

**INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE ACEITE SULFONADO EN LA RESPUESTA
DINÁMICA A PEQUEÑAS DEFORMACIONES DE UN MATERIAL GRANULAR
ARCILLOSO**

JOHN EDUARD PÁEZ RUANO, LUIS FERNANDO DÍAZ CRUZ

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ
2019**

**INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE ACEITE SULFONADO EN LA RESPUESTA
DINÁMICA A PEQUEÑAS DEFORMACIONES DE UN MATERIAL GRANULAR
ARCILLOSO**

JOHN EDUARD PÁEZ RUANO, LUIS FERNANDO DÍAZ CRUZ

Trabajo de grado para optar el título de Magíster en Infraestructura Vial

**Director
Jorge Arturo Pineda Jaimes, Ph.D.
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ
2019**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

A mis padres por sus enseñanzas y sacrificios, mi hermana por la confianza depositada, mi sobrino como ejemplo para su formación futura y a mi novia por su paciencia y apoyo incondicional.

John Páez

A mi familia, este documento refleja el esfuerzo y dedicación del trabajo académico en el que me han apoyado incondicionalmente, a mi compañera sentimental que ha aportado con su comprensión y en brindar fortaleza en todo momento.

Fernando Díaz

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Jorge A. Pineda por su orientación y apoyo en todo momento durante el desarrollo de la investigación como director.

Ambos

A mi mamá, que ha sido la fuente de mi inspiración y dedicación, a mi padre que con su motivación y consejos me encaminó a seguir sin titubear, a mi novia que por todas las dificultades y adversidades afrontadas siempre estuvo dándome su mano, a mi familia, que siempre ha estado presente en todo momento. Por último, a mi compañero de tesis, con el que hemos desarrollado varios retos académicos y espero afrontar muchos más.

Fernando Díaz

A mi familia quien me acompañó durante todo el proceso.

John Páez

CONTENIDO

	Pág.
1	INTRODUCCIÓN12
1.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA12
1.2	JUSTIFICACIÓN14
1.3	OBJETIVO GENERAL15
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....15
2	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y CIENTÍFICA16
2.1	MARCO TEÓRICO16
2.1.1	PROPIEDADES DINÁMICAS16
2.1.1.1	MÓDULO DE RIGIDEZ AL CORTE (G)17
2.1.1.2	AMORTIGUAMIENTO18
2.1.2	MODELOS DE REPRESENTACIÓN PROPIEDADES DINÁMICAS.18
2.1.2.1	REPRESENTACIÓN LINEAL ELÁSTICA.....18
2.1.2.2	REPRESENTACIÓN VISCOELÁSTICA.....20
2.1.2.3	REPRESENTACIONES NO LINEALES21
2.1.3	ENSAYOS DINÁMICOS23
2.1.4	ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS29
2.1.5	ACEITE SULFONADO.....30
2.1.6	MICROSCOPIO DE BARRIDO ELECTRÓNICO31
3	ESTADO DEL ARTE.....32
3.1	ESTABILIZACIÓN DE MATERIALES.....32
3.2	PROPIEDADES DINÁMICAS DE MATERIALES SIN ADICIÓN DE AGENTES MODIFICADORES37
3.3	PROPIEDADES DINÁMICAS DE MATERIALES CON ADICIÓN DE AGENTES MODIFICADORES40
4	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL46
4.1	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA ACEITE SULFONADO47
4.2	CARACTERIZACIÓN MATERIAL CANTERA DE MONDOÑEDO.....47
4.3	PLAN DE DOSIFICACIÓN.....48
4.4	ELABORACIÓN MUESTRAS48
4.4.1	FABRICACIÓN.....48
4.4.2	MADURACIÓN.....49
4.5	CONTROL MUESTRAS ADICIONADAS CON ACEITE SULFONADO.49
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS51
5.1	CARACTERIZACIÓN MATERIAL GRANULAR51
5.1.1	LOCALIZACIÓN.....51
5.1.2	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN51
5.1.2.1	DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULAS DE SUELO52

5.1.2.2	PROPIEDADES DE DURABILIDAD Y LIMPIEZA.....	53
5.1.2.3	PROPIEDADES EXPANSIVAS Y DE CAMBIO VOLUMÉTRICO.....	54
5.1.2.4	RELACIÓN HUMEDAD-PESO UNITARIO MÁXIMO	55
5.2	ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES	55
5.3	COLUMNA RESONANTE.....	61
5.3.1	MÓDULO DE CORTE MÁXIMO (G).....	63
5.3.2	AMORTIGUAMIENTO	70
5.3.3	NORMALIZACIÓN DEL MÓDULO	74
5.3.4	MODELOS DE CORRELACIÓN.....	79
5.3.4.1	HIPERBÓLICO.....	79
5.3.4.2	DRNEVICH	80
5.4	MICROSCOPIO DE BARRIDO ELECTRÓNICO (SEM)	83
6	CONCLUSIONES	86
7	RECOMENDACIONES	89
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
9	ANEXOS	93

LISTA DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1</i> Características aceite sulfonado	30
<i>Tabla 2</i> Dosificación de GEOSTAB para material granular	34
<i>Tabla 3</i> Parámetros que afectan la resistencia al corte y el amortiguamiento	38
<i>Tabla 4</i> Constantes para cálculo de $G_{\text{máx}}$	38
<i>Tabla 5</i> Propiedades físicas arenas y gravas ensayadas en equipo RC.....	39
<i>Tabla 6</i> Valores constantes r y α modelo Ramberg-Osgod	41
<i>Tabla 7</i> Parámetros de ajuste ecuación de normalización $G/G_{\text{máx}}$ arcillas estabilizadas	42
<i>Tabla 8</i> Ensayos de caracterización material de cantera INCOMINERÍA	48
<i>Tabla 9</i> Muestras por cada ensayo	49
<i>Tabla 10</i> Controles de maduración aceite sulfonado - Arcilla.....	49
<i>Tabla 11</i> Parámetros diseño experimental.....	50
<i>Tabla 12</i> Caracterización material cantera INCOMINERÍA	54
<i>Tabla 13</i> Propiedades expansión material cantera INCOMINERÍA.....	54
<i>Tabla 14</i> Resultados módulo de rigidez G (MPa)	63
<i>Tabla 15</i> Resultados velocidad de onda ensayo ultrasónico Pundit.....	70
<i>Tabla 16</i> Resultados Amortiguamiento D (%)	70
<i>Tabla 17</i> Normalización módulo de corte $G/G_{\text{máx}}$	75
<i>Tabla 18</i> Constantes de ajuste para el modelo hiperbólico	79
<i>Tabla 19</i> Contantes modelo Drnevich	81

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1:</i> Efectos desfavorables de materiales expansivos en el noroccidente de la ciudad de Bogotá, Colombia.	13
<i>Figura 2:</i> Comportamiento del suelo de acuerdo con la deformación.	17
<i>Figura 3:</i> Definición módulo de corte (G).	17
<i>Figura 4:</i> Definición amortiguamiento.	18
<i>Figura 5:</i> Módulo cortante secante y tangente.	19
<i>Figura 6:</i> Representación modelo hiperbólico.	21
<i>Figura 7:</i> Relación módulo de corte y amortiguamiento modelo hiperbólico	22
<i>Figura 8:</i> Ejemplo numérico modelo Ramberg-Osgord.	23
<i>Figura 9:</i> Equipo de columna resonante.	25
<i>Figura 10:</i> Elementos equipo columna resonante GCTS (Geotechnical Consulting and Testing Systems) de la USTA	25
<i>Figura 11:</i> Configuraciones ensayo de columna resonante.	26
<i>Figura 12:</i> Relación de amortiguamiento ensayo de columna resonante.	28
<i>Figura 13:</i> Doble capa difusa.	29
<i>Figura 14:</i> Arcilla vista desde un microscopio de barrido electrónico.	31
<i>Figura 15:</i> Módulo de corte y amortiguamiento.	33
<i>Figura 16:</i> Irrigación de material granular con aceite sulfonado.	35
<i>Figura 17:</i> Evolución peso unitario seco de muestra estabilizada con aceite sulfonado.	36
<i>Figura 18:</i> Normalización del módulo de corte y amortiguamiento	37
<i>Figura 19:</i> Curvas granulométricas arenas y gravas.	39
<i>Figura 20:</i> Módulo de corte y amortiguamiento.	40
<i>Figura 21:</i> Predicción modelo Ramberg-Osgod	41
<i>Figura 22:</i> Curvas superior e inferior ecuación de normalización arcillas estabilizadas	42
<i>Figura 23:</i> Variación del módulo de rigidez en arcillas de Core del Sur	43
<i>Figura 24:</i> Módulo de corte vs deformación.	44
<i>Figura 25:</i> Propiedades dinámicas arena mezclada con caucho reciclado	45

<i>Figura 26: Metodología experimental.</i>	47
<i>Figura 27: Localización cantera INCOMINERÍA.</i>	51
<i>Figura 28: Granulometría por tamizado.</i>	52
<i>Figura 29: Granulometría por hidrometría.</i>	52
<i>Figura 30: Distribución de partículas material seleccionado.</i>	53
<i>Figura 31: Curva de compactación.</i>	55
<i>Figura 32: Material granular seleccionado para elaboración de especímenes.</i>	56
<i>Figura 33: Preparación y adición de agua con aceite sulfonado a material granular.</i>	57
<i>Figura 34: Moldes para elaboración de especímenes.</i>	58
<i>Figura 35: Molde para compactación.</i>	59
<i>Figura 36: Compactación material granular.</i>	60
<i>Figura 37: Especímenes finales.</i>	60
<i>Figura 38: Frecuencia de resonancia muestra 0 días sin adición de aceite sulfonado.</i>	62
<i>Figura 39: Variación del módulo de rigidez (G).</i>	63
<i>Figura 40: Variación del módulo de corte según presión de confinamiento.</i>	66
<i>Figura 41: Evolución del módulo de corte a través del tiempo para especímenes con adición de aceite sulfonado.</i>	67
<i>Figura 42: Evolución del módulo de corte a través del tiempo respecto a muestra patrón.</i>	68
<i>Figura 43: Compresión inconfiada para 0 y 90 días</i>	69
<i>Figura 44: Variación del amortiguamiento según presión de confinamiento.</i>	73
<i>Figura 45: Relación de amortiguamiento respecto al tiempo.</i>	74
<i>Figura 46: Normalización módulo de corte según presión de confinamiento.</i>	77
<i>Figura 47: Normalización del módulo de corte respecto al tiempo.</i>	78
<i>Figura 48: Ajuste por modelo hiperbólico</i>	80
<i>Figura 49: Modelo de ajuste Drnevich</i>	83
<i>Figura 50: Capturas microscopio electrónico de barrido.</i>	84

RESUMEN

En esta investigación se estudió el efecto de la adición de aceite sulfonado a través del tiempo en las propiedades dinámicas, módulo de rigidez al corte y amortiguamiento, de un material granular con presencia de arcilla proveniente del sector de Mondoñedo al occidente de la ciudad de Bogotá, utilizando el ensayo de columna resonante. En total se fabricaron 19 especímenes de 50 mm de diámetro por 100 mm de altura, elaborados mediante la adición de aceite sulfonado al agua de mezcla en proporción del 2%, compactados por el método estático denominado volumen constante presión variable y ensayados bajo esfuerzos isotrópicos de confinamiento variables entre 0 y 400 KPa, con torques cíclicos entre 0.0115 a 0.23 N-m y tiempos de curado de 0 a 90 días.

Los resultados demostraron que con la inclusión del agente estabilizante a 0 días de curado se presentó un aumento del 60% en el módulo de rigidez comparado con la muestra sin adición, así mismo, las curvas de normalización G/G_0 manifiestan una degradación más rápida del módulo para las muestras sin estabilizar. Para los especímenes sometidos a proceso de curado se evidenció un incremento en la rigidez a 30 días y una disminución para las edades de 60 y 90 días, con una menor degradación del módulo y aumento de las deformaciones a mayor tiempo de maduración. Estos cambios se corroboraron a nivel microestructural mediante observaciones en el microscopio de barrido electrónico (SEM - Scanning Electron Microscope), encontrando para 0 días sin adición agregados conglomerados por la matriz arcillosa en forma laminar con poco espacio entre las partículas, mientras que, para 90 días, una estructura heterogénea, fisuras a lo largo de las terrones y discontinuidades o poros abiertos. Finalmente, se ajustaron los resultados a dos modelos hiperbólicos basados en la deformación de referenciada (γ_r) para $G/G_0=0.5$ y en la relación amortiguamiento (D) - módulo de corte (G). Los resultados sugieren que el efecto del aceite sulfonado sobre el comportamiento dinámico del material es favorable.

Palabras claves: columna resonante, módulo de corte, amortiguamiento, aceite sulfonado, estabilización de arcillas.

1 INTRODUCCIÓN

El estudio de los materiales empleados en la ingeniería se relaciona en mayor medida con la respuesta dinámica de los suelos, debido a que el comportamiento mecánico ante cargas cíclicas es fundamental en diferentes aplicaciones, tales como la reacción de estructuras de pavimento asociadas al tránsito, la respuesta de esos materiales en sismos, y en general, problemas de vibraciones.

Los materiales empleados para ingeniería en la construcción de infraestructura vial requieren caracterizarse a partir de parámetros asociados a sus propiedades físicas y químicas, su resistencia y rigidez en diferentes condiciones, las cuales deben analizarse en el contexto de requisitos técnicos que permitan garantizar la estabilidad y correcto funcionamiento de las obras, minimizando riesgos o fallas tempranas.

Los cambios volumétricos, hinchazón y en general los problemas asociados con las propiedades expansivas de los suelos y los materiales combinados con estos ante variaciones de humedad son recurrentes y representan solamente en Estados Unidos al menos 15 mil millones de dólares en daños a las estructuras de ingeniería (Saride & Dutta, 2016). Frecuentemente este tipo de materiales son tratados y estabilizados con productos como cemento, cenizas, derivados asfálticos, soluciones químicas, fibras, entre otros, buscando mejorar sus características y mitigar sus efectos adversos. Por lo anterior, abordar el estudio de las propiedades dinámicas y su respuesta bajo cargas cíclicas de suelos estabilizados constituye un paso fundamental en el entendimiento del comportamiento de estos materiales y su aplicación en diferentes campos de la ingeniería.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los inconvenientes que se evidencia con frecuencia en las obras de infraestructura es la dificultad para encontrar materiales aptos para la construcción que cumplan con las especificaciones técnicas contractuales. Factores como composición mineralógica de las fuentes, distancias de acarreo, infraestructura para producción de agregados, entre otras, condicionan tanto económica como logísticamente la ejecución de proyectos, especialmente de desarrollo vial, llegando a considerar el mejoramiento de los materiales existentes.

En los alrededores de Bogotá, entre los municipios de Mosquera y Soacha, se localiza una de las mayores zonas de explotación de materiales como rajón, recibos, sub bases y bases granulares y agregados para producción de concretos asfálticos, los cuales surten a una parte importante de construcciones viales de la capital del país con un 48% de las canteras aprobadas como proveedores del IDU (Instituto de Desarrollo Urbano, 2018); allí la presencia de minerales arcillosos en las betas de explotación, en proporciones superiores a las establecida en la normatividad, constituye una limitación para la comercialización de materiales

puesto que confieren características expansivas y de cambios volumétricos no deseados en las estructuras de pavimentos restringiendo su uso, obligando a la adición de agregados de mejores características o en el peor de los casos descartando el material para construcción.

Las patologías asociadas con las características expansivas de las arcillas han cobrado importancia en las últimas décadas debido a los continuos daños evidenciados en las estructuras ingenieriles y al considerable impacto que conllevan; ejemplo de estas consecuencias desfavorables corresponden a los corredores viales construidos sobre subrasantes potencialmente expansivas donde fenómenos de retracción-expansión potencializan los daños como fisuras, hundimientos y ahuellamientos (Figura 1) que a su vez repercuten en los índices de servicio, velocidad de operación y seguridad de los usuarios.



Figura 1: Efectos desfavorables de materiales expansivos en el noroccidente de la ciudad de Bogotá, Colombia. **Nota:** Elaboración propia

Para poder simular, conceptuar y dar soluciones a las patologías descritas anteriormente es necesario comprender de antemano el comportamiento de los materiales ante cargas cíclicas en condiciones reales de trabajo, lo que se logra a través de ensayos dinámicos como el de columna resonante. Los vehículos que circulan por una carretera transmiten una carga hacia las estructuras de pavimento principalmente caracterizadas por la velocidad, tiempo de aplicación, peso y repeticiones o volumen de tránsito, lo que se traduce en deformaciones en el rango elástico de los materiales que generalmente son solo una pequeña parte de la deformación total que puede alcanzar el suelo; por lo anterior, la determinación de los módulos característicos de los materiales como el de corte (G) o de elasticidad (E), obtenidos mediante el equipo de columna resonante, constituyen un elemento fundamental para evaluar la respuesta de los materiales ante cargas de trabajo (Sas, Gabrys, Gluchoswski, & Szymanski, 2014).

Esta investigación, pretende generar alternativas para la utilización de materiales granulares con presencia de arcilla mediante la evaluación del comportamiento dinámico de estos ante la adición de agentes químicos estabilizadores. Diversas

investigaciones han demostrado la efectividad de los aceites derivados del petróleo y las industrias en el control de expansión volumétrica, índices de plasticidad y capacidad de soporte para subrasantes, sin embargo, el comportamiento de materiales granulares estabilizados con aceite sulfonado no ha sido estudiado a través de ensayos dinámicos a pequeñas deformaciones a pesar de sus favorables resultados en materiales arcillosos. En nuestro país, este tema reviste una especial importancia, por cuanto existen varios kilómetros de vías terciarias cuyos materiales pueden ser estabilizados mediante esta técnica, por lo anterior, el conocimiento de la respuesta de estos materiales es fundamental para favorecer la economía de nuestros proyectos.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Los materiales implementados en las obras civiles presentan propiedades físicas que brindan en toda la vida útil de la infraestructura niveles de seguridad y servicio según su comportamiento ante la aplicación de cargas. Para ejecutar cualquier proyecto de infraestructura vial se requiere insumos para su construcción que cumplan características técnicas reglamentadas en Colombia por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) con el fin de brindar estándares de calidad que garanticen la integridad y estabilidad a la infraestructura en todo su periodo de servicio; en las fuentes de explotación y extracción de estos materiales naturales conformados por procesos geológicos se pueden encontrar diversidad de componentes que dependiendo de sus características mineralógicas y de formación tendrán un comportamiento mecánico variable. Según los estudios de caracterización y perfiles estratigráficos realizados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) en la Sabana de Bogotá, existen minerales de caolinita, illita y en algunos casos montmorillonitas, los cuales son conocidos en sus diferentes configuraciones como arcillas.

En la zona de Mondoñedo Cundinamarca, existen alrededor de 6 (seis) canteras dedicadas a la explotación de materiales granulares. Durante el aprovechamiento comercial en la cantera Loma Pelada se ha encontrado que alrededor del 25% del material explotado tiene presencia de arcilla condicionando la clasificación y destinación final de los materiales extraídos, y restringiendo la explotación en zonas que cuentan con la infraestructura, permisos y licencias para ello; muchas de estas betas de material son desaprovechadas y consideradas como material no apto para el uso en construcción por sus desfavorables propiedades mecánicas especialmente en las estructuras de pavimento. La presencia de arcilla fundamentalmente permite que el material al contacto con la molécula de agua genere esfuerzos internos variando su comportamiento mecánico, esta condición es perjudicial para la estabilidad de cualquier obra civil debido a que al cambiar volumétricamente y modificar densidades disminuye directamente la resistencia portante.

Los materiales que se implementan para la construcción de infraestructura vial presentan deformaciones ante la aplicación de cargas de servicio o eventos sísmicos, las cuales se caracterizan por tener un comportamiento dinámico causando una respuesta física en función de las propiedades mecánicas presentes en el material.

Mediante el ensayo de columna resonante, se busca analizar la influencia del aceite sulfonado en el comportamiento del módulo de corte y el amortiguamiento mediante una técnica experimental avanzada, evaluado a bajas deformaciones, en un material con presencia de arcilla para un periodo de tiempo determinado, con el fin de aprovechar adecuadamente los materiales y brindar una línea base o primera aproximación para el diseño y construcción de estructuras viales. Así mismo, se podrán implementar, a mediano plazo, en la construcción de subbases, bases y afirmados de carreteras, materiales granulares que antes eran dispuestos en zonas de desperdicio.

1.3 OBJETIVO GENERAL

- Determinar la influencia de la adición de aceite sulfonado en la rigidez y las propiedades dinámicas a pequeñas deformaciones de un material granular con presencia arcilla a través del tiempo, mediante el ensayo de columna resonante.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las características de las arcillas presentes en el material granular a través de ensayos de caracterización.
- Establecer el plan de dosificación de aceite sulfonado para la elaboración de los especímenes de ensayo a partir de la densidad seca máxima y contenido de humedad.
- Evaluar el comportamiento dinámico de los especímenes con y sin adición de aceite sulfonado a través del tiempo.
- Comparar las muestras de material granular con presencia de arcilla mediante el ensayo de microscopio de barrido electrónico (SEM) maduras a través del tiempo.

2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y CIENTÍFICA

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 Propiedades Dinámicas. Cuando se aplican cargas dinámicas a una masa de suelo, por ejemplo, el tránsito de vehículos en un pavimento, vibración producida por maquinaria, olas del mar o vientos, sismos, entre otros, se pueden inducir cambios en los estados de esfuerzos lo que se traduce en incrementos en las deformaciones y la presión de poros ocasionando la falla del suelo, o en otras situaciones, modificación o amplificación del movimiento que pueden afectar a las estructuras subyacentes; este tipo de problemas involucran principalmente el estudio de tres aspectos: las deformaciones inducidas, la cuantificación de los efectos de las cargas y la determinación de las propiedades dinámicas como el módulo de corte (G) y la relación de amortiguamiento (λ) (Rodríguez, 2005). El estudio y la representación de estas dos variables dependen en gran medida del rango de deformación donde se evalúe la respuesta del suelo en función de los esfuerzos de corte.

De acuerdo con Ishihara (1996) para deformaciones entre $10^{-6}\%$ y $10^{-4}\%$, denominadas pequeñas deformaciones, el suelo presenta un comportamiento elástico con el módulo de corte como un parámetro pertinente para representar su comportamiento mediante un modelo lineal elástico; entre $10^{-5}\%$ y $10^{-2}\%$, llamadas deformaciones medias, la respuesta se considera del tipo elastoplástico representado en la disminución del módulo de corte al incrementar el esfuerzo cortante cíclico y la incorporación del amortiguamiento como la capacidad de absorción de energía a través de un método lineal equivalente o no lineal; por último, para deformaciones superiores a $10^{-2}\%$ el comportamiento del material cambia de manera considerable con la tensión de corte y el número de ciclos aplicados por lo que se requiere un modelo paso a paso para representar el comportamiento del suelo (Figura 2). Estos rangos no se deben tomar como absolutos puesto que dependen de variables como la microestructura del suelo, plasticidad, saturación, entre otros.

Shear strain	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
	Small strain	Medium strain	Large strain		Failure strain	
Elastic						
Elasto-plastic						
Failure						
Effect of load repetition						
Effect of loading rate						
Model	Linear elastic model		Visco-elastic model		Load history tracing type model	
Method of response analysis	Linear method		Equivalent linear method		Step – by – step Integration method	

Figura 2: Comportamiento del suelo de acuerdo con la deformación. (Ishihara, 1996)

2.1.1.1 Módulo de Rigidez al Corte (G). Es la relación entre la tensión de corte cíclica (τ) y la deformación al corte cíclica (γ), corresponde a la respuesta mecánica del suelo cuando es sometido a esfuerzos cortantes. A partir de la curva esfuerzo-deformación y en función del punto donde se evalué se puede obtener el módulo de rigidez tangente (G_{tan}), el cual corresponde a la pendiente de la recta tangente en un punto de la curva, módulo de rigidez secante (G_{sec}), equivalente a la pendiente de la recta secante a la curva que pasa por el origen y módulo de corte máximo ($G_{m\acute{a}x}$), similar al módulo de rigidez tangente pero evaluado en el punto inicial del ciclo (Figura 3). A deformaciones bajas, el módulo de corte tiende a $G_{m\acute{a}x}$ debido a la naturaleza lineal o elástica, mientras que el módulo secante se evidencia con el aumento de las deformaciones originado por un comportamiento no lineal.

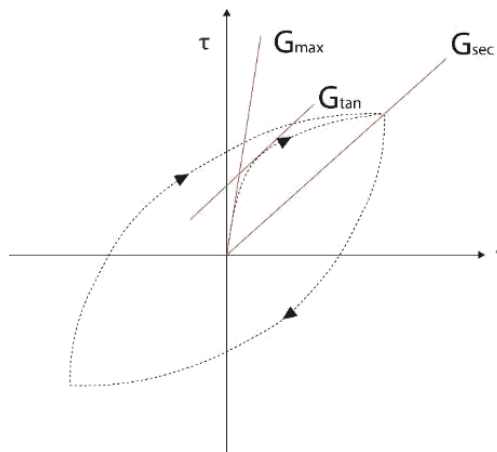


Figura 3: Definición módulo de corte (G). (Barchiesi, Fernández, & Placci, 2010)

2.1.1.2 Amortiguamiento. Proporciona una medida de la capacidad de disipación de energía del suelo y se produce porque la energía almacenada durante un ciclo de carga es superior a la liberada durante la descarga debido a los efectos friccionantes del suelo provocados por el deslizamiento de partículas del mismo (Lucero Solis, 2017). Se expresa como:

$$D = \frac{\text{Energía disipada en un ciclo}}{4\pi \text{ área } OAB}$$

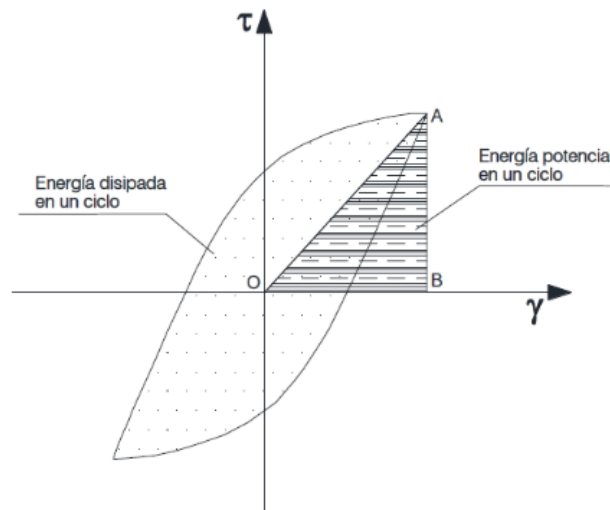


Figura 4: Definición amortiguamiento. (Lucero Solis, 2017)

2.1.2 Modelos de Representación Propiedades Dinámicas. Debido a que la rigidez del suelo varía en función de la deformación y del tipo de material estudiado, existen varios modelos que tienen en cuenta especialmente el comportamiento no lineal tensión-deformación. Es común representar esta característica mediante la normalización del módulo o curva de reducción dividiendo el módulo de corte entre el módulo máximo o de referencia ($G/G_{m\acute{a}x}$); esta curva también se puede asociar con el amortiguamiento, siendo la relación $G/G_{m\acute{a}x}$ menor y el amortiguamiento mayor con el aumento de la deformación. A continuación, se detallan tres tipos de modelos.

2.1.2.1 Representación Lineal Elástica. También llamado lineal equivalente, según Kramer (1996) este modelo plantea que el ciclo de histéresis característico de respuesta es similar al de la Figura 5, donde se deben tener en cuenta dos características importantes: su inclinación, la cual depende de la rigidez del suelo y está determinada por el módulo de corte tangente (G_{tan}), y su amplitud, equivalente a los valores de esfuerzo cortante (τ_a) y deformación (γ_a). G_{tan} varía con el transcurso del ciclo de carga, pero su valor promedio aproximado se puede expresar mediante el módulo secante (G_{sec})

$$G_{sec} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad \text{Ecuación 1}$$

El amortiguamiento a su vez está dado por:

$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_s} = \frac{1}{2\pi} \frac{A_{ciclo}}{G_{sec} \gamma_c^2} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde W_D es la energía disipada, W_s la energía aplicada y A_{ciclo} el área del ciclo de histéresis.

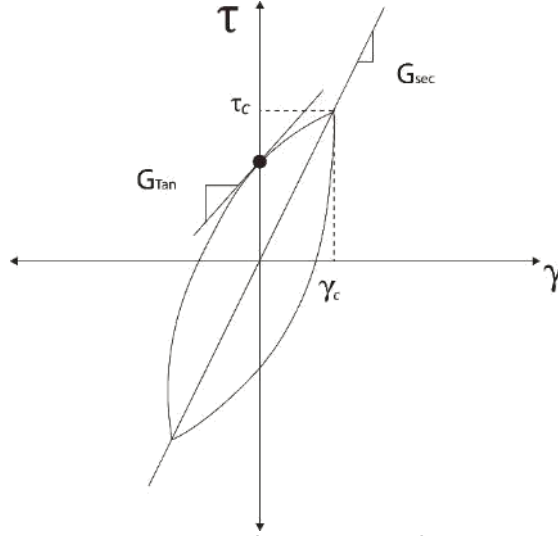


Figura 5: Módulo cortante secante y tangente. (Kramer, 1996)

Es importante resaltar que este modelo no se puede utilizar para problemas que impliquen una deformación permanente del suelo ya que la tensión vuelve a cero después del ciclo de carga, es decir, no se produce la falla.

La curva de reducción del módulo de corte propuesta por Ishibashi & Zhang (1993) para el modelo lineal relaciona los efectos de la presión de confinamiento y el índice de plasticidad (IP) con la siguiente expresión:

$$\frac{G}{G_{m\acute{a}x}} = K(\gamma, IP)(\sigma'_m)^{m(\gamma, IP) - m_0} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$$K(\gamma, IP) = 0.5 \left\{ 1 + \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000102 + n(IP)}{\gamma} \right)^{0.492} \right] \right\}$$

$$m(\gamma, IP) - m_0 = 0.272 \left\{ 1 - \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \right\} \exp(0.0145 IP^{1.3})$$

$$n(IP) = \begin{cases} 0.0 & \text{para } IP = 0 \\ 3.37 \times 10^{-6} IP^{1.404} & \text{para } 0 < IP \leq 15 \\ 7.0 \times 10^{-7} IP^{1.976} & \text{para } 15 < IP \leq 70 \\ 2.7 \times 10^{-5} IP^{1.115} & \text{para } IP > 70 \end{cases}$$

Para el caso de amortiguamiento equivale a:

$$\xi = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145IP^{1.3})}{2} \left[0.586 \left(\frac{G}{G_{\max}} \right)^2 - 1.547 \frac{G}{G_{\max}} + 1 \right] \quad \text{Ecuación 4}$$

2.1.2.2 Representación Viscoelástica. Este modelo introduce características de disipación de energía en el comportamiento de los materiales; se han desarrollado diferentes métodos de representación de los cuales se destacan:

2.1.2.2.1 Modelo de Kelvin-Voight. Esta representación, idealiza el comportamiento del material como elástico y viscoso simultáneamente ante una carga determinada y su modelo se representa por un resorte y un amortiguador acomodados en paralelo. La tensión es distribuida en τ_1 y τ_2 que a su vez es soportada y transmitida por el resorte (G y) sumado con el amortiguador ($G' d\gamma/dt$) respectivamente.

$$\tau = G \gamma + G' \frac{d\gamma}{dt} \quad \text{Ecuación 5}$$

Al aplicar un esfuerzo cortante armónico a un cuerpo se producirá una respuesta similar con la misma frecuencia, pero acompañado de un retraso en el tiempo o desfase (δ) debido a que la energía aplicada se disipa. Para mayor comprensión de este fenómeno se utilizan variables complejas dadas por: $\bar{\tau} = \tau_R + \tau_i$ y $\bar{\gamma} = \gamma_R + \gamma_i$ la relación entre tensión y deformación puede describirse de forma compleja mediante la ecuación 6 (Ishihara, 1996) donde τ_a es la tensión aplicada, γ_a la deformación obtenida, ϕ el desfase, y μ , μ' , μ^* el módulo elástico, la pérdida del módulo y el módulo complejo respectivamente.

$$\frac{\tau^*}{\gamma^*} = \frac{\tau_a e^{i\omega t}}{\gamma_a e^{i(\omega t - \phi)}} = \mu + i\mu' = \mu^* \quad \text{Ecuación 6}$$

Para una carga armónica $\gamma = \gamma_a e^{i(\omega t - \phi)}$, μ es igual a G y μ' a $\omega G'$, entonces el módulo complejo está dado por:

$$G^* = G + i\omega G' \quad \text{Ecuación 7}$$

2.1.2.2.2 Modelo No Lineal de Kelvin. Similar al viscoelástico, supone la misma distribución en paralelo de un resorte y un amortiguador con la diferencia que para este último elemento se tiene en cuenta una disipación de energía que no depende de la frecuencia. El esfuerzo es igual a:

$$\tau = (G + i G_0') \gamma \quad \text{Ecuación 8}$$

Para la misma carga armónica G_0' se puede expresar en términos de (G) y un amortiguamiento histerético (ξ) ; μ es igual a G y μ' a $\xi 2G$:

$$G^* = G(1 + i2\xi) \quad \text{Ecuación 9}$$

2.1.2.3 Representaciones No Lineales. La aplicabilidad de este tipo de modelos surge debido al comportamiento no lineal que se produce con el aumento de las deformaciones. De acuerdo con Ishihara (1996) cuando el nivel de deformación es lo suficientemente grande se produce un ciclo de histéresis no lineal donde se observan dos tipos de curvas: la curva esqueleto asociada a las propiedades elásticas del material y un ciclo de histéresis relacionado con la capacidad de disipación de energía. Debido al comportamiento no lineal, la curva esqueleto no es una línea recta y el ciclo de histéresis no tiene curvas redondeadas. A continuación, se describen dos de los principales modelos.

2.1.2.3.1 Modelo Hiperbólico. Supone que la curva tensión-deformación esqueleto está limitada por dos rectas asintóticas, donde τ_f representa el límite superior de tensión o resistencia del suelo y G_0 el módulo a pequeñas deformaciones (Figura 6). Esta curva se puede representar mediante la Ecuación 10 donde n es un exponente para el control de curvatura:

$$\frac{d\tau}{d\gamma} = G_0 \left(1 - \frac{\tau}{\tau_f}\right)^n \quad \text{Ecuación 10}$$

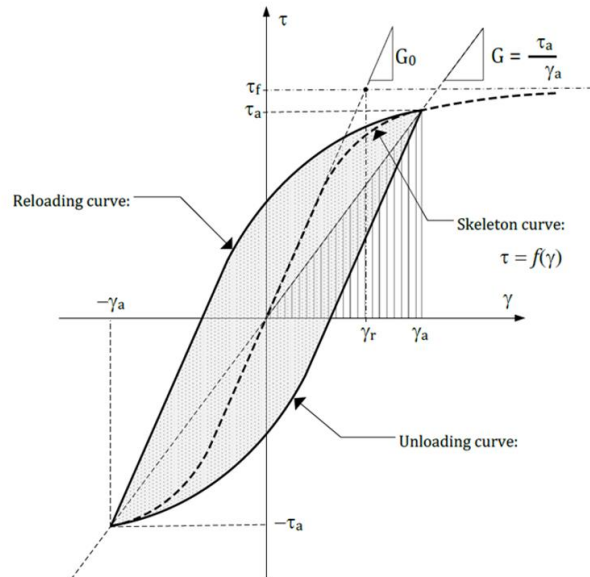


Figura 6: Representación modelo hiperbólico. (Ishihara, 1996)

El modelo hiperbólico propuesto por Hardin y Drnevich tomado de Tovar Borbón & Vergara Díaz (2016) calcula el G mediante la relación entre el módulo cortante y esfuerzo cortante máximos ($G_{m\acute{a}x}$ y $\tau_{m\acute{a}x}$) con deformaciones reales y de referencia (γ_a y γ_r); para el amortiguamiento utiliza un valor máximo para una deformación del

5%.

$$G = \frac{G_{\text{máx}}}{1 + \frac{\gamma_a}{\gamma_r}} \quad y \quad D = D_{\text{máx}} \left[1 - \left(\frac{G}{G_{\text{máx}}} \right) \right] \quad \text{Ecuación 11}$$

La normalización del módulo de corte se puede obtener de:

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma_a}{\gamma_r}} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$D = \frac{4}{\pi} \left[1 + \frac{1}{\frac{\gamma_a}{\gamma_r}} \right] \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\gamma_a}{\gamma_r} \right)}{\frac{\gamma_a}{\gamma_r}} \right] - \frac{2}{\pi} \quad \text{Ecuación 13}$$

Como se puede observar en la Figura 7 la relación G/G_0 es 0.5 cuando $\gamma_a = \gamma_r$. Así mismo, el amortiguamiento converge en $2/\pi$ cuando el esfuerzo cortante se hace demasiado grande.

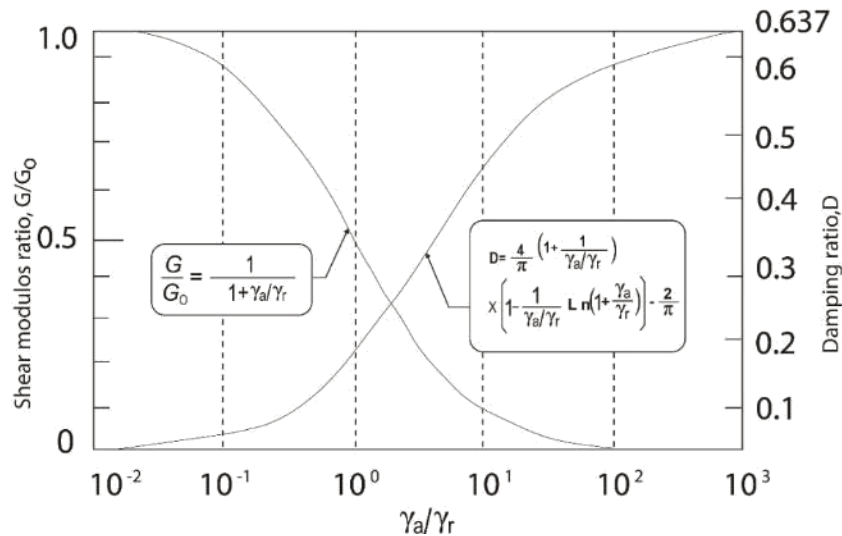


Figura 7: Relación módulo de corte y amortiguamiento modelo hiperbólico (Ishihara, 1996)

2.1.2.3.2 Modelo de Ramberg-Osgod. La ecuación general está dada por la expresión:

$$\frac{\gamma}{\gamma_y} = \frac{\tau}{\tau_y} \left[1 + \alpha \left| \frac{\tau}{\tau_y} \right|^{r-1} \right] \quad \text{Ecuación 14}$$

γ_y, τ_y : esfuerzo cortante y tensión de corte respectivamente

α, r : constantes del modelo

Las cuatro variables anteriores se pueden combinar para lograr el mejor ajuste de las curvas; si los valores de referencia τ_f y γ_r se igualan con τ_y y γ_y respectivamente se obtiene:

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \alpha \left| \frac{\tau}{\tau_y} \right|^{r-1}} \quad \text{Ecuación 15}$$

La ecuación para el módulo dependiente de la tensión de corte para carga cíclica se obtiene cuando $\tau = \tau_a$ y $\gamma = \gamma_a$:

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \alpha \left| \frac{G}{G_0} * \frac{\gamma_a}{\gamma_r} \right|^{r-1}} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$D = \frac{\pi}{4} \frac{2r-1}{\pi r+1} * \alpha \frac{\left| \frac{G}{G_0} * \frac{\gamma_a}{\gamma_r} \right|^{r-1}}{1 + \alpha \left| \frac{G}{G_0} * \frac{\gamma_a}{\gamma_r} \right|^{r-1}} \quad \text{Ecuación 17}$$

La relación numérica de las constantes α y r se puede evidenciar en la Figura 8 los valores de r oscilan entre 2 y 5, en la mayoría de los casos menor a 4, mientras que para valores altos de α se evidencia un desplazamiento de las curvas hacia el lado izquierdo de la gráfica (Camacho Tauta J. , 2011).

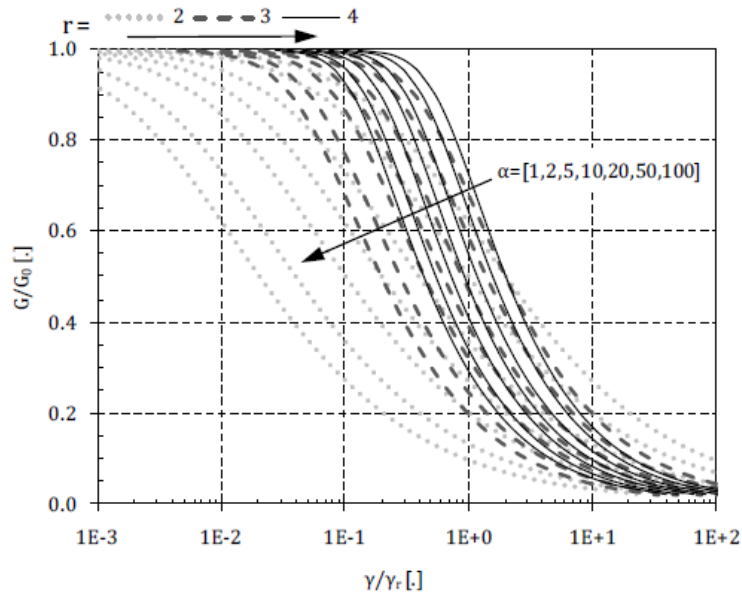


Figura 8: Ejemplo numérico modelo Ramberg-Osgord. (Camacho Tauta J. , 2011)

2.1.3 Ensayos Dinámicos. De acuerdo con Kramer (1996) la medición de las propiedades dinámicas de los suelos es una tarea crítica en la solución de problemas de Ingeniería Sísmica y de cargas vibratorias como cimentaciones de maquinaria y estructuras de pavimentos, por lo que se deben hacer esfuerzos para intentar reproducir las condiciones de tensión iniciales y las condiciones cíclicas de carga lo más cercanas posibles.

Algunas de las propiedades que influyen en la propagación de las ondas y otros fenómenos son rigidez, amortiguamiento, relación de Poisson y densidad, siendo las dos primeras las más importantes. Existen varias metodologías y ensayos para determinar estas propiedades clasificadas principalmente en pruebas en campo, basadas en la determinación de la velocidad de propagación de las ondas de corte (S) a través del suelo con la perturbación mínima de la muestra y sin limitarse al tamaño de la misma, y de laboratorio utilizadas para complementar y confirmar las de campo con el beneficio de medir propiedades de los materiales que no existen en el terreno como la compactación del suelo (Kumar, 2008).

Dentro de los ensayos in situ se diferencian dos grupos: los de baja tensión o deformaciones bajas como por ejemplo reflexión y refracción sísmica, suspensión, vibración en estado estable, análisis espectral o de ondas superficiales, Cross-Hole Down-Hole, y los de tensiones altas, los cuales también se han relacionado con características de los suelos a baja tensión, donde se destacan penetración estándar (SPT), ensayo de penetración de cono (CPT), dilatómetro, medidor de presión, entre otros. Las pruebas en el laboratorio también se pueden clasificar midiendo las propiedades a bajos y altos niveles de tensión, con ensayos como columna resonante, pulso ultrasónico y elementos bender piezoeléctricos para el primer grupo, y triaxial cíclico, corte cíclico simple y de torsión para el segundo.

Actualmente equipos como bender element y columna resonante son utilizados para el cálculo de la respuesta dinámica de materiales, diferenciándose principalmente en que el primero presenta restricciones considerables como la ausencia de un procedimiento normalizado debido a que no existe una comprobada repetitividad en el método y un margen de incertidumbre entre el comportamiento e interacción de las piezas piezocerámicas con las muestras de estudio, lo que permite una mayor confiabilidad en los resultados de la columna resonante (Camacho Tauta, Molina Gómez, & Reyes Ortiz, 2014).

Particularmente el ensayo de columna resonante consiste en la aplicación de una carga armónica a un espécimen cilíndrico de suelo donde variando la amplitud y frecuencia de excitación se consigue la vibración máxima del sistema igualando la frecuencia inducida a la frecuencia natural del espécimen. Cuando el sistema está en resonancia es posible calcular la velocidad de la onda y con ello la rigidez del suelo, mediante la deformación resultante después de la interrupción de la excitación es posible determinar la relación de amortiguamiento. Este ensayo está estandarizado bajo la norma ASTM D4015 "Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by the Resonant-Column Method".



Figura 9: Equipo de columna resonante. **Nota:** Elaboración propia

El equipo consta de estos elementos: pistón, anclaje de reacción torsional, impulsión torsional, transductor de par, contrapeso, placa inferior fija, acelerómetro, plato superior, columnas de celdas y pared celular transparente.

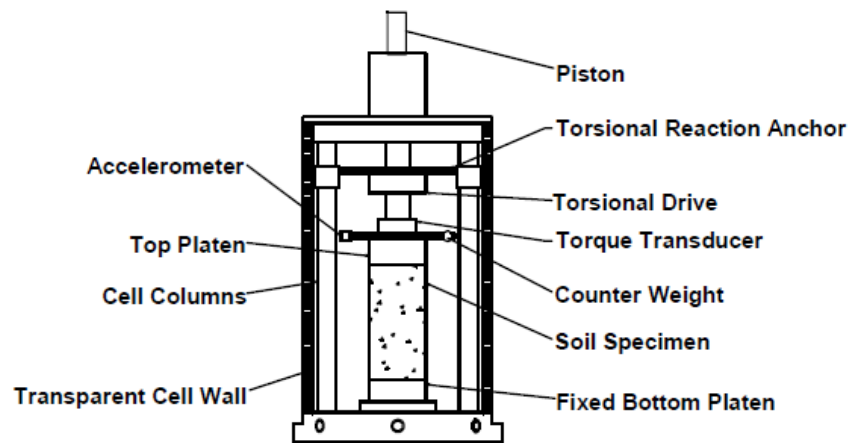


Figura 10: Elementos equipo columna resonante GCTS (Geotechnical Consulting and Testing Systems) de la USTA(Geotechnical Consulting and Testing Systems, 2017)

Existen varias configuraciones que se pueden utilizar para el ensayo de columna resonante principalmente variando las condiciones en los extremos de la muestra. Según Camacho Tauta J. (2011) se puede realizar el montaje en cuatro modalidades: el primero con el extremo inferior fijo y sin rotación, donde la distribución del ángulo θ está en función de la altura (z) y el tiempo (t); el segundo consiste en una platina localizada en la parte superior, manteniendo el extremo inferior fijo, con inercia de masa rotacional (J_A) buscando proporcionar una distribución lineal de la rotación; el tercero representa un versión modificada del

primer modelo donde un plato superior con inercia de masa rotacional (J_A) está parcialmente restringido por un resorte y un amortiguador con constantes K_A y ξ_A respectivamente; por último, en el cuarto modelo el resorte y amortiguador se fijan en la parte inferior del equipo, aplicando la excitación en este misma zona, con la platina en el extremo superior Figura 11. Para esta investigación se utilizó el segundo modelo conocido como Fixed Free.

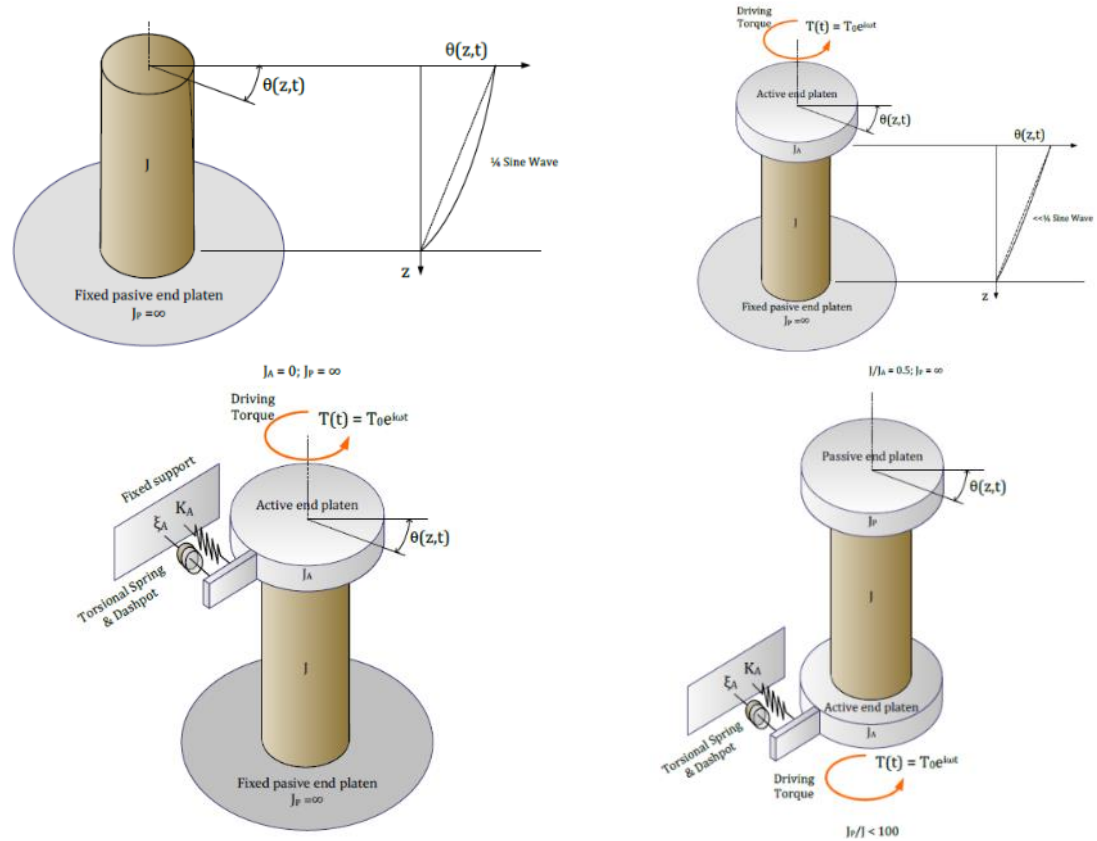


Figura 11: Configuraciones ensayo de columna resonante. (Camacho Tauta J. , 2011)

El módulo de corte (G) se puede calcular obteniendo la frecuencia de resonancia mediante las siguientes expresiones (Kramer, 1996): suponiendo una muestra de altura (h) fijada a la base y con un momento polar de inercia (J) sometido a una carga armónica de torsión, a partir de la resistencia elástica del espécimen se produce un torque en el extremo superior igual a:

$$T = GJ \frac{\partial \theta}{\partial x} = GJ \frac{1}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad \text{Ecuación 18}$$

donde I es el momento polar de inercia del espécimen. Este torque debe ser igual al par de inercia del sistema. Si los elementos del sistema de carga de torsión conectado a la parte superior de la muestra tienen un momento polar de inercia (I_0), entonces:

$$T = -I_0 h \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad \text{Ecuación 19}$$

Considerando que las rotaciones de la muestra son armónicas:

$$\theta(z, t) = \Theta(z)(C_1 \cos \omega t + C_2 \sen \omega t) \quad \text{Ecuación 20}$$

$$\Theta(z) = (C_3 \cos kz + C_4 \sen kz) \quad \text{Ecuación 21}$$

La condición de cero rotaciones ($z = 0$) requiere $C_3 = 0$, y la igualdad de las Ecuación 17 y Ecuación 18 para la frecuencia natural:

$$\omega_n = k_n v_s \quad \text{Ecuación 22}$$

de modo que:

$$G \frac{I}{\rho} C_4 k_n \cos k_n h (C_1 \cos \omega_n t + C_2 \sen \omega_n t) = -I_0 h (-\omega_n^2 C_4 \sen k_n h) (C_1 \cos \omega_n t + C_2 \sen \omega_n t) \quad \text{Ecuación 23}$$

La igualdad anterior se puede expresar como:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\omega_n h}{v_s} \tan \frac{\omega_n h}{v_s} \quad \text{Ecuación 24}$$

Para una muestra dada, I , I_0 y h son generalmente conocidos cuando comienza la carga cíclica. La frecuencia fundamental se obtiene experimentalmente y la Ecuación 23 se usa para calcular v_s .

El módulo de corte (G) se calcula a partir de:

$$G = \rho v_s^2 \quad \text{Ecuación 25}$$

Para la carga longitudinal la ecuación análoga es:

$$\frac{W}{W_0} = \frac{\omega_n h}{v_l} \tan \frac{\omega_n h}{v_l} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde W es el peso del espécimen, W_0 el peso del sistema de carga y la velocidad de propagación de la onda longitudinal (Ecuación 27).

$$v_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{Ecuación 27}$$

Considerando la masa del sistema de carga como nula ($I_o = 0$), la Ecuación 23 estaría dada por:

$$v_s = \frac{2\omega_n h}{\pi} = 4f_n h \quad \text{Ecuación 28}$$

donde f_n es la frecuencia fundamental en Hertz. En este caso, las rotaciones seguirán un patrón de onda sinusoidal de un cuarto sobre la altura del espécimen a la frecuencia fundamental. La adición de la masa del sistema de carga da como resultado una variación de rotación más lineal y, consecuentemente, condiciones de deformación más uniformes sobre la altura de la muestra (Kramer, 1996).

De acuerdo con Briaud (2013) la relación de amortiguamiento (D) se puede calcular por varios métodos: el primero y más sencillo denominado decremento logarítmico, consiste en detener la excitación y dejar que la vibración de la muestra disminuya llevando los registros de rotación en función del tiempo; la Figura 12a muestra una curva de decaimiento donde la amplitud del primer ciclo (X_1) y el ciclo n (X_n), que es más pequeño que X_1 , están relacionados por la ecuación 28 donde todos los datos son conocidos excepto D.

$$\frac{\ln x_1 - \ln x_n}{n-1} = \frac{2\pi D}{\sqrt{1-D^2}} \quad \text{Ecuación 29}$$

El segundo método, llamado ancho de banda, se basa en la gráfica de amplitud vs frecuencia, obtenida durante el estado estacionario de vibración torsional, mediante la extracción de los datos f_1 , f_2 y f_n (Figura 12b) relacionados en la siguiente expresión:

$$D = \frac{(f_2 - f_1)}{2f_n} \quad \text{Ecuación 30}$$

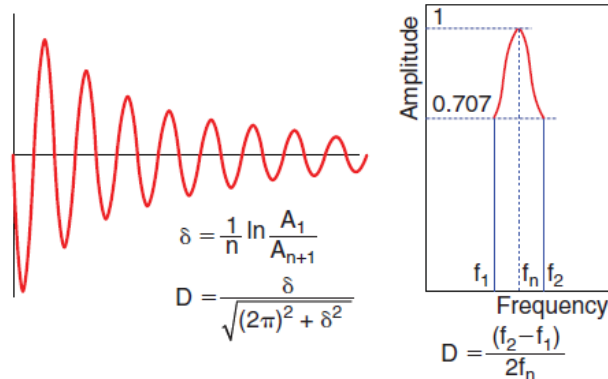


Figura 12: Relación de amortiguamiento ensayo de columna resonante. a) Decremento logarítmico, b) Ancho de banda (Briaud, 2013)

2.1.4 Estabilización de Arcillas. La arcilla está compuesta por minerales eléctricamente anisotrópicos que, al entrar en contacto con la molécula de agua, más específicamente con la partícula de oxígeno, genera una fuerza de atracción eléctrica conocido comúnmente como la doble capa difusa. Puede producirse una estabilización de fuerzas eléctricas presentes en la arcilla con diferentes métodos mediante la adición de cal, cemento, puzolanas, y algunos derivados del petróleo como el aceite sulfonado, este último presenta una reacción química irreversible, disminuyendo las fuerzas de atracción molecular, que se traduce en una disminución directa de la doble capa difusa y a su vez cambios en las propiedades mecánicas como la expansión, densidad seca y energía de compactación.

La estabilización consiste en modificar las características de atracción molecular presentes en la arcilla. Existen diversos métodos para disminuir las fuerzas de atracción pelicular de la partícula de arcilla con la molécula de agua cuando se encuentra desestabilizada. Según Das (2001) la carga eléctrica de la arcilla es negativa en su alrededor, cuando la molécula se encuentra sin presencia de agua se genera balanceo por cationes intercambiables, en cambio al entrar en contacto con el agua estos cationes se combinan con los aniones de la molécula de agua denominado doble capa difusa ver Figura 13.

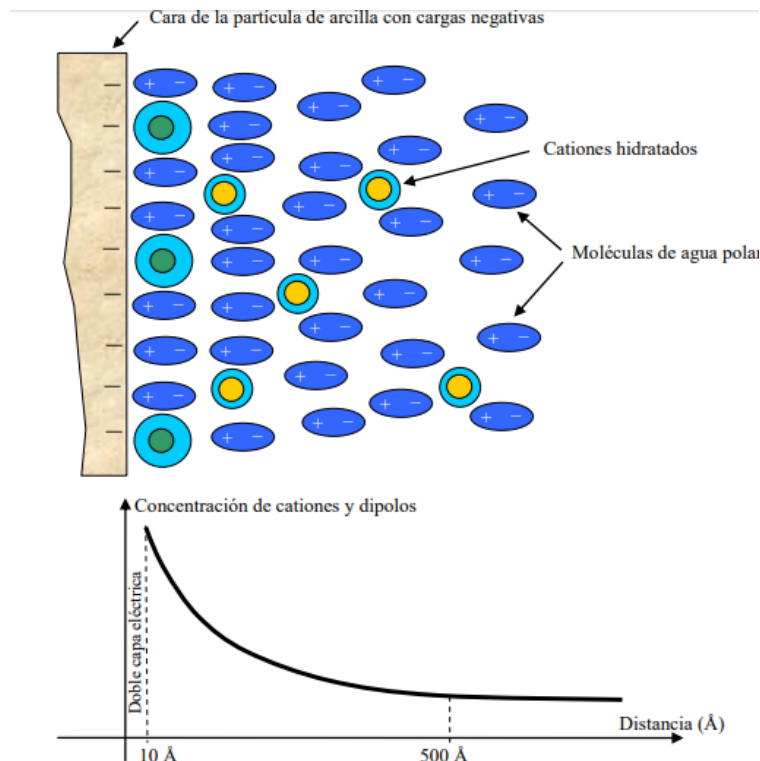


Figura 13: Doble capa difusa. (Leoni, 2015)

Autores como Camacho Tauta , Reyes Ortiz, & Mayorga Antonilez (2008) y Solminihaç T., Echeverría G., & Thenoux Z (2012) presentan investigaciones

asociadas con elementos para estabilización de arcilla. Dentro de ellos se plantea que la Cal puede ser utilizada en el tratamiento de suelos para diferentes tipologías de arcilla y dependiendo de la finalidad, en el tratamiento los procesos fundamentalmente son secado, modificación y estabilización. “En general los suelos arcillosos de grano fino (con un mínimo del 25 por ciento que pasa el tamiz 200 -75 μm y un índice de plasticidad mayor que 10) se consideran buenos candidatos para este proceso. Los suelos que contienen cantidades significativas de material orgánico (mayor que 1 por ciento) o sulfatos (mayor que el 0.3 por ciento) pueden requerir Cal adicional y/o procedimientos de construcción especiales” (National Lime Association, 2004)

Otro elemento usado para estabilizar arcilla son los polímeros. “El uso de estos materiales en la estabilización de suelos ha tenido por objeto principal, formar una estructura impermeable al agua; ciertas resinas sintéticas tales como las del sistema anilina y furfural de naturaleza orgánica aumentan la resistencia mecánica del suelo mejorando su cohesión” (Lopez, 2010)

2.1.5 Aceite Sulfonado. Es un compuesto orgánico soluble en agua a la que ioniza aumentando su conductividad y facilitando el intercambio catiónico. Proviene de la fracción naftalénica de la hulla, está compuesto por sulfuros y ácidos el cual produce una reacción permanente cuando está en contacto con la partícula de arcilla. (Camacho Tauta , Reyes Ortiz, & Mayorga Antonilez, 2008). Sus principales características son:

Tabla 1
Características aceite sulfonado

PROPIEDAD	CARACTERÍSTICA
Densidad específica	1.15
Color	Rojizo
PH	1.1

Nota: Basado en ESTAVÍAS

2.1.6 Microscopio de Barrido Electrónico. Es un instrumento basado en el principio de la microscopia óptica que permite obtener imágenes de alta resolución y aumentos del orden de 2,000 a 300,000 veces con detalles de hasta 4 nanómetros, mediante la interacción de un haz de electrones de alta energía con la materia acelerados por un alto potencial eléctrico; estos electrones, tras hacerlos incidir sobre una superficie generalmente plana son dispersados, detectados y clasificados de acuerdo con su energía: entre 10 y 30 KeV, valor cercano al haz incidente, se denominan electrones retrodifundidos, mientras que los de baja energía, entre 20 y 50 eV, son llamados electrones secundarios (Ipohorsky & Bozzano B., 2013). La formación de la imagen se logra a través del procesamiento de las señales captadas por el detector de electrones secundarios (SEI-Secondary Electron Image), el detector de electrones retrodispersados (BEI-Backscattered Electron Image) y el detector de energía dispersiva (EDS-Energy Dispersive Spectrometer), este último utilizado para el análisis de composición.

Las aplicaciones del microscopio de barrido electrónico se han extendido prácticamente a cualquier material debido a que permite examinar características como composición, textura, tamaño, forma, entre otras. Sin embargo, por su mecanismo de funcionamiento, requiere que las muestras sean buenas conductoras eléctricas y soporten condiciones de alto vacío, permitiendo realizar un recubrimiento metálico cuando no se cumpla con la primera condición.

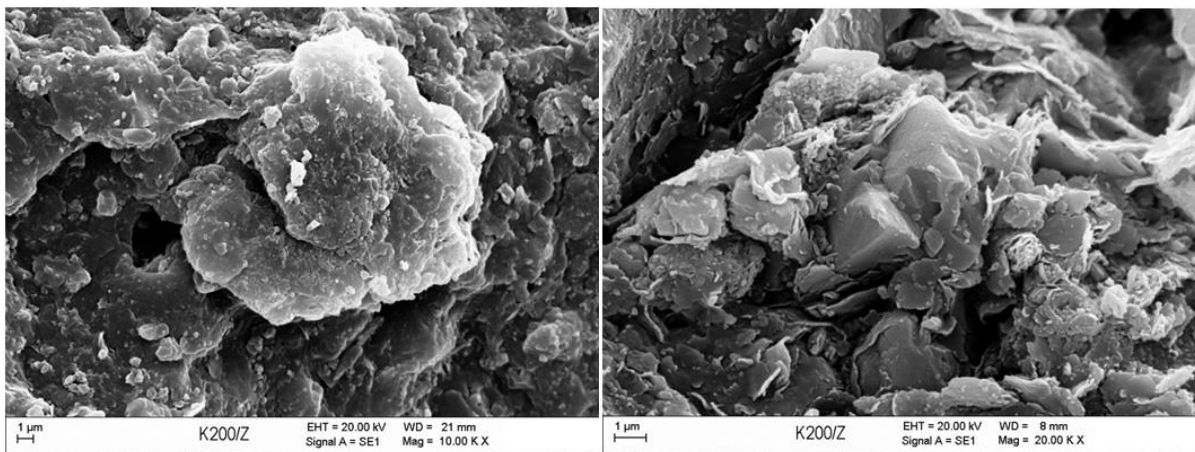


Figura 14: Arcilla vista desde un microscopio de barrido electrónico.(Koszela-Marek, 2015)

3 ESTADO DEL ARTE

Las propiedades dinámicas de los suelos se pueden medir en campo, en laboratorio o a través de correlaciones. En laboratorio, equipos como el triaxial cíclico y la columna resonante han sido ampliamente utilizados para determinar el módulo de corte y el amortiguamiento diferenciados por la efectividad de sus resultados cuando son sometidos a deformaciones específicas, es decir, el primero presenta limitadas respuestas para deformaciones bajas y un excelente comportamiento para deformaciones elevadas, por ejemplo condiciones de falla, mientras que el segundo exhibe un comportamiento opuesto con buenas respuestas a tensiones bajas.

Diversos autores han determinado experimentalmente la respuesta de arcillas, gravas y arenas a través de ensayos de laboratorio en función de las propiedades características de los materiales, así como la influencia de la adición de productos en el comportamiento dinámico. A continuación, se presenta la revisión bibliográfica referente a procesos de estabilización con aceite sulfonado y la evaluación de propiedades dinámicas de materiales con y sin adición de agentes modificadores.

3.1 ESTABILIZACIÓN DE MATERIALES

Consiste en un tratamiento físico o mecánico ejecutado con el fin de mejorar o mantener la estabilidad de una masa de suelo o mejorar sus propiedades ingenieriles. La estabilización química altera las propiedades del suelo mediante la adición de algún aditivo el cual normalmente produce cambios en las propiedades moleculares superficiales buscando mayor durabilidad, control de cambios volumétricos, mejor trabajabilidad, reducción de espesores en las capas de pavimentos, entre otros (Solminihaç T., Echeverría G., & Thenoux Z., 2012). A nivel mundial se han desarrollado técnicas para estabilización química de suelos y materiales granulares principalmente con la adición de productos como la cal, el cemento portland, cloruros, escorias, aceites y emulsiones derivados del petróleo, cenizas, polímeros. Seco, Ramírez, Miqueleiz, & García (2010) realizaron ensayos a una arcilla con un límite líquido de 43.5%, un índice plástico de 24.9%, resistencia a la compresión inconfiada de 0.399 MPa, hinchazón libre de 4.65%, a través de la incorporación de aditivos convencionales y otros productos de los residuos industriales, encontrando un alto potencial de estos en los tratamientos de suelos principalmente por la reducción del hinchamiento libre así como el mejoramiento de algunas propiedades como: aumento entre 2 y 4 veces en la capacidad de compactación y aumento de casi tres veces en el ensayo de compresión inconfiada respecto al material sin tratamiento cuando se agrega cenizas de la cascarilla de arroz (RHFA). Los subproductos y desechos industriales cuyos altos contenidos en óxidos de Ca, Mg, Si o Al, los hacen adecuados para estabilización de suelos fueron: óxido de magnesio (PC-7), cenizas de la cascarilla de arroz (RHFA), cenizas volantes de paja de cereales (CFA), ceniza de fondo de carbón (CBA) y acero (SFA) y relleno de aluminato (AF).

Ta'negonbadi & Noorzard (2017) concluyeron que con la adición de 0,75% de lignosulfato, obtenido de la producción de papel, se disminuye el peso unitario máximo seco y aumento del contenido de humedad óptima, mayor resistencia a procesos de humectación y secado, y aumento de la rigidez sin provocar comportamiento frágil y ganancia de resistencia axial máxima de 44% con relación a una muestra testigo con un porcentaje de adición de 0.75%.

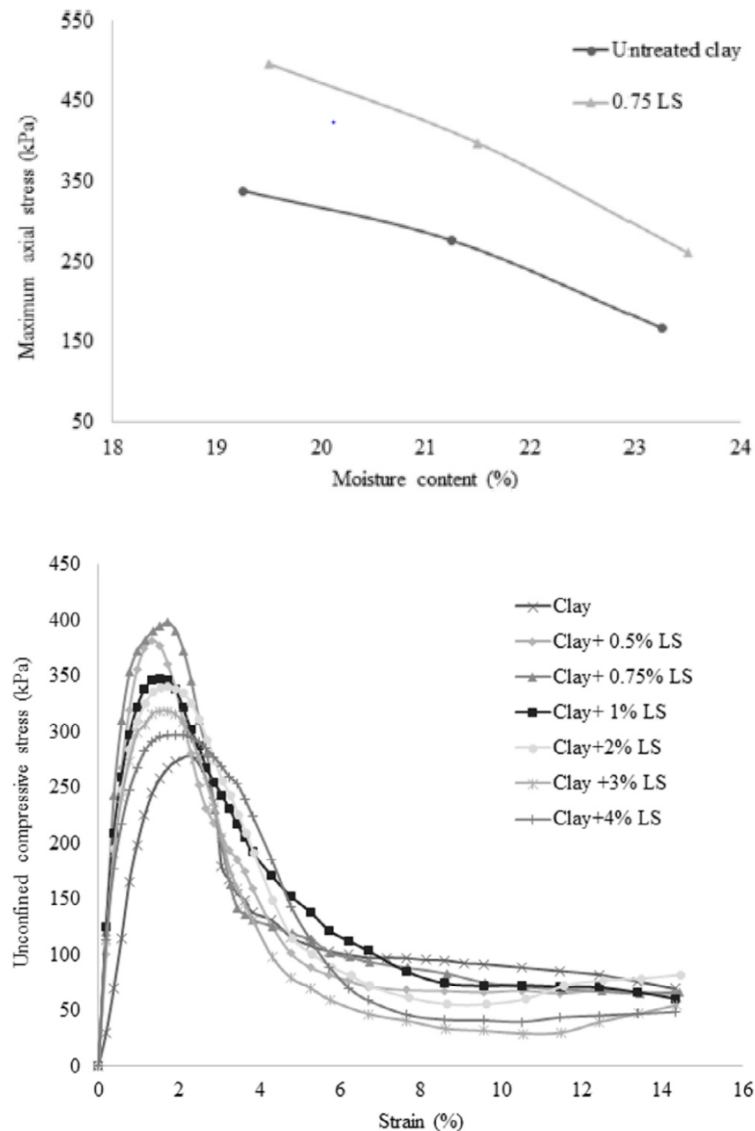


Figura 15: Módulo de corte y amortiguamiento. (a) Módulo de corte y (b) Amortiguamiento (GW) y (SW) CITATION Tan17 \l 9226 (Ta'negonbadi & Noorzard, 2017) En Colombia, la disminución de la plasticidad y el potencial de expansión al agregar aceite sulfonado fue evaluado para una mezcla de bentonita (6%) y caolín (94%), con un límite líquido de 49% y un índice de plasticidad 31%, variando las dosificaciones de aceite

sulfonado, el tiempo y el mecanismo de curado simulando condiciones naturales y aceleradas en cámara. El estabilizante disuelto con el agua de mezcla en diferentes concentraciones de acuerdo con la humedad óptima obtenida del ensayo de Proctor modificado, demostró disminución en los valores del IP y LL para muestras curadas en campo, entre un periodo de 30 a 120 días, y el aumento de los tiempos de curado en cámara a mayor dosificación de aceite sulfonado (Camacho Tauta , Reyes Ortiz, & Mayorga Antonilez, 2008).

En la industria de la construcción los estabilizantes químicos se han popularizado debido su buen comportamiento y facilidad de adición con el agua lo que garantiza una adecuada mezcla con el granular o suelos a estabilizar. Por ejemplo, la empresa ESTAVÍAS propone dos métodos de aplicación, inoculación e incorporación, de acuerdo con el tipo de material y la humedad óptima, habitualmente una solución de 0.5% litros, es decir, 1 litro de GEOSTAB por 200 litros de agua. Para agregados destinados para terraplenes o subbases granulares recomienda las dosificaciones de la Tabla 2:

Tabla 2
Dosificación de GEOSTAB para material granular

MATERIAL	ESPESOR DE CAPA (cm)	DOSIS (cc / m³)
Suelo natural	15	7.5
	20	10
Fino-gravoso	15	6
	20	8

Nota: Basado en (Estavías, 2008)

Igualmente asegura obtener efectos favorables en los materiales después de 60 días de aplicación de aceite naftalénico sulfonado con incrementos acelerados posteriores a los 90 días, y destaca los siguientes beneficios en proyectos ejecutados en diferentes zonas del país: incremento del CBR (California Bearing Ratio) y del peso unitario máximo de la subrasante en la Calle 167 con carrera 60 ciudad de Bogotá; aumento en la resistencia a la compresión del suelo natural entre 25 y 50% al ser utilizado en un suelo-cemento para la plataforma del aeropuerto Maranda en el departamento de Vichada; disminución del índice de plasticidad y mejoramiento de la resistencia en un 48% a 30 días de curado, para una arcilla arenosa color rojizo en la vía Calamar San José de Guaviare; modificación de las propiedades de material con características expansivas utilizado en la construcción del corredor Morelia-Cenicafé, municipio de Risaralda, mejorando el CBR y los índices de plasticidad con base en muestras testigos no tratadas (Estavías, 2008).



Figura 16: Irrigación de material granular con aceite sulfonado. (Estavías, 2008)

Otra industria denominada Hydram LTDA manifiesta mayor vida útil de las vías, menor consumo de materiales, control permanente de variaciones volumétricas, disminución de la humedad óptima y permeabilidad, densificación y aumento de la resistencia de los suelos cuando estos son estabilizados con GEOSTAB (Hydram LTDA, 2018). Así mismo, en un proyecto de una investigación denominado “Estudio de selección y estructuración de sistemas tecnológicos alternativos para estabilización y tratamientos de la red vial secundaria departamental” desarrollado entre la gobernación y la Universidad de Antioquia, se ejecutaron pruebas en diferentes tramos adicionados con aceite sulfonado monitoreando factores como la humedad, densidad, CBR, Ph, y su evolución respecto al tiempo, encontrando un efecto satisfactorio sobre las propiedades mecánicas del suelo, influenciadas por las condiciones climáticas, sumado a un gran potencial para el control de la expansividad y la plasticidad (Universidad de Antioquia, 2016). También se documentan resultados favorables con la incorporación de aceite quemado producido por el parque automotor de las grandes ciudades en bases y sub bases granulares con aumentos de la densidad máxima de hasta 7.5 % en proporción 25% agua y 75% aceite e incrementos del CBR entre 47% y 62% para bases; el porcentaje de aceite quemado agregado fue determinado mediante el remplazo total

o parcial de los porcentajes de humedad óptima de agua obtenidos en el ensayo de Proctor (Reyes Ortiz, Porras S., & Rodríguez A., 2001)

El efecto de la adición de aceite sulfonado en el grado de compactación de una sub base tipo INVIAS en concentración del 10% fue estudiado por Díaz Cruz & Bohórquez Poveda, 2013 (2013), encontrando un aumento de la densidad máxima en un 4% después de un periodo de curado de 2 meses, con un incremento más pronunciado tras las primeras dos semanas (Figura 17a) descenso de la humedad óptima en un rango de 4% por semana, con un valor máximo de 17% después de 8 semanas (Figura 17b) y aumento del CBR (Figura 17c).

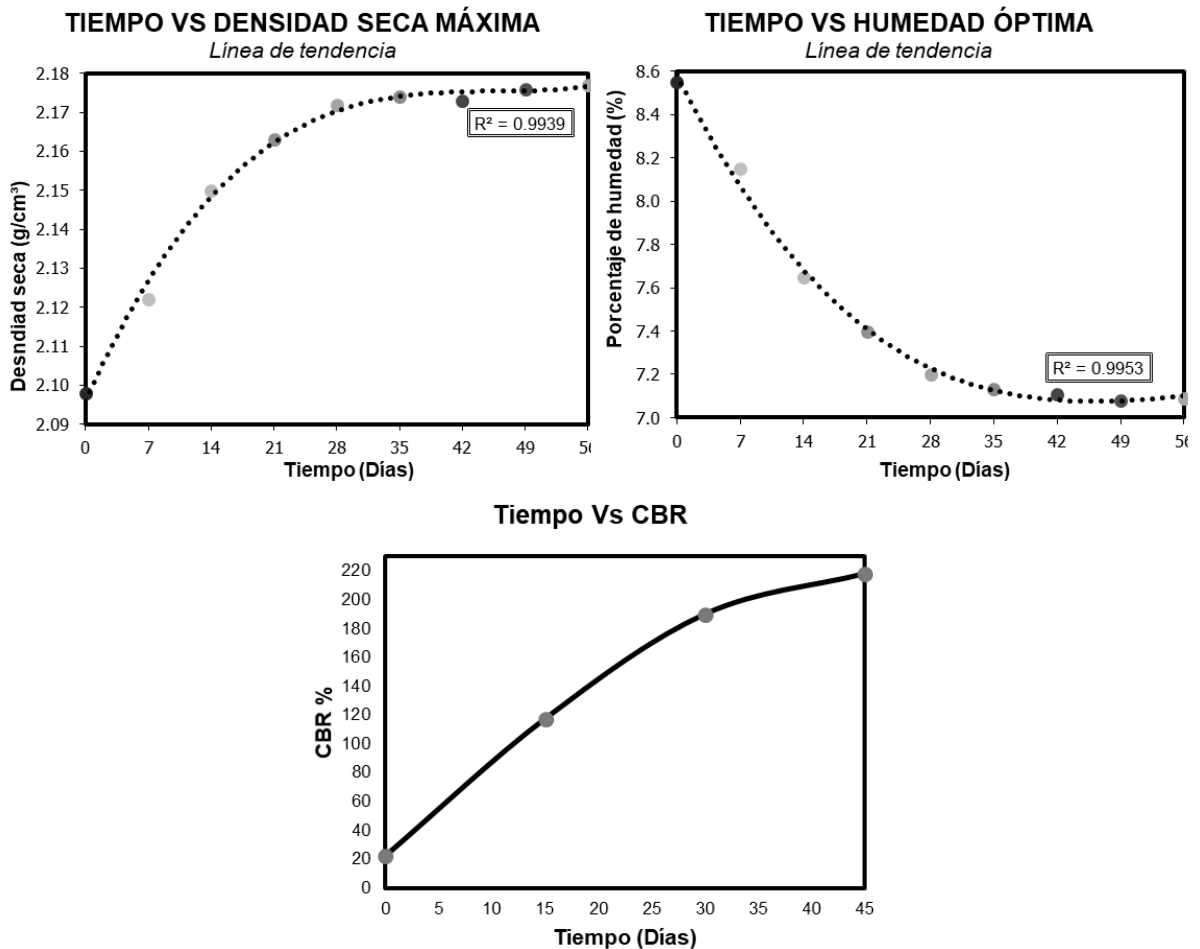


Figura 17: Evolución peso unitario seco de muestra estabilizada con aceite sulfonado. (a) densidad seca máxima vs tiempo, (b) humedad óptima vs tiempo y (c) CBR vs tiempo (Díaz Cruz & Bohórquez Poveda, 2013)

3.2 PROPIEDADES DINÁMICAS DE MATERIALES SIN ADICIÓN DE AGENTES MODIFICADORES

Afshari, Hashash, & Stewart (2014) trazaron curvas para el módulo de corte y amortiguamiento (Figura 18) para diferentes arcillas dependientes del índice de plasticidad.

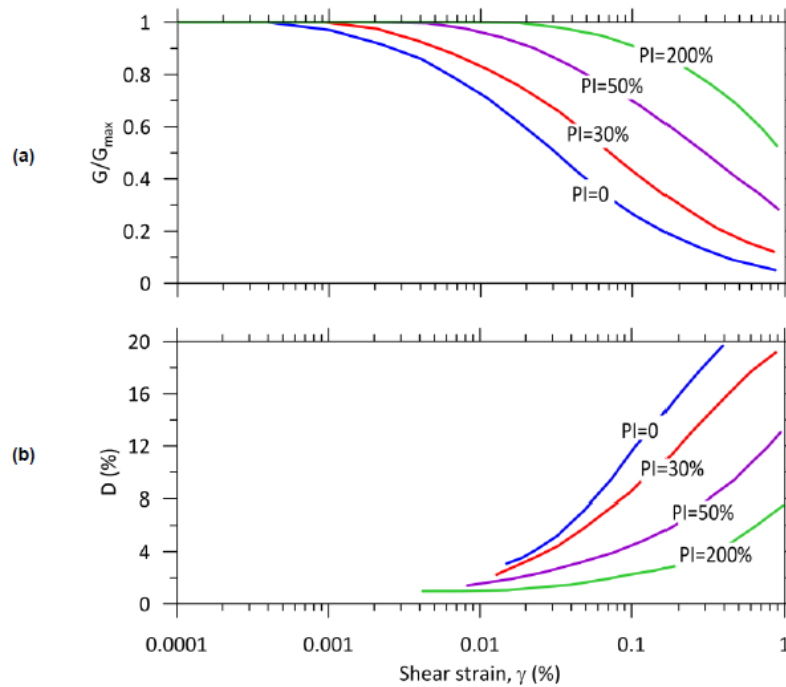


Figura 18: Normalización del módulo de corte y amortiguamiento (a) Módulo de reducción y (b) Curvas de amortiguamiento para arcillas con diferentes plasticidades. (Afshari, Hashash, & Stewart, 2014)

Araya Contreras (2017) describe algunos parámetros que afectan el módulo de corte y el amortiguamiento clasificándolos en muy importante (V), menos importante (L), relativamente sin importancia (R) y sin importancia (U); asegura que el módulo de corte inicial o máximo aumenta con la frecuencia de carga, el confinamiento efectivo, el índice de sobre consolidación, la historia de carga y el índice de plasticidad y disminuye con el índice de vacíos; a mayor contenido de finos y/o mejor granulometría $G_{m\acute{a}x}$ disminuye mientras que a mayor cementación $G_{m\acute{a}x}$ aumenta.

Tabla 3

Parámetros que afectan la resistencia al corte y el amortiguamiento

PARÁMETRO		MÓDULO DE CORTE		AMORTIGUAMIENTO	
		ARENA LIMPIA	SUELO COHESIVO	ARENA LIMPIA	SUELO COHESIVO
Deformación	γ	V	V	V	V
Confinamiento efectivo	σ'_c	V	V	V	V
Índice de vacíos	e	V	V	V	V
Número de ciclos de carga	-	R	R	V	V
Grado de saturación	S_r	R	V	K	U
Índice de sobreconsolidación	OCR	R	L	R	L
Línea de estado último	LEU	L	L	L	L
Historia de carga	H	L	L	L	L
Frecuencia de carga	f	R	R	R	L
Características del suelo	C	R	R	R	R
Estructura del suelo	θ	R	R	R	R

Nota: Basado en (Araya Contreras, 2017)

Hardin & Richart (1963) parametrizaron los resultados experimentales del módulo de corte máximo mediante las ecuaciones 30 y 31, donde A representa el coeficiente de ajuste a las curvas $G_{m\acute{a}x}$, B se obtiene de la relación lineal de la gráfica V_s vs e y n se logra a partir de la relación $G_{m\acute{a}x}$ y σ'_c . Estas constantes fueron posteriormente recopiladas con datos de distinto autores para arenas, gravas y arcillas y sus valores se presentan en la Tabla 4.

$$V_c = C * (B - e) * (\sigma'_c)^{n/2} \quad \text{Ecuación 31}$$

$$G_{m\acute{a}x} = \rho * V_s^2 = A * \frac{(B-e^2)}{1+e} * (\sigma'_c)^n = A * F(e) * (\sigma'_c)^n \quad \text{Ecuación 32}$$

Tabla 4

Constantes para cálculo de $G_{m\acute{a}x}$

A	B	n	Tipo de suelo	e	σ'_c (KPa)
700	2.17	0.5	Arena de Ottawa redondeada	0.37-0.79	24-287
3,300	2.97	0.5	Cuarzo triturado	0.63-1.27	24-287
14,100	2.17	0.5	11 tipos de arena limpia	0.55-0.88	20-400
7,000	2.17	0.5	3 tipos de arena limpia	-	-
5,000	2.41	0.5	Arena limosa 41% de finos IP=9	0.57	50-200
9,000	2.17	0.5	Arena $D_{50} = 0.65$ mm	0.59-0.74	50-200
3,300	2.97	0.5	Arcilla de baja plasticidad	0.6-1.5	240-700

A	B	n	Tipo de suelo	e	σ'_c (KPa)
4,500	2.97	0.5	Caolinita IP=30	1.1-1.3	70-550
450	4.4	0.5	Bentonita IP=60	1.8-2.4	70-550
350	9.0	0.5	Turba	4.5	50-70
250	5.0	0.5	Arcilla limosa IP=40-42	1.32-2	20-200
7,230	2.97	0.38	Balasto $D_{50} = 40$ mm	0.68-0.78	60-100

Nota: Adaptado (Araya Contreras, 2017)

Por su parte, Menq (2003) analizó la influencia del tamaño del grano expresado como (D_{50}), la distribución del mismo a través del coeficiente de uniformidad (C_u) y la densidad seca en términos de relación de vacíos (e), para muestras reconstituidas de material clasificado como arena fina mal gradada (SW) y grava bien gradada (GW) con las características descritas en la Tabla 5 y curvas granulométrías de la Figura 19.

Tabla 5

Propiedades físicas arenas y gravas ensayadas en equipo RC

	Grava	Arena
C_u	20	1.5
D_{50} (mm)	2.08	0.5
e	0.26	0.64
Dr (%)	95	95
$G_{máx}$ (MPa)	277	99
ng	0.63	0.5
D_s mín (%)	0.1	0.71
γ_r (%)	0.02	0.094
a	0.86	0.86

Nota: Adaptado (Menq, 2003)

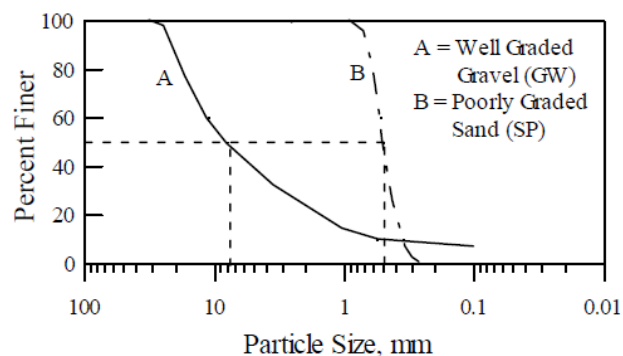


Figura 19: Curvas granulométrías arenas y gravas. (Menq, 2003)

Para suelos granulares el $G_{máx}$ es mayor con el aumento de D_{50} , C_u y σ'_o , y la disminución de e , y la influencia del coeficiente de uniformidad es menor debido a la forma como este parámetro afecta la relación de vacíos. El módulo de corte para la grava (GW) es aproximadamente 1.5 veces mayor que el de la arena fina (SW) atribuida al tamaño de la partícula y el valor disminuido de e , y este a su vez aumenta a medida que crece la tensión efectiva σ'_o . Así mismo la diferencia de G

entre estos dos materiales disminuye a medida que aumenta la deformación de corte, porque γ_r de la grava (0.02%) es menor que la de la arena fina (0.09%). Para el módulo de amortiguamiento, D disminuye al aumentar el esfuerzo efectivo; en la grava D es menor en comparación con la arena fina a consecuencia del tamaño de la partícula D_{50} , es decir, entre mayor sea el D_{50} menor es la relación de amortiguamiento. La frecuencia de carga tiene un efecto en $G_{m\acute{a}x}$ y D solo cuando la muestra está húmeda. El amortiguamiento puede aumentar a medida que se agrega agua al suelo, ver Figura 20.

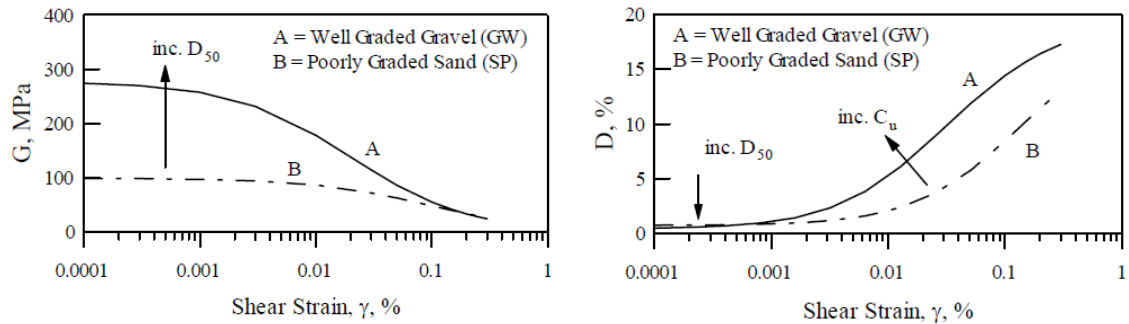


Figura 20: Módulo de corte y amortiguamiento. (a) Módulo de corte y (b) Amortiguamiento (GW) y (SW)(Menq, 2003)

3.3 PROPIEDADES DINÁMICAS DE MATERIALES CON ADICIÓN DE AGENTES MODIFICADORES

Con respecto a la evaluación de propiedades dinámicas en materiales mejorados y/o estabilizados se pueden diferenciar dos grandes grupos: el primero referente a suelos cohesivos principalmente enmarcados en arcillas donde se busca medir los efectos de los agentes estabilizantes y el segundo relativo a materiales granulares como arenas y gravas enfocado a la adición de elementos para mejorar, contrarrestar y/o mitigar efectos secundarios, por ejemplo, licuefacción.

Tsai & Ni (2012) estudiaron los efectos de la adición de cemento común, cemento adicionado con escoria y cemento adicionado con silicato de sodio en porcentajes de 5%, 15% y 25% en peso, en las propiedades dinámicas medidas en el equipo de columna resonante para una arcilla limosa en Taiwán clasificada como CL por el sistema Unified Soil Classification System (USCS), índices de consistencia $LL=40\%$ y $LP=22\%$, peso unitario $=1702 \text{ KN/m}^3$, humedad natural $W_n=37\%$, resistencia la corte no drenado $S_u=30 \text{ KN/m}^2$ e índice de compresión $C_c=0.4$, encontrando que: el valor de $G_{m\acute{a}x}$ aumenta y el amortiguamiento disminuye a medida que se incrementa el porcentaje de cemento; el máximo factor de mejora de rigidez es 22, 13.5 y 7.1 veces para cemento con escoria, cemento mezclado con silicato de sodio y cemento portland normal respectivamente; la presión de confinamiento no es una variable representativa para este tipo de mezclas. Adicionalmente, encontraron que el modelo de Ramberg-Osgod se ajusta para un amplio rango de deformaciones (Figura 21) con los valores relacionados en la Tabla 6.

Tabla 6
Valores constantes r y α modelo Ramberg-Osgod

Tipo de estabilizante	% de adición	α	r
Cemento portland	5	6150	3.024
	15	184	2.768
	25	8.43	2.766
Cemento adicionado con silicato de sodio	15	1.48	2.358
Cemento adicionado con escoria	15	3.54	3.338

Nota: Adaptado de (Tsai & Ni, 2012)

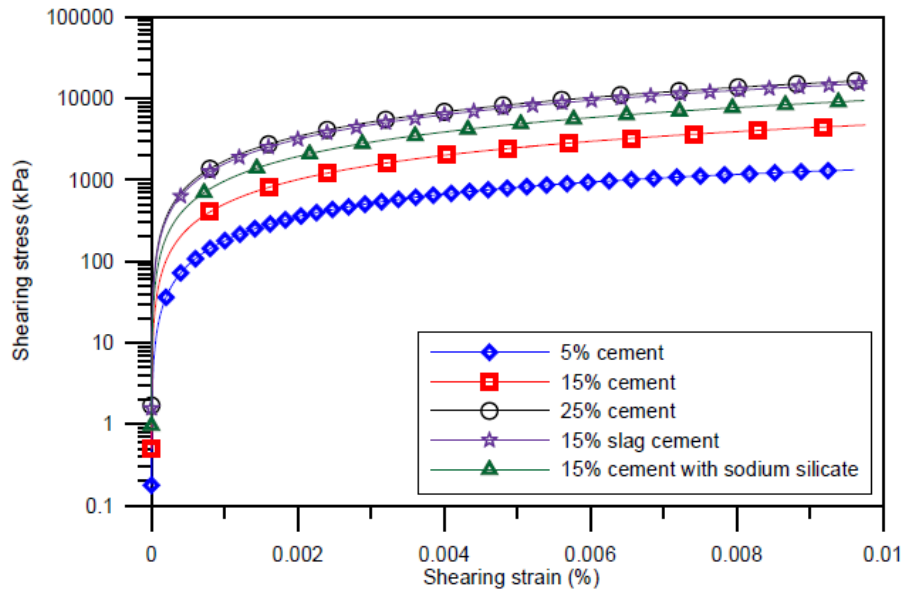


Figura 21: Predicción modelo Ramberg-Osgod (Tsai & Ni, 2012)

Okur & Akinci (2018) ejecutaron pruebas de columna resonante en muestras de caolinita y montmorillonita tratadas con residuos de boro en diferentes proporciones concluyendo que el módulo de corte aumenta debido a los efectos cementantes del residuo, es decir, especímenes más rígidos, en proporción de 300% para la montmorillonita y un porcentaje moderado para la caolinita, respecto al módulo de rigidez inicial con especímenes no tratados, y un incremento del amortiguamiento a mayor deformación.

Saride & Dutta (2016) incluyeron cenizas volante clase C entre el 5% y 20 % en suelos expansivos obtenidos del campus del Instituto de Tecnología Hyderabad en la India, compuestos mayoritariamente por un 70% de fracción fina y un 40% de arcilla, curados durante 1, 7 y 28 días en cámara de humedad con el fin de estabilizarlos y determinar la influencia en las propiedades dinámicas (módulo de rigidez y amortiguamiento) en un equipo de columna resonante tipo fixed-free. Observaron reducción del amortiguamiento, aumento del módulo de rigidez y aumento de relación de Poisson a mayor contenido de cenizas volantes y presión de confinamiento, así como una baja influencia del tiempo de curado en las

propiedades dinámicas. También propusieron la ecuación 32 generalizada para las curvas de degradación del módulo de corte superior e inferior en arcillas estabilizadas, donde γ corresponden a la deformación y A, B y C a parámetros de ajuste determinados experimentalmente (Tabla 7)

$$\frac{G}{G_{\max}} = A \left(1 + \frac{B\gamma}{C} \right)^{\left(-\frac{1}{B} \right)} \quad \text{Ecuación 33}$$

Tabla 7

Parámetros de ajuste ecuación de normalización $G/G_{\max}$ arcillas estabilizadas

Parámetros	A	B	C	R ²
Límite superior	1.01	0.045	0.841	0.99
Límite inferior	0.965	0.009	1.466	0.99

Nota: Adaptado de (Saride & Dutta, 2016)

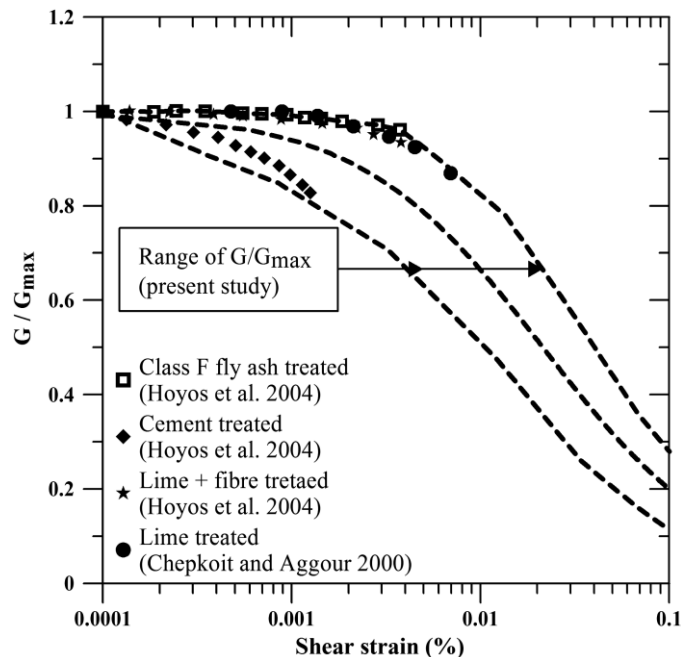


Figura 22: Curvas superior e inferior ecuación de normalización arcillas estabilizadas (Saride & Dutta, 2016)

Kim, Chang, Cho, & Shim (2016) evaluaron la inclusión de cemento portland en materiales arcillosos obtenidos de los puertos de Ulsan y Busan en Corea del Sur, mayormente compuestos por ilita, a través de la elaboración de probetas cilíndricas de 50 mm de diámetro y 100 milímetros de altura uniformemente mezcladas con diferentes cantidades de cemento y ensayos en equipos de compresión simple y columna resonante. Determinaron que la resistencia a la compresión no confinada y la rigidez al corte aumentan con el tiempo de curado y el contenido de cemento (Figura 23) mientras que el amortiguamiento medido a los 28 días evidencia un comportamiento inverso a la rigidez a mayores proporciones de cemento; además, la degradación del módulo de rigidez presenta una mayor sensibilidad a la

deformación con el tiempo de curado, es decir, mayor fragilidad, debido a la reducción del índice de plasticidad y al proceso de hidratación del cemento.

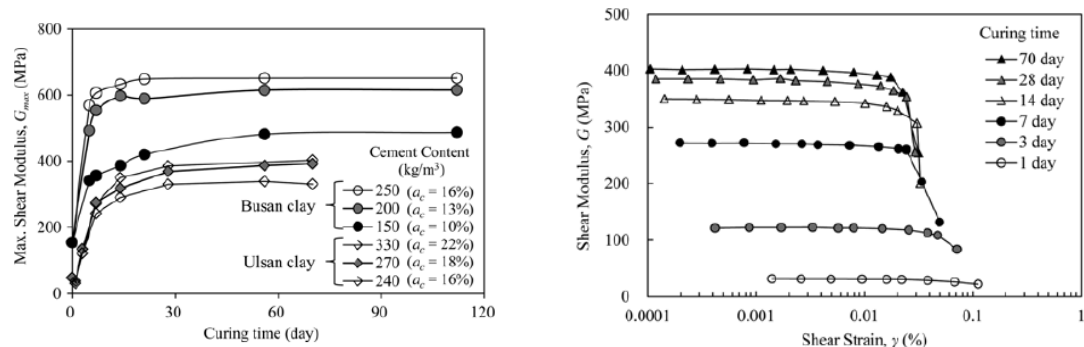
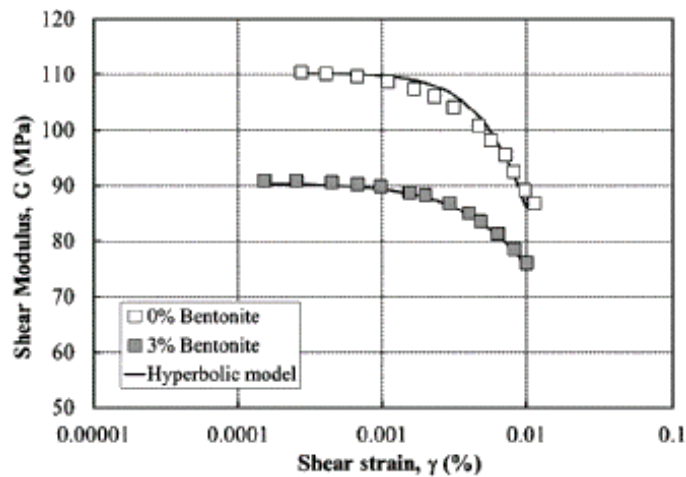


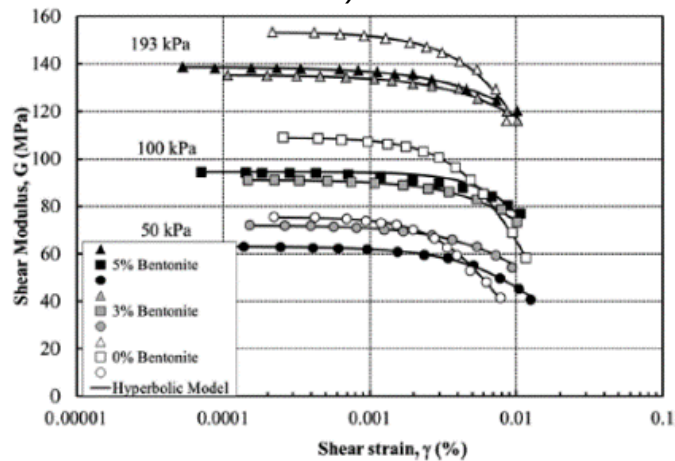
Figura 23: Variación del módulo de rigidez en arcillas de Core del Sur a) respecto al tiempo de curado b) respecto a la deformación (Kim, Chang, Cho, & Shim, 2016)

Para los materiales granulares Spencer, Rix, & Gallagher (2007) presentaron un estudio comparativo de diferentes concentraciones (5%, 7% y 9%) de gel de sílice coloidal, también conocido como sílica sol, mezclado con arena para determinar su influencia en la respuesta dinámica relacionado cado especialmente a los fenómenos de licuefacción producidos en las zonas costeras de los Estados Unidos. Al igual que en los suelos cohesivos estabilizados con cemento y cenizas, el módulo de rigidez aumentó a mayores concentraciones de sílica sol, aunque los valores son menores comparados con la muestra patrón sin adición; el amortiguamiento tiene un incremento a mayor presencia de aditivo para deformaciones superiores al 0.01% respecto a la muestra de referencia.

El Mothar, Drnevich, Santagata, & Bobet (2013) realizaron pruebas con muestras de arena con adición de bentonita al 0%, 3% y 5% por masa seca de arena en condición drenada y no drenada en los equipos de columna resonante y triaxial cíclico para deformaciones bajas y altas respectivamente, con esfuerzos de confinamiento de 50, 100 y 193 KPa; la arena utilizada se clasifica como grado Ottawa C778 con un coeficiente de uniformidad C_u de 1.7, $D_{50} = 4$ mm, del 2 al 5% de finos que pasan el tamiz 200, gravedad específica $G_s = 2.65$ y relaciones de vacíos entre $e_{max} = 0.78$ y $e_{min} = 0.48$, y bentonita de Wyoming (CP-200) comercializada por VOLCLAY con al menos el 70% de material pasa tamiz 0.075 mm y una un mínimo de hinchamiento libre de 8 ml / g. Los resultados muestran una disminución en G_{max} para muestras adicionadas con bentonita en condición drenada debido al contacto del material fino con los granos de arena con un aumento del umbral elástico lineal. Para las pruebas no drenadas, la rigidez de todos los especímenes aumento a mayor presión de confinamiento con una tendencia similar a la condición drenada para el módulo de corte en todos los esfuerzos de confinamiento.



a)



b)

Figura 24: Módulo de corte vs deformación. (a) condición drenada y (b) condición no drenada (El Mothar, Drnevich, Santagata, & Bobet, 2013)

Ehsani, Shariatmadari, & Mirhosseini (2015), evaluaron la respuesta de un material alternativo liviano proyectado para muros de contención, terraplenes, cimientos de máquinas, vías férreas, entre otros, compuesto por suelo arenoso (F161), tomado en Firoozkooh a 130 kilómetros al noreste de Teherán (Irán), mezclado con granos de caucho proveniente de llantas recicladas; la metodología contempló una presión de confinamiento 300 KPa y porcentajes entre el 10% y 30% de inclusión de granos finos (FR) y gruesos (GR) para especímenes ensayados en equipos triaxial y columna resonante. El estudio principalmente concluyó: todas las mezclas de arena-caucho presentaron una disminución de la rigidez al corte respecto a las de arena pura especialmente con los mayores contenidos de caucho; el aumento del grano grueso (GR) conduce a un módulo de corte más bajo a grandes deformaciones, mientras que a pequeñas deformación, la influencia del tamaño de caucho es menor; una mayor relación de amortiguamiento respecto a la muestra patrón asociada a la deformabilidad de las partículas de caucho (Figura 25).

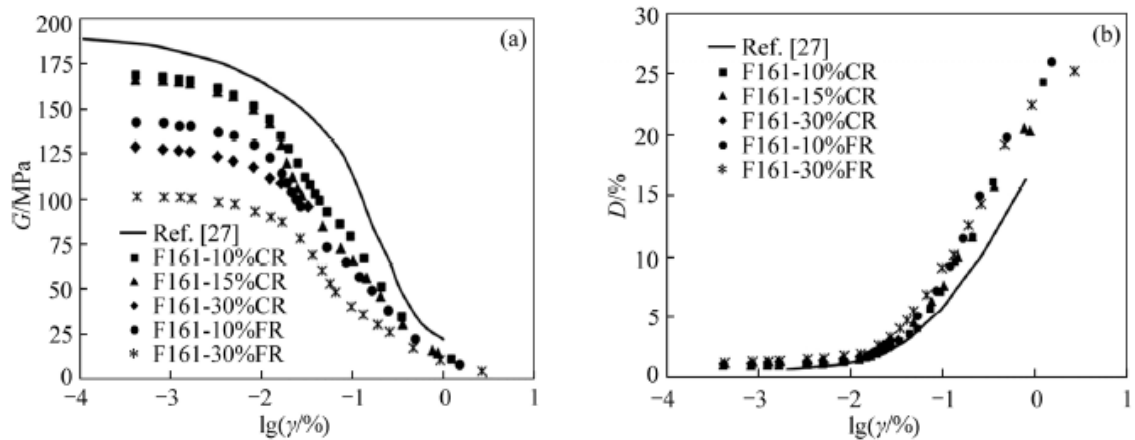


Figura 25: Propiedades dinámicas arena mezclada con caucho reciclado a) Módulo de rigidez b) Amortiguamiento (Ehsani, Shariatmadari, & Mirhosseini, 2015)

Fei & Xu (2017) encontraron un mayor módulo de corte para mezclas de arcilla-agregado con un aumento del contenido de material grueso adicionado y la presión de confinamiento, equivalente al 117%, 110% y 67% del G patrón para la adición de 32% en peso y presiones de 100, 200 y 400 KPa respectivamente. Adicionalmente, para relaciones de tensión bajas, observaron aumento en el número de ciclos hasta la falla, mientras que, para relaciones altas, la influencia del grano grueso en la deformación fue menos notoria. Los especímenes fueron evaluados en el equipo triaxial cíclico para un material compuesto por microesferas de vidrio y Caolinita.

En resumen, a nivel mundial todavía son escasos los estudios acerca de las propiedades dinámicas de materiales granulares como arenas y gravas adicionadas con diferentes materiales comparados con las investigaciones referentes a estabilización de arcillas de diferentes orígenes mediante la adición de productos como el cemento y sus derivados, cenizas, fibras y productos químicos. En Colombia, a pesar de que existen algunas referencias especialmente en arcillas, no hay estudios que involucren el equipo de columna resonante con la estabilización y curado de materiales a través del tiempo.

4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para analizar el efecto causado por el aceite sulfonado en un material granular con presencia de arcilla, se estabilizó químicamente la fracción fina mediante la inclusión del agente estabilizante con el agua de mezcla durante el proceso compactación, donde las variables de estudio fueron el módulo de corte y el amortiguamiento en función del tiempo a diferentes presiones de confinamiento. El material de estudio fue caracterizado con los ensayos normalizados por el INVIAS presentados en la Tabla 8. Debido a las características geométricas requeridas por el equipo de columna resonante y por el tipo de material, fue necesario el diseño y fabricación de un molde en acero galvanizado de 2" de diámetro y 4" de longitud con apertura lateral y un collar de extensión de aproximadamente 3" ajustable a la base principal, con el fin de realizar la compactación por el método denominado presión variable volumen constante. Adicionalmente, se requirió la fabricación de los accesorios inferior y superior que entran en contacto con el espécimen para la aplicación de carga torsional debido a que el equipo no contaba con implementos para diámetros de 2"; posteriormente se realizó la calibración del equipo mediante el procedimiento descrito en el anexo C y la evaluación previa de briquetas denominadas muestras de sacrificio. Para los ensayos de columna resonante los especímenes de estudio fueron curados a luz solar y sometidos a presiones de confinamiento entre 0 KPa y 400 KPa, torques desde 0.5 pfs hasta 10 pfs y frecuencias de 5 Hz hasta 180 Hz para pequeñas deformaciones.

A continuación, se presenta en la Figura 26 la metodología de trabajo y se describe paso a paso el diseño experimental.

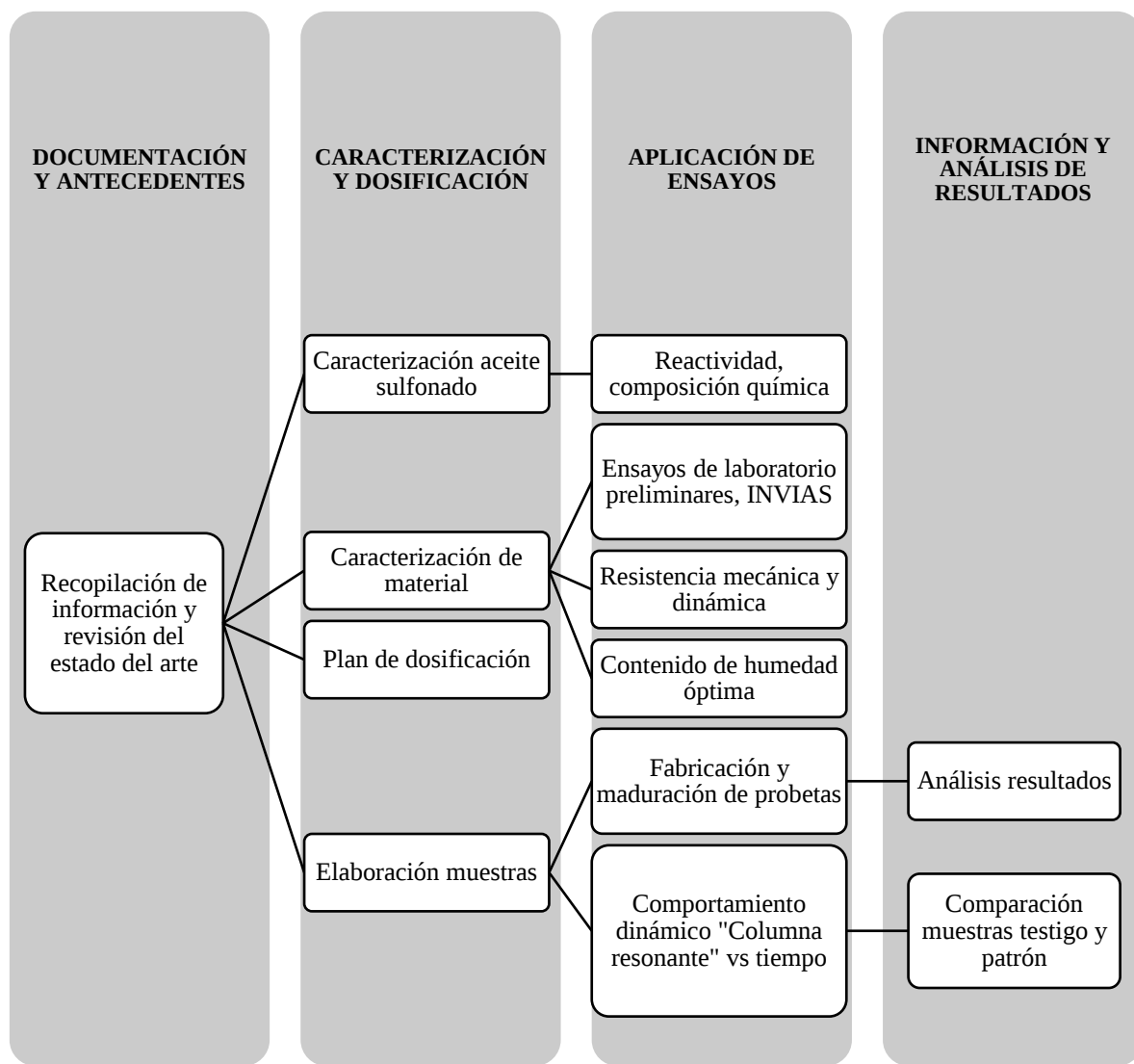


Figura 26: Metodología experimental. **Nota:** Elaboración propia

4.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA ACEITE SULFONADO

Para conocer la composición química y posible reactividad del aceite sulfonado con las partículas de arcilla, se consultó con el proveedor las propiedades como viscosidad, Ph, gravedad específica, contenido de sulfuro, entre otras. Adicionalmente en la revisión bibliográfica se pudo comprobar los efectos favorables resultantes de la mezcla de aceite sulfonado con materiales con presencia de arcilla.

4.2 CARACTERIZACIÓN MATERIAL CANTERA DE MONDOÑEDO

Como primera etapa se consideró realizar ensayos reglamentados por el INVIAS en el laboratorio para revisar el estado actual del material en cantera. Se realizaron los siguientes ensayos:

Tabla 8

Ensayos de caracterización material de cantera INCOMINERÍA

ENSAYOS	NORMA
Límites de consistencia	INV. 125 y 126
Factores de contracción	INV. 127
Clasificación por azul de metileno	INV. 182 y 235
Clasificación de suelos por AASHTO y SUCS	-
Granulometría por tamizado	INV. 123
Granulometría por hidrómetro	INV. 124
CBR y Proctor modificado	INV. 142 y 148
Determinación de suelos expansivos	INV. 132
Potencial de expansión (Aparato de Lambe)	INV. 120
Solidez en agregados	INV. 220
Terrones de arcilla y partículas deleznales	INV. 211
Contenido de materia orgánica	INV. 221

Nota: INVIAS 2013

Después de obtener los resultados se revisaron las recomendaciones del INVIAS, los posibles problemas y debilidades que presentó el material de la cantera INCOMINERÍA para construcción de carreteras. La caracterización ejecutada permitió determinar el estado base “Inicial” como punto de partida antes de cualquier modificación, para posteriormente comparar los resultados usándolos como testigo versus las muestras estabilizadas y maduradas en un periodo de tiempo.

4.3 PLAN DE DOSIFICACIÓN

Para la aplicación del aceite sulfonado y su correcta distribución en toda la muestra, se preparó una única mezcla en la totalidad del material con un contenido de aceite sulfonado en proporción de 1 litro de aceite por 50 litros de agua (2%), recomendada por el proveedor ESTAVÍAS; con esta solución se llevó a humedad óptima de compactación el material de estudio y posteriormente se procedió a la elaboración de las probetas.

4.4 ELABORACIÓN MUESTRAS

4.4.1 Fabricación. Las probetas se fabricaron mediante el método de compactación estático denominado presión variable volumen constante para especímenes de 2” de diámetro y 4” de altura, a una velocidad de 10 mm/ min hasta una carga máxima de 30 KN. Para cada control de maduración, incluyendo la muestra testigo inicial se elaboraron 3 especímenes.

Tabla 9
Muestras por cada ensayo

ENSAYO	# DE MUESTRAS
Módulo de corte	3
Relación de amortiguamiento	
Normalización del módulo de corte	

Nota: El ensayo de columna resonante al ser no destructivo permite realizar la medición de módulo de corte, relación de amortiguamiento y normalización del módulo de corte con una misma probeta.

4.4.2 Maduración. Todas las probetas se expusieron a luz solar y adicional se permitió la oxigenación para garantizar la reacción de la partícula de arcilla con la solución de aceite sulfonado. El tiempo de maduración fue de 90 días haciendo controles cada 30 días según lo indicado en la Tabla 10.

4.5 CONTROL MUESTRAS ADICIONADAS CON ACEITE SULFONADO

Para las muestras en el ensayo de columna resonante se analizaron tres tipos de comparaciones:

- MÓDULO DE CORTE
 - Módulo de corte (G) vs tiempo de curado (t)
 - Módulo de corte (G) vs deformación al corte (γ)
- RELACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO
 - Amortiguamiento (D) vs tiempo de curado (t)
 - Amortiguamiento (D) vs deformación al corte (γ)
- NORMALIZACIÓN DEL MÓDULO DE CORTE
 - Esfuerzo normalizado de corte ($G/G_{\text{máx}}$) vs deformación al corte (γ)
 - Esfuerzo normalizado de corte ($G/G_{\text{máx}}$) vs tiempo de curado (t)

Se realizaron controles de maduración de aceite sulfonado con la arcilla periódicamente cada 30 días, de acuerdo con las investigaciones anteriormente presentadas y teniendo en cuenta que se considera un cambio representativo en la partícula de arcilla estabilizada a los 30 días. Los controles se distribuyen de la siguiente manera:

Tabla 10
Controles de maduración aceite sulfonado - Arcilla

CONTROL	TIEMPO (Días)
1	0
2	30
3	60
4	90

Nota: Elaboración propia.

A continuación, se presenta un cuadro con las características del diseño experimental:

Tabla 11

Parámetros diseño experimental

INDICADOR	DESCRIPCIÓN
Variable	Tiempo, 90 días en total con controles cada 30 días
Método de compactación	Compactación estática, velocidad 10 mm/min
Cantidad de probetas	15, 3 por cada punto de control
Estabilizador	Solución de aceite sulfonado 2%
Muestra a estabilizar	Material granular con presencia de arcilla proveniente de la cantera INCOMINERÍA, localizada en Mondoñedo Cundinamarca.
Ensayo por realizar	Columna resonante, variables: Módulo de corte, relación de amortiguamiento, normalización del módulo de corte

Nota: Elaboración propia.

5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Caracterización Material Granular

5.1.1 Localización. El material para estudio fue extraído del sector de Mondoñedo al occidente de Bogotá, entre la vía que conduce del municipio de Mosquera hacia la Mesa, donde predominan canteras de explotación de materiales a cielo abierto como base, subbase, triturado rajón, recebo, entre otros, (Figura 27).



Figura 27: Localización cantera INCOMINERÍA. **Nota:** Google Maps año 2018 y elaboración propia

5.1.2 Ensayos de caracterización. El material seleccionado corresponde a un granular conocido en el argot técnico de muchas obras de ingeniería como B200 con la particularidad de contener fracciones que pasan el tamiz N° 200 superiores al 25% e índices de Atterberg por encima del 35% y 15% para el límite líquido e índice de plasticidad respectivamente, lo que condicionan la utilización de este material especialmente para terraplenes y estructuras viales debido al gran contenido de finos y su potencial de expansión. La clasificación del material se realizó en el laboratorio mediante los ensayos relacionados en la Tabla 8.

5.1.2.1 Determinación del Tamaño de Partículas de Suelo. La distribución granulométrica mediante tamizado arroja que un 39% del material corresponde a gravas, el 22 % arenas y 39% restante a finos (Figura 28); a partir de esta distribución y los resultados de límites de Atterberg el material clasifica como grava arcillosa (GC) evaluado por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y como un suelo tipo A-7-6 por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Respecto a la fracción fina, equivalente al 39% de la masa total, se utilizó el método de sedimentación mediante hidrómetro para su clasificación obteniendo un 90% de suelo calificado como limo y 10% de arcilla (Figura 29).

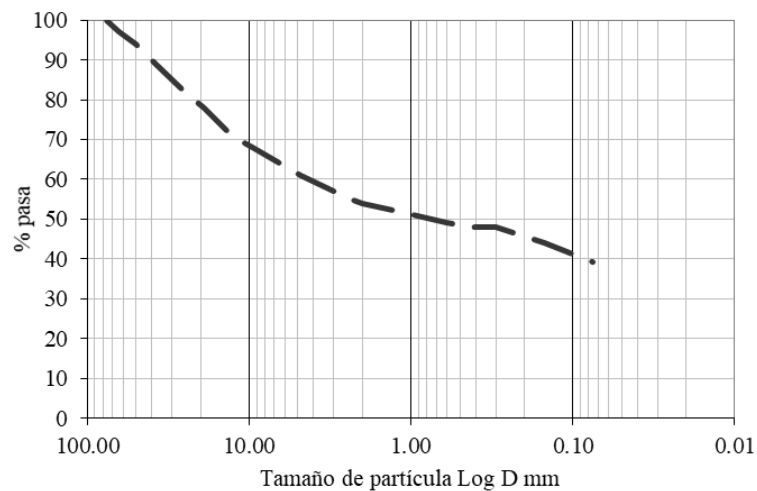


Figura 28: Granulometría por tamizado. **Nota:** Elaboración propia

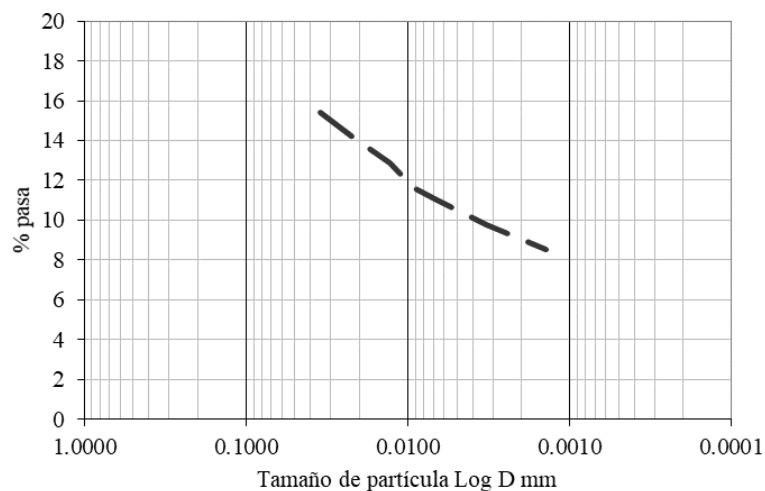


Figura 29: Granulometría por hidrometría. **Nota:** Elaboración propia

A partir de los datos obtenidos en la granulometría se pueden determinar parámetros acerca de la distribución y uniformidad del material a través de los coeficientes de curvatura (Cc) y uniformidad (Cu) mediante la relación entre coeficientes como D_{60} , D_{30} y D_{10} donde el subíndice representa el porcentaje pasa donde se debe evaluar la abertura del tamiz. Debido a que el porcentaje pasa sobre el tamiz N°200 fue de 39% no se pueden calcular los valores de referencia como D_{30} y D_{10} . Sin embargo, el granular seleccionado clasifica como un material uniforme pero mal gradado cuando se compara con los valores medios exigidos por las especificaciones INVIAS para materiales usados en la construcción de infraestructura vial como suelos seleccionados, sub bases y bases (Figura 30), donde se evidencia que la composición de partículas agrupadas por distribución de tamaño se mantiene constantes para las gravas, crece para las arenas y disminuye para los finos cuando aumenta la calidad del material y por ende su posición en las estructuras de pavimento especialmente.

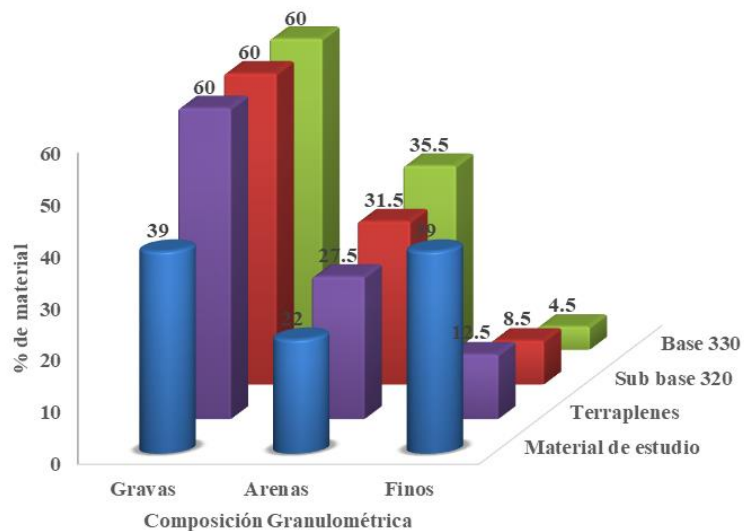


Figura 30: Distribución de partículas material seleccionado. **Nota:** Elaboración propia

5.1.2.2 Propiedades de Durabilidad y Limpieza. Las propiedades de durabilidad y limpieza se resumen en la Tabla 12. Los límites de Atterberg demuestran una alta actividad para la fracción fina, respecto a los materiales granulares utilizados comúnmente para carreteras, con un límite líquido de 45 e índice de plasticidad 20 refleja que el material tiene capacidad de ionizar la molécula de agua y por consiguiente producir un comportamiento plástico, lo cual indica presencia de limos y arcillas de alta actividad eléctrica favorable para esta investigación; esto se corrobora con el resultado de azul de metileno cercano a 20 indicando ser reactivo. La muestra de estudio presenta un 1.2% de concentración de arcilla en terrones permitiendo que no existan agrupaciones representativas en las cuales no alcance a entrar en contacto con el aceite sulfonado y se produzca heterogeneidad de la mezcla.

Tabla 12
Caracterización material cantera INCOMINERÍA

PROPIEDADES	ENSAYO	RESULTADOS
DURABILIDAD	Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos	Fracción gruesa 12.0 Fracción fina 2.0
	Límite líquido	LL 45
	Límite plástico	LP 25
	Índice de plasticidad	IP 20
	Contenido de materia orgánica	CMO 3.6
		Agregado Fino 14.2
LIMPIEZA	Azul de metileno	Fracción pasa tamiz N° 200 16.7
	Terrones de arcilla y partículas deleznales	- 1.2

Nota: Elaboración propia

5.1.2.3 Propiedades Expansivas y de Cambio Volumétrico. Los resultados evidencian un potencial de expansión medio teniendo en cuenta que se trata de un material granular utilizado para estructuras viales como terraplenes, con valores de expansión libre en probeta de 30%, CPV clasificado entre 2 y 4 (marginal), índice de hinchamiento de 0.1306 MPa y cambio volumétrico de 16.5 (Tabla 13)

Tabla 13
Propiedades expansión material cantera INCOMINERÍA

ENSAYO	RESULTADOS
Determinación de los factores de contracción de los suelos	Límite de contracción LC (%) 24.1%
	Relación de contracción 1.511
	Contenido de humedad superior al límite de contracción W1 (%) 35%
	Cambio volumétrico CV 16.5
	Contracción lineal R 4.95
Expansión libre en probeta	Índice de expansión libre (%) 30%
determinación del potencial de expansividad de un suelo en el aparato de lambe	Índice de hinchamiento (MPa) 0.1306
clasificación de la fracción fina de un suelo a partir de su valor de azul de metileno	Cambio volumétrico potencial (CVP) Marginal
	Tamaño de partículas menores a 2 µm (C2) (%) 9.1
	Valor de azul de metileno (VA) 16.7
	Lta
	Clasificación fracción fina Limo muy activo

Nota: Elaboración propia

5.1.2.4 Relación Humedad-Peso Unitario Máximo. El peso unitario seco máximo obtenido mediante el ensayo de Proctor modificado método D corresponde a 16.68 KN/m³ con una humedad óptima de 13.4% y una gravedad específica (GS) igual a 2.6. La curva de compactación y saturación se presenta en la Figura 31.

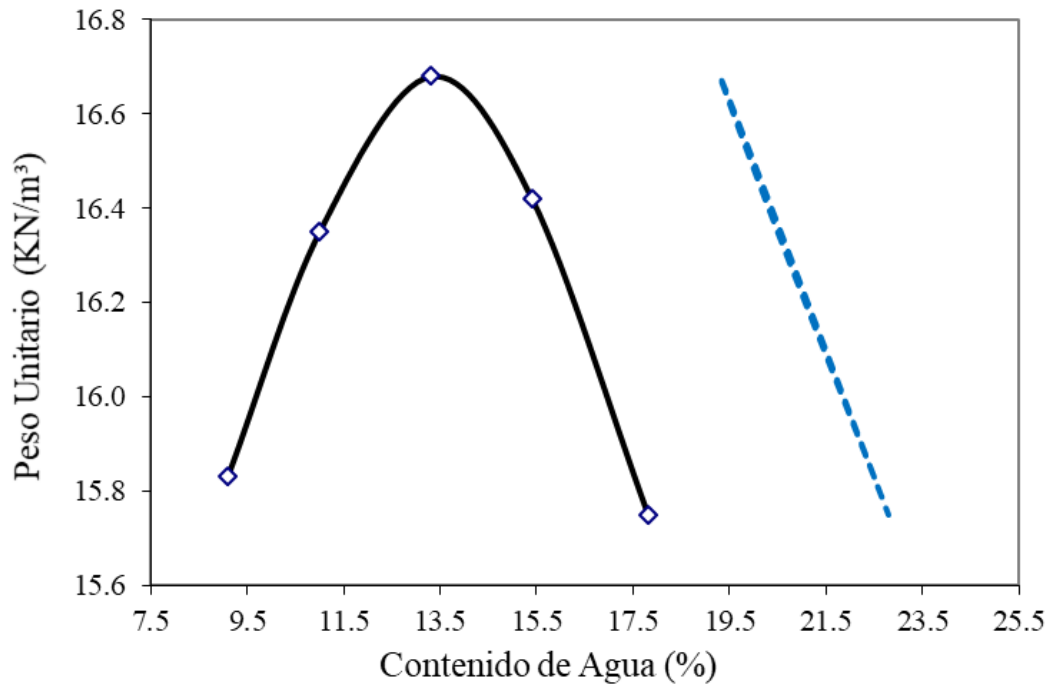


Figura 31: Curva de compactación. **Nota:** Elaboración propia

5.2 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES

Debido al diámetro de los especímenes se utilizó un método de compactación estática denominado volumen constante presión variable (Venkatarama Reddy & Jagadish, 1993), el cual consiste en ejercer una fuerza de estática variable a una tasa definida, suministrada por el pistón de la prensa utilizada en el ensayo de CBR y/o Marshall, a una masa de suelo determinada hasta alcanzar el volumen requerido, es decir, la altura final de la probeta conociendo el diámetro de esta, controlando la distancia recorrida por el pistón. El procedimiento de compactación detallado se describe a continuación:

- i. Selección del material: la masa de suelo seca al aire utilizada fue únicamente la fracción que pasa el tamiz N°4 (4.76 mm) cumpliendo con el tamaño mínimo de partículas exigido por la ASTM D 4015 "*Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by the Resonant-Column*" de un décimo del diámetro del espécimen. (5.08 mm).



Figura 32: Material granular seleccionado para elaboración de especímenes. **Nota:** Elaboración propia

- ii. Determinación peso del material: de acuerdo con el ensayo de humedad-densidad se requiere un 13.4% de humedad para alcanzar el peso unitario seco máximo de 1701 Kg/ m³. El volumen para una probeta de Ø= 2" y L= 4" corresponde a 196.25 cm³, lo que conlleva a una masa de material húmedo suelto de 378.55 gr por espécimen; el aceite sulfonado se incorporó directamente al agua de mezcla en proporción del 2% (1 litro de aceite por 50 litros de agua).



Figura 33: Preparación y adición de agua con aceite sulfonado a material granular. **Nota:** Elaboración propia

- iii. Preparación de las probetas: teniendo en cuenta el proceso de compactación estático y el diámetro de las probetas fue necesario la fabricación de moldes metálicos con las siguientes características: una base cuadrada, una camisa principal de 2" de diámetro y 4" de longitud de apertura lateral y ajuste mediante tornillo, y un collar de extensión de 8 cm asegurable a la base principal. La masa de suelo húmeda definida fue colocada dentro de los moldes en aproximadamente 4 capas compactadas levemente por un pisón.



Figura 34: Moldes para elaboración de especímenes. **Nota:** Elaboración propia

- iv. El molde permite fabricar especímenes que pueden ser utilizados en el equipo de compresión inconfiada, columna resonante, triaxial, entre otros. Por su diseño, el collar permite apertura lateral (Figura 35) con el que pueden extraerse las muestras conformadas sin sufrir una alteración en sus propiedades físicas; este fue fabricado en acero A36 galvanizado con una pared de espesor 5 mm y se compone de tres partes principales: base, collar y extensión, donde la muestra después de realizado el proceso de compactación queda ubicada en el collar lo que permite que se puede extraer lateralmente.

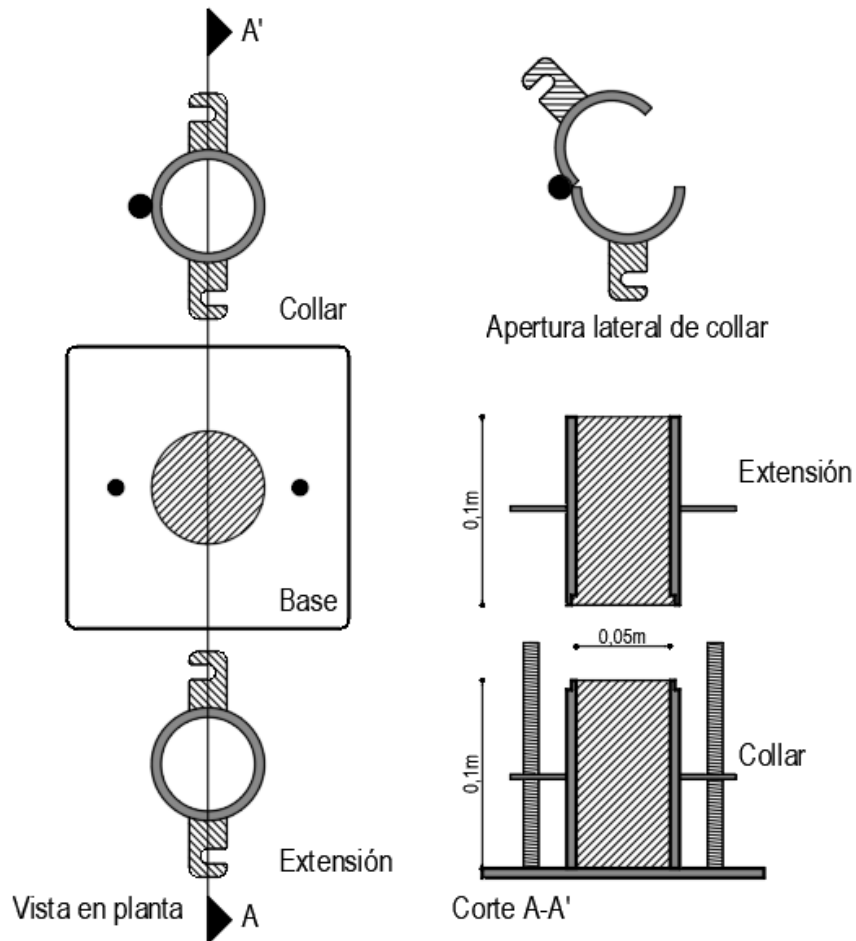


Figura 35: Molde para compactación. **Nota:** Elaboración propia

- vi. Compactación: los especímenes fueron compactados a una velocidad constante de 10 mm/ minuto, un recorrido aproximado de 5 cm y a una carga máxima de 25 KN.



Figura 36: Compactación material granular. **Nota:** Elaboración propia

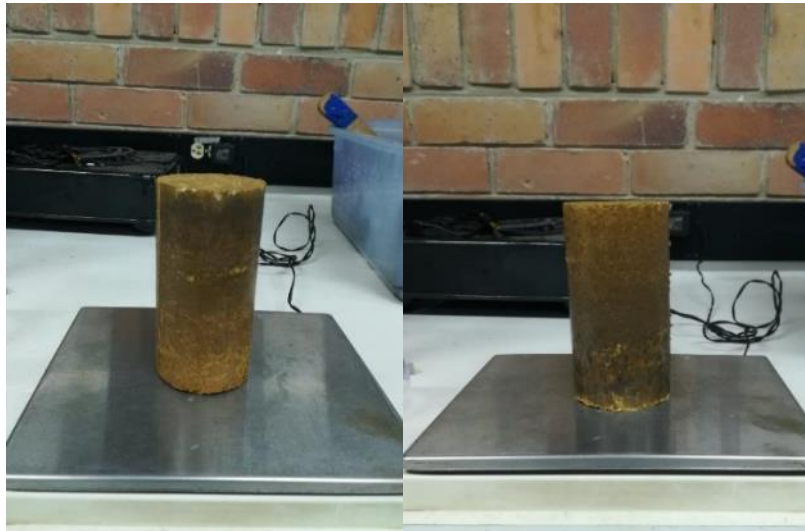


Figura 37: Especímenes finales. **Nota:** Elaboración propia

Todos los especímenes elaborados estuvieron por encima del 98% de la densidad máxima confirmando la efectividad y optimización de la energía de compactación proporcionada por el método estático.

5.3 COLUMNA RESONANTE

Previo a la ejecución de los ensayos se realizaron pruebas de sacrificio para especímenes elaborados con un material similar al caracterizado sin adición de aceite con el fin conocer el equipo, verificar su respuesta para materiales más rígidos y definir las escalas y parámetros iniciales del ensayo. Posteriormente se configuró el equipo a través de la instalación de accesorios de calibración pertenecientes al equipo; el detalle del procedimiento se puede revisar en el anexo B “Calibración equipo columna resonante”.

En total se ensayaron 19 especímenes de los cuales 3 fueron utilizados como muestras de sacrificio y los 16 restantes para los ensayos definitivos con el material seleccionado y la adición de aceite. Para el segundo grupo, los especímenes fueron distribuidos en 4 edades de control de curado 0, 30, 60 y 90 días, y una muestra patrón sin adición de aceite sulfonado evaluada a 0 días. La metodología utilizada consistió en aumentar progresivamente los torques con valores de 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0 y 10.0 pfs para presiones de confinamiento de 0, 100, 150, 200 y 400 KPa. En la Figura 38 se presentan las frecuencias de resonancia obtenidas para una muestra a 0 días con presiones de confinamiento de 0 y 400 KPa. La unidad que utiliza el equipo para la configuración del torque se denomina Percent Full Scale (pfs) y equivale a 0.023 N·m permitiendo un máximo de 200 pfs; de acuerdo con la metodología, se aplicaron torques entre 0.0115 y 0.23 N m (0.5 y 10 pfs).

Los resultados se nombraron de acuerdo con una tipología de 4 caracteres que describen lo siguiente de izquierda a derecha: la letra M, el consecutivo de la muestra ensayada para un grupo de características similares, días de curado y si contiene adición (C) o no (S) de aceite sulfonado; el último término solo se tuvo en cuenta para las muestras a 0 días ya que los demás días de curado deben contener aceite sulfonado para lograr medir su efecto. Por ejemplo, la convención M2-0C significa muestra número 2, a 0 días de curado para un material con aceite sulfonado incorporado.

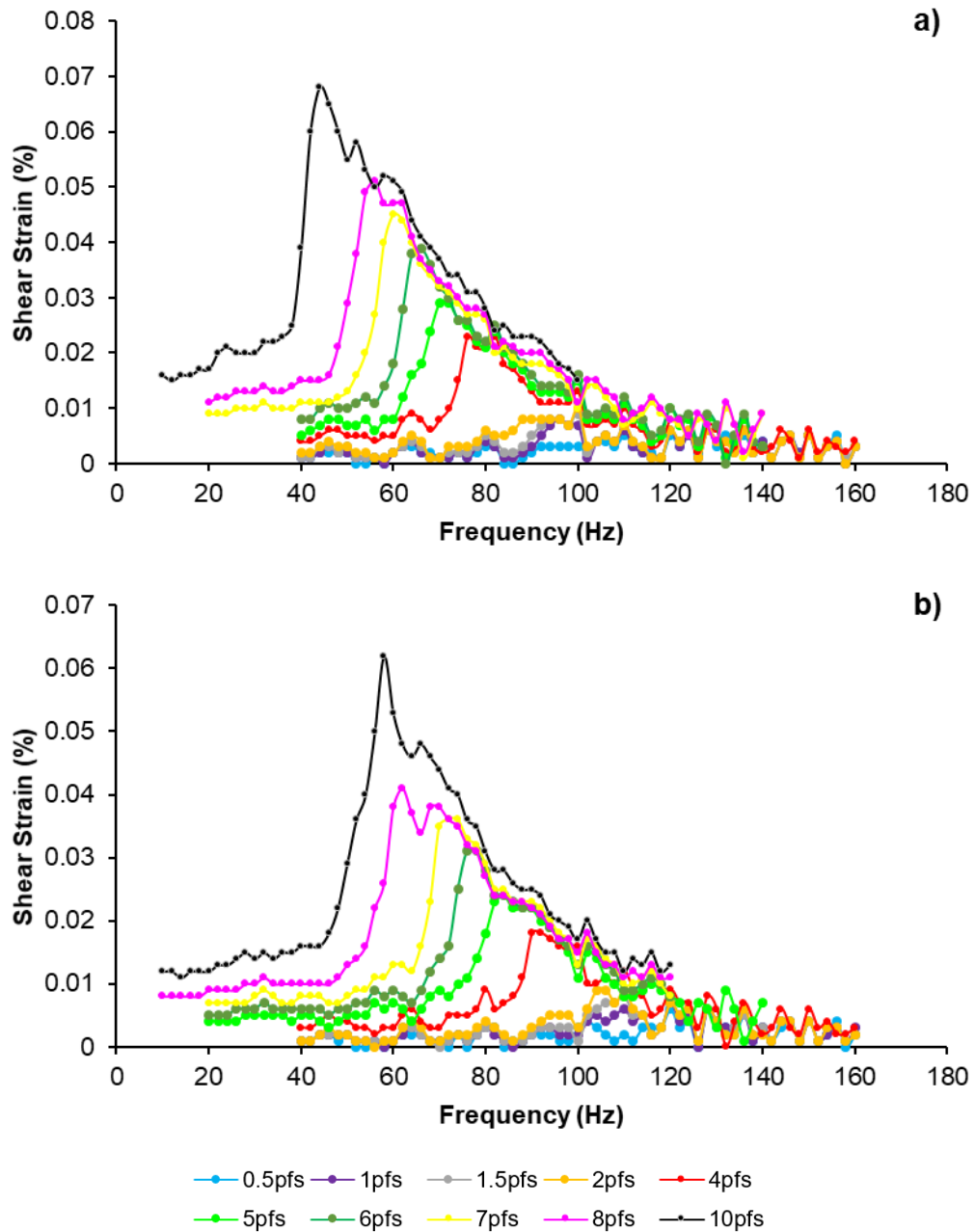


Figura 38: Frecuencia de resonancia muestra 0 días sin adición de aceite sulfonado. a) presión de confinamiento. 0 KPa y b) presión de confinamiento 400 KPa. **Nota:** Elaboración propia

Dado que a 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 pfs no se presentó resonancia en ningún ensayo debido a que el torque generaba una oscilación que no producía deformaciones apreciables con la escala de medición del equipo, los análisis de datos solamente se realizaron a partir de las respuestas desde 4 pfs.

5.3.1 Módulo de Corte Máximo (G). Los resultados experimentales obtenidos para las diferentes edades de control se resumen en la Tabla 14, donde se puede observar que el módulo de corte (G) aumenta con la presión de confinamiento (σ) y decrece con el torque aplicado como se muestra en la Figura 39.

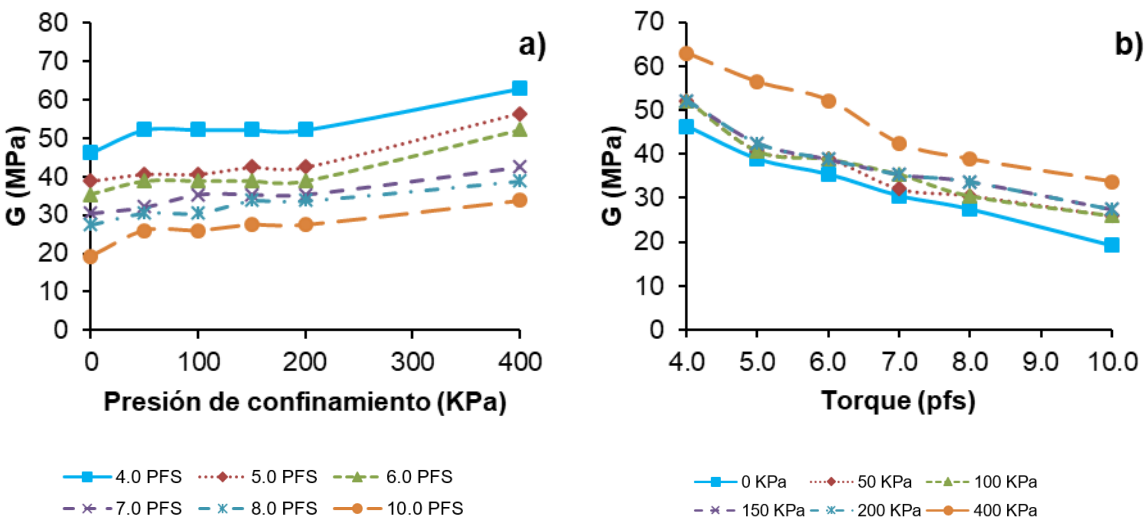


Figura 39: Variación del módulo de rigidez (G). a) con la presión de confortamiento b) con el torque. **Nota:** Elaboración propia

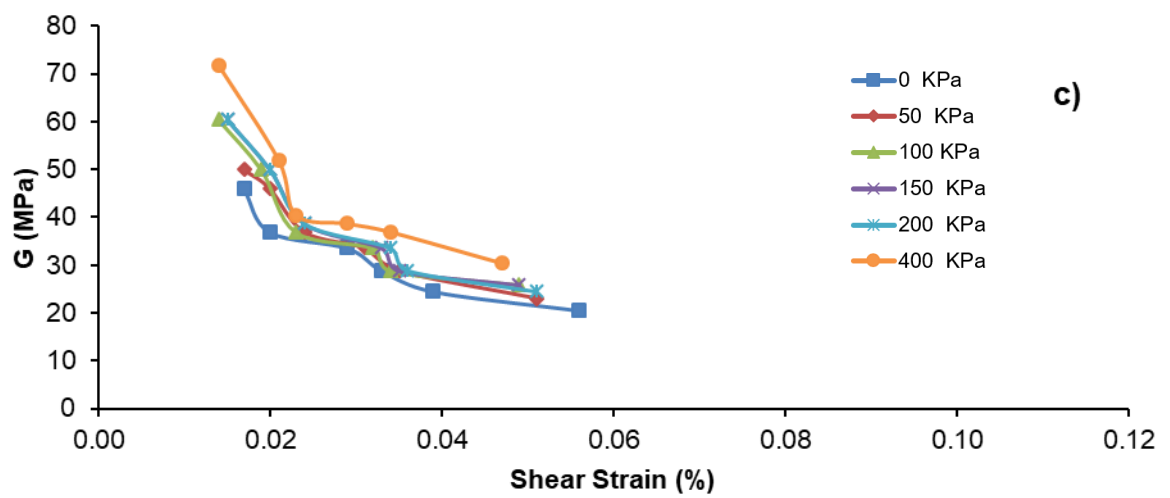
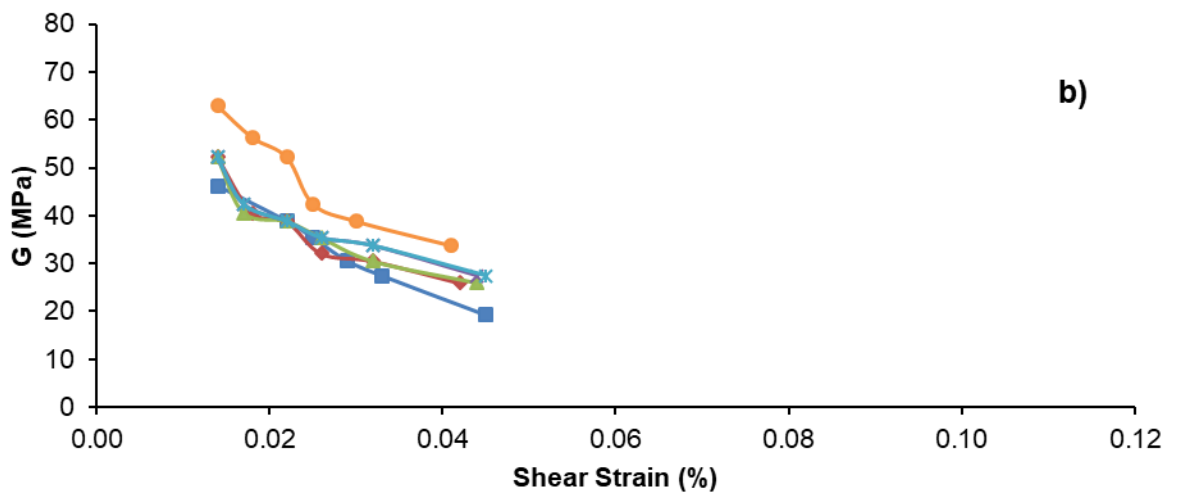
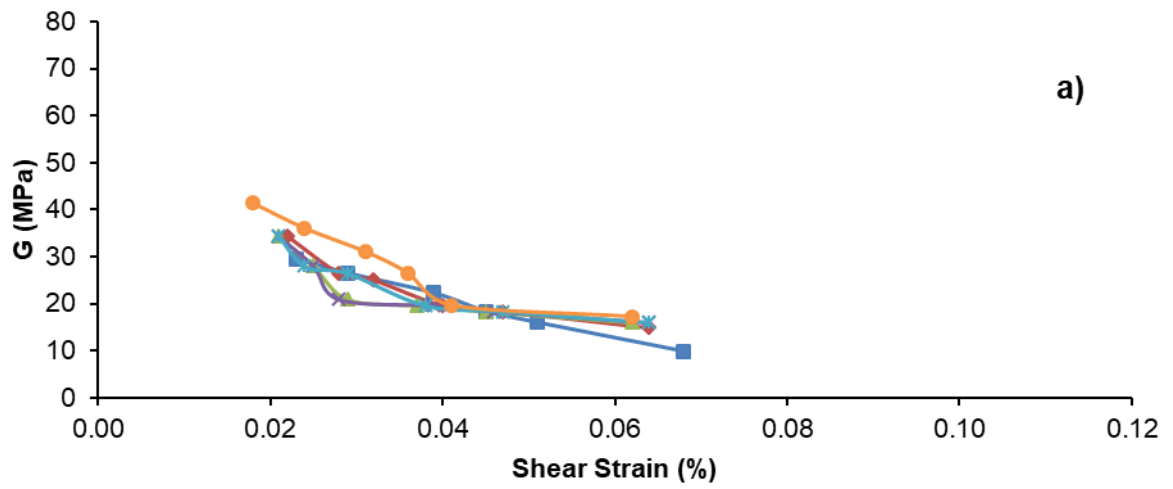
En la Figura 40 se presenta las curvas de degradación del módulo de corte para las edades de control variando la presión de confinamiento. El módulo de corte sufrió un incremento instantáneo aproximadamente del 60% con la aplicación de aceite sulfonado cuando se evaluaron los especímenes a 0 días con y sin adición causado por el efecto inicial del estabilizante relacionado con la neutralización de la actividad electroquímica de la matriz arcillosa. Adicionalmente, se puede observar un aumento de la deformación al corte (γ) para las edades de 60 y 90 y con esto la disminución del módulo de rigidez.

Tabla 14
Resultados módulo de rigidez G (MPa)

Presión de confinamiento (KPa)	Torque (pfs)	Días de curado				
		0S	0	30	60	90
0	4	29.5	46.22	46.01	35.71	22.19
	5	26.48	38.84	36.92	29.3	13.88
	6	22.25	35.39	33.57	22.18	12.85
	7	18.39	30.52	28.84	19.00	10.92
	8	16.02	27.47	24.46	13.88	8.72
	10	9.89	19.28	20.45	8.72	6.41
50	4	34.34	52.18	49.92	35.71	35.71
	5	26.48	40.63	46.01	27.06	22.19
	6	25.03	38.84	36.92	22.18	18.39
	7	19.63	32.1	33.57	16.06	13.88
	8	18.39	30.52	28.84	12.85	10.01

Presión de confinamiento (KPa)	Torque (pfs)	Días de curado				
		0S	0	30	60	90
100	10	14.89	26.00	23.08	7.14	8.31
	4	34.34	52.18	60.41	35.71	26.34
	5	27.97	40.63	49.92	29.3	19.62
	6	20.92	38.84	36.92	19.00	16.06
	7	19.63	35.39	33.57	14.95	12.85
	8	18.39	30.52	28.84	11.39	10.92
	10	16.02	26.00	25.88	7.14	7.52
150	4	34.34	52.18	60.41	35.71	35.71
	5	27.97	42.45	49.92	27.06	22.19
	6	20.92	38.84	38.66	19.00	18.39
	7	19.63	35.39	33.57	14.95	13.88
	8	18.39	33.73	28.84	12.85	11.87
	10	16.02	27.47	25.88	7.52	8.31
200	4	34.34	52.18	60.41	35.71	23.53
	5	27.97	42.45	49.92	29.3	19.62
	6	26.48	38.84	38.66	19.00	16.06
	7	19.63	35.39	33.57	12.85	10.92
	8	18.39	33.73	28.84	11.39	9.14
	10	16.02	27.47	24.46	7.52	6.77
400	4	41.37	62.92	71.89	39.14	40.93
	5	36.04	56.36	51.94	27.06	37.41
	6	31.07	52.18	40.44	22.18	20.88
	7	26.48	42.45	38.66	19.00	19.62
	8	19.63	38.84	36.92	13.88	17.2
	10	17.18	33.73	30.37	8.31	11.87

Nota: Elaboración propia



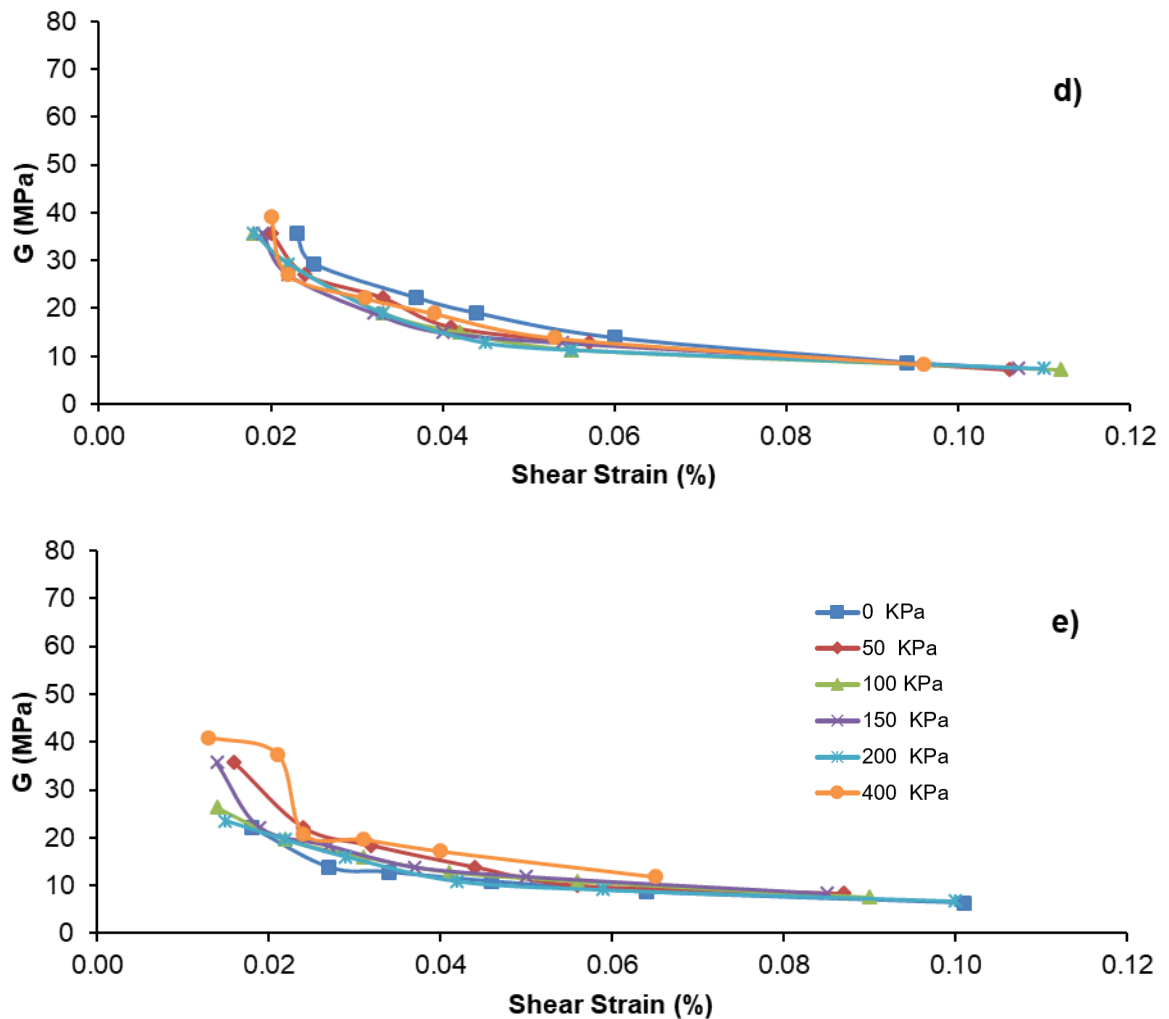
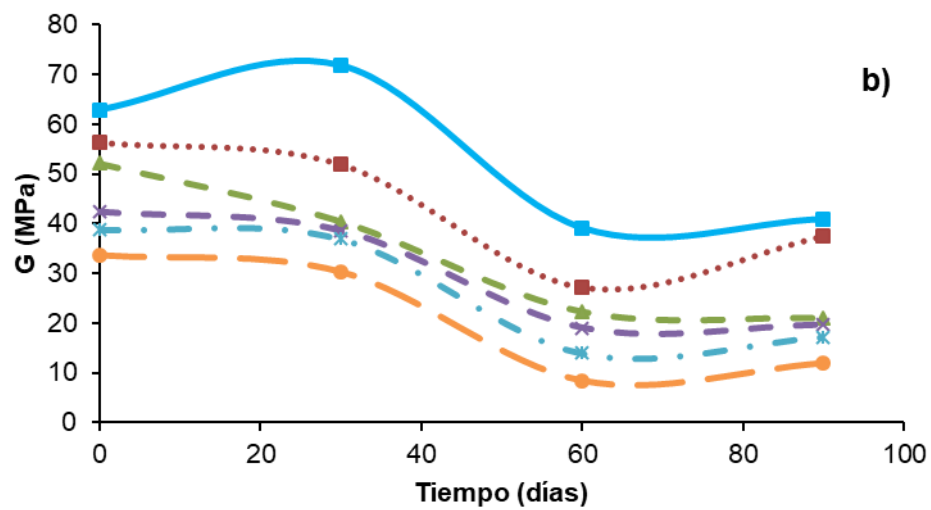
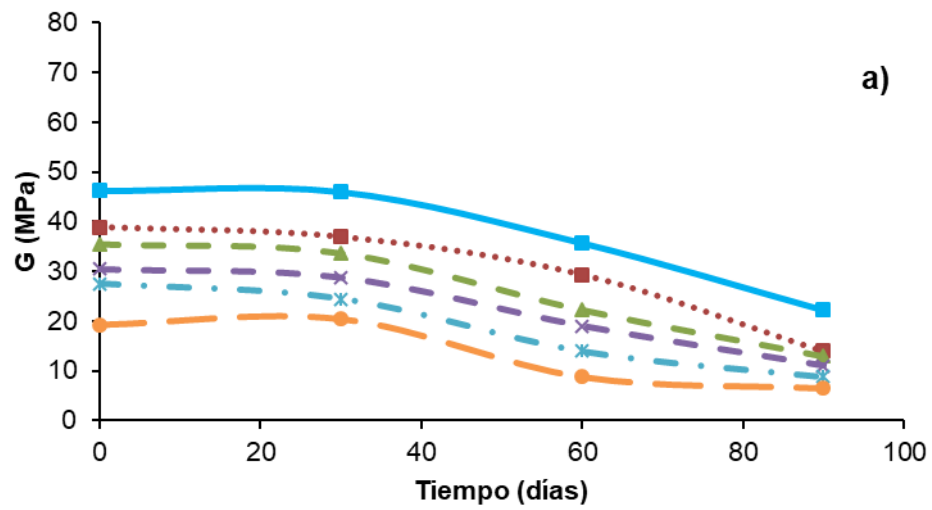


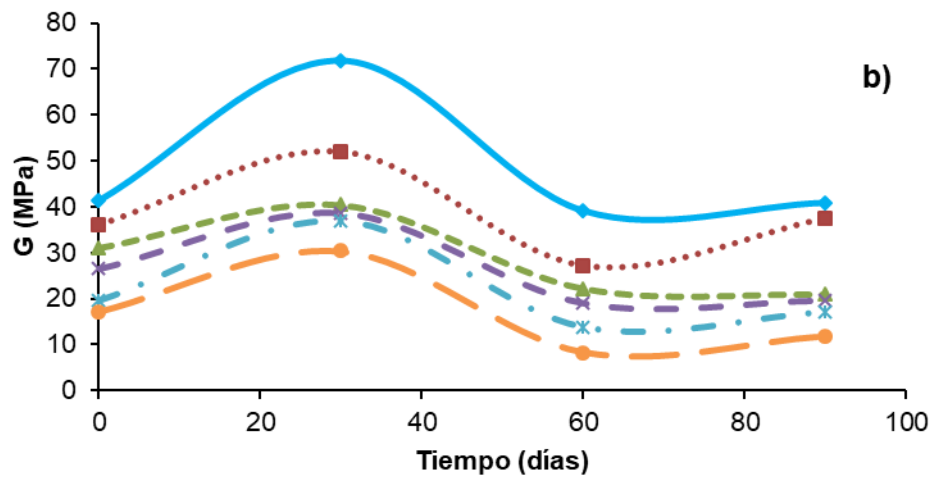
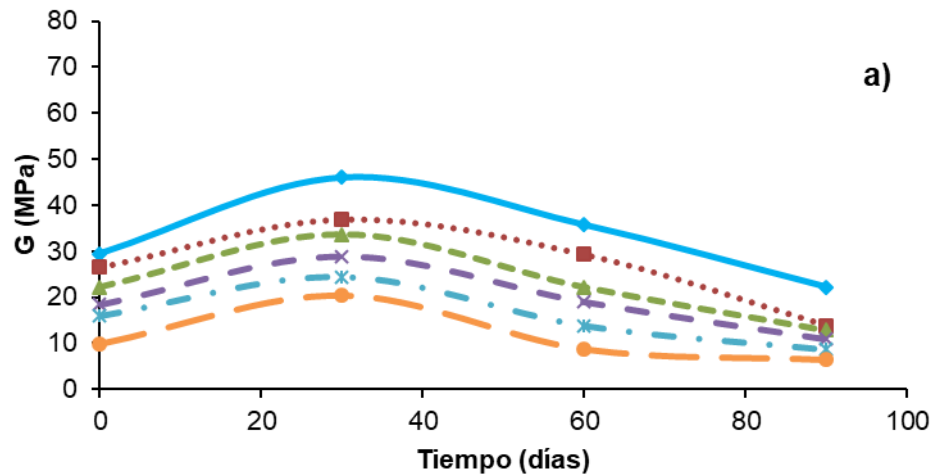
Figura 40: Variación del módulo de corte según presión de confinamiento. a) M-0S b) M-0 c) M-30 d) M-60 e) M-90. **Nota:** Elaboración propia

Respecto al tiempo de maduración se evidencia que la adición del agente estabilizante genera un efecto en la rigidez debido a que se mantiene constante hasta la edad de 30 días a pesar de la pérdida de humedad durante el curado, para las edades de 60 y 90 días el módulo de rigidez decae en un rango entre 35% y 50% (Figura 41). El material fino que compone la briqueta actúa como una matriz cementante que aporta rigidez e incrementa el módulo cuando se evalúa con la humedad óptima de compactación. Este comportamiento es similar para todas las presiones de confinamiento y coincide con la descripción documentada por el proveedor del producto acerca de la inmediatez de los efectos desde su aplicación hasta los 90 días.



—■— 4.0 pfs ···■··· 5.0 pfs —▲— 6.0 pfs —×— 7.0 pfs —*— 8.0 pfs —●— 10.0 pfs

Figura 41: Evolución del módulo de corte a través del tiempo para especímenes con adición de aceite sulfonado. a) 0 KPa y b) 400 KPa **Nota:** Elaboración propia



—■— 4.0 pfs ···■··· 5.0 pfs —▲— 6.0 pfs —×— 7.0 pfs —*— 8.0 pfs —●— 10.0 pfs

Figura 42: Evolución del módulo de corte a través del tiempo respecto a muestra patrón a) 0 KPa y b) 400 KPa. **Nota:** Elaboración propia

El aceite sulfonado como agente estabilizador genera un efecto en la microestructura del material evidente con la pérdida de humedad y el tiempo de curado. Durante las sollicitaciones de esfuerzos, propiedades intrínsecas del material como forma, mineralogía y tamaño de partículas, entre otras, no cambian obligando a asumir la respuesta a través de la reacomodación de partículas y la distribución de poros. Para las muestras evaluadas a 0 días, con humedad óptima, la fricción entre partículas y las fuerzas electroquímicas, asociadas a la matriz fina, aportan resistencia durante la sollicitación de esfuerzos, mientras que, para las muestras de 30, 60 y 90 días, las fuerzas internas de cohesión se ven influenciadas por la ionización de la molécula de arcilla y su estabilización, obligando a la

reorganización de partículas similar al fenómeno conocido como dilatancia. Este comportamiento se puede corroborar en ensayos adicionales ejecutados de compresión inconfiada y velocidad de onda en muestras elaboradas a 0 días sin adición de aceite y 90 días, con el aumento de la rigidez a mayor tiempo de curado asociado a la pérdida de humedad y al efecto del aceite sulfonado. A continuación, se describen los resultados para cada ensayo:

- Compresión simple: el ensayo se ejecutó en una prensa Marshall Humboldt a una velocidad de 0.1 mm/min. La gráfica esfuerzo deformación (Figura 43) permite ver la influencia de la matriz arcillosa para la edad de 0 días, con una pendiente menos pronunciada y mayor deformación respecto a la muestra ensayada a 90 días. Así mismo, la falla de los dos especímenes se produce como un material frágil. Después de realizar el ajuste a las curvas necesario por la baja velocidad de ejecución y al fenómeno de reacomodación de partículas en las briquetas, se relacionó en la zona elástica el esfuerzo/deformación usando un modelo de tendencia lineal; posteriormente, ajustadas las curvas, la relación entre el esfuerzo deformación indica que al pasar el tiempo de 0 días vs 90 días la rigidez aumentó.

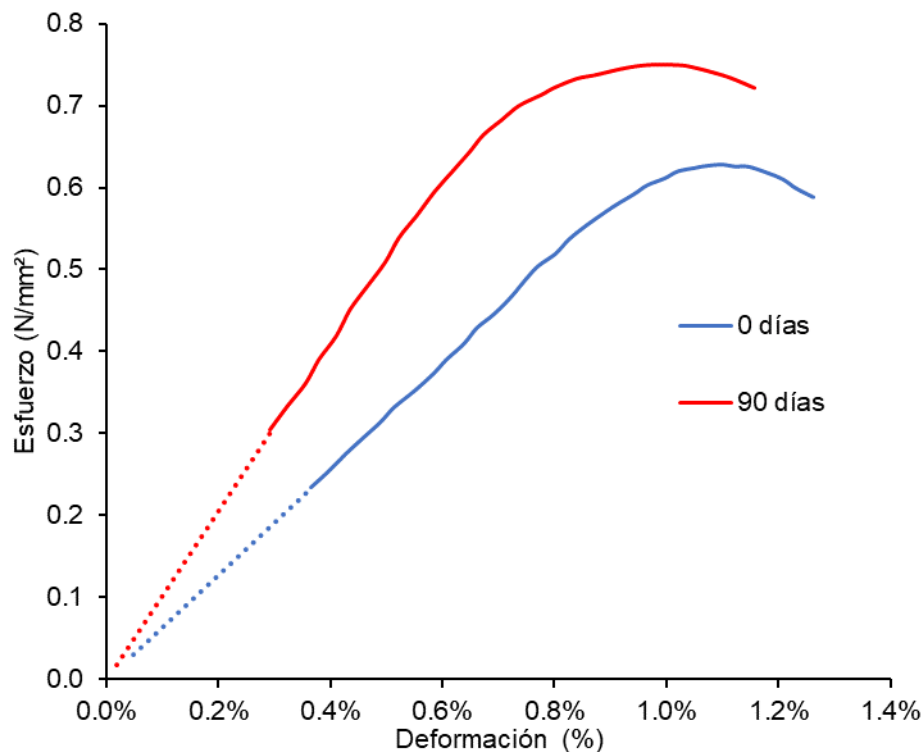


Figura 43: Compresión inconfiada para 0 y 90 días **Nota:** Elaboración propia

- Velocidad de onda: se realizaron ocho mediciones por edad de curado con el equipo de ensayo ultrasónico PUNDIT PL-200 del proveedor Proceq. Por restricciones del equipo adquirido por la Universidad Santo Tomás solamente

fue posible medir la velocidad de onda longitudinal sobre los especímenes; sin embargo, se aplicó la correlación propuesta por (Kramer, 1996) presentada en la Ecuación 34, relaciona la velocidad de onda longitudinal (V_p), la velocidad de onda transversal (V_s) y el módulo de Poisson (ν). En la Tabla 15 se presentan los resultados obtenidos para $V_{p\text{medido}}$ y $V_{s\text{calculado}}$ asumiendo un módulo de Poisson de 0.35 típico de materiales granulares; se observa que la velocidad de onda fue superior para el espécimen a 90 días, aunque las velocidades se consideran altas respecto a las obtenidas en el equipo de columna resonante debido a los transductores utilizados en la medición.

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2-2\nu}{1-2\nu}} \quad \text{Ecuación 34}$$

Tabla 15
Resultados velocidad de onda ensayo ultrasónico Pundit

Medición	Velocidad onda (m/seg)			
	0 días		90 días	
	V_p	V_s	V_p	V_s
1	766	368	929	446
2	674	324	926	445
3	796	382	929	446
4	781	375	914	439
5	800	384	925	444
6	793	381	913	439
7	788	379	917	441
8	770	370	915	440
Promedio	771	370	921	442

Nota: Elaboración propia

5.3.2 Amortiguamiento. A continuación, se presenta el valor de amortiguamiento calculados por el método de ancho de banda para una presión de confinamiento variable entre 0 y 400 KPa y torque desde 4 pfs hasta 10 pfs.

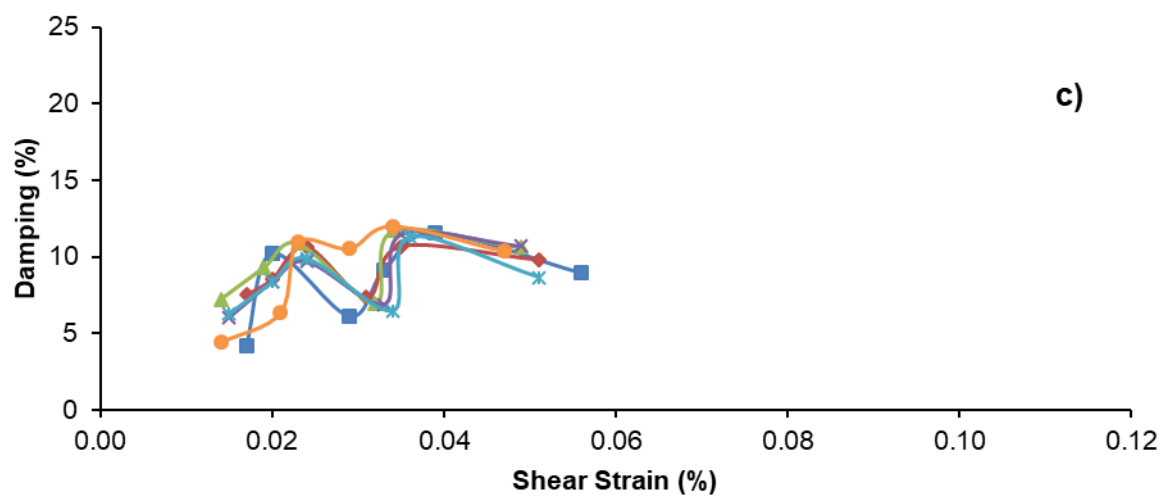
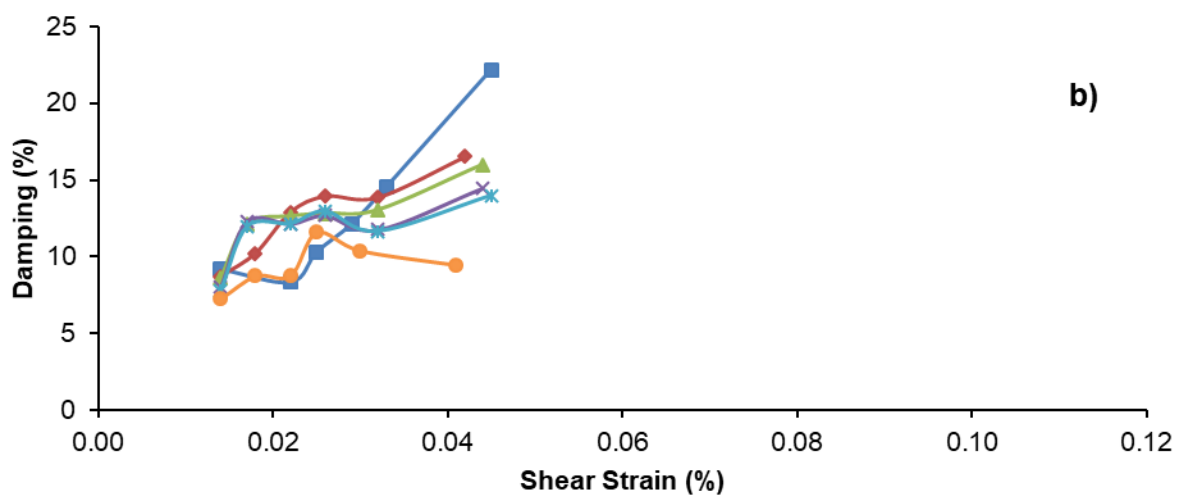
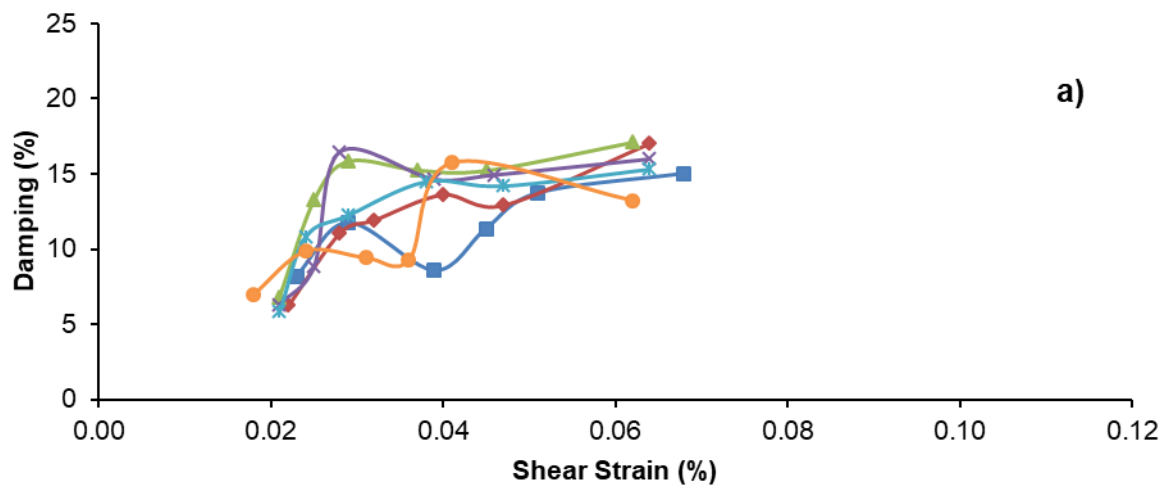
Tabla 16
Resultados Amortiguamiento D (%)

Presión de confinamiento (KPa)	Torque (pfs)	Días de curado				
		0S	0	30	60	90
0	4	8.17	9.17	4.16	2.37	10.90
	5	11.74	8.33	10.24	8.76	12.89
	6	8.56	10.30	6.14	3.42	14.73
	7	11.35	12.13	9.13	7.24	17.29
	8	13.72	14.56	11.58	10.24	15.03
	10	15.02	22.16	8.94	13.10	16.70
50	4	6.26	8.70	7.49	0.00	5.71
	5	11.08	10.23	8.51	6.36	7.49
	6	11.93	12.91	10.65	6.61	10.24
	7	13.62	13.94	7.33	9.72	11.38
	8	12.91	13.86	10.67	12.16	16.06

Presión de confinamiento (KPa)	Torque (pfs)	Días de curado				
		0S	0	30	60	90
100	10	17.01	16.53	9.80	15.15	12.84
	4	6.83	8.63	7.20	2.83	15.26
	5	13.27	12.12	9.28	7.67	11.32
	6	15.85	12.63	10.87	7.87	13.40
	7	15.25	12.82	6.93	11.71	14.87
	8	15.23	13.03	11.68	16.27	13.78
	10	17.11	15.97	10.59	13.72	13.68
150	4	6.32	7.99	6.03	2.48	12.00
	5	8.84	12.31	8.37	6.62	10.97
	6	16.47	12.15	9.69	7.74	13.84
	7	14.63	12.68	6.87	12.01	14.95
	8	14.93	11.75	11.50	14.67	14.23
	10	15.99	14.45	10.70	12.46	13.90
200	4	5.85	7.78	6.26	2.25	7.72
	5	10.82	11.95	8.33	6.49	12.39
	6	12.27	12.15	9.85	2.49	14.91
	7	14.50	12.94	6.44	10.73	14.51
	8	14.21	11.64	11.27	16.86	14.49
	10	15.32	13.97	8.65	12.59	15.14
400	4	7.00	7.26	4.42	1.12	4.29
	5	9.85	8.75	6.37	4.37	4.11
	6	9.41	8.77	10.94	5.50	11.08
	7	9.28	11.58	10.51	7.51	10.99
	8	15.73	10.40	11.98	11.06	9.58
	10	13.22	9.46	10.36	15.10	10.34

Nota: Elaboración propia

El comportamiento del amortiguamiento para los ensayos realizados no presenta una tendencia clara como se ve en la Figura 44, ni una relación entre ellos, exceptuando los especímenes iniciales de cero días con y sin aceite sulfonado ver Figura 45, las cuales muestran una tendencia de crecimiento con el aumento del torque. El material al tener discontinuidad en su estructura y una matriz heterogénea con presencia de tamaños diferentes en toda su gradación desde el tamiz número 4 (4.76mm) no manifiesta un amortiguamiento definido ya que predomina el comportamiento friccionante en el espécimen.



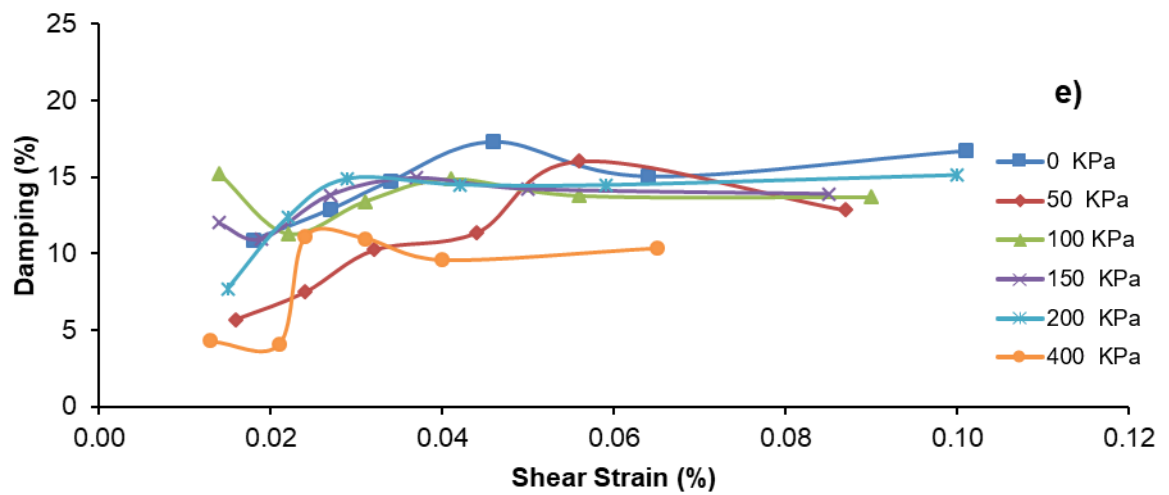
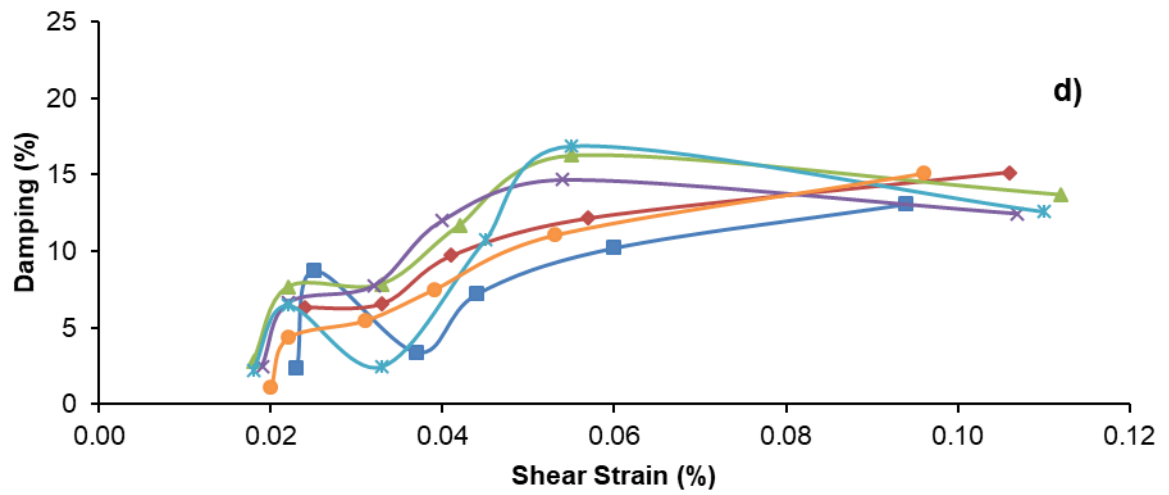


Figura 44: Variación del amortiguamiento según presión de confinamiento. a) M-0S b) M-0 c) M-30 d) M-60 e) M-90. **Nota:** Elaboración propia

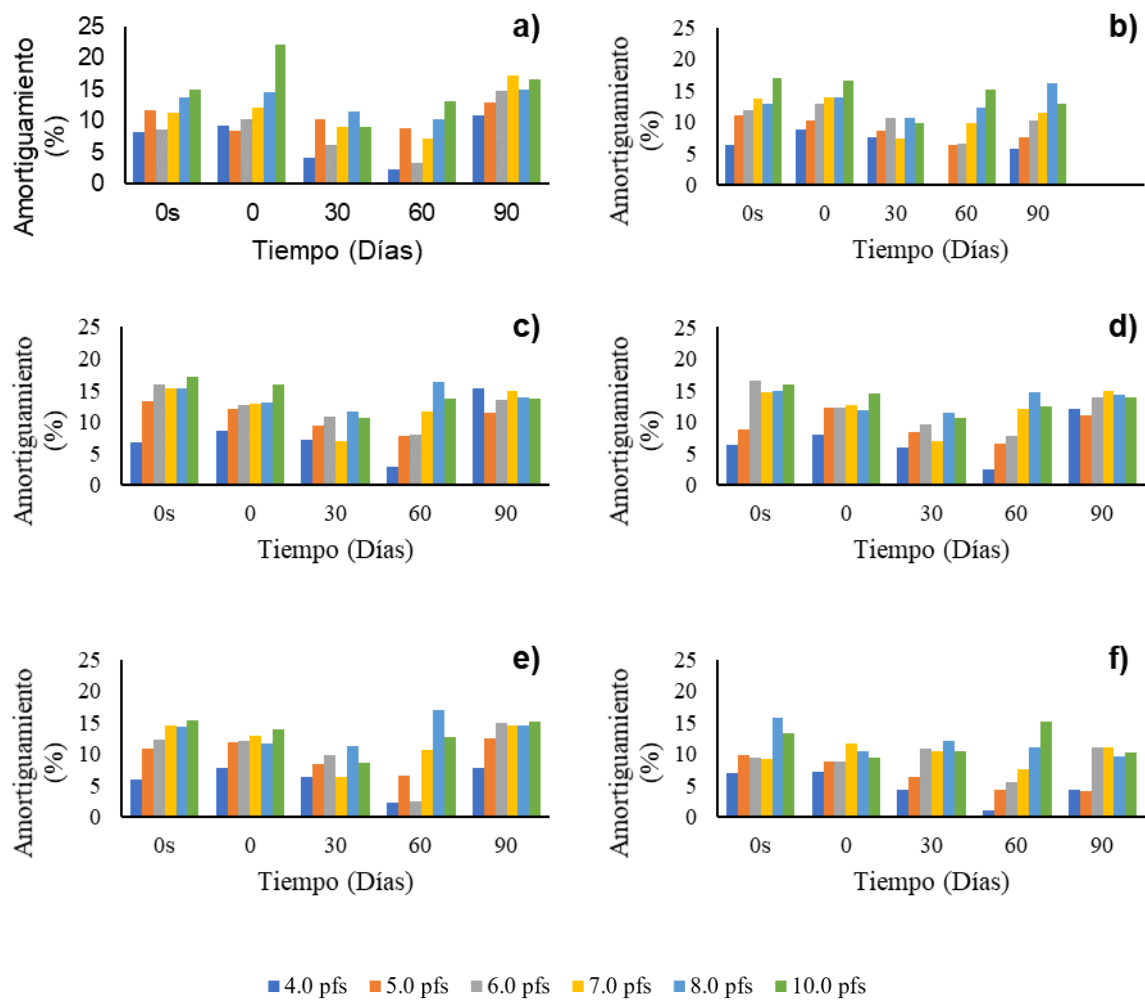


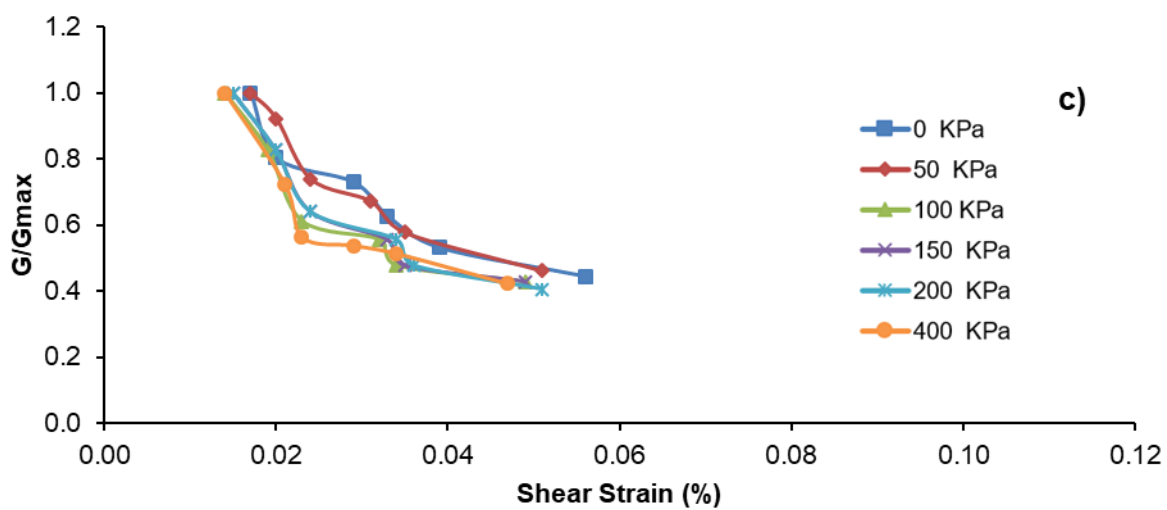
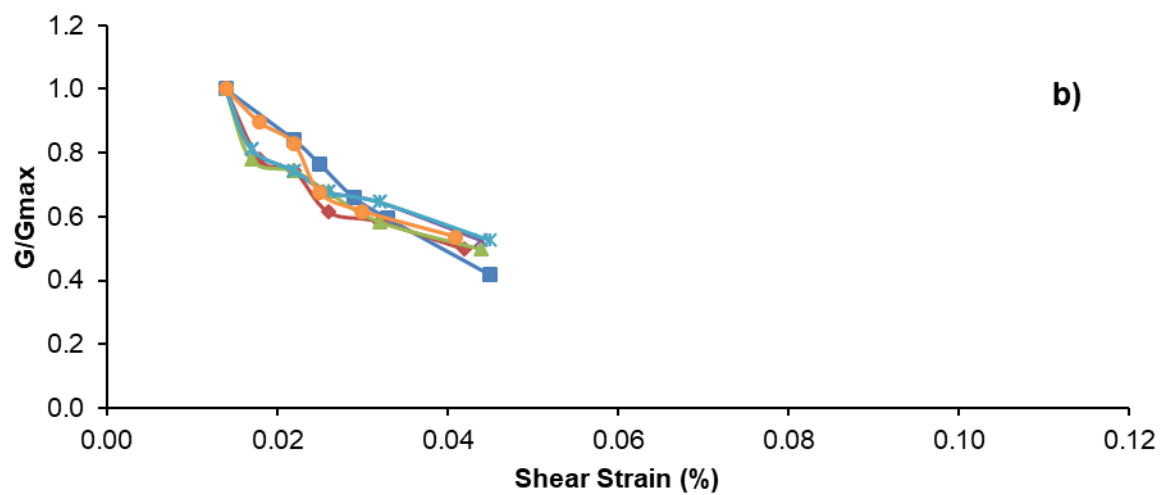
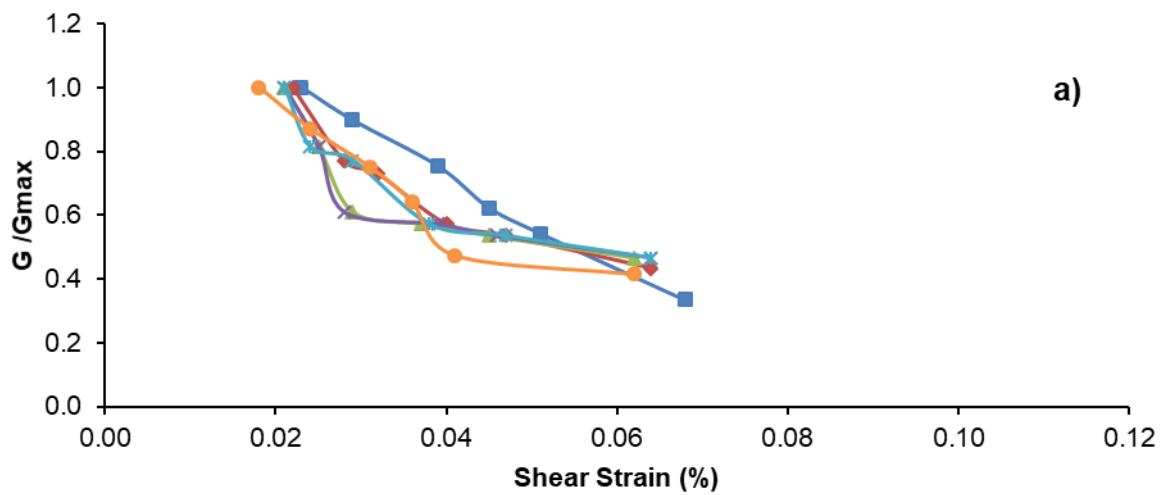
Figura 45: Relación de amortiguamiento respecto al tiempo. a) 0 KPa b) 50 KPa c) 100 KPa d) 150 KPa e) 200 KPa f) 400 KPa. **Nota:** Elaboración propia

5.3.3 Normalización del Módulo. En la Tabla 17 se resume la normalización o degradación del módulo de corte tomando como valor máximo obtenido para 4 pfs de torque. Se evidencia un cambio en el comportamiento en función del tiempo de curado ver Figura 46, a medida que el tiempo incrementa la muestra presenta mayor deformación con una degradación más baja, representado en la disminución de la relación $G/G_{\text{máx.}}$.

Tabla 17
Normalización módulo de corte $G/G_{\text{máx}}$

Presión de confinamiento (KPa)	Torque (pfs)	Días de curado				
		0S	0	30	60	90
0	4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	5	0.90	0.84	0.80	0.82	0.63
	6	0.75	0.77	0.73	0.62	0.58
	7	0.62	0.66	0.63	0.53	0.49
	8	0.54	0.59	0.53	0.39	0.39
	10	0.34	0.42	0.44	0.24	0.29
50	4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	5	0.77	0.78	0.92	0.76	0.62
	6	0.73	0.74	0.74	0.62	0.51
	7	0.57	0.62	0.67	0.45	0.39
	8	0.54	0.58	0.58	0.36	0.28
	10	0.43	0.50	0.46	0.20	0.23
100	4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	5	0.81	0.78	0.83	0.82	0.74
	6	0.61	0.74	0.61	0.53	0.61
	7	0.57	0.68	0.56	0.42	0.49
	8	0.54	0.58	0.48	0.32	0.41
	10	0.47	0.50	0.43	0.20	0.29
150	4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	5	0.81	0.81	0.83	0.76	0.62
	6	0.61	0.74	0.64	0.53	0.51
	7	0.57	0.68	0.56	0.42	0.39
	8	0.54	0.65	0.48	0.36	0.33
	10	0.47	0.53	0.43	0.21	0.23
200	4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	5	0.81	0.81	0.83	0.82	0.83
	6	0.77	0.74	0.64	0.53	0.68
	7	0.57	0.68	0.56	0.36	0.46
	8	0.54	0.65	0.48	0.32	0.39
	10	0.47	0.53	0.40	0.21	0.29
400	4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	5	0.87	0.90	0.72	0.69	0.91
	6	0.75	0.83	0.56	0.57	0.51
	7	0.64	0.67	0.54	0.49	0.48
	8	0.47	0.62	0.51	0.35	0.42
	10	0.42	0.54	0.42	0.21	0.29

Nota: Elaboración propia



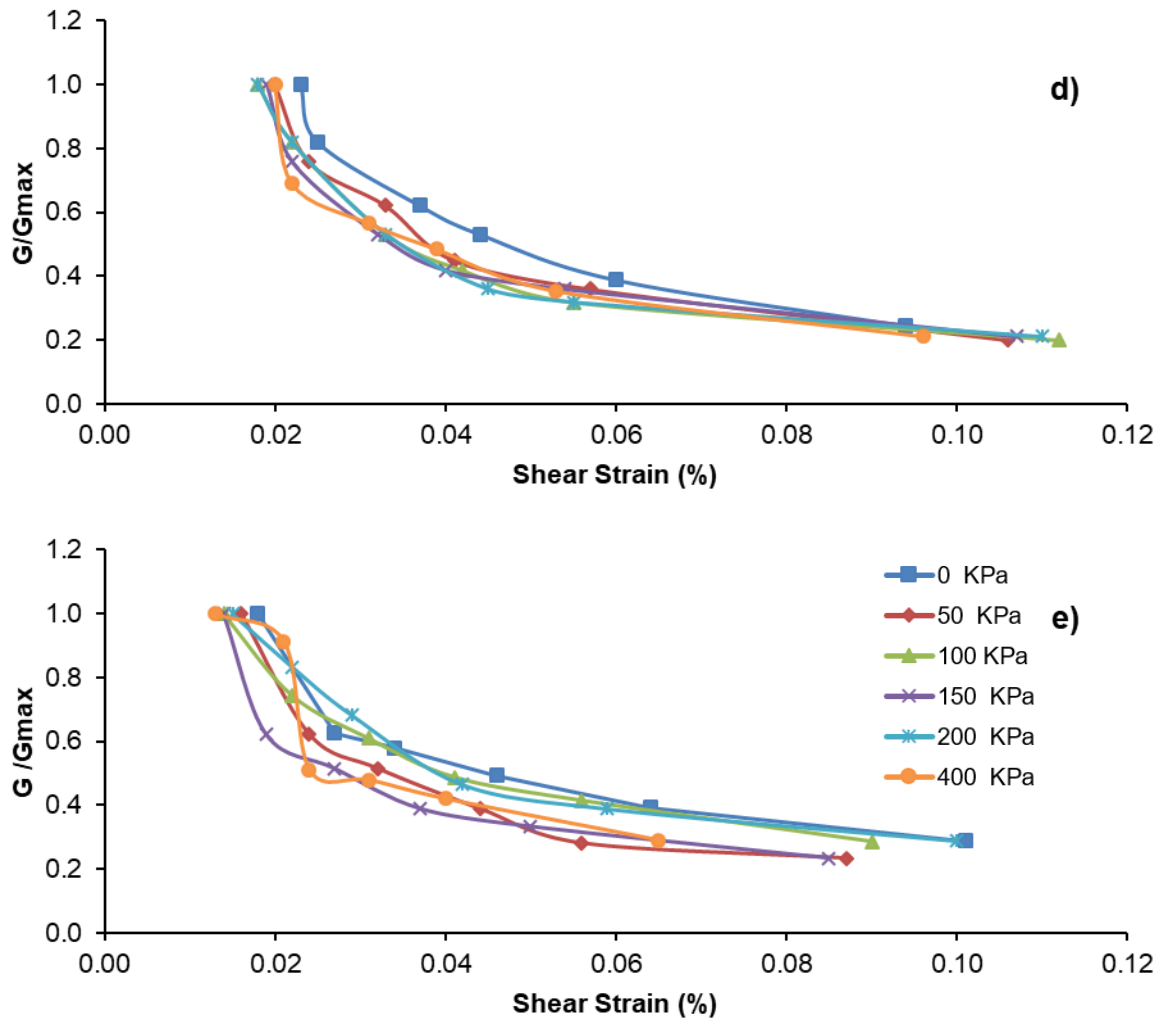


Figura 46: Normalización módulo de corte según presión de confinamiento. a) M-0S b) M-0 c) M-30 d) M-60 e) M-90 **Nota:** Elaboración propia

En la Figura 47 el comportamiento del $G/G_{\text{máx}}$ respecto a la deformación manifiesta un resultado similar en función de la presión de confinamiento para 0 KPa y 400KPa; a 0 días presenta una tendencia lineal y a medida que incrementa el tiempo de maduración el comportamiento cambia su forma a una curva decreciente. Respecto a la muestra patrón, la degradación del módulo es constante para las dos muestras evaluadas a 0 días acompañada de un aumento de la deformación para la muestra adicionada con aceite.

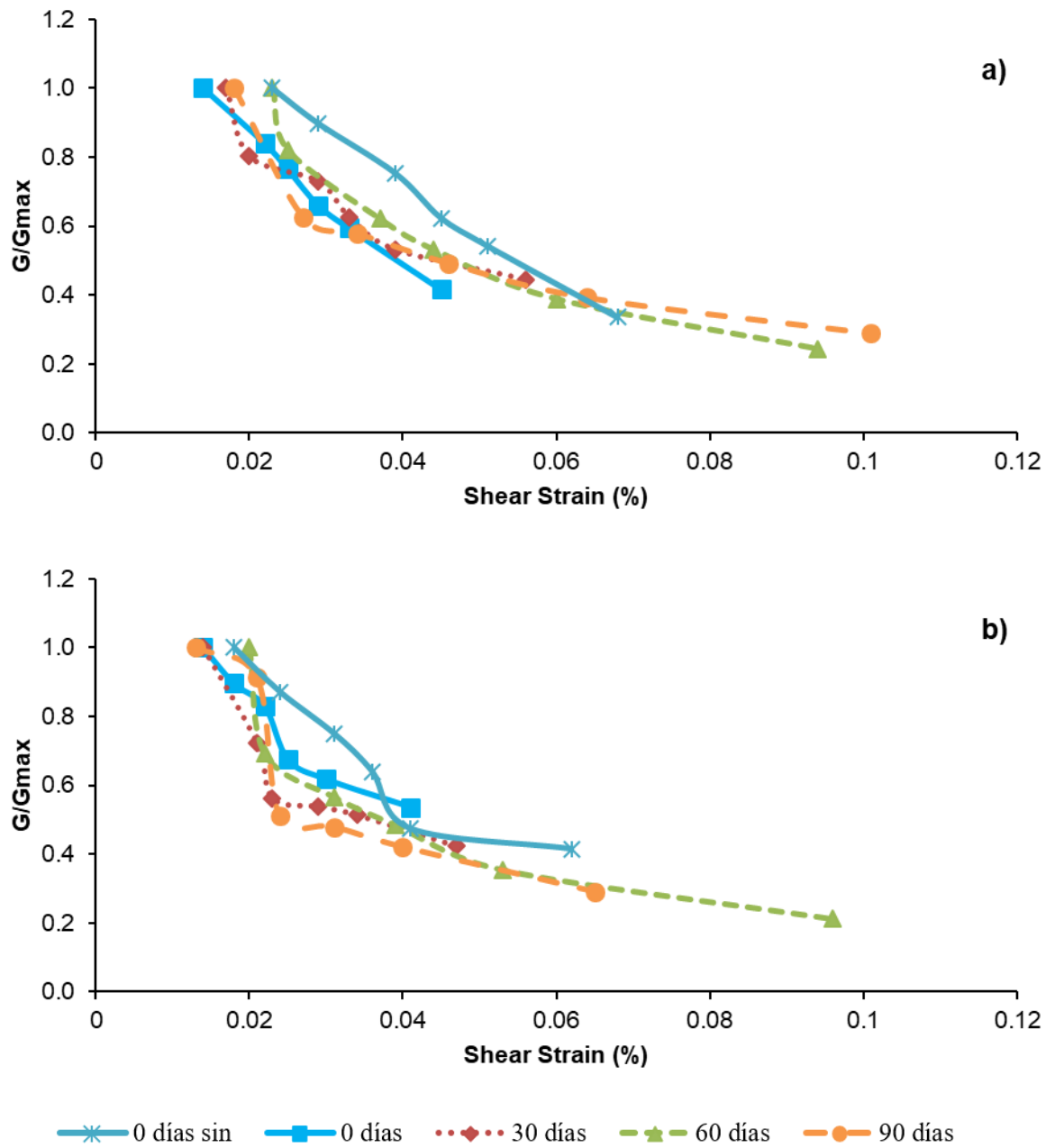


Figura 47: Normalización del módulo de corte respecto al tiempo. a) 0 KPa b) 400 KPa. **Nota:** Elaboración propia

5.3.4 Modelos de Correlación. Para comprender el comportamiento tensión-deformación del granular seleccionado y realizar el mejor ajuste funcional que ayude a predecir las curvas de degradación y amortiguamiento, a continuación, se analizan los datos obtenidos mediante dos modelos no lineales.

5.3.4.1 Hiperbólico. Este modelo representa la relación tensión-deformación mediante una curva hiperbólica propuesta inicialmente por Harding & Drnevich (1972) y ajustada por Darandeli (2001) bajo la Ecuación 35 con base en pruebas ejecutadas sobre granulares:

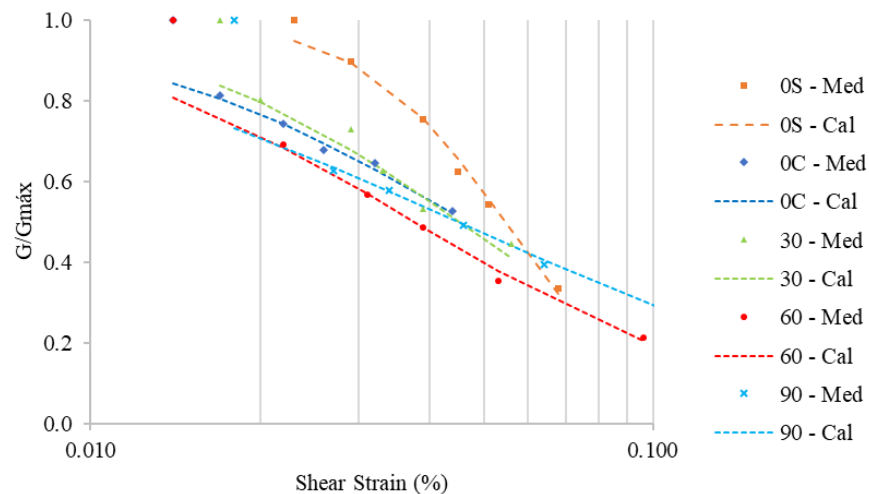
$$\frac{G}{G_{m\acute{a}x}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^\alpha} \quad \text{Ecuación 35}$$

donde α representa un coeficiente de curvatura y γ_r la deformación de referencia para una relación $(G/G_{m\acute{a}x}) = 0.5$. Debido a que α se considera independiente de la presión de confinamiento se escogieron los mejores ajustes entre las presiones de confinamiento para cada día de curado. En la Tabla 18 se muestran los coeficientes de curvatura para las edades de control, teniendo R^2 superiores a 0.98.

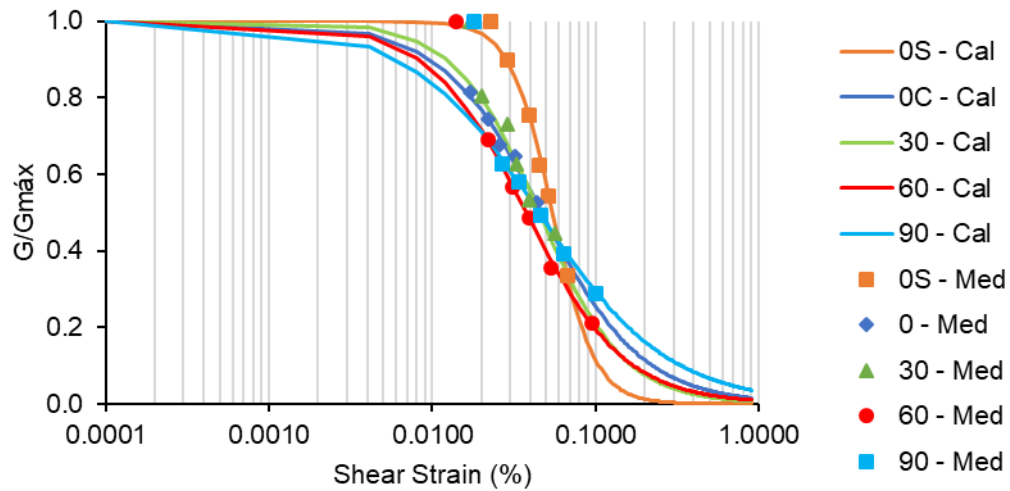
Tabla 18
Constantes de ajuste para el modelo hiperbólico

Muestra	α	R^2
0S	3.372	0.997
0C	1.405	0.994
30	1.679	0.976
60	1.449	0.997
90	1.096	0.999

Nota: Elaboración propia



a)



b)

Figura 48: Ajuste por modelo hiperbólico a) Relación modelo y mediciones b) Resultado modelación. **Nota:** Elaboración propia

En la Figura 48 (b) se observa que la degradación del módulo de corte tiene un punto de inflexión aproximadamente a 0.06% con el siguiente comportamiento: para deformaciones inferiores presenta una mayor degradación con el incremento del tiempo de curado, mientras que a deformaciones superiores presenta un comportamiento inverso.

5.3.4.2 Drnevich. El modelo propuesto por Drnevich (2017) plantea una relación entre los valores del módulo de rigidez y amortiguamiento obtenidos para cualquier nivel de deformación mediante dos expresiones hiperbólicas que incluyen una tensión de corte de referencia con el fin de minimizar el efecto de la presión de confinamiento. El modelo se divide en tres pasos:

- Cálculo del amortiguamiento relativo mediante la relación entre el amortiguamiento mínimo ($D_{\min}$) y máximo ($D_{\max}$) y el módulo de corte máximo ($G_{\max}$) Ecuación 36

$$\frac{D - D_{\min}}{D_{\min} - D_{\max}} = 1 - \frac{G}{G_{\max}} \quad \text{Ecuación 36}$$

Normalización de la deformación a través de (γ_{ref}) equivalente a $\tau_{\max}/G_{\max}$. Para la determinación $\tau_{\max}$ se requiere la utilización de la Ecuación 37 y Ecuación 38, donde las constantes B y m corresponden a las variables de mejor ajuste.

$$\tau = G\gamma \quad \text{Ecuación 37}$$

$$\tau = \frac{\tau_{m\acute{a}x} B \left(\frac{\gamma}{\tau_{m\acute{a}x}/G_{m\acute{a}x}} \right)^m}{1 + B \left(\frac{\gamma}{\tau_{m\acute{a}x}/G_{m\acute{a}x}} \right)^m} \quad \text{Ecuación 38}$$

- Cálculo de las constantes A y n a través de las Ecuación 39 y Ecuación 40 las cuales comparten las mismas variables desconocidas:

$$\frac{G}{G_{m\acute{a}x}} = \frac{1}{1 + A \left(\frac{\gamma}{\gamma_{ref}} \right)^n} \quad \text{Ecuación 39}$$

$$\frac{D - D_{min}}{D_{min} - D_{m\acute{a}x}} = \frac{A \left(\frac{\gamma}{\gamma_{ref}} \right)^n}{1 + A \left(\frac{\gamma}{\gamma_{ref}} \right)^n} \quad \text{Ecuación 40}$$

- Finalmente, el amortiguamiento se determina resolviendo la ecuación para D con la Ecuación 41:

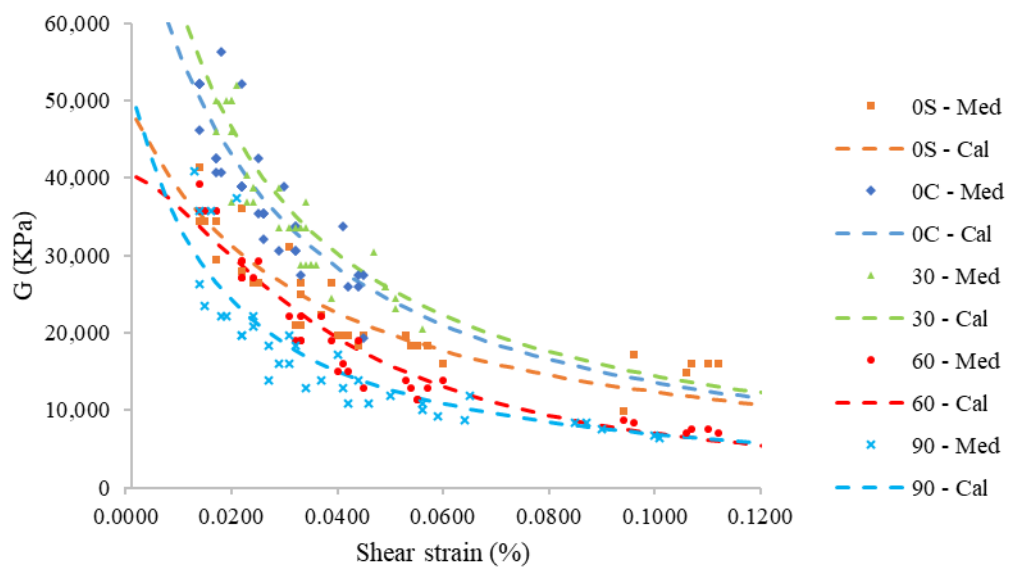
$$D = D_{min} + (D_{m\acute{a}x} - D_{min}) \frac{A \left(\frac{G_{m\acute{a}x} \gamma}{\tau_{m\acute{a}x}} \right)^n}{1 + A \left(\frac{G_{m\acute{a}x} \gamma}{\tau_{m\acute{a}x}} \right)^n} \quad \text{Ecuación 41}$$

En la Figura 49 se comparan los resultados obtenidos mediante la aplicación de la Ecuación 39, Ecuación 40 y Ecuación 41 con el equipo de columna resonante, limitando el esfuerzo máximo de corte a 0.75 MPa a partir de los resultados de compresión inconfiada, siendo apreciable: la disminución del G cuando el tiempo de curado es mayor a partir de los 30 días; a pesar de que los datos presentan una dispersión considerable, el amortiguamiento arrojó un valor máximo de 23% con tendencia a ser homogéneo para deformaciones superiores a 0.1%; para la normalización de módulo de rigidez, todas las curvas se encuentran entre el extremo superior, 0 días con adición, y extremo inferior, 90 días, exceptuando la muestra de 60 días donde se evidencia una degradación mayor. Los coeficientes de ajuste se encuentran en la Tabla 19.

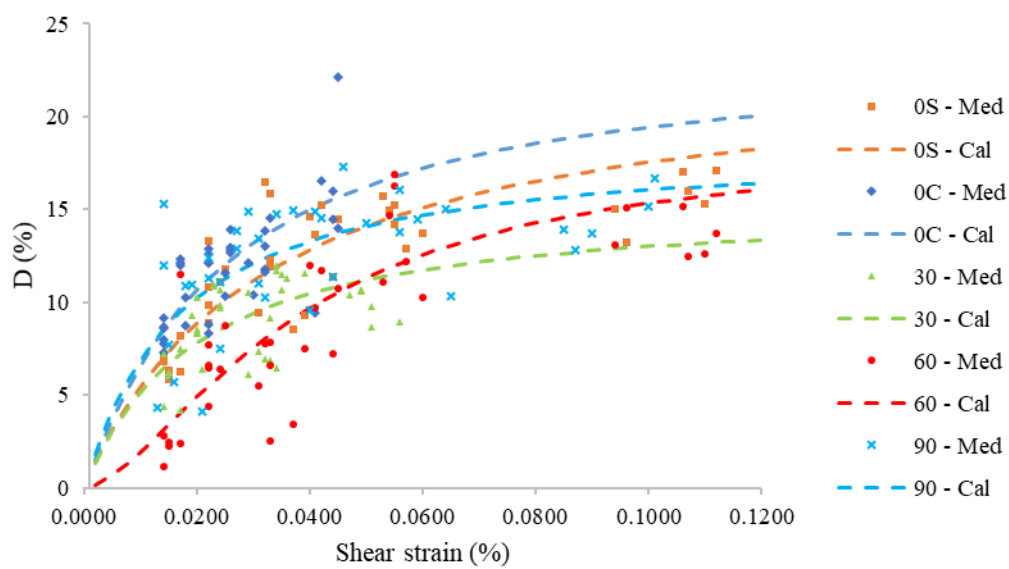
Tabla 19
Constantes modelo Drnevich

Muestra	G _{máx} (KPa)	D _{mín} (%)	D _{máx} (%)	A	n
0S	50494	0.000	23.212	0.458	1.000
0C	78356	0.000	23.519	0.372	1.086
30	94720	0.000	15.342	0.397	1.040
60	40519	0.000	18.549	0.317	1.608
90	54361	0.000	18.379	0.844	1.058

Nota: Elaboración propia



a)



b)

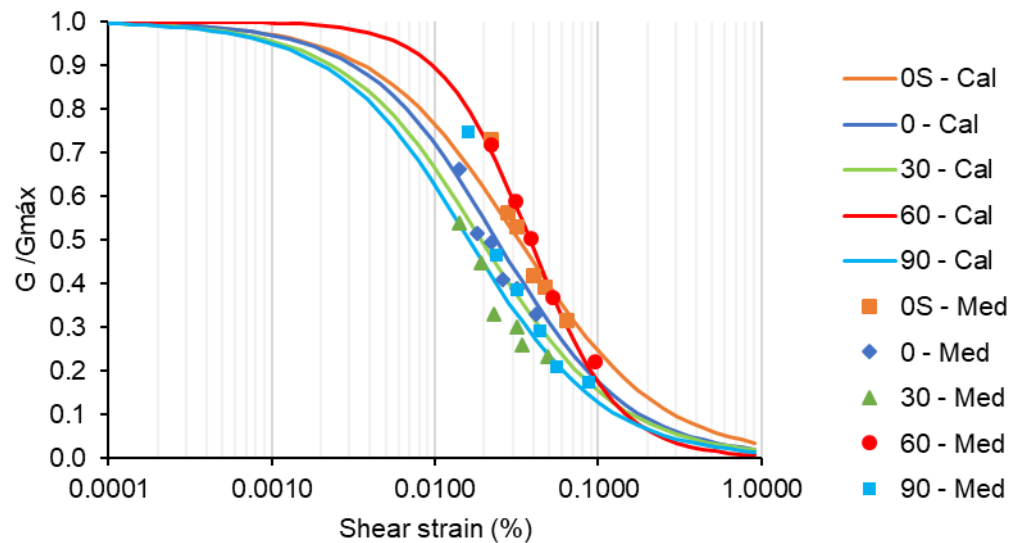


Figura 49: Modelo de ajuste Drnevich a) Deformación vs módulo de corte b) Deformación vs amortiguamiento c) Normalización del módulo de corte. **Nota:** Elaboración propia

5.4 MICROSCOPIO DE BARRIDO ELECTRÓNICO (SEM)

Con el fin de verificar los cambios en la microestructura del material se realizaron ensayos en el microscopio de barrido electrónico (SEM) para todas las edades de control en el equipo Phenom ProX, el cual cuenta un rango de magnificación de hasta 130,000 veces, voltajes entre 5 y 15 kV, resolución hasta 10 nm y análisis por EDS (Energy Dispersive Spectrometer). La Figura 50 muestra imágenes SEM del material ensayados en columna resonante para aumentos 1,000, 5,000 y 15,000 veces con escala de referencia 80, 10 y 5 μm respectivamente. A 0 días sin adición su puede ver la disposición de los agregados conglomerados por la matriz arcillosa en forma laminar y poco espacio entre las partículas debido a los efectos del agua absorbida, por el contrario, para la muestra con adición evaluada a la misma edad, se identifica la acción del aceite desestabilizando electroquímicamente la partícula de arcilla, es decir, iniciando el proceso de separación de enlaces y rompiendo las fuerzas de atracción molecular. Para 30 días se aprecia parte granular expuesta sin recubrimiento de matriz cementante; finalmente a 90 días, se evidencia una estructura heterogénea, fisuras a lo largo de las terrones y discontinuidades o poros abiertos durante la deshidratación del material combinado con la reacción final del aceite sulfonado. Este fenómeno de los vacíos se debe a que no existe una acomodación de partículas y conserva la estructura granular dada por la compactación inicial.

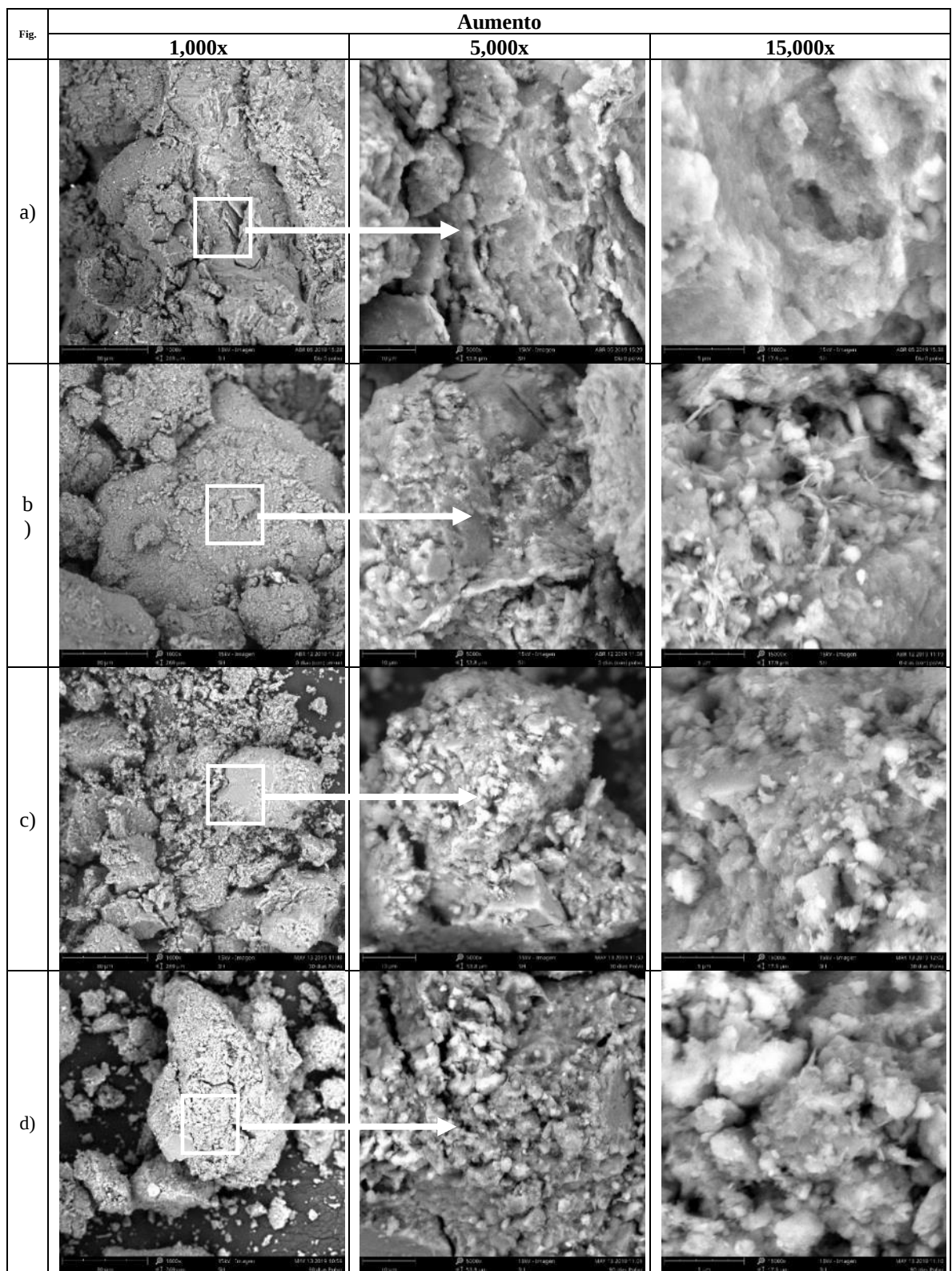


Figura 50: Capturas microscopio electrónico de barrido. a) 0 días sin b) 0 días c) 30 días d) 90 días

El comportamiento del material curado con aceite sulfonado se describe:

- a) 0 días: la partícula de arcilla en su estado inicial presenta una estructura uniforme continúa de forma laminar. La matriz tiene un tamaño de partícula menor a 2 micrómetros visible a 15,000x, esta compone la parte cementante del material y es la encargada de aportar la cohesión de la briqueta.
- b) 30 días: al incorporar el aceite sulfonado al 2% disuelto en agua, desde su aplicación inicia su efecto disgregando los enlaces en la partícula de arcilla y separando la estructura laminar visto a 15,000x con una distribución homogénea sin concentración de material laminar.
- c) 60 días: las partículas de arcilla manifiestan un comportamiento heterogéneo en tamaño agrupándose en forma de bolas de algodón dispersas en la matriz. Se presenta un comportamiento disgregado y aleatorio de la arcilla en su estructura física, la acomodación de estas partículas no obedece a un patrón específico apreciable a 10,000x y 15,000x.
- d) 90 días: la reacción del aceite sulfonado con la arcilla estabilizó eléctricamente su comportamiento, se aprecian las partículas separadas de su estructura e independientes sin una matriz que las una, con un tamaño promedio de un micrómetro, se libera parte del contenido de humedad con el secado de la briqueta por estar expuesto a radiación solar lo cual produce un incremento en la rigidez del espécimen, esto se verifica con un aumento en la velocidad de onda alrededor del 20% (Tabla 15) y aumento de la resistencia a la compresión inconfiada de la muestra a 90 días respecto a la inicial.

6 CONCLUSIONES

Las propiedades dinámicas de los suelos y materiales granulares han sido ampliamente estudiadas a nivel mundial mediante equipos de laboratorio como bender elements, triaxial cíclico y columna resonante, debido a que son esenciales para el análisis del comportamiento ante cargas cíclicas asociadas al tránsito de vehículos en un pavimento y durante un movimiento telúrico. Sin embargo, son escasas las investigaciones referentes a gravas y arenas adicionadas con productos utilizando el equipo de columna resonante comparadas con los existentes para la estabilización y mejoramiento de arcillas de diferentes orígenes mediante la adición de cemento y sus derivados, cenizas, fibras, productos químicos, entre otros, y su influencia con el paso del tiempo. En Colombia, aunque existen algunos referentes especialmente en arcillas y suelos de subrasante, no hay estudios que involucren el equipo de columna resonante con la estabilización y curado de materiales granulares a través del tiempo.

En esta investigación se estudió el efecto de la adición de aceite sulfonado a través del tiempo en las propiedades dinámicas, módulo de corte (G) y amortiguamiento (D), de un material granular conocido como B-200 a través del equipo de columna resonante, contribuyendo hacia el entendimiento del comportamiento de materiales comúnmente empleados en las obras de ingeniería y su respuesta ante la incorporación de productos orientados hacia mejores alternativas de utilización.

La incorporación de aceite sulfonado en un material granular con presencia de arcilla generó un cambio favorable en el comportamiento del material ya que reduce el efecto cohesivo y propiedades expansivas de la fracción fina y permite la acomodación de partículas de la fracción gruesa representada en una degradación más lenta del módulo de rigidez frente a la muestra patrón soportando con el aumento del tiempo de curado mayores deformaciones, siendo recomendable su implementación en el mejoramiento de materiales. Sin embargo, este estudio no tuvo en cuenta el cambio del contenido de humedad durante y después del proceso de curado por lo que se requiere profundizar esta variable. Los resultados de la investigación se resumen a continuación:

El material de estudio clasificó como grava arcillosa (GC) evaluado por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y como un suelo tipo A-7-6 por la American Association of State Highway and Transportation Officials. Los resultados evidencian un potencial de expansión medio teniendo en cuenta que se trata de un material granular utilizado para estructuras viales como terraplenes, con valores de límite líquido de 45 e índice de plasticidad igual a 20, expansión libre en probeta de 30%, CPV clasificado entre 2 y 4 (marginal), índice de hinchamiento de 0.1306 MPa y cambio volumétrico de 16.5. La alta actividad para la fracción fina refleja que el material tiene capacidad de ionizar la molécula de agua y por consiguiente producir un comportamiento nocivo. Este material no es recomendable para conformar estructuras viales sin antes estabilizar su fracción fina.

Durante la metodología experimental, debido a las características geométricas requeridas por el equipo de columna resonante y por el tipo de material, fue necesario el diseño y fabricación de un molde en acero galvanizado de 2" de diámetro y 4" de longitud con apertura lateral y un collar de extensión de aproximadamente 3" ajustable a la base principal, con el fin de realizar la compactación por el método denominado presión variable volumen constante a una velocidad de 10 mm/ min. Adicionalmente, se requirió la fabricación de los accesorios inferior y superior que entran en contacto con el espécimen para la aplicación de carga torsional debido a que el equipo no contaba con implementos para diámetros de 2"; posteriormente se realizó la calibración del equipo mediante el procedimiento descrito en el anexo C y la evaluación previa de briquetas denominadas muestras de sacrificio.

La influencia del aceite sulfonado se manifiesta principalmente en un cambio microestructural del material con la pérdida de humedad y el aumento del tiempo; con el proceso de curado se aprecian las partículas de arcilla separadas de su estructura e independientes sin una matriz que las una con un tamaño promedio de un micrómetro, para la edad de 90 días, produciendo un incremento en la rigidez del espécimen, esto se verifica con un aumento en la velocidad de onda e incremento de la resistencia a la compresión inconfiada. Para las muestras evaluadas a 0 días, con humedad óptima, la fricción entre partículas y las fuerzas electroquímicas, asociadas a la matriz fina, aportan resistencia durante la sollicitación de esfuerzos, mientras que, para las muestras de 30, 60 y 90 días, las fuerzas internas de cohesión se ven influenciadas por la ionización de la molécula de arcilla y su estabilización, obligando a la reorganización de partículas. Este comportamiento se traduce en una disminución del módulo de rigidez aproximada del 60% y 40 % para los especímenes evaluados a 0 días con y sin adición de aceite respectivamente hasta el periodo final de curado a 90 días.

El material presenta dos comportamientos característicos para el módulo de rigidez diferenciados en el día 30: un aumento del 65% en promedio respecto a la muestra patrón sin adición de aceite sulfonado, en contraste, el G se mantiene constante comparado con la muestra a 0 días estabilizada; a partir de allí el módulo decae con el aumento del tiempo de maduración, cercano al 50% respecto a los 90 días, acompañado por un incremento en las deformaciones. Para todas las muestras evaluadas, el aumento de la presión de confinamiento se traduce en un mayor módulo de rigidez.

Las curvas de normalización $G/G_{\text{máx}}$ demuestran una degradación más rápida del módulo para las muestras a 0 días comparadas con las estabilizadas; así mismo, los especímenes sometidos a curado (30, 60 y 90 días) tienen una menor degradación con un aumento de la deformación a mayor tiempo de maduración.

El amortiguamiento presenta un comportamiento heterogéneo para las edades de 30, 60 y 90 a diferencia de las muestras evaluadas a 0 días, con y sin adición de

aceite, donde la característica es el incremento del amortiguamiento con el aumento de la deformación. Las diferencias encontradas están asociadas a la heterogeneidad del material y al proceso de acomodación de partículas durante la aplicación de cargas.

Se aplicaron modelos de ajuste basados en el comportamiento esfuerzo deformación no lineal con el fin de parametrizar los resultados y permitir la utilización en futuros estudios. El modelo hiperbólico propuesto por (Darandeli, 2001) entregó el mejor ajuste con correlaciones superiores al 0.98 y coeficientes de curvatura (α) de 3.372, 1.405, 1.679, 1.449 y 1.096 para las edades de 0S, SC, 30, 60 y 90 días respectivamente. Por otro lado, el modelo propuesto por (Drnevich, 2017), el cual permite introducir variables importantes como amortiguamiento mínimo ($D_{\min}$) y máximo ($D_{\max}$) y esfuerzo máximo, arroja valores entre 0.458 y 0.844 para la constante "A", entre 1 y 1.608 para la constante "n" y $D_{\max}$ entre 18.38 y 23.52%; el análisis en este modelo se vio afectado por la variación en los resultados de amortiguamiento, los cuales no reflejaron una relación directa respecto al tiempo de curado. Respecto a la normalización del módulo, el primer modelo demuestra una degradación más rápida del módulo para la muestra de 0 días de referencia comparado con las que están estabilizadas, el comportamiento hasta los 30 días presenta una tendencia diferente a 60 y 90 días; el segundo modelo, todas las curvas se encuentran entre el extremo superior, 0 días con adición, y extremo inferior, 90 días, exceptuando la muestra de 60 días donde se evidencia una degradación mayor.

En el ensayo de microscopio de barrido electrónico se aprecia que la matriz de forma laminar de arcilla es disgregada por el efecto del aceite sulfonado a partir de los primeros días de aplicación, después del treintavo día de curado no se manifiesta un cambio representativo en su acomodación física. La doble capa difusa es disminuida por la reducción del enlace eléctrico entre la arcilla y la molécula de agua, se aprecia en las imágenes de 30, 60 y 90 días como las partículas de arcilla se encuentran dispersas unas de otras dejando microporos y discontinuidades en la estructura inicial que hacía parte de la matriz cementante.

7 RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones estudiar la variación de humedad en el módulo de corte y amortiguamiento de un material con el ensayo de columna resonante, la liberación de vacíos en la estructura de material ocupados por presencia de agua modifica la respuesta dinámica del suelo disminuyendo la velocidad de onda, y por consiguiente puede modificar la resonancia sin tener que aplicar procesos de reacomodación de partículas internas.

Revisar la metodología de compactación estática considerando cambios en la humedad óptima debido a que el ensayo optimiza la aplicación de energía. Limitar la carga y la velocidad de aplicación en el proceso de compactación asociado a equipos de construcción que suministren energías semejantes a las usadas en obra.

Revisar ensayos para evaluar la respuesta dinámica en materiales granulares con presencia de arcilla estabilizados utilizando diferentes agentes como cal, cemento, polímeros para caracterizar la respuesta del material con diferentes escenarios de estabilización.

Variar los porcentajes de adición de aceite sulfonado respecto a la humedad óptima de compactación y medir su influencia en el módulo de rigidez y amortiguamiento.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afshari, K., Hashash, Y. M., & Stewart, J. P. (Octubre de 2014). *Guidelines for Performing Hazard-Consistent One-dimensional Ground response Analysis for Ground Motion Prediction*. University of California, Department of Civil and Environmental Engineering. Berkeley: University of California.
- Araya Contreras, S. e. (2017). Medición de parámetros dinámicos de arena con finos mediante columna resonante. Santiago de Chile, Chile.
- Barchiesi, A. M., Fernández, F., & Placci, H. M. (2010). Construcción de una Columna Resonante y primeras mediciones. Mendoza, Argentina. Recuperado el 2019
- Briaud, J. L. (2013). *Introduction to Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Sils*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Camacho Tauta, J., Reyes Ortiz, O., & Mayorga Antonilez, C. (2008). Curado natural y acelerado de una arcilla estabilizada con aceite sulfonado. *Ingeniería & Desarrollo*, 24.
- Camacho Tauta, J. (2011). Evaluation of the small-strain stiffness of soil by non-conventional dynamic testing methods. Lisboa.
- Camacho Tauta, J. F., Molina Gómez, F. A., & Reyes Ortiz, Ó. J. (2014). Ensayo combinado columna resonante - bender elements para evaluar la rigidez del suelo.
- Darandeli, B. M. (2001). *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves*. Texas: University of Texas at Austin.
- Das, B. M. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. México: THOMSON LEARNING.
- Díaz Cruz, L. F., & Bohórquez Poveda, J. A. (2013). Efectos del aceite sulfonado en el grado de compactación de sub bases granulares arcillosas. Bogotá, Cundinamarca, Colombia.
- Drnevich, V. P. (2017). A relationship between modulus and damping provides for simple, unified modeling of both. *Geotechnical Frontiers*.
- Ehsani, M., Shariatmadari, N., & Mirhosseini, S. M. (2015). Shear modulus and damping ratio of sand-granulated rubber mixtures. *Journal of Central South University*, 9.
- El Mothar, C. S., Drnevich, V. P., Santagata, M., & Bobet, A. (14 de Mayo de 2013). Combined resonant column and cyclic triaxial test for measuring undrained shear modulus reduction of sand with plastic fines. *Geotechnical Testing Journal*, 36(4), 9.
- Estavías. (2008). *Aceite Naftalénico sulfonado estabilizador electroquímico de arcillas*. Bogotá: Estavías.
- Fei, K., & Xu, J. (2017). Dynamic Behavior of Clay-Aggregate Mixtures. *Hindawi. Advances in Materials Science and Engineering*, 11.
- Geotechnical Consulting and Testing Systems. (2017). Resonant Column / Torsional Shear testing system and cats module. Arizona, Estados Unidos: Geotechnical Consulting and Testing Systems.
- Hardin, B. O., & Richart, F. E. (1963). Elastic wave velocities in granular soils:

- measurement and parameter effects. *Journal of Solis Mechanics & Foundations*.
- Harding, B. O., & Drnevich, V. P. (1972). Shear modulus and damping in soils. *Journal of the Soil Mechanics Foundation, ASCE*, 667-692.
- Hydram LTDA. (Agosto de 2018). *Hydram*. Obtenido de Estabilizador electroquimico de arcillas: <https://hydramltda.com/geostab-2/>
- Instituto de Desarrollo Urbano. (30 de Abril de 2018). Listado de proveedores 2018. Bogotá, Colombia.
- Ipohorsky, M., & Bozzano B., P. (2013). Microscopía electrónica de barrido en la caracterización de materiales. *Ciencia e investigación*, 11.
- Ishibashi, I., & Zhang, X. (Marzo de 1993). Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils and foundations*, 33(1), 182-191.
- Ishihara, K. (1996). *Soil behaviour in Earthquake Geotechnics* (Vol. 46). New York: Oxford University Press.
- Kim, A.-r., Chang, I., Cho, G.-C., & Shim, S.-H. (2016). Strength and Dynamic Properties of Cement-Mixed Korean Marine Clays. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 12.
- Koszela-Marek, E. (2015). SEM Investigations of Clay Subjected to 200 MPa Pressure. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 3-6.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Washington: Prentice Hall.
- Kumar, K. (2008). *Basic Geotechnical Earthquake Engineering*. Piani : New Age International Publishers.
- Leoni, A. J. (2015). Propiedades físicas de los suelos. *Ing. Leoni & Asociados*, 90.
- Lopez, L. (2010). Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas. *Revista Iberoamericana de polímeros*, 10.
- Lucero Solis, Y. (Enero de 2017). Propiedades y modelos dinámicos para las arcillas del ex lago de Texcoco. Ciudad de México.
- Menq, F.-Y. (Mayo de 2003). Dynamic properties of sandy and gravelly soils. Austin, Texas.
- National Lime Association. (2004). *Manual de estabilización de suelo tratado con cal*. Arlington Virginia: National Lime Association.
- Okur, V., & Akinci, K. (2018). Dynamic behavior of soft subgrade soils treated with Boron waste. (A. Gloria, Ed.) *Hindawi. Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 10. Recuperado el 04 de Agosto de 2019, de <https://doi.org/10.1155/2018/2390481>
- Pineda, J. A., Cruz, J. A., & Ávila, P. Y. (Junio de 2018). Dynamic Behavior of Naturally Desiccated Clays via Resonant Column Testing at Constant Water Content Conditions. 11.
- Reyes Ortiz, O., Porras S., M., & Rodríguez A., Y. (2001). Empleo de aceite quemado para mejorar las propiedades mecánicas de bases y subbases granulares. *Ciencia e Ingeniería Neogradina*.
- Rodríguez, J. A. (2005). *Dinámica de Suelos*. Ciudad de México : Limusa.
- Saride, S., & Dutta, T. T. (2016). Effect of Fly-Ash stabilization on stiffness modulus degradation of expansive clays. *Journal of Materials in Civil Engineering*.

- American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 12.
- Sas, W., Gabrys, K., Gluchoswski, A., & Szymanski, A. (September de 2014). The influence of dynamic loading on road pavement constructions and associate road structures. *XV Danube- European Conference on Geotechnical Engineering*, 7.
- Seco, A., Ramírez, F., Miqueleiz, B., & García, B. (Enero de 2010). Stabilization of expansive soils for use in construction. *Applied Clay Science*, 5.
- Solminihaç T., H., Echeverría G., G., & Thenoux Z., G. (2012). estabilización química de suelos: aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos. *Ingeniería de construcción*.
- Spencer, L. M., Rix, G. J., & Gallagher, P. M. (Junio de 2007). Dynamic properties of colloidal silica gel and sand. *4th International Conference on Earthquake Geotechnical engineering*, 10.
- Ta'negonbadi, B., & Noorzard, R. (Marzo de 2017). Stabilization of clayey soil using lignosulfonate. *Transportation Geotechnics*, 10.
- Tovar Borbón, D. F., & Vergara Díaz, J. J. (2016). Determinación de los módulos dinámicos para un suelo lacustre de Bogotá mediante el ensayo triaxial cíclico. Bogotá, Colombia.
- Tsai, P.-H., & Ni, S.-H. (Octubre de 2012). Effects of types of additives on dynamic properties of cement stabilized soils. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 131-144. Recuperado el 4 de Agosto de 2019
- Universidad de Antioquia. (2016). *Estudio, selección y estructuración de sistemas tecnológicos alternativos para estabilización y tratamiento de la red vial secundaria departamental. desarrollo de pruebas piloto en subregiones de Antioquia*. Universidad de Antioquia , Antioquia . Medellín: Universidad de Antioquia.
- Venkatarama Reddy, B. V., & Jagadish, K. (January de 1993). The static compaction of soil. *Geotechnique*, 337-341.

9 ANEXOS

- A – Ensayos de caracterización material granular cantera INCOMINERÍA
- B – Calibración equipo columna resonante
- C – Resultados experimentales columna resonante
- D – Imágenes microscopio de barrido electrónico