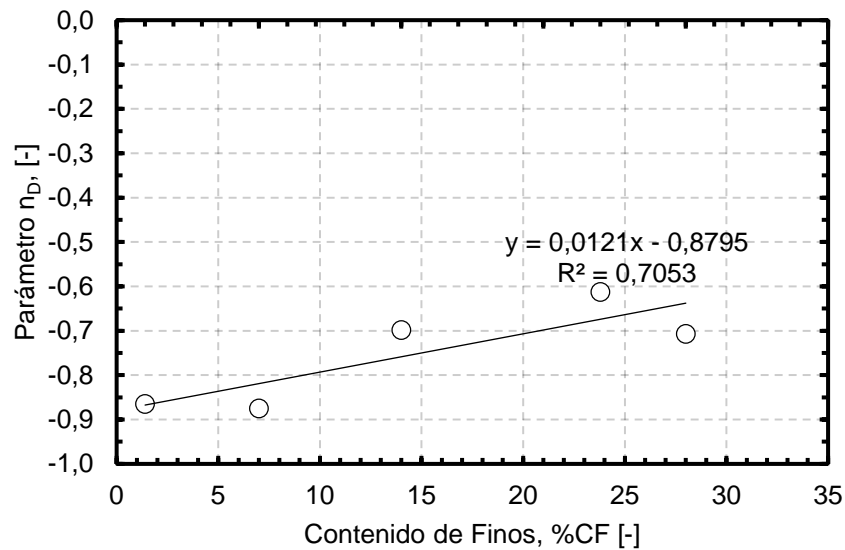


Figura 4-51: Parámetro n_D en función del contenido de finos

5. DEGRADACIÓN DRENADA

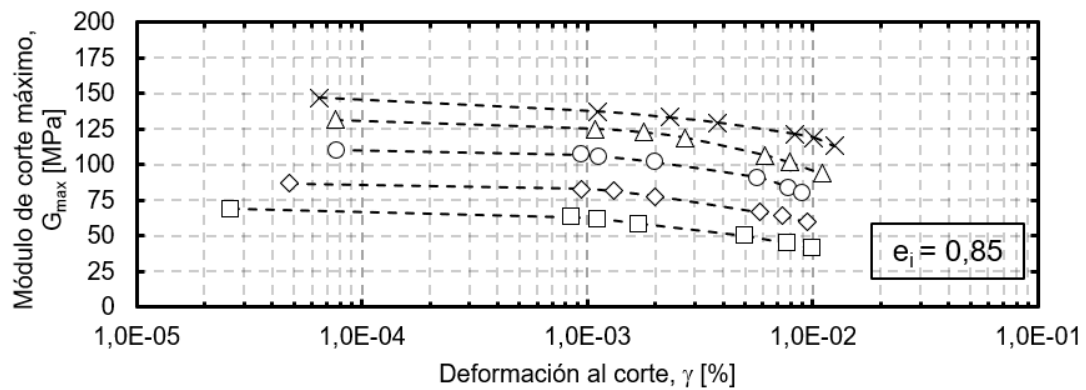
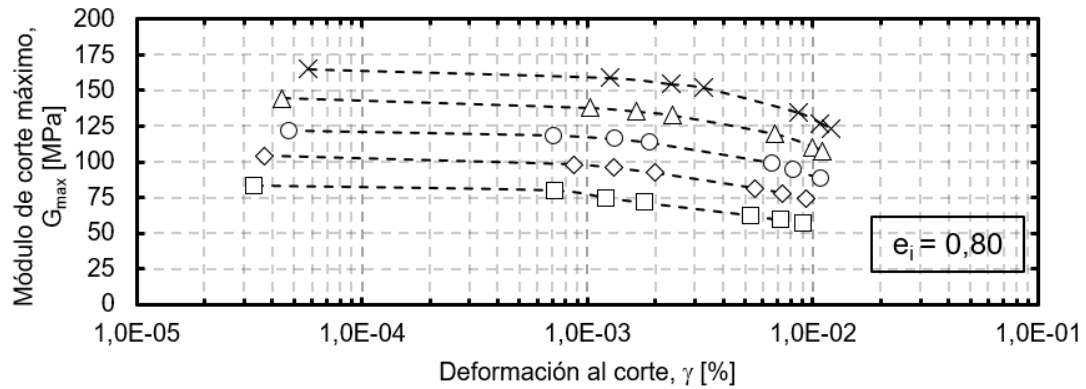
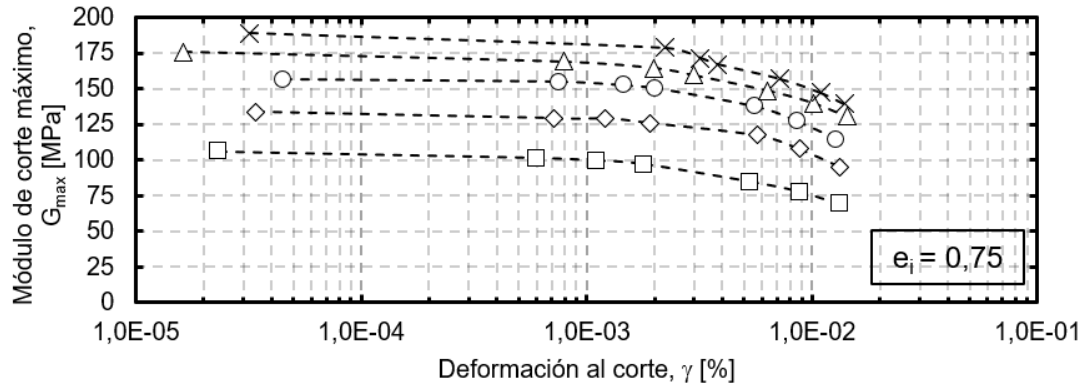
A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante columna resonante para el comportamiento drenado.

5.1. Resultados para Arena Limpia

Los resultados para una arena limpia obtenidos mediante columna resonante se muestran en la Figura 5-1, donde se grafica el módulo de corte a medida que aumenta la deformación al corte para un rango de presiones de confinamiento efectivo entre 1 kg/cm^2 a 5 kg/cm^2 , para tres índices de vacíos iniciales distintos.

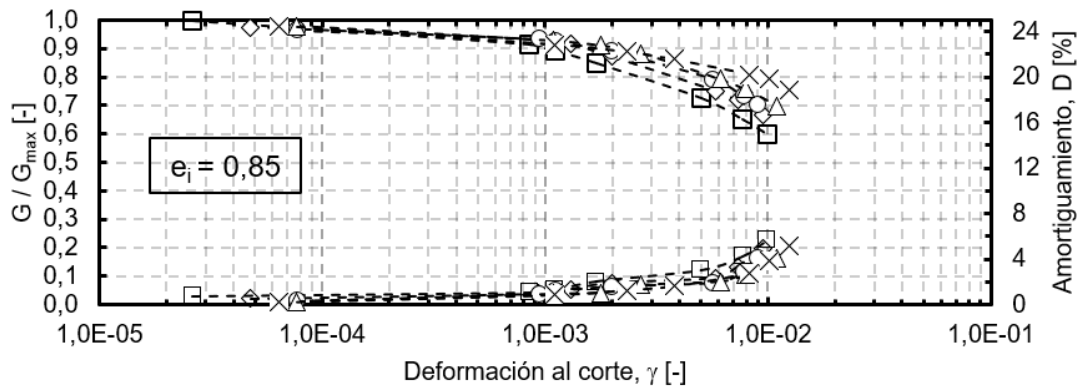
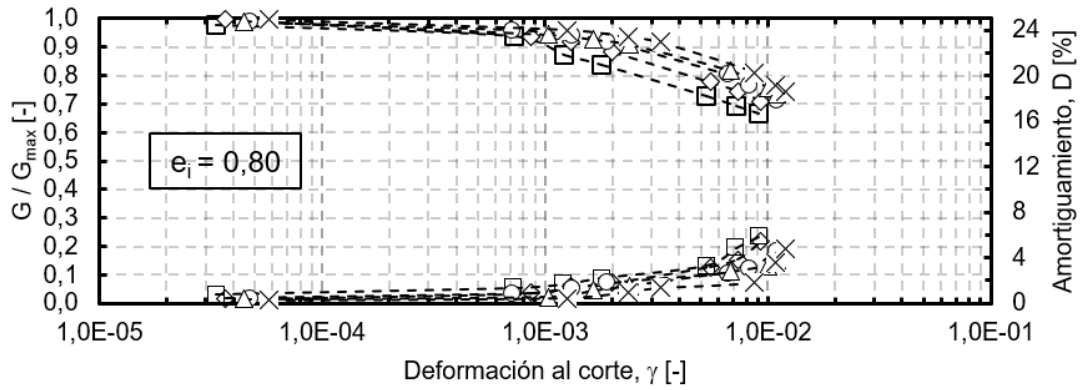
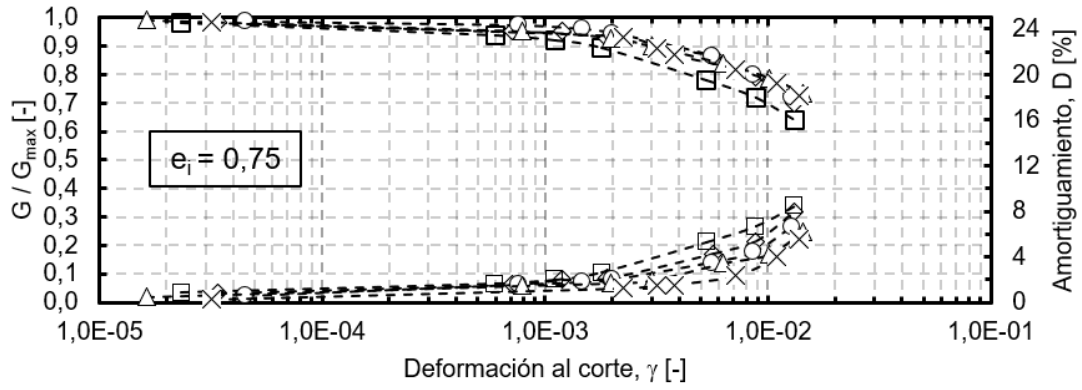
Al utilizar los valores obtenidos mediante bender element del módulo de corte máximo (G_{\max}), es posible obtener la relación G/G_{\max} en función de la deformación al corte. Estos resultados se pueden ver reflejados en la Figura 5-2, donde adicionalmente, se muestran los resultados obtenidos para el amortiguamiento. Ambos parámetros se grafican en función de la deformación al corte, para un rango de presiones de confinamiento entre 1 kg/cm^2 a 5 kg/cm^2 , para tres índices de vacíos iniciales distintos.

Por otro lado, a partir del primer valor obtenido en columna resonante para el amortiguamiento (D_{\min}), se grafica D/D_{\min} en función de la deformación al corte en la Figura 5-3.



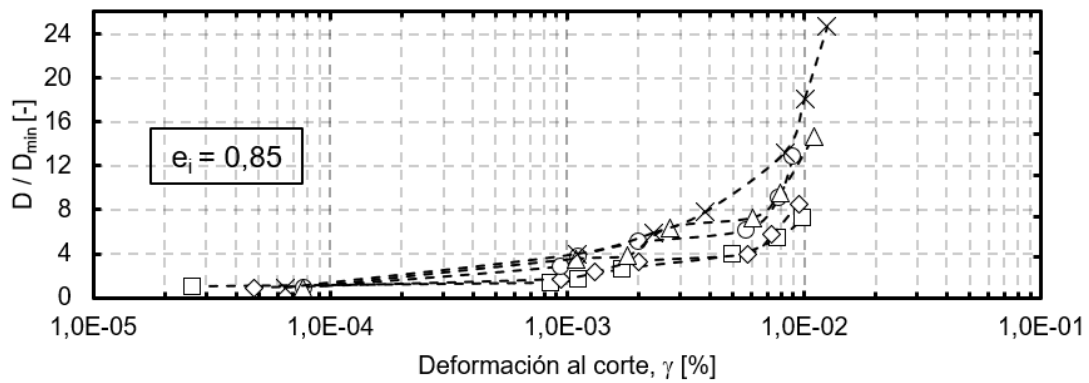
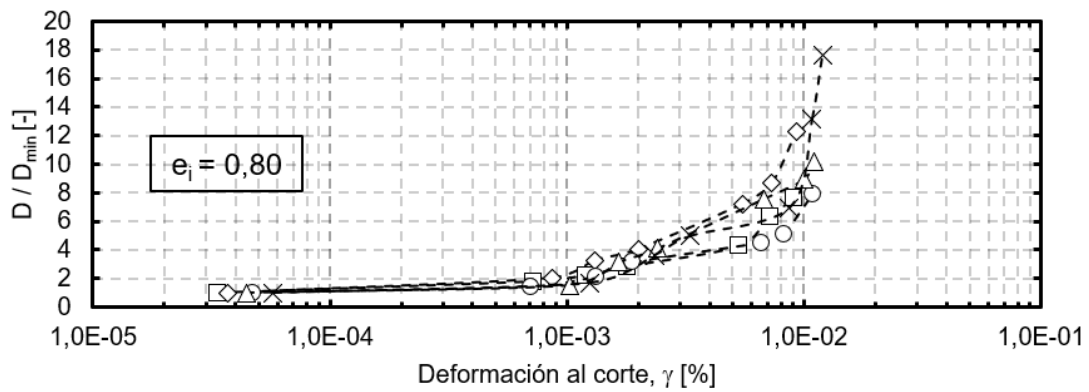
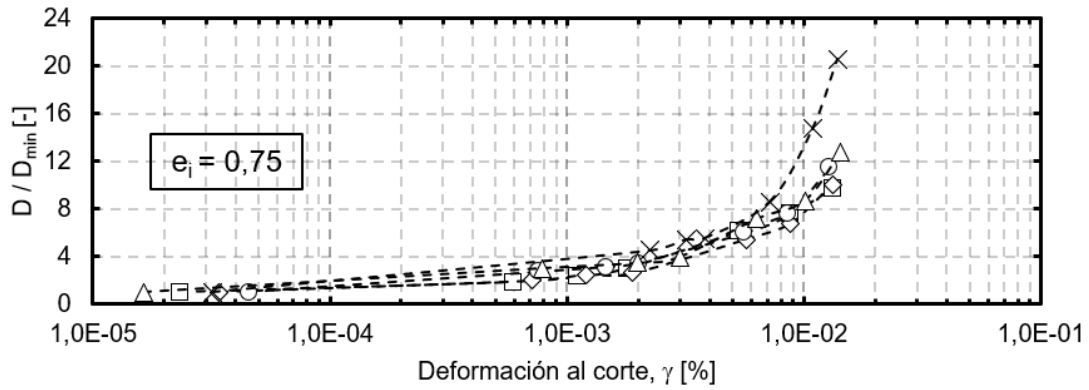
-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -✕- 490 kPa

Figura 5-1: Resultados de G vs γ , para una arena limpia ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.



-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -✕- 490 kPa

Figura 5-2: Resultados de G/G_{max} vs γ , para una arena limpia ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.



-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -✕- 490 kPa

Figura 5-3: Resultados de D/D_{min} vs γ , para una arena limpia ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.

Finalmente, en la Figura 5-4 se muestran los valores de todos los ensayos realizados para una arena limpia, de D/D_{min} vs G/G_{max} .

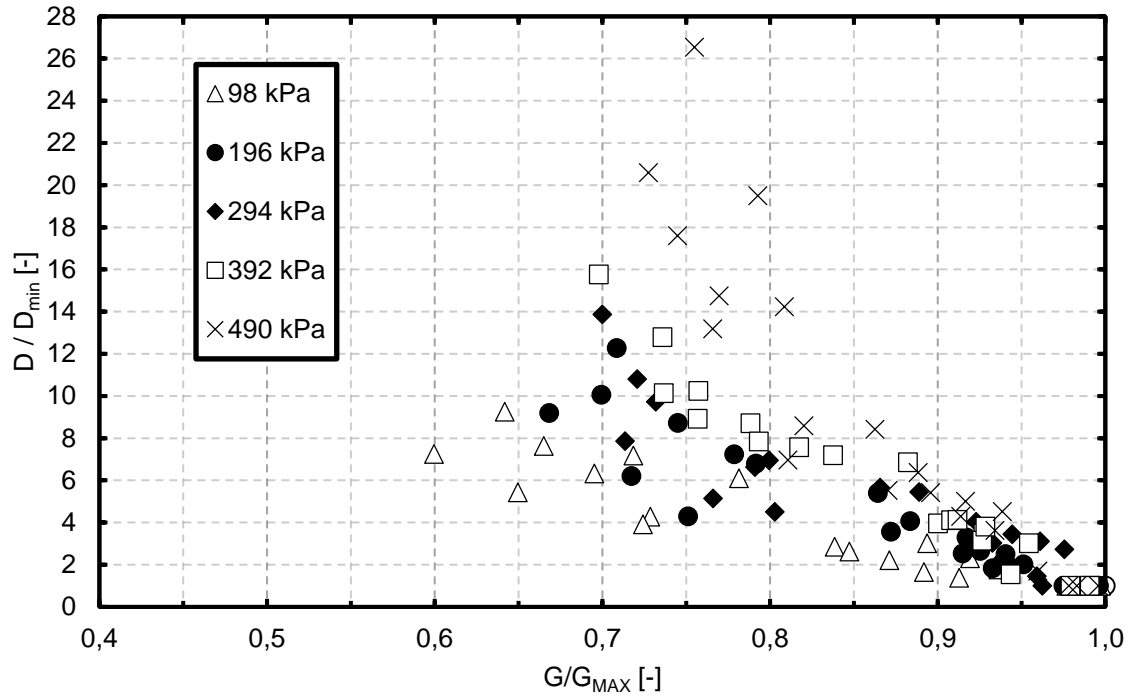


Figura 5-4: Resultados de D/D_{\min} vs G/G_{\max} , para una arena limpia ensayada a diferentes estados de carga.

5.2. Resultados para Arenas con Finos

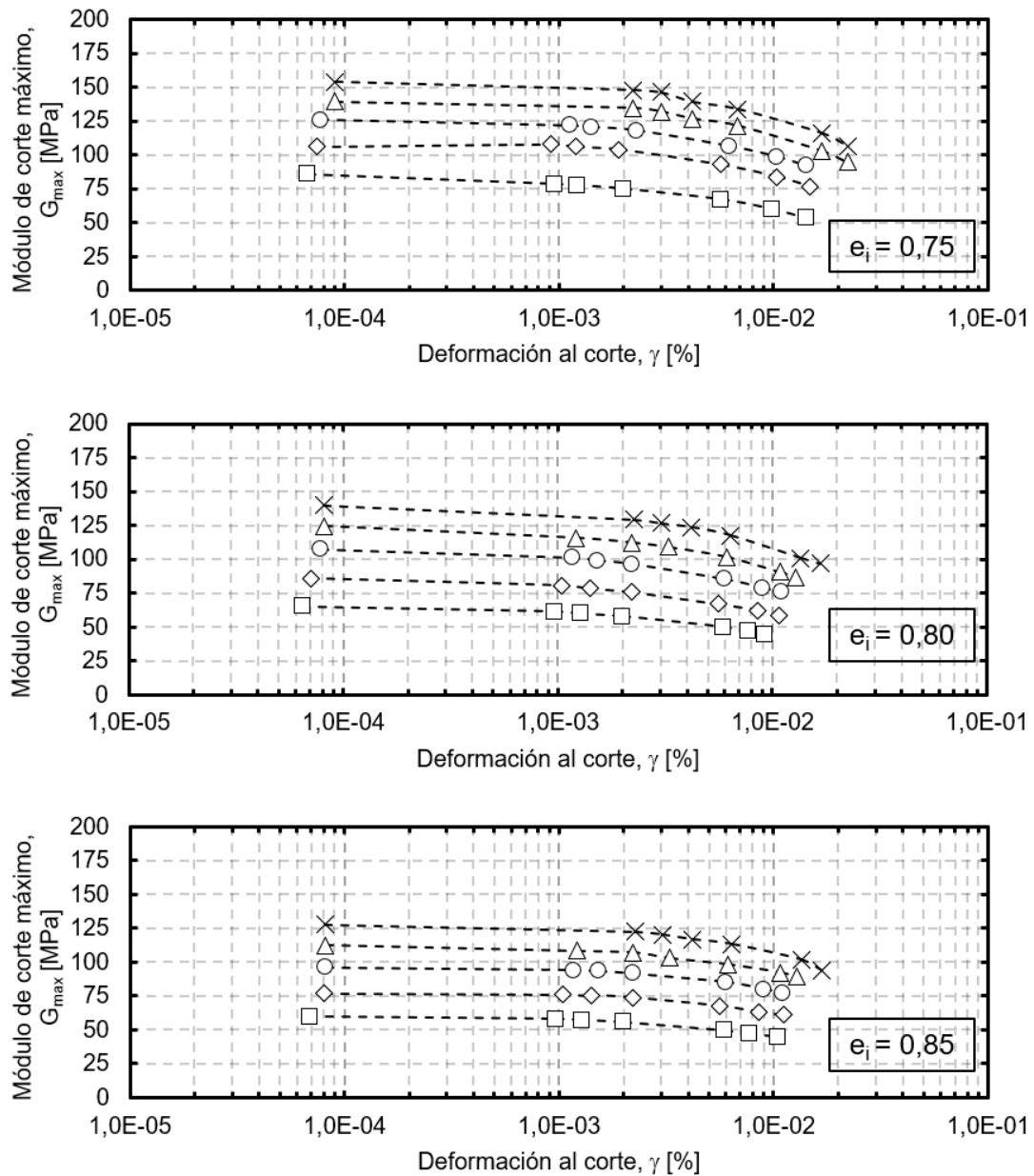
A continuación, se muestran los resultados obtenidos mediante columna resonante para distintos contenidos de finos (5%, 10%, 17% y 20%).

5.2.1. Resultados para 5% Contenido de Finos

Los resultados para una arena con 5% de contenido de finos obtenidos mediante columna resonante se muestran en la Figura 5-5, donde se grafica el módulo de corte a medida que aumenta la deformación al corte para un rango de presiones de confinamiento efectivo entre 1 kg/cm^2 a 5 kg/cm^2 , para tres índices de vacíos iniciales distintos.

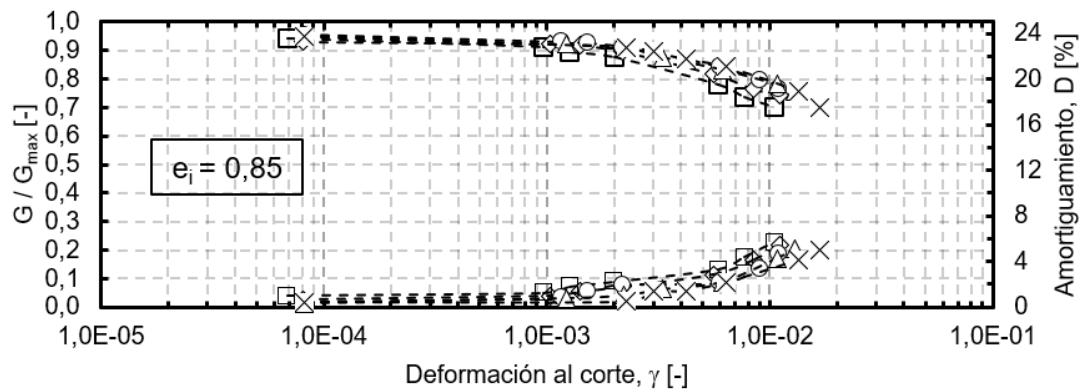
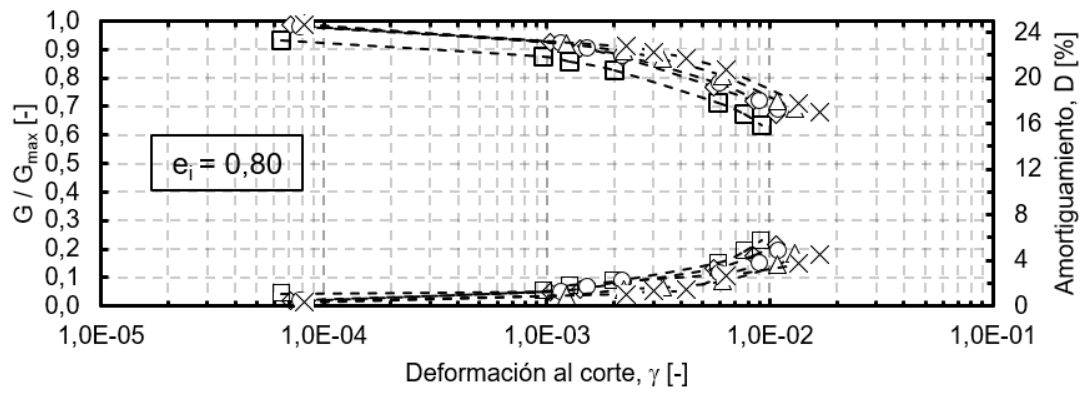
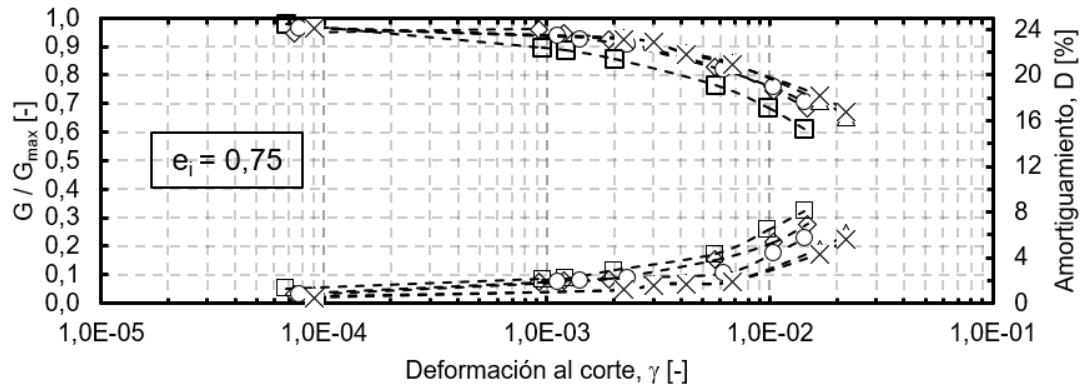
Al utilizar los valores obtenidos mediante bender element del módulo de corte máximo (G_{\max}), es posible obtener la relación G/G_{\max} en función de la deformación al corte. Estos resultados se pueden ver reflejados en la Figura 5-6, donde adicionalmente, se muestran los resultados obtenidos para el amortiguamiento. Ambos parámetros se grafican en función de la deformación al corte, para un rango de presiones de confinamiento entre 1 kg/cm^2 a 5 kg/cm^2 , para tres índices de vacíos iniciales distintos.

Por otro lado, a partir del primer valor obtenido en columna resonante para el amortiguamiento (D_{min}), se grafica D/D_{min} en función de la deformación al corte en la Figura 5-7.



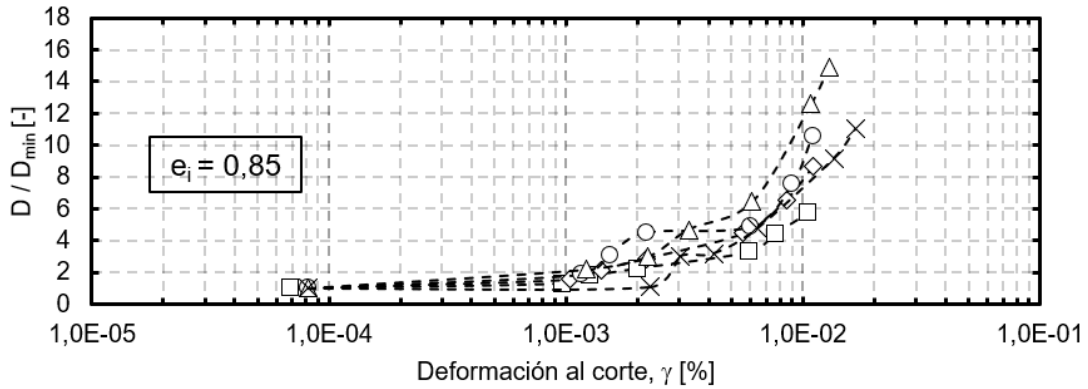
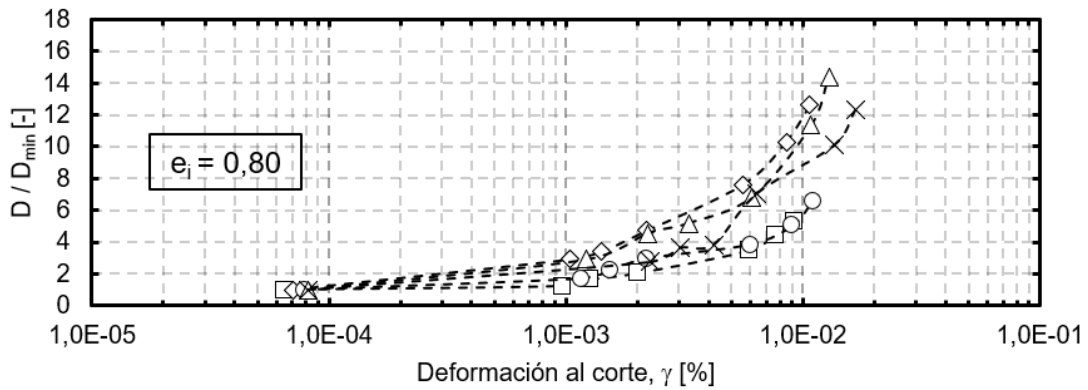
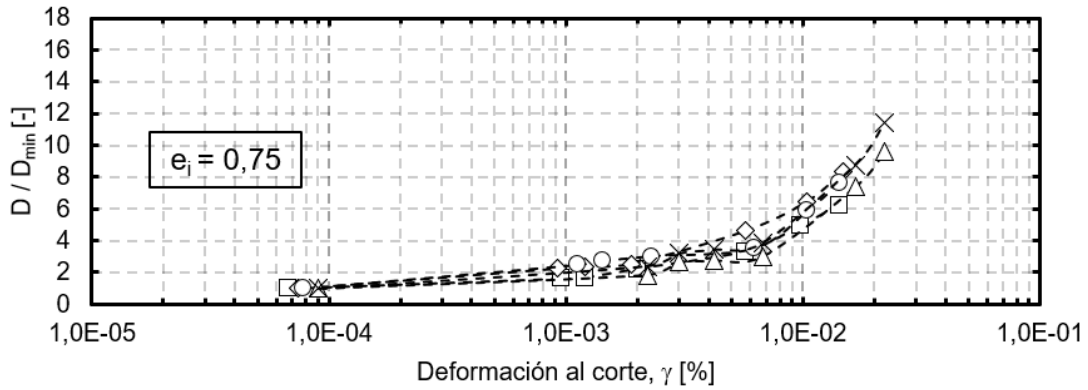
-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -✕- 490 kPa

Figura 5-5: Resultados de G vs γ , para una arena con 5% CF, ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.



-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -✕- 490 kPa

Figura 5-6: Resultados de G/G_{max} vs γ , para una arena con 5%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.



-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -✕- 490 kPa

Figura 5-7: Resultados de D/D_{min} vs γ , para una arena con 5%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.

Finalmente, en la Figura 5-8 se muestran los valores de todos los ensayos realizados para una arena con 5%CF, de D/D_{min} vs G/G_{max} .

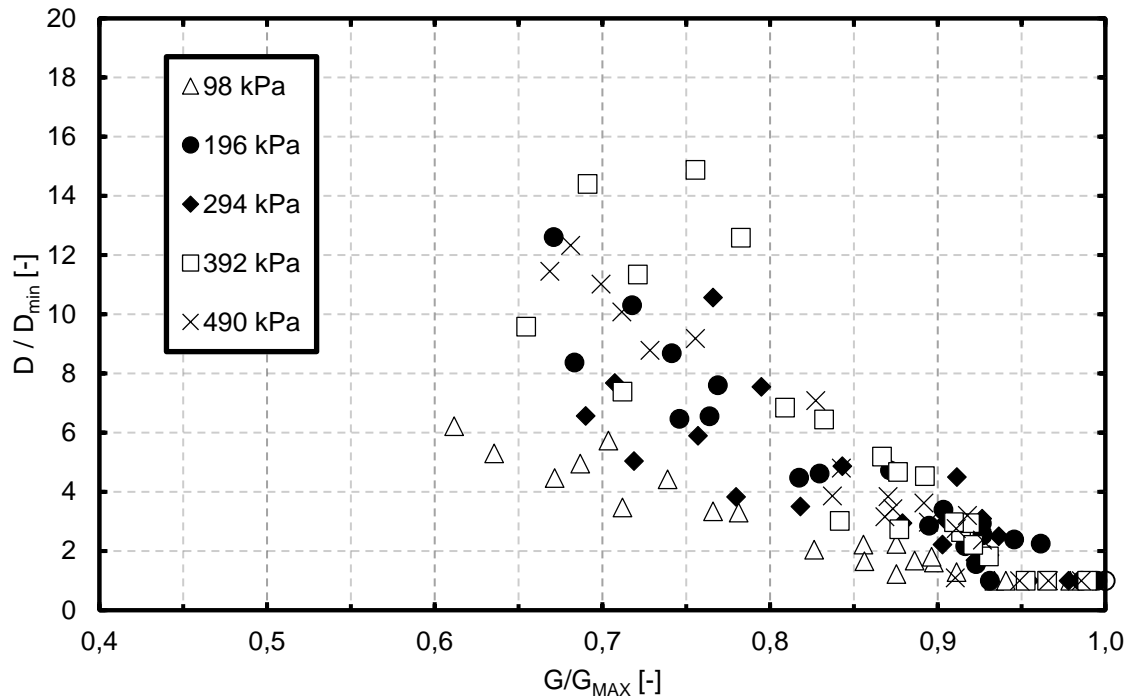


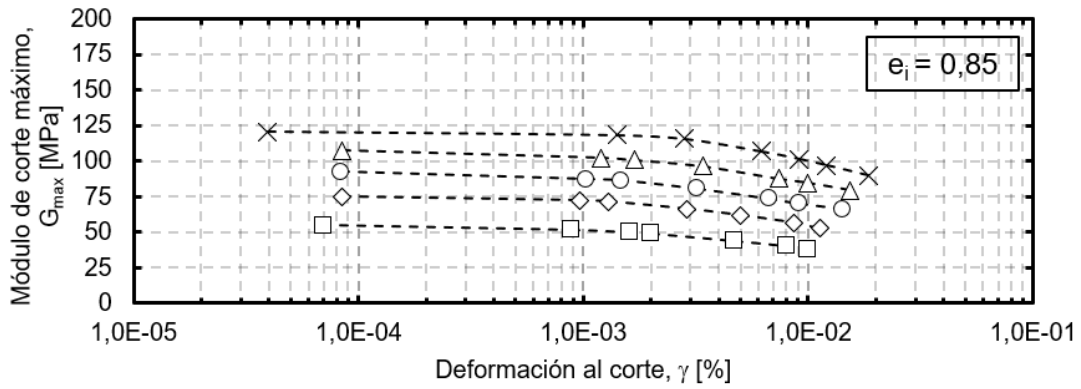
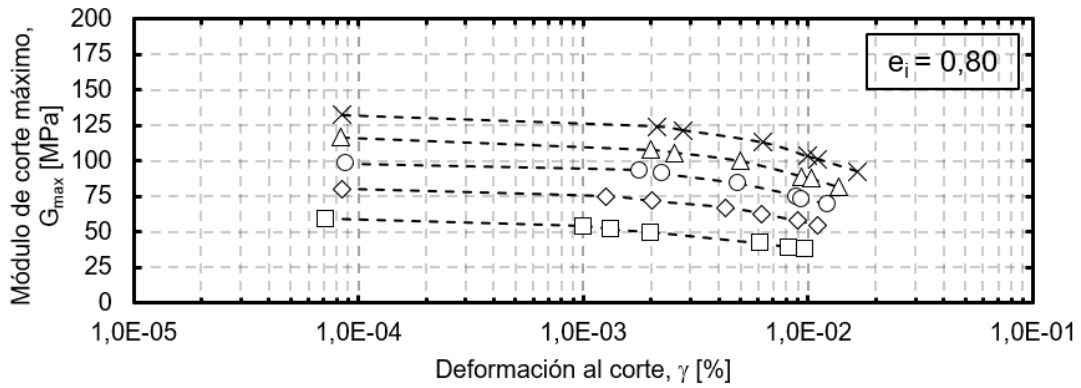
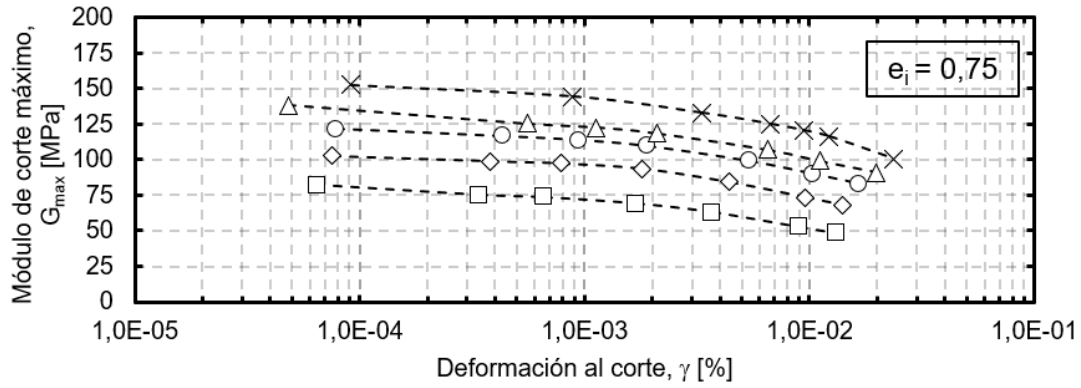
Figura 5-8: Resultados de D/D_{min} vs G/G_{max} , para una arena con 5%CF ensayada a diferentes estados de carga.

5.2.2. Resultados para 10% Contenido de Finos

Los resultados para una arena con 10% de contenido de finos obtenidos mediante columna resonante se muestran en la Figura 5-9, donde se grafica el módulo de corte a medida que aumenta la deformación al corte para un rango de presiones de confinamiento efectivo entre 1 kg/cm^2 a 5 kg/cm^2 , para tres índices de vacíos iniciales distintos.

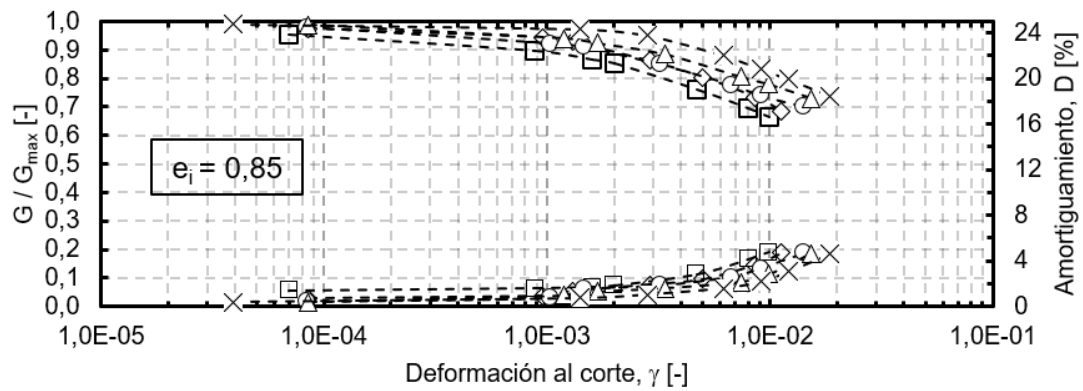
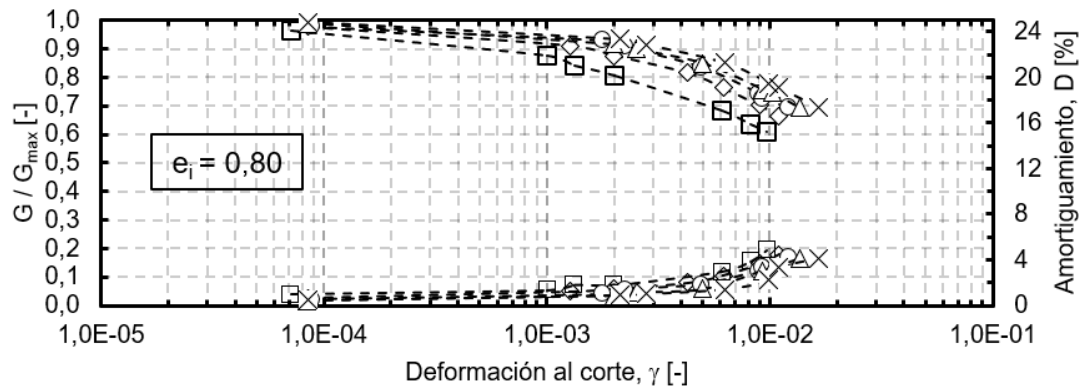
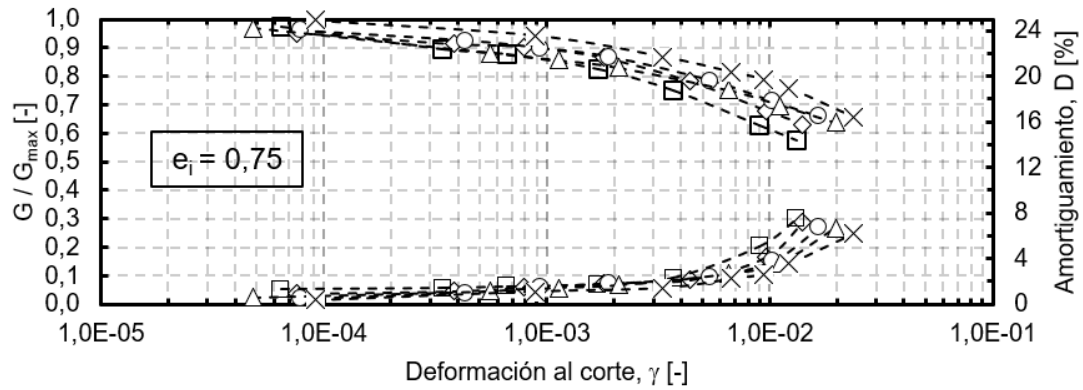
Al utilizar los valores obtenidos mediante bender element del módulo de corte máximo (G_{max}), es posible obtener la relación G/G_{max} en función de la deformación al corte. Estos resultados se pueden ver reflejados en la Figura 5-10, donde adicionalmente, se muestran los resultados obtenidos para el amortiguamiento. Ambos parámetros se grafican en función de la deformación al corte, para un rango de presiones de confinamiento entre 1 kg/cm^2 a 5 kg/cm^2 , para tres índices de vacíos iniciales distintos.

Por otro lado, a partir del primer valor obtenido en columna resonante para el amortiguamiento (D_{min}), se grafica D/D_{min} en función de la deformación al corte en la Figura 5-11.



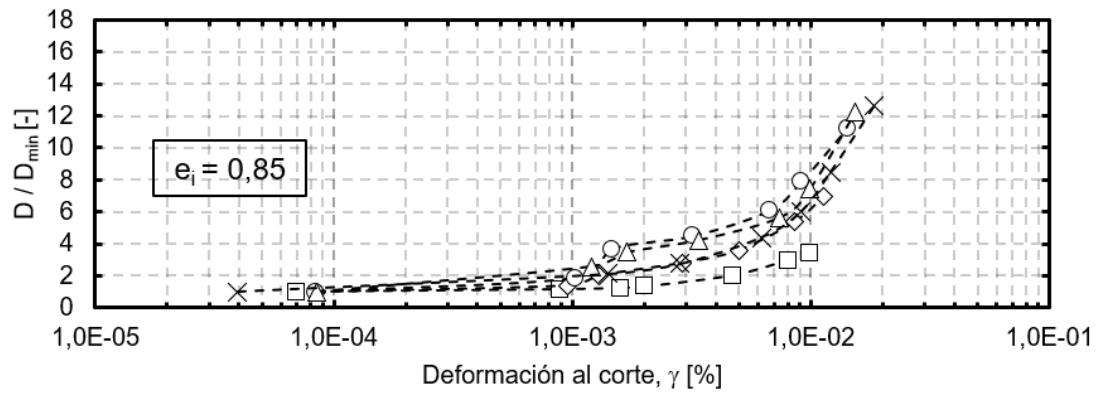
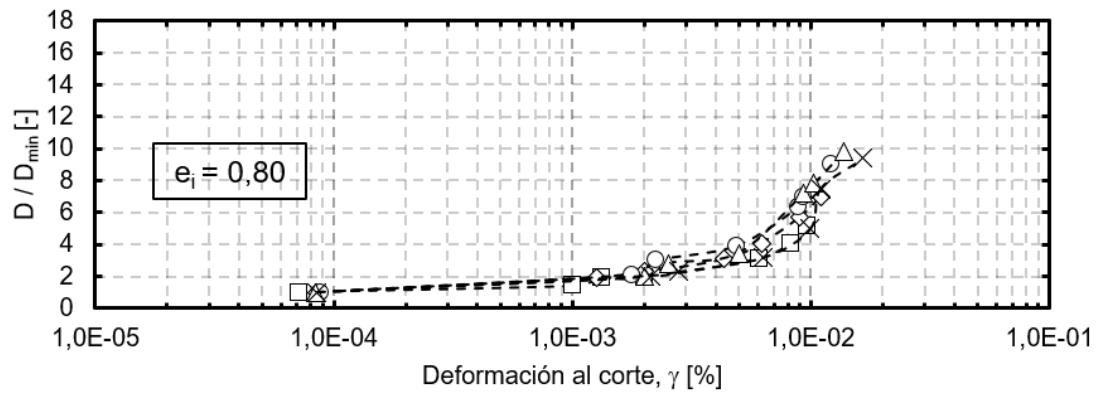
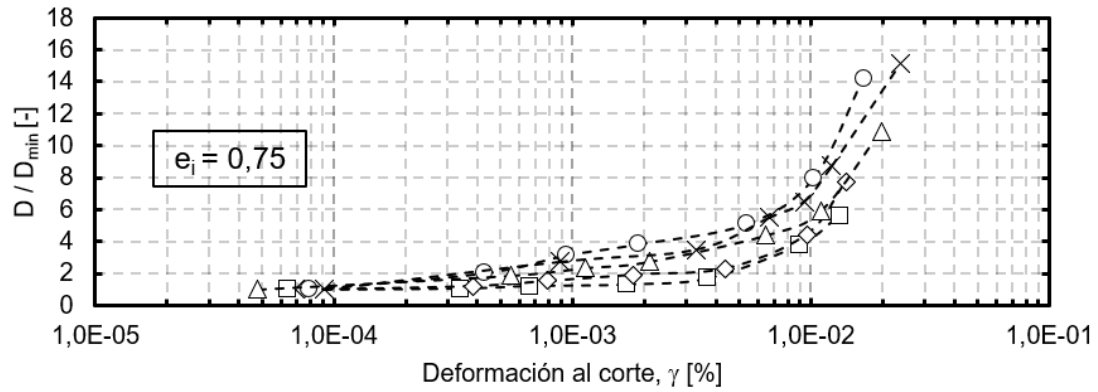
- □ - 98 kPa - ◇ - 196 kPa - ○ - 294 kPa - △ - 392 kPa - ✕ - 490 kPa

Figura 5-9: Resultados de G vs γ , para una arena con 10% CF, ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.



-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -✕- 490 kPa

Figura 5-10: Resultados de G/G_{max} vs γ , para una arena con 10%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.



- □ - 98 kPa - ◇ - 196 kPa - ○ - 294 kPa - △ - 392 kPa - ✕ - 490 kPa

Figura 5-11: Resultados de D/D_{min} vs γ para una arena con 10%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.

Finalmente, en la Figura 5-12 se muestran los valores de todos los ensayos realizados para una arena con 10%CF, de D/D_{min} vs G/G_{max} .

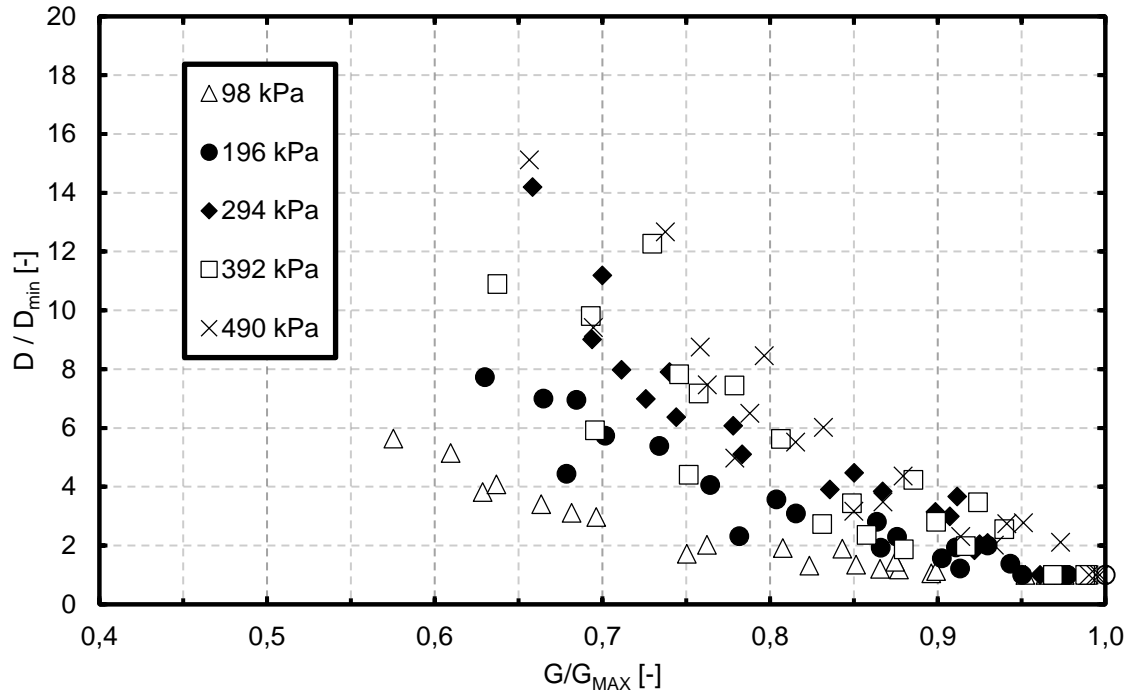
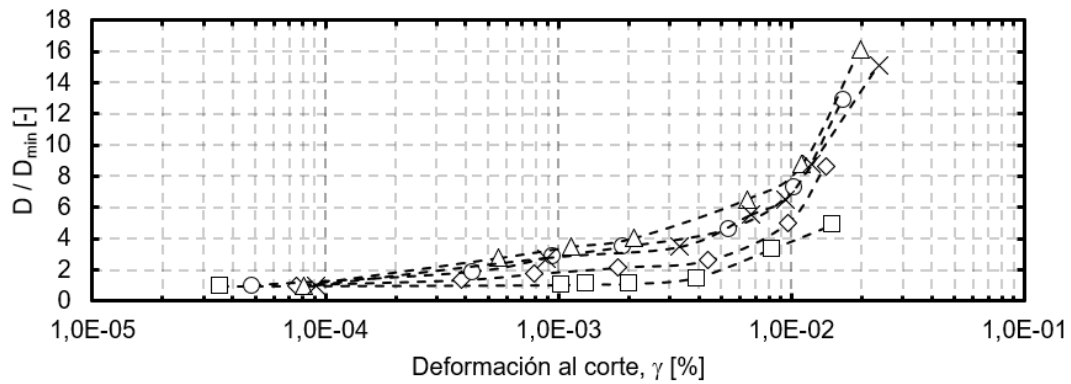
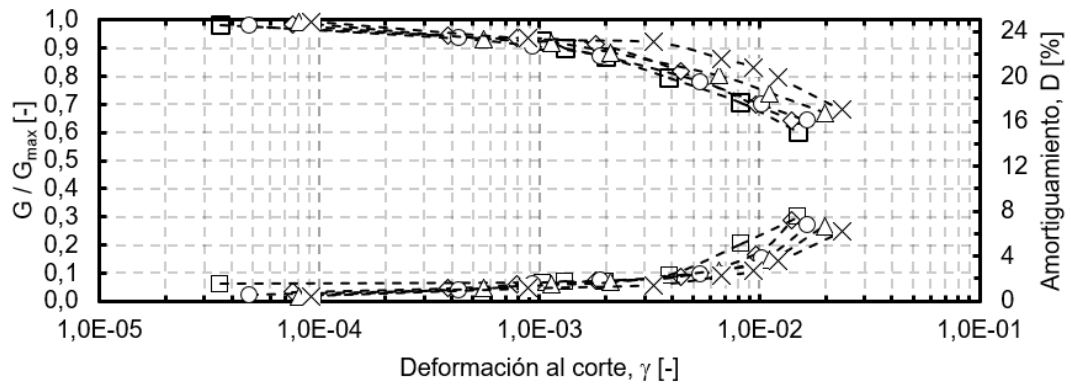
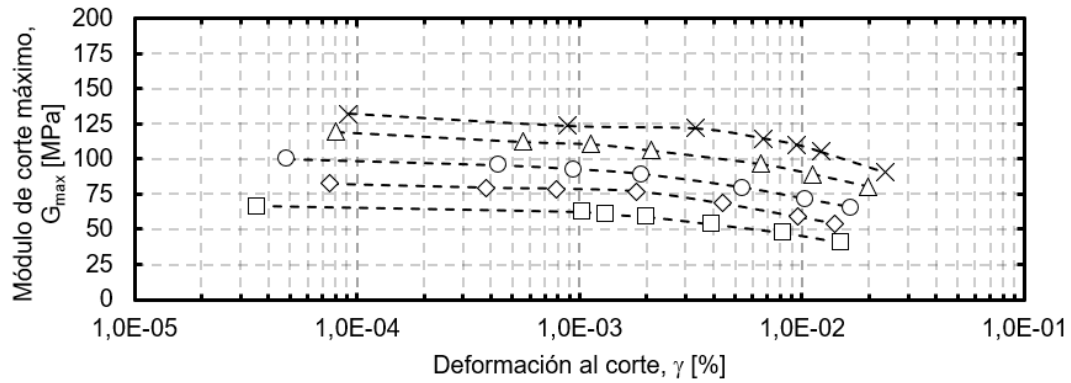


Figura 5-12: Resultados de D/D_{min} vs G/G_{max} , para una arena con 10%CF ensayada a diferentes estados de carga.

5.2.3. Resultados para 17% Contenido de Finos

Para Torito natural (Arena con 17%CF), sólo se ha realizado ensayos para un índice de vacío de confección inicial de 0,75. En la Figura 5-13, se muestra (a) resultados del módulo de corte (G) en función de la deformación al corte (γ), para distintos estados de carga, mientras que en (b) al considerar los valores obtenidos en bender element de G_{max} , se realiza el gráfico de G/G_{max} en función de la deformación al corte para distintos confinamientos, además de su amortiguamiento (D) y en (c) se muestran los resultados del amortiguamiento normalizado respecto a su valor mínimo obtenido (D/D_{min}) en función de la deformación al corte.



-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -✕- 490 kPa

Figura 5-13: Resultados para Torito Natural (17%CF) a un índice de confección inicial de 0,75, para (a) G vs g , (b) G/G_{max} vs g , y (c) D/D_{min} vs γ .

Finalmente, en la Figura 5-14 se muestran los valores de todos los ensayos realizados para una arena natural (17%CF), de D/D_{min} vs G/G_{max} .

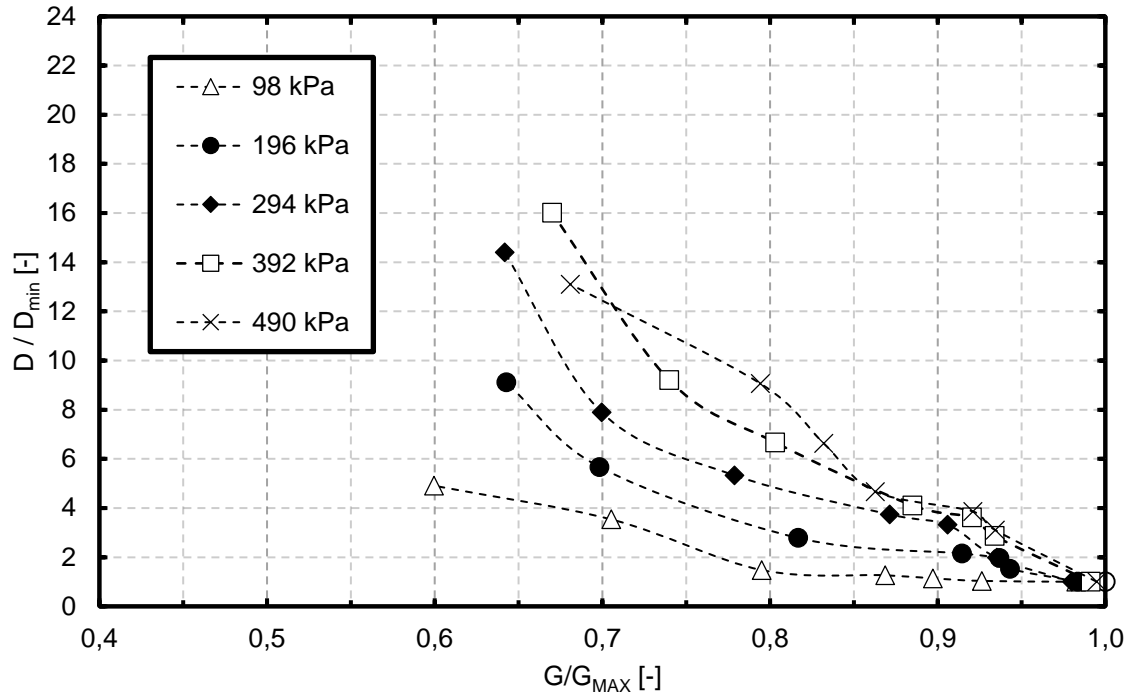


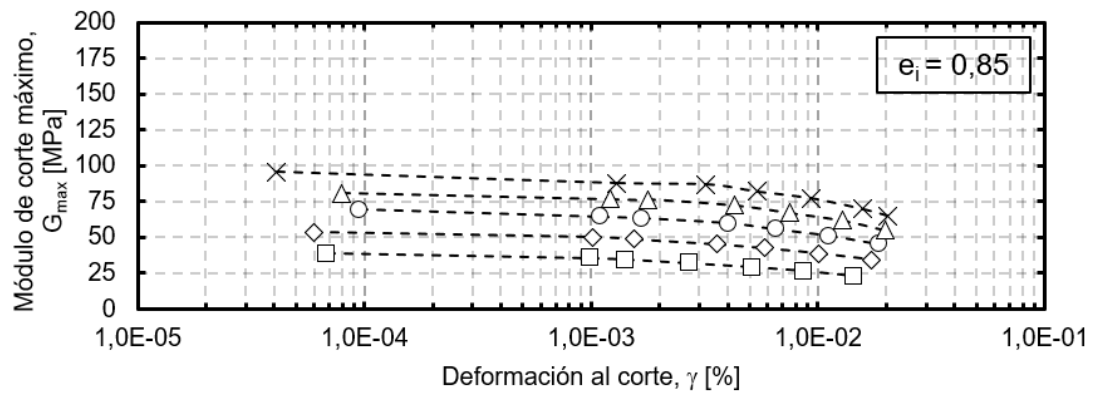
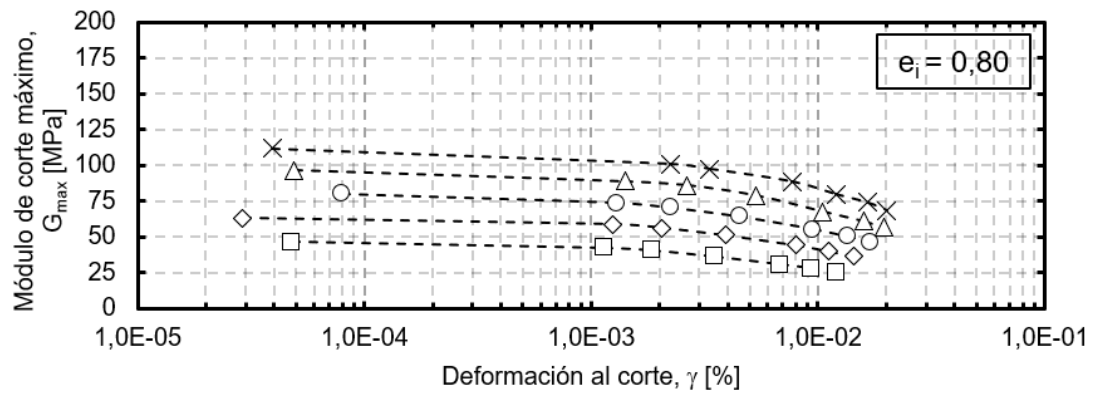
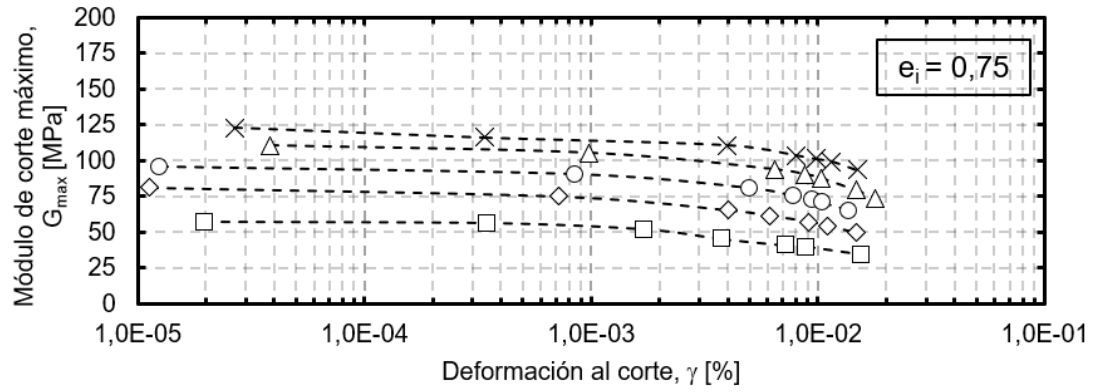
Figura 5-14: Resultados de D/D_{min} vs G/G_{max} , para una arena con 17%CF ensayada a diferentes estados de carga.

5.2.4. Resultados para 20% Contenido de Finos

Los resultados para una arena con 20% de contenido de finos obtenidos mediante columna resonante se muestran en la Figura 5-15, donde se grafica el módulo de corte a medida que aumenta la deformación al corte para un rango de presiones de confinamiento efectivo entre 1 kg/cm² a 5 kg/cm², para tres índices de vacíos iniciales distintos.

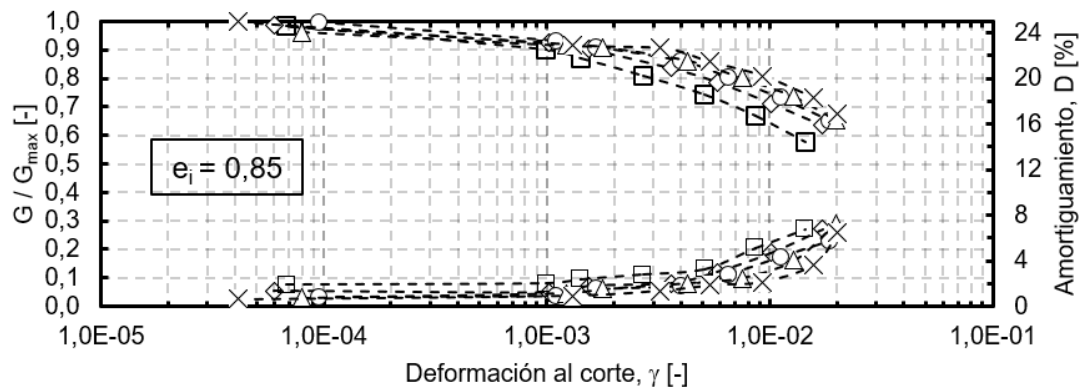
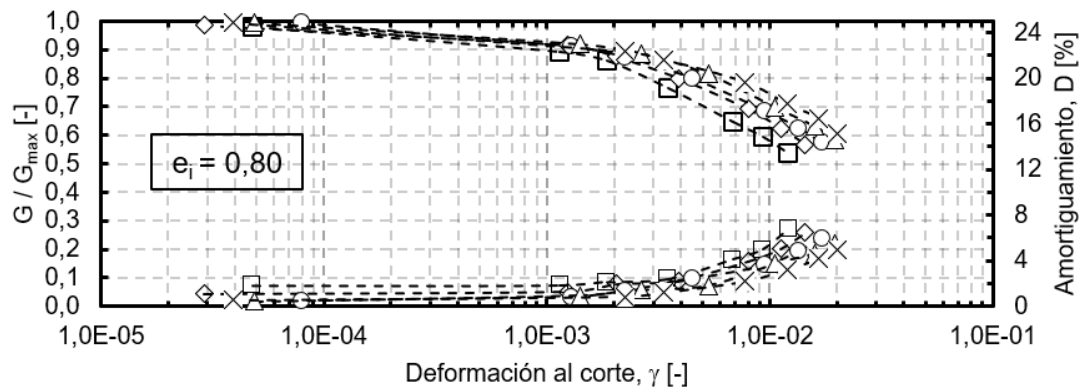
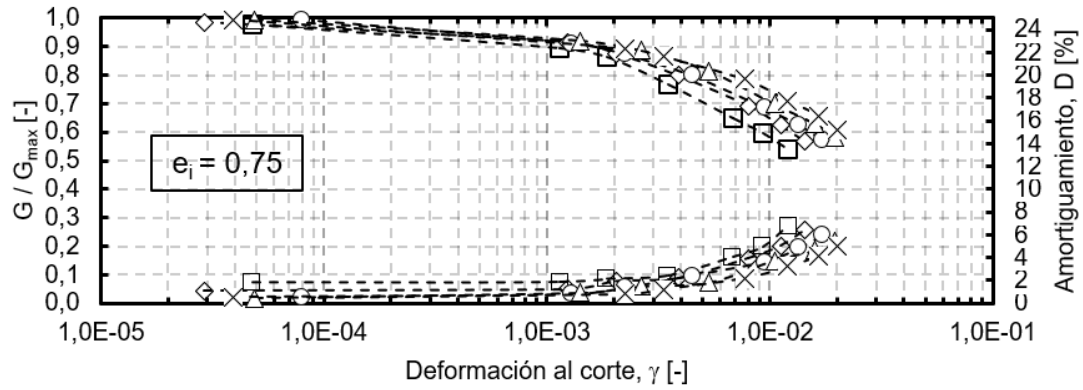
Al utilizar los valores obtenidos mediante bender element del módulo de corte máximo (G_{max}), es posible obtener la relación G/G_{max} en función de la deformación al corte. Estos resultados se pueden ver reflejados en la Figura 5-16, donde adicionalmente, se muestran los resultados obtenidos para el amortiguamiento. Ambos parámetros se grafican en función de la deformación al corte, para un rango de presiones de confinamiento entre 1 kg/cm² a 5 kg/cm², para tres índices de vacíos iniciales distintos.

Por otro lado, a partir del primer valor obtenido en columna resonante para el amortiguamiento (D_{min}), se grafica D/D_{min} en función de la deformación al corte en la Figura 5-17.



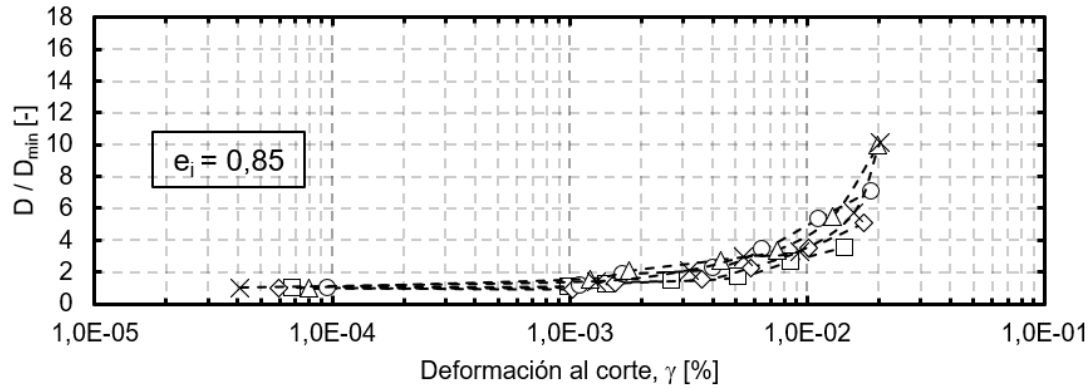
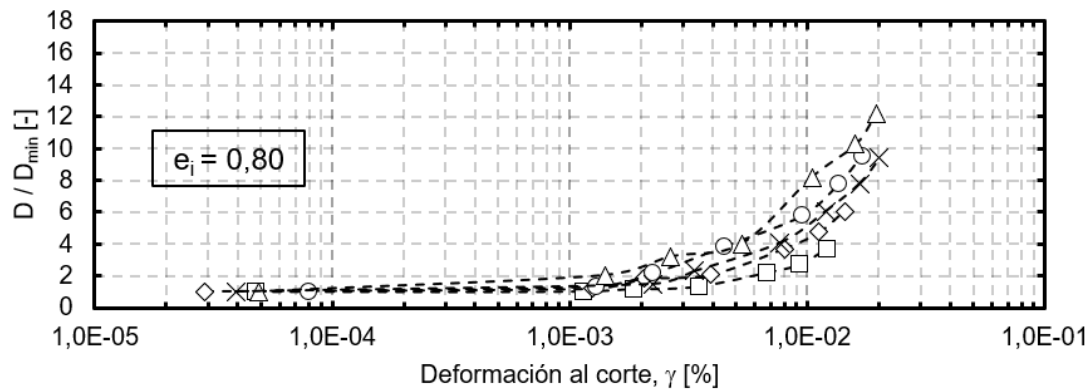
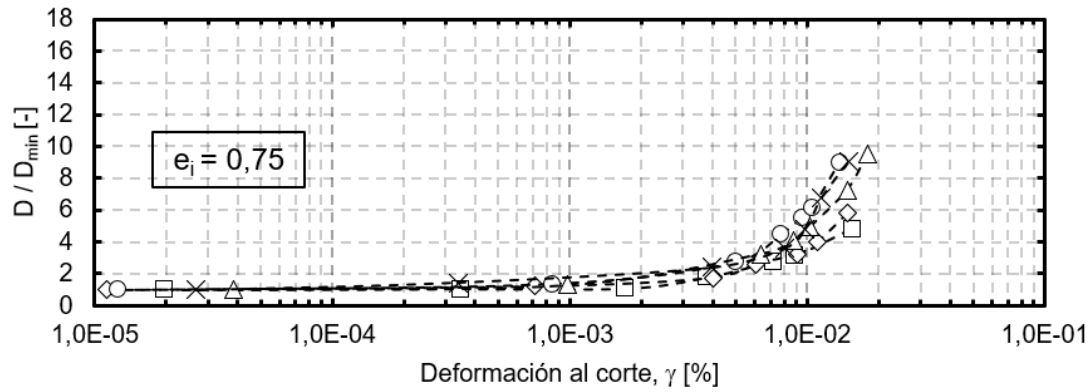
-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -✕- 490 kPa

Figura 5-15: Resultados de G vs γ , para una arena con 20% CF, ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.



-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -✕- 490 kPa

Figura 5-16: Resultados de G/G_{max} vs γ , para una arena con 20%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.



-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -✕- 490 kPa

Figura 5-17: Resultados de D/D_{min} vs γ para una arena con 20%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.

Finalmente, en la Figura 5-18 se muestran los valores de todos los ensayos realizados para una arena con 20%CF, de D/D_{min} vs G/G_{max} .

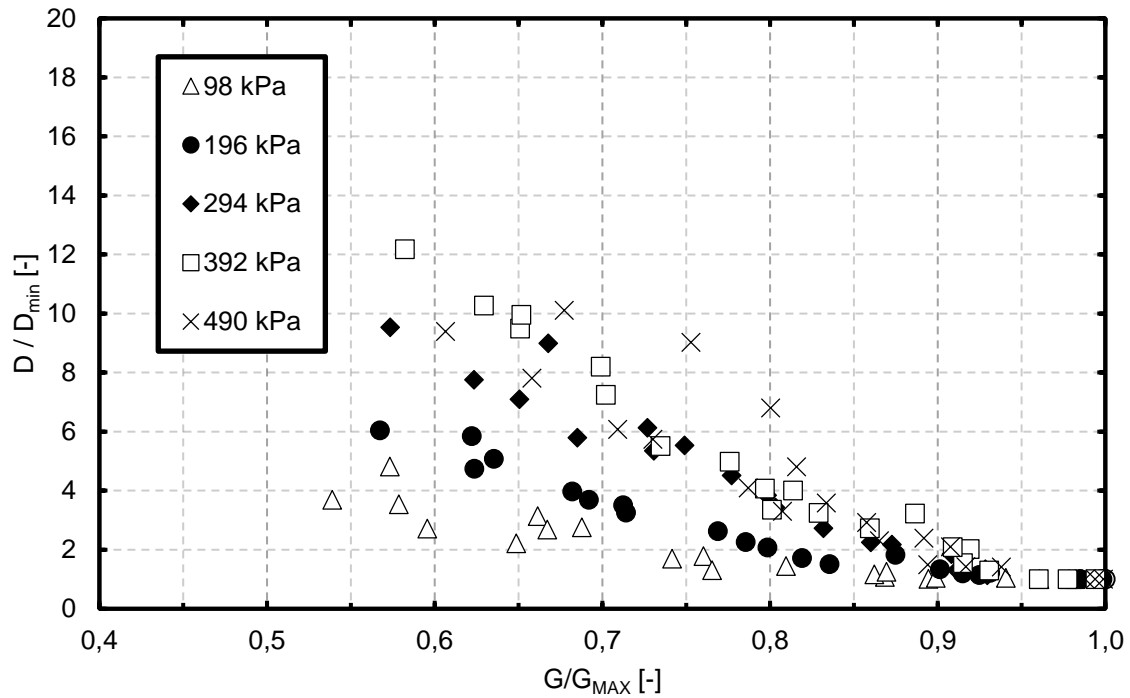


Figura 5-18: Resultados de D/D_{min} vs G/G_{max} , para una arena con 20%CF ensayada a diferentes estados de carga.

5.3. Discusión

El estudio realizado por Hardin y Drnevich (1972a y 1972b) es ampliamente utilizado como base para el estudio de los resultados de parámetros dinámicos como la degradación del módulo de corte (G/G_{max}) y el amortiguamiento (D). En dicho estudio se establece los parámetros que controlan el comportamiento dinámico del suelo y su importancia, donde para arenas, la deformación al corte (γ), el confinamiento efectivo (σ'_o) y el índice de vacío (e_o) tiene un impacto muy relevante en los parámetros sobre G y D . El efecto del estado de carga y el índice de vacío son analizados en los acápites 5.3.1 y 5.3.2 respectivamente, mientras que en el acápite 5.3.3 se estudia el efecto del contenido de finos.

A continuación, se presentan varias tablas con resumen con los resultados obtenidos mediante columna resonante para los distintos contenidos de finos y diferentes índices de vacíos iniciales.

Tabla 5-1: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena limpia para $e_i=0,75$.

%CF	σ [kPa]	Voltaje	e_f [-]	V_s [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G_{max} [MPa]	G/ G_{max}	D/ D_{min}
1	98	0,001	0,739	251,6	106,1	0,0000233	0,87	108,3	0,98	1,00
		0,1	0,738	246,6	101,4	0,000597	1,6		0,94	1,84
		0,2	0,737	244,3	99,6	0,00111	2,01		0,92	2,31
		0,5	0,737	240,8	96,8	0,0018	2,63		0,89	3,02
		0,7	0,736	225,1	84,6	0,0053	5,3		0,78	6,09
		0,8	0,736	215,9	77,8	0,0088	6,64		0,72	7,63
		1	0,735	204,0	69,5	0,0132	8,45		0,64	9,71
1	196	0,001	0,724	282,4	133,8	0,0000342	0,79	136,2	0,98	1,00
		0,1	0,723	279,7	129,5	0,000717	1,59		0,95	2,01
		0,2	0,720	279,3	129,5	0,0012	1,98		0,95	2,51
		0,5	0,718	275,5	126,0	0,0019	2,1		0,93	2,66
		0,7	0,717	266,3	117,7	0,0057	4,27		0,86	5,41
		0,8	0,716	254,8	107,8	0,0088	5,37		0,79	6,80
		1	0,715	239,4	95,3	0,0132	7,95		0,70	10,06
1	294	0,001	0,714	300,0	156,7	0,0000453	0,58	158,8	0,99	1,00
		0,1	0,715	301,6	154,7	0,000758	1,58		0,97	2,72
		0,2	0,714	299,3	152,6	0,00147	1,8		0,96	3,10
		0,5	0,712	296,6	150,2	0,002	2		0,95	3,45
		0,7	0,712	283,9	137,5	0,0056	3,48		0,87	6,00
		0,8	0,711	272,8	127,0	0,0086	4,4		0,80	7,59
		1	0,711	259,0	114,5	0,0128	6,65		0,72	11,47
1	392	0,001	0,707	314,2	175,7	0,0000163	0,48	177,3	0,99	1,00
		0,1	0,707	312,2	169,0	0,000789	1,45		0,95	3,02
		0,2	0,706	307,7	164,4	0,00198	1,67		0,93	3,48
		0,5	0,705	303,1	159,6	0,003	1,9		0,90	3,96
		0,7	0,704	292,3	148,6	0,0063	3,45		0,84	7,19
		0,8	0,704	283,5	139,7	0,0101	4,18		0,79	8,71
		1	0,704	274,0	130,5	0,0143	6,14		0,74	12,79
1	490	0,001	0,693	323,4	188,7	0,000032	0,27	192,0	0,98	1,00
		0,1	0,702	321,9	178,8	0,002233	1,22		0,93	4,52
		0,2	0,701	314,4	171,5	0,00319	1,46		0,89	5,41
		0,5	0,700	309,9	166,8	0,00382	1,49		0,87	5,52
		0,7	0,699	300,8	157,2	0,0072	2,32		0,82	8,59
		0,8	0,699	291,4	147,5	0,0109	3,98		0,77	14,74
		1	0,699	283,1	139,3	0,0139	5,56		0,73	20,59

Tabla 5-2: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena limpia para $e_i=0,80$.

%CF	σ [kPa]	Voltaje	e_f [-]	V_s [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G_{max} [MPa]	G/G _{max}	D/D _{min}
1	98	0,001	0,788	228,0	83,2	0,0000334	0,77	85,1	0,98	1,00
		0,1	0,782	223,3	79,7	0,000722	1,37		0,94	1,78
		0,2	0,781	215,6	74,2	0,00121	1,7		0,87	2,21
		0,5	0,779	211,3	71,4	0,0018	2,2		0,84	2,86
		0,7	0,778	197,0	62,0	0,0053	3,29		0,73	4,27
		0,8	0,777	192,3	59,2	0,0072	4,87		0,70	6,32
		1	0,776	188,1	56,6	0,0091	5,87		0,67	7,62
1	196	0,001	0,777	252,2	104,2	0,000037	0,44	104,6	1,00	1,00
		0,1	0,767	244,8	98,2	0,000867	0,91		0,94	2,07
		0,2	0,765	242,5	96,0	0,00131	1,45		0,92	3,30
		0,5	0,763	237,9	92,5	0,002	1,79		0,88	4,07
		0,7	0,761	223,3	81,5	0,0055	3,182		0,78	7,23
		0,8	0,759	218,2	78,0	0,0073	3,841		0,74	8,73
		1	0,759	212,8	74,1	0,0093	5,4		0,71	12,27
1	294	0,001	0,770	271,7	121,9	0,0000475	0,36	123,4	0,99	1,00
		0,1	0,765	269,0	118,3	0,0007086	0,84		0,96	1,45
		0,2	0,763	266,7	116,2	0,00132	1,25		0,94	2,16
		0,5	0,760	263,3	113,4	0,0019	1,82		0,92	3,14
		0,7	0,759	246,0	99,0	0,0066	2,61		0,80	4,50
		0,8	0,757	240,3	94,5	0,0082	2,98		0,77	5,14
		1	0,756	231,8	88,0	0,0109	4,56		0,71	7,86
1	392	0,001	0,766	291,3	144,6	0,00004434	0,37	146,0	0,99	1,00
		0,1	0,764	286,7	137,7	0,001032	0,57		0,94	1,54
		0,2	0,762	284,0	135,3	0,00165	1,16		0,93	3,14
		0,5	0,759	280,9	132,6	0,0024	1,52		0,91	4,11
		0,7	0,757	266,5	119,3	0,0068	2,8		0,82	7,57
		0,8	0,756	256,3	110,5	0,01	3,3		0,76	8,92
		1	0,755	252,8	107,5	0,011	3,75		0,74	10,14
1	490	0,001	0,753	309,1	164,9	5,7757E-05	0,27	165,5	1,00	1,00
		0,1	0,752	307,4	158,9	0,001255	0,46		0,96	1,70
		0,2	0,750	303,2	154,6	0,00235	0,98		0,93	3,63
		0,5	0,748	300,1	151,8	0,0033	1,35		0,92	5,00
		0,7	0,748	282,3	134,2	0,0087	1,88		0,81	6,96
		0,8	0,746	274,1	126,8	0,0108	3,56		0,77	13,19
		1	0,745	270,2	123,3	0,012	4,75		0,74	17,59

Tabla 5-3: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena limpia para $e_i=0,85$.

%CF	σ [kPa]	Voltaje	e_r [-]	V_s [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G_{max} [MPa]	G/G _{max}	D/D _{min}
1	98	0,001	0,827	205,9	69,1	0,000262	0,78	69,3	1,00	1,00
		0,1	0,826	198,1	63,2	0,000853	1,08		0,91	1,38
		0,2	0,825	195,7	61,8	0,00111	1,29		0,89	1,65
		0,5	0,823	190,7	58,7	0,0017	2,04		0,85	2,62
		0,7	0,822	176,2	50,2	0,005	3,05		0,72	3,91
		0,8	0,821	166,9	45,0	0,0077	4,24		0,65	5,44
		1	0,820	160,3	41,5	0,0099	5,66		0,60	7,26
1	196	0,001	0,818	232,2	87,0	0,000478	0,54	89,2	0,98	1,00
		0,1	0,816	228,9	83,2	0,000937	0,99		0,93	1,83
		0,2	0,814	226,5	81,6	0,00131	1,37		0,91	2,54
		0,5	0,812	221,1	77,8	0,002	1,92		0,87	3,56
		0,7	0,811	205,1	67,0	0,0058	2,32		0,75	4,30
		0,8	0,810	200,4	64,0	0,0073	3,35		0,72	6,20
		1	0,808	193,3	59,6	0,0095	4,96		0,67	9,19
1	294	0,001	0,810	260,7	110,4	0,000772	0,29	114,7	0,96	1,00
		0,1	0,808	259,3	107,0	0,000945	0,88		0,93	3,03
		0,2	0,806	257,7	105,9	0,00112	1,17		0,92	4,03
		0,5	0,804	252,7	102,0	0,002	1,58		0,89	5,45
		0,7	0,802	238,4	90,7	0,0057	1,92		0,79	6,62
		0,8	0,800	229,1	83,9	0,0078	2,82		0,73	9,72
		1	0,798	224,0	80,3	0,009	4,02		0,70	13,86
1	392	0,001	0,802	282,3	131,9	0,000763	0,255	134,7	0,98	1,00
		0,1	0,799	278,3	125,0	0,001088	0,97		0,93	3,80
		0,2	0,796	275,5	122,8	0,00179	1,05		0,91	4,12
		0,5	0,793	270,8	118,8	0,0027	1,75		0,88	6,86
		0,7	0,791	256,6	106,8	0,0061	2		0,79	7,84
		0,8	0,790	250,7	102,0	0,0079	2,61		0,76	10,24
		1	0,788	240,5	94,0	0,011	4,02		0,70	15,76
1	490	0,001	0,795	297,3	147,0	0,000643	0,196	150,2	0,98	1,00
		0,1	0,793	291,4	137,3	0,001104	0,84		0,91	4,29
		0,2	0,791	287,1	133,5	0,00232	1,25		0,89	6,38
		0,5	0,789	282,8	129,6	0,0038	1,65		0,86	8,42
		0,7	0,787	273,8	121,5	0,0083	2,79		0,81	14,23
		0,8	0,786	271,0	119,1	0,0101	3,82		0,79	19,49
		1	0,785	264,4	113,4	0,0125	5,2		0,76	26,53

Tabla 5-4: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena con 5%CF para $e_i=0,75$.

%CF	σ [kPa]	Voltaje	e_f [-]	V_s [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G_{max} [MPa]	G/G _{max}	D/D _{min}
5	98	0,001	0,723	224,2	85,8	3,68E-05	1,297	87,6	0,98	1,00
		0,1	0,722	216,2	78,7	0,000957	2,09		0,90	1,61
		0,2	0,720	214,7	77,7	0,00121	2,17		0,89	1,67
		0,5	0,719	210,9	75,0	0,002	2,87		0,86	2,21
		0,7	0,718	199,6	67,1	0,0057	4,33		0,77	3,34
		0,8	0,718	189,0	60,2	0,0098	6,43		0,69	4,96
		1	0,718	178,3	53,6	0,0143	8,07		0,61	6,22
5	196	0,001	0,714	251,8	106,2	5,74E-05	0,83	112,1	0,95	1,00
		0,1	0,710	255,8	107,8	0,000917	1,87		0,96	2,25
		0,2	0,708	253,5	106,0	0,0012	1,98		0,95	2,39
		0,5	0,706	250,9	103,9	0,0019	2,1		0,93	2,53
		0,7	0,705	237,5	93,0	0,0057	3,83		0,83	4,61
		0,8	0,704	225,1	83,7	0,0104	5,37		0,75	6,47
		1	0,703	215,4	76,6	0,0148	6,95		0,68	8,37
5	294	0,001	0,702	268,2	125,7	5,78E-05	0,74	130,3	0,96	1,00
		0,1	0,701	268,0	122,0	0,001125	1,85		0,94	2,50
		0,2	0,701	266,5	120,6	0,00142	2,02		0,93	2,73
		0,5	0,701	263,4	117,9	0,0023	2,23		0,91	3,01
		0,7	0,700	250,4	106,6	0,0062	2,59		0,82	3,50
		0,8	0,700	240,9	98,6	0,0104	4,36		0,76	5,89
		1	0,700	232,8	92,2	0,0143	5,68		0,71	7,68
5	392	0,001	0,695	282,6	139,5	3,9E-05	0,64	144,5	0,97	1,00
		0,1	0,708	284,3	134,5	0,002213	1,16		0,93	1,81
		0,2	0,708	280,5	132,1	0,003	1,69		0,91	2,64
		0,5	0,707	274,8	126,7	0,0042	1,75		0,88	2,73
		0,7	0,707	269,2	121,6	0,0068	1,93		0,84	3,02
		0,8	0,707	247,6	102,9	0,0167	4,73		0,71	7,39
		1	0,707	237,4	94,6	0,0221	6,13		0,65	9,58
5	490	0,001	0,686	296,6	154,0	5,9E-05	0,49	159,4	0,97	1,00
		0,1	0,685	296,0	147,7	0,002213	1,16		0,93	2,37
		0,2	0,685	294,5	146,3	0,003	1,57		0,92	3,20
		0,5	0,684	287,3	139,2	0,0042	1,68		0,87	3,43
		0,7	0,684	281,3	133,5	0,0068	1,89		0,84	3,86
		0,8	0,684	262,3	116,1	0,0167	4,3		0,73	8,78
		1	0,684	251,4	106,6	0,0221	5,61		0,67	11,45

Tabla 5-5: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena con 5%CF para $e_i=0,80$.

%CF	σ [kPa]	Voltaje	e_f [-]	V_s [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G_{max} [MPa]	G/G _{max}	D/D _{min}
5	98	0,001	0,781	199,6	65,6	4,65E-05	1,084	70,2	0,93	1,00
		0,1	0,778	194,0	61,5	0,000967	1,32		0,88	1,22
		0,2	0,775	191,7	60,1	0,00127	1,79		0,86	1,65
		0,5	0,772	188,2	58,0	0,002	2,21		0,83	2,04
		0,7	0,770	174,7	50,0	0,0059	3,76		0,71	3,47
		0,8	0,769	169,6	47,2	0,0077	4,84		0,67	4,46
		1	0,769	165,0	44,6	0,0092	5,74		0,64	5,30
5	196	0,001	0,762	226,0	85,9	5,71E-05	0,43	87,1	0,99	1,00
		0,1	0,762	221,4	80,7	0,001039	1,26		0,93	2,93
		0,2	0,759	218,3	78,7	0,00141	1,46		0,90	3,40
		0,5	0,758	214,4	75,9	0,0022	2,03		0,87	4,72
		0,7	0,757	201,4	67,0	0,0056	3,27		0,77	7,60
		0,8	0,756	194,5	62,5	0,0085	4,43		0,72	10,30
		1	0,754	187,9	58,4	0,0107	5,42		0,67	12,60
5	294	0,001	0,756	253,9	107,3	4,79E-05	0,46	109,7	0,98	1,00
		0,1	0,752	249,3	101,2	0,001163	1,25		0,92	1,69
		0,2	0,751	246,6	99,0	0,00153	1,64		0,90	2,22
		0,5	0,749	243,1	96,4	0,0022	2,18		0,88	2,95
		0,7	0,747	229,0	85,5	0,006	2,83		0,78	3,82
		0,8	0,746	219,8	78,9	0,009	3,73		0,72	5,04
		1	0,744	215,2	75,7	0,011	4,86		0,69	6,57
5	392	0,001	0,746	270,2	124,6	5,82E-05	0,32	126,0	0,99	1,00
		0,1	0,744	264,2	115,8	0,00122	0,94		0,92	2,94
		0,2	0,743	260,3	112,4	0,00221	1,45		0,89	4,53
		0,5	0,742	256,4	109,2	0,0033	1,66		0,87	5,19
		0,7	0,740	247,6	101,9	0,0061	2,19		0,81	6,84
		0,8	0,738	233,7	90,9	0,0108	3,63		0,72	11,34
		1	0,737	228,6	87,1	0,0129	4,61		0,69	14,41
5	490	0,001	0,738	285,1	140,0	6,81E-05	0,37	142,0	0,99	1,00
		0,1	0,741	279,6	129,4	0,002261	1,02		0,91	2,76
		0,2	0,740	276,2	126,7	0,00303	1,34		0,89	3,62
		0,5	0,739	272,7	123,6	0,0042	1,42		0,87	3,84
		0,7	0,737	265,8	117,5	0,0064	2,62		0,83	7,08
		0,8	0,735	246,2	101,1	0,0135	3,73		0,71	10,08
		1	0,733	240,9	96,8	0,0167	4,56		0,68	12,32

Tabla 5-6: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena con 5%CF para $e_i=0,85$.

%CF	σ [kPa]	Voltaje	e_f [-]	V_s [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G_{max} [MPa]	G/G _{max}	D/D _{min}
5	98	0,001	0,830	194,2	59,9	6,86E-05	0,989	63,7	0,94	1,00
		0,1	0,827	191,8	58,0	0,000967	1,27		0,91	1,28
		0,2	0,826	190,2	57,1	0,00127	1,79		0,90	1,81
		0,5	0,824	187,9	55,7	0,002	2,21		0,88	2,23
		0,7	0,822	177,4	49,7	0,0059	3,26		0,78	3,30
		0,8	0,820	172,4	47,0	0,0077	4,37		0,74	4,42
		1	0,817	168,1	44,8	0,0105	5,67		0,70	5,73
5	196	0,001	0,817	218,1	76,9	4,81E-05	0,63	82,6	0,93	1,00
		0,1	0,815	218,9	76,2	0,001039	0,98		0,92	1,56
		0,2	0,814	218,1	75,7	0,00141	1,36		0,92	2,16
		0,5	0,812	215,4	73,9	0,0022	1,8		0,89	2,86
		0,7	0,809	205,6	67,5	0,0056	2,82		0,82	4,48
		0,8	0,806	198,6	63,1	0,0085	4,13		0,76	6,56
		1	0,803	195,5	61,2	0,0111	5,47		0,74	8,68
5	294	0,001	0,807	241,9	96,3	2,82E-05	0,44	100,8	0,95	1,00
		0,1	0,805	241,7	93,9	0,001163	0,82		0,93	1,86
		0,2	0,803	240,9	93,4	0,00153	1,36		0,93	3,09
		0,5	0,802	238,9	91,9	0,0022	1,98		0,91	4,50
		0,7	0,799	229,5	85,0	0,006	2,14		0,84	4,86
		0,8	0,798	222,8	80,1	0,009	3,32		0,79	7,55
		1	0,796	218,6	77,2	0,011	4,65		0,77	10,57
5	392	0,001	0,798	261,0	112,4	8,15E-05	0,34	118,0	0,95	1,00
		0,1	0,795	260,0	108,7	0,00122	0,75		0,92	2,21
		0,2	0,794	258,4	107,3	0,00221	1,01		0,91	2,97
		0,5	0,791	253,4	103,4	0,0033	1,59		0,88	4,68
		0,7	0,789	246,7	98,2	0,0061	2,19		0,83	6,44
		0,8	0,788	239,3	92,3	0,0108	4,28		0,78	12,59
		1	0,786	235,0	89,1	0,0129	5,06		0,76	14,88
5	490	0,001	0,782	277,5	127,7	4,81E-05	0,45	134,6	0,95	1,00
		0,1	0,780	276,7	122,6	0,002261	0,49		0,91	1,09
		0,2	0,777	274,0	120,4	0,00303	1,34		0,89	2,98
		0,5	0,774	269,7	116,9	0,0042	1,42		0,87	3,16
		0,7	0,771	265,4	113,4	0,0064	2,16		0,84	4,80
		0,8	0,768	251,1	101,7	0,0135	4,13		0,76	9,18
		1	0,765	241,4	94,1	0,0167	4,96		0,70	11,02

Tabla 5-7: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena con 10%CF para $e_i=0,75$.

%CF	σ [kPa]	Voltaje	e_r [-]	V_s [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G_{max} [MPa]	G/ G_{max}	D/ D_{min}
10	98	0,001	0,727	218,8	82,1	6,44E-05	1,3301	84,1	0,98	1,00
		0,1	0,727	211,1	75,4	0,00034	1,4		0,90	1,05
		0,2	0,727	208,8	73,8	0,00066	1,58		0,88	1,19
		0,5	0,726	202,2	69,3	0,0017	1,75		0,82	1,32
		0,7	0,726	193,1	63,1	0,0037	2,28		0,75	1,71
		0,8	0,725	176,6	52,9	0,009	5,08		0,63	3,82
		1	0,724	168,9	48,4	0,0132	7,5		0,58	5,64
10	196	0,001	0,717	244,1	102,8	7,54E-05	0,93	108,2	0,95	1,00
		0,1	0,717	241,5	98,8	0,000382	1,13		0,91	1,22
		0,2	0,716	240,0	97,6	0,00079	1,46		0,90	1,57
		0,5	0,715	235,1	93,7	0,0018	1,79		0,87	1,92
		0,7	0,714	223,3	84,6	0,0044	2,16		0,78	2,32
		0,8	0,714	208,1	73,4	0,0096	4,13		0,68	4,44
		1	0,714	200,5	68,1	0,014	7,19		0,63	7,73
10	294	0,001	0,699	262,9	121,5	7,85E-05	0,474	126,4	0,96	1,00
		0,1	0,699	261,8	117,0	0,00043	0,97		0,93	2,05
		0,2	0,698	258,0	113,6	0,00094	1,49		0,90	3,14
		0,5	0,698	253,4	109,6	0,0019	1,82		0,87	3,84
		0,7	0,698	240,9	99,1	0,0054	2,42		0,78	5,11
		0,8	0,697	229,5	89,9	0,0103	3,78		0,71	7,97
		1	0,697	220,8	83,3	0,0166	6,73		0,66	14,20
10	392	0,001	0,681	278,8	138,4	4,81E-05	0,615	142,8	0,97	1,00
		0,1	0,681	271,2	125,7	0,000556	1,15		0,88	1,87
		0,2	0,681	267,8	122,5	0,00113	1,45		0,86	2,36
		0,5	0,681	263,6	118,7	0,0021	1,68		0,83	2,73
		0,7	0,680	250,6	107,3	0,0065	2,71		0,75	4,41
		0,8	0,680	241,1	99,4	0,0111	3,64		0,70	5,92
		1	0,680	230,8	91,1	0,0198	6,7		0,64	10,89
10	490	0,001	0,672	287,6	152,8	9,16E-05	0,408	153,3	1,00	1,00
		0,1	0,671	286,2	144,3	0,000885	1,12		0,94	2,75
		0,2	0,671	274,8	133,0	0,00331	1,42		0,87	3,48
		0,5	0,671	266,4	125,0	0,0067	2,25		0,82	5,51
		0,7	0,670	261,8	120,8	0,0094	2,65		0,79	6,50
		0,8	0,670	256,9	116,3	0,0122	3,57		0,76	8,75
		1	0,670	238,9	100,7	0,0237	6,17		0,66	15,12

Tabla 5-8: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena con 10%CF para $e_i=0,80$.

%CF	σ [kPa]	Voltaje	e_f [-]	V_s [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G_{max} [MPa]	G/G _{max}	D/D _{min}
10	98	0,001	0,778	190,6	59,4	7,12E-05	0,94	61,6	0,96	1,00
		0,1	0,776	182,4	53,9	0,001003	1,36		0,87	1,45
		0,2	0,774	178,9	51,9	0,00133	1,78		0,84	1,89
		0,5	0,772	175,0	49,7	0,002	1,8		0,81	1,91
		0,7	0,769	160,7	42,0	0,0061	2,93		0,68	3,12
		0,8	0,768	155,3	39,2	0,0082	3,84		0,64	4,09
		1	0,766	151,8	37,5	0,0097	4,84		0,61	5,15
10	196	0,001	0,764	217,8	80,4	8,45E-05	0,64	82,3	0,98	1,00
		0,1	0,762	212,3	74,9	0,001267	1,24		0,91	1,94
		0,2	0,760	208,0	72,1	0,00201	1,47		0,88	2,30
		0,5	0,758	200,6	67,1	0,0043	1,98		0,82	3,09
		0,7	0,755	194,0	62,9	0,0062	2,6		0,76	4,06
		0,8	0,753	185,8	57,7	0,009	3,67		0,70	5,73
		1	0,751	180,8	54,7	0,011	4,48		0,66	7,00
10	294	0,001	0,752	239,4	98,4	8,78E-05	0,51	100,6	0,98	1,00
		0,1	0,748	236,2	93,5	0,001775	0,99		0,93	2,09
		0,2	0,745	233,2	91,2	0,00223	1,42		0,91	3,00
		0,5	0,741	223,6	84,0	0,0049	1,85		0,84	3,90
		0,7	0,739	210,9	74,8	0,0089	3,02		0,74	6,37
		0,8	0,737	208,2	73,0	0,0093	3,31		0,73	6,98
		1	0,733	203,2	69,8	0,0122	4,27		0,69	9,01
10	392	0,001	0,742	260,9	116,4	8,39E-05	0,424	117,6	0,99	1,00
		0,1	0,740	254,9	107,8	0,001999	0,84		0,92	1,98
		0,2	0,736	252,2	105,7	0,00253	1,19		0,90	2,81
		0,5	0,733	244,9	99,8	0,005	1,46		0,85	3,44
		0,7	0,732	231,3	89,1	0,0093	3,04		0,76	7,17
		0,8	0,730	229,4	87,7	0,0103	3,32		0,75	7,83
		1	0,727	220,9	81,5	0,0137	4,16		0,69	9,81
10	490	0,001	0,730	274,4	132,1	8,48E-05	0,442	132,9	0,99	1,00
		0,1	0,728	271,1	124,1	0,002126	0,89		0,93	2,01
		0,2	0,726	268,0	121,4	0,00278	1,02		0,91	2,31
		0,5	0,723	258,3	113,0	0,0063	1,4		0,85	3,17
		0,7	0,720	247,0	103,5	0,0099	2,2		0,78	4,98
		0,8	0,718	244,3	101,3	0,011	3,3		0,76	7,47
		1	0,716	233,0	92,3	0,0165	4,16		0,69	9,41

Tabla 5-9: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena con 10%CF para $e_i=0,85$.

%CF	σ [kPa]	Voltaje	e_f [-]	V_s [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G_{max} [MPa]	G/G _{max}	D/D _{min}
10	98	0,001	0,828	184,4	55,0	6,96E-05	1,396	57,8	0,95	1,00
		0,1	0,825	180,0	51,9	0,000885	1,58		0,90	1,13
		0,2	0,821	176,4	50,0	0,0016	1,68		0,87	1,20
		0,5	0,819	174,9	49,2	0,002	1,88		0,85	1,35
		0,7	0,817	165,4	44,1	0,0047	2,82		0,76	2,02
		0,8	0,814	158,0	40,2	0,008	4,15		0,70	2,97
		1	0,811	154,0	38,3	0,0099	4,76		0,66	3,41
10	196	0,001	0,814	216,3	75,1	0,000085	0,68	77,0	0,98	1,00
		0,1	0,811	214,4	72,6	0,00096	0,94		0,94	1,38
		0,2	0,810	212,8	71,5	0,0013	1,36		0,93	2,00
		0,5	0,808	205,0	66,5	0,0029	1,91		0,86	2,81
		0,7	0,806	197,7	61,9	0,005	2,43		0,80	3,57
		0,8	0,803	188,7	56,5	0,0086	3,66		0,73	5,38
		1	0,800	182,1	52,7	0,0113	4,73		0,68	6,96
10	294	0,001	0,799	238,1	92,8	8,39E-05	0,42	94,8	0,98	1,00
		0,1	0,796	234,0	87,4	0,001034	0,77		0,92	1,83
		0,2	0,793	232,5	86,4	0,00147	1,54		0,91	3,67
		0,5	0,789	224,3	80,6	0,0032	1,88		0,85	4,48
		0,7	0,788	214,6	73,8	0,0067	2,55		0,78	6,07
		0,8	0,785	209,1	70,2	0,0091	3,32		0,74	7,90
		1	0,784	203,3	66,4	0,0142	4,7		0,70	11,19
10	392	0,001	0,791	256,1	107,7	0,000085	0,38	109,0	0,99	1,00
		0,1	0,789	253,5	102,4	0,001198	0,97		0,94	2,55
		0,2	0,786	251,2	100,7	0,00169	1,32		0,92	3,47
		0,5	0,784	245,7	96,5	0,0034	1,61		0,89	4,24
		0,7	0,782	234,4	87,9	0,0074	2,14		0,81	5,63
		0,8	0,779	230,2	84,9	0,0099	2,83		0,78	7,45
		1	0,777	222,8	79,5	0,0154	4,66		0,73	12,26
10	490	0,001	0,783	266,0	120,5	3,94E-05	0,364	121,7	0,99	1,00
		0,1	0,780	268,3	118,5	0,001412	0,77		0,97	2,12
		0,2	0,778	265,2	115,8	0,00283	1,01		0,95	2,77
		0,5	0,775	254,7	107,0	0,0062	1,59		0,88	4,37
		0,7	0,773	247,7	101,2	0,0091	2,19		0,83	6,02
		0,8	0,771	242,2	96,9	0,0121	3,08		0,80	8,46
		1	0,769	232,9	89,8	0,0185	4,61		0,74	12,66

Tabla 5-10: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena con 17%CF para $e_i=0,75$.

%CF	σ [kPa]	Voltaje	e_r [-]	V_s [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G_{max} [MPa]	G/G _{max}	D/D _{min}
17	98	0,001	0,727	195,5	66,5	3,55E-05	1,618	67,6	0,98	1,00
		0,1	0,726	191,1	62,7	0,001034	1,674		0,93	1,03
		0,2	0,725	188,0	60,7	0,00131	1,8443		0,90	1,14
		0,5	0,724	184,9	58,8	0,002	2,046		0,87	1,26
		0,7	0,723	176,8	53,8	0,0039	2,3884		0,80	1,48
		0,8	0,722	166,5	47,7	0,0082	5,723		0,71	3,54
		1	0,721	153,5	40,6	0,015	7,94		0,60	4,91
17	196	0,001	0,717	219,4	82,7	7,54E-05	0,877	84,1	0,98	1,00
		0,1	0,716	216,8	79,3	0,000382	1,341		0,94	1,53
		0,2	0,715	216,0	78,8	0,00079	1,72		0,94	1,96
		0,5	0,714	213,3	76,9	0,0018	1,887		0,91	2,15
		0,7	0,712	201,5	68,7	0,0044	2,44		0,82	2,78
		0,8	0,711	186,3	58,8	0,0096	4,97		0,70	5,67
		1	0,710	178,6	54,1	0,014	7,99		0,64	9,11
17	294	0,001	0,699	239,9	100,4	4,85E-05	0,503	102,4	0,98	1,00
		0,1	0,698	237,8	95,8	0,00043	0,994		0,94	1,98
		0,2	0,697	234,0	92,8	0,00094	1,67		0,91	3,32
		0,5	0,696	229,4	89,3	0,0019	1,88		0,87	3,74
		0,7	0,695	216,9	79,8	0,0054	2,68		0,78	5,33
		0,8	0,694	205,4	71,6	0,0103	3,97		0,70	7,89
		1	0,692	196,7	65,7	0,0166	7,24		0,64	14,39
17	392	0,001	0,681	258,0	119,3	8,05E-05	0,4334	120,3	0,99	1,00
		0,1	0,680	255,6	112,4	0,000556	1,24		0,93	2,86
		0,2	0,679	253,6	110,7	0,00113	1,57		0,92	3,62
		0,5	0,679	248,6	106,5	0,0021	1,78		0,88	4,11
		0,7	0,677	236,8	96,6	0,0065	2,89		0,80	6,67
		0,8	0,677	227,2	89,0	0,0111	3,99		0,74	9,21
		1	0,675	216,1	80,6	0,0198	6,94		0,67	16,01
17	490	0,001	0,668	263,3	132,0	9,16E-05	0,448	132,7	0,99	1,00
		0,1	0,667	261,8	124,0	0,000885	1,39		0,93	3,10
		0,2	0,666	259,8	122,2	0,00331	1,73		0,92	3,86
		0,5	0,665	251,4	114,5	0,0067	2,09		0,86	4,67
		0,7	0,664	246,8	110,4	0,0094	2,97		0,83	6,63
		0,8	0,663	241,0	105,4	0,0122	4,06		0,79	9,06
		1	0,662	223,1	90,4	0,0237	5,87		0,68	13,10

Tabla 5-11: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena con 20%CF para $e_i=0,75$.

%CF	σ [kPa]	Voltaje	e_f [-]	V_s [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G_{max} [MPa]	G/G _{max}	D/D _{min}
20	98	0,001	0,721	182,1	57,3	1,97E-05	1,804	59,7	0,96	1,00
		0,1	0,721	181,7	56,1	0,000348	1,876		0,94	1,04
		0,2	0,720	174,5	51,8	0,00171	1,949		0,87	1,08
		0,5	0,718	163,1	45,4	0,0038	3,22		0,76	1,78
		0,7	0,718	155,2	41,0	0,0072	4,98		0,69	2,76
		0,8	0,717	152,2	39,5	0,0089	5,65		0,66	3,13
		1	0,716	141,6	34,2	0,0155	8,69		0,57	4,82
20	196	0,001	0,695	211,4	79,9	1,13E-05	1,22	80,1	1,00	1,00
		0,1	0,694	207,6	74,6	0,000716	1,484		0,93	1,22
		0,2	0,694	194,7	65,6	0,00403	2,1		0,82	1,72
		0,5	0,693	188,6	61,6	0,0061	3,2		0,77	2,62
		0,7	0,693	181,7	57,2	0,0091	3,97		0,71	3,25
		0,8	0,693	177,6	54,6	0,011	4,84		0,68	3,97
		1	0,692	169,6	49,8	0,0148	7,13		0,62	5,84
20	294	0,001	0,689	232,3	95,8	1,25E-05	0,627	97,3	0,98	1,00
		0,1	0,689	229,7	90,4	0,000847	0,838		0,93	1,34
		0,2	0,689	217,4	81,0	0,00498	1,71		0,83	2,73
		0,5	0,688	210,1	75,6	0,0078	2,83		0,78	4,51
		0,7	0,688	206,3	72,9	0,0095	3,47		0,75	5,53
		0,8	0,688	203,2	70,7	0,0105	3,84		0,73	6,12
		1	0,688	194,7	65,0	0,0137	5,64		0,67	9,00
20	392	0,001	0,678	249,3	110,7	3,85E-05	0,57	113,3	0,98	1,00
		0,1	0,670	247,4	105,4	0,000982	0,74		0,93	1,30
		0,2	0,669	234,0	93,9	0,00641	1,85		0,83	3,25
		0,5	0,669	229,4	90,3	0,0088	2,32		0,80	4,07
		0,7	0,669	226,4	87,9	0,0103	2,84		0,78	4,98
		0,8	0,669	215,3	79,5	0,0147	4,13		0,70	7,25
		1	0,668	207,3	73,7	0,0179	5,41		0,65	9,49
20	490	0,001	0,672	260,1	122,7	2,68E-05	0,46	124,2	0,99	1,00
		0,1	0,671	259,4	116,5	0,000338	0,65		0,94	1,41
		0,2	0,671	252,9	110,8	0,00399	1,1		0,89	2,39
		0,5	0,670	244,5	103,5	0,008	1,65		0,83	3,59
		0,7	0,670	241,8	101,3	0,0098	2,21		0,82	4,80
		0,8	0,670	239,5	99,4	0,0115	3,13		0,80	6,80
		1	0,669	232,3	93,5	0,0149	4,15		0,75	9,02

Tabla 5-12: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena con 20%CF para $e_i=0,80$.

%CF	σ [kPa]	Voltaje	e_f [-]	V_s [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G_{max} [MPa]	G/G _{max}	D/D _{min}
20	98	0,001	0,769	167,7	46,4	4,77E-05	1,84	47,4	0,98	1,00
		0,1	0,767	161,6	42,4	0,001145	1,857		0,89	1,01
		0,2	0,765	158,5	40,9	0,00186	2,14		0,86	1,16
		0,5	0,762	149,3	36,3	0,0035	2,41		0,77	1,31
		0,7	0,760	137,3	30,7	0,0068	4,07		0,65	2,21
		0,8	0,758	131,5	28,2	0,0093	5		0,60	2,72
		1	0,755	125,0	25,6	0,0121	6,79		0,54	3,69
20	196	0,001	0,752	193,6	63,1	2,91E-05	1,064	64,1	0,99	1,00
		0,1	0,749	188,8	58,6	0,001248	1,27		0,91	1,19
		0,2	0,747	184,6	56,1	0,00205	1,94		0,87	1,82
		0,5	0,744	176,2	51,2	0,0039	2,21		0,80	2,08
		0,7	0,741	163,9	44,3	0,008	3,93		0,69	3,69
		0,8	0,738	155,4	40,0	0,0112	5,05		0,62	4,75
		1	0,736	148,1	36,4	0,0144	6,43		0,57	6,04
20	294	0,001	0,736	216,3	80,4	7,94E-05	0,49	80,8	0,99	1,00
		0,1	0,734	210,7	73,7	0,001291	0,82		0,91	1,31
		0,2	0,732	206,1	70,6	0,00223	1,36		0,87	2,17
		0,5	0,729	196,9	64,5	0,0045	2,41		0,80	3,84
		0,7	0,727	182,3	55,4	0,0095	3,63		0,69	5,79
		0,8	0,725	173,8	50,4	0,0135	4,86		0,62	7,75
		1	0,722	166,5	46,4	0,0171	5,98		0,57	9,54
20	392	0,001	0,722	234,5	96,2	4,9E-05	0,45	96,8	0,99	1,00
		0,1	0,720	230,6	88,9	0,001407	0,91		0,92	2,02
		0,2	0,719	226,4	85,8	0,00265	1,45		0,89	3,22
		0,5	0,716	216,7	78,7	0,0053	1,8		0,81	4,00
		0,7	0,715	200,8	67,6	0,0105	3,69		0,70	8,20
		0,8	0,712	190,3	60,9	0,016	4,62		0,63	10,27
		1	0,710	183,0	56,3	0,0195	5,48		0,58	12,18
20	490	0,001	0,710	251,1	111,8	3,92E-05	0,53	112,5	0,99	1,00
		0,1	0,708	244,4	100,6	0,002231	0,79		0,89	1,49
		0,2	0,705	240,2	97,4	0,00333	1,22		0,87	2,30
		0,5	0,703	229,0	88,5	0,0077	2,17		0,79	4,09
		0,7	0,700	217,1	79,8	0,012	3,22		0,71	6,08
		0,8	0,698	209,0	74,0	0,0166	4,14		0,66	7,81
		1	0,696	200,5	68,2	0,0201	4,98		0,61	9,40

Tabla 5-13: Resumen Ensayo CR Drenado para Arena con 20%CF para $e_i=0,85$.

%CF	σ [kPa]	Voltaje	e_f [-]	V_s [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G_{max} [MPa]	G/G _{max}	D/D _{min}
20	98	0,001	0,829	155,5	38,6	6,82E-05	1,924	39,3	0,98	1,00
		0,1	0,828	149,5	35,3	0,000995	2,02		0,90	1,05
		0,2	0,823	146,8	34,2	0,00142	2,4		0,87	1,25
		0,5	0,822	141,7	31,8	0,0027	2,78		0,81	1,44
		0,7	0,820	135,5	29,1	0,0051	3,26		0,74	1,69
		0,8	0,818	128,5	26,2	0,0086	5,16		0,67	2,68
		1	0,816	119,5	22,7	0,0144	6,8		0,58	3,53
20	196	0,001	0,800	177,8	53,3	5,96E-05	1,334	54,1	0,99	1,00
		0,1	0,799	174,6	50,1	0,001022	1,52		0,92	1,14
		0,2	0,796	172,3	48,8	0,00155	1,78		0,90	1,33
		0,5	0,792	165,6	45,2	0,0036	2,01		0,84	1,51
		0,7	0,789	160,5	42,5	0,0058	3,01		0,79	2,26
		0,8	0,785	152,6	38,6	0,0101	4,67		0,71	3,50
		1	0,781	143,9	34,4	0,0173	6,78		0,64	5,08
20	294	0,001	0,782	202,6	69,1	9,53E-05	0,81	69,3	1,00	1,00
		0,1	0,779	199,1	64,4	0,0011	0,92		0,93	1,14
		0,2	0,777	196,8	63,0	0,00167	1,5		0,91	1,85
		0,5	0,774	191,4	59,6	0,004	1,82		0,86	2,25
		0,7	0,771	184,7	55,7	0,0065	2,78		0,80	3,43
		0,8	0,770	176,2	50,6	0,0112	4,33		0,73	5,35
		1	0,767	166,1	45,1	0,0186	5,75		0,65	7,10
20	392	0,001	0,772	214,5	80,6	7,94E-05	0,73	83,9	0,96	1,00
		0,1	0,770	214,1	76,8	0,001221	1,13		0,92	1,55
		0,2	0,768	213,3	76,3	0,00177	1,52		0,91	2,08
		0,5	0,764	207,0	72,2	0,0043	1,99		0,86	2,73
		0,7	0,762	199,9	67,3	0,0075	2,45		0,80	3,36
		0,8	0,760	191,3	61,7	0,0128	4,02		0,73	5,51
		1	0,756	179,9	54,7	0,0199	7,27		0,65	9,96
20	490	0,001	0,763	234,6	95,4	4,11E-05	0,64	95,6	1,00	1,00
		0,1	0,761	230,4	87,6	0,0013	0,91		0,92	1,42
		0,2	0,756	228,9	86,7	0,0032	1,34		0,91	2,09
		0,5	0,753	222,3	82,0	0,0054	1,87		0,86	2,92
		0,7	0,751	215,7	77,2	0,0093	2,11		0,81	3,30
		0,8	0,748	204,9	69,8	0,0158	3,67		0,73	5,73
		1	0,745	197,1	64,7	0,0202	6,47		0,68	10,11

5.3.1. Efecto del Estado de Carga

El efecto del estado de carga es analizado en el acápite 4, donde se observa que, a mayor confinamiento, el módulo de corte máximo (G_{max}) aumenta. En este capítulo se estudia el efecto del estado de carga a medida que aumenta la deformación al corte.

A través de los ensayos realizados, es evidente que el estado de carga es un parámetro muy relevante para el Módulo de Corte (G), debido a que se obtienen tendencias muy definidas, donde a mayor confinamiento, se obtiene un mayor G . En la Figura 5-19 se puede observar esta tendencia, para ensayos a igual índice de vacío inicial (0,75), para todos los contenidos de finos: (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.

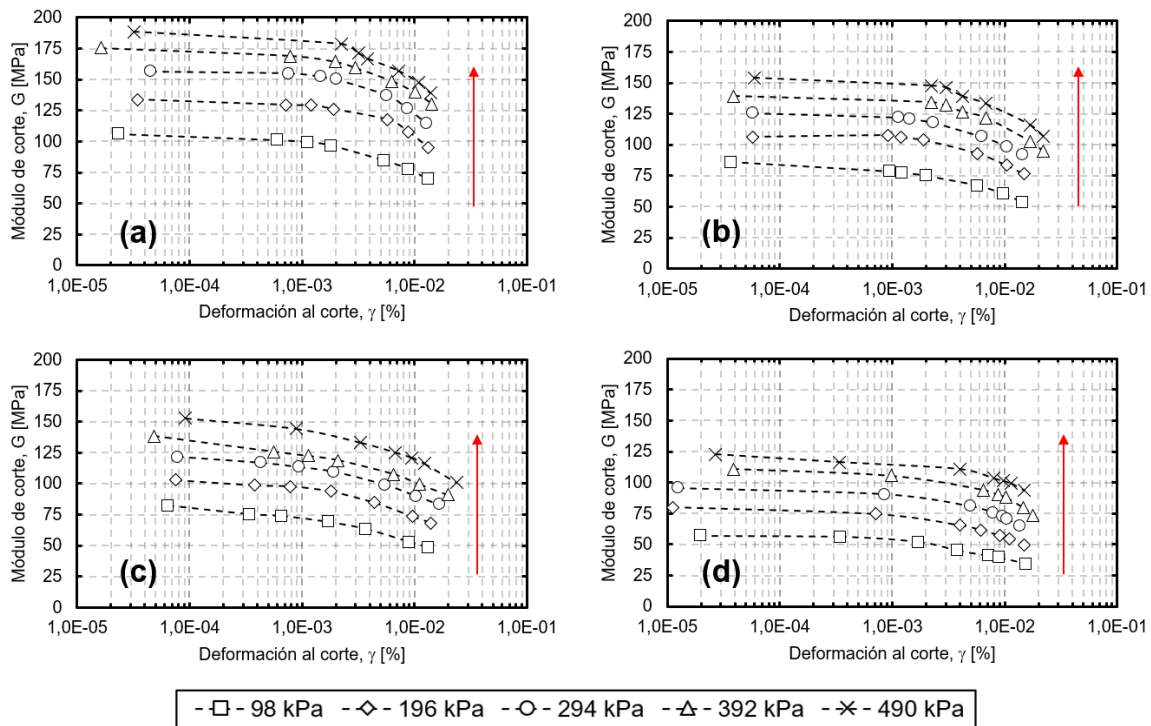


Figura 5-19: Efecto del confinamiento en G

Para el comportamiento de G/G_{max} , se tiene que, a mayor confinamiento, existe un mayor valor de G/G_{max} , lo que se traduce en una menor degradación del módulo de rigidez. Este efecto se ilustra en la Figura 5-20, para todos los contenidos de finos: (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF, a igual índice de vacío inicial (0,80).

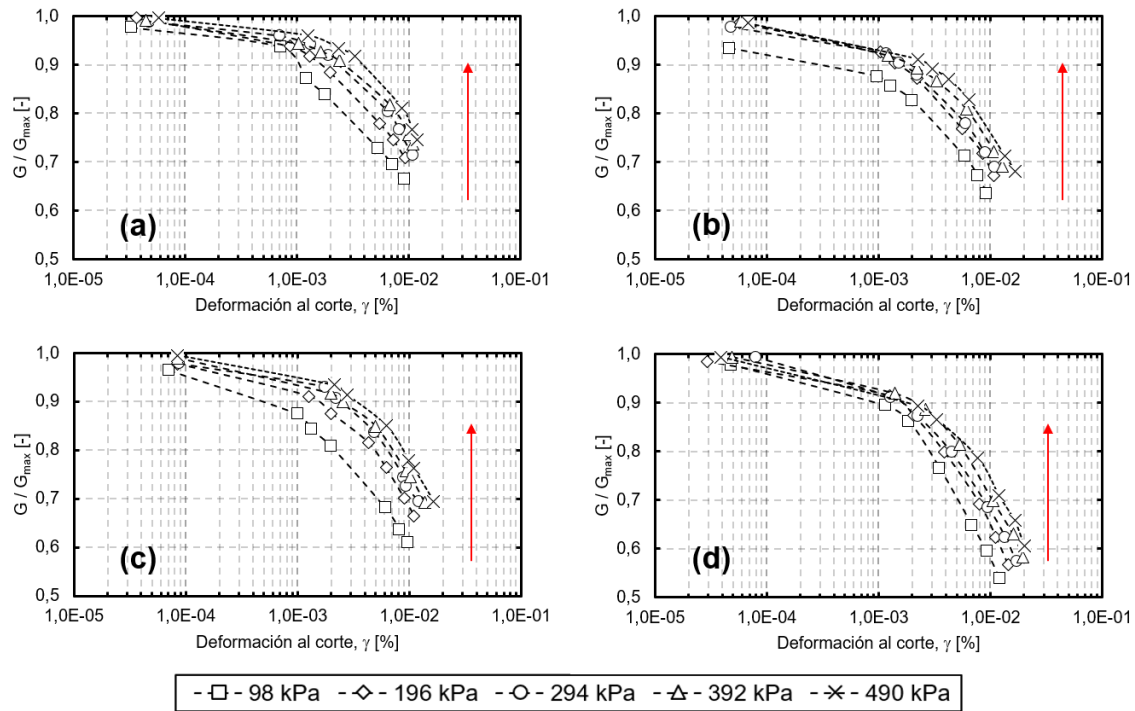


Figura 5-20: Efecto del confinamiento en G/G_{max}

Diversos autores han estudiado el efecto del estado de carga sobre la degradación de la rigidez (G/G_{max}) para arenas no plásticas, estas se presentan en la Figura 5-21, donde corresponden a: (a) Ishibashi and Zhang (1993), (b) Iwasaki et al. (1978), (c) Kokusho (1980), y (d) Ni (1987).

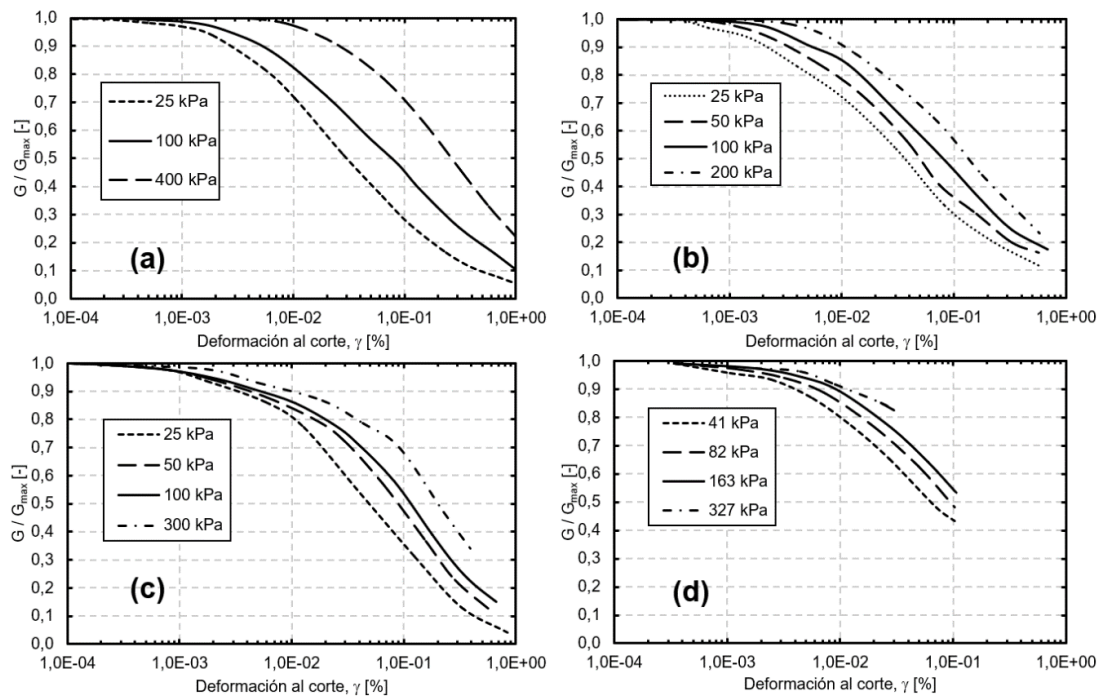


Figura 5-21: Efecto del confinamiento en G/G_{max} de diversos autores.

Finalmente, se analiza el efecto del estado de carga sobre el amortiguamiento (D), donde en general se observa que, para confinamientos mayores, se obtiene un menor amortiguamiento, esto se acentúa a medida que se aumenta la deformación al corte. En la Figura 5-22 se muestran los resultados del amortiguamiento para un mismo índice de vacío inicial (0,75), para distintos contenidos de finos: (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.

Diversos autores han estudiado este mismo efecto, obteniendo la misma tendencia, la cual se asocia a una consecuencia de tener una mayor estabilidad del medio granular a medida que se aumenta el estado de carga, lo que se traduce en una menor liberación de energía. En la Figura 5-23, se muestran los resultados de: (a) Ishibashi and Zhang (1993), (b) Kokusho (1980), y (c) Ni (1987).

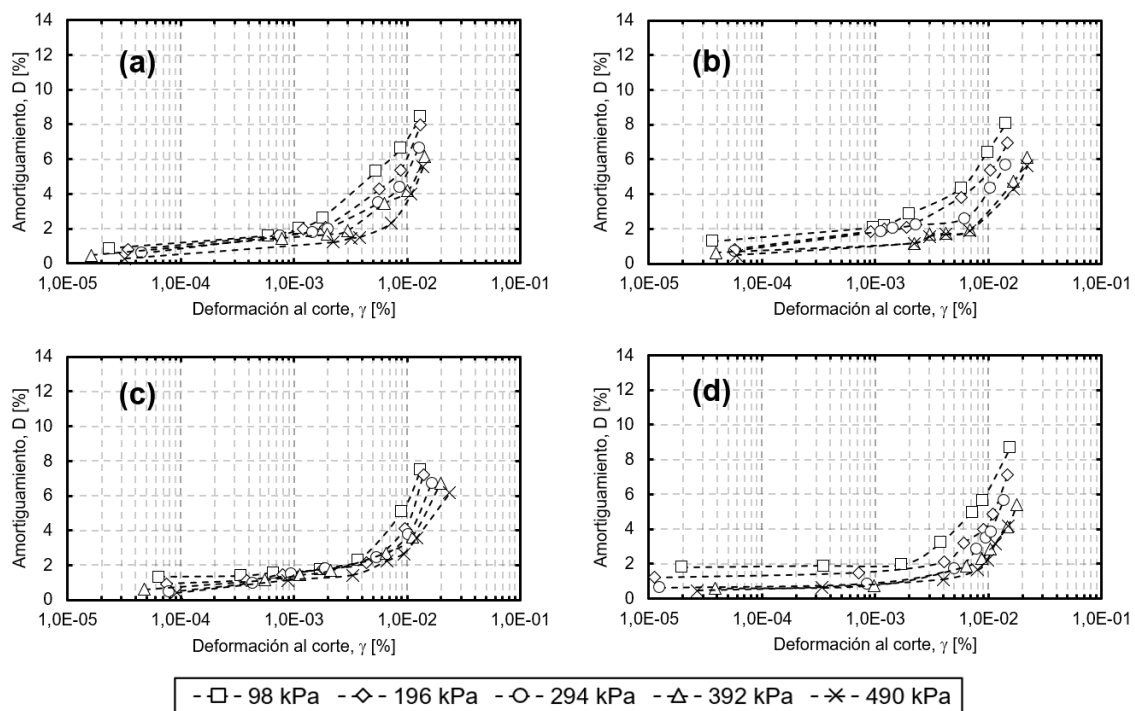


Figura 5-22: Efecto del confinamiento en Amortiguamiento (D).

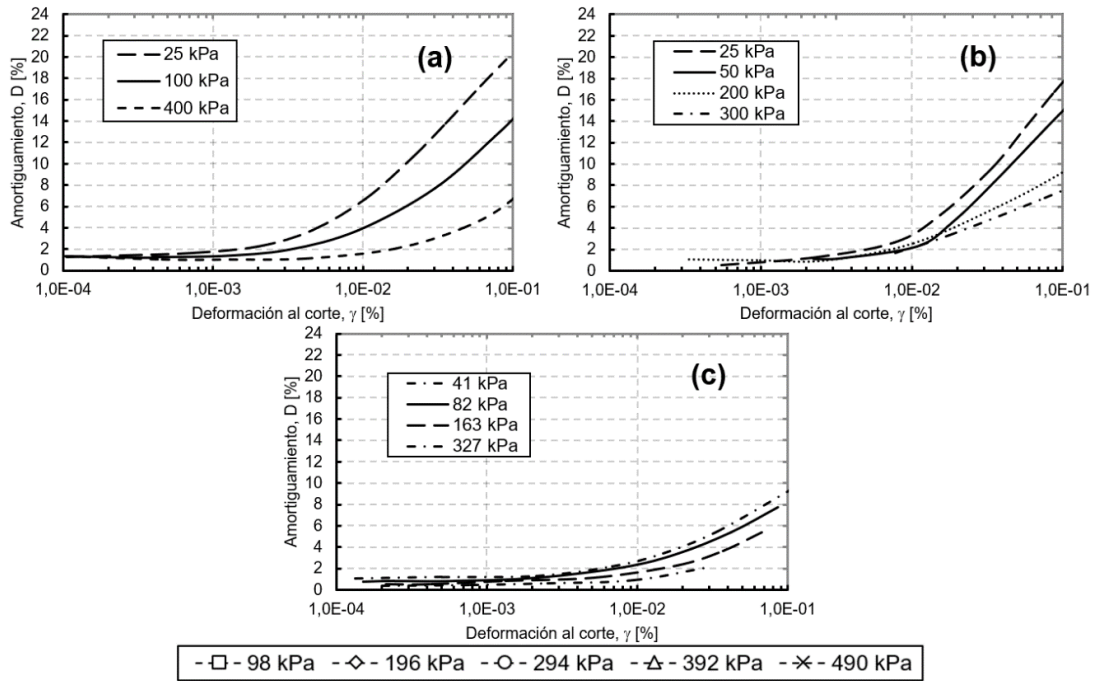


Figura 5-23: Efecto del confinamiento en Amortiguamiento (D) de diversos autores.

Finalmente, a modo de resumen, es posible observar el efecto de la degradación de la rigidez, a través de G/G_{max} , y el amortiguamiento (D), a través del gráfico mostrado en la Figura 5-24.

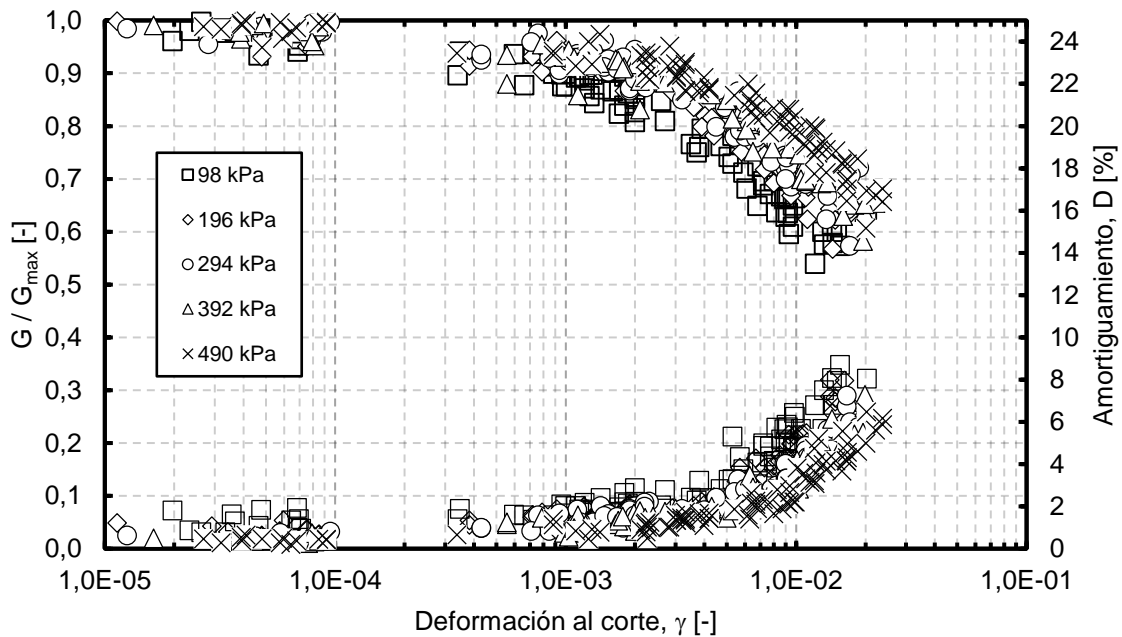


Figura 5-24: G/G_{max} y D en función de la deformación al corte.

5.3.2. Efecto del Índice de vacío

En el acápite 4.4.2, se muestra el efecto de G_{max} en función del índice de vacío, donde a menor índice de vacío, mayor es el G_{max} , es decir, para una probeta más densa, se obtienen mayor Módulo de Rigidez Máxima. Al analizar el comportamiento de G en función del índice de vacío cuando se aumenta la deformación al corte, se observa que en general, sigue la misma tendencia de G_{max} , es decir, G es inversamente proporcional al índice de vacío.

En la Figura 5-25, se muestra la tendencia para dos estados de carga, 98 kPa y 490 kPa, para cuatro contenidos de finos: (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF, donde se observa que valores más alto para G están asociado a una muestra de suelo más densa (menor índice de vacío), para un mismo estado de carga.

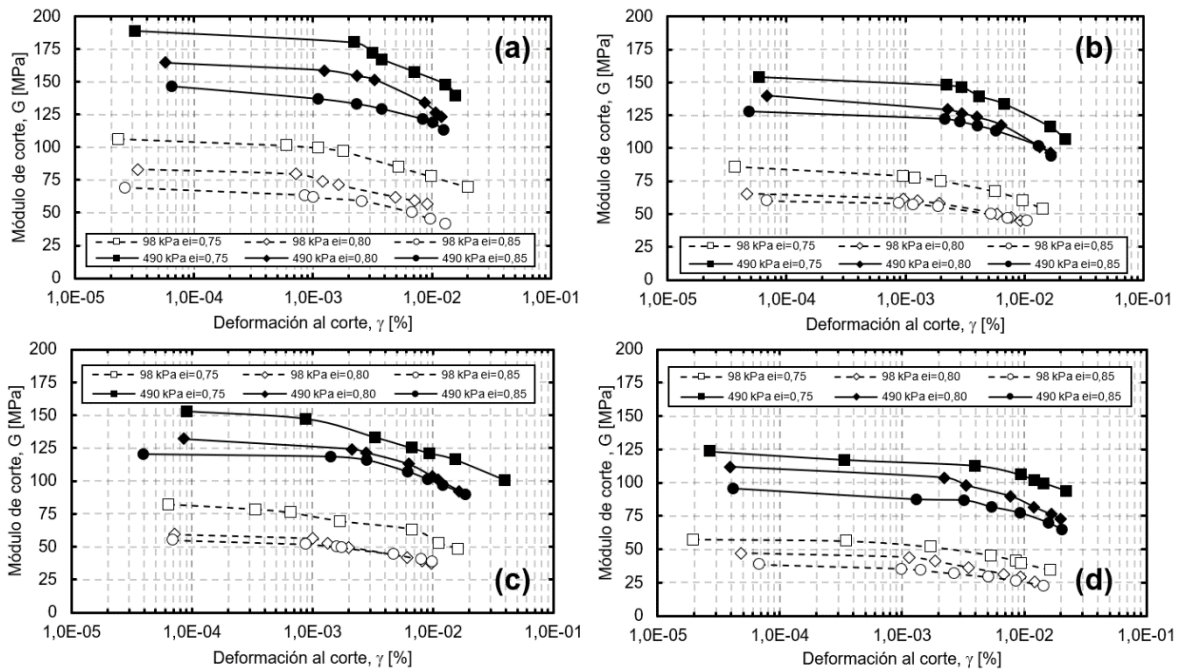


Figura 5-25: Efecto del índice de vacío en G : (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.

Al considerar G/G_{max} , en general, se observa una menor degradación de la rigidez (mayor G/G_{max}) para un índice de vacío menor. Esto va de la mano con lo analizado para el módulo de rigidez máximo y módulo de rigidez degradado, donde en un ensayo de una probeta más suelta, se obtienen menores valores de G .

En la Figura 5-26, se pueden observar los resultados para distintas confecciones de índice de vacío inicial (0,75 – 0,80 – 0,85), para un mismo nivel de estado de carga y un contenido de finos de 1%CF, donde se observa la tendencia directamente proporcional entre G/G_{max} y el índice de vacío.

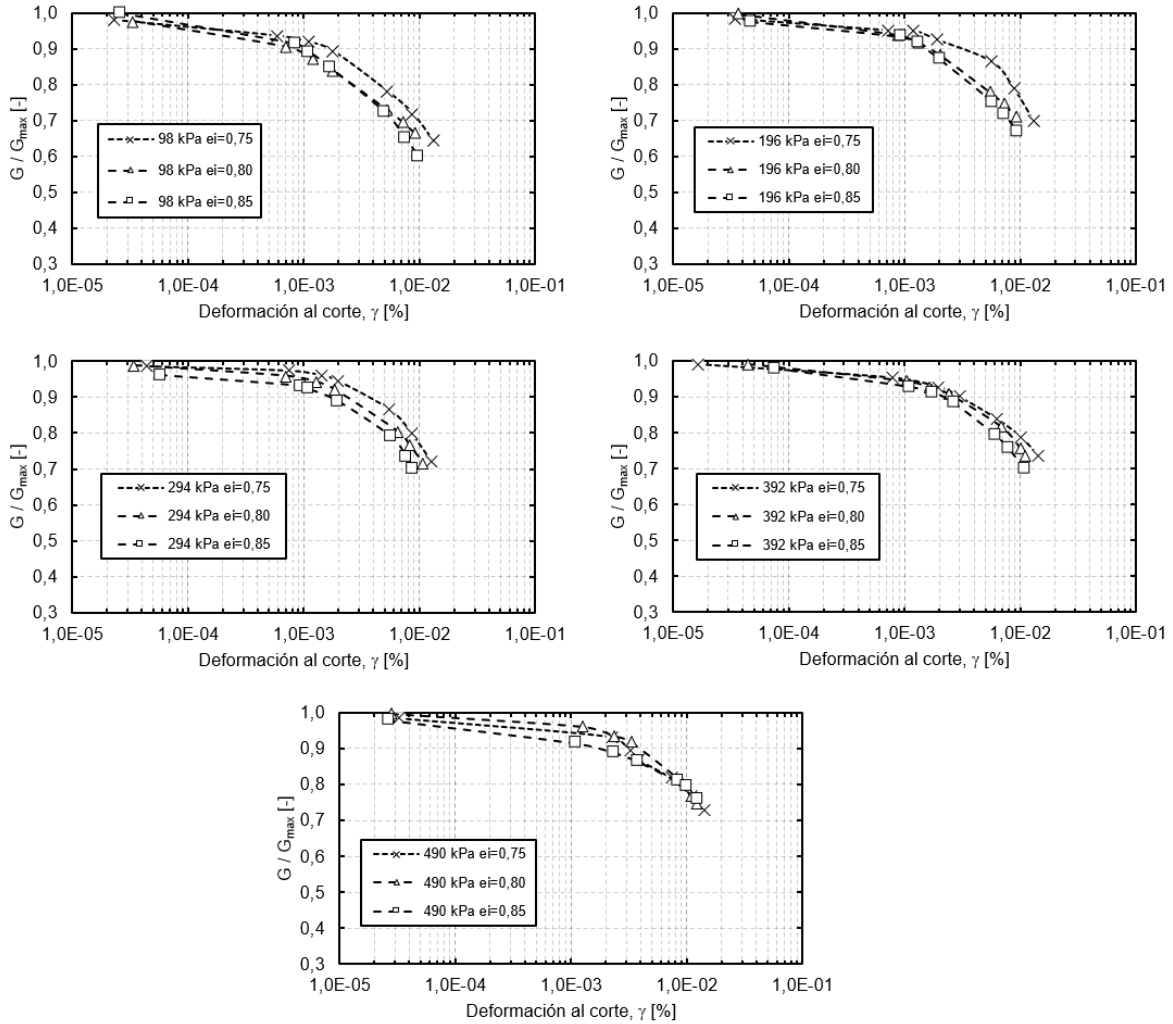


Figura 5-26: Efecto del índice de vacío en G/G_{max} (1%CF)

Por otro lado, en la Figura 5-27, Figura 5-28 y Figura 5-29, se observa que en general, el índice de vacío al aumentar, aumenta la degradación de la rigidez (menor G/G_{max}), este efecto se tiende a perder en algunos casos. La Figura 5-27 corresponde al caso para un estado de carga de 98 kPa y para un contenido de finos de (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF y (d) 20%CF, mientras que la Figura 5-28 y Figura 5-29 corresponden al caso para un estado de carga de 294 kPa y 490 kPa, respectivamente y para la misma variación del contenido de finos.

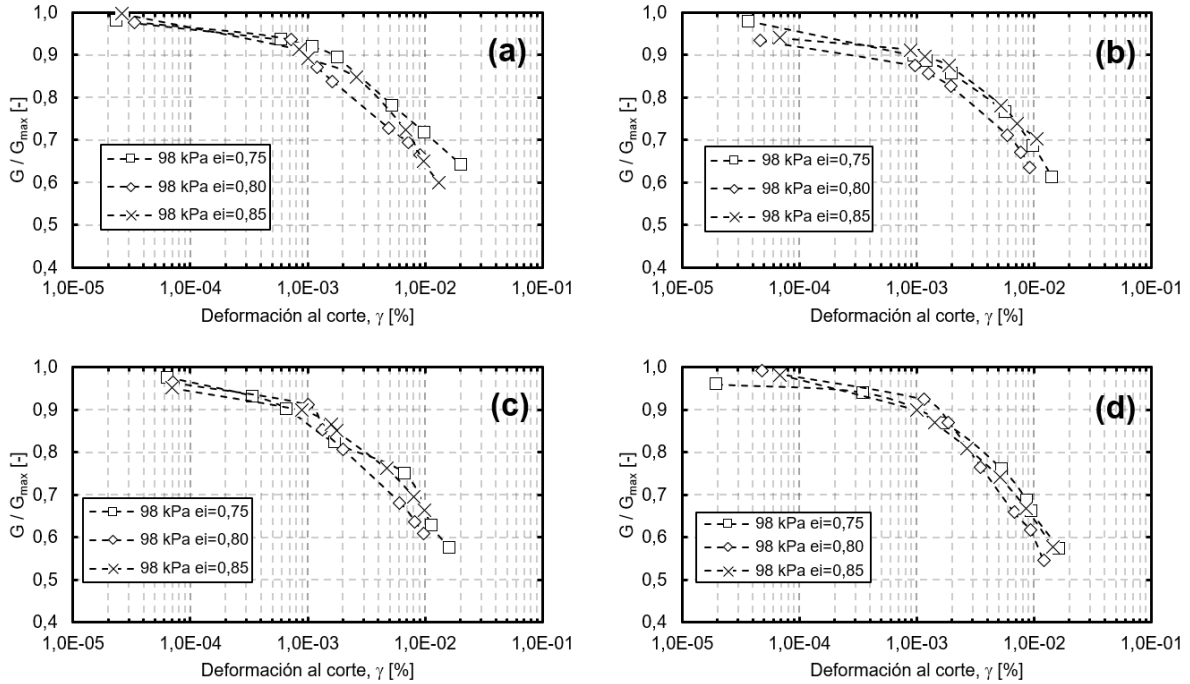


Figura 5-27: Efecto del índice de vacío en G/G_{max} para 98 kPa: (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.

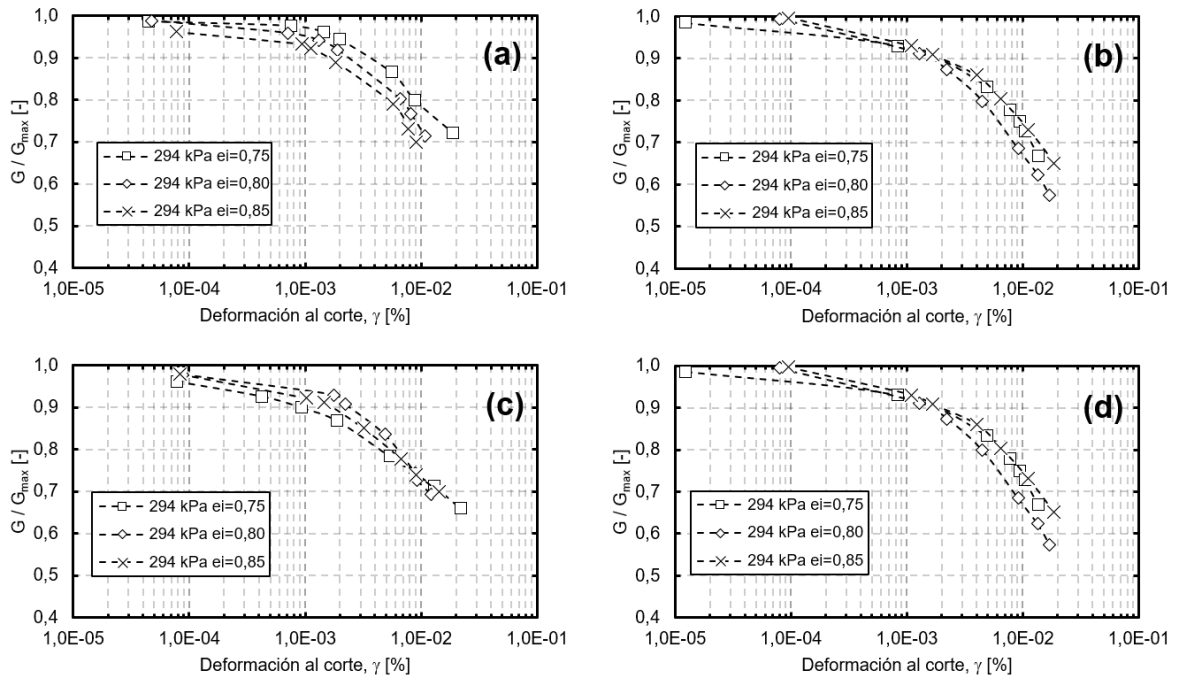


Figura 5-28: Efecto del índice de vacío en G/G_{max} para 294 kPa: (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.

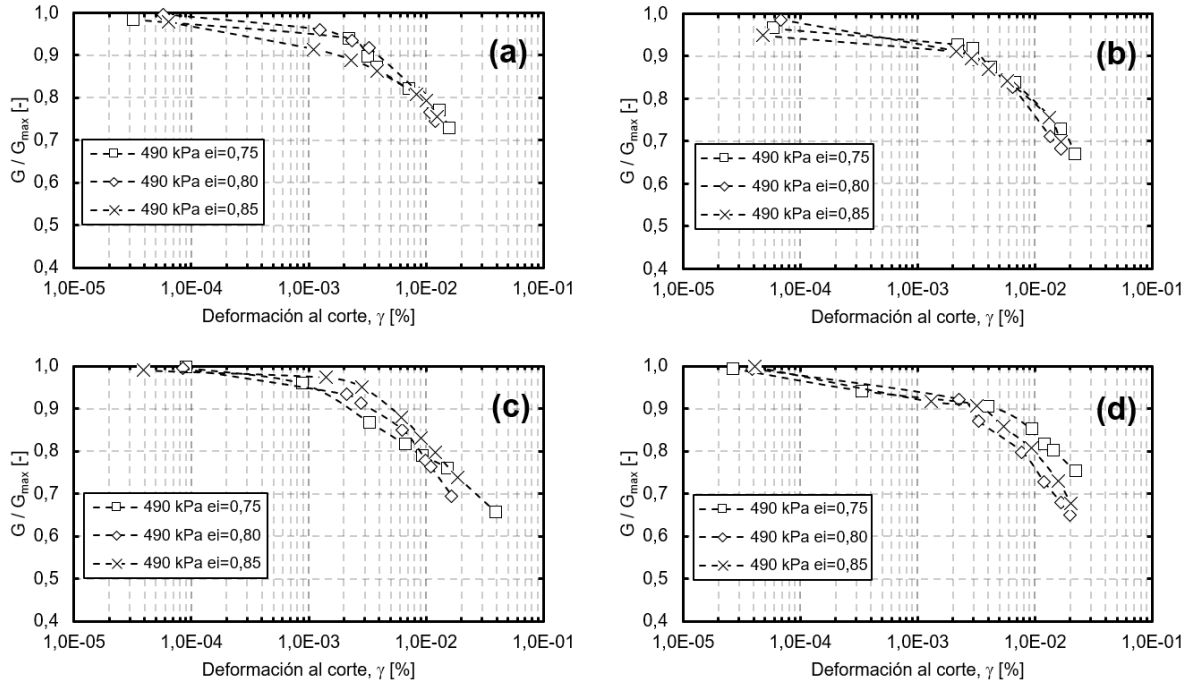


Figura 5-29: Efecto del índice de vacío en G/G_{max} para 490 kPa: (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.

Por otro lado, para el amortiguamiento no se tiene una tendencia exacta para los resultados de una arena limpia (1%CF), debido a que el comportamiento para menor confinamiento, hay una tendencia directamente proporcional respecto al amortiguamiento y el índice de vacío, sin embargo, a mayor estado de carga, se pierde esta relación, llegando incluso para un estado de carga de 5 kg/cm^2 , el efecto contrario Figura 5-30.

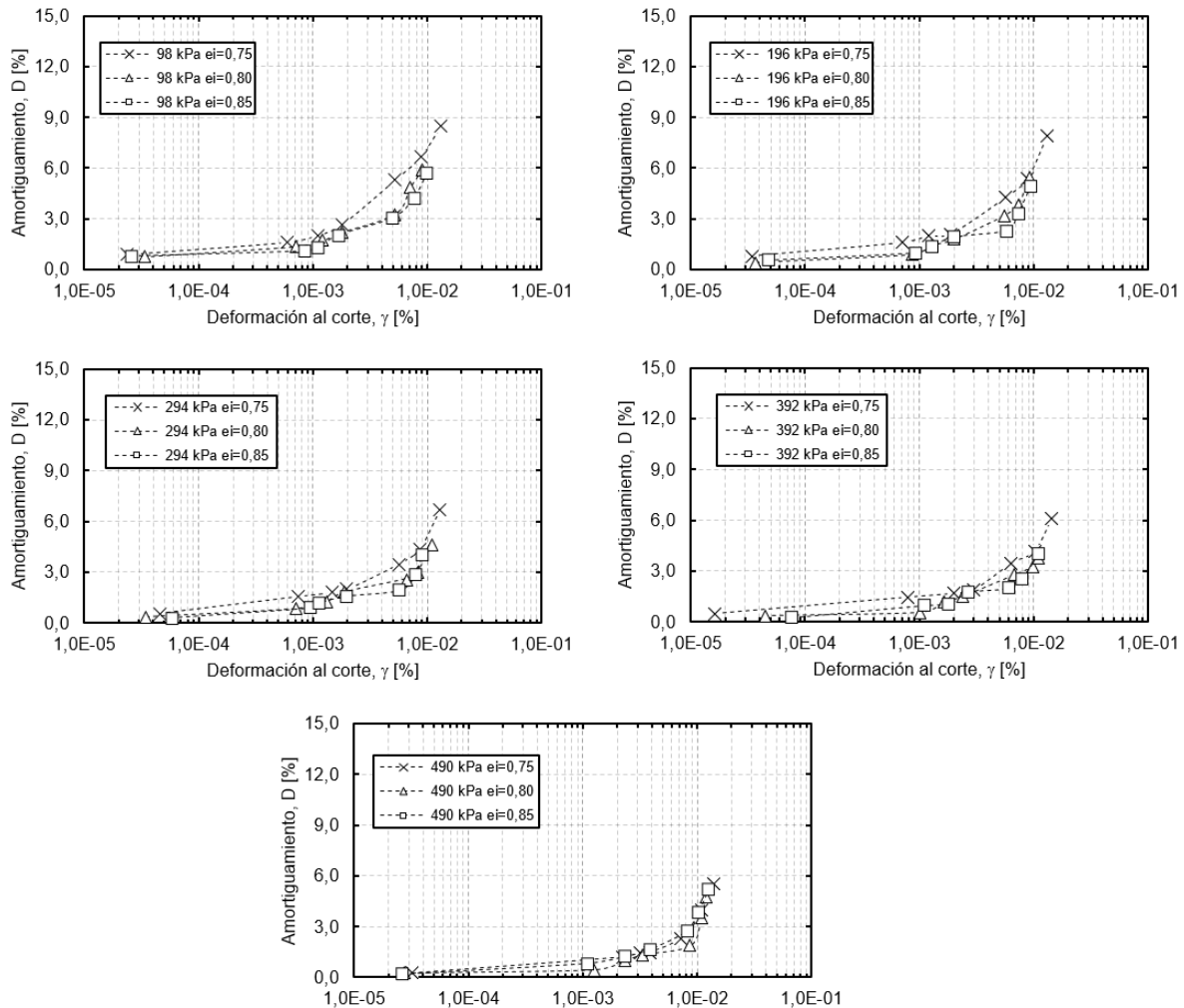


Figura 5-30: Efecto del índice de vacío en el amortiguamiento (D) (1%CF)

Finalmente, en la Figura 5-31, Figura 5-32 y Figura 5-33, no se observa una clara tendencia respecto al efecto del índice de vacío, si bien para confinamiento de 98 kPa, se observa que a menor índice de vacío se obtiene mayor amortiguamiento, esta tendencia se elimina para mayores confinamiento, incluso llegando a tendencias, como en el caso para 490 kPa, que a menor índice de vacío (estado más denso del suelo), existe un menor amortiguamiento. La Figura 5-31 corresponde al caso para un estado de carga de 98 kPa y para un contenido de finos de (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF y (d) 20%CF, mientras que la Figura 5-32 y Figura 5-33 corresponden al caso para un estado de carga de 294 kPa y 490 kPa, respectivamente y para la misma variación del contenido de finos.

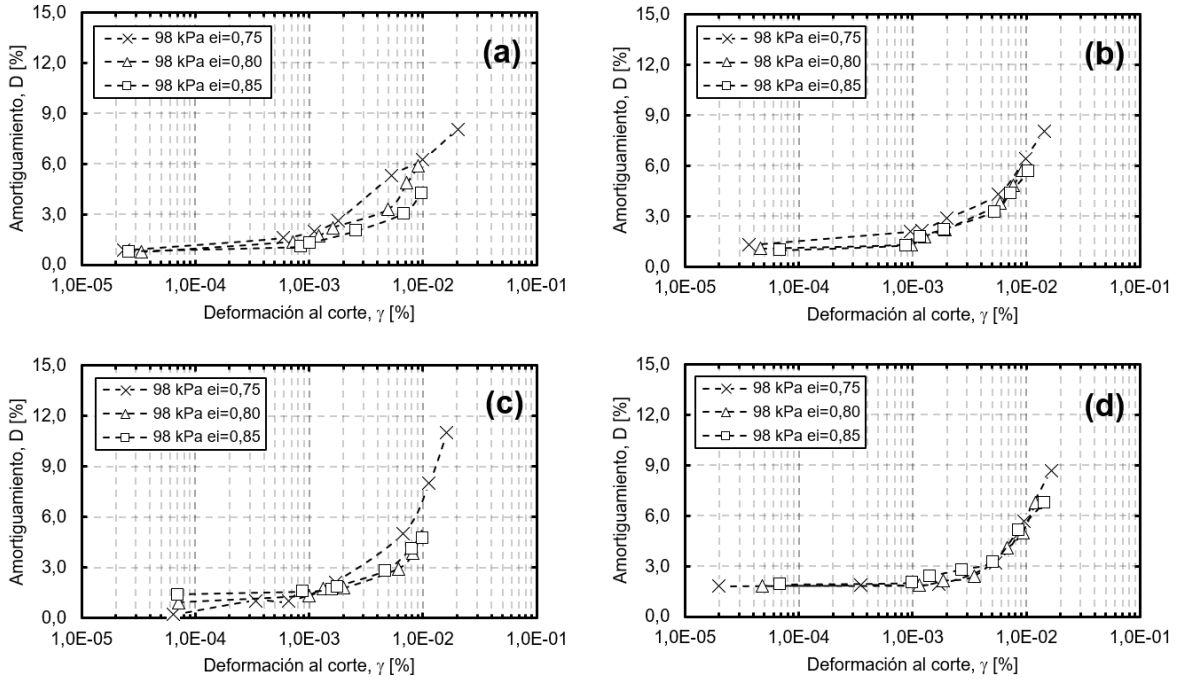


Figura 5-31: Efecto del índice de vacío en D para 98 kPa: (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.

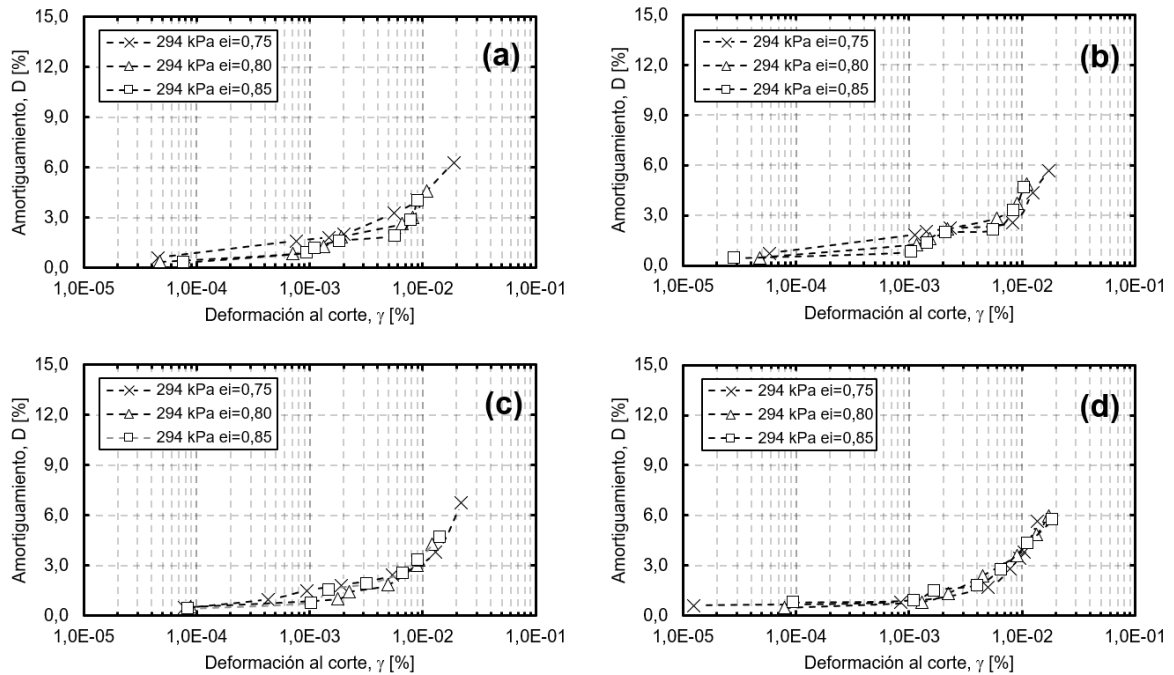


Figura 5-32: Efecto del índice de vacío en D para 294 kPa: (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.

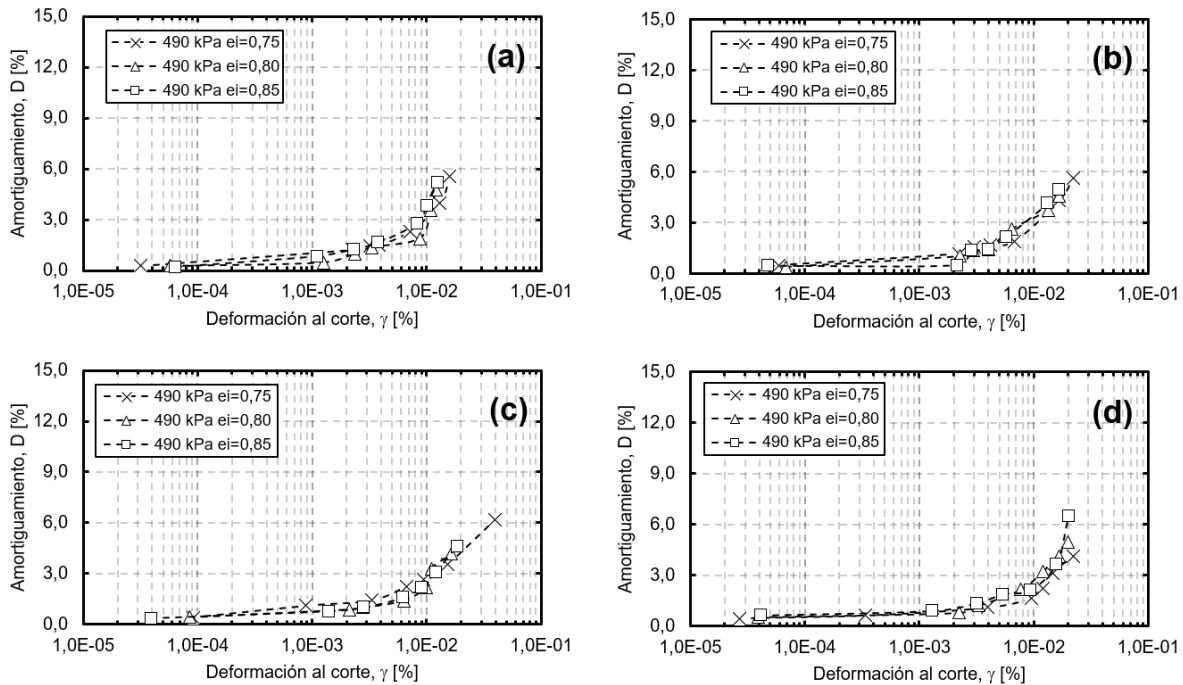


Figura 5-33: Efecto del índice de vacío en D para 490 kPa: (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.

5.3.3. Efecto del Contenido de finos

Al considerar el efecto del contenido de finos para el módulo de rigidez, se observa una tendencia marcada, donde a mayores contenidos de finos, disminuye el módulo de corte, éste efecto se presenta tanto en G_{max} , como al ir aumentando la deformación al corte (G). En la Figura 5-34, se presentan los resultados para un estado de carga de 98 kPa, para distintos índices de vacíos de confección inicial (0,75 – 0,80 – 0,85), mientras que en la Figura 5-35 se muestra el mismo efecto, pero para un estado de carga de 490 kPa.

Por otro lado, en la Figura 5-36 y Figura 5-37, se observa el efecto del contenido de finos respecto a la degradación de la rigidez (G/G_{max}), donde se observa que los distintos contenidos de finos, para un mismo índice de vacío de confección inicial y estado de carga, forman una curva única, independiente a su contenido de finos. Este comportamiento puede explicarse debido a la naturaleza de cada suelo ensayado, donde todos poseen la misma naturaleza, ya que el relave es extraído de la misma roca en general.

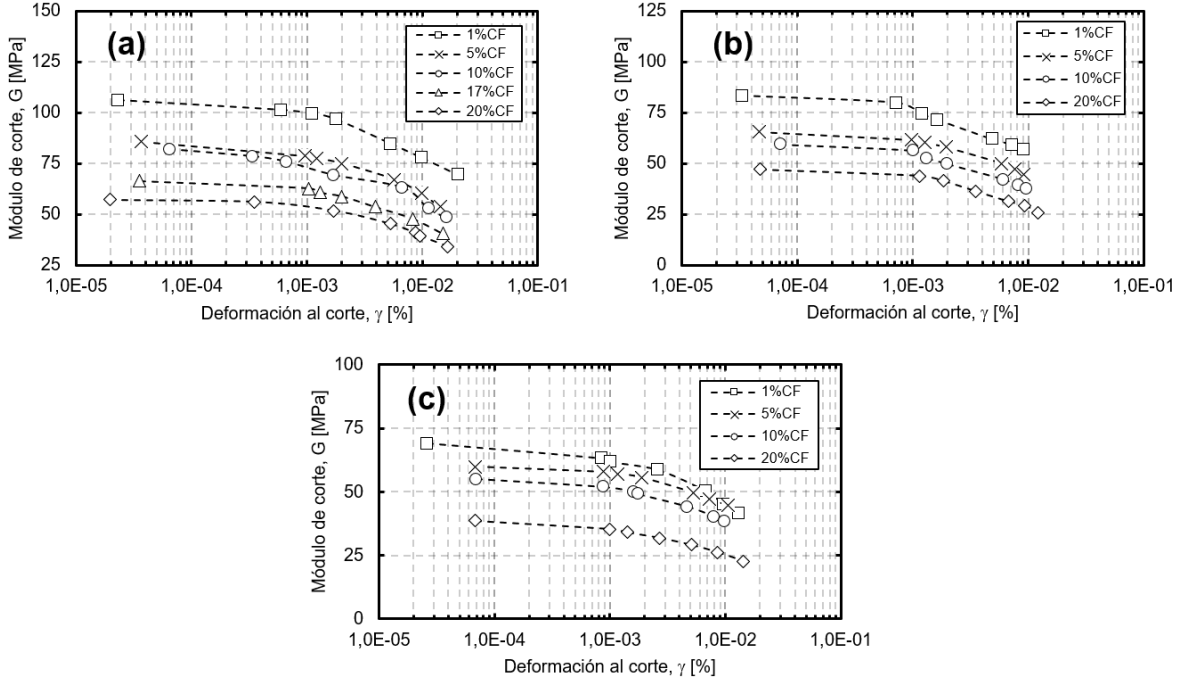


Figura 5-34: Efecto del contenido de finos en G para 98 kPa: (a) $e_i=0,75$, (b) $e_i=0,80$, y (c) $e_i=0,85$.

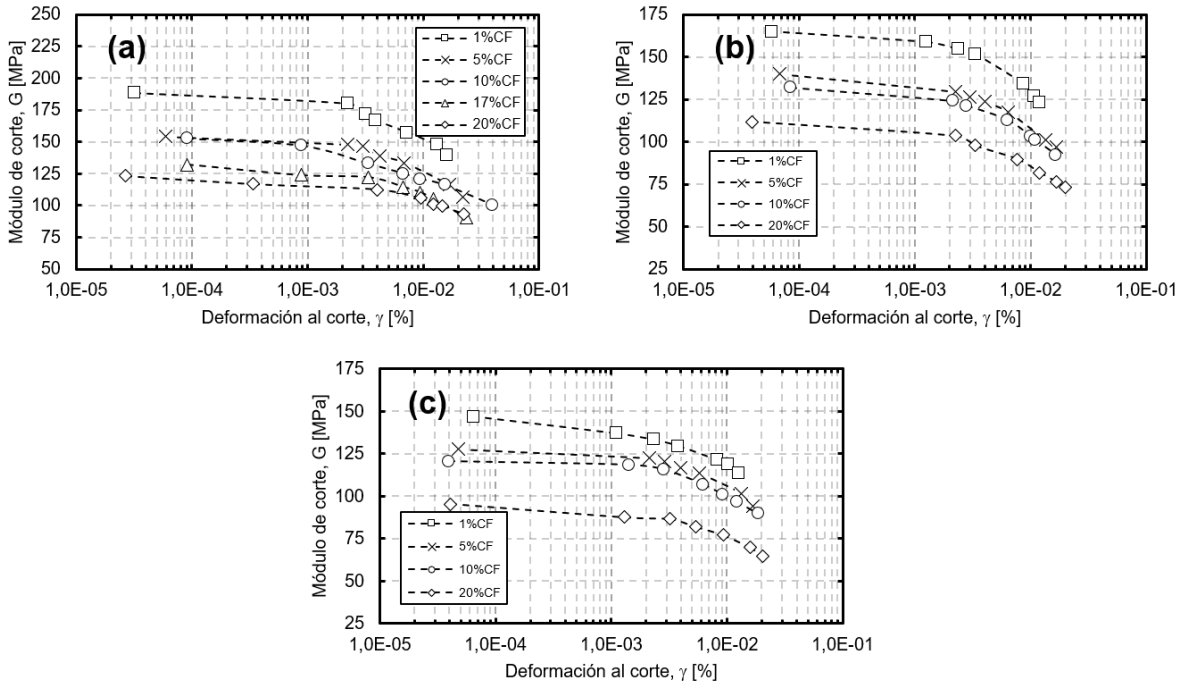


Figura 5-35: Efecto del contenido de finos en G para 490 kPa: (a) $e_i=0,75$, (b) $e_i=0,80$, y (c) $e_i=0,85$.

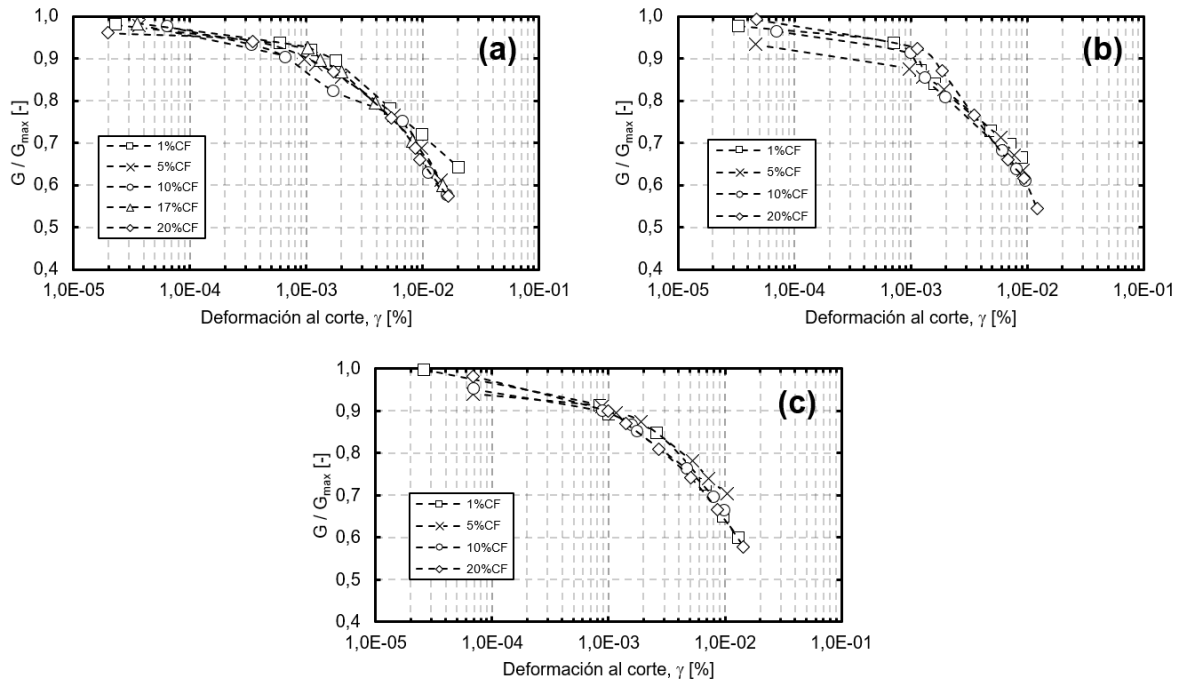


Figura 5-36: Efecto del contenido de finos en G/G_{max} para 98 kPa: (a) $e_i=0,75$, (b) $e_i=0,80$, y (c) $e_i=0,85$.

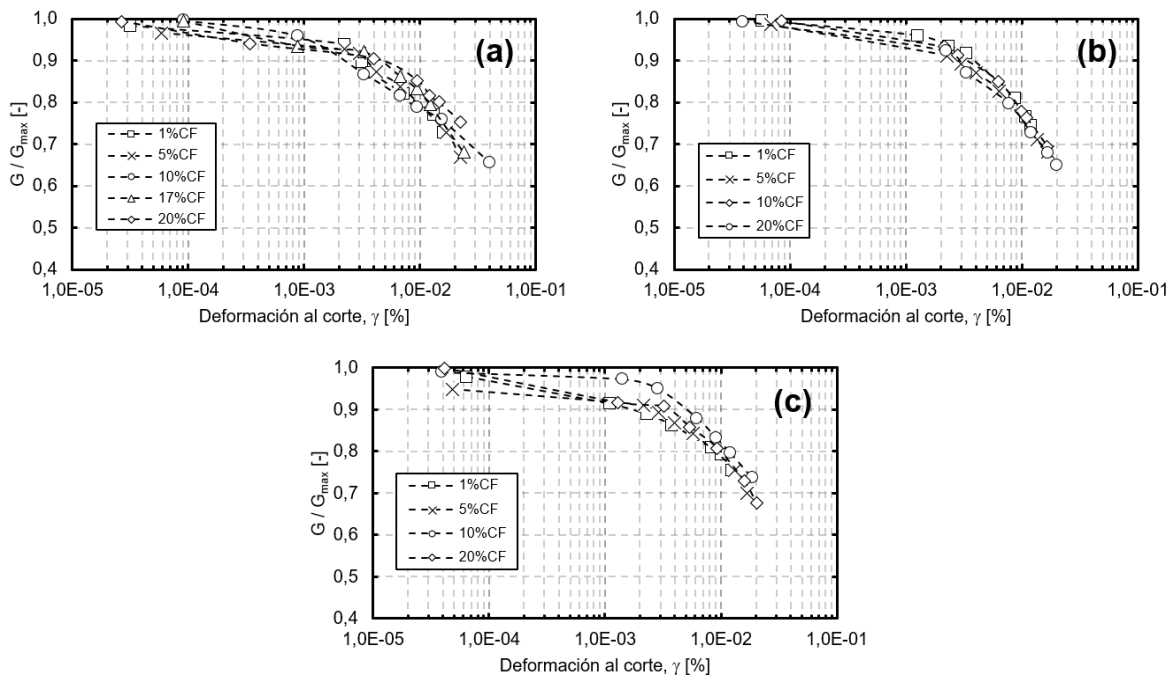


Figura 5-37: Efecto del contenido de finos en G/G_{max} para 490 kPa: (a) $e_i=0,75$, (b) $e_i=0,80$, y (c) $e_i=0,85$.

Finalmente, se observa la tendencia del amortiguamiento al variar el contenido de finos, donde no se aprecia una tendencia. Al considerar dos estados de carga (98 kPa y 490 kPa) y tres índices de vacíos de confección inicial (0,75 – 0,80 – 0,85), no se observa una tendencia y es posible observar que todos los valores obtenidos tienden a seguir una misma recta, independiente al contenido de finos.

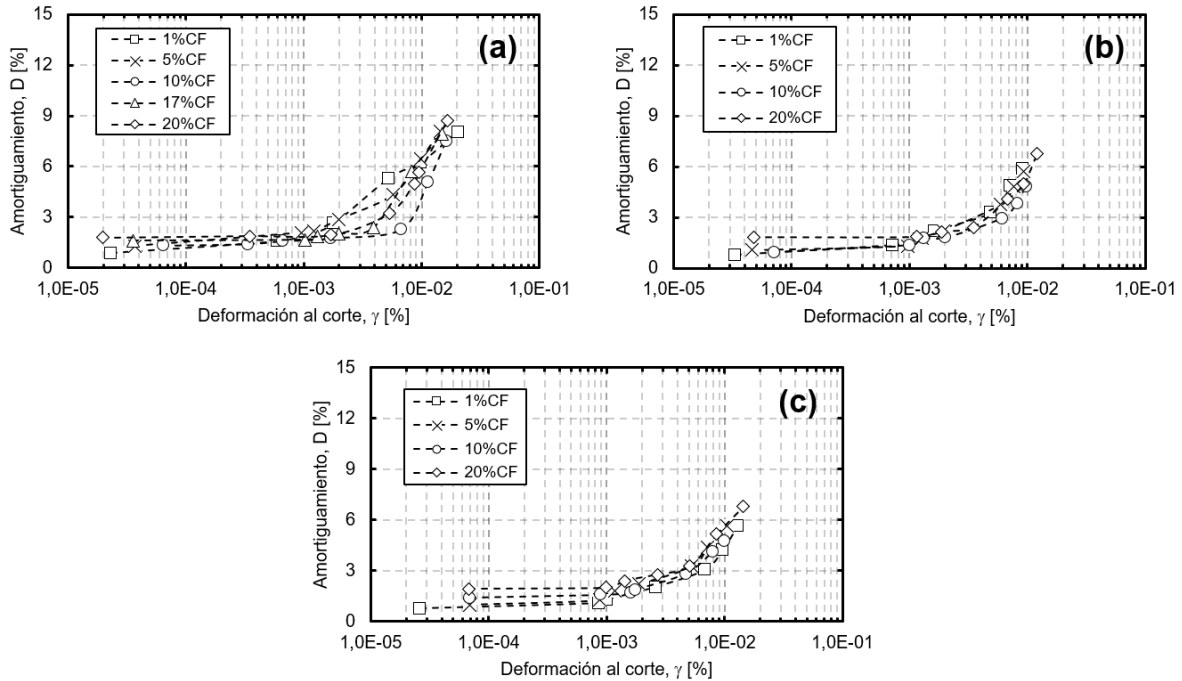


Figura 5-38: Efecto del contenido de finos en D para 98 kPa: (a) $e_i=0,75$, (b) $e_i=0,80$, y (c) $e_i=0,85$.

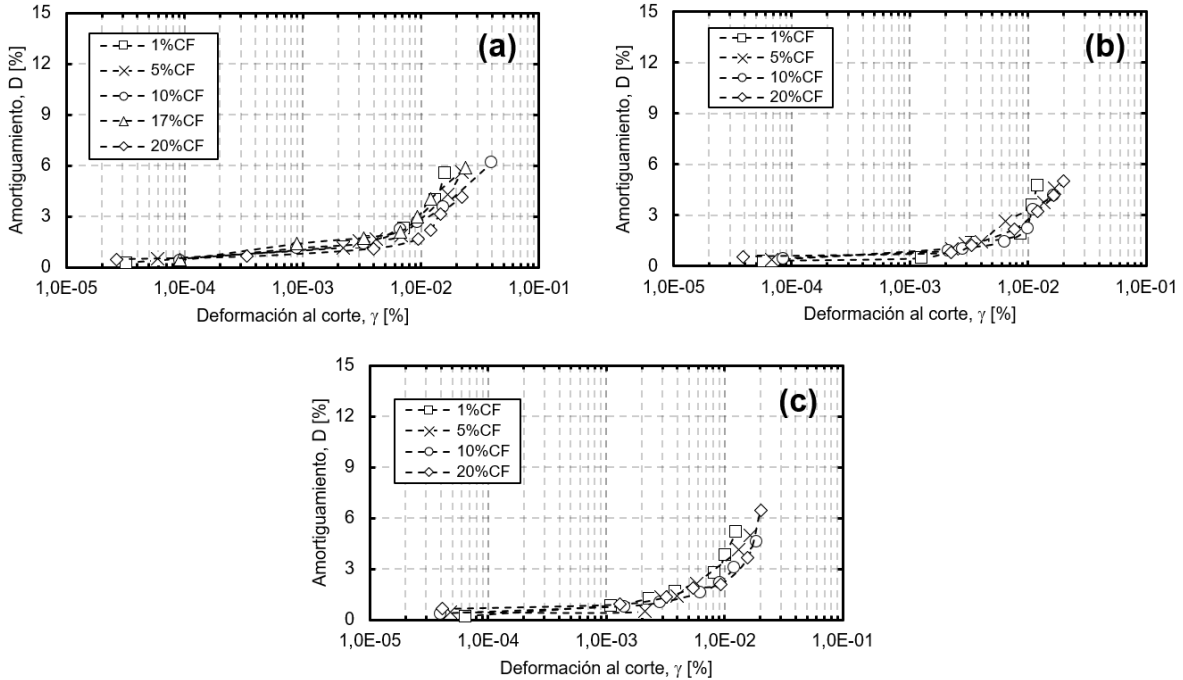


Figura 5-39: Efecto del contenido de finos en D para 490 kPa: (a) $e_i=0,75$, (b) $e_i=0,80$, y (c) $e_i=0,85$.

5.3.4. Estimación de la Degradación de la Rigidez

A continuación, se analiza la estimación de la degradación de la rigidez mediante el estudio propuesto por tres autores: (a) Hardin and Drnevich (1972b), (b) Stokoe et al. (1999), y (c) Zhang et al. (2005). Todos basan sus estudios a partir de variables de ajustes y la relación principal de:

$$\frac{G}{G_{max}} = f(\gamma)$$

(a) Hardin and Drnevich (1972b):

Al estudiar la respuesta no lineal del suelo, Hardin and Drnevich (1972b), proponen a partir del modelo hiperbólico la siguiente relación:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_{ref}}}$$

Le ecuación planteada solo posee una variable para juste (γ_{ref}), la cual se estima a partir de τ_{max}/G_{max} , en la cual se puede observar en la Tabla 5-14 para los distintos contenidos de finos y estados de carga, obteniendo un valor mínimo del orden de $6 \times 10^{-20}\%$ y un máximo de $2 \times 10^{-1}\%$.

Tabla 5-14: Deformación Referencial Hardin and Drnevich (1972b).

%CF	e_i	γ_{ref} (%)				
		98 kPa	196 kPa	294 kPa	392 kPa	490 kPa
1	0,75	0,0647	0,0758	0,0846	0,0928	0,1013
1	0,80	0,0822	0,0987	0,1089	0,1128	0,1174
1	0,85	0,1011	0,1157	0,1172	0,1223	0,1294
5	0,75	0,0799	0,0921	0,1032	0,1140	0,1219
5	0,80	0,0997	0,1186	0,1225	0,1307	0,1369
5	0,85	0,1100	0,1250	0,1333	0,1396	0,1445
10	0,75	0,0833	0,0955	0,1063	0,1153	0,1268
10	0,80	0,1137	0,1255	0,1336	0,1400	0,1463
10	0,85	0,1212	0,1342	0,1418	0,1511	0,1598
20	0,75	0,1174	0,1289	0,1381	0,1454	0,1565
20	0,80	0,1477	0,1611	0,1663	0,1701	0,1728
20	0,85	0,1782	0,1907	0,1939	0,1961	0,2035

Al comparar los resultados obtenidos mediante columna resonante, para todos los contenidos de finos e índices de vacíos de confección inicial, respecto al valor calculado según la estimación de Hardin and Drnevich (1972b), por cada estado de carga, se observa una pésima relación entre estas, mostrando poca degradación de G/G_{max} , según la metodología de Hardin and Drnevich (1972b).

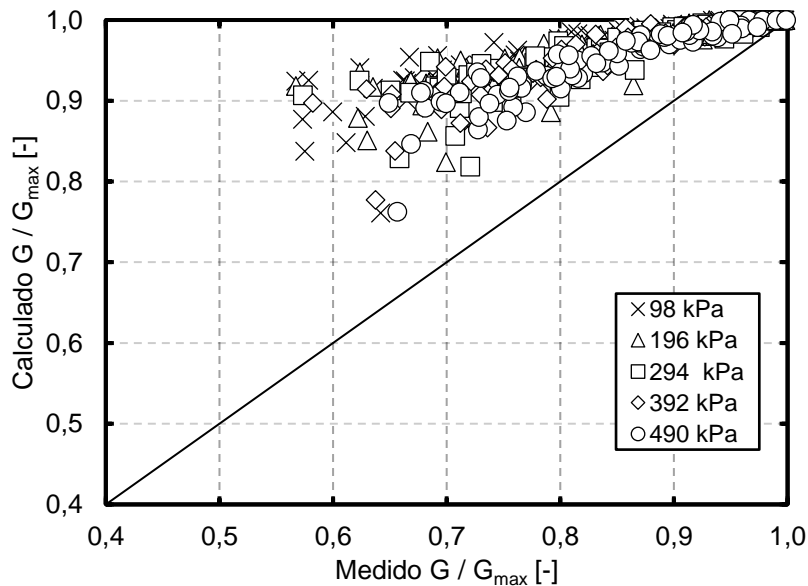


Figura 5-40: Estimación G/G_{max} según Hardin and Drnevich (1972b)

A través de un solo parámetro de ajuste (γ_{ref}), es complicado realizar una relación que se ajuste para todo tipo de arenas, ante esto, los siguientes autores han agregado más parámetros de ajuste, además del γ_{ref} .

(b) Stokoe et al. (1999):

En base a lo planteado por Hardin and Drnevich (1972b), Stokoe et al. (1999) propone agregar un nuevo parámetro de ajuste, obteniendo la siguiente relación:

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

Donde γ_{ref} se define como el valor para el cual G/G_{max} es igual a 0,5 y el parámetro α es un coeficiente de curvatura. Para obtener γ_{ref} , se ha tomado en cuenta que el contenido de finos e índice de vacío no son parámetros tan incidentes en G/G_{max} , como lo es el estado de carga, donde incluso las curvas para Arena El Torito, para distintos contenidos de finos e índice de vacío apuntan hacia una misma curva, pero no así con el estado de carga, donde tiende a disminuir o aumentar la degradación según el confinamiento aplicado, de esta forma se encuentra la deformación referencial para los cinco estado de cargas, mostradas en la Tabla 5-15, donde van desde $1,8 \times 10^{-2}$ a $4,2 \times 10^{-2}\%$.

Tabla 5-15: Deformación Referencial Stokoe et al. (1999).

Confinamiento [kPa]	γ_{ref} (%)
98	0,0186
196	0,0229
294	0,0277
392	0,0332
490	0,0419

Por otro lado, el parámetro de curvatura α fue obtenido calibrando cada resultado, con la consideración de que sea independiente al índice de vacío, obteniendo los coeficientes de la Tabla 5-16, los cuales están dentro de un rango muy acotado, con un promedio de 0,95.

Tabla 5-16: Coeficiente curvatura obtenidos según metodología de Stokoe et al. (1999).

Estado de Carga [kPa]	1%CF	5%CF	10%CF	20%CF
98	0,98	1,02	0,9	1,09
196	1,2	1,03	0,9	0,95
294	1,1	1,05	0,85	0,9
392	0,98	1,08	0,8	0,97
490	0,9	0,8	0,7	0,91

Al comparar los resultados obtenidos mediante columna resonante, para todos los contenidos de finos e índices de vacíos de confección inicial, respecto al valor calculado según la estimación de Stokoe et al. (1999), por cada estado de carga, se

observa una buena relación entre estas, con errores puntuales que no superan el 22%, siendo en general un error no superior al 10%.

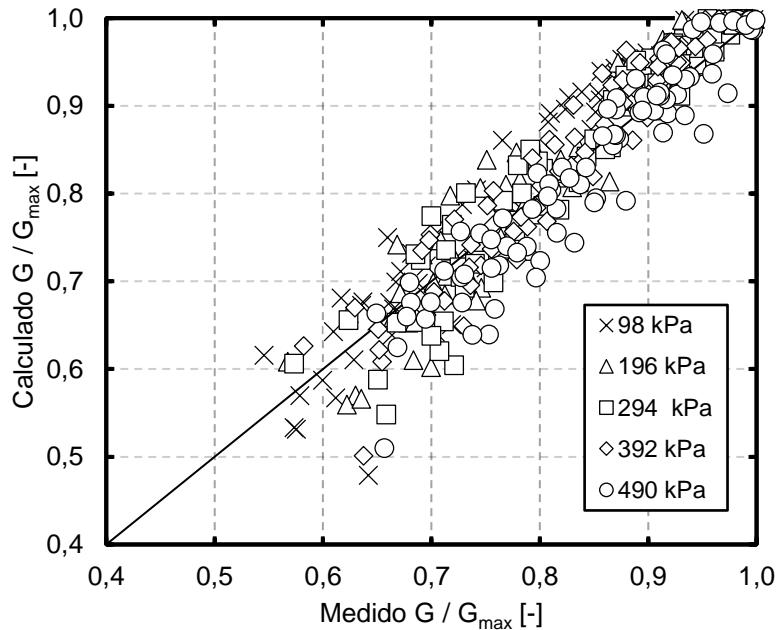


Figura 5-41: Estimación G/G_{max} según Stokoe et al. (1999)

(c) Zhang et al. (2005):

Modificando lo planteado por Stokoe et al. (1999), Zhang et al. (2005) propone agregar dos parámetros de ajuste, además de normalizar la deformación referencial. La relación propuesta se define de la siguiente forma:

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

$$\gamma_r = \gamma_{r\left(\frac{1\text{kg}}{\text{cm}^2}\right)} \cdot \left(\frac{\sigma'_m}{p_a}\right)^k$$

Donde γ_r se define en función de la deformación al corte para un estado de carga de 1 kg/cm^2 (98 kPa). Considerando que esta metodología se basa en Hardin and Drnevich (1972b) y viene a mejorar a la metodología de Stokoe et al. (1999), se tomaran los mismos coeficientes de α y la deformación referencial será la misma para un estado de carga de 1 kg/cm^2 obtenida en la metodología anterior, es decir, 0.0186%.

En la Tabla 5-17, se muestran los coeficientes k obtenidos, el cual fue obtenido calibrando cada resultado. Como promedio se tiene un valor de k en torno a los 0,47

y para el primer estado de carga no se obtienen valores de k debido a que no afecta a la deformación referencial, ya que σ'_m/p_a es igual a la unidad para 98 kPa.

Tabla 5-17: Coeficiente k obtenidos según metodología de Zhang et al. (2005).

Estado de Carga [kPa]	1%CF	5%CF	10%CF	20%CF
98	-	-	-	-
196	0,30	0,40	0,40	0,36
294	0,37	0,41	0,57	0,37
392	0,42	0,44	0,63	0,41
490	0,52	0,54	0,80	0,55

Al comparar los resultados obtenidos mediante columna resonante, para todos los contenidos de finos e índices de vacíos de confección inicial, respecto al valor calculado según la estimación Zhang et al. (2005) (Figura 5-42), por cada estado de carga, se observa una buena relación entre estas, mejorando la estimación propuesta por Stokoe et al. (1999), con errores puntuales que no superan el 22%, siendo en general un error no superior al 8%.

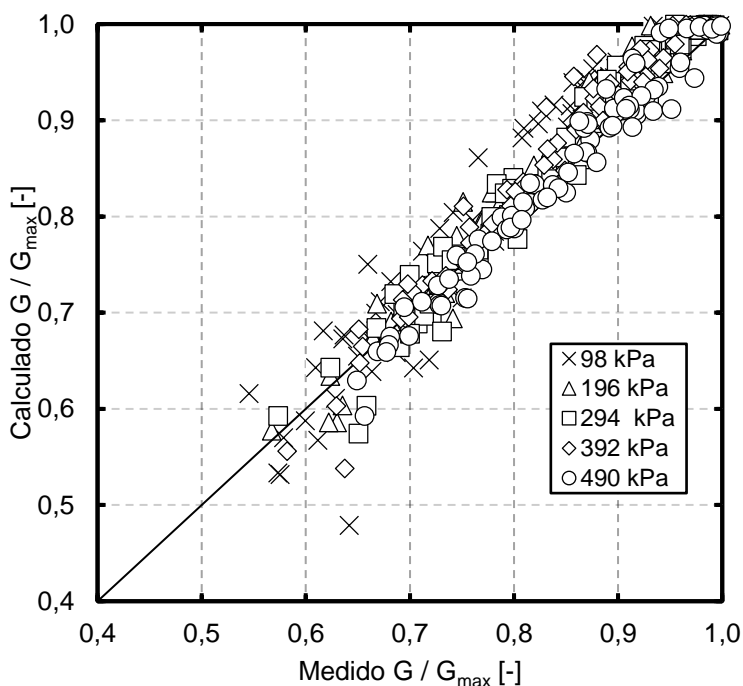


Figura 5-42: Estimación G/Gmax según Zhang et al. (2005)

Para cuantificar el efecto de la estimación, se considera los ensayos con los resultados para todos los contenidos de finos e índice de vacío de confección inicial para un estado de carga de 98 kPa, 294 kPa y 490 kPa (Figura 5-43).

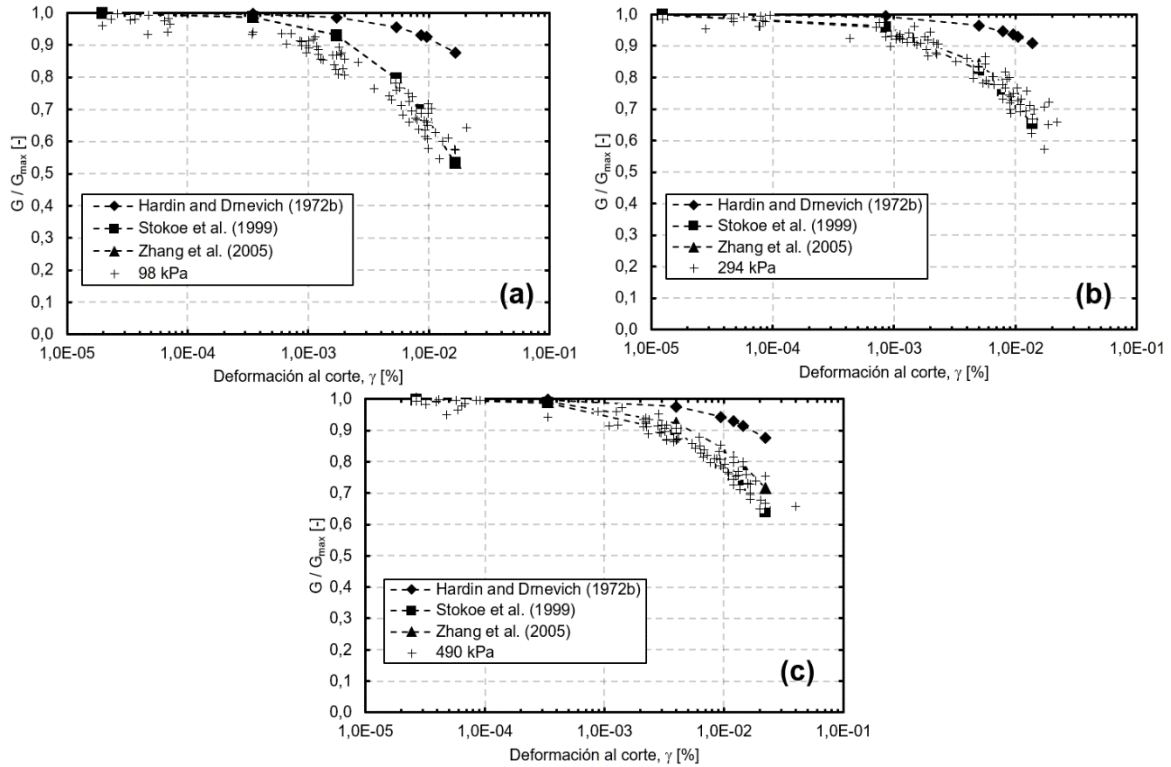


Figura 5-43: Estimación G/G_{max} : (a) 98 kPa, (b) 294 kPa), y (c) 490 kPa.

5.3.5. Estimación del Amortiguamiento (Damping)

Las estimaciones para el amortiguamiento (D) presentadas a continuación vienen de la aproximación propuesta por Hardin and Drnevich (1972b), dada por:

$$D = f\left(\frac{G}{G_{max}}\right)$$

Ishibashi and Zhang (1993), estudiaron una relación empírica entre el amortiguamiento (D) y el índice de plasticidad (IP), donde para una arena no plástica se tiene la siguiente relación:

$$D = 0,333 \cdot \left[0,586 \cdot \left(\frac{G}{G_{max}}\right)^2 - 1,547 \cdot \frac{G}{G_{max}} + 1 \right]$$

Al aplicar la relación empírica y comparándolo para todos los resultados obtenidos, se observa una buena aproximación, sin embargo, existen puntos con una gran diferencia entre lo obtenido y calculado, pero finalmente se obtiene un error asociado al 45%.

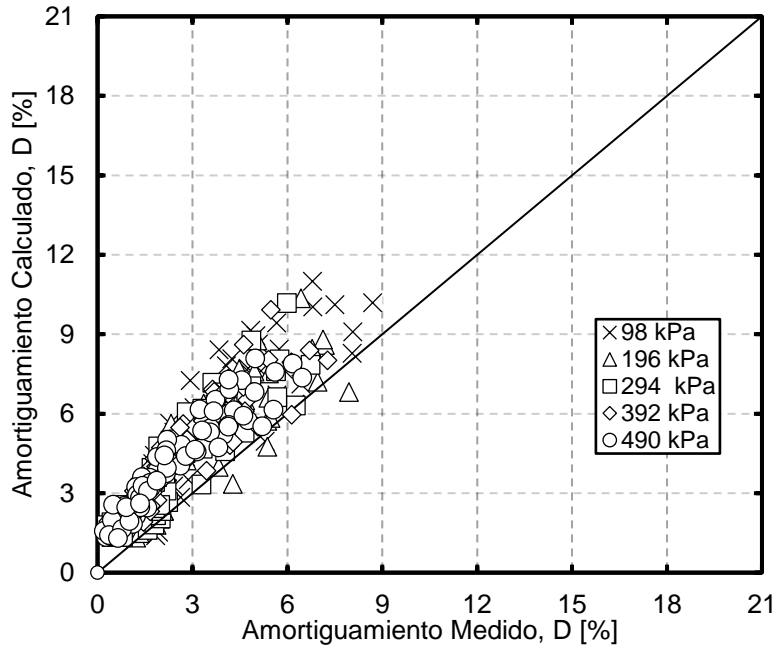


Figura 5-44: Estimación D según Ishibashi and Zhang (1993)

Por otro lado, y siguiendo la misma metodología, Zhang et al. (2005) propuso una relación dada por:

$$D = f\left(\frac{G}{G_{max}}\right) + D_{min}$$

$$D - D_{min} = k_1 \left(\frac{G}{G_{max}}\right)^2 + k_2 \left(\frac{G}{G_{max}}\right) + k_3$$

Donde k_1 , k_2 y k_3 son coeficientes polinómicos de ajustes, los que son definidos por el mismo autor, para ensayos de columna resonante por: 9,4, -26,5 y 17,1 respectivamente, donde se obtiene mejores resultados que la metodología Ishibashi and Zhang (1993), donde el error asociado promedio varía entre 30% al 40%.

Al modificar los coeficientes polinómicos, se ha realizado una iteración para minimizar el error entre los resultados obtenidos y las estimaciones, donde no se ha obtenido una relación de los coeficientes polinómicos respecto al contenido de finos, índice de vacío o estado de carga, por lo que se ha propuesto coeficientes que caractericen al material arena El Torito, los cuales para k_1 , k_2 y k_3 son 13,2 -27,3 y 14,1, respectivamente. Con estos coeficientes, es posible tener una buena aproximación en los primeros datos de entrada, siendo casi idénticos, para finalmente tener un error asociado promedio menor al 20%.

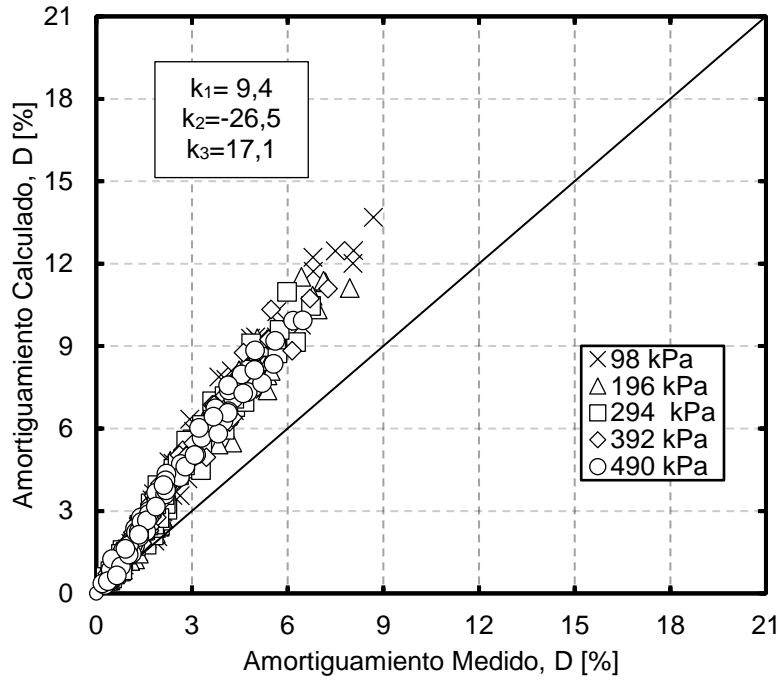


Figura 5-45: Estimación D según Zhang et al. (2005).

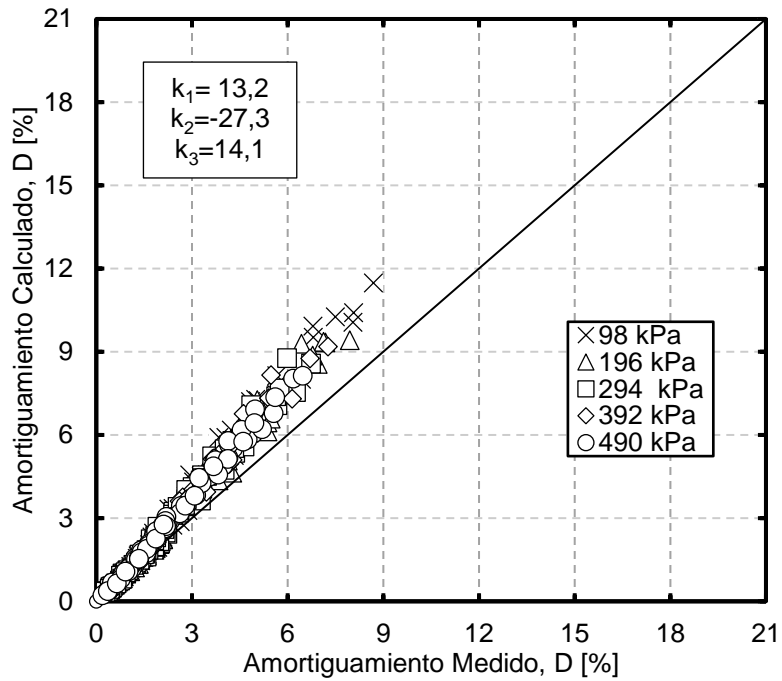


Figura 5-46: Estimación D según Zhang et al. (2005) modificado.

Finalmente, para cuantificar el efecto de la estimación, se considera los ensayos con los resultados para todos los contenidos de finos e índice de vacío de

confección inicial para un estado de carga de 98 kPa, 294 kPa y 490 kPa (Figura 5-47).

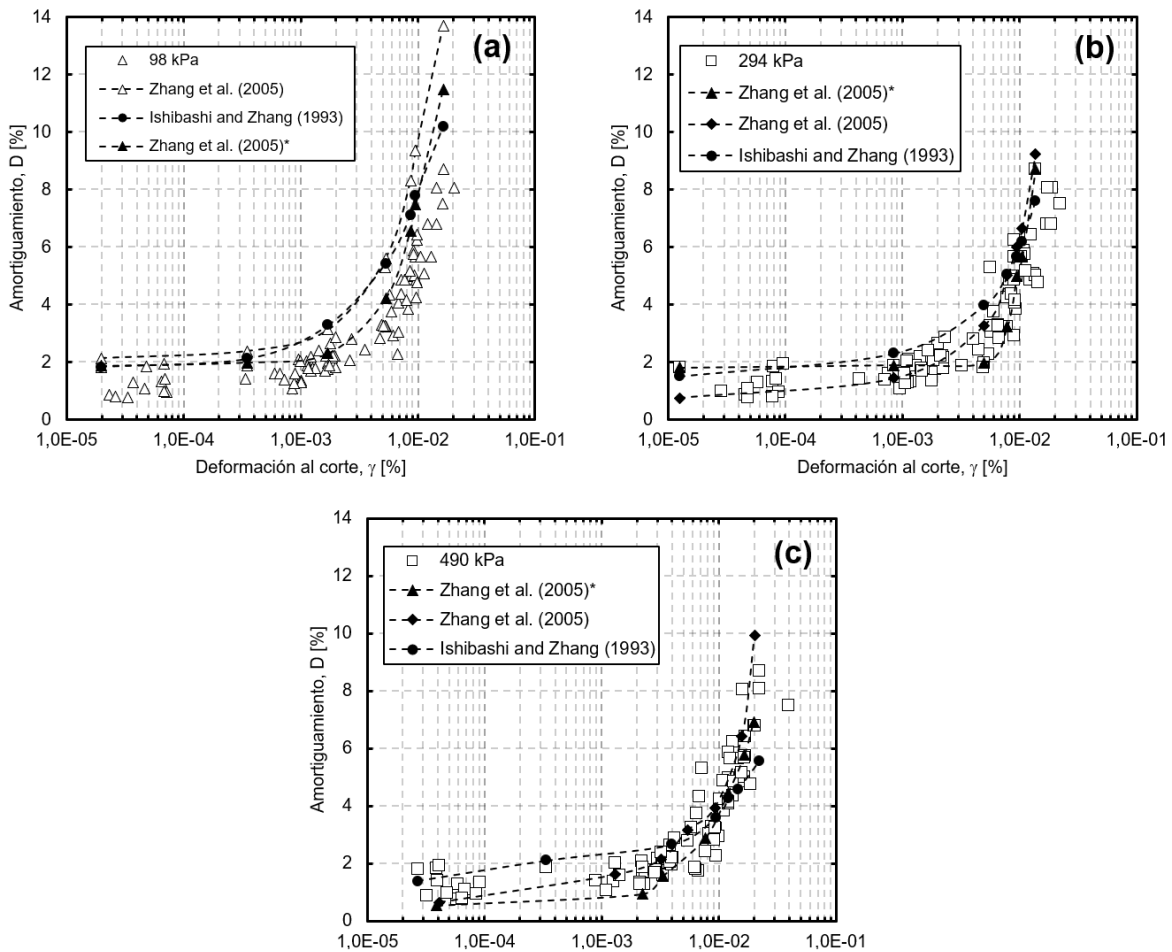


Figura 5-47: Estimación D: (a) 98 kPa, (b) 294 kPa, y (c) 490 kPa.

5.3.6. G/G_{max} vs D

Al graficar los resultados para la degradación de la rigidez en función del amortiguamiento (D), se observa una tendencia lineal al agrupar todos los resultados, donde al aumentar el amortiguamiento, aumenta la degradación de la rigidez (disminuye G/G_{max}). Esto es válido para todos los resultados, donde en Figura 5-48, se observa la tendencia lineal para distintos índices de vacíos de confección inicial y en la Figura 5-49 para dos estados de carga (98 kPa y 490 kPa).

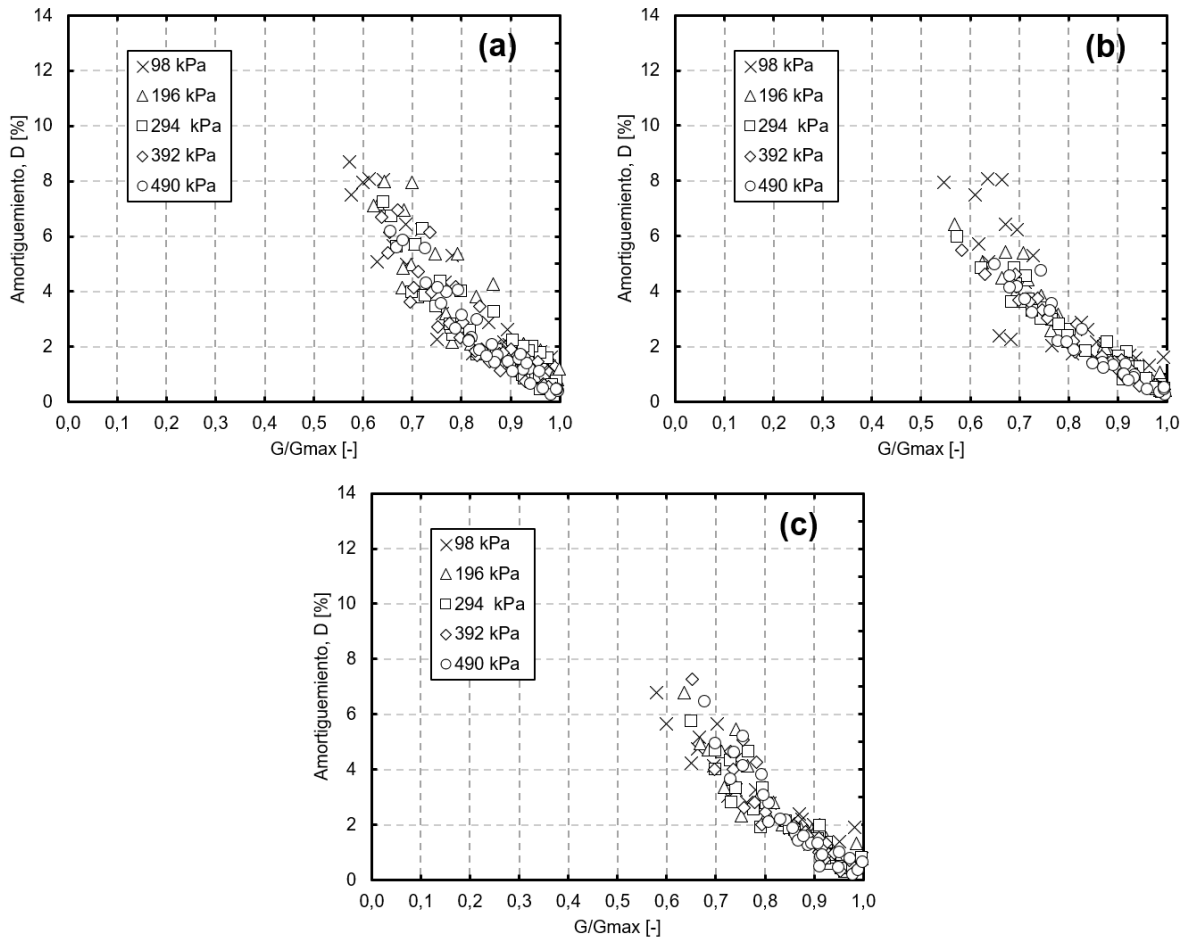


Figura 5-48: G/G_{max} vs D para: (a) $e_i=0.75$, (b) $e_i=0.80$, y (c) $e_i=0.85$.

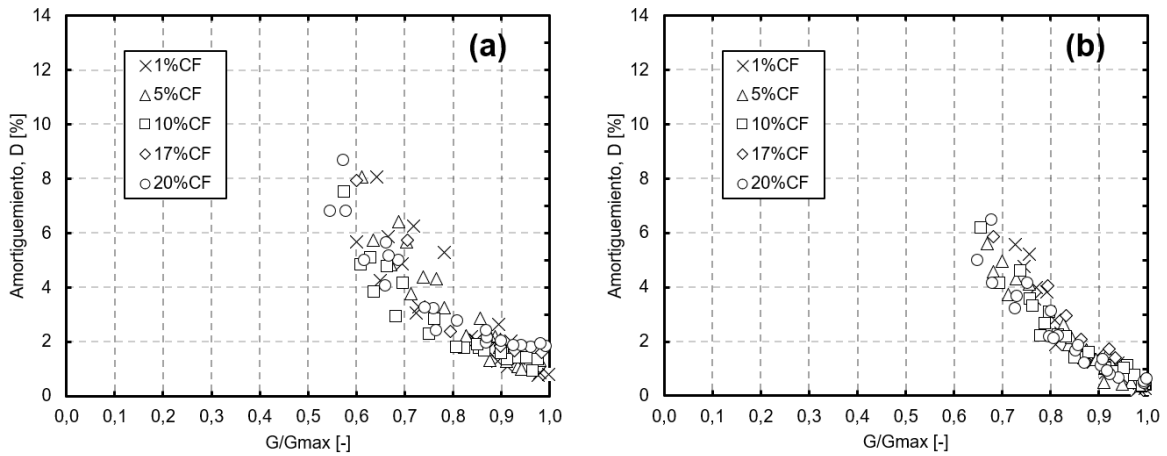


Figura 5-49: G/G_{max} vs D para: (a) 98 kPa y (b) 490 kPa.

6. DEGRADACIÓN NO DRENADA

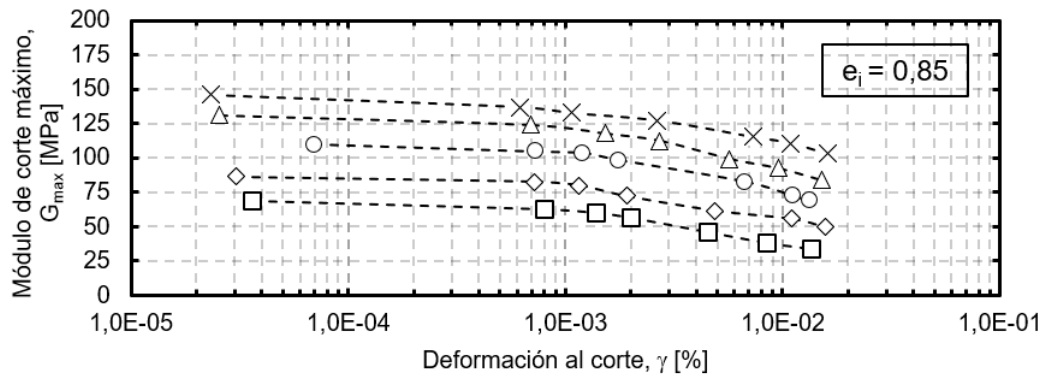
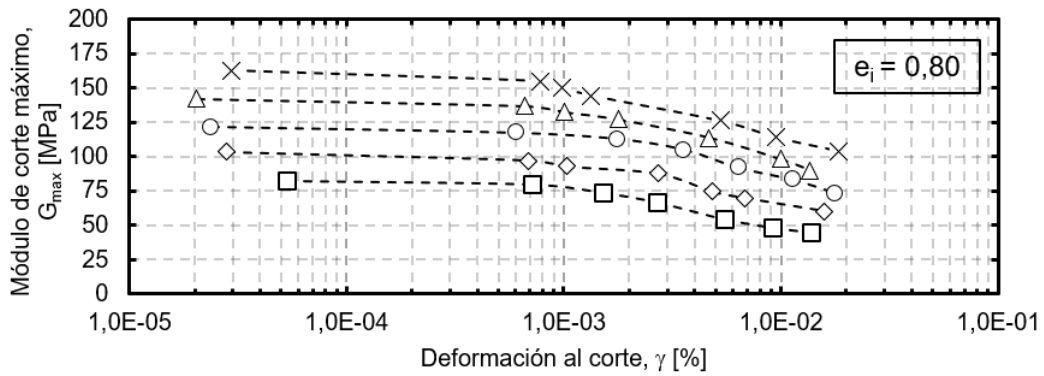
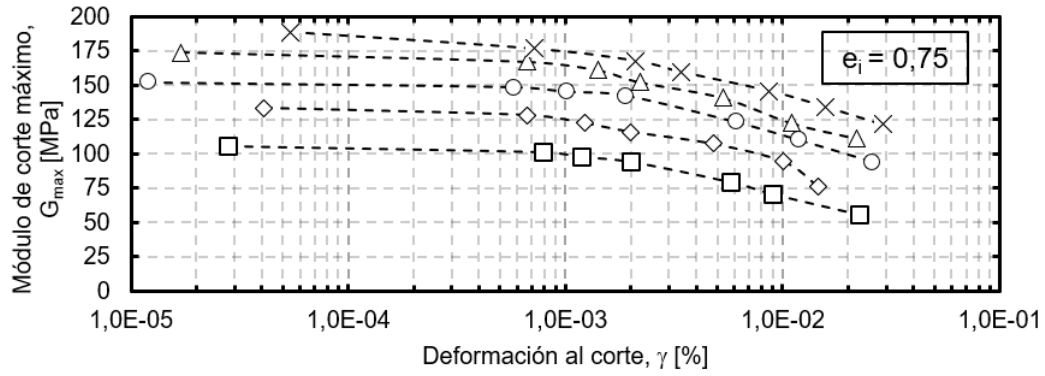
De forma similar a la presentación de los resultados obtenidos del comportamiento drenado, a continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante columna resonante para el comportamiento no drenado.

6.1. Resultados para Arena Limpia

Los resultados para una arena limpia obtenidos mediante columna resonante se muestran en la Figura 5-1, donde se grafica el módulo de corte a medida que aumenta la deformación al corte para un rango de presiones de confinamiento efectivo entre 1 kg/cm^2 a 5 kg/cm^2 , para tres índices de vacíos iniciales distintos.

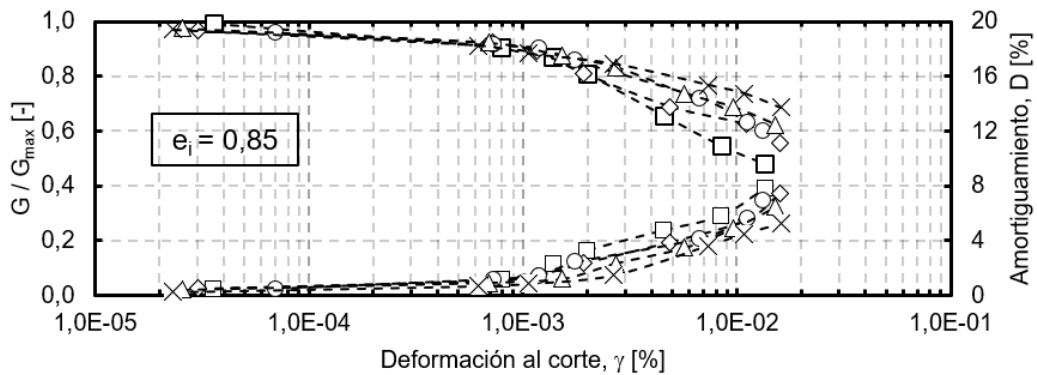
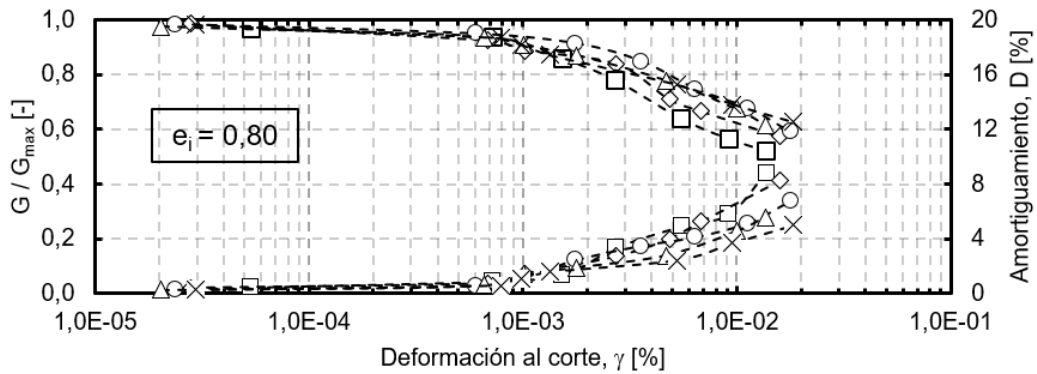
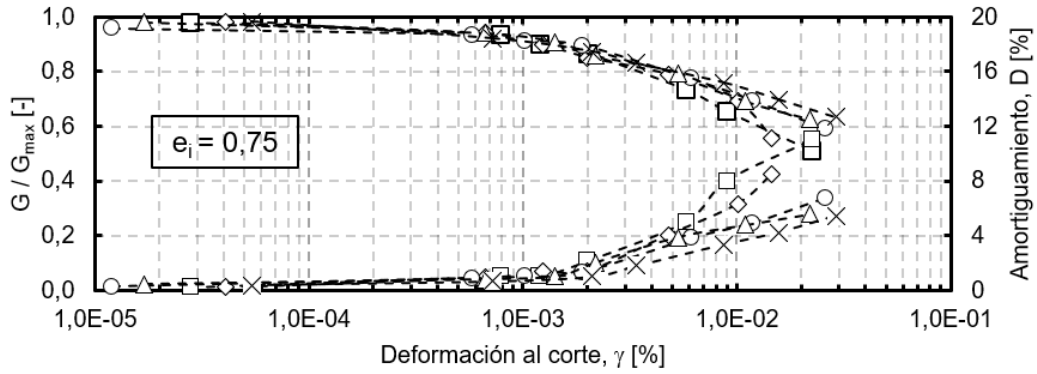
Al utilizar los valores obtenidos mediante bender element del módulo de corte máximo (G_{\max}), es posible obtener la relación G/G_{\max} en función de la deformación al corte. Estos resultados se pueden ver reflejados en la Figura 5-2, donde adicionalmente, se muestran los resultados obtenidos para el amortiguamiento. Ambos parámetros se grafican en función de la deformación al corte, para un rango de presiones de confinamiento entre 1 kg/cm^2 a 5 kg/cm^2 , para tres índices de vacíos iniciales distintos.

Por otro lado, a partir del primer valor obtenido en columna resonante para el amortiguamiento (D_{\min}), se grafica D/D_{\min} en función de la deformación al corte en la Figura 5-3, mientras que en la Figura 6-4 se evidencia la generación de presiones de poros normalizada ($\Delta u/\sigma_o$) a medida que aumenta la deformación al corte.



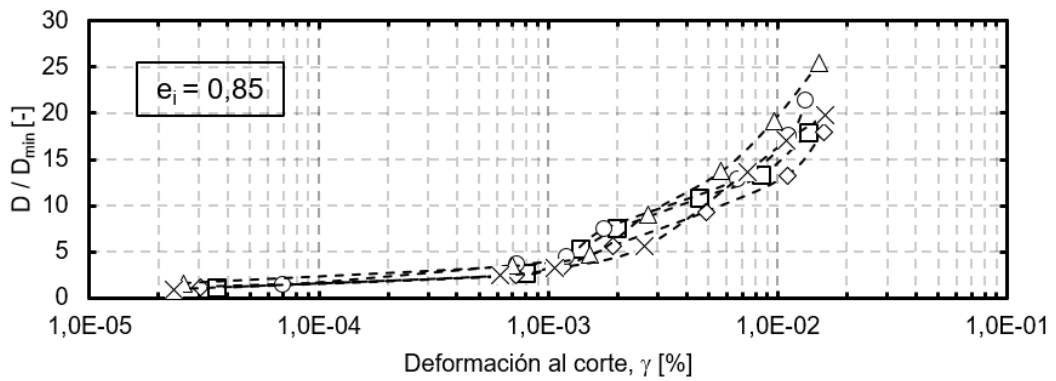
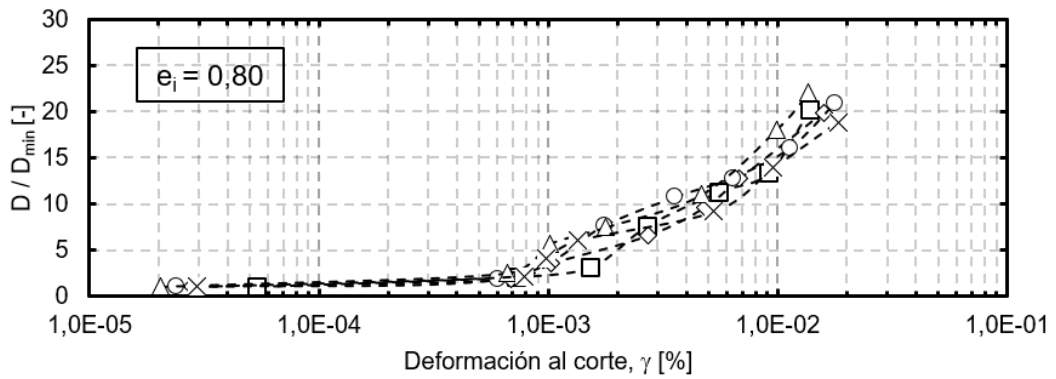
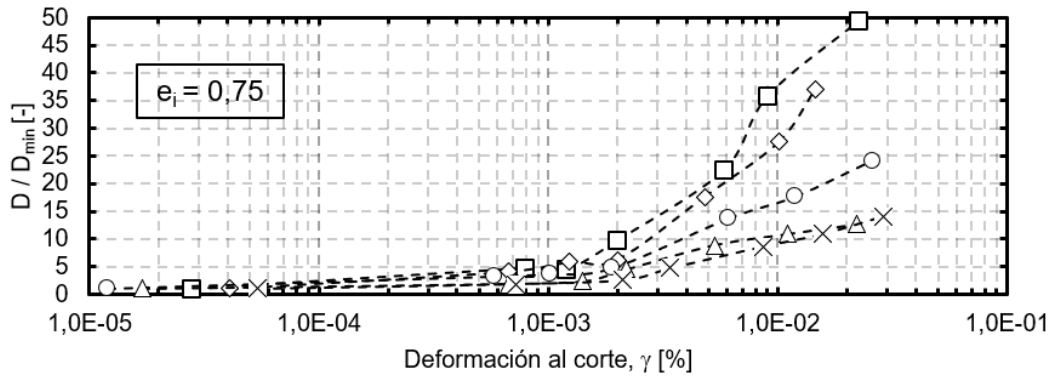
-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -✕- 490 kPa

Figura 6-1: Resultados de G vs γ , para una arena limpia ensayada en condición no drenada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.



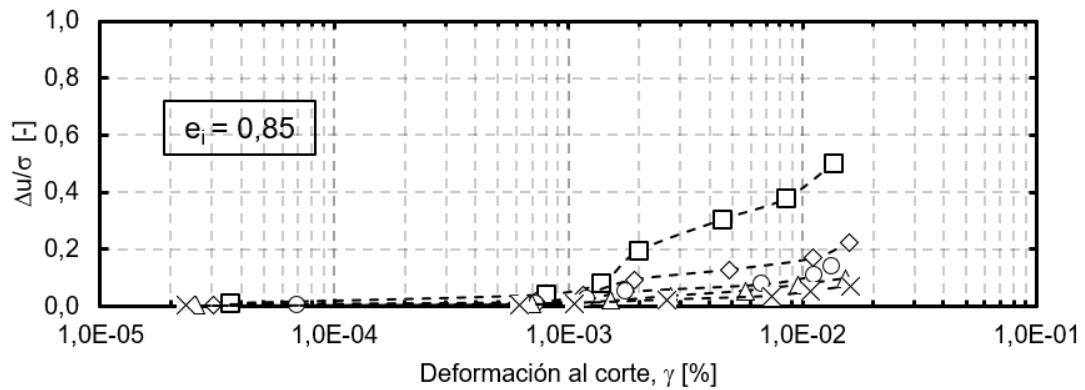
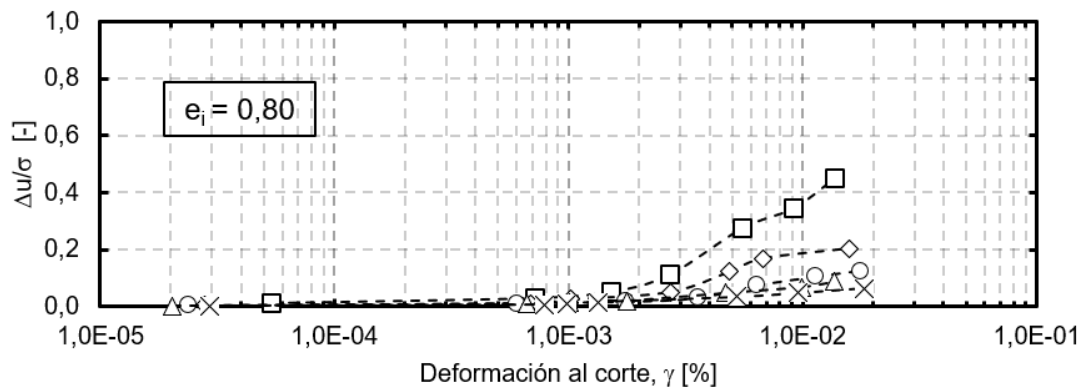
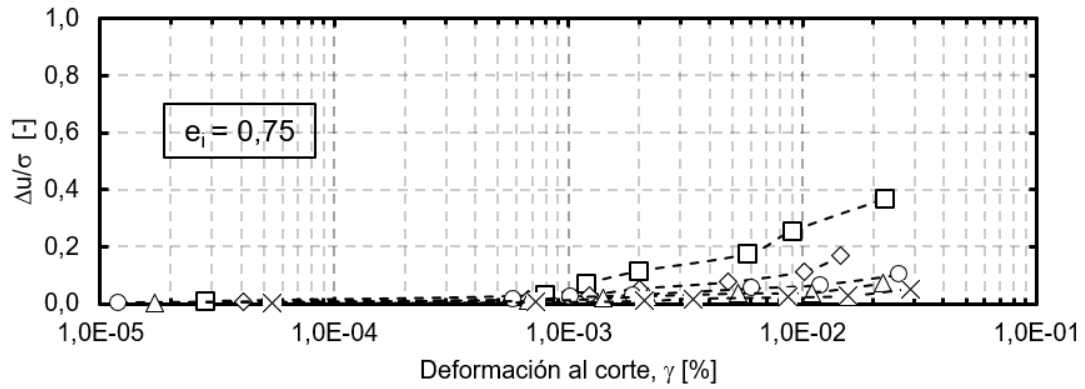
-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -✕- 490 kPa

Figura 6-2: Resultados de G/G_{max} vs γ , para una arena limpia ensayada en condición no drenada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.



-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -✕- 490 kPa

Figura 6-3: Resultados de D/D_{min} vs γ , para una arena limpia ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.



-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -✕- 490 kPa

Figura 6-4: Resultados de $\Delta u/\sigma_0$ vs γ , para una arena limpia ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.

Finalmente, en la Figura 5-4 se muestran los valores de todos los ensayos realizados para una arena limpia, de D/D_{min} vs G/G_{max} .

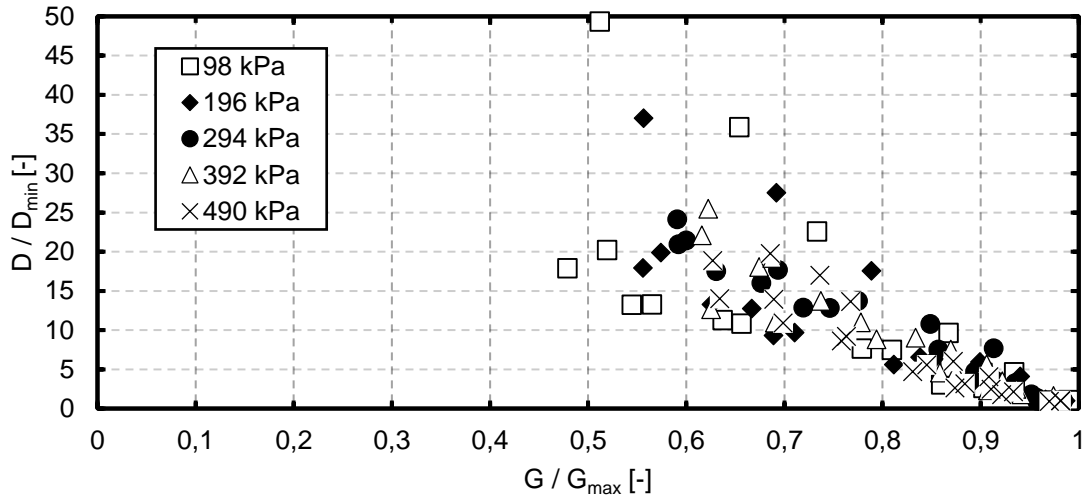


Figura 6-5: Resultados de D/D_{min} vs G/G_{max} , para una arena limpia ensayada a diferentes estados de carga.

6.2. Resultados para Arenas con Finos

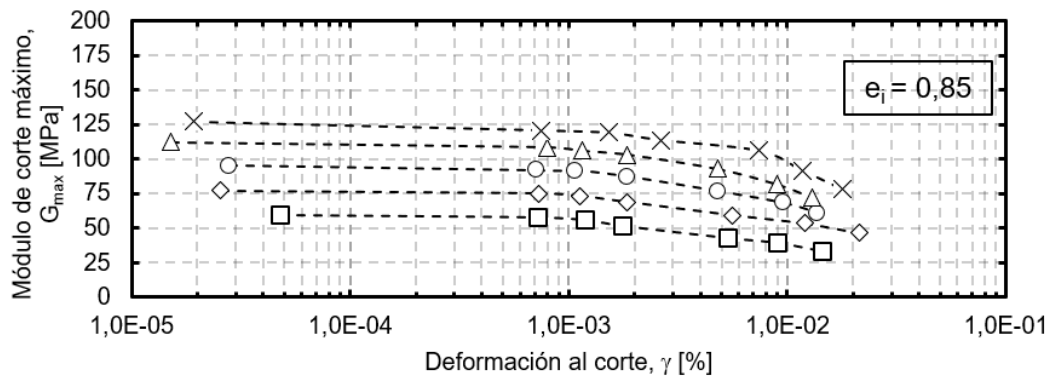
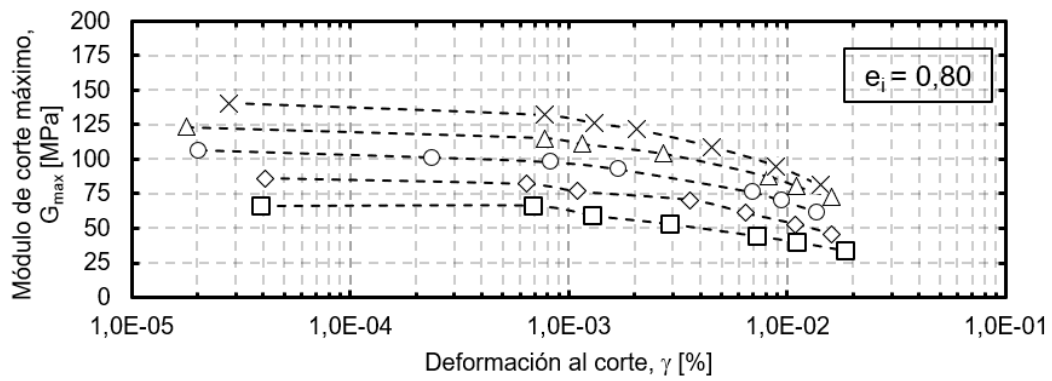
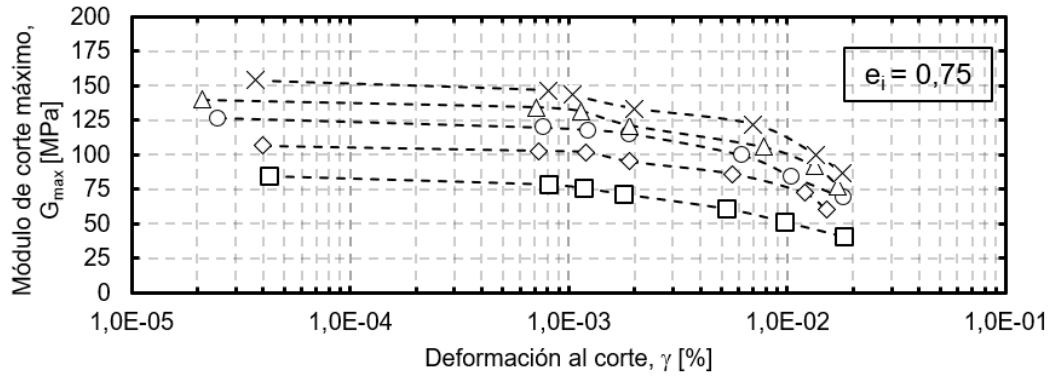
A continuación, se muestran los resultados obtenidos en condición no drenada mediante columna resonante para distintos contenidos de finos (5%, 10% y 20%).

6.2.1. Resultados para 5% Contenido de Finos

Los resultados para una arena con 5% de contenido de finos obtenidos mediante columna resonante se muestran en la Figura 5-5, donde se grafica el módulo de corte a medida que aumenta la deformación al corte para un rango de presiones de confinamiento efectivo entre 1 kg/cm^2 a 5 kg/cm^2 , para tres índices de vacíos iniciales distintos.

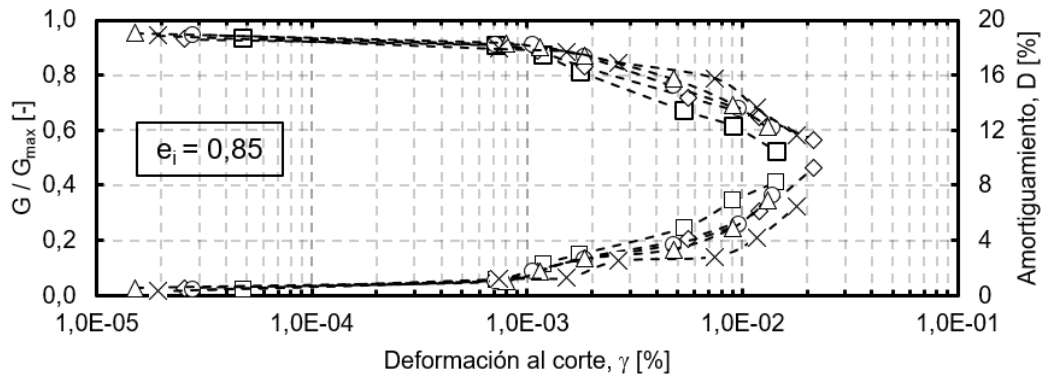
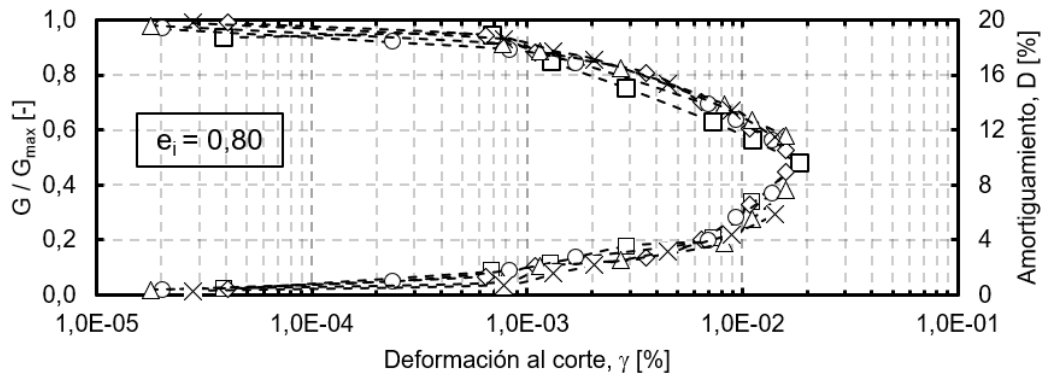
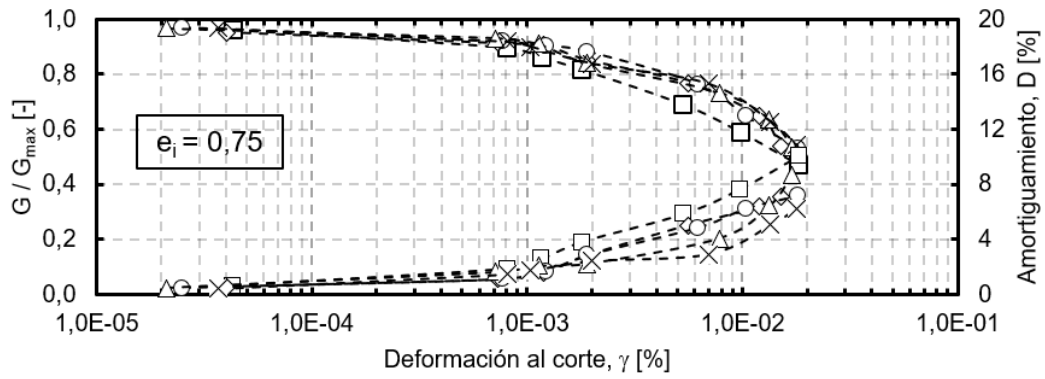
Al utilizar los valores obtenidos mediante bender element del módulo de corte máximo (G_{max}), es posible obtener la relación G/G_{max} en función de la deformación al corte. Estos resultados se pueden ver reflejados en la Figura 5-6, donde adicionalmente, se muestran los resultados obtenidos para el amortiguamiento. Ambos parámetros se grafican en función de la deformación al corte, para un rango de presiones de confinamiento entre 1 kg/cm^2 a 5 kg/cm^2 , para tres índices de vacíos iniciales distintos.

Por otro lado, a partir del primer valor obtenido en columna resonante para el amortiguamiento (D_{min}), se grafica D/D_{min} en función de la deformación al corte en la Figura 5-7.



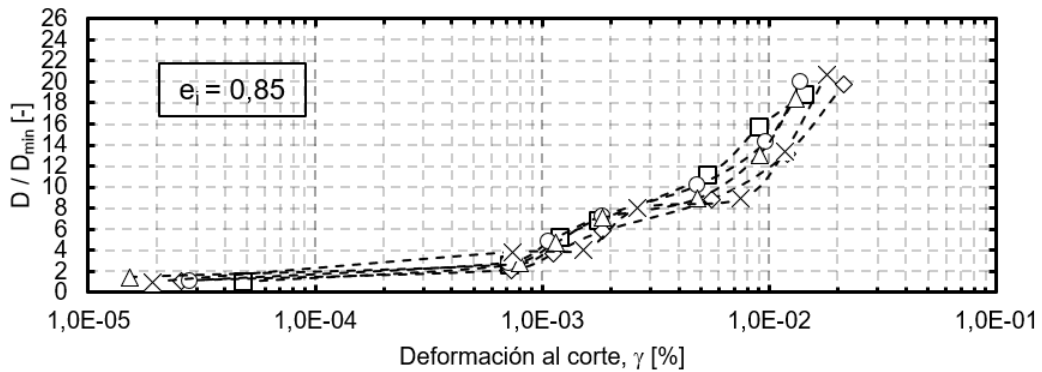
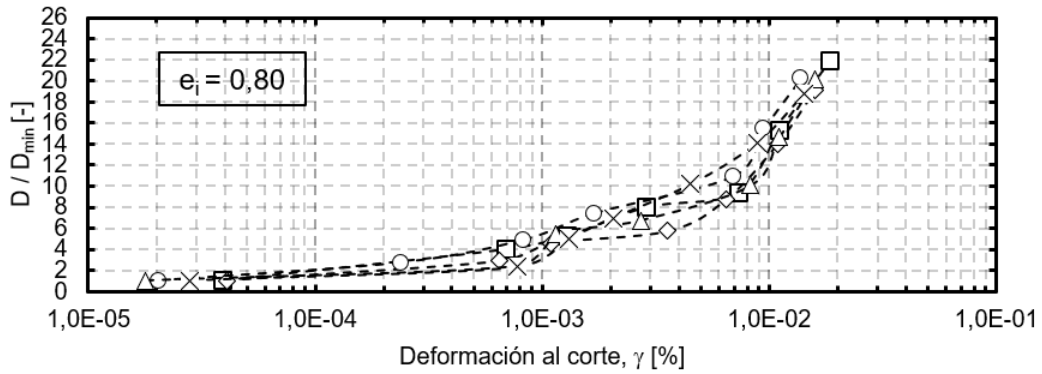
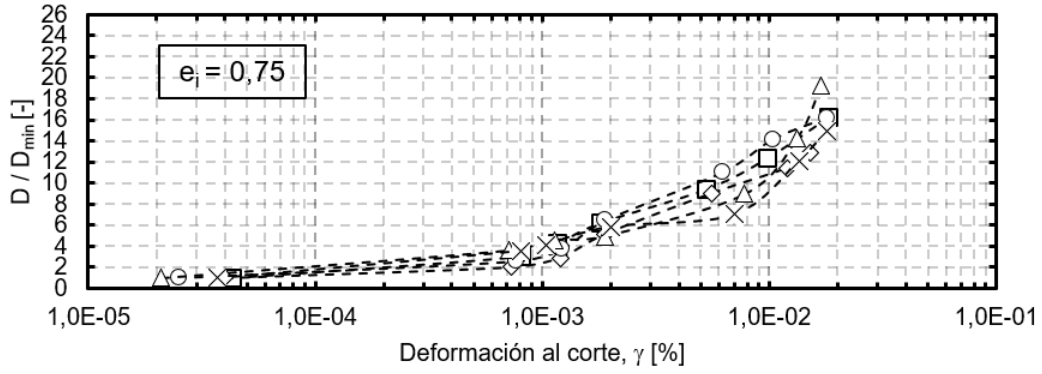
-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -✕- 490 kPa

Figura 6-6: Resultados de G vs γ , para una arena con 5% CF, ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.



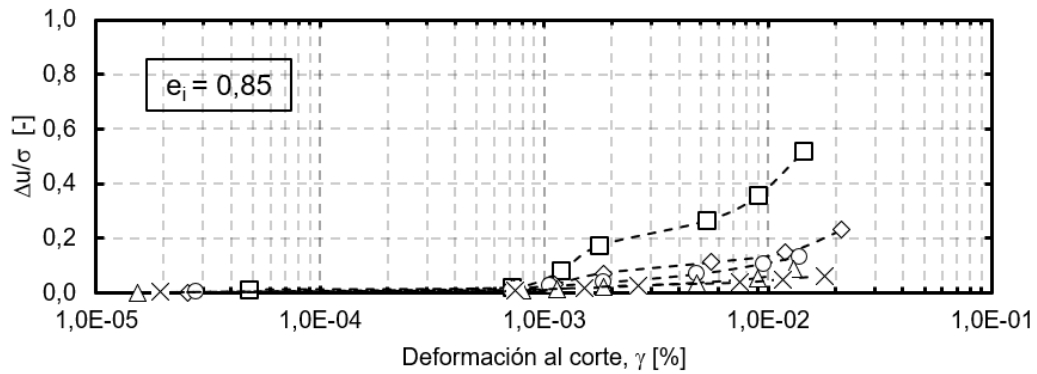
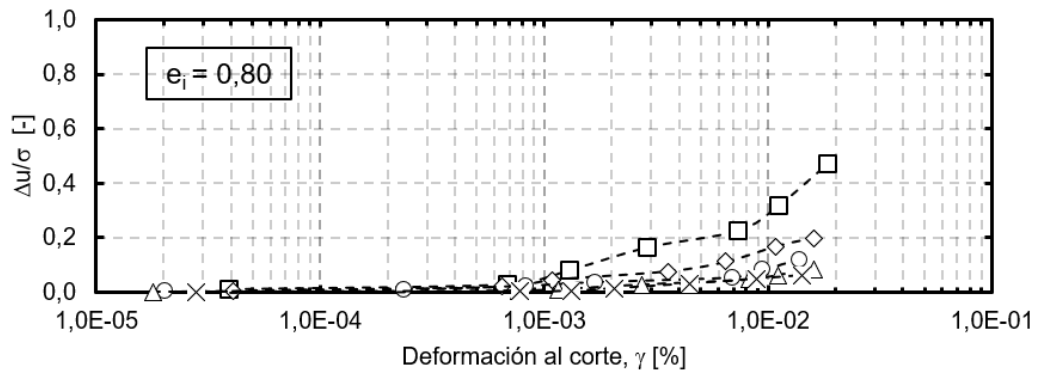
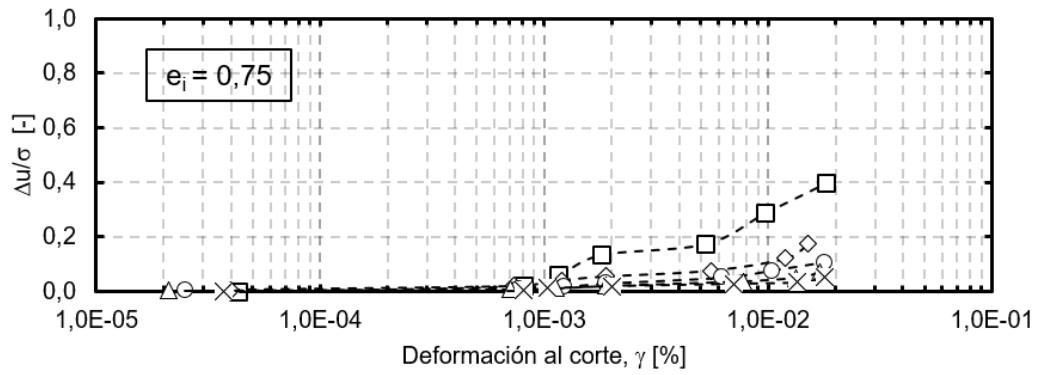
-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -✱- 490 kPa

Figura 6-7: Resultados de G/G_{max} vs γ , para una arena con 5%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.



-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -✕- 490 kPa

Figura 6-8: Resultados de D/D_{min} vs γ , para una arena con 5%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.



-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -✕- 490 kPa

Figura 6-9: Resultados de $\Delta u/\sigma_0$ vs γ , para una arena con 5%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.

Finalmente, en la Figura 5-8 se muestran los valores de todos los ensayos realizados para una arena con 5%CF, de D/D_{min} vs G/G_{max} .

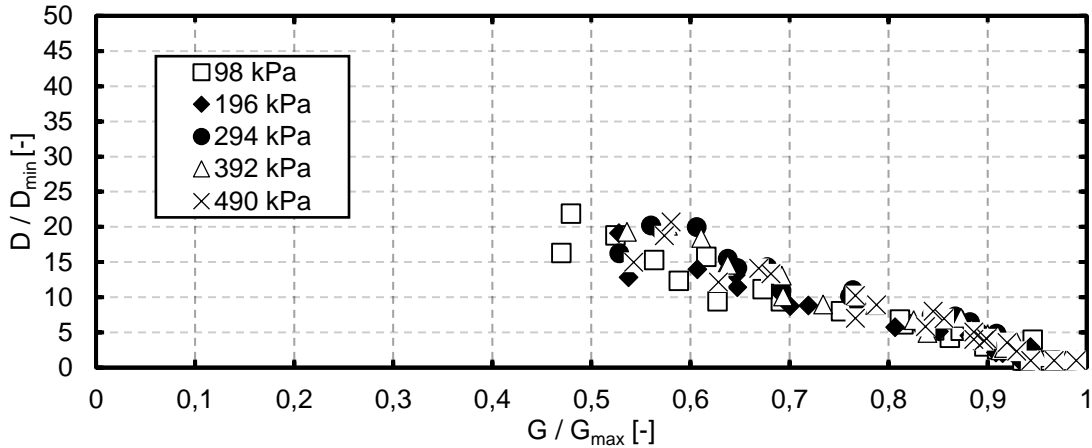


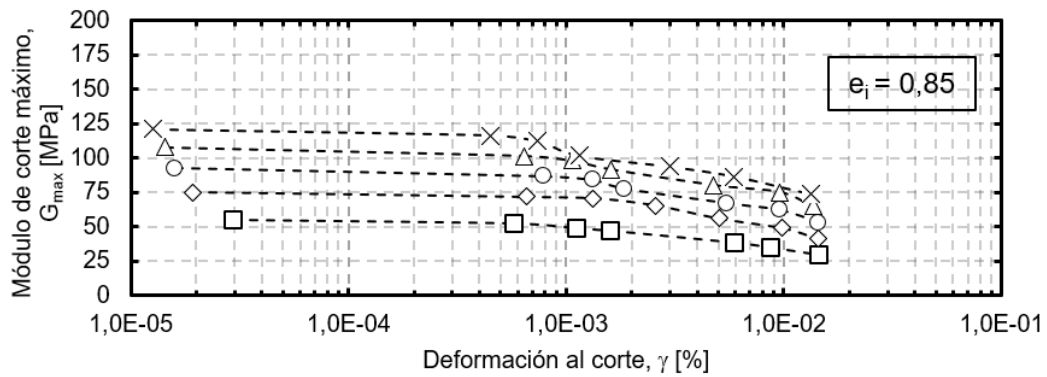
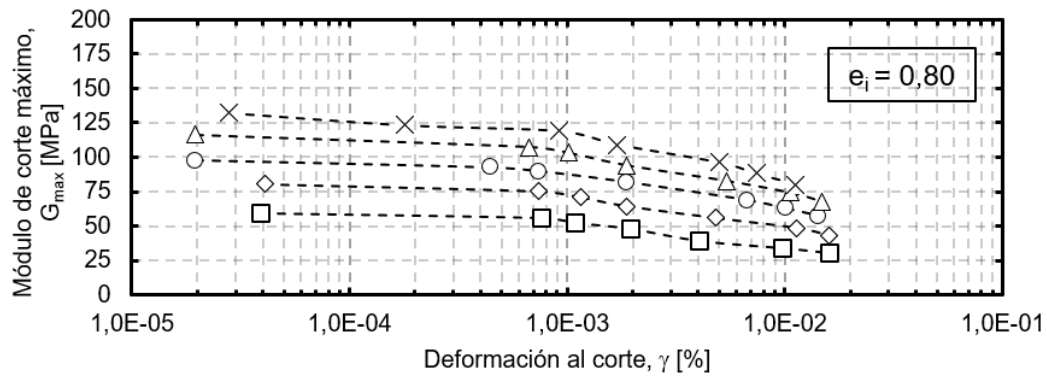
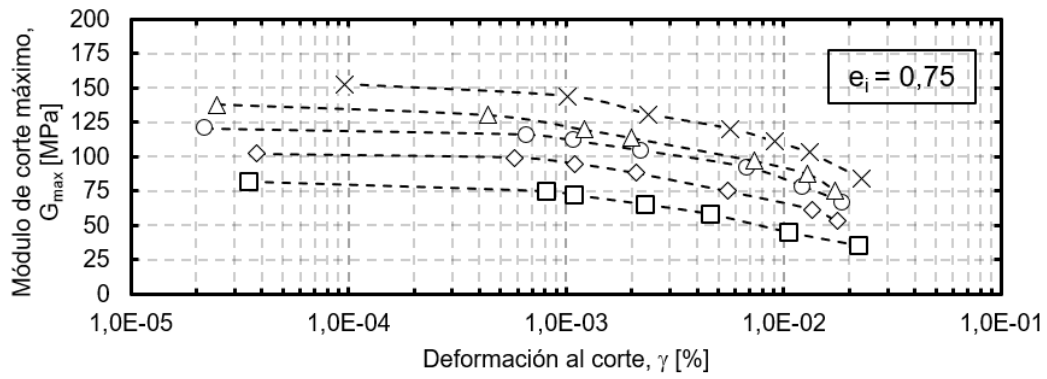
Figura 6-10: Resultados de D/D_{min} vs G/G_{max} , para una arena con 5%CF ensayada a diferentes estados de carga.

6.2.2. Resultados para 10% Contenido de Finos

Los resultados para una arena con 10% de contenido de finos obtenidos mediante columna resonante se muestran en la Figura 5-9, donde se grafica el módulo de corte a medida que aumenta la deformación al corte para un rango de presiones de confinamiento efectivo entre 1 kg/cm² a 5 kg/cm², para tres índices de vacíos iniciales distintos.

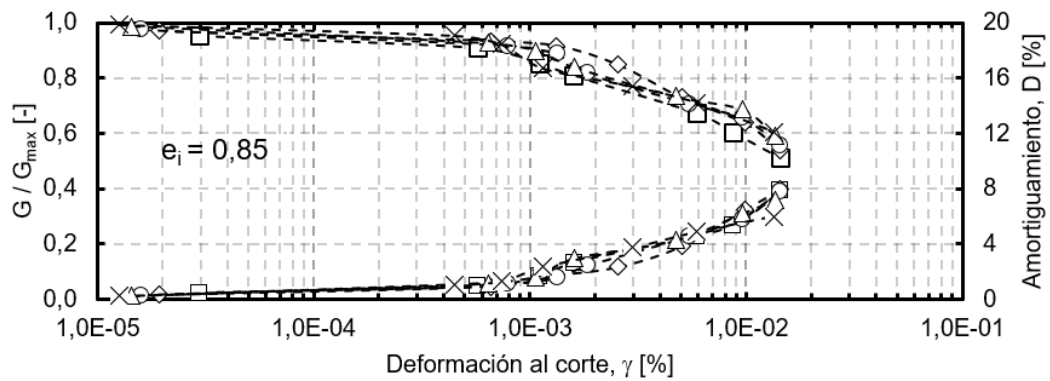
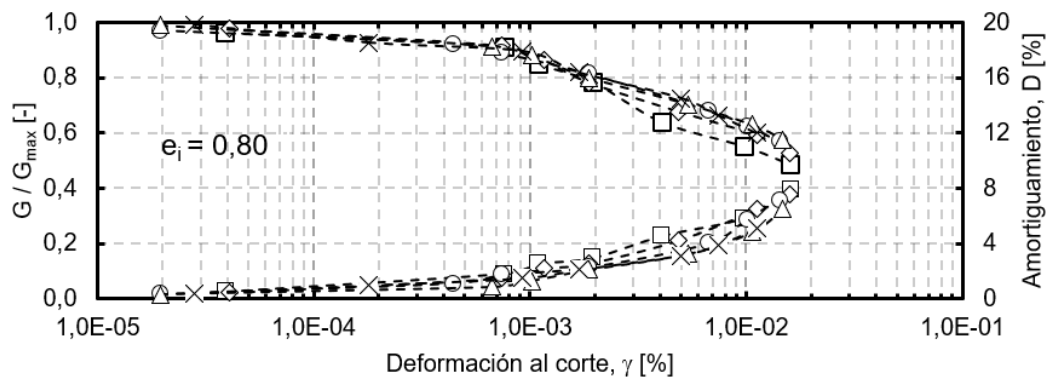
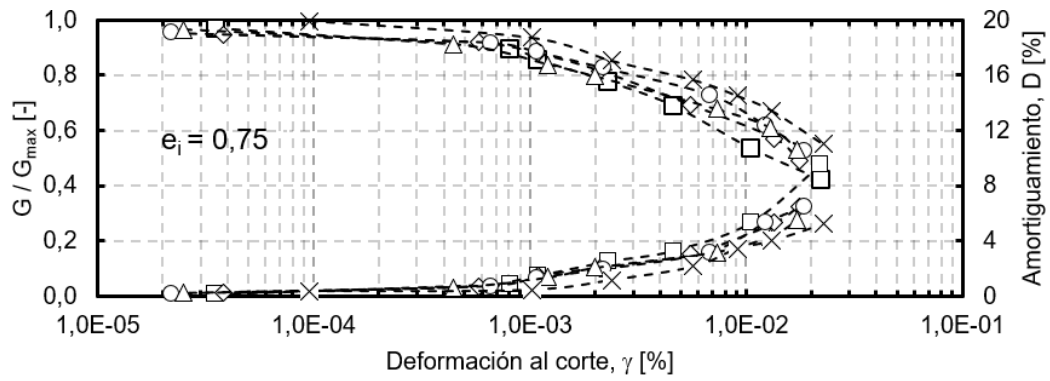
Al utilizar los valores obtenidos mediante bender element del módulo de corte máximo (G_{max}), es posible obtener la relación G/G_{max} en función de la deformación al corte. Estos resultados se pueden ver reflejados en la Figura 5-10, donde adicionalmente, se muestran los resultados obtenidos para el amortiguamiento. Ambos parámetros se grafican en función de la deformación al corte, para un rango de presiones de confinamiento entre 1 kg/cm² a 5 kg/cm², para tres índices de vacíos iniciales distintos.

Por otro lado, a partir del primer valor obtenido en columna resonante para el amortiguamiento (D_{min}), se grafica D/D_{min} en función de la deformación al corte en la Figura 5-11.



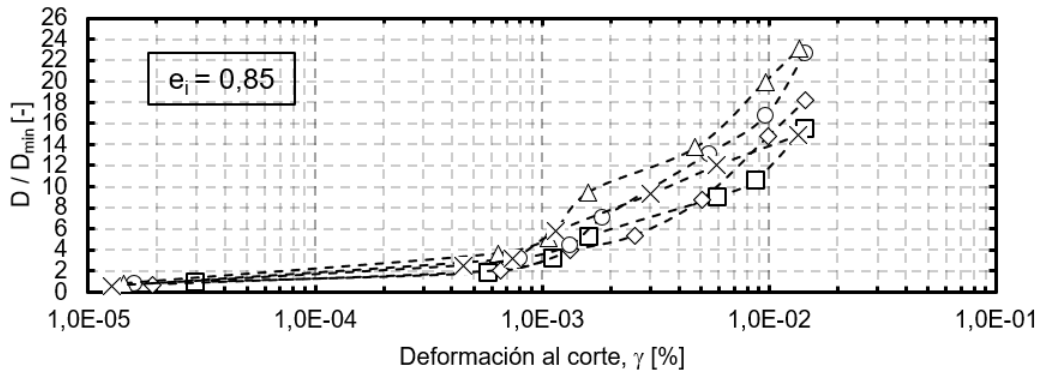
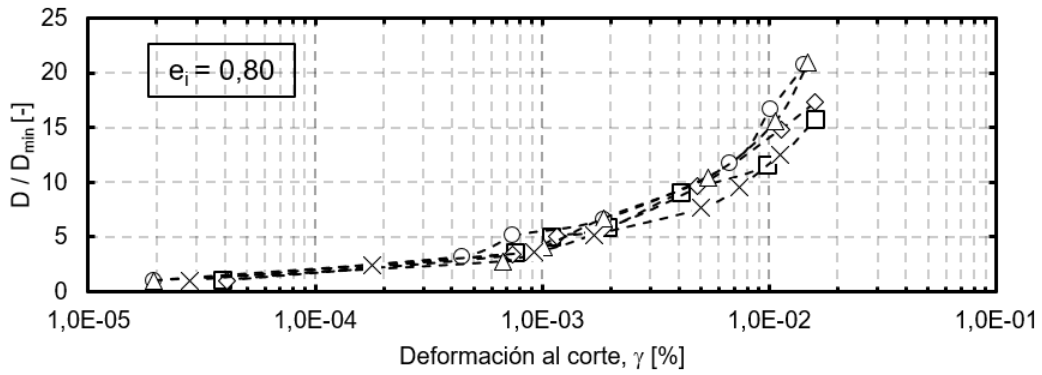
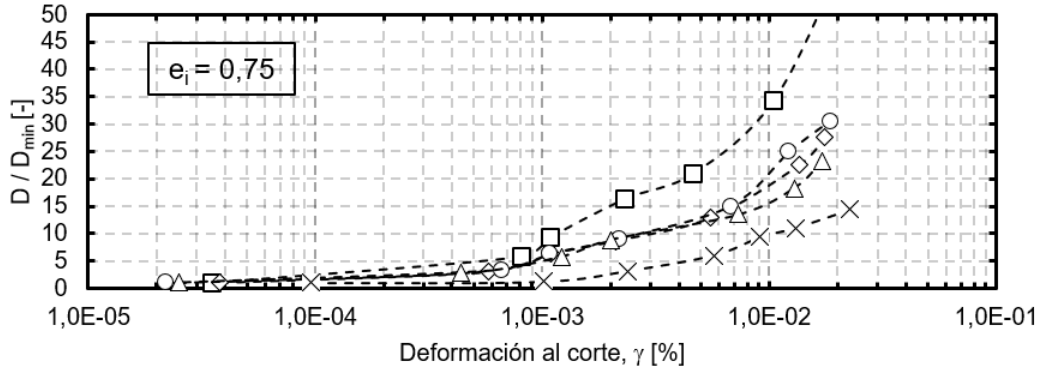
-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -×- 490 kPa

Figura 6-11: Resultados de G vs γ , para una arena con 10% CF, ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.



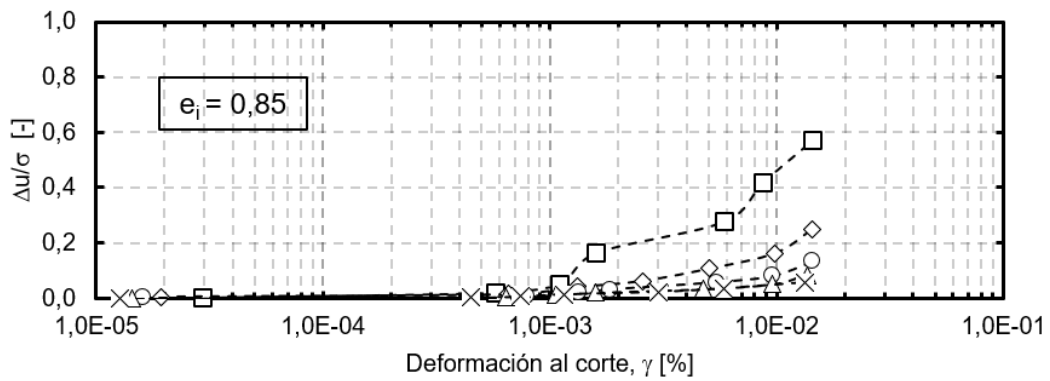
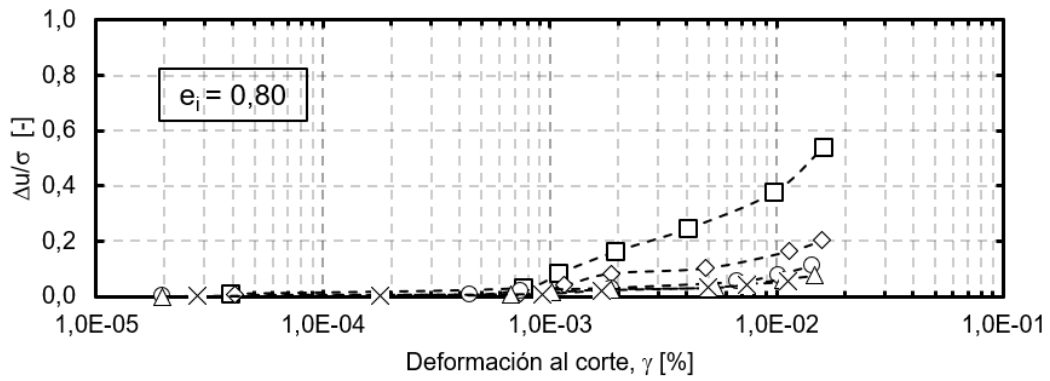
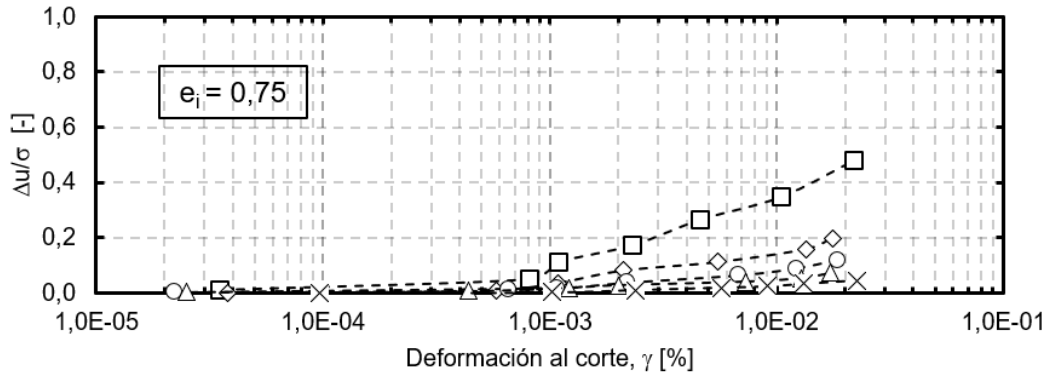
-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -✕- 490 kPa

Figura 6-12: Resultados de G/G_{max} vs γ , para una arena con 10%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.



-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -×- 490 kPa

Figura 6-13: Resultados de D/D_{min} vs γ para una arena con 10%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.



- □ - 98 kPa - ◇ - 196 kPa - ○ - 294 kPa - △ - 392 kPa - ✕ - 490 kPa

Figura 6-14: Resultados de $\Delta u/\sigma_0$ vs γ , para una arena 10%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.

Finalmente, en la Figura 5-12 se muestran los valores de todos los ensayos realizados para una arena con 10%CF, de D/D_{\min} vs G/G_{\max} .

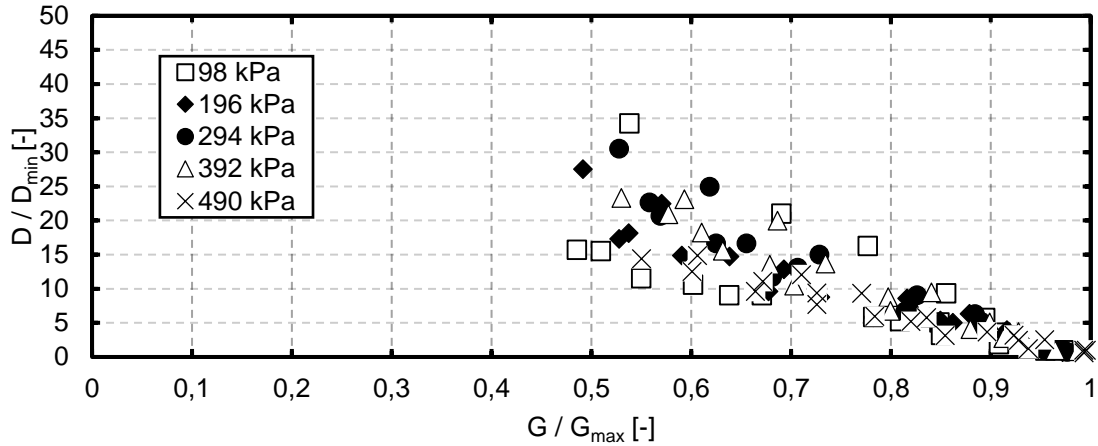


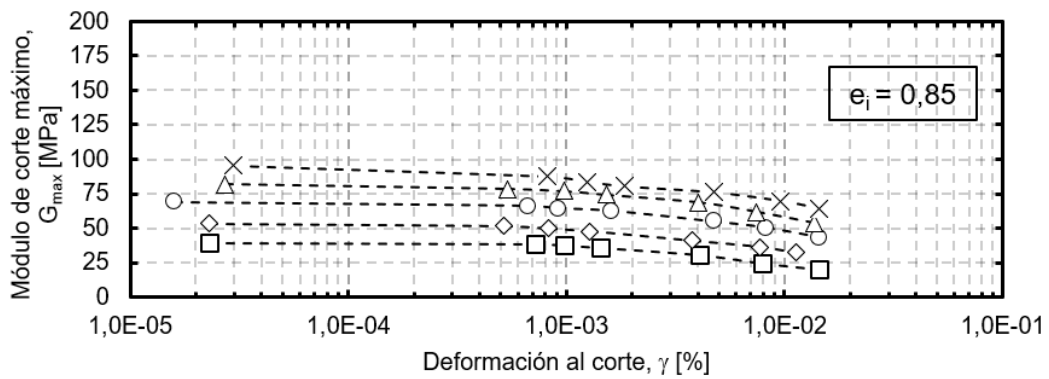
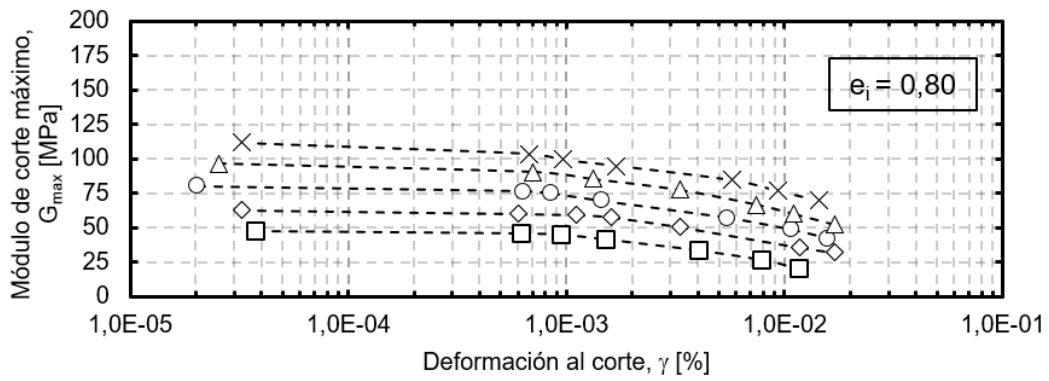
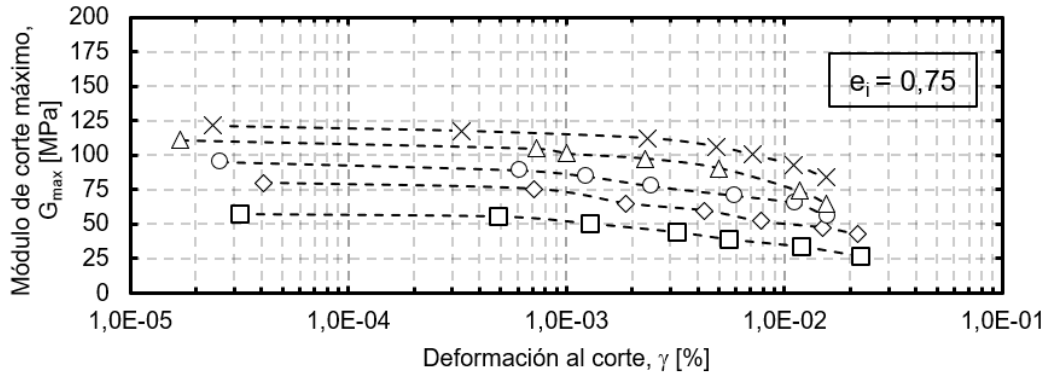
Figura 6-15: Resultados de D/D_{min} vs G/G_{max} , para una arena con 10%CF ensayada a diferentes estados de carga.

6.2.3. Resultados para 20% Contenido de Finos

Los resultados para una arena con 20% de contenido de finos obtenidos mediante columna resonante se muestran en la Figura 5-15, donde se grafica el módulo de corte a medida que aumenta la deformación al corte para un rango de presiones de confinamiento efectivo entre 1 kg/cm^2 a 5 kg/cm^2 , para tres índices de vacíos iniciales distintos.

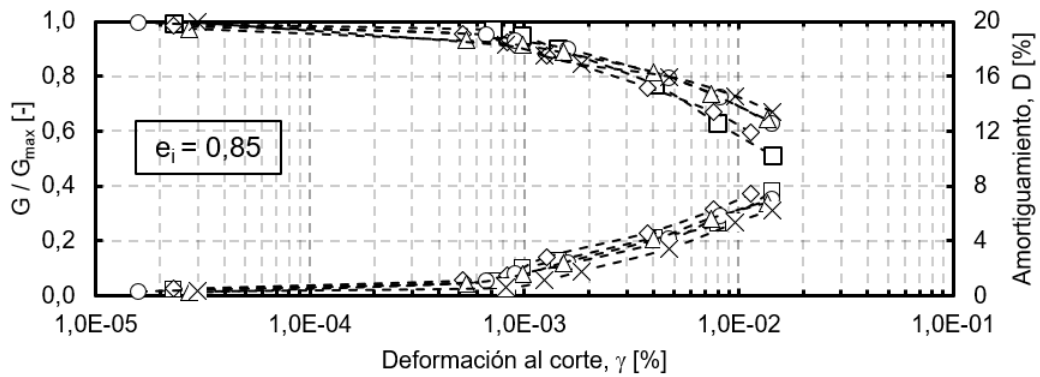
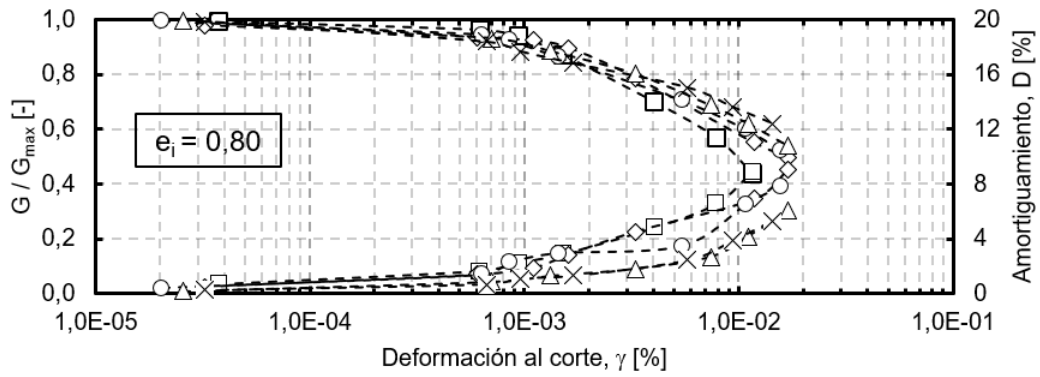
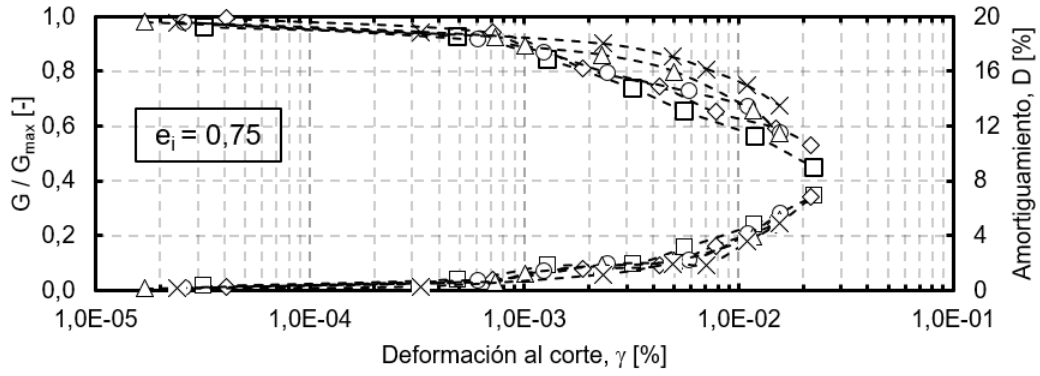
Al utilizar los valores obtenidos mediante bender element del módulo de corte máximo (G_{max}), es posible obtener la relación G/G_{max} en función de la deformación al corte. Estos resultados se pueden ver reflejados en la Figura 5-16, donde adicionalmente, se muestran los resultados obtenidos para el amortiguamiento. Ambos parámetros se grafican en función de la deformación al corte, para un rango de presiones de confinamiento entre 1 kg/cm^2 a 5 kg/cm^2 , para tres índices de vacíos iniciales distintos.

Por otro lado, a partir del primer valor obtenido en columna resonante para el amortiguamiento (D_{min}), se grafica D/D_{min} en función de la deformación al corte en la Figura 5-17.



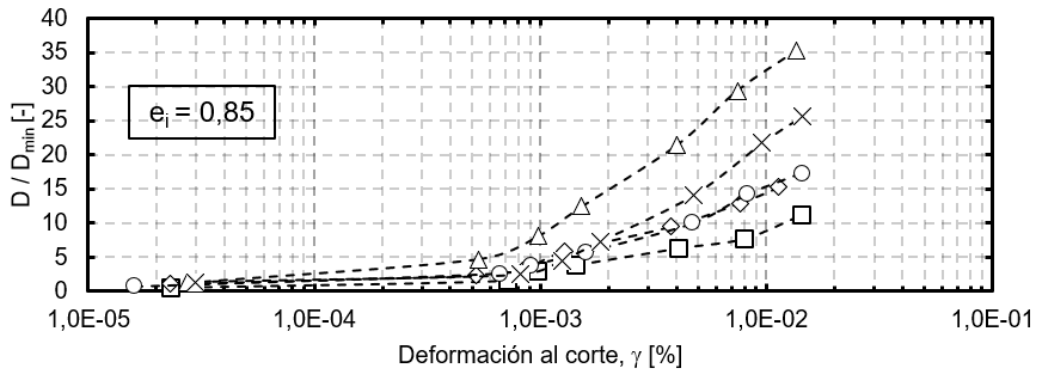
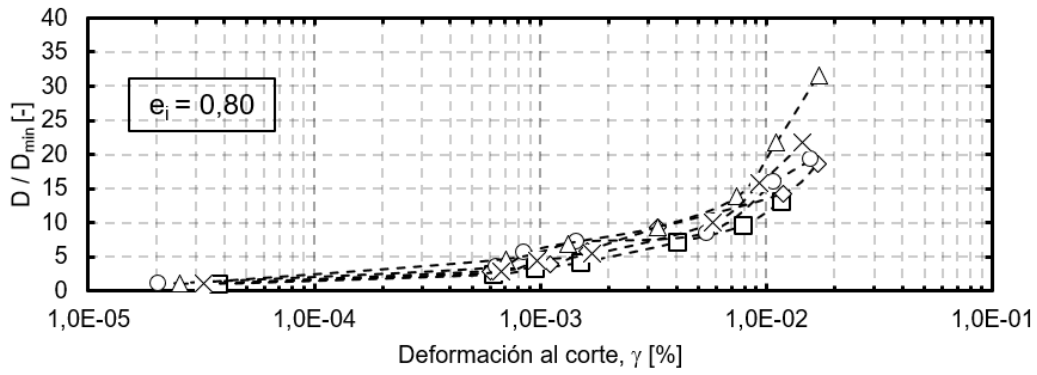
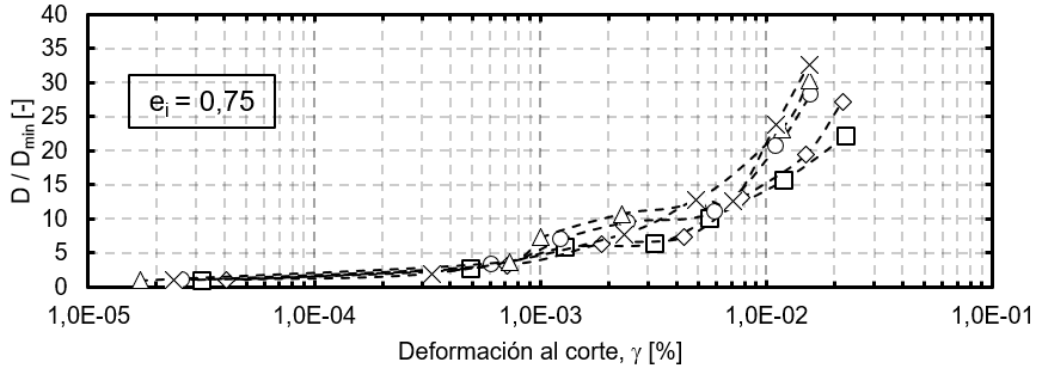
-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -✕- 490 kPa

Figura 6-16: Resultados de G vs γ , para una arena con 20% CF, ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.



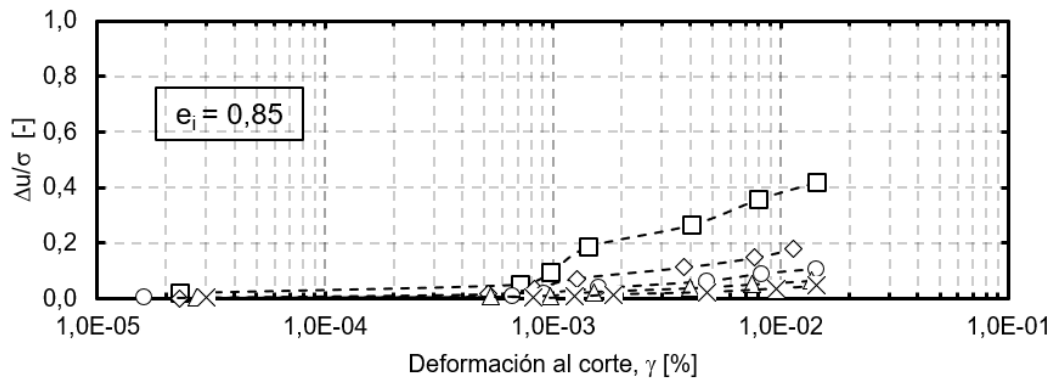
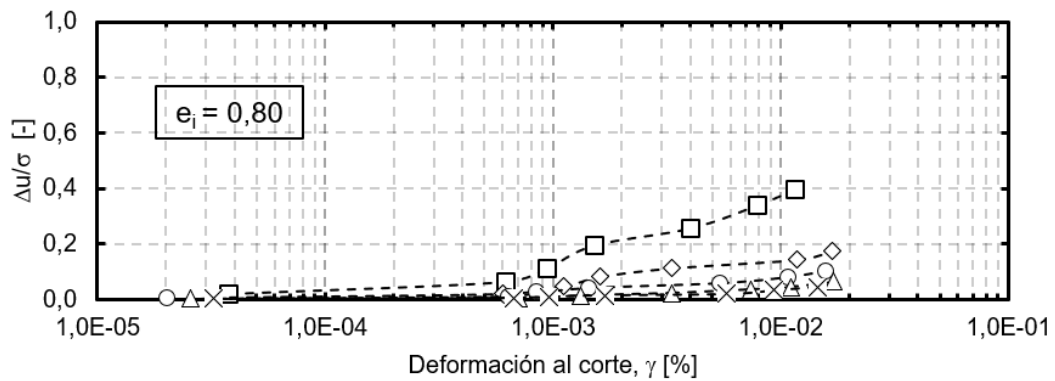
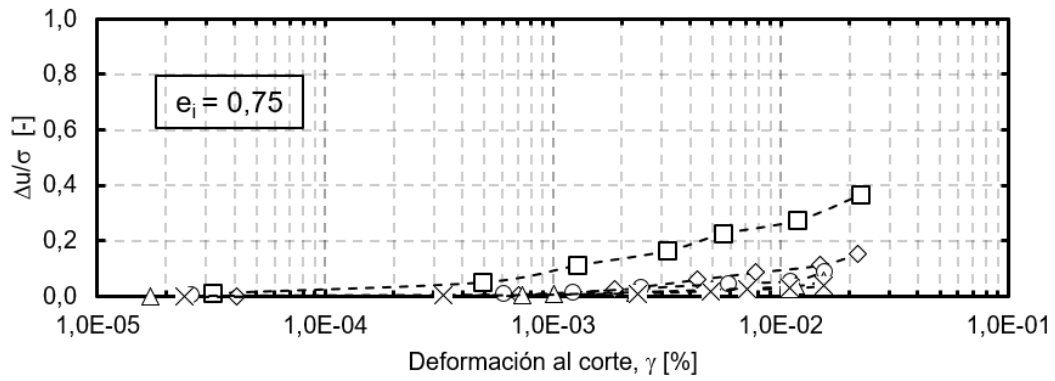
-□- 98 kPa -◇- 196 kPa -○- 294 kPa -△- 392 kPa -✕- 490 kPa

Figura 6-17: Resultados de G/G_{max} vs γ , para una arena con 20%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.



- □ - 98 kPa - ◇ - 196 kPa - ○ - 294 kPa - △ - 392 kPa - ✕ - 490 kPa

Figura 6-18: Resultados de D/D_{min} vs γ para una arena con 20%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0.75, (b) 0.80, y (c) 0.85.



- □ - 98 kPa - ◇ - 196 kPa - ○ - 294 kPa - △ - 392 kPa - ✕ - 490 kPa

Figura 6-19: Resultados de $\Delta u/\sigma_0$ vs γ , para una arena con 20%CF ensayada a diferentes estados de carga, para un índice de confección inicial de (a) 0,75, (b) 0,80, y (c) 0,85.

Finalmente, en la Figura 5-18 se muestran los valores de todos los ensayos realizados para una arena con 20%CF, de D/D_{min} vs G/G_{max} .

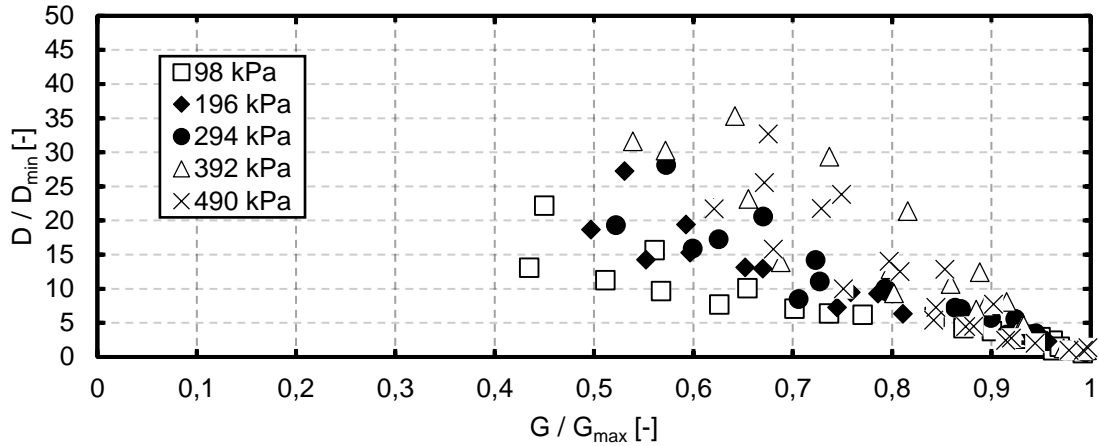


Figura 6-20: Resultados de D/D_{min} vs G/G_{max} , para una arena con 20%CF ensayada a diferentes estados de carga.

6.3. Discusión

Los resultados obtenidos en columna resonante en condición no drenada, es presentada en las siguientes tablas (Tabla 6-1 a Tabla 6-12), mostrando resultados relevantes como el módulo de corte (G), la deformación al corte (γ), el amortiguamiento (D), G/G_{max} y el exceso de presiones de poros normalizado por el confinamiento inicial ($\Delta u/\sigma'$).

Por otro lado, se presentan todos los resultados no drenado en los gráficos Figura 6-21 y Figura 6-22, donde en la primera figura se presenta la degradación de G/G_{max} junto al amortiguamiento en función de la deformación al corte y en la segunda figura se agrega el exceso de presión de poros normalizado ($\Delta u/\sigma'$).

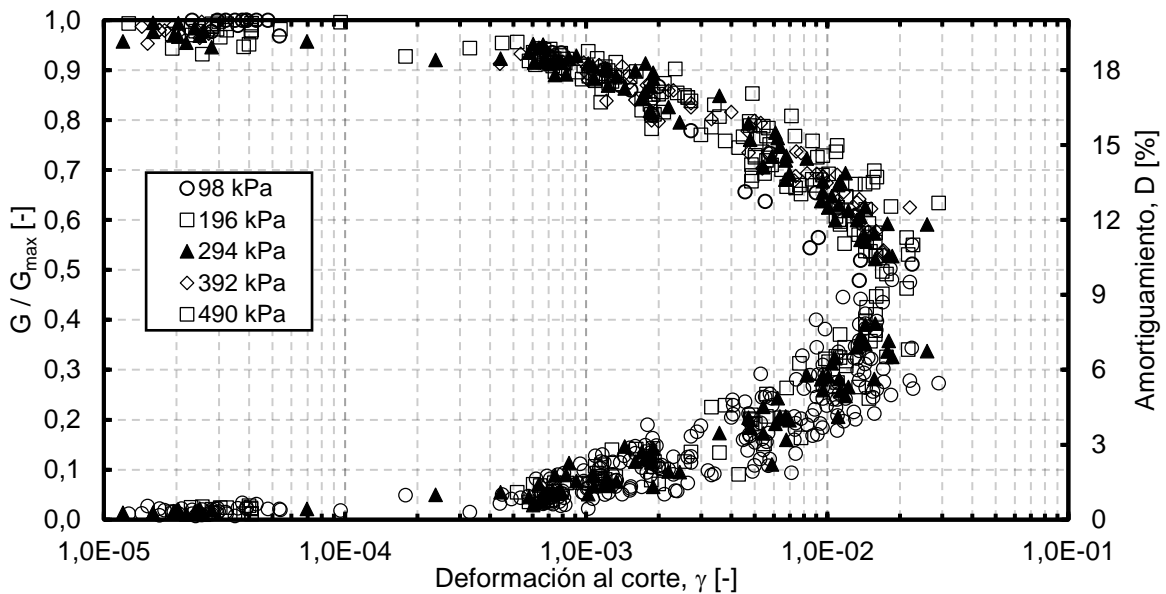


Figura 6-21: Resultados de G/G_{max} , D vs Deformación según estado de carga.

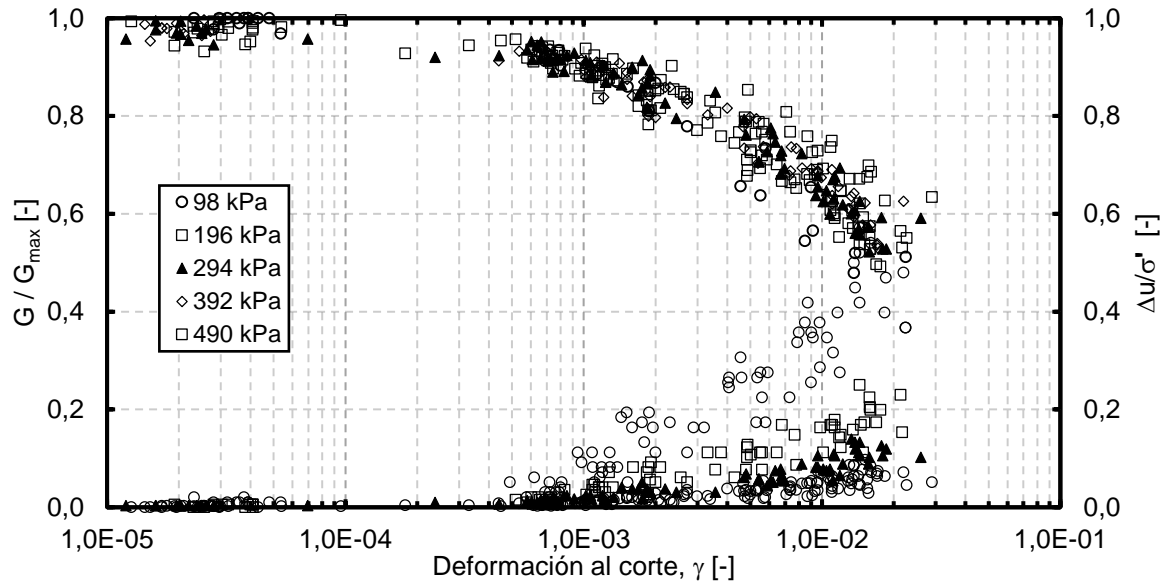


Figura 6-22: Resultados de G/G_{\max} , $\Delta u/\sigma'$ vs Deformación según estado de carga.

De las figuras anteriores, se puede observar el principal parámetro que afecta a G/G_{\max} , D y $\Delta u/\sigma'$, el cual además de la deformación al corte es el estado de carga, donde a mayor confinamiento, se obtiene una menor degradación (mayor G/G_{\max}), un menor damping y también un menor exceso de presión de poros. Es decir, el comportamiento no drenado, en general, también cumple lo establecido por Hardin y Drnevich (1972a y 1972b) respecto al comportamiento de las propiedades dinámicas.

Tabla 6-1: Resumen Ensayo CR No Drenado 1%CF para $e_i=0,75$.

Confinamiento [kPa]	Vs [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G/G _{max} [-]	$\Delta u/\sigma'$ [-]
98	247,45	105,81	0,000028	0,22	0,977	0,010
98	242,83	101,18	0,00079	1,03	0,934	0,031
98	238,60	97,68	0,001198	1,01	0,902	0,071
98	233,98	93,94	0,002	2,15	0,868	0,112
98	215,12	79,41	0,0058	5,03	0,733	0,173
98	203,19	70,85	0,009	8,00	0,654	0,255
98	179,72	55,43	0,0225	11,00	0,512	0,367
196	280,36	133,46	0,000041	0,23	0,980	0,005
196	276,54	128,08	0,00067	0,94	0,941	0,015
196	270,43	122,49	0,001233	1,36	0,899	0,031
196	263,17	116,00	0,002	1,43	0,852	0,051
196	253,24	107,42	0,0048	4,04	0,789	0,077
196	237,20	94,25	0,01012	6,33	0,692	0,112
196	212,75	75,82	0,014596	8,51	0,557	0,168
294	295,59	152,09	0,000012	0,28	0,958	0,003
294	295,20	148,54	0,00058	0,91	0,935	0,014
294	291,75	145,08	0,001021	1,02	0,913	0,024
294	288,68	142,07	0,0019	1,32	0,894	0,031
294	268,75	123,13	0,0061	3,84	0,775	0,054
294	254,18	110,15	0,0119	4,95	0,694	0,065
294	234,63	93,86	0,026	6,75	0,591	0,102
392	315,00	173,76	0,000017	0,44	0,980	0,003
392	312,72	166,98	0,00067	0,79	0,942	0,010
392	307,01	160,94	0,001413	1,02	0,907	0,018
392	298,63	152,29	0,0022	2,02	0,859	0,026
392	287,20	140,85	0,0053	3,88	0,794	0,036
392	267,77	122,45	0,011	4,81	0,690	0,038
392	254,82	110,91	0,022	5,57	0,625	0,071
490	323,29	188,47	0,000054	0,39	0,982	0,002
490	318,26	176,94	0,00072	0,69	0,922	0,006
490	310,15	167,75	0,002113	1,02	0,874	0,010
490	302,43	159,51	0,0034	1,84	0,831	0,016
490	288,91	145,57	0,0087	3,36	0,758	0,022
490	277,32	134,13	0,0157	4,25	0,699	0,029
490	264,19	121,75	0,029	5,47	0,634	0,051

Tabla 6-2: Resumen Ensayo CR No Drenado 1%CF para $e_i=0,80$.

Confinamiento [kPa]	Vs [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G/G _{max} [-]	$\Delta u/\sigma'$ [-]
98	220,61	82,44	0,00005355	0,44	0,968	0,010
98	217,51	79,61	0,0007225	0,90	0,935	0,031
98	208,59	73,22	0,0015317	1,33	0,860	0,051
98	198,51	66,33	0,00272	3,34	0,779	0,112
98	179,51	54,24	0,005525	4,92	0,637	0,276
98	169,05	48,11	0,00918	5,81	0,565	0,347
98	162,07	44,23	0,01377	8,83	0,520	0,449
196	246,80	103,25	0,00002805	0,41	0,987	0,005
196	240,60	96,86	0,0006885	0,75	0,926	0,010
196	235,56	92,86	0,00102765	1,47	0,887	0,026
196	228,98	87,75	0,00272	2,71	0,839	0,051
196	210,77	74,35	0,004845	4,00	0,711	0,122
196	204,18	69,79	0,0068	5,28	0,667	0,168
196	189,46	60,10	0,015895	8,22	0,574	0,204
294	266,43	121,43	0,0000238	0,32	0,984	0,003
294	264,11	117,43	0,0006035	0,59	0,952	0,010
294	258,68	112,66	0,0017646	2,47	0,913	0,017
294	249,37	104,72	0,00357	3,47	0,849	0,031
294	233,86	92,10	0,006375	4,13	0,747	0,075
294	222,61	83,48	0,011305	5,15	0,677	0,105
294	208,26	73,07	0,017765	6,74	0,592	0,126
392	287,98	142,20	0,0000204	0,25	0,974	0,003
392	285,00	136,69	0,000663	0,63	0,936	0,008
392	280,36	132,29	0,0010098	1,43	0,906	0,013
392	274,63	126,97	0,001785	1,90	0,870	0,020
392	259,73	113,57	0,004675	2,78	0,778	0,048
392	241,76	98,42	0,009945	4,57	0,674	0,069
392	231,06	89,91	0,0136	5,59	0,616	0,087
490	308,39	162,52	2,9453E-05	0,26	0,982	0,002
490	304,97	154,57	0,0007854	0,56	0,934	0,006
490	300,78	150,39	0,00097907	1,07	0,908	0,010
490	294,70	144,40	0,00133875	1,59	0,872	0,014
490	275,69	126,37	0,00526575	2,43	0,763	0,035
490	262,00	114,15	0,00954975	3,68	0,690	0,049
490	249,83	103,80	0,0183855	4,99	0,627	0,063

Tabla 6-3: Resumen Ensayo CR No Drenado 1%CF para $e_i=0,85$.

Confinamiento [kPa]	Vs [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G/G _{max} [-]	$\Delta u/\sigma'$ [-]
98	202,24	68,55	0,000036	0,46	0,990	0,010
98	194,05	62,56	0,0008	1,15	0,903	0,041
98	190,54	60,18	0,0013864	2,29	0,869	0,082
98	183,92	56,09	0,001885	3,27	0,810	0,194
98	165,61	45,48	0,00456	4,73	0,657	0,306
98	150,80	37,71	0,00848	5,78	0,544	0,378
98	141,45	33,18	0,0136	7,82	0,479	0,500
196	227,30	86,20	0,0000304	0,48	0,966	0,005
196	223,75	82,34	0,00072	1,01	0,923	0,015
196	220,21	79,64	0,0011592	1,41	0,893	0,041
196	209,96	72,41	0,00192	2,32	0,812	0,092
196	193,42	61,47	0,00488	3,85	0,689	0,128
196	184,36	55,84	0,01104	5,50	0,626	0,168
196	173,72	49,61	0,01584	7,42	0,556	0,224
294	256,13	109,81	0,0000696	0,44	0,958	0,003
294	253,03	104,87	0,000728	1,15	0,914	0,010
294	251,48	103,62	0,0012	1,41	0,903	0,024
294	244,89	98,29	0,00176	2,42	0,857	0,051
294	224,36	82,50	0,00672	4,14	0,719	0,078
294	210,02	72,32	0,0112	5,64	0,631	0,109
294	204,89	68,82	0,01328	6,90	0,600	0,139
392	275,06	131,22	0,0000256	0,40	0,974	0,003
392	271,51	124,22	0,000696	0,89	0,922	0,008
392	264,39	117,84	0,0015192	1,17	0,875	0,020
392	258,07	112,30	0,00272	2,29	0,834	0,036
392	242,66	99,29	0,00568	3,47	0,737	0,054
392	234,36	92,63	0,0096	4,85	0,688	0,074
392	222,90	83,82	0,0152	6,44	0,622	0,097
490	290,30	145,78	0,0000232	0,24	0,970	0,002
490	285,62	136,87	0,000616	0,65	0,911	0,004
490	281,32	132,80	0,0010656	0,84	0,884	0,010
490	275,07	126,97	0,00264	1,47	0,845	0,022
490	262,17	115,36	0,00736	3,61	0,768	0,035
490	256,70	110,63	0,01088	4,49	0,736	0,053
490	247,72	103,02	0,01608	5,23	0,686	0,071

Tabla 6-4: Resumen Ensayo CR No Drenado 5%CF para $e_i=0,75$.

Confinamiento [kPa]	Vs [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G/G _{max} [-]	$\Delta u/\sigma'$ [-]
98	221,05	84,44	0,000043	0,62	0,963	0,000
98	214,88	78,61	0,00081	1,87	0,897	0,020
98	210,64	75,53	0,001169	2,61	0,862	0,061
98	204,85	71,44	0,0018	3,81	0,815	0,133
98	188,65	60,60	0,0053	5,84	0,691	0,173
98	173,99	51,55	0,0098	7,63	0,588	0,286
98	155,47	41,17	0,0183	10,06	0,470	0,398
196	248,76	106,73	0,00004	0,56	0,952	0,005
196	246,45	102,62	0,00073	1,14	0,915	0,020
196	245,30	101,69	0,001199	1,61	0,907	0,041
196	237,61	95,42	0,0019	2,85	0,851	0,056
196	225,69	86,10	0,0056	5,03	0,768	0,077
196	207,23	72,61	0,012	6,35	0,648	0,122
196	188,78	60,27	0,0151	7,14	0,537	0,173
294	266,46	126,24	0,000025	0,44	0,969	0,003
294	262,65	119,63	0,00077	1,14	0,918	0,007
294	260,74	117,65	0,001222	1,65	0,903	0,017
294	257,69	114,93	0,0019	2,86	0,882	0,031
294	239,78	99,50	0,00623	4,86	0,764	0,051
294	220,72	84,32	0,01045	6,26	0,647	0,075
294	199,37	68,81	0,018	7,16	0,528	0,105
392	277,81	139,87	0,000021	0,45	0,968	0,003
392	275,86	134,28	0,00071	1,63	0,929	0,008
392	273,54	131,51	0,001133	2,06	0,910	0,013
392	262,67	121,28	0,0019	2,22	0,839	0,020
392	245,60	106,02	0,0078	4,04	0,734	0,036
392	228,53	91,80	0,0133	6,45	0,635	0,048
392	209,90	77,46	0,017	8,70	0,536	0,069
490	290,59	154,22	0,000037	0,42	0,967	0,000
490	289,44	146,66	0,00081	1,48	0,920	0,004
490	285,98	143,34	0,001037	1,71	0,899	0,012
490	275,98	133,51	0,002	2,43	0,837	0,018
490	264,07	122,23	0,007	2,92	0,767	0,027
490	239,08	100,20	0,0135	5,05	0,628	0,035
490	222,17	86,54	0,0179	6,24	0,543	0,053

Tabla 6-5: Resumen Ensayo CR No Drenado 5%CF para $e_i=0,80$.

Confinamiento [kPa]	Vs [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G/G _{max} [-]	$\Delta u/\sigma'$ [-]
98	198,59	65,87	0,0000391	0,44	0,938	0,010
98	200,53	66,42	0,0006885	1,75	0,946	0,031
98	189,67	59,43	0,00129285	2,31	0,846	0,082
98	178,81	52,83	0,00289	3,52	0,752	0,163
98	163,29	44,06	0,00731	4,13	0,627	0,224
98	154,76	39,58	0,011135	6,72	0,564	0,316
98	142,74	33,68	0,01853	9,60	0,480	0,469
196	225,28	86,21	0,0000408	0,47	0,990	0,005
196	222,17	82,14	0,000646	1,37	0,943	0,020
196	214,78	76,77	0,00109055	2,14	0,882	0,046
196	205,44	70,25	0,00357	2,69	0,807	0,077
196	191,43	61,01	0,00646	4,08	0,701	0,112
196	178,20	52,88	0,01088	6,54	0,607	0,168
196	166,14	45,97	0,01598	8,94	0,528	0,199
294	247,08	106,08	0,0000204	0,36	0,967	0,003
294	243,99	100,93	0,000238	0,99	0,920	0,010
294	240,13	97,77	0,0008279	1,79	0,891	0,024
294	233,57	92,51	0,0017	2,70	0,843	0,037
294	211,56	75,91	0,00697	3,99	0,692	0,054
294	203,07	69,95	0,009435	5,62	0,638	0,082
294	190,33	61,45	0,01377	7,35	0,560	0,119
392	265,65	123,33	0,00001785	0,38	0,979	0,003
392	260,58	115,01	0,0007735	0,93	0,913	0,005
392	256,29	111,29	0,0011492	2,07	0,883	0,010
392	247,71	103,98	0,00272	2,54	0,825	0,028
392	227,03	87,36	0,008245	3,80	0,694	0,048
392	217,67	80,32	0,01105	5,51	0,638	0,064
392	207,14	72,74	0,01598	7,59	0,577	0,084
490	283,74	140,54	0,00002805	0,31	0,989	0,002
490	279,84	132,01	0,00077605	0,73	0,929	0,004
490	273,22	125,84	0,00131648	1,58	0,886	0,006
490	268,54	121,58	0,002057	2,18	0,856	0,014
490	254,12	108,90	0,004488	3,20	0,767	0,033
490	237,36	95,02	0,0088825	4,42	0,669	0,049
490	219,82	81,51	0,014212	5,88	0,574	0,063

Tabla 6-6: Resumen Ensayo CR No Drenado 5%CF para $e_i=0,85$.

Confinamiento [kPa]	Vs [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G/G _{max} [-]	$\Delta u/\sigma'$ [-]
98	191,22	59,52	0,000048	0,43	0,935	0,010
98	189,65	57,91	0,00072	1,14	0,910	0,020
98	185,74	55,56	0,0011912	2,29	0,873	0,082
98	179,09	51,66	0,00176	2,99	0,812	0,173
98	163,06	42,83	0,00536	4,90	0,673	0,265
98	156,02	39,22	0,00904	6,90	0,616	0,357
98	143,90	33,37	0,0144	8,24	0,524	0,520
196	215,71	77,00	0,0000256	0,52	0,932	0,000
196	213,71	75,05	0,000728	1,00	0,908	0,015
196	211,72	73,28	0,00112	1,74	0,887	0,031
196	204,94	68,68	0,00184	2,72	0,831	0,071
196	190,59	59,40	0,0056	4,13	0,719	0,112
196	180,62	53,35	0,012	6,16	0,646	0,148
196	168,87	46,65	0,02136	9,26	0,565	0,230
294	237,33	95,35	0,000028	0,40	0,946	0,003
294	236,15	91,94	0,000712	1,03	0,912	0,007
294	235,76	91,65	0,0010656	1,76	0,909	0,024
294	230,24	87,44	0,00184	2,65	0,867	0,037
294	215,68	76,74	0,0048	3,69	0,761	0,068
294	203,48	68,32	0,0096	5,19	0,678	0,105
294	192,46	61,13	0,01376	7,26	0,606	0,133
392	260,52	112,42	0,0000152	0,55	0,953	0,000
392	258,96	108,10	0,0008	1,05	0,916	0,008
392	256,61	106,17	0,0011472	1,76	0,900	0,013
392	252,71	102,98	0,00184	2,67	0,873	0,020
392	239,82	92,77	0,0048	3,35	0,787	0,036
392	224,98	81,65	0,00904	4,92	0,692	0,054
392	211,31	72,05	0,01304	6,94	0,611	0,087
490	270,75	127,01	0,0000192	0,32	0,944	0,002
490	269,18	120,66	0,000744	1,20	0,896	0,008
490	267,61	119,28	0,0015224	1,25	0,886	0,018
490	261,32	113,76	0,00264	2,51	0,845	0,027
490	252,28	106,06	0,00744	2,80	0,788	0,039
490	234,60	91,73	0,01168	4,17	0,681	0,049
490	216,52	78,15	0,01792	6,48	0,581	0,061

Tabla 6-7: Resumen Ensayo CR No Drenado 10%CF para $e_i=0,75$.

Confinamiento [kPa]	Vs [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G/G _{max} [-]	$\Delta u/\sigma'$ [-]
98	217,41	81,79	0,000035	0,16	0,973	0,010
98	210,06	75,22	0,00081	0,89	0,894	0,051
98	205,42	71,94	0,001087	1,45	0,855	0,112
98	195,74	65,34	0,0023	2,52	0,777	0,173
98	184,53	58,06	0,0046	3,26	0,690	0,265
98	162,86	45,25	0,0105	5,32	0,538	0,347
98	144,68	35,72	0,022	9,52	0,425	0,480
196	240,31	102,37	0,000038	0,24	0,946	0,000
196	238,00	99,35	0,00058	0,71	0,919	0,010
196	233,38	95,03	0,001091	1,49	0,879	0,036
196	224,92	88,27	0,0021	2,03	0,816	0,082
196	207,24	74,95	0,0055	3,03	0,693	0,112
196	188,01	61,70	0,0135	5,32	0,570	0,158
196	174,56	53,19	0,0176	6,52	0,492	0,199
294	259,58	120,72	0,000022	0,21	0,955	0,003
294	258,04	115,89	0,00066	0,70	0,917	0,014
294	253,43	111,80	0,001079	1,34	0,884	0,017
294	244,97	104,47	0,0022	1,93	0,826	0,037
294	229,97	92,09	0,00678	3,20	0,728	0,065
294	211,90	78,20	0,01224	5,32	0,618	0,088
294	195,74	66,74	0,0186	6,52	0,528	0,119
392	274,60	137,77	0,000025	0,24	0,965	0,003
392	272,70	130,37	0,00044	0,66	0,913	0,008
392	261,30	119,74	0,001214	1,37	0,838	0,018
392	254,85	113,89	0,002	2,07	0,797	0,028
392	235,10	96,94	0,0073	3,20	0,679	0,041
392	222,94	87,20	0,0129	4,32	0,610	0,054
392	207,75	75,73	0,0172	5,52	0,530	0,074
490	287,82	152,66	0,000096	0,36	0,996	0,002
490	286,29	143,75	0,00102	0,44	0,938	0,004
490	273,26	131,00	0,002391	1,15	0,854	0,010
490	261,76	120,21	0,0057	2,17	0,784	0,018
490	251,80	111,27	0,0091	3,42	0,726	0,024
490	242,21	102,97	0,0131	4,02	0,672	0,035
490	219,22	84,35	0,0227	5,25	0,550	0,045

Tabla 6-8: Resumen Ensayo CR No Drenado 10%CF para $e_i=0,80$.

Confinamiento [kPa]	Vs [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G/G _{max} [-]	$\Delta u/\sigma'$ [-]
98	186,09	59,42	0,0000391	0,51	0,965	0,010
98	181,81	56,03	0,000765	1,81	0,910	0,031
98	175,58	52,27	0,0010931	2,55	0,849	0,082
98	168,57	48,19	0,001955	2,97	0,782	0,163
98	152,22	39,30	0,00408	4,58	0,638	0,245
98	141,32	33,88	0,009775	5,84	0,550	0,378
98	132,76	29,90	0,016065	7,95	0,486	0,541
196	217,67	80,30	0,0000408	0,44	0,976	0,005
196	212,99	75,28	0,0007395	1,48	0,915	0,010
196	206,71	70,92	0,00116195	2,20	0,862	0,041
196	196,92	64,37	0,00187	2,53	0,782	0,082
196	183,22	55,73	0,004845	4,20	0,677	0,102
196	171,08	48,60	0,011305	6,49	0,591	0,163
196	161,69	43,42	0,015895	7,57	0,528	0,204
294	238,82	97,49	0,00001955	0,35	0,969	0,003
294	236,49	92,82	0,000442	1,10	0,923	0,007
294	232,21	89,51	0,0007429	1,77	0,890	0,020
294	222,12	81,90	0,00187	2,29	0,814	0,031
294	203,09	68,48	0,006715	4,04	0,681	0,054
294	194,55	62,86	0,010115	5,74	0,625	0,078
294	185,62	57,23	0,01428	7,14	0,569	0,112
392	260,59	116,35	0,00001955	0,31	0,989	0,000
392	254,74	107,35	0,0006715	0,86	0,913	0,005
392	250,06	103,45	0,00102085	1,27	0,880	0,015
392	238,35	94,01	0,00187	2,09	0,799	0,026
392	223,53	82,69	0,005389	3,24	0,703	0,033
392	211,83	74,28	0,010625	4,83	0,632	0,061
392	202,46	67,87	0,01479	6,50	0,577	0,077
490	274,69	131,96	0,00002805	0,40	0,993	0,002
490	270,83	123,26	0,0001785	0,98	0,928	0,004
490	266,19	119,09	0,0009214	1,47	0,896	0,008
490	254,60	108,97	0,0017	2,09	0,820	0,020
490	239,53	96,47	0,005015	3,09	0,726	0,033
490	229,10	88,27	0,007395	3,87	0,664	0,043
490	217,90	79,85	0,01122	5,06	0,601	0,055

Tabla 6-9: Resumen Ensayo CR No Drenado 10%CF para $e_i=0,85$.

Confinamiento [kPa]	Vs [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G/G _{max} [-]	$\Delta u/\sigma'$ [-]
98	183,72	55,17	0,0000296	0,47	0,955	0,000
98	180,20	52,47	0,000576	0,94	0,908	0,020
98	174,35	49,13	0,0011112	1,64	0,850	0,051
98	170,06	46,75	0,0016	2,66	0,809	0,163
98	154,85	38,76	0,00592	4,59	0,671	0,276
98	146,66	34,78	0,00872	5,37	0,602	0,418
98	134,96	29,45	0,0144	7,85	0,510	0,571
196	214,02	74,79	0,0000192	0,31	0,972	0,005
196	211,68	71,80	0,000656	0,91	0,933	0,015
196	209,73	70,50	0,001328	1,73	0,916	0,041
196	201,93	65,37	0,00256	2,33	0,849	0,061
196	187,12	56,14	0,00504	3,83	0,730	0,107
196	175,04	49,13	0,00984	6,44	0,638	0,163
196	160,61	41,37	0,0144	7,94	0,538	0,250
294	232,53	92,58	0,000016	0,26	0,977	0,003
294	228,61	86,82	0,000792	1,10	0,916	0,007
294	225,08	84,17	0,0013352	1,53	0,888	0,020
294	216,06	77,58	0,00184	2,42	0,818	0,031
294	200,77	66,99	0,00544	4,52	0,707	0,058
294	193,32	62,12	0,0096	5,75	0,655	0,082
294	178,42	52,92	0,0144	7,81	0,558	0,133
392	252,02	107,59	0,0000144	0,25	0,987	0,000
392	248,16	101,09	0,00064	1,14	0,928	0,003
392	244,30	97,98	0,0010656	1,58	0,899	0,010
392	236,19	91,61	0,0016	2,94	0,841	0,020
392	220,76	80,04	0,00472	4,26	0,734	0,033
392	213,42	74,82	0,0096	6,20	0,687	0,051
392	198,37	64,65	0,0136	7,18	0,593	0,084
490	263,46	120,89	1,2672E-05	0,24	0,993	0,000
490	263,06	116,11	0,00044928	1,01	0,954	0,002
490	258,74	112,34	0,00073901	1,28	0,923	0,006
490	246,18	101,71	0,001152	2,33	0,836	0,014
490	236,36	93,78	0,0029952	3,76	0,771	0,022
490	226,94	86,46	0,0058752	4,86	0,710	0,035
490	209,66	73,81	0,0134	5,99	0,607	0,057

Tabla 6-10: Resumen Ensayo CR No Drenado 20%CF para $e_i=0,75$.

Confinamiento [kPa]	Vs [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G/G _{max} [-]	$\Delta u/\sigma'$ [-]
98	181,59	57,41	0,000032	0,31	0,962	0,010
98	180,04	55,38	0,00049	0,83	0,928	0,051
98	171,56	50,29	0,001289	1,81	0,843	0,112
98	160,38	43,96	0,0032	1,97	0,737	0,163
98	151,13	39,04	0,0056	3,12	0,654	0,224
98	139,95	33,48	0,0119	4,85	0,561	0,276
98	125,30	26,84	0,0224	6,88	0,450	0,367
196	212,10	79,63	0,000041	0,25	0,994	0,000
196	209,77	75,44	0,00071	0,81	0,942	0,005
196	194,65	64,96	0,001867	1,58	0,811	0,026
196	186,51	59,65	0,0043	1,82	0,745	0,061
196	174,49	52,22	0,0078	3,28	0,652	0,087
196	166,35	47,47	0,0149	4,85	0,593	0,112
196	157,43	42,52	0,0217	6,81	0,531	0,153
294	226,83	95,16	0,000026	0,20	0,978	0,003
294	223,78	89,07	0,00061	0,66	0,915	0,007
294	218,07	84,59	0,001236	1,41	0,869	0,014
294	208,56	77,39	0,00245	1,91	0,795	0,031
294	199,43	70,77	0,0059	2,21	0,727	0,044
294	191,43	65,22	0,0111	4,12	0,670	0,054
294	176,97	55,75	0,0157	5,63	0,573	0,088
392	245,97	111,03	0,000017	0,17	0,980	0,000
392	244,42	104,78	0,00073	0,63	0,925	0,003
392	240,16	101,19	0,001009	1,25	0,893	0,008
392	235,51	97,32	0,0023	1,82	0,859	0,015
392	226,99	90,43	0,005	2,18	0,798	0,026
392	205,68	74,26	0,0117	3,94	0,656	0,038
392	192,12	64,80	0,0155	5,14	0,572	0,056
490	252,07	121,52	0,000024	0,15	0,978	0,000
490	253,98	117,28	0,00033	0,30	0,944	0,004
490	248,26	112,08	0,002347	1,16	0,902	0,010
490	241,40	105,98	0,0049	1,93	0,853	0,018
490	234,91	100,39	0,0071	1,88	0,808	0,027
490	226,14	93,05	0,011	3,57	0,749	0,031
490	214,70	83,90	0,0155	4,90	0,675	0,039

Tabla 6-11: Resumen Ensayo CR No Drenado 20%CF para $e_i=0,80$.

Confinamiento [kPa]	Vs [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G/G _{max} [-]	$\Delta u/\sigma'$ [-]
98	164,66	47,10	0,00003757	0,68	0,993	0,020
98	163,49	45,60	0,00062135	1,64	0,962	0,061
98	161,53	44,51	0,00094575	2,24	0,939	0,112
98	155,66	41,35	0,00151725	2,87	0,872	0,194
98	139,63	33,27	0,004046	4,80	0,702	0,255
98	125,55	26,90	0,00787525	6,57	0,567	0,337
98	109,90	20,62	0,01163225	8,91	0,435	0,398
196	189,91	62,78	0,0000323	0,49	0,980	0,005
196	188,34	59,95	0,0006035	1,42	0,935	0,020
196	187,16	59,21	0,00111095	1,87	0,924	0,046
196	184,41	57,49	0,001615	2,83	0,897	0,082
196	172,61	50,38	0,003315	4,51	0,786	0,112
196	144,70	35,41	0,011815	6,90	0,552	0,143
196	137,23	31,85	0,016915	9,05	0,497	0,173
294	214,29	80,36	0,0000204	0,41	0,994	0,003
294	212,72	76,37	0,0006375	1,42	0,945	0,010
294	210,38	74,71	0,00085085	2,26	0,924	0,024
294	203,36	69,81	0,001445	2,93	0,864	0,041
294	183,84	57,07	0,00544	3,45	0,706	0,058
294	169,40	48,46	0,010795	6,47	0,599	0,078
294	158,08	42,21	0,01581	7,86	0,522	0,102
392	233,14	96,42	0,0000255	0,19	0,996	0,003
392	230,44	90,07	0,0007055	0,89	0,931	0,005
392	224,66	85,62	0,00132515	1,33	0,885	0,013
392	213,87	77,61	0,003315	1,79	0,802	0,023
392	198,07	66,58	0,007395	2,65	0,688	0,036
392	188,05	60,02	0,01105	4,17	0,620	0,043
392	175,34	52,18	0,017085	6,05	0,539	0,064
490	247,03	111,66	0,0000323	0,24	0,993	0,002
490	244,28	103,51	0,0006715	0,67	0,920	0,004
490	239,17	99,24	0,00096305	1,09	0,882	0,008
490	233,66	94,73	0,0017	1,32	0,842	0,014
490	220,68	84,50	0,00578	2,44	0,751	0,020
490	210,06	76,58	0,00935	3,85	0,681	0,033
490	200,62	69,85	0,01445	5,29	0,621	0,045

Tabla 6-12: Resumen Ensayo CR No Drenado 20%CF para $e_i=0,85$.

Confinamiento [kPa]	Vs [m/s]	G [MPa]	γ [%]	D [%]	G/G _{max} [-]	$\Delta u/\sigma'$ [-]
98	154,19	38,98	0,0000232	0,39	0,992	0,020
98	153,40	38,07	0,00072	1,02	0,969	0,051
98	151,81	37,30	0,0009792	1,97	0,949	0,092
98	147,85	35,38	0,00144	2,56	0,901	0,184
98	136,75	30,26	0,00408	4,22	0,770	0,265
98	123,27	24,60	0,008	5,24	0,626	0,357
98	111,38	20,09	0,0144	7,66	0,511	0,418
196	176,12	53,29	0,00002304	0,49	0,984	0,000
196	176,12	51,79	0,0005184	1,10	0,957	0,015
196	172,97	49,95	0,00083136	1,47	0,923	0,036
196	168,64	47,49	0,00128	2,81	0,877	0,071
196	156,82	41,07	0,003776	4,59	0,759	0,112
196	147,36	36,27	0,00768	6,27	0,670	0,148
196	139,09	32,31	0,011328	7,42	0,597	0,179
294	199,77	68,95	0,000016	0,28	0,995	0,003
294	198,98	65,93	0,000664	1,02	0,951	0,007
294	196,63	64,37	0,000912	1,54	0,929	0,017
294	193,49	62,35	0,0016	2,33	0,900	0,037
294	181,71	54,99	0,00472	4,08	0,793	0,061
294	173,47	50,12	0,00824	5,78	0,723	0,088
294	161,30	43,35	0,0144	7,03	0,625	0,105
392	214,78	81,67	0,0000272	0,24	0,973	0,003
392	215,18	78,28	0,000536	0,89	0,932	0,008
392	213,19	76,84	0,0009776	1,54	0,915	0,010
392	209,99	74,59	0,00152	2,38	0,888	0,023
392	201,21	68,48	0,004	4,09	0,816	0,038
392	191,23	61,88	0,00744	5,62	0,737	0,051
392	178,45	53,88	0,0136	6,76	0,642	0,064
490	232,97	95,29	0,00002992	0,33	0,997	0,002
490	229,07	87,39	0,0008184	0,59	0,915	0,004
490	224,00	83,55	0,00124256	1,09	0,874	0,006
490	220,09	80,68	0,001848	1,77	0,844	0,014
490	213,85	76,17	0,004752	3,42	0,797	0,022
490	204,49	69,65	0,009592	5,30	0,729	0,035
490	196,29	64,18	0,014344	6,23	0,672	0,047

6.3.1. Análisis Resultados

Al analizar los resultados en condición drenada en el acápite anterior, se observó que el parámetro más influyente es el estado de carga (además de la deformación al corte), esto es muy relevante para la condición no drenada, debido a que el aumento del exceso de presiones de poros (Δu) genera una disminución de la tensión efectiva de la probeta.

Para los resultados del comportamiento no drenado obtenidos respecto al estado de carga, índice de vacío inicial y al contenido de finos, se observan tendencias similares a lo expuesto en el acápite 5.3.1, 5.3.2 y 5.3.3 respectivamente.

A modo de resumen, al observar los resultados mostrados en la Figura 6-23, se observa resultados para los distintos contenidos de finos, donde en la Figura 6-23(a), se muestran los resultados para 1%CF, para dos estados de cargas distintos, 98 kPa y 490 kPa, donde se observa que a medida que aumenta el estado de carga, el módulo de rigidez también, adicionalmente en el gráfico se muestra para un mismo estado de carga, los tres índice de vacíos de confección, donde a menor índice de vacío (más denso), se observa un mayor módulo de rigidez.

Por último, al comparar los valores del módulo de corte obtenidos en la Figura 6-23, a medida que aumenta el contenido de finos (hacia la Figura 6-23(d), correspondiente a 20%CF), existe una disminución del módulo de rigidez (G).

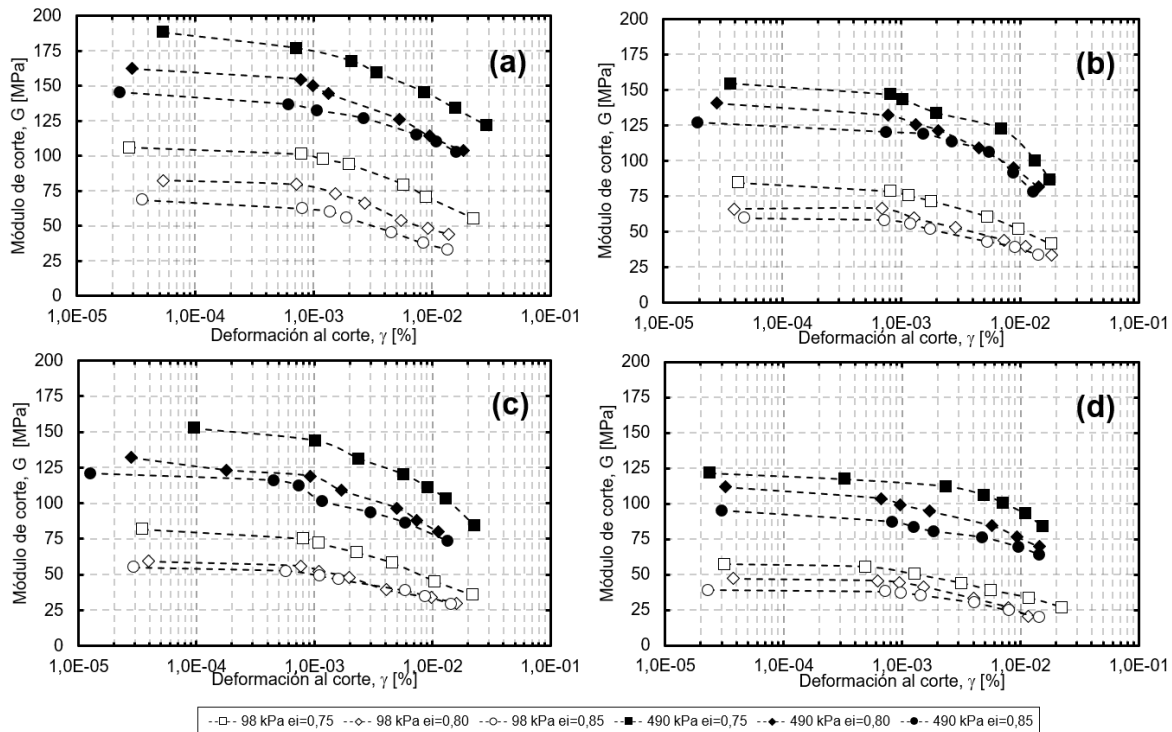


Figura 6-23: Efecto de %CF, e_i y estado de carga en G: (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.

Respecto a G/G_{max} , se tiende a perder un poco la relación para el índice de vacío, donde muestras de suelo más densas (menor índice de vacío) presentan menor degradación para estados de cargas bajos (Figura 6-24), sin embargo, para estados de carga más altos (Figura 6-25), se vuelve a la tendencia de que a menores índice de vacíos, mayor es la degradación.

Respecto al contenido de finos, aún no se observa una tendencia definida, y todos los datos tienden a converger a una curva, mientras que el estado de carga es claro al comparar los resultados para 98 kPa (Figura 6-24) y 490 kPa (Figura 6-25), obteniendo menores valores de G/G_{max} para éste último estado de carga.

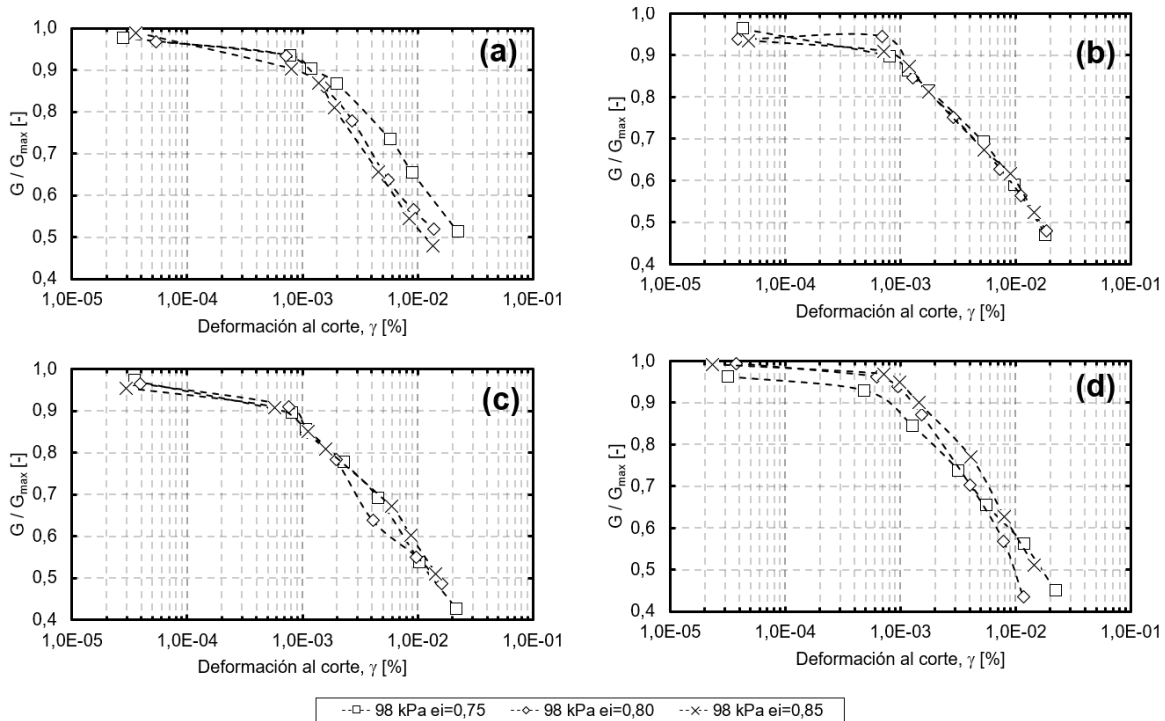


Figura 6-24: Efecto de %CF, e_i para 98 kPa en G/G_{max} : (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.

Para el Damping, se tiene una relación similar del índice de vacío respecto a G/G_{max} , donde a estados de carga bajos (Figura 6-26), no se observa una tendencia clara, donde en se tiende a igualar a una única curva, sin embargo, a medida que aumenta el estado de carga (Figura 6-27), los ensayos realizados a mayor índice de vacío poseen un mayor amortiguamiento. Por otro lado, para el estado de carga, es claro que a medida que el suelo es ensayado con mayor estado de carga, el amortiguamiento disminuye.

Respecto al contenido de finos, no se observa una clara tendencia, donde inclusive, es posible agrupar todos los resultados en una curva característica.

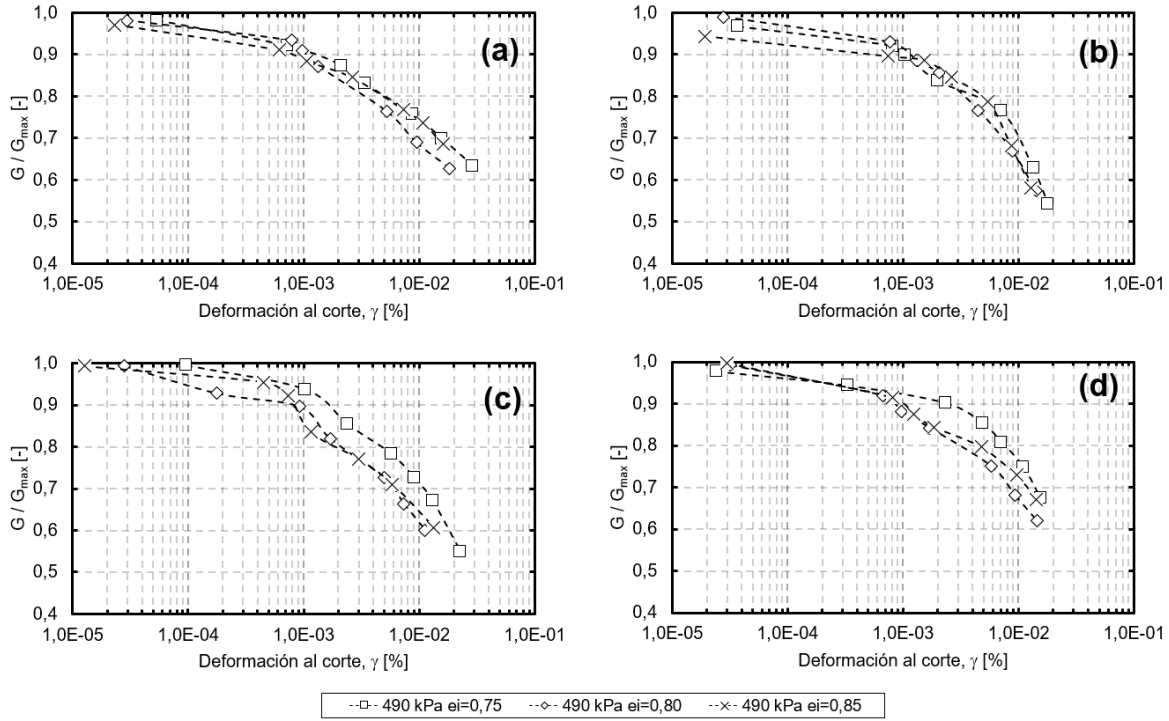


Figura 6-25: Efecto de %CF, e_i para 490 kPa en G/G_{max} : (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.

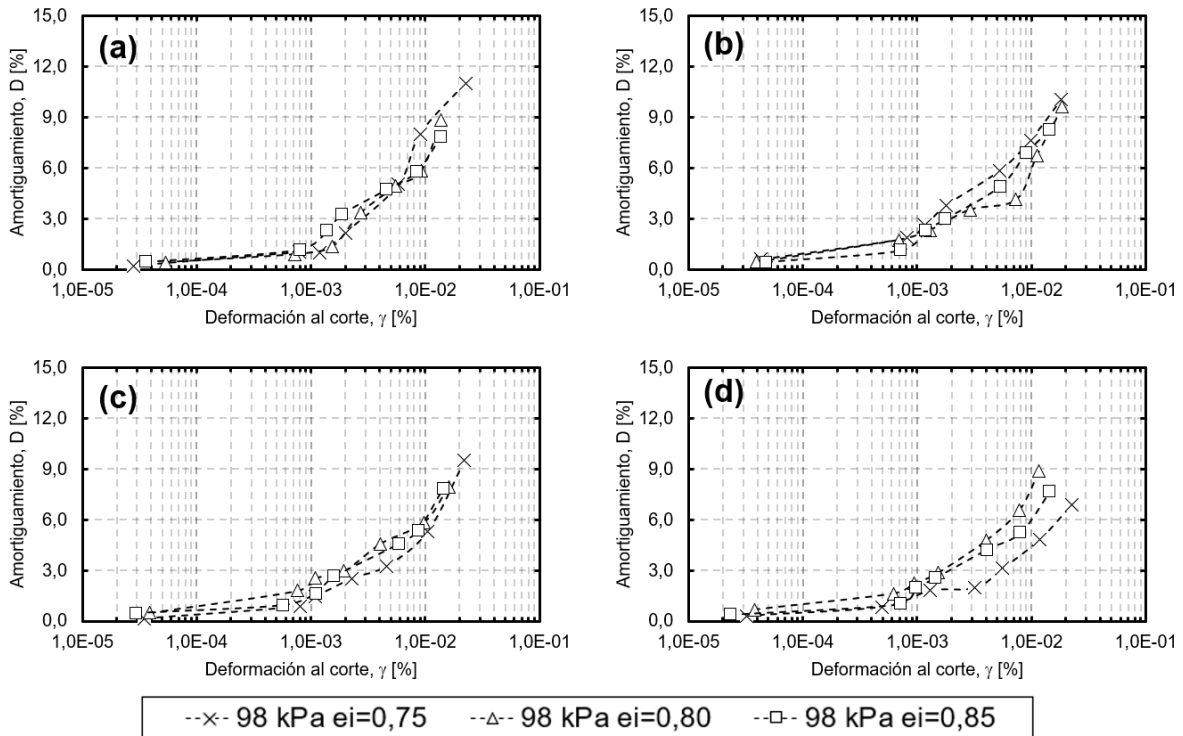


Figura 6-26: Efecto de %CF, e_i para 98 kPa en Amortiguamiento: (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.

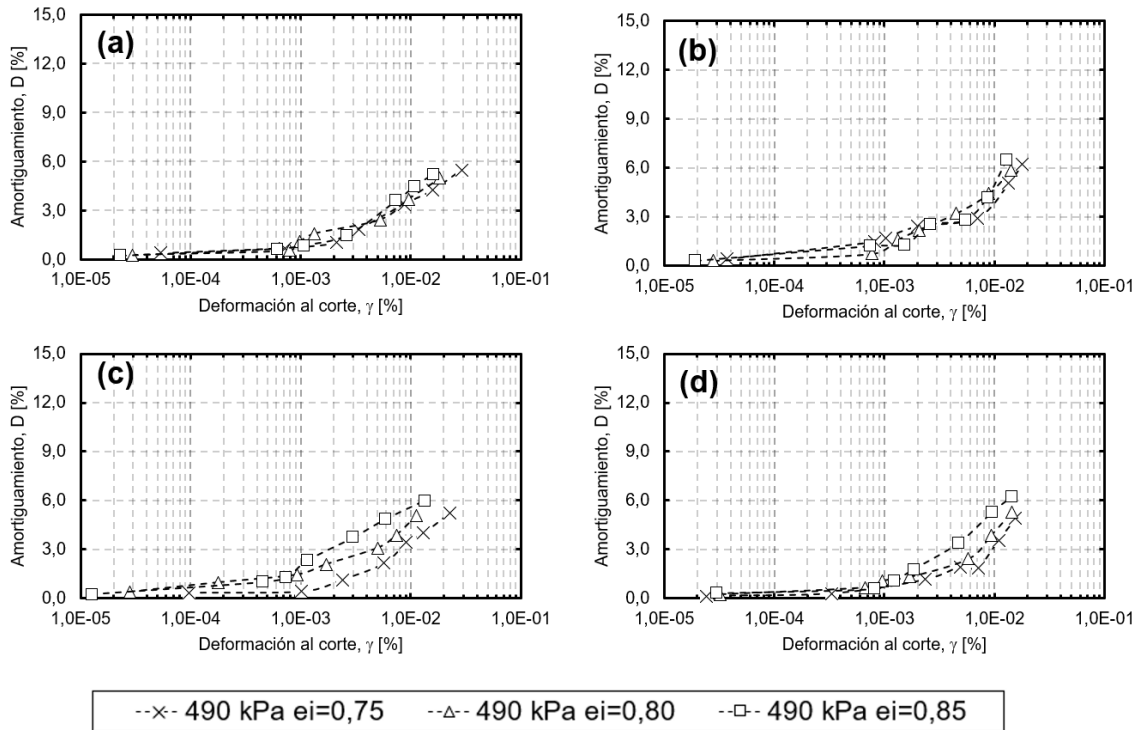


Figura 6-27: Efecto de %CF, e_i para 490 kPa en Amortiguamiento: (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.

Finalmente, para el comportamiento no drenado como se mencionó anteriormente, si bien no hay un cambio de volumen en la probeta, si existe el aumento del exceso de presiones de poros. En la Figura 6-28 se observa el valor del exceso de presiones de poros normalizado ($\Delta u/\sigma'$), donde a medida que aumenta el estado de carga, disminuye rápidamente su exceso de presión de poros normalizado.

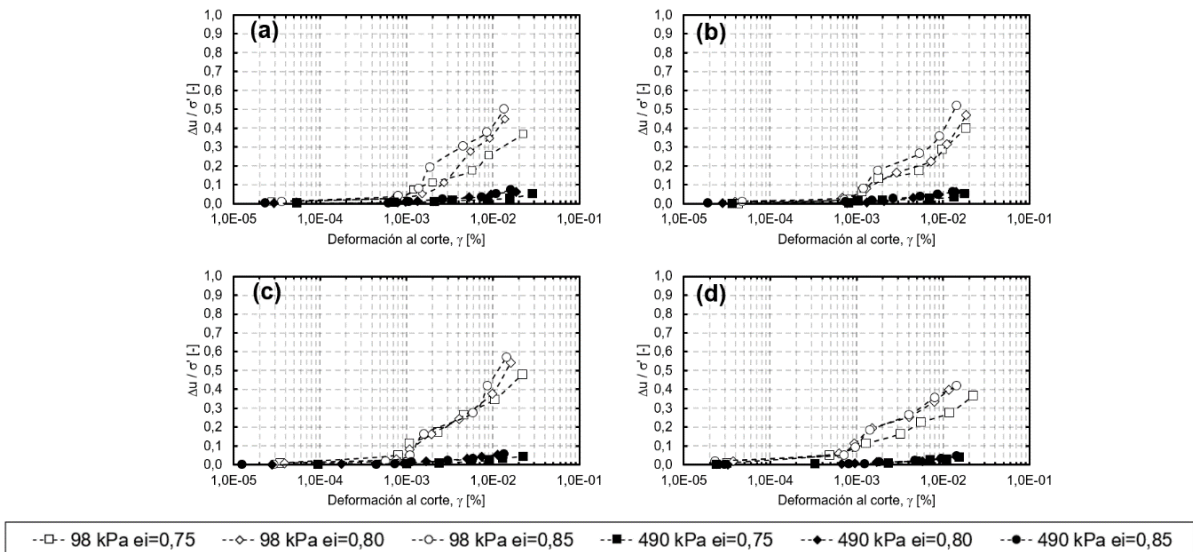


Figura 6-28: Efecto de %CF, e_i para 98 kPa y 490 kPa en $\Delta u/\sigma'$: (a) 1%CF, (b) 5%CF, (c) 10%CF, y (d) 20%CF.

6.3.2. Comparación Resultados Drenados y No Drenados

Si bien se realizaron los ensayos drenados y no drenados, bajo las mismas condiciones, es decir, probetas confeccionadas con índice de vacío inicial de 0,75 0,80 – 0,85, estado de carga entre 98 kPa a 490 kPa y contenido de finos entre 1% a 20%, no es del todo correcto comparar los resultados directamente, esto debido a que el resultado obtenido se asocia a cierto nivel de deformación, sin embargo, sirve como buena aproximación para entender las diferencias obtenidas.

A modo de ejemplo, en la Figura 6-29, se observa la comparación de todos los resultados obtenidos para un índice de confección inicial de 0,75, para distintos estados de carga y contenidos de finos, donde se observan que los mayores valores para el módulo de corte se asocian a un contenido de finos menor. Se observan valores mayores para el módulo de corte drenado. Por otro lado, en la Figura 6-30 se muestran bajo las mismas condiciones mencionadas anteriormente, el valor del amortiguamiento en condición drenada y no drenada, donde hay una leve tendencia a ser mayor en condición drenada, en especial luego de aumentar la deformación al corte.

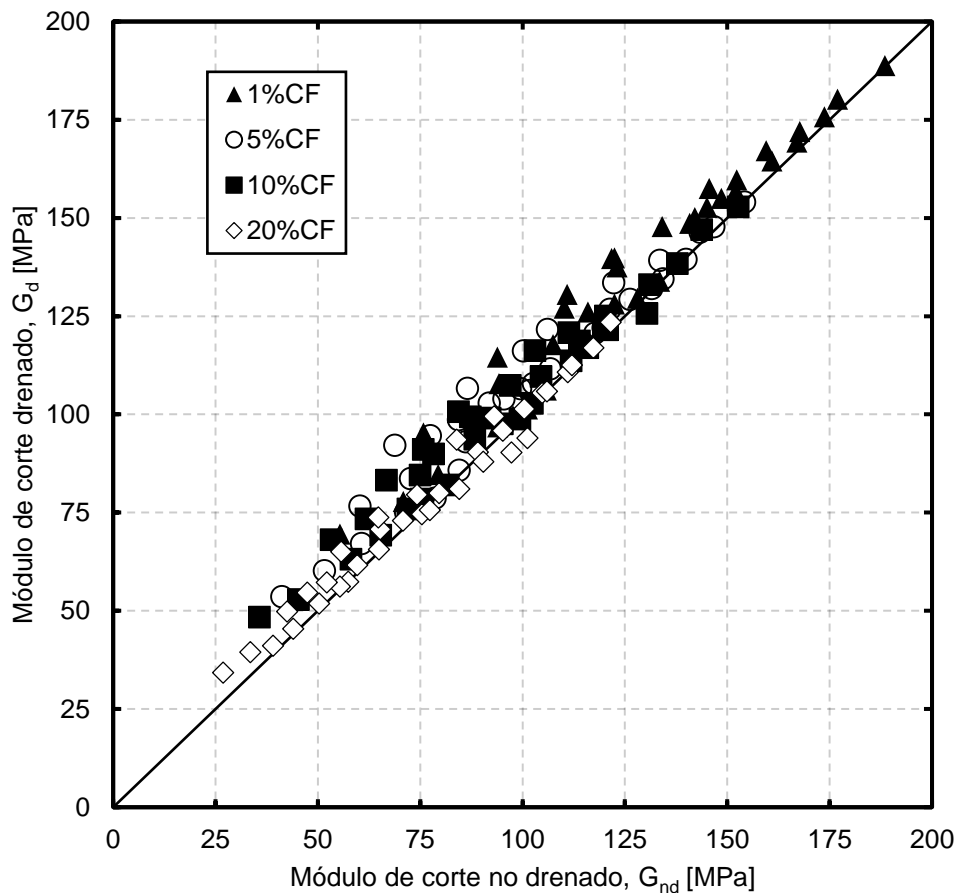


Figura 6-29: Comparación $G_{drenado}$ y $G_{no\ drenado}$ para $e_i=0,75$.

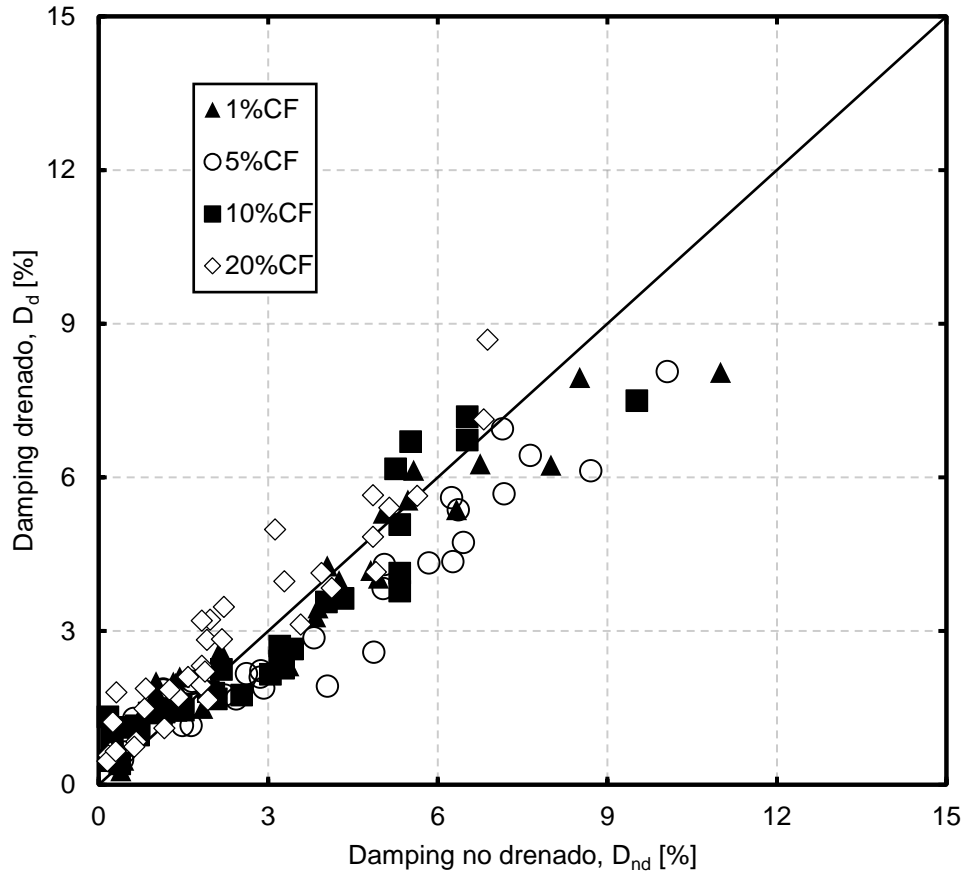


Figura 6-30: Comparación D_{drenado} y $D_{\text{no drenado}}$ para $e_i=0,75$.

Para una comparación más estricta y válida, se toma como referencia cuatro deformaciones: (a) $1 \times 10^{-4}\%$, (b) $5 \times 10^{-3}\%$, (c) $1 \times 10^{-2}\%$, y (d) Última Medición.

Para la Figura 6-31, se observa la comparación entre el módulo de corte drenado y no drenado para un índice de vacío inicial de 0,75, mientras que en la Figura 6-32 para una índice de vacío inicial de 0,85. Se observa que a medida que aumenta la deformación al corte, los valores del módulo de corte drenado son mayores, esto debido a la disminución de la tensión efectiva en el comportamiento drenado, lo que traduce en un menor estado de carga a medida que aumenta la deformación al corte.

A bajas deformaciones, como en la Figura 6-31(a) y Figura 6-32(a), no existe una variación importante, esto debido a que en ese estado tensional casi no existe disipación de presiones de poros.

En general, se observan mayores diferencias para un índice de vacío más suelto, sin embargo, no se aprecia una disminución sustancial entre el módulo de corte drenado y no drenado (del orden del 10% al 20% en promedio).

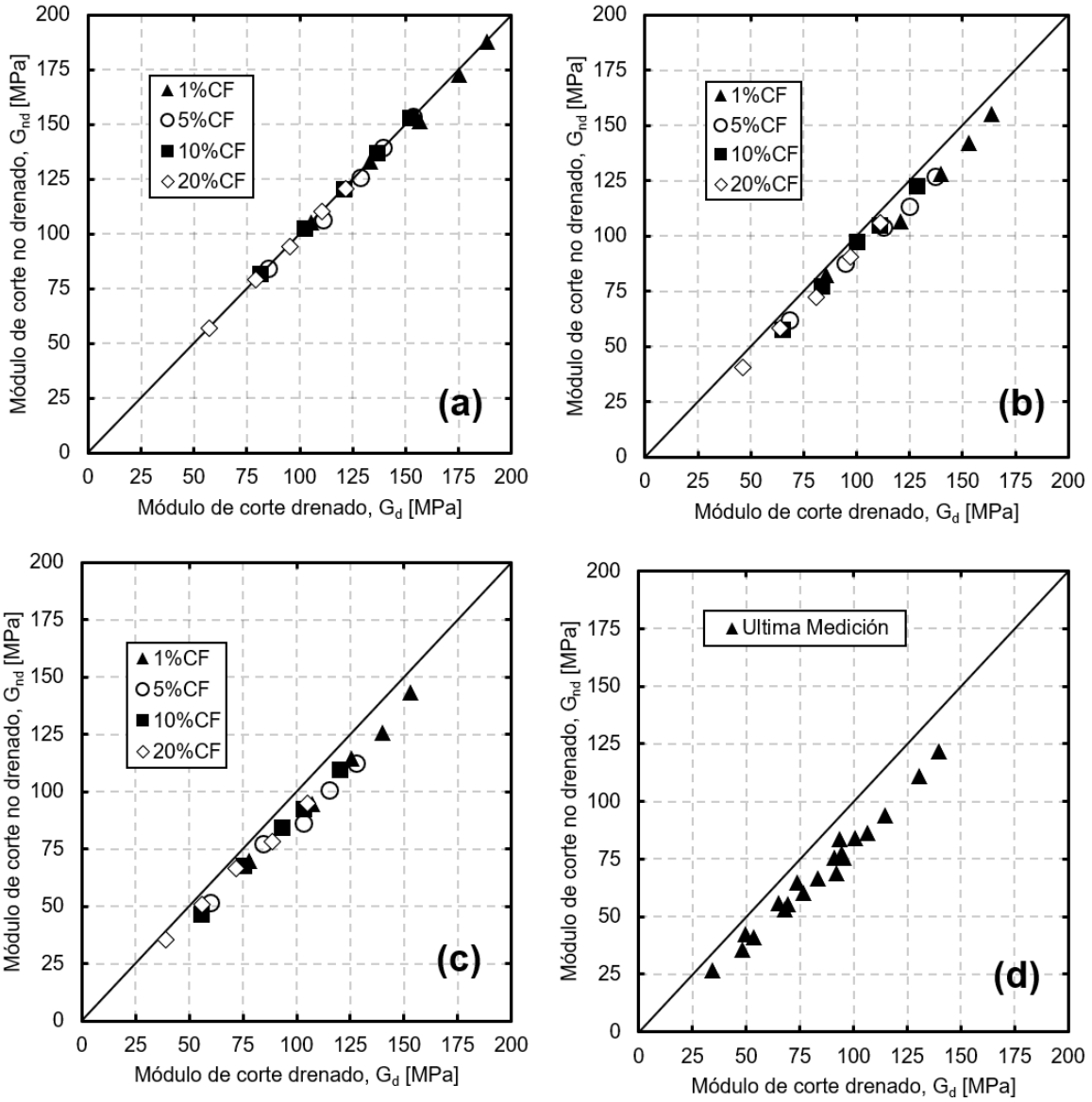


Figura 6-31: Comparación $G_{drenado}$ y $G_{no\ drenado}$ a $e_i=0,75$, para: (a) $1 \times 10^{-4}\%$, (b) $5 \times 10^{-3}\%$, (c) $1 \times 10^{-2}\%$, y (d) Última Medición.

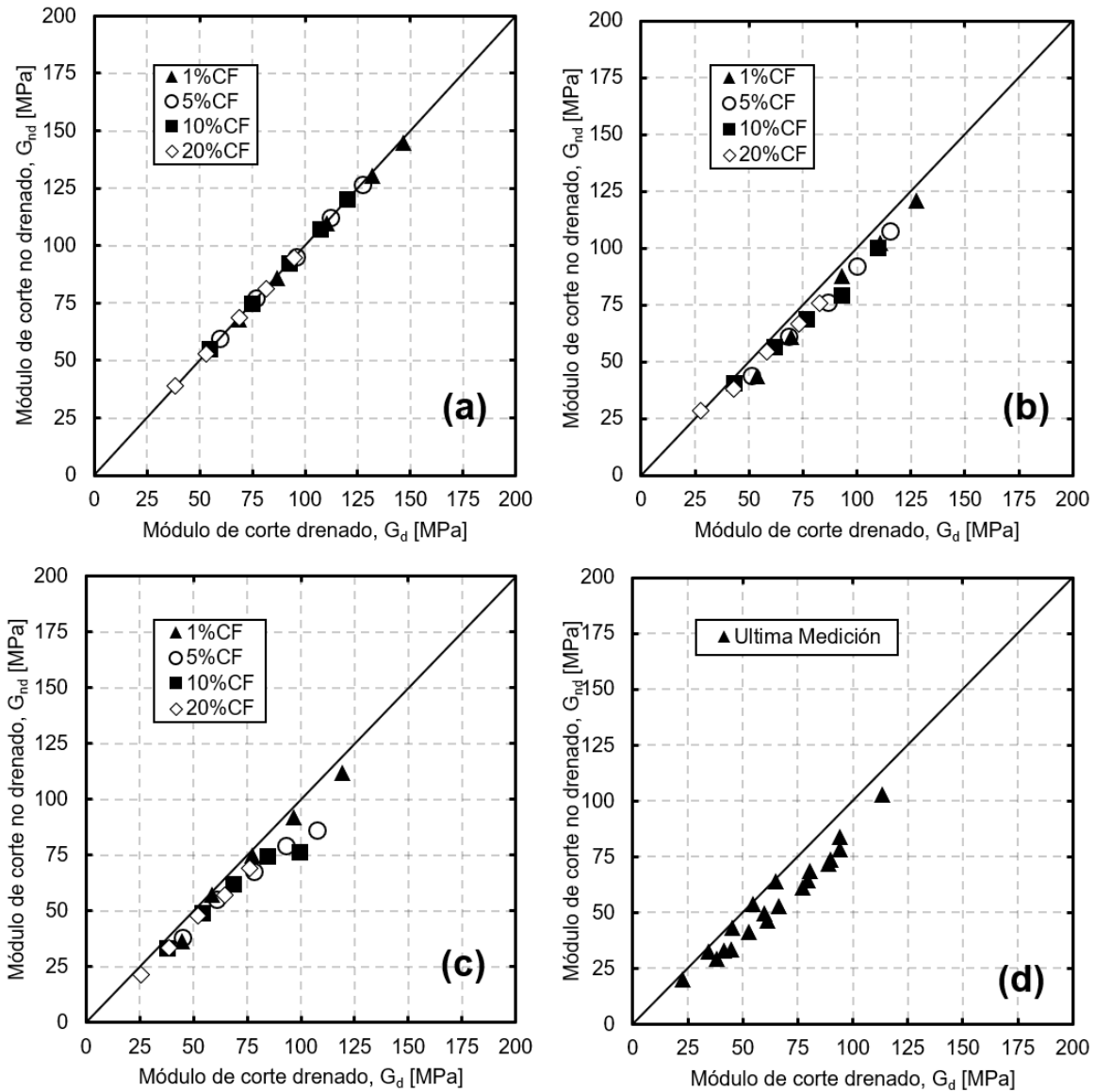


Figura 6-32: Comparación $G_{drenado}$ y $G_{no\ drenado}$ a $e_i=0,85$, para: (a) $1 \times 10^{-4}\%$, (b) $5 \times 10^{-3}\%$, (c) $1 \times 10^{-2}\%$, y (d) Última Medición.

Similar al análisis realizado para el módulo de corte drenado y no drenado, se realiza para el amortiguamiento obtenido en condición drenada y no drenada, el mismo análisis, para un índice de vacío inicial de 0,75 en la Figura 6-33 y para 0,85 en la Figura 6-34, donde se observa una alta dispersión, pero en general se cumple que a medida que aumentamos la deformación al corte, tenemos un amortiguamiento mayor en condición no drenada.

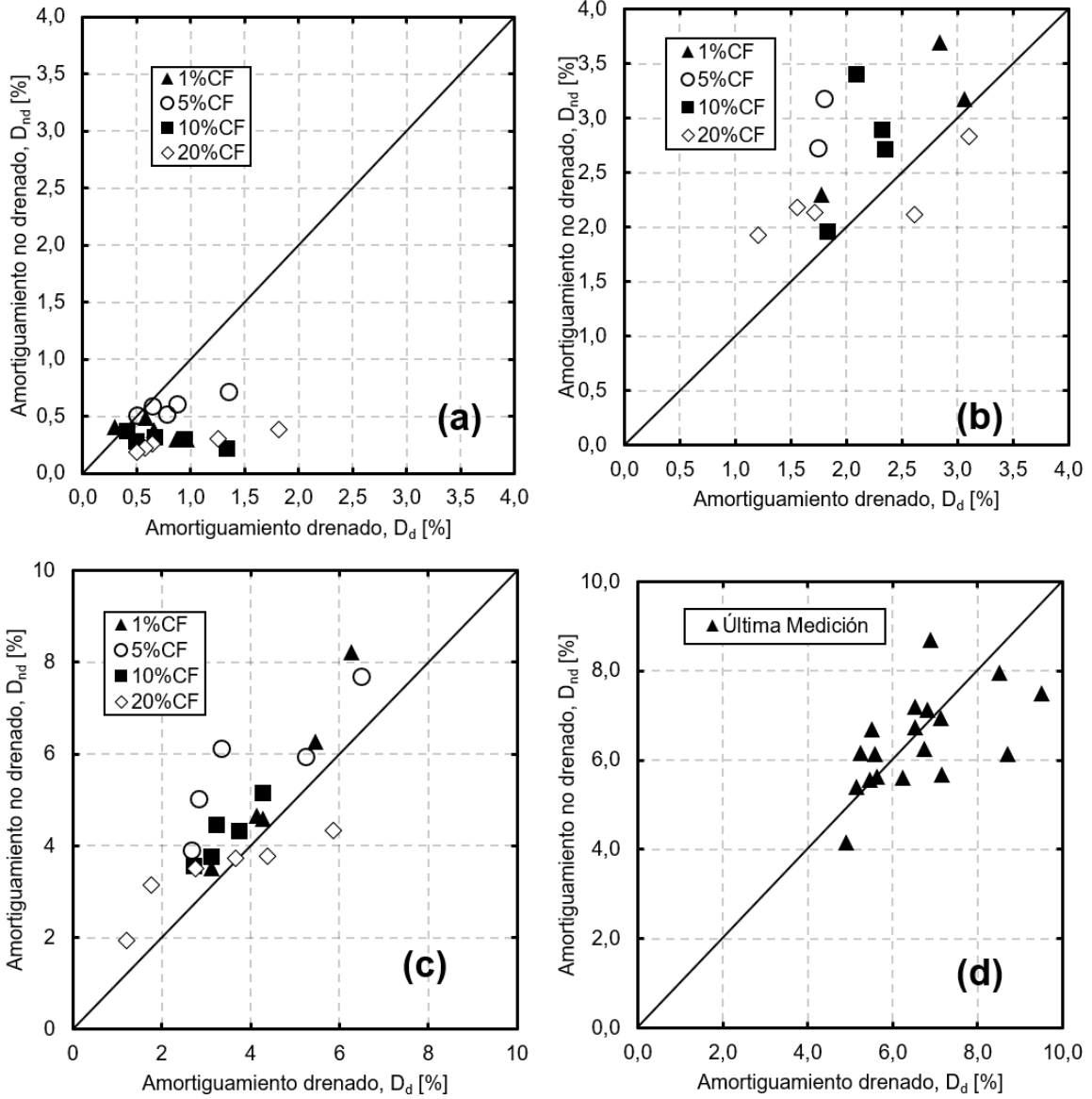


Figura 6-33: Comparación $D_{drenado}$ y $D_{no\ drenado}$ a $e_i=0,75$, para: (a) $1 \times 10^{-4}\%$, (b) $5 \times 10^{-3}\%$, (c) $1 \times 10^{-2}\%$, y (d) Última Medición.

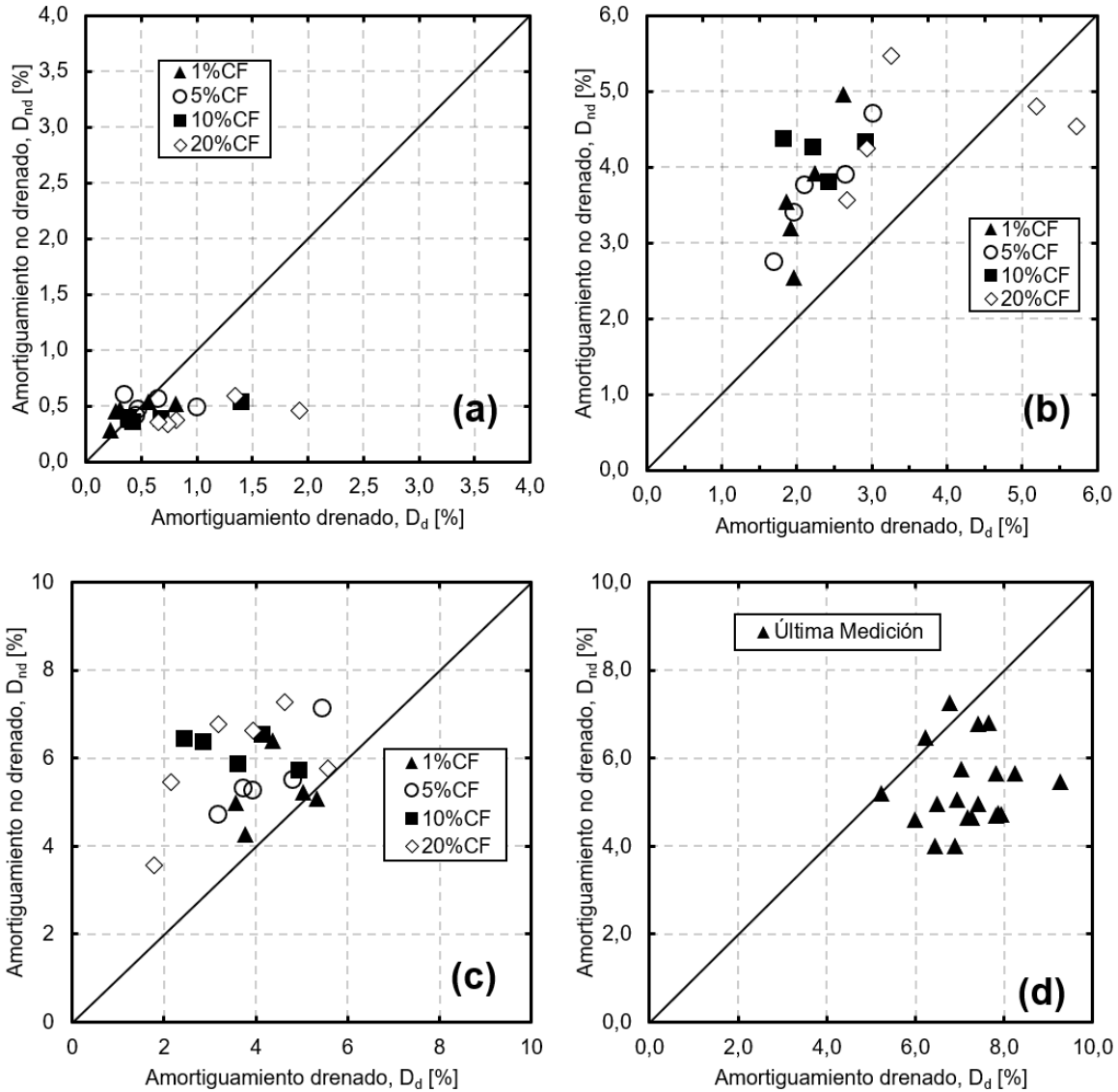


Figura 6-34: Comparación $D_{drenado}$ y $D_{no\ drenado}$ a $e_i=0,85$, para: (a) $1 \times 10^{-4}\%$, (b) $5 \times 10^{-3}\%$, (c) $1 \times 10^{-2}\%$, y (d) Última Medición.

6.3.3. Corrección G_{nd}

El Mohtar et al. (2013) ha propuesto la siguiente relación para relacionar el módulo de corte drenado con el no drenado, donde se basa en el estado de carga asociado, debido a que en condición no drenada existe una disminución del estado tensional. En este estudio, para seguir la línea de la ecuación de Hardin (1978), se define:

$$G_{nd-correctado} = G_{nd\ obtenido} \cdot \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_o} \right)^n$$

Al tomar en cuenta los datos del módulo de rigidez drenado y no drenado para un índice de vacío inicial de 0,75, se grafican todos los resultados para cuantificar la diferencia entre dichos valores.

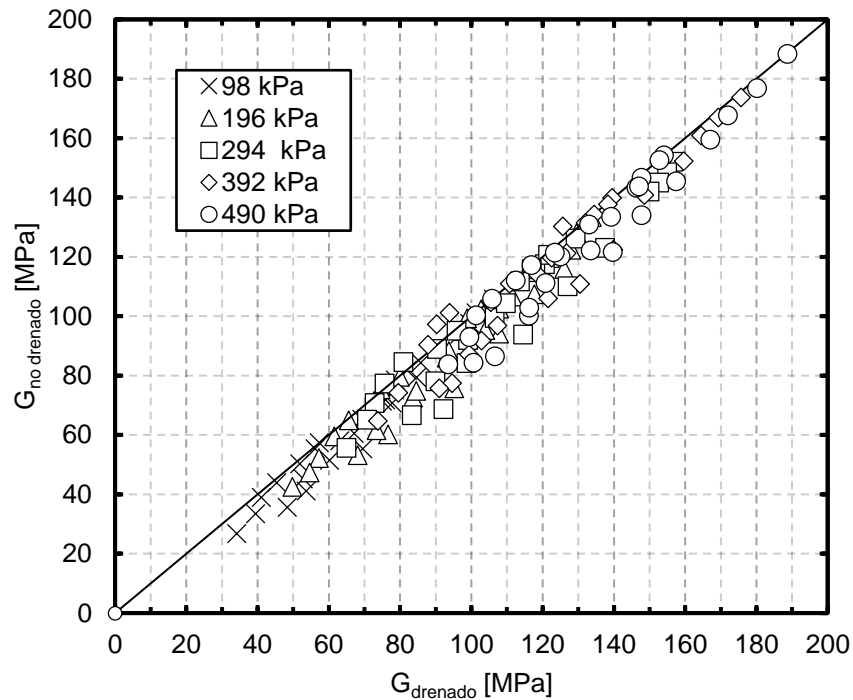


Figura 6-35: Comparación G_{drenado} y $G_{\text{no drenado}}$ a $e_i=0,75$

Al considerar los valores de n mostrados en la Tabla 6-13, se obtienen una buena relación, con errores menores entre el 1% y 6% entre el módulo de corte drenado y el estimado a partir del módulo de corte no drenado, tal y como se muestra en la Figura 6-36. Adicionalmente se observar que n no tiene una relación muy clara respecto al contenido de finos, sin embargo, para el estado de carga es directamente proporcional, es decir, a medida que aumenta el estado de carga, aumenta el valor de n .

Tabla 6-13: Valores de n

	98 kPa	196 kPa	294 kPa	392 kPa	490 kPa
1%CF	0,42	1,1	1,5	2	2,8
5%CF	0,5	1,2	2,2	2,9	3,5
10%CF	0,4	1	1,5	2,4	3,3
20%cf	0,41	0,94	1,2	0,9	1,8

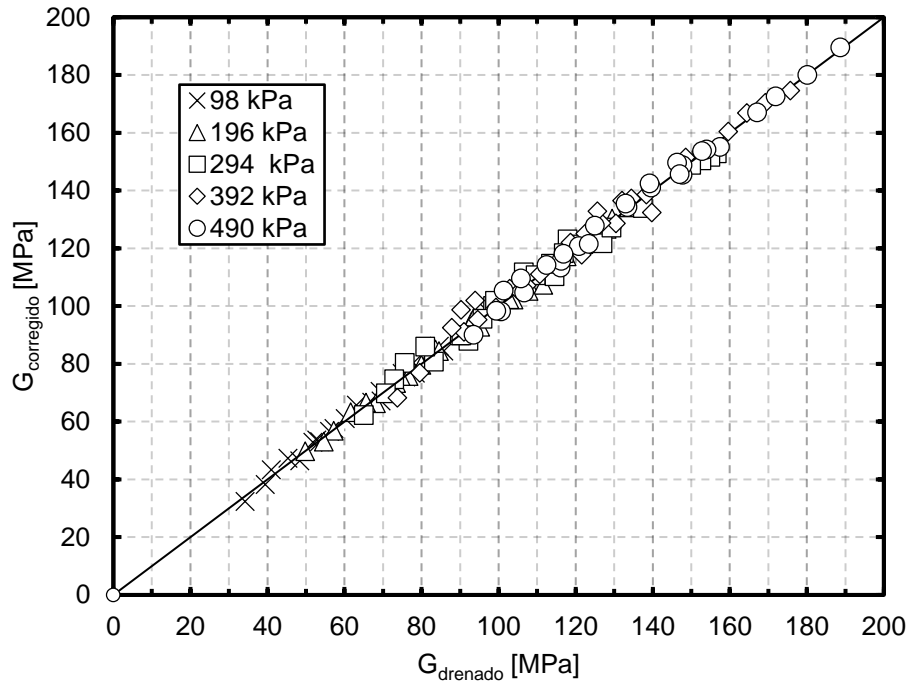


Figura 6-36: Comparación $G_{drenado}$ y $G_{corregido}$ a $e_i=0,75$

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones Generales

En este estudio se muestran los resultados obtenidos mediante bender element y columna resonante para una arena de relaves con contenidos de finos no plásticos de 1%, 5%, 10% y 20%. Si bien se presentan resultados para la arena natural (17%CF), el análisis se centra en los contenidos de finos mencionados. El principal objetivo es estudiar el efecto de adicionar esos finos no plásticos en el comportamiento dinámico de la arena de relaves, como también el efecto que tiene el estado de carga, el índice de vacío y la deformación al corte. En base a esto, es posible concluir lo siguiente:

- A partir de la recopilación de bibliografía, es posible encontrar buena fuente respecto al módulo de corte (G) en función de la deformación al corte, estado de carga, índice de vacío y plasticidad, siendo Hardin y Drnevich (1972a y 1972b) uno de los pioneros en las propiedades dinámicas a bajas deformaciones. Sin embargo, respecto a la variación del contenido de finos la bibliografía es escasa y más aún para el comportamiento no drenado a bajas deformaciones.
- Para la confección de las probetas para distintos contenidos de finos, se realizan a partir del procedimiento de lavado del material y tamizado. Se ha realizado granulometría láser a una probeta de 5%CF, posterior a ser ensayada, extrayendo una muestra de la parte superior de la probeta y la parte inferior, obteniendo un error del 7% en la parte superior de la probeta y 4% en la parte inferior, por lo que es posible validar la metodología empleada (3.1.1 y 3.1.2).
- Los resultados obtenidos para la confección del ensayo (pre-ensayo) presentan una clara tendencia, siendo constante en sus primeras etapas, para luego observar una clara tendencia de ir aumentando su velocidad de onda de corte (V_s) mientras se encuentra consolidando. Respecto al amortiguamiento, se observan una enorme variabilidad, pero en general a medida que se termina el proceso del pre-ensayo disminuye el amortiguamiento hasta llegar a valores del torno a 1%. En esta etapa, no es posible generar una conclusión respecto al contenido de finos y el amortiguamiento, pero si respecto a V_s , donde en general se obtienen mayores valores para probetas con menores contenidos de finos.
- Respecto al módulo de corte máximo (G_{max}), se obtienen valores muy cercanos con bender element y columna resonante, sin embargo, los valores obtenidos mediante bender element son mayores en hasta un 5%, lo cual se puede asociar que el impulso generado a través de los elementos piezoeléctrico genera una deformación al corte menor a $1 \times 10^{-6}\%$, esto considerando que las deformaciones obtenidas en columna resonante parten en deformaciones del orden de 1×10^{-6} a $1 \times 10^{-5}\%$. Adicionalmente, es posible decir a bajas deformaciones la degradación de la rigidez es mínima, considerando que podría existir un orden de magnitud en la diferencia de la deformación al corte.

- Considerando la pequeña diferencia obtenida entre ambos equipos para el módulo de corte máximo (G_{max}), al realizar el análisis de los parámetros α y β de la ecuación de White (1983), como los valores de C_g y n de la ecuación de Hardin (1978), es indiferente y se obtienen parámetros similares:
 - Para α y β , se obtiene en general que a medida que aumenta el contenido de finos, disminuye el parámetro α (Figura 4-44) y aumenta el parámetro β (Figura 4-43).
 - Para C_g , se tiene que disminuye al aumentar el contenido de finos (Figura 4-47), mientras que n tiende a aumentar, pero en la práctica se puede considerar constante en torno al 0,4 – 0,5 (Figura 4-48). Los valores obtenidos de C_g y n , concuerdan con datos de partículas angulares de otros autores, siendo C_g menores en general para este tipo de partículas.
- Para la estimación del amortiguamiento para bajas deformaciones, asociadas al G_{max} , de tipo potencial propuesta por Santamarina et al. (2001), el parámetro A_D tiende a disminuir al aumentar el contenido de finos (Figura 4-50) y el parámetro n_D tiende a aumentar al aumentar el contenido de finos (Figura 4-51Figura 4-30).
- El estado de carga es un parámetro fundamental en el módulo de corte máximo (G_{max}), donde es directamente proporcional a éste, mientras que el índice de vacío es inversamente proporcional a G_{max} . De esta forma, es esperable que un suelo denso y con un confinamiento mayor, tenga un mayor G_{max} respecto a un suelo denso o un suelo con un confinamiento menor.
- Respecto al contenido de finos, se han realizado un análisis que considera la dependencia del índice de vacío (Figura 4-41) y otro que se independiza de éste, a través de la función $f(e)$ para partículas angulares (Figura 4-45), y en ambos se obtiene la conclusión que a medida que aumenta el contenido de finos, disminuye el módulo de corte máximo (G_{max}).
- Al analizar la descarga del módulo de corte máximo (G_{max}), se obtienen tres incógnitas (C_g , k y n), es posible estimar el parámetro k , considerando que los parámetros C_g y n , son coeficiente asociados a la naturaleza y fábrica del material, por lo que considerando el C_g y n asociado al análisis de la carga, el valor de k varía en función del OCR, encontrando una relación inversamente proporcional según el OCR y directamente proporcional según el contenido de finos (Tabla 4-11).
- Para los resultados del comportamiento drenado y no drenado, a medida que se aumenta la deformación al corte, se observa una degradación de la rigidez, lo que se traduce en una disminución del módulo de corte (G) y en un aumento de la amortiguación (D).
- Respecto al estado de carga, se obtiene una relación directamente proporcional entre el confinamiento y el módulo de rigidez, como también con G/G_{max} . El hecho de tener un mayor valor de G/G_{max} , se traduce en una menor degradación de la rigidez. Para el amortiguamiento, se obtiene una relación inversamente proporcional, donde los mayores valores se alcanzan para un menor estado de carga.

- Para un completo análisis del efecto del índice de vacío, se hace necesario aumentar el rango del índice de vacío ensayado, donde en este caso se asocia a una arena ensayada en el rango de 50 a 70%. Sin embargo, en este rango se observa que a mayor índice de vacío, se obtienen menor módulo de corte (G), una menor degradación (mayor G/G_{max}), aunque esta última relación no es del toda directa para todos los ensayos obtenidos, donde para mayores estados de carga, se pierde esta relación y tienden a una única curva. Respecto al damping, no se encuentra una directa correlación, sin embargo, a medida que aumentamos el estado de carga, el damping es directamente proporcional, es decir, para una muestra de suelo suelta (índice de vacío mayor), se obtienen mayor amortiguamiento.
- Respecto al contenido de finos, se observa una relación inversamente proporcional con el módulo de rigidez, mientras que con G/G_{max} y el amortiguamiento, se obtiene una curva única, es decir, los resultados para distintos contenidos de finos tienden a converger a una curva característica para G/G_{max} y para el amortiguamiento (D).
- Para los resultados en condición drenada, se han estimados los resultados para G/G_{max} , donde se han obtenido buenas aproximaciones con la metodología propuesta por Zhang et al. (2005), donde su coeficiente de ajuste k tiene una relación directamente proporcional con el estado de carga y no es posible establecer una relación con el contenido de finos (Tabla 5-17).
- Al estimar el amortiguamiento obtenido en condición drenada, la mejor metodología con buenas aproximaciones es la de Zhang et al. (2005), con un ajuste polinómico de segundo grado. Al considerar los coeficientes señalados en la Figura 5-46, se obtienen errores menores al 20%.
- Respecto a la relación de G/G_{max} en función del amortiguamiento (D), se observa una relación inversamente proporcional (Figura 5-49) y que si bien, en general los valores asociados a menores contenidos de finos se encuentran en la parte superior, no es posible establecer una relación y que en general, todos los valores se ajustan a una única curva.
- Para la degradación no drenada, se observan los mismos comportamientos respecto a la deformación al corte, el estado de carga, el contenido de finos y el índice de vacíos. En este comportamiento, se diferencia del comportamiento drenado, por el aumento del exceso de presiones de poro, lo cual se traduce en una disminución de la tensión efectiva, obteniendo en general menores valores de G respecto a la condición drenada.
- En general el exceso de presión de poros se evidencia a medida que aumenta la deformación al corte, donde sobre la deformación de $1 \times 10^{-3}\%$ hay un aumento muy notorio. A partir de los resultados obtenidos, en general, se puede observar que una probeta con mayor índice de vacío y menor estado de carga genera mayores excesos de presiones de poro.
- La diferencia entre los valores obtenidos para el módulo de corte en condición drenada y no drenada se puede explicar mediante la disminución de la tensión efectiva. Al intentar estimar el módulo de corte drenado a partir de los resultados no drenado, se hace una corrección asociado a la disminución de la tensión efectiva. Se utiliza la potencial, la cual se asocia con el valor del módulo de corte no drenado obtenido y el coeficiente n , el cual tiende a

aumentar a medida que aumenta el estado de carga, como también al aumentar el contenido de finos (Tabla 6-13). Los resultados muestran una buena aproximación entre el G_{drenado} y G_{estimado} (Figura 6-36).

- Finalmente, a partir del presente estudio, se ha observado que la degradación de la rigidez comienza a partir de la deformación al corte del orden de $9 \times 10^{-4}\%$ a $2 \times 10^{-3}\%$. A partir de esta deformación, el suelo es inelástico y no lineal, donde se generan exceso de presiones notorias en los ensayos no drenados y se generan cambios irrecuperables en el volumen en ensayos drenados.

7.2. Recomendaciones para Trabajos Futuros

A partir del trabajo realizado, tanto a partir de la revisión bibliográfica, como el trabajo desarrollado en laboratorio, se recomienda:

- Investigación en profundidad de la metodología del ensayo Bender Element, donde es posible eliminar la subjetividad del ensayo (tiempo de llegada) por métodos más precisos (Frequency Domine), de esta forma la persona a cargo solo debe confeccionar la probeta y su montaje.
- Estimación del amortiguamiento a partir de Bender Element.
- Se recomienda realizar un set de ensayos con un índice de vacío más amplio, para analizar el comportamiento de probetas sueltas (índice de vacío bajo) y densas (índice de vacíos altos).
- Con el fin de estudiar completamente el efecto de los finos no plásticos, se recomienda ensayar probetas de suelo con mayor contenido de finos y estudiar el punto transicional donde los finos comienzan a tomar mayor predominancia.
- Estudio de la degradación de la rigidez y amortiguamiento para medianas y grandes deformaciones, de tal forma de confeccionar la curva completa. A modo de ejemplo, se ha considerado el trabajo de Rodríguez (2019) y un ensayo en condición no drenada del presente estudio. Considerando que para una arena de torito limpia (1%CF), se tiene el G_{max} mediante bender element, junto a la degradación de la rigidez mediante columna resonante y el G_{sec} para medianas y grandes deformaciones mediante triaxial cíclico, es posible generar curvas como las mostrada en la Figura 7-1.

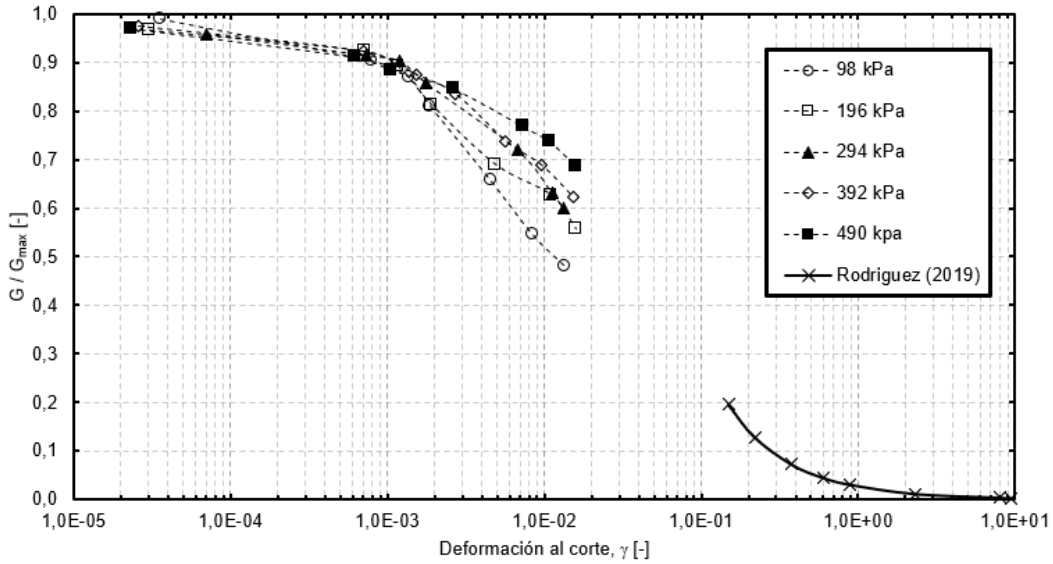


Figura 7-1: G/G_{max} para pequeñas, medianas y grandes deformaciones.

- Ampliar el estudio con finos plásticos, para ver el comportamiento de un suelo de distinta naturaleza y el efecto de la plasticidad.
- Estudio de la descarga en la degradación de la rigidez.
- Analizar el efecto del grado de saturación en el módulo de rigidez y amortiguamiento.
- Realizar el estudio con un suelo cohesivo.

8. BIBLIOGRAFÍA

Arulnathan, R., Boulanger, R. W., & Riemer, M. F. (1998). Analysis of bender element tests. *Geotechnical Testing Journal*, 21(2), 120-131.

Assimaki & Kausel. (2000). Model for Dynamic Shear Modulus and Damping for Granular Soils. *J. Geotech. Geoenviron.Eng.*

ASTM, (2015). D4015-15: Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Fixed-Base Resonant Column Devices. ASTM international.

Carraro, J. A. H., Prezzi, M., & Salgado, R. (2009). Shear strength and stiffness of sands containing plastic or nonplastic fines. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 135(9), 1167-1178.

Cheng, K., Zhang, J., Miao, Y., Ruan, B., & Peng, T. (2019). The effect of plastic fines on the shear modulus and damping ratio of silty sands. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(8), 5865-5876.

Darendeli, M. B. (2001). Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves.

Das, B. M., & Luo, Z. (2016). *Principles of soil dynamics*. Cengage Learning.

El Mohtar, C. S., Drnevich, V. P., Santagata, M., & Bobet, A. (2013). Combined resonant column and cyclic triaxial tests for measuring undrained shear modulus reduction of sand with plastic fines. *Geotechnical Testing Journal*, 36(4), 484-492.

Electric Power Research Institute (EPRI). (1993). Guidelines for determining design basis ground motions. Method and guidelines for estimating earthquake ground motion in eastern North America, 1.

GDS Instruments. (2010). *GDS Resonant Column.*, 1–35.

Goudarzy, M., Rahman, M. M., König, D., & Schanz, T. (2016). Influence of non-plastic fines content on maximum shear modulus of granular materials. *Soils and Foundations*, 56(6), 973-983.

Hardin, B. O. and Black, W. L. (1968), "Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 94, No. SM2, pp. 353-369.

Hardin, B. O., & Drnevich, V. P. (1972a). Shear modulus and damping in soils: design equations and curves. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 98(sm7).

Hardin, B. O., & Drnevich, V. P. (1972b). Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 98(sm6).

Ishihara, K. (1996). *Soil behaviour in earthquake geotechnics*.

Iwasaki, T. and Tatsuoka, F. (1977), "Effects of Grain Size and Grading on Dynamic Shear Moduli of Sands," *Soils and Foundations*, Vol. 17. No. 3, pp. 19-35.

Iwasaki, T., Tatsuoka, F., and Takagi, Y. (1978), "Shear Moduli of Sands under Cyclic Torsional Shear Loading," *Soils and Foundations*, Vol. 18, No. 1, pp. 39-50.

Ishibashi, I., & Zhang, X. (1993). Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils and foundations*, 33(1), 182-191.

Jovičić, V., Coop, M. R., & Simić, M. (1996). Objective criteria for determining G_{max} from bender element tests. *Geotechnique*, 46(2), 357-362.

Kokusho, T. (1980), "Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range," *Soils and Foundations*, Vol. 20, pp. 45-60.

Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*.

Lai, C. G., & Rix, G. J. (1998). Simultaneous inversion of Rayleigh phase velocity and attenuation for near-surface site characterization.

Lee, J. S., & Santamarina, J. C. (2005). Bender elements: performance and signal interpretation. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131(9), 1063-1070.

Leong, E., Yeo, S., & Raharjo, H. (2015). Measuring shear wave velocity using bender elements. *Geotechnical Testing Journal*, 28(5), 1–11.

Lo Presti, D. C. F., Pallara, O., Lancellota, R., Armandi, M., and Maniscalco, R. (1993), "Monotonic and Cyclic Loading Behavior of Two Sands at Small Strains," *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 16, No. 4, pp. 409-424.

Lo Presti, D. C. F., Jamiolkowski, M., Pallara, O., Cavallararo, A., and Pedroni, S. (1997), "Shear Modulus and Damping of Soils," *Geotechnique*, Vol. 47, No. 3, pp. 603-617.

Lo Presti, D. C. F. (1997). Damping ratio of soils from laboratory and in situ tests," in "Seismic behaviour of ground and geotechnical structures. In Proc. of Special Technical Session on Earthquake Geotech. Engrg., 14th Int. Conf. on SMFE (pp. 391-400). Balkema.

Ochoa-Cornejo, F., Bobet, A., Johnston, C. T., Santagata, M., & Sinfield, J. V. (2016). Cyclic behavior and pore pressure generation in sands with laponite, a super-plastic nanoparticle. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 88, 265-279.

Ochoa-Cornejo, F., Bobet, A., Johnston, C., Santagata, M., & Sinfield, J. V. (2020). Dynamic properties of a sand–nanoclay composite. *Géotechnique*, 70(3), 210-225.

Payan, M., Khoshghalb, A., Senetakis, K., & Khalili, N. (2016). Effect of particle shape and validity of G_{max} models for sand: A critical review and a new expression. *Computers and Geotechnics*, 72, 28-41.

Payan, M., Senetakis, K., Khoshghalb, A., & Khalili, N. (2017). Characterization of the small-strain dynamic behaviour of silty sands; contribution of silica non-plastic fines content. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 102, 232-240.

Salgado, R., Bandini, P., & Karim, A. (2000). Shear strength and stiffness of silty sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(5), 451-462.

Santamarina, J. C., Klein, K. A., & Fam, M. A. (2001). *Soils and waves*. New York: J. Wiley & Sons.

Santamarina, J. C., & Cho, G. C. (2004). Soil behaviour: The role of particle shape. In *Advances in geotechnical engineering: The Skempton conference: Proceedings of a three day conference on advances in geotechnical engineering, organised by the Institution of Civil Engineers and held at the Royal Geographical Society, London, UK, on 29–31 March 2004* (pp. 604-617). Thomas Telford Publishing.

Sawangsurriya, A. (2012). Wave propagation methods for determining stiffness of geomaterials. *Wave processes in classical and new solids*, 44.

Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M., & Tokimatsu, K. (1986). Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(11).

Seed, & Idriss. (1970). *Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Responce Analyses*.

Senetakis, K., Anastasiadis, A., & Pitilakis, K. (2012). The small-strain shear modulus and damping ratio of quartz and volcanic sands. *Geotechnical Testing Journal*, 35(6), 964-980.

Senetakis, K., & Payan, M. (2018). Small strain damping ratio of sands and silty sands subjected to flexural and torsional resonant column excitation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 114, 448-459.

Shibata, T. and Soelarno, D. S. (1975), "Stress-Strain Characteristics of Sands under Cyclic Loading," *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineering*, No. 239, pp. 57-65. (in Japanese).

Stokoe, K. H., Darendeli, M. B., Andrus, R. D., & Brown, L. T. (1999). Dynamic soil properties: laboratory, field and correlation studies. In *Earthquake geotechnical engineering* (pp. 811-845).

Tatsuoka, F., Iwasaki, T., & Takagi, Y. (1978). Hysteretic damping of sands under cyclic loading and its relation to shear modulus. *Soils and Foundations*, 18(2), 25-40.

Tatsuoka, F., Iwasaki, T., Yoshida, S., Fukushima, S., & Sudo, H. (1979). Shear modulus and damping by drained tests on clean sand specimens reconstituted by various methods. *Soils and Foundations*, 19(1), 39-54.

Tatsuoka, F., Iwasaki, T., Fukushima, S., & Sudo, H. (1979). Stress conditions and stress histories affecting shear modulus and damping of sand under cyclic loading. *Soils and Foundations*, 19(2), 29-43.

Verdugo, R. (2016). Experimental and conceptual evidence about the limitations of shear wave velocity to predict liquefaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 91, 160-174.

Viertel Pereira, P., Verdugo Alvarado, R., & Acevedo M., P. (2003). Efecto del contenido de finos y de la densidad relativa en la resistencia cíclica de arenas de relave . Tesis (ingeniero civil, mención estructuras y construcción)--Universidad de Chile, 2003.

Viggiani, G., & Atkinson, J. H. (1995). Interpretation of bender element tests. *Géotechnique*, 45(1), 149-154.

Vucetic, M. (1994). Cyclic threshold shear strains in soils. *Journal of Geotechnical engineering*, 120(12), 2208-2228.

Vucetic, M., & Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of geotechnical engineering*, 117(1), 89-107.

Wichtmann, T., & Triantafyllidis, T. (2010). On the influence of the grain size distribution curve on dynamic properties of quartz sand.

Wichtmann, T., Hernández, M. N., & Triantafyllidis, T. (2015). On the influence of a non-cohesive fines content on small strain stiffness, modulus degradation and damping of quartz sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 69, 103-114.

Wichtmann, T., & Triantafyllidis, T. (2013). Effect of uniformity coefficient on G/G max and damping ratio of uniform to well-graded quartz sands. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 139(1), 59-72.

Yang, J., & Liu, X. (2016). Shear wave velocity and stiffness of sand: the role of non-plastic fines. *Géotechnique*, 66(6), 500-514.

Yu, P. and Richart, F. E., Jr. (1984), "Stress Ratio Effects on Shear Modulus of Dry Sands," *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 110, No. GT3, pp. 331-345.

Zhang, J., Andrus, R. D., & Juang, C. H. (2005). Normalized shear modulus and material damping ratio relationships. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(4), 453-464.