



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**Estudio de la anisotropía de suelos lacustres en un odómetro instrumentado con transductores piezoeléctricos**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**DOCTOR EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA CIVIL – GEOTECNIA  
P R E S E N T A :

**CLAUDIA PAULINA CHAMORRO ZURITA**

TUTOR:  
**DR. EFRAÍN OVANDO SHELLEY**  
INSTITUTO DE INGENIERÍA

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., septiembre de 2020



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. JOSÉ FRANCISCO SÁNCHEZ SESMA  
Secretario: DR. RIGOBERTO RIVERA CONSTANTINO  
1<sup>er</sup>. Vocal: DR. EFRAÍN OVANDO SHELLEY  
2<sup>do</sup>. Vocal: DRA. ALEXANDRA OSSA LOPEZ  
3<sup>er</sup>. Vocal: DR. MARIO FLORES GUZMÁN

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

**TUTOR DE TESIS:**

---

DR. EFRAÍN OVANDO SHELLEY

## **AGRADECIMIENTOS**

La autora expresa su agradecimiento al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, en donde se desarrolló la presente investigación. Al Dr. Efraín Ovando Shelley quien con paciencia y confianza dirigió este trabajo. A los doctores Rigoberto Rivera, José Sánchez Sesma, Alexandra Ossa y Mario Flores, miembros de Comité Tutor por sus valiosas observaciones y sugerencias. A la empresa Ingeniería Experimental S.A de C.V., por la donación de las muestras inalteradas que se usaron, gracias a la gestión del Dr. Osvaldo Flores (IIUNAM). Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-México) y a la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT-Ecuador) por el apoyo.

*A mis padres, Matilde y Edwin, la piedra en la que se han cimentado mis sueños.*

*A mis hijos, Gabriel y Martín, su cariño es el motor que me impulsa a  
dar lo mejor de mí todos los días.*

*A mi esposo, Alfonso, mi mejor amigo y compañero en esta aventura.*

## CONTENIDO

|   |             |
|---|-------------|
| <b>LISTA DE FIGURAS.....</b>  | <b>VIII</b> |
| <b>LISTA DE TABLAS.....</b>   | <b>XI</b>   |
| <b>RESUMEN XII</b>  |             |
| <b>SIMBOLOGÍA .....</b>   | <b>XIII</b> |
| <b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>  | <b>1</b>    |
| 1.1. Presentación del problema .....  | 1           |
| 1.2. Antecedentes .....   | 3           |
| 1.3. Descripción del proyecto.....  | 5           |
| 1.4. Objetivos .....  | 6           |
| <b>2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....</b>   | <b>8</b>    |
| 2.1. Propagación de ondas sísmicas .....  | 8           |
| 2.2. Piezoelectricidad y la técnica de los elementos bender .....                             | 12          |
| 2.3. Anisotropía en el rango lineal – elástico de un medio continuo .....                     | 19          |
| 2.3.1. Ley de Hooke Generalizada .....  | 20          |
| 2.3.2. Casos básicos de simetría elástica .....   | 22          |
| 2.4. Determinación del grado de anisotropía.....  | 27          |
| 2.5. Determinación experimental de las constantes elásticas $E, G, \nu$ .....                 | 28          |
| <b>3. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS EN EL RANGO ELÁSTICO .....</b>                              | <b>30</b>   |
| 3.1. Pruebas de laboratorio.....  | 30          |
| 3.1.1. Columna resonante .....  | 31          |
| 3.1.2. Corte torsional simple .....   | 31          |
| 3.1.3. Prueba de los elementos bender .....   | 32          |
| 3.2. Pruebas de campo.....  | 34          |
| 3.3. Parámetros que inciden en el valor de $G_0$ .....  | 35          |
| <b>4. METODOLOGÍA .....</b>   | <b>37</b>   |
| 4.1. Ensayo de elementos bender en odómetro .....   | 37          |
| 4.1.1. Especificaciones y fabricación de los transductores.....                               | 37          |
| 4.1.2. Evaluación del tiempo de retardo y prueba de funcionamiento de los transductores ..... | 39          |
| 4.1.3. Medición de la velocidad de ondas de corte y compresión .....                          | 41          |
| 4.1.4. Equipo utilizado .....   | 42          |

---

---

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 4.1.5.    | Análisis e interpretación de señales.....  | 44         |
| 4.2.      | Ensayo de columna resonante .....  | 50         |
| 4.2.1.    | Calibración del sistema móvil .....  | 51         |
| <b>5.</b> | <b>MATERIALES EMPLEADOS .....</b>  | <b>60</b>  |
| 5.1.      | Caracterización de las muestras .....  | 61         |
| <b>6.</b> | <b>RESULTADOS EXPERIMENTALES .....</b>   | <b>63</b>  |
| 6.1.      | Pruebas de compresibilidad.....  | 63         |
| 6.1.1.    | Medición de velocidad de onda de corte con elementos bender.....   | 64         |
| 6.2.      | Corrección de velocidades fuera de tendencia. Modelado numérico .....  | 69         |
| 6.2.1.    | Parámetros de entrada .....  | 69         |
| 6.2.2.    | Etapas de cálculo .....  | 71         |
| 6.2.3.    | Resultados .....   | 71         |
| 6.2.4.    | Factor de corrección .....   | 73         |
| 6.2.5.    | Corrección de velocidades fuera de tendencia. Verificación experimental. ....  | 73         |
| 6.3.      | Ensayo de columna resonante .....  | 76         |
| 6.3.1.    | Velocidad de cortante ( $V_s$ ).....   | 77         |
| 6.3.2.    | Representación polar de $V_s$ obtenidas en columna resonante .....   | 80         |
| 6.3.3.    | Análisis y discusión de resultados experimentales .....  | 81         |
| 6.4.      | Determinación del cociente de anisotropía ( $V_{sa}/V_{sv}$ ).....   | 82         |
| <b>7.</b> | <b>EVOLUCIÓN DEL COCIENTE DE ANISOTROPÍA DURANTE LA PRUEBA DE CONSOLIDACIÓN. ....</b>  | <b>89</b>  |
| 7.1.      | Relación entre el cociente de anisotropía y el índice de liquidez .....  | 89         |
| 7.2.      | Relación entre el cociente de anisotropía y el esfuerzo de preconsolidación .....  | 93         |
| 7.3.      | Relación entre el cociente de anisotropía y la relación de preconsolidación (OCR) .....                                      | 95         |
| 7.4.      | Anisotropía estimada para condiciones de campo.....  | 99         |
| <b>8.</b> | <b>ESTIMACIÓN DE LA ANISOTROPÍA A PARTIR DE PROPIEDADES ÍNDICE EN SUELOS LACUSTRES. ....</b>                                 | <b>102</b> |
|           | <b>CONCLUSIONES .....</b>  | <b>110</b> |
|           | <b>REFERENCIAS .....</b>   | <b>114</b> |
|           | <b>ANEXOS .....</b>  | <b>120</b> |
|           | Anexo 1. Fabricación de transductores piezoeléctricos.....   | 121        |
|           | Anexo 2. Velocidad de onda de corte en función del esfuerzo efectivo durante el ensayo de consolidación unidimensional ..... | 130        |
|           | Anexo 3. Anisotropía vs. Esfuerzo efectivo vs. Dirección .....   | 137        |

|   |     |
|---|-----|
| Anexo 4. Perfiles de anisotropía calculados .....   | 144 |
| Anexo 4.1. Perfiles de anisotropía en función del ángulo de incidencia, obtenidos a partir de la correlación con el índice de liquidez (Tabla 13).....            | 145 |
| Anexo 4.2. Perfiles de anisotropía en función del ángulo de incidencia, obtenidos a partir de la correlación con el esfuerzo de preconsolidación (Tabla 14).....  | 151 |
| Anexo 4.3. Perfiles de anisotropía en función del ángulo de incidencia, obtenidos a partir de la correlación con el grado de preconsolidación OCR (Tabla 15)..... | 157 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Propagación de ondas de cuerpo y de superficie.....  | 10 |
| Figura 2. Dipolos en cerámicas piezoeléctricas (a) antes y (b) después de la polarización (González et al., 2009).<br>.....  | 13 |
| Figura 3. Tipo de elementos piezocerámicos: (a) polarizados en x; (b) polarizados en y (Leong, et al., 2009). .  | 14 |
| Figura 4. (a) Elemento de flexión polarizado en x, conectado en serie, b) elemento de flexión polarizado en y,<br>conectado en paralelo (Piezo Systems, Inc., 2008). ..... | 15 |
| Figura 5. (a) Elemento de compresión polarizado en x, conectado en serie, (b) funcionamiento mecánico del<br>elemento de compresión. (Piezo Systems Inc., 2008). .....     | 15 |
| Figura 6. Elementos de flexión (a) emisor, (b) receptor.....   | 17 |
| Figura 7. Elementos de compresión (a) emisor, (b) receptor. (Lings y Greening, 2001).....  | 18 |
| Figura 8. Elementos bender/extender (a) emisor extender / receptor bender, (b) receptor extender / emisor<br>bender. (Lings & Greening, 2001).....                         | 18 |
| Figura 9. Planos normales a los ejes coordenados Cartesianos (x,y,z).....  | 20 |
| Figura 10. Señales típicas de elementos bender usando una función senoidal de pulso. (Bonaf, et al., 2012).....  | 33 |
| Figura 11. Materiales usados como encapsulado final. ....  | 38 |
| Figura 12. Velocidad de propagación de ondas con diferentes materiales de encapsulado. ....  | 39 |
| Figura 13. Determinación del tiempo de retardo para la frecuencia de 2kHz. ....  | 40 |
| Figura 14. Esquema de instrumentación.....   | 43 |
| Figura 15. Polarización de las señales .....   | 43 |
| Figura 16. Criterios de primera deflexión y pico-pico superior e inferior.....   | 45 |
| Figura 17. Criterio de intersección de ondas .....   | 46 |
| Figura 18. Correlación cruzada en el dominio del tiempo.....   | 48 |
| Figura 19. Relación entre frecuencia de excitación y tiempo de arribo .....  | 49 |
| Figura 20. Momento de inercia de cuerpos cilíndricos.....  | 52 |
| Figura 21. Momento de inercia de un cilindro hueco.....  | 53 |
| Figura 22. Momento de inercia de un paralelepípedo .....   | 54 |
| Figura 23. Vista general del sistema móvil de la columna resonante.....  | 56 |
| Figura 24. Placa de aluminio con perforaciones y acelerómetro.....   | 56 |
| Figura 25. Puentes y tornillos.....  | 56 |
| Figura 26. Cabezal.....  | 57 |
| Figura 27. Dibujo a detalle del sistema móvil.....   | 57 |
| Figura 28. Momento de inercia CR-3.....  | 59 |

---

---

|  |    |
|--|----|
| Figura 29. Estratigrafía típica del ex lago Texcoco.....   | 61 |
| Figura 30. Curvas de compresibilidad (ensayo de consolidación unidimensional).....   | 63 |
| Figura 31. Curvas de velocidad de ondas de corte medidas en diferentes direcciones en las etapas de carga, descarga y recarga. ....  | 66 |
| Figura 32. Representación polar de las velocidades de ondas de corte medidas en diferentes direcciones en las etapas de carga, descarga y recarga. ....  | 69 |
| Figura 33. Geometría y condiciones de frontera .....   | 70 |
| Figura 34. Etapas de cálculo.....  | 71 |
| Figura 35. Curvas de consolidación de igual tiempo.....  | 72 |
| Figura 36. Curva de compresibilidad corregida .....  | 72 |
| Figura 37. Distribución de esfuerzos en el interior de la probeta .....  | 73 |
| Figura 38. Esquema de obtención de muestras para determinar la variación de e. ....  | 74 |
| Figura 39. Pesaje de muestras húmedas extraídas al final del ensayo de B.E. ....   | 75 |
| Figura 40. Velocidades corregidas por concentración de esfuerzos.....  | 76 |
| Figura 41. Ensayo de Columna Resonante (izquierda). Extracción de la muestra (centro).Esquema de corte (derecha).....  | 76 |
| Figura 42. Curvas de compresibilidad columna resonante.....  | 77 |
| Figura 43. Representación semilogarítmica de Vs en función del esfuerzo y ubicación del esfuerzo de preconsolidación.....  | 78 |
| Figura 44. Velocidad Vs contra esfuerzo efectivo medida a 0°, 90° y 60° respecto a la horizontal .....   | 79 |
| Figura 45. Representación polar de Vs en función del esfuerzo, columna resonante. ....   | 80 |
| Figura 46. Curvas de compresibilidad.....  | 81 |
| Figura 47. Normalización $V_{S\alpha}$ respecto a $V_{SV}$ .....   | 82 |
| Figura 48. Normalización de las velocidades de ondas de corte medidas en diferentes direcciones en las etapas de carga, descarga y recarga. ....   | 84 |
| Figura 49. Índice de liquidez en función del cociente de anisotropía en el comportamiento general (izquierda), en la rama normalmente consolidada (centro) y en las ramas preconsolidada y descarga-recarga (derecha). Ambos parámetros determinados para cada esfuerzo efectivo aplicado en la prueba de consolidación unidimensional. ....           | 92 |
| Figura 50. Esfuerzo de preconsolidación en función del cociente de anisotropía en el comportamiento general (izquierda), en la rama normalmente consolidada (centro) y en las ramas preconsolidada y descarga-recarga (derecha). Ambos parámetros determinados para cada esfuerzo efectivo aplicado en la prueba de consolidación unidimensional. .... | 96 |

Figura 51. Relación de preconsolidación en función del cociente de anisotropía en el comportamiento general (izquierda) y en las ramas preconsolidada (rojo) y descarga-recarga (azul) (derecha). Ambos parámetros determinados para cada esfuerzo efectivo aplicado en la prueba de consolidación unidimensional.....98

Figura 52. Anisotropía vs. propiedades índice en condiciones de campo: (izquierda)  $I_L$ , (centro)  $\sigma'_p$ ; y, (derecha) OCR.....100

Figura 53. Perfiles de propiedades a correlacionar: (izquierda)  $I_L$ , (centro)  $\sigma'_p$ , y (derecha) OCR. (A partir de Fernández, 2020). .....103

Figura 54. Perfiles de anisotropía determinados a partir de  $I_L$  obtenido en condiciones de campo y de laboratorio.....104

Figura 55. Perfiles de anisotropía determinados a partir de  $\sigma'_p$  obtenido en condiciones de campo y de laboratorio.....105

Figura 56. Perfiles de anisotropía determinados a partir de OCR obtenido en condiciones de campo y de laboratorio.....106

## LISTA DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1. Parámetros que influyen en el valor de $G_0$ (Dobry & Vucetic, 1987).....  | 36  |
| Tabla 2. Velocidad de propagación de ondas en arcilla con diferente material de encapsulado.....  | 38  |
| Tabla 3. Tiempo de retardo del sistema medido en diferentes direcciones.....  | 41  |
| Tabla 4. Diferencia en el tiempo de llegada usando varios criterios.....  | 49  |
| Tabla 5. Porcentaje de error con respecto al método de intersección de ondas.....   | 50  |
| Tabla 6. Propiedades índice de especímenes sometidos a consolidación unidimensional.....  | 61  |
| Tabla 7. Propiedades índice de especímenes ensayados en columna resonante.....  | 62  |
| Tabla 8. Parámetros experimentales para modelado numérico.....  | 70  |
| Tabla 9. Parámetros corregidos para modelado numérico.....  | 72  |
| Tabla 10. Relaciones volumétricas y propiedades índice de secciones.....  | 74  |
| Tabla 11. $V_{S\alpha}/V_{SV}$ determinado en pruebas de consolidación unidimensional.....  | 85  |
| Tabla 12. Índice de liquidez, esfuerzo de preconsolidación y relación de preconsolidación por esfuerzo efectivo.....                                  | 90  |
| Tabla 13. $V_{S\alpha}/V_{SV}$ vs. $I_L$ . Parámetros de ajuste m, b y $R^2$ de la regresión lineal.....  | 91  |
| Tabla 14. $V_{S\alpha}/V_{SV}$ vs. $\sigma'_p$ . Parámetros de ajuste m, b y $R^2$ de la regresión lineal.....  | 94  |
| Tabla 15. $V_{S\alpha}/V_{SV}$ vs. OCR. Parámetros de ajuste m, b y $R^2$ de la regresión lineal.....   | 97  |
| Tabla 16. Anisotropía de campo y propiedades índice iniciales.....  | 99  |
| Tabla 17. $V_{S\alpha}/V_{SV}$ vs. $I_L$ , $\sigma'_p$ y OCR e en condiciones de campo. Parámetros de ajuste m, b y $R^2$ de la regresión lineal..... | 101 |

## **RESUMEN**

Los suelos lacustres del antiguo lago de Texcoco en la cuenca del valle de México, ubicados aproximadamente a 14 km al norte de la Ciudad de México, poseen propiedades geotécnicas únicas. Estos materiales han sido ampliamente estudiados en el pasado; sin embargo, muy pocas investigaciones se han orientado al estudio de la anisotropía del módulo de rigidez ( $G_0$ ) a muy pequeñas deformaciones. La anisotropía de la rigidez al cortante, aún a muy pequeñas deformaciones puede influir significativamente en la respuesta del suelo en una variedad de casos y aplicaciones incluyendo los problemas de interacción suelo-estructura bajo condiciones estáticas y dinámicas. En este trabajo se instrumentó un consólidometro de gran tamaño con elementos bender, con el fin de medir la velocidad de propagación de ondas cortantes a lo largo de diferentes trayectorias; y, consecuentemente, determinar  $G_0$  a lo largo de esas trayectorias. Los resultados experimentales revelaron que la anisotropía inducida por esfuerzos no es significativa en este tipo de suelo y por lo tanto  $G_0$  depende principalmente de la anisotropía inicial. De manera general se encontró una correlación inversa entre el esfuerzo de preconsolidación (o entre la relación de preconsolidación OCR) y la anisotropía inicial; mientras que al relacionar la anisotropía inicial con el índice de liquidez la correlación fue directa.

## SIMBOLOGÍA

|               |   |
|---------------|---|
| A             | Constante empírica que depende del tipo de suelo y del esfuerzo de referencia elegido |
| $a_{ij}$      | Coefficientes de la matriz de rigideces (deformaciones)                               |
| $A_{ij}$      | Coefficientes de la matriz de elasticidad (esfuerzos)                                 |
| $C_{ij}$      | Coefficientes de la matriz de elasticidad (esfuerzos). Notación de Voigt              |
| c             | Cohesión  |
| cc            | Índice de de compresión   |
| cr            | Índice de recompresión  |
| D             | Distancia de extremo a extremo entre los elementos bender                             |
| E             | Módulo de Young   |
| $E_H$         | Módulo de Young en dirección horizontal   |
| e             | Relación de vacíos  |
| $f_0$         | Frecuencia fundamental  |
| G             | Módulo de rigidez al cortante   |
| $G_0$         | Módulo de rigidez al cortante a muy pequeñas deformaciones                            |
| $G_V$         | Módulo de rigidez al cortante en dirección vertical                                   |
| $G_H$         | Módulo de rigidez al cortante en dirección horizontal                                 |
| $G_\alpha$    | Módulo de rigidez al cortante en la dirección $\alpha$                                |
| $I=I_m$       | Momento polar de inercia de la masa   |
| $I_0=I_s$     | Momento polar de inercia del sistema de carga   |
| $I_L$         | Índice de liquidez  |
| $I_p$         | Índice de plasticidad   |
| $K_0$         | Coefficiente de presión de tierras en reposo  |
| $K_\theta$    | Módulo de compresión volumétrica (bulk)   |
| $M_V$         | Módulo de compresibilidad en la dirección vertical                                    |
| $M_H$         | Módulo de compresibilidad en la dirección horizontal                                  |
| n,k           | Exponentes que dependen del tipo de suelo   |
| n             | Porosidad   |
| OCR           | Relación de preconsolidación  |
| POP           | Presión de preconsolidación   |
| P             | Ondas de compresión   |
| S             | Ondas de cortante   |
| $S_V$         | Movimiento de las ondas de cortante en la dirección vertical                          |
| $S_H$         | Movimiento de las ondas de cortante en la dirección horizontal                        |
| $S_r$         | Grado de saturación   |
| $s_{ij}$      | Coefficientes de la matriz de rigideces (deformaciones). Notación de Voigt            |
| $V_P$         | Velocidad de onda de compresión   |
| $V_S$         | Velocidad de onda de corte  |
| $V_{SV}$      | Velocidad de onda de corte en dirección vertical                                      |
| $V_{SH}$      | Velocidad de onda de corte en dirección horizontal                                    |
| $V_{S\alpha}$ | Velocidad de onda de corte en la dirección $\alpha$                                   |
| v             | Velocidad de fase en la ecuación de Christoffel                                       |
| w             | Humedad del suelos  |

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| $w_L$                         | Límite líquido                                    |
| $w_P$                         | Límite plástico                                   |
| $\rho$                        | Densidad  |
| $\nu$                         | Relación de Poisson                               |
| $\nu_H$                       | Relación de Poisson en dirección horizontal       |
| $\sigma_{x,y,z}$              | Esfuerzo normal en el plano x, y, z               |
| $\tau_{xy,xz,yz}$             | Esfuerzo cortante en los planos xy, xz, yz        |
| $\varepsilon_{x,y,z}$         | Deformación por extensión en los planos x, y, z   |
| $\gamma_{xy,xz,yz}$           | Deformación por cortante en los planos xy, xz, yz |
| $\Gamma$                      | Tensor de rigidez de Christoffel                  |
| $\delta$                      | Delta de Kronecker                                |
| $\varepsilon, \gamma, \delta$ | Parámetros de anisotropía de Thomsen              |
| $\omega_n$                    | Frecuencia angular del enésimo modo               |
| $\lambda$                     | Longitud de onda                                  |
| $\sigma'$                     | Esfuerzo efectivo de consolidación                |
| $\sigma'_m$                   | Esfuerzo efectivo confinante medio                |
| $\sigma_r$                    | Esfuerzo de referencia                            |
| $\sigma'_m$                   | Esfuerzo de preconsolidación                      |
| $\sigma'_c$                   | Esfuerzo efectivo de campo                        |
| $\gamma$                      | Peso unitario del suelo                           |
| $\gamma_s$                    | Peso unitario de sólidos                          |
| $\gamma_{sat}$                | Peso unitario saturado                            |

## 1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo proporciona una descripción de los antecedentes recopilados para este trabajo. Se presenta una investigación bibliográfica de los antecedentes encontrados en la literatura, la descripción del trabajo desarrollado y los objetivos que se persiguen.

### 1.1. Presentación del problema

La orientación de la estructura interna de algunos materiales induce un comportamiento direccional en su respuesta mecánica. La orientación de la respuesta de los materiales juega un papel importante en muchos problemas de Física e Ingeniería. Para los geo-materiales, incluyendo suelos en su estado natural, las propiedades anisótropas están influenciadas por la morfología de las partículas, por el proceso de sedimentación que produce estratos horizontales distintos; y, la subsecuente historia de cargas. De acuerdo con (Casagrande & Carrillo, 1944) la forma de las partículas y el proceso de sedimentación natural produce una *anisotropía inherente* y sólo se refiere a suelos naturales. Posterior al proceso de sedimentación, las capas de suelo pueden estar sujetas a cambios en las condiciones de esfuerzos durante su historia geológica, debido a la acumulación de capas superiores, cambios en la presión de poro o la acción de la erosión en períodos prolongados. Todo esto induce una anisotropía adicional, conocida como *anisotropía inducida por esfuerzos*. La combinación de los dos tipos de anisotropía genera la anisotropía inicial y ésta afecta las propiedades elásticas del suelo (Cividini, et al., 1979).

El comportamiento anisótropo esfuerzo-deformación del suelo puede ser representado por un modelo de isotropía transversa o anisotropía cruzada con un eje vertical de simetría (Fioravante, 2000). En este modelo de anisotropía cruzada, el plano de isotropía es típicamente el horizontal; y, el plano vertical o normal es el plano transverso. Se requieren solo cinco constantes elásticas independientes entre sí para describir la respuesta deformacional (Módulo de Young  $E$  y relación de Poisson  $\nu$  en los planos horizontal y vertical, y el módulo de rigidez al cortante  $G$  en el plano vertical). Debido a que el suelo lacustre del

---

Valle de México se considera totalmente saturado, la relación de Poisson en las direcciones horizontal y vertical es 0.5 (Auvinet, et al., 2016), para condiciones de carga no drenada en las que no hay deformaciones volumétricas como es el caso de fenómenos dinámicos transitorios de corta duración.

Durante muchas décadas se han llevado a cabo investigaciones que han permitido determinar los factores que afectan el valor de módulo de rigidez en el plano vertical ( $G_V$ ). Con este fin se han desarrollado varios dispositivos y aparatos de laboratorio, tales como la columna resonante (Hardin & Drnevich, 1972); sin embargo, el módulo en el plano horizontal ( $G_H$ ) se lo ha calculado como una función del módulo de Young y de la relación de Poisson en esa dirección:

$$G_H = \frac{E_H}{2(1+\nu_H)} \quad 1-1$$

Los transductores fabricados a partir de cristales piezoeléctricos (elementos bender) han sido usados recientemente como una técnica alternativa de laboratorio para medir el módulo de cortante a muy pequeñas deformaciones (Viggiani & Atkinson, 1995b; Jovicic, et al., 1996). Usando elementos bender es posible medir la velocidad de propagación de la onda cortante ( $V_S$ ) a lo largo de diferentes trayectorias y bajo diferentes estados de esfuerzo. Esta técnica permite el estudio de los efectos de la anisotropía en la propagación de las  $V_S$  (Jamolkowsky, et al., 1995).

De la teoría de onda elástica se tiene que:

$$G_H = \rho * (V_S)^2 \quad 1-2$$

donde  $\rho$  es la densidad del suelo.

Aunque considerar isótropo al material puede simplificar los cálculos desde el punto de vista geotécnico, la anisotropía de la rigidez, aún a muy pequeñas deformaciones puede tener efectos significativos en la respuesta del suelo en problemas de interacción suelo-estructura bajo condiciones estáticas y dinámicas (Bishop & Hight, 1977; Lee & Rowe, 1989; Simpson, et al., 1996; Atkinson, 2000;

---

Clayton, 2011; Puzrin, et al., 2012; Ahmadi & Eskandari, 2014; Eskandari, et al., 2014; Mitaritonna, et al., 2014). Varios modelos matemáticos desarrollados en años recientes consideran el efecto de la anisotropía inicial en la solución de problemas geotécnicos (Nova & Sacchi, 1979; Kaliakin, 2005; Masin, 2012.a; Masin, 2012.b; Masin & Rott, 2014) pero la falta de valores experimentales hace que dichos modelos no reflejen adecuadamente el comportamiento del suelo.

## 1.2. Antecedentes

Con relación a las técnicas de laboratorio, la mayoría de investigaciones experimentales que involucran mediciones del módulo de rigidez han sido efectuadas en cámaras triaxiales o, indirectamente en columnas resonantes, mientras que hay muy pocos ensayos efectuados en odómetros instrumentados.

Para simplificar la evaluación de los parámetros de rigidez a muy pequeñas deformaciones, Jamiolkowski y sus colaboradores usaron un odómetro de carga incremental con medición de esfuerzos horizontales totales para estimar el coeficiente de presión de tierras en reposo ( $K_0$ ) al final de la consolidación en seis arcillas naturales de Italia (Jamiolkowsky, et al., 1995). Las arcillas estudiadas eran de origen lacustre, aluvial y marino con índices de plasticidad entre 10% y 75%, relaciones de vacíos entre 0.6 y 3 y relaciones de preconsolidación entre 1 y 8.2. El odómetro utilizado fue equipado con elementos bender para propagar y medir  $V_s$  a lo largo de trayectorias verticales, horizontales y con inclinaciones entre  $55^\circ$  y  $70^\circ$  (con relación al eje vertical) y también a lo largo de una trayectoria fija de  $70^\circ$ , durante las etapas de carga y descarga. Encontraron que  $G_0$  no está influenciado por el OCR generado durante la descarga y que los valores de  $G_0$  obtenidos con los elementos bender son usualmente mayores que aquellos obtenidos en ensayos de columna resonante debido a que las deformaciones de cortante inducidas por los elementos bender y propagadas a través de la probeta de suelo dentro del odómetro son considerablemente menores que aquellas que se generan en la columna resonante. También concluyeron que la propagación de ondas vertical y horizontalmente provee una medida de la anisotropía

---

inicial de  $G_0$  y que la relación  $G_H/G_V$  puede ser considerada como un coeficiente de anisotropía que depende de los efectos de la fábrica y de de la anisotropía inducida por esfuerzos.

Usando elementos bender colocados en los planos horizontal y vertical de un odómetro, (Zeng & Ni, 1999) midieron  $G_0$  de una arena mal graduada y de arena de Ottawa a lo largo de diferentes planos, bajo condiciones de deformación lateral nula (condiciones  $K_0$ ). Encontraron que la técnica de elementos bender provee resultados confiables cuando el equipo y el pulso eléctrico son diseñados apropiadamente. De acuerdo a su investigación, la anisotropía inducida por esfuerzos sobre el módulo  $G_0$  ocurre en suelos con fábrica isótropa bajo la aplicación de esfuerzos anisótropos. Bajo condiciones  $K_0$ , la influencia de la anisotropía inducida por esfuerzos está controlada por el valor de  $K_0$ . Durante la etapa de carga, la anisotropía se afecta principalmente por el ángulo de fricción interna del material mientras que en la etapa de descarga, tanto el ángulo de fricción interna como el OCR son relevantes. También concluyeron que los módulos de cortante a lo largo de planos distintos a los planos principales dependen de los valores del módulo cortante en los planos de esfuerzos principales mayores y de la trayectoria de propagación.

En otro estudio experimental en el cual un odómetro fue instrumentado con elementos bender para medir la propagación de la velocidad de onda cortante en cuatro planos de dos especímenes de arcilla saturada (relaciones de vacíos de 1.31 y 1.35 e índices de plasticidad del 28% bajo diferentes esfuerzos de consolidación) (Grolewsky & Zeng, 2001) investigaron la anisotropía de la rigidez de la arcilla inducida por condiciones de esfuerzo anisótropo. Estos investigadores encontraron los valores de  $G_0$  asociados con diferentes planos y con aquellos valores calcularon el coeficiente de empuje de tierras en reposo ( $K_0$ ) de la arcilla bajo diferentes esfuerzos de consolidación. Posteriormente, compararon sus resultados con los valores de  $G_0$  obtenidos con expresiones empíricas. Los esfuerzos aplicados incluyeron carga, descarga y recarga durante 22 ciclos. Este estudio les permitió concluir que la repetición de la carga no influye en el comportamiento de los parámetros  $K_0$  y  $G_0$ .

Con base en este estudio, Fu diseñó un odómetro de gran tamaño colocando un elemento bender en la base (emisor) y tres elementos bender en la tapa (receptores) para medir la anisotropía de  $G_0$  en la trayectoria vertical y en planos con diferentes inclinaciones ( $30^\circ$  y  $45^\circ$ ) con la aplicación de esfuerzos anisótropos (Fu, 2004). Las pruebas se llevaron a cabo en dos tipos de suelo con diferentes contenidos de grava (25% y 50%). Se encontró que  $G_0$  en la dirección vertical es el más alto, seguido por el valor a  $30^\circ$ . El módulo a  $45^\circ$  resultó ser el menor de los tres valores.

Ensayos de consolidación en especímenes prismáticos y pruebas de triaxial fueron realizados por (Teachavorasinskun & Lukkanaprasit, 2008) sobre tres especímenes de arcilla blanda, obtenida a diferentes profundidades de un mismo sondeo, con índices plásticos entre 30% y 55%. Ambos equipos fueron instrumentados con elementos bender para estudiar la influencia del esfuerzo desviador sobre  $G_0$ . Encontraron que la anisotropía inherente influye más sobre  $G_0$  que el estado de esfuerzos aplicado.

En resumen, estudios experimentales usando elementos bender para medir  $V_S$  usando cámaras triaxiales y odómetros han establecido la dependencia de este parámetro con el esfuerzo efectivo, condiciones de esfuerzo e historia de esfuerzos. Estudios específicos sobre la anisotropía de la rigidez del suelo son menos frecuentes. Los odómetros instrumentados con elementos bender han demostrado ser herramientas útiles para desarrollar investigaciones, como se explicó anteriormente. Cabe destacar que la investigación en la anisotropía de la rigidez de materiales arcillosos se ha concentrado en suelos con índices plásticos entre 10% y 75%. Las características de la anisotropía en la rigidez de materiales extremadamente plásticos han sido muy poco estudiadas.

### **1.3. Descripción del proyecto**

En este trabajo se presentan los resultados de una investigación para estudiar la influencia de la anisotropía sobre el comportamiento y propiedades de suelos lacustres del antiguo Lago de Texcoco. Estos materiales son altamente compresibles, con contenidos de agua muy altos; y, consecuentemente

muy poco resistentes. Sus propiedades generales han sido motivo de estudio y discusión y han sido presentadas previamente (Ovando-Shelley, 2011). Las propiedades dinámicas y el comportamiento bajo carga cíclica también ha sido revisado recientemente (Ovando, et al., 2019). La determinación de la velocidad de onda cortante tanto en campo como en laboratorio utilizando elementos bender también ha sido investigada en el pasado (Flores, et al., 2014; Díaz Pardavé, 2014). Sin embargo, no existen investigaciones previas de la anisotropía de las propiedades dinámicas de estos materiales utilizando odómetros.

De manera específica, se ha utilizado la técnica de los elementos bender para evaluar la anisotropía en la propagación de las ondas de cortante y por tanto de la rigidez de la arcilla lacustre del antiguo lago de Texcoco. El equipo utilizado en esta investigación es más grande que los odómetros convencionales y se usó para evaluar  $V_S$  a lo largo de diferentes trayectorias en probetas de gran tamaño. Se investigó también la influencia de algunas propiedades índice como el índice de liquidez, el esfuerzo de preconsolidación y la relación de preconsolidación (OCR) en la rigidez al cortante a lo largo de diferentes trayectorias para derivar medios cuantitativos para evaluar la anisotropía de la rigidez.

#### **1.4. Objetivos**

Debido a la importancia que tiene el estudio y comprensión del comportamiento anisótropo del suelo, el objetivo principal del presente trabajo es evaluar la anisotropía inducida por esfuerzos de la arcilla del lago de Texcoco a partir del estudio de la velocidad de propagación de la onda cortante a través del suelo.

Con los resultados experimentales se propone elaborar un modelo conceptual que permita predecir el comportamiento del cociente de anisotropía en diferentes direcciones y establecer relaciones entre éste cociente y las propiedades índice y los estados e historia de esfuerzos.

Para llegar a este objetivo se alcanzaron las siguientes metas:

- Se instrumentó con transductores piezoeléctricos, lateralmente cada una de las probetas de arcilla procedentes del ex lago de Texcoco que se ensayaron en el equipo de consolidación para grandes deformaciones. Se utilizó también instrumentación vertical, colocada en el pedestal y cabezal del odómetro.
- Se utilizaron muestras procedentes de la formación arcillosa superior, de profundidades entre 8 m y 20 m, que fueron extraídas en tubos de aluminio de pared delgada (Shelby).
- Se realizaron ensayos de consolidación utilizando como anillo de consolidación el tubo de pared delgada que contiene cada muestra, hasta aplicar el esfuerzo efectivo máximo de  $2.0 \text{ kg/cm}^2$  o hasta llegar a la deformación máxima permitida por el aparato (25 mm). Se aplicaron etapas de carga, descarga y recarga.
- Se midió la velocidad de propagación de onda cortante en las direcciones vertical ( $90^\circ$ ) y horizontal ( $0^\circ$ ) y en los planos de  $-76^\circ$ ,  $-46^\circ$ ,  $-28^\circ$ ,  $38^\circ$ ,  $65^\circ$ ,  $78^\circ$  aproximadamente, al finalizar la consolidación primaria en cada incremento de esfuerzo efectivo.
- Se analizaron las señales registradas para determinar el tiempo de arribo de la onda cortante por los siguientes métodos: visuales (primera deflexión, pico a pico superior e inferior), matemáticos (correlación cruzada en el dominio del tiempo) y empleando la técnica de intersección de ondas, que se desarrolló durante esta investigación. Se realizó un análisis comparativo y se concluyó, considerando las condiciones de frontera, el método más adecuado para este ensayo.
- Se calcularon los cocientes de anisotropía ( $V_{sa}/V_{sv}$ ) en las direcciones horizontal ( $0^\circ$ ), vertical ( $90^\circ$ ) y en los planos de  $76^\circ$ ,  $-46^\circ$ ,  $-28^\circ$ ,  $38^\circ$ ,  $65^\circ$ ,  $78^\circ$  para cada estado de esfuerzos.

---

## 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Este capítulo presenta la fundamentación teórica que sustenta el fenómeno de propagación de ondas sísmicas en el suelo; la técnica de los elementos bender usada para estudiar dicho fenómeno, desde la fabricación y funcionamiento de los transductores piezoeléctricos, y como medio para determinar las propiedades dinámicas a muy pequeñas deformaciones; finalmente, se hace una breve introducción al comportamiento anisótropo del suelo, sus causas y sus implicaciones para luego centrar el análisis del módulo de rigidez al cortante máximo ( $G_0$ ).

### 2.1. Propagación de ondas sísmicas

Cuando ocurre un sismo se producen dos tipos de ondas sísmicas: las *ondas de cuerpo* y las *ondas de superficie*. Aquí se presenta una breve descripción.

#### Ondas de cuerpo

Viajan a través del interior de la tierra y son de dos tipos: las ondas P y las ondas S. Las ondas P se conocen también como ondas primarias, de compresión o longitudinales. Involucran la compresión sucesiva y la rarefacción de los materiales que atraviesan. Son similares a las ondas de sonido; el movimiento de una partícula individual que es atravesada por una onda P es paralelo a la dirección de viaje. Como las ondas de sonido, las ondas P pueden viajar a través de sólidos y fluidos. Las ondas S, también conocidas como ondas secundarias, de corte o transversales, causan deformaciones por cortante cuando atraviesan un material. El movimiento de una partícula individual es perpendicular a la dirección de viaje de las ondas S. La dirección del movimiento de la partícula es útil para dividir las ondas S en dos componentes,  $S_V$  (movimiento en el plano vertical) y  $S_H$  (movimiento en el plano horizontal). La velocidad a la cual las ondas de cuerpo viajan varía con la rigidez de los materiales que atraviesan. Como los materiales geológicos son más rígidos en compresión, las ondas P viajan más rápido que las otras

---

ondas sísmicas y por lo tanto son las primeras en llegar a un sitio particular. Los fluidos, que no tienen rigidez al cortante no pueden transmitir ondas S.

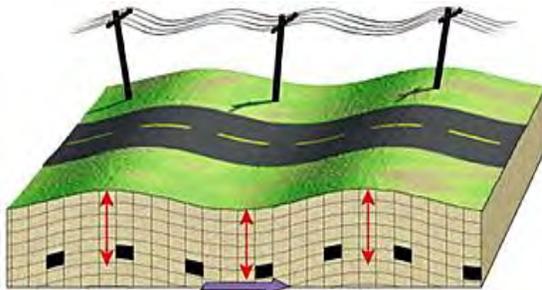
### **Ondas de superficie**

Resultan de la interacción entre las ondas de cuerpo y la superficie del terreno. Viajan a lo largo de esta superficie con amplitudes que decrecen aproximadamente de manera exponencial con la longitud. Debido a la naturaleza de las interacciones requeridas para producirlas, las ondas de superficie son más notorias a distancias lejanas de la fuente del sismo. A distancias mayores que más o menos el doble del espesor de la corteza terrestre, las ondas de superficie, a diferencia de las ondas de cuerpo, producirán movimientos pico del terreno. Para los fines de ingeniería, las ondas de superficie más importantes son las ondas *Rayleigh* y las ondas *Love*. Las ondas *Rayleigh* se producen por la interacción de las ondas P y las  $S_V$  con la superficie de la tierra e involucran el movimiento vertical y horizontal de las partículas. Son similares, en algunos aspectos, a las ondas producidas por una roca arrojada a una laguna. Las ondas *Love* resultan de la interacción entre las ondas  $S_H$  con una capa superficial suave y no tienen componente vertical de movimiento de las partículas.

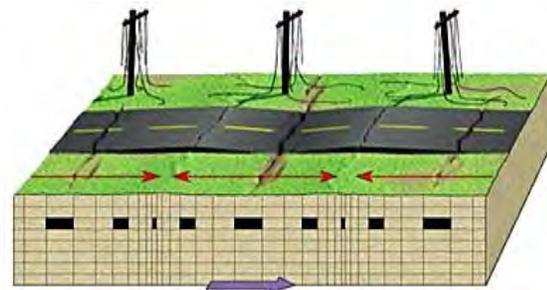
### **Consideraciones importantes de la propagación de ondas**

- A través de un sólido homogéneo y no cementado solo pueden viajar las ondas de cuerpo. Existen dos tipos de ondas de cuerpo P y S. Las ondas P inducen deformaciones volumétricas pero no de cortante en el material que atraviesan, la dirección de las partículas es paralela a la dirección de viaje de la onda. Las ondas S involucran deformaciones de cortante pero no volumétricas, el paso de la onda tipo S causa a las partículas el movimiento perpendicular a la dirección de viaje de la onda.

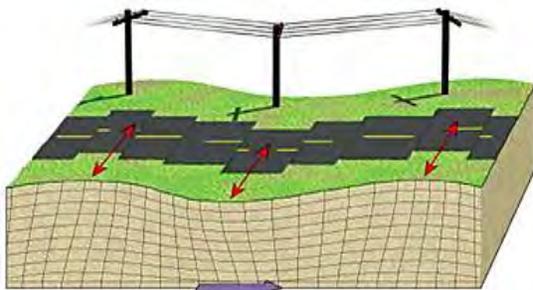
- Las ondas de cuerpo viajan a velocidades que dependen de la rigidez y densidad del material que atraviesan. Debido a que los materiales geológicos son más resistentes o rígidos a la compresión volumétrica que al cortante, las ondas P viajan más rápido a través del material que las ondas S.



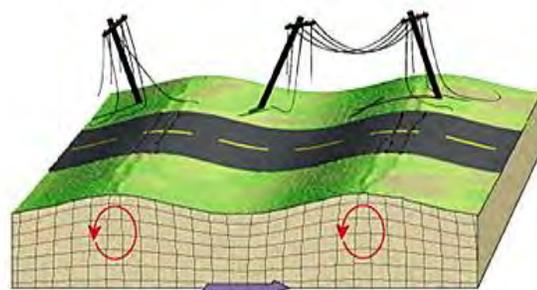
Ondas de corte (S)



Ondas de compresión (P)



Ondas Love



Ondas Rayleigh

Figura 1. Propagación de ondas de cuerpo y de superficie.

- La interacción de las ondas de cuerpo inclinadas con la superficie libre de esfuerzo del terreno produce ondas de superficie. Los movimientos producidos por las ondas de superficie se concentran en una zona de poca profundidad cerca de la superficie.
- Las ondas Rayleigh son el tipo de onda de superficie más importante para fines de aplicación en la ingeniería. Estas ondas pueden viajar, en un medio homogéneo y elástico, ligeramente más lento que las ondas S y pueden producir movimiento vertical y horizontal en las partículas, siguiendo una trayectoria elíptica retrógrada.

- La profundidad a la que las ondas Rayleigh inducen movimientos significativos, es inversamente proporcional a la frecuencia de la onda. Ondas Rayleigh de baja frecuencia pueden producir movimiento de las partículas a grandes profundidades, mientras que el movimiento producido por ondas de alta frecuencia permanece confinado en la superficie.
- Cuando la velocidad de las ondas de cuerpo se incrementa con la profundidad, como generalmente sucede en la corteza terrestre, la velocidad de las ondas Rayleigh depende de la frecuencia. Ondas Rayleigh de baja frecuencia que inducen movimiento en materiales rígidos depositados a grandes profundidades, viajan más rápido que las ondas Rayleigh de alta frecuencia. Las ondas con velocidades que dependen de la frecuencia se conocen como dispersivas.
- Las ondas Love son ondas de superficie que se pueden desarrollar en presencia de una capa superficial blanda. Las ondas Love son dispersivas porque sus velocidades varían con la frecuencia entre la velocidad de onda de corte de la capa superficial (a altas frecuencias) y la velocidad de onda de corte del material subyacente (a bajas frecuencias).
- Cuando una onda de cuerpo choca con una frontera rígida, orientada perpendicularmente a su dirección de viaje la onda es perfectamente reflejada como una onda idéntica que viaja de regreso en la dirección contraria. La condición de frontera cero-desplazamiento requiere que el esfuerzo en la frontera sea el doble del de la onda lejos de la frontera. Cuando una onda de cuerpo choca contra una frontera libre de esfuerzo, orientada perpendicularmente a su dirección de viaje la onda es reflejada como una onda idéntica de polaridad opuesta que viaja de regreso en la misma dirección. La condición de frontera cero-esfuerzo requiere que el movimiento de la partícula en la frontera sea dos veces el tamaño del movimiento de la partícula lejos de la frontera.
- Cuando una onda de cuerpo choca con una frontera normal entre dos materiales diferentes, parte de su energía es reflejada y parte es transmitida a través de la frontera. El comportamiento de la

---

onda en la frontera está gobernado por la relación de la impedancia específica entre los materiales en cada lado de la frontera. Esta relación de impedancia determina la amplitud y la polaridad de las ondas reflejadas y transmitidas.

- Cuando las ondas de cuerpo chocan con las fronteras que separan dos materiales diferentes en ángulos diferentes de  $90^\circ$ , parte de la energía de la onda se refleja y parte se refracta cuando cruza la frontera. Si la dirección del movimiento de las partículas es paralelo a la frontera, las ondas reflejada y refractada serán de la misma forma que la onda incidente, Si no, se pueden producir nuevos tipos de ondas, por ejemplo: una onda P inclinada que choca con una frontera horizontal producirá ondas P y ondas  $S_V$  reflejadas, así como también ondas P y  $S_V$  refractadas.
- Cuando una onda inclinada viaja hacia arriba, atravesando capas horizontales que son sucesivamente más suaves, la parte de la onda que cruza cada frontera será refractada con dirección cada vez más cercana a la vertical.
- La amplitud de una onda decrece según atraviesa la corteza terrestre. Existen dos mecanismos primarios que causan esta atenuación de la amplitud de onda. El primero es el amortiguamiento del material, que se debe a la absorción de energía por el material. El segundo es el amortiguamiento del sistema, que resulta de la dispersión de la energía de ondas dentro de un gran volumen de material conforme se aleja la onda de su fuente.

## 2.2. Piezoelectricidad y la técnica de los elementos bender

La piezoelectricidad es la propiedad que tienen ciertos materiales para deformarse cuando se les aplica un voltaje y, de manera inversa, generar un voltaje cuando son deformados. Los materiales piezoeléctricos más comunes son cristales naturales como el cuarzo, la turmalina, la sal de Rochelle, etc. Estos materiales conocidos como cristales o cerámicas piezoeléctricos, tienen una polarización que es definida durante el proceso de manufactura. Desde el punto de vista eléctrico, puede considerarse que la

cerámica piezoeléctrica tiene dipolos elementales, consistentes en una carga positiva y una negativa a cierta distancia. Antes del proceso de fabricación los dipolos no muestran preferencia por alguna dirección en particular, de modo que en el material cerámico están orientados al azar (Figura 2) y en estas condiciones, cuando se aplica un esfuerzo la suma de los desplazamientos de carga es cero, tal que el material no exhibe un efecto piezoeléctrico (Gonzalez, et al., 2009). Para activar la propiedad de la piezoelectricidad en estos materiales se los expone a un fuerte campo eléctrico externo a alta temperatura, no más allá de la llamada temperatura de Curié, con esto se logra teóricamente que los dipolos tomen una dirección correspondiente a la del campo de polarización. En realidad, los dipolos nunca se orientan como idealmente se sugiere en la Figura 2(b), pues la estructura cerámica admite solo ciertas rotaciones a los dipolos, pero el material se vuelve capaz de convertir energía mecánica en eléctrica y viceversa.

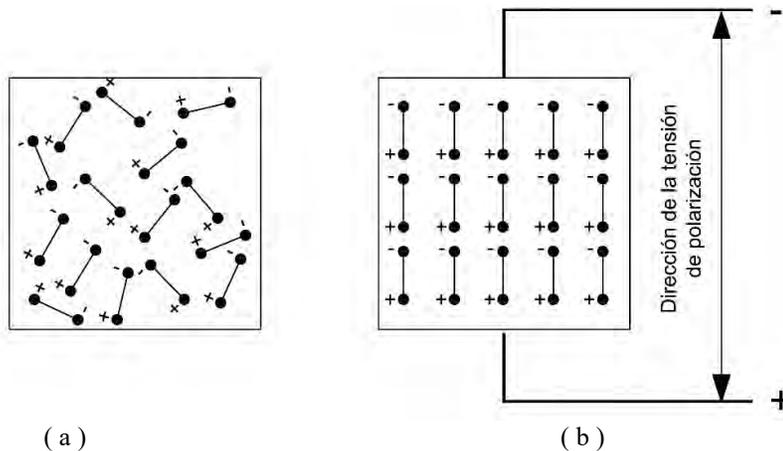


Figura 2. Dipolos en cerámicas piezoeléctricas (a) antes y (b) después de la polarización (González et al., 2009).

### Transductores piezoeléctricos

Un elemento piezocerámico (bender element o bending disk) está conformado por dos placas piezocerámicas unidas entre sí por una lámina de refuerzo metálico y recubiertas por un electrodo que puede ser fabricado a base de níquel o plata.

En el mercado se encuentran dos tipos de elementos piezocerámicos, los polarizados en  $x$  y los polarizados en  $y$  (Figura 3), que difieren entre sí por la dirección de polarización. En los cristales

polarizados en  $x$  las direcciones de la polarización de cada una de las placas cerámicas apuntan en dirección opuesta (Figura 3(a)), generalmente una hacia la otra o lo que es lo mismo hacia el refuerzo metálico. Los cristales polarizados en  $y$  tienen la particularidad de que la polarización de las placas cerámicas lleva la misma dirección (Figura 3(b)).

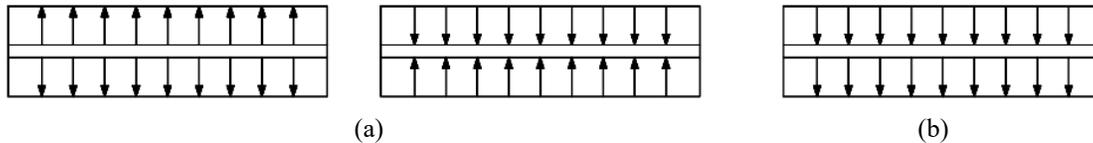


Figura 3. Tipo de elementos piezocerámicos: (a) polarizados en  $x$ ; (b) polarizados en  $y$  (Leong, et al., 2009).

Existen dos tipos de configuración para realizar las conexiones eléctricas que permiten aplicar y recibir el voltaje: configuración en serie y configuración en paralelo. La configuración en serie se refiere al caso en el que se aplica el voltaje a través del elemento completo de una vez, así el voltaje sobre cada una de las placas piezocerámicas es la mitad del voltaje total aplicado. Un elemento de flexión configurado en serie usa solamente dos cables (fase y tierra) fijados cada uno a su respectivo electrodo (cara libre del elemento). La configuración en paralelo se refiere al caso en el que el voltaje se aplica a las placas piezocerámicas de manera individual, esto implica el acceso a cada una de las placas incluido el refuerzo metálico. Un elemento de flexión configurado en paralelo requiere de tres cables, uno fijado a cada electrodo (fase) y uno fijado a la placa central (tierra). Para realizar el mismo movimiento que el elemento configurado en serie, se requiere solamente de la mitad del voltaje y se incrementa en cuatro veces su capacitancia (Piezo Systems, Inc., 2008). En la Figura 4 se muestra esquemáticamente la configuración.

El funcionamiento mecánico del elemento de flexión es similar al de una viga empotrada en un extremo y puede actuar como generador o como sensor.

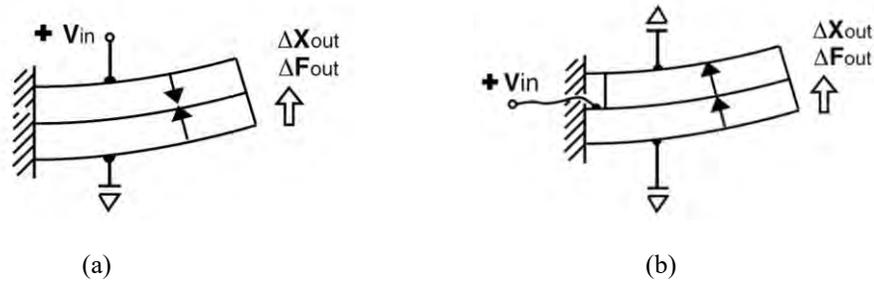


Figura 4. (a) Elemento de flexión polarizado en x, conectado en serie, b) elemento de flexión polarizado en y, conectado en paralelo (Piezo Systems, Inc., 2008).

Este mismo principio se aplica al elemento de compresión (bending disk), el que, al ser doblemente empotrado se restringe el movimiento, como se muestra en la Figura 5, con la única diferencia de que el elemento de compresión está polarizado en  $x$  y sólo puede ser conectado en serie.

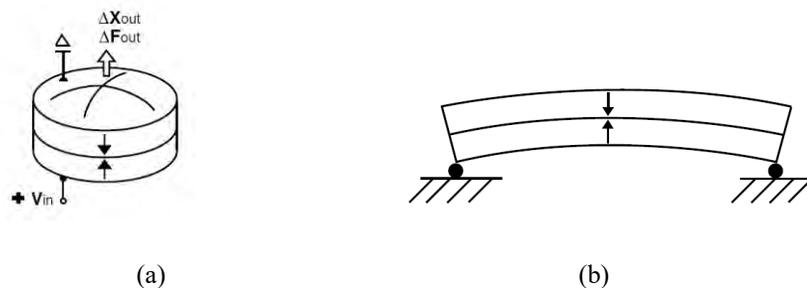


Figura 5. (a) Elemento de compresión polarizado en x, conectado en serie, (b) funcionamiento mecánico del elemento de compresión. (Piezo Systems Inc., 2008).

En los últimos años se ha popularizado el uso de elementos bender para la medición de la velocidad de onda de corte, en tal forma que se los encuentra disponibles en varias casas comerciales, mientras que el uso de los discos de compresión, que propagan ondas de compresión, fue relegado de las investigaciones durante mucho tiempo, principalmente por dos causas: 1) el módulo cortante,  $G$ , calculado a partir de la velocidad de onda de corte tiene mayor aplicabilidad en la descripción del comportamiento deformacional del suelo mientras este es ensayado bajo esfuerzos cortantes; y 2) es un método inefectivo para medir la velocidad de ondas P en suelos saturados, debido a que las ondas P viajan a través de la fase líquida más rápido de lo que viajan a través del esqueleto de suelo. Sin embargo, con el creciente interés en la mecánica de suelos no saturados, la medición de las ondas P ha vuelto a

tomar importancia, en el sentido en que facilitan determinar el grado de saturación, así como la porosidad del espécimen.

Lings y Greening introdujeron en el año 2001 una modificación a la configuración de la conexión del elemento bender, que hizo que además de las ondas cortantes, sea capaz de generar y recibir también ondas de compresión. Esto permitió la medición de la velocidad de propagación de ondas P y S utilizando un solo par de elementos bender en la misma trayectoria dentro de la muestra de suelo, que generan ondas S u ondas P dependiendo de la modalidad especificada en una caja externa de control. (Leong, et al., 2009). Los elementos piezocerámicos utilizados por estos investigadores fueron uno polarizado en  $x$  y uno polarizado en  $y$ , los cuales con la apropiada configuración de conexión se convierte el emisor de ondas S en receptor de ondas P y el receptor de ondas S en emisor de ondas P. Más adelante se muestran detalles de las conexiones y elementos utilizados.

### **Configuración del elemento bender**

En el transductor piezoeléctrico, el elemento que actúa como emisor o generador de las ondas de cortante utiliza un cristal polarizado en  $y$  y la configuración en paralelo para la conexión eléctrica. Como se explicó anteriormente, esto disminuye a la mitad el voltaje requerido para alcanzar un desplazamiento dado. El elemento que actúa como receptor, emplea un cristal polarizado en  $x$  y configuración en serie. La Figura 6 muestra ambos elementos.

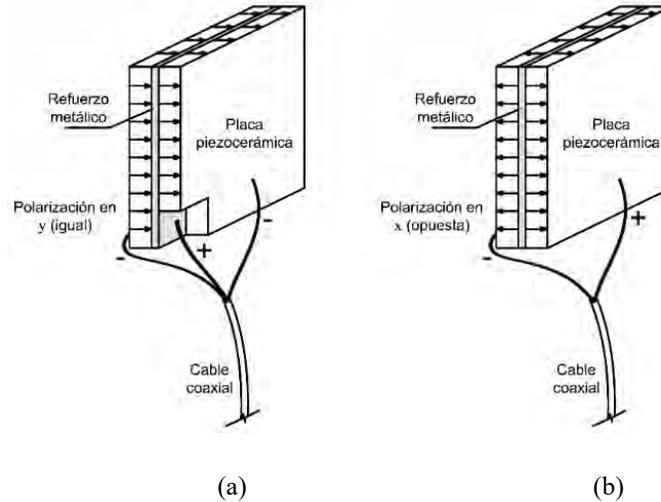


Figura 6. Elementos de flexión (a) emisor, (b) receptor.

Aunque esta configuración es la de mayor eficiencia, en este trabajo se utilizaron cristales polarizados en  $x$  y conexión en serie tanto para el emisor como para el receptor, sin que hubieran inconvenientes en la eficiencia de los mismos.

### Configuración del elemento extender

Si se toman los elementos piezoeléctricos utilizados para generar y recibir ondas de cortante y se cambia la configuración de cada uno, es decir, se conecta en serie el elemento polarizado en  $y$  y en paralelo el elemento polarizado en  $x$ , cambiará la respuesta motora del cristal, en lugar de comportarse como una viga simplemente empotrada, se tendrá un movimiento en sentido longitudinal de extensión y contracción. Este par de elementos se conocen como *extender* y son, aunque de relativamente reciente desarrollo, ampliamente utilizados para la generación y registro de las ondas de compresión. La Figura 7 muestra los elementos *extender*.

### Configuración del elemento “Bender / Extender”

Si tomamos ahora los dos elementos piezoeléctricos utilizados antes, cada uno con su propia polarización, y los conectamos con una configuración en paralelo, es posible transmitir y recibir ondas de compresión y de corte (Lings & Greening, 2001).

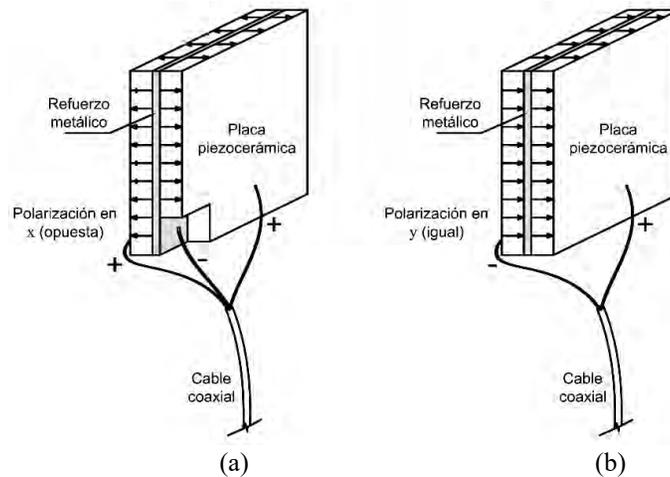


Figura 7. Elementos de compresión (a) emisor, (b) receptor. (Lings y Greening, 2001)

Para esto es necesario implementar una caja de control, que permita a los transductores pasar de modo bender a modo extender rápidamente. Cada cable debe ser emparejado a un conector de cuatro vías, donde la cuarta vía es emparejada a su vez al conector negativo. El funcionamiento de este par de elementos se ilustra en la Figura 8.

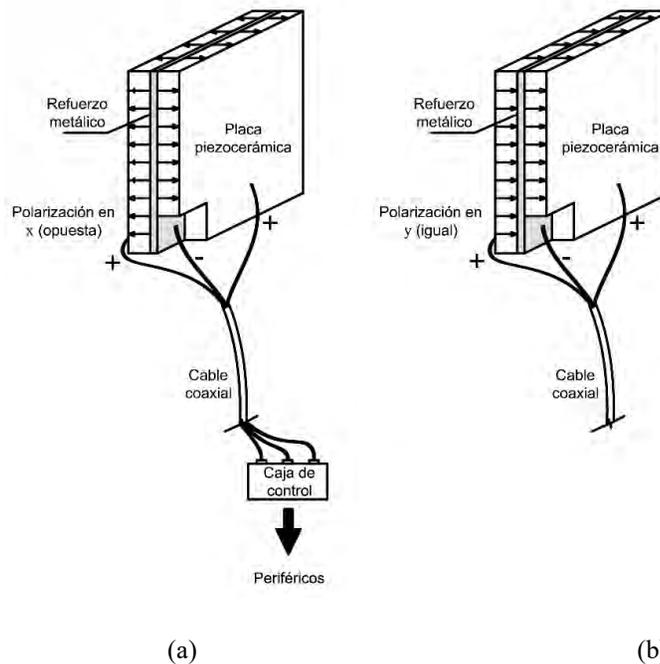


Figura 8. Elementos bender/extender (a) emisor extender / receptor bender, (b) receptor extender / emisor bender. (Lings & Greening, 2001)

---

En el presente estudio se encontró que, utilizando la configuración en serie para la conexión, tanto en el emisor como en el receptor, es posible propagar ondas de cortante y de compresión variando la frecuencia de excitación; así, en un rango entre 1 kHz y 7 kHz se registraron ondas de corte, y en un rango entre 50 y 70 kHz se registraron ondas de compresión, ambas muy claras y bien definidas en cuanto a su amplitud. Con este hallazgo se pudo omitir el uso de transductores a partir de discos de compresión, de elementos extender o del tipo bender/extender, obviando así la dificultad en su fabricación. Esta información se amplía en el Anexo 1.

### **2.3. Anisotropía en el rango lineal – elástico de un medio continuo**

Para estudiar los estados de esfuerzo y deformación en un cuerpo anisótropo, producidos estos estados por la aplicación de una carga externa, es necesario establecer hipótesis que impongan ciertas restricciones. Las más importantes de estas hipótesis se resumen a continuación (Lekhnitskii, 1981):

- El cuerpo es sólido (es un medio continuo), los esfuerzos sobre cualquier plano dentro del cuerpo y en su superficie son fuerzas por área unitaria.
- La relación entre los componentes de deformación y las proyecciones de desplazamiento y sus primeras derivadas respecto a los ejes coordenados es lineal, es decir sólo se consideran pequeñas deformaciones.
- Las relaciones esfuerzo-deformación son lineales, es decir, que el material se apega a la Ley de Hooke Generalizada. Los coeficientes en estas relaciones lineales pueden ser constantes (cuerpos homogéneos) o variables (cuerpos heterogéneos) por ejemplo, funciones de posición continuas o discontinuas.
- Los esfuerzos iniciales, es decir, aquellos existentes antes de la aplicación de cargas externas, son no tomados en consideración.

En el sistema de ejes coordenados Cartesiano ( $x, y, z$ ), los esfuerzos que actúan sobre planos normales a las direcciones coordenadas son descompuestos en tres componentes: una componente normal al plano (esfuerzo normal) y dos tangenciales (esfuerzos de cortante), como se muestra en la Figura 9.

La deformación de un cuerpo en las proximidades a un punto dado, es caracterizado por los componentes de deformación que son tres extensiones y tres deformaciones por cortante. Estos componentes, al igual que los esfuerzos, se pueden escribir de forma matricial y constituyen tensores de segundo rango como se indica a continuación. Por razones de equilibrio de un cuerpo infinitesimal, estos tensores son simétricos.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xz} & \frac{1}{2}\gamma_{yz} & \varepsilon_z \end{bmatrix}$$

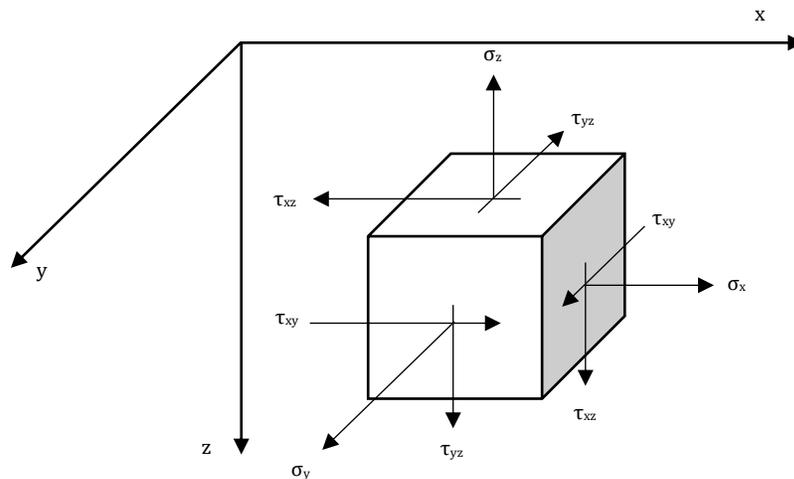


Figura 9. Planos normales a los ejes coordenados Cartesianos ( $x, y, z$ ).

### 2.3.1. Ley de Hooke Generalizada

Tratándose de un cuerpo elástico y continuo, en el cual se consideran solamente pequeñas deformaciones, el modelo más adecuado para determinar las relaciones entre esfuerzo y deformación es el que siga la Ley de Hooke generalizada. Consideraremos que los componentes de deformación son

funciones lineales de los componentes de esfuerzo. Estas funciones deben ser homogéneas puesto que asumimos que en ausencia de esfuerzo no hay deformaciones y viceversa.

Los cuerpos que obedecen la Ley de Hooke generalizada pueden ser diferentes, por tanto, se los debe clasificar de acuerdo a sus características, por lo menos de forma general. En lo que respecta a las propiedades de elasticidad, todos los cuerpos pueden ser divididos en homogéneos y heterogéneos, por una parte; y, por otra, en isótropos y anisótropos. Un cuerpo es homogéneo cuando estas propiedades son iguales en cualquier punto y es heterogéneo cuando son diferentes en diferentes puntos. Si las características elásticas, por ejemplo, el módulo elástico, varía de punto a punto de forma continua, la heterogeneidad también es continua; si en cambio, el módulo elástico presenta discontinuidades al pasar de un punto a otro, es decir que cambia abruptamente, la heterogeneidad es discontinua o discreta. Este comportamiento se observa principalmente en cuerpos formados por varios elementos de diferentes propiedades elásticas o diferentes materiales.

Un cuerpo isótropo es aquel en que las propiedades elásticas son las mismas en todas las direcciones que atraviesan un punto dado; un cuerpo anisótropo tiene de manera general diferentes propiedades elásticas para cada dirección. Las direcciones para las cuales las propiedades elásticas (o resistencia elástica) son las mismas, son elásticamente equivalentes. Para un cuerpo isótropo todas las direcciones son elásticamente equivalentes mientras que para un cuerpo anisótropo solamente algunas direcciones podrían ser elásticamente equivalentes, pero no todas. Es así que, dependiendo de su estructura, un cuerpo puede ser isótropo o anisótropo y al mismo tiempo homogéneo o heterogéneo. Además, se pueden distinguir dos tipos de anisotropía: rectilínea y curvilínea. En este trabajo se trata con anisotropía rectilínea por tratarse de un geomaterial, un caso de anisotropía curvilínea se tiene por ejemplo en la resistencia del tronco de un árbol.



componentes incrementales de deformación. La matriz elástica (ec. 2-3) debe ser simétrica para satisfacer los principios de la termodinámica (Castro & Sivasithamparam, 2017).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz}/2 \\ \gamma_{xz}/2 \\ \gamma_{xy}/2 \end{Bmatrix} \quad 2-3$$

Sin embargo, muchos materiales presentan algún tipo de simetría que permite reducir el número de parámetros elásticos independientes. Esto permite clasificar la anisotropía en los siguientes casos:

- *Plano de simetría elástica.* Supongamos que a cada punto de un cuerpo lo atraviesa un plano en el cual cada dos direcciones que son simétricas con respecto a este plano son equivalentes en cuanto a sus propiedades elásticas. Una dirección normal a este plano de simetría elástica será conocida como la dirección principal, es decir, aquella en donde los tensores de esfuerzo y deformación son considerados simultáneamente. En este caso sólo una dirección principal atraviesa el punto en consideración. Si se toma el eje z en dirección normal al plano de simetría y los otros dos ejes están en el plano, concluimos que ocho constantes elásticas son cero, dejando en 13 el número de constantes necesarias para su caracterización (ec. 2-4).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz}/2 \\ \gamma_{xz}/2 \\ \gamma_{xy}/2 \end{Bmatrix} \quad 2-4$$

- *Tres planos de simetría elástica (cuerpo ortótropo).* Si a través de un punto determinado pasan tres planos de simetría elástica, perpendiculares entre sí (ortótropos), y los planos similares de simetría elástica son paralelos en todos los puntos, entonces, tomando los ejes coordenados normales a los planos de simetría (a lo largo de las direcciones principales), encontramos que

ahora son 12 las constantes iguales a cero, por lo que la matriz elástica es de la forma siguiente (ec. 2-5)

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz}/2 \\ \gamma_{xz}/2 \\ \gamma_{xy}/2 \end{Bmatrix} \quad 2-5$$

- *Plano de isotropía (eje de simetría rotacional). Cuerpo de isotropía transversa.* Consideremos un cuerpo en el que a través de todos los puntos pasan planos paralelos de simetría elástica, en los cuales todas las direcciones son elásticamente equivalentes (planos de isotropía). En otras palabras, en cada punto existe una dirección principal y un infinito número de direcciones principales en un plano normal a la primera dirección. Tal cuerpo también puede ser referido como un cuerpo en el cual por cada punto pasa un eje de simetría elástica de orden infinito; es decir, un eje rotacional. Este es un cuerpo de isotropía transversa.

Si tomamos el eje  $z$  normal a un plano de isotropía, con los ejes  $x$  e  $y$  dirigidos arbitrariamente en este plano, la Ley de Hooke generalizada se expresa según la ecuación 2-6.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz}/2 \\ \gamma_{xz}/2 \\ \gamma_{xy}/2 \end{Bmatrix} \quad 2-6$$

El número de constantes elásticas independientes  $C_{ij}$  es cinco, donde  $C_{44}$  es el módulo de cortante vertical,  $C_{66}$  es el módulo de cortante horizontal,  $C_{11}$  es el módulo de compresibilidad horizontal y  $C_{33}$  es el módulo de compresibilidad vertical,  $C_{12} = C_{11} - 2C_{66}$  y  $C_{13}$  puede determinarse a partir de  $C_{11}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{44}$  y una medida de velocidad de onda de compresión tomada en cualquier dirección, generalmente a  $45^\circ$ , aunque puede ser cualquier dirección diferente de la

horizontal y vertical. Las constantes elásticas pueden ser determinadas utilizando el siguiente procedimiento:

La ecuación de Christoffel para la propagación de ondas en medios anisótropos se puede expresar como:

$$\det(\rho v^2 \delta_{ik} - \Gamma_{ik}) = 0 \quad 2-7$$

donde  $\rho$  es la densidad volumétrica,  $v$  es la velocidad de fase,  $\Gamma$  es el tensor de rigidez de Christoffel

$$\Gamma_{ik} = c_{ijkl} n_j n_l$$

y  $\delta$  es la delta de Kronecker. Resolviendo esta ecuación, y tomando la raíz positiva para la propagación a lo largo de los ejes se determinan cuatro de las cinco constantes elásticas:

$$C_{11} = \rho V_{PH}^2 = M_H \quad 2-8$$

$$C_{33} = \rho V_{PV}^2 = M_V \quad 2-9$$

$$C_{66} = \rho V_{SH}^2 = G_H \quad 2-10$$

$$C_{44} = \rho V_{SV}^2 = G_V \quad 2-11$$

Para resolver para  $C_{13}$  usando la velocidad de onda de corte o compresión medida sobre cualquier dirección excepto los ejes, se resuelve la ecuación 2-7 para  $C_{13}$ , después de formar el tensor  $\Gamma$  con apropiados cosenos directores para el ángulo de propagación usado. Para la propagación a  $45^\circ$  la solución se simplifica a

$$C_{13} = -C_{44} + m \sqrt{(C_{11} + C_{44} - 2\rho V_{45}^2)(C_{33} + C_{44} - 2\rho V_{45}^2)} \quad 2-12$$

Donde  $V_{45}$  es la velocidad de onda de compresión o de corte medida a  $45^\circ$  respecto al eje de simetría (eje vertical),  $m = -1$  para ondas de compresión y  $m = 1$  para ondas de cortante.

Además se pueden introducir las constantes ingenieriles o módulos en la ecuación 2-1, se tiene que las constantes de rigideces  $s_{ij}$  son:

$$\begin{aligned} s_{11} &= \frac{1}{E}, & s_{12} &= -\frac{\nu}{E}, & s_{33} &= \frac{1}{E'} \\ s_{13} &= -\frac{\nu'}{E'}, & s_{44} &= \frac{1}{G'}, & s_{66} &= \frac{1}{G} \end{aligned} \quad 2-13$$

y las ecuaciones de deformación son:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) - \frac{\nu'}{E'}\sigma_z, & \gamma_{yz} &= \frac{1}{G'}\tau_{yz} \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}(-\nu\sigma_x + \sigma_y) - \frac{\nu'}{E'}\sigma_z, & \gamma_{xz} &= \frac{1}{G'}\tau_{xz} \\ \varepsilon_z &= \frac{-\nu'}{E'}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{E'}\sigma_z, & \gamma_{xy} &= \frac{1}{G}\tau_{xy} \end{aligned} \quad 2-14$$

Donde,  $E$ ,  $E'$  son el módulo de Young para tensión o compresión en el plano de isotropía y en dirección normal a este.  $\nu$  es la relación de Poisson que caracteriza la contracción transversa en el plano de isotropía cuando se aplica tensión en este plano,  $\nu'$  caracteriza la contracción transversa en el plano de isotropía cuando la tensión es aplicada en una dirección normal al plano de isotropía.  $G = E/2(1+\nu)$  es el módulo de rigidez al cortante para el plano de isotropía,  $G'$  es el módulo de rigidez al cortante para cualquier plano perpendicular al plano de isotropía.

En este caso se ubican las arcillas blandas que no han sido sujetas a ningún otro tipo de deformación (como pliegues debidos a la acción tectónica, por ejemplo) así como otros tipos de suelo.

- *Cuerpo isótropo.* Si todas las direcciones en un cuerpo son elásticamente equivalentes y principales, entonces, colocando  $E'=E$ ,  $\nu'=\nu$ ,  $G'=G=E/2(1+\nu)$  en el grupo de ecuaciones 2-7 se obtienen las expresiones

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)], \quad \gamma_{yz} = \frac{1}{G}\tau_{yz}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)], & \gamma_{xz} &= \frac{1}{G} \tau_{xz} \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)], & \gamma_{xy} &= \frac{1}{G} \tau_{xy}\end{aligned}\quad 2-15$$

Cuya matriz en función de deformaciones se escribe a continuación:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{11} - C_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{11} - C_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{11} - C_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz}/2 \\ \gamma_{xz}/2 \\ \gamma_{xy}/2 \end{Bmatrix}\quad 2-16$$

#### 2.4. Determinación del grado de anisotropía

La manera más general de medir la anisotropía de un material con isotropía transversa es contrastar los módulos elásticos horizontal y vertical ( $G/G'$ ,  $E/E'$ ,  $\nu/\nu'$ ), lo cual proporciona una idea de la rigidez del material en estudio en función de la dirección; sin embargo, para algunas aplicaciones, como la determinación del esfuerzo en la dirección horizontal, conviene expresar tres de las 5 constantes dinámicas elásticas en términos de tres parámetros de anisotropía, introducidos inicialmente por (Thomsen, 1986):

$$\varepsilon = \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}} \quad 2-17$$

$$\gamma = \frac{C_{66} - C_{44}}{2C_{44}} \quad 2-18$$

$$\delta = \frac{(C_{13} - C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})^2}{2C_{33}(C_{33} - C_{44})} \quad 2-19$$

donde  $\varepsilon$  mide la anisotropía de las ondas P,  $\gamma$  mide la anisotropía de las ondas S, y,  $\delta$  es una combinación de los parámetros elásticos que es totalmente independiente de la velocidad horizontal y puede ser positiva o negativa para los geomateriales en estado natural, siendo éste parámetro el que controla la mayor parte del comportamiento anisótropo (Thomsen, 1986). La ventaja principal de estos parámetros es su naturaleza adimensional, lo que facilita la evaluación cualitativa del comportamiento del material.

Para los fines de este trabajo se empleó la manera más simple de determinar la anisotropía del material, es decir relacionando los módulos horizontal y vertical ( $V_{SH}/V_{SV}$ ).

### 2.5. Determinación experimental de las constantes elásticas E,G,v

Es muy bien conocido que el comportamiento del suelo bajo la acción de esfuerzos que producen grandes deformaciones es generalmente no lineal y plástico por naturaleza. Sin embargo, a deformaciones por debajo de 0.001% la respuesta del suelo se asume generalmente como lineal y elástica. La determinación de las propiedades a pequeñas deformaciones es muy importante pues juegan un rol esencial en varios problemas de tipo geotécnico, como la respuesta del suelo ante el sismo, la cimentación de grandes maquinarias, el tránsito de ferrocarriles de carga y la evaluación del potencial de licuación entre otros.

Teniendo en cuenta que la Ley de Hooke Generalizada modela la respuesta esfuerzo-deformación del material, las constantes elásticas involucradas deben ser medidas experimentalmente. En esta sección se describen los procedimientos realizados para determinar las constantes elásticas en el plano de isotropía como en el plano transversal.

El módulo de rigidez al cortante ( $G_0$ ), el módulo de Young ( $E_0$ ), el módulo de compresión volumétrica (bulk modulus,  $K_0$ ), el módulo de compresibilidad ( $M_0$ ) y la relación de Poisson ( $\nu$ ) son los parámetros a pequeñas deformaciones que se necesitan determinar, dentro de un programa de caracterización estática y dinámica del suelo. Para un medio isótropo y continuo (o para el plano de isotropía) solo dos de estos parámetros son independientes y la relación entre ellos se expresa de la siguiente manera:

$$G_0 = \frac{E_0}{2(1+\nu)} = \frac{3K_0(1-2\nu)}{2(1+\nu)} = \frac{M_0(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \quad 2-20$$

Gracias al desarrollo y gran avance que en los últimos años ha presentado la técnica de elementos bender, se puede medir en una probeta de laboratorio, en la misma dirección (horizontal, vertical o

inclinada) y trayectoria la velocidad de propagación de las ondas de corte y de compresión, para determinar los módulos  $G_0$  y  $M_0$ , que se calculan por las siguientes expresiones:

$$G_0 = \rho(V_S)^2 \quad 2-21$$

$$M_0 = \rho(V_P)^2 \quad 2-22$$

Donde  $\rho$  es la densidad del suelo por el que se propaga la onda,  $V_s$  y  $V_P$  son las velocidades de onda de corte y de compresión respectivamente.

Las ecuaciones 2-10 y 2-11 proporcionan el valor de  $G_0$  en los planos horizontal y vertical respectivamente. Para cualquier plano  $\alpha$ , diferente al plano principal, Zeng y Ni (1998) sugirieron que el módulo  $G_0$  en ese plano se puede determinar por:

$$G_\alpha = \frac{G_V G_H}{G_H \sin^2 \alpha + G_V \cos^2 \alpha} \quad 2-23$$

Donde  $\alpha$  es el ángulo de inclinación del plano investigado con respecto al plano horizontal,  $G_V$  es el módulo medido en el plano vertical y  $G_H$  es el módulo medido en el plano horizontal. La expresión 2-23 es la ecuación de una elipse con semiejes mayor y menor de  $G_V^{1/2}$  y  $G_H^{1/2}$  respectivamente.

Por otro lado, la relación de Poisson también puede ser determinada con base en las velocidades de onda cortante y de compresión medidas en la misma dirección, para esto basta con reemplazar las ecuaciones 2-21 y 2-22 en el primer y último términos de la ecuación 2-20, con lo que se obtiene la siguiente expresión:

$$\nu = \frac{1 - 0.5 \left( \frac{V_P}{V_S} \right)^2}{1 - \left( \frac{V_P}{V_S} \right)^2} \quad 2-24$$

La ecuación 2-24 es aplicable en suelos secos o parcialmente saturados, en donde la velocidad de onda de compresión  $V_P$  pueda ser determinada usando cualquier método incluyendo cristales piezoeléctricos. En suelos saturados  $V_P$  es cercana a 1530 m/s, por lo que no se puede emplear la ecuación 2-24 en este tipo de suelo.

---

### 3. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS EN EL RANGO ELÁSTICO

Dentro de los parámetros elásticos, la determinación del módulo de rigidez al corte supone una mayor dificultad que los otros módulos. Por esta razón se han desarrollado una diversidad de equipos y métodos para su determinación en campo y en laboratorio. Como ya se mencionó anteriormente, una forma para determinar el módulo  $G_0$  es midiendo la velocidad de onda de cortante y empleando las ecuaciones 2-10 y 2-11. Este enfoque puede ser aplicado tanto en pruebas de campo como en las de laboratorio si se tiene cuidado en la interpretación de los resultados de propagación de onda.

En este capítulo se presentan algunas pruebas tradicionalmente utilizadas para la determinación de  $G_0$ . Se pone énfasis en la prueba de los elementos bender.

#### 3.1. Pruebas de laboratorio

Las pruebas de laboratorio son diseñadas y ejecutadas bajo la hipótesis de que son representativas del área de interés y los aparatos intentan recrear las condiciones de campo. Los diferentes ensayos proveen diferentes condiciones de esfuerzo – deformación por lo que se debe escoger con cuidado el aparato que mejor represente las condiciones esperadas.

Para fines prácticos, se requieren determinar las propiedades mecánicas, tanto estáticas como dinámicas de campo, por lo que se recurre a muestras “inalteradas”, sin embargo, resulta muy difícil eliminar todo rastro de perturbación. Por esta razón, la presente investigación se desarrolló en muestras que no se extraen del muestreador de pared delgada (tipo Shelby), sino que se ensayan directamente dentro de él.

A continuación, se presenta una descripción breve de los ensayos más comunes para la determinación de las propiedades dinámicas a muy pequeñas deformaciones.

### 3.1.1. Columna resonante

En este ensayo la muestra se coloca y se consolida en una cámara donde se fija la parte inferior y se deja libre la parte superior, en la que se aplica una carga torsional normalmente armónica, con frecuencia y amplitud controladas. La carga cíclica inicia a baja frecuencia y se va incrementando hasta que se produzca la máxima respuesta. La frecuencia más baja a la que se produce la amplitud de deformación más alta se le conoce como frecuencia de resonancia en el primer modo.

Detalles con respecto a la frecuencia de resonancia y su relación al módulo cortante se pueden encontrar en (Kramer, 1996). En resumen, se usa la solución de la ecuación de movimiento para un sistema de péndulo invertido y el momento polar de la masa  $I$ , y del sistema de carga  $I_0$  son relacionadas como sigue:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\omega_n h}{v_s} \tan \frac{\omega_n h}{v_s} \quad 3-1$$

Donde  $h$  es la altura de la muestra, y  $\omega_n$  es la frecuencia angular del  $n$ -ésimo modo. De la ecuación 3-1, se obtiene  $V_s$  y  $G_0$  puede determinarse con la ecuación 2-21.

Este ensayo también permite determinar el amortiguamiento del material. Esto requiere otro tipo de análisis, el cual no es objeto del presente trabajo.

### 3.1.2. Corte torsional simple

Esta prueba consiste en colocar una muestra en forma de cilindro hueco dentro de una cámara, consolidarla al estado de esfuerzos deseado, de forma isótropa o anisótropa. A continuación, se le aplica un torque para provocar el corte continuo de la muestra.

La condición de corte simple requiere el movimiento paralelo de todos los planos paralelos en la dirección del corte, sin que haya cambio en la forma original. Todas las deformaciones horizontales

---

normales se mantienen en cero. Para obtener esta condición, la muestra es sujeta a la aplicación de presión sobre su cara interna y también sobre su cara externa, las cuales pueden ser controladas independientemente. El cambio de volumen se controla midiendo la cantidad de agua expulsada o ingresada al cilindro. La presión axial es aplicada en términos de presión de aire y es independiente de las presiones aplicadas sobre las caras del cilindro.

### **3.1.3. Prueba de los elementos bender**

La técnica de los elementos bender fue propuesta inicialmente por (Shirley & Hampton, 1978) y más tarde por (Dyvik & Madshus, 1985) e involucra el uso de transductores piezoeléctricos capaces de generar y detectar ondas de cortante y de compresión (Lings & Greening, 2001). Los elementos bender son relativamente baratos, pueden ser conectados de manera sencilla (Lee & Santamarina, 2005) y pueden ser fácilmente incorporados a un gran número de aparatos para ensayos geotécnicos (Viggiani & Atkinson, 1995b; Jovicic, et al., 1996; Zeng & Ni, 1999; Dyvik & Olsen, 1989). Sin embargo, a pesar de su popularidad y versatilidad, aún no existe una metodología definitiva para su uso y los procedimientos de interpretación de las señales varían considerablemente de un investigador a otro.

Para determinar  $V_s$  usando elementos bender sólo se requiere conocer la distancia de viaje de la onda entre el emisor y el receptor y el tiempo de viaje. La distancia entre los elementos bender (tip-to-tip) es relativamente fácil de determinar, pero el tiempo de viaje es mucho más problemático debido a que la señal de llegada puede estar significativamente alterada con respecto a la señal de partida. El criterio que más se ha utilizado en la estimación de la primera llegada es mediante una inspección visual de la señal recibida; pero, debido a los efectos de campo cercano y de reflexión de las ondas en las fronteras de la muestra, este criterio puede conllevar errores significativos en la interpretación del tiempo de viaje. La importancia de los efectos de campo cercano en los ensayos con elementos bender ha sido ampliamente discutida (Jovicic, et al., 1996; Lee & Santamarina, 2005; Brignoli, et al., 1996; Arroyo, et al., 2003;

Viggiani & Atkinson, 1995a). (Sanchez-Salineró, et al., 1986), presentaron evidencia numérica de que el efecto de campo cercano puede enmascarar la primera llegada de la onda cortante y propusieron los siguientes límites para la interpretación de las señales producidas con elementos bender:

$$2 < \frac{d}{\lambda} < 4 \quad 3-2$$

Donde  $d$  es la distancia entre los elementos y  $\lambda$  es la longitud de onda. El límite inferior toma en cuenta el efecto de campo cercano y el límite superior minimiza la atenuación de la señal.

Con estas recomendaciones (Kawaguchi, et al., 2001), sugirieron seleccionar el punto 3 de la Figura 10 como la llegada correcta. En esta figura se observa el efecto de campo cercano en la señal de llegada y muestra puntos característicos: 1 marca la primera deflexión, 2 el primer mínimo, 3 el cero después del primer mínimo y 4 el primer pico máximo.

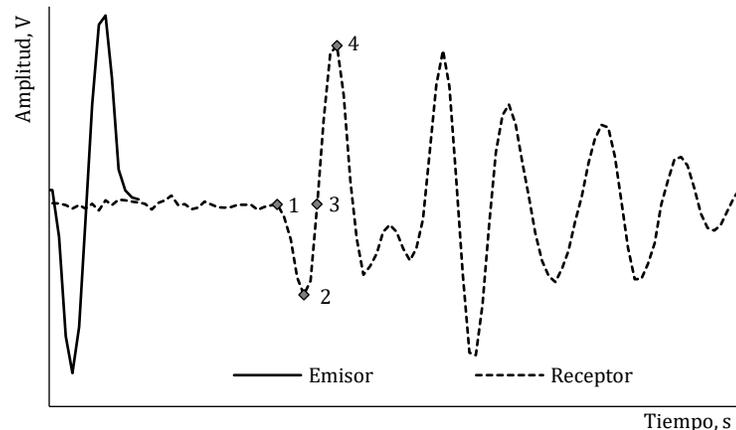


Figura 10. Señales típicas de elementos bender usando una función senoidal de pulso. (Bonal, et al., 2012).

(Donohue, 2005) mostró que cada uno de los puntos característicos de la Figura 10 pueden estar afectados por la frecuencia aún sobre el límite superior propuesto por Sánchez-Salineró. (Arroyo, et al., 2003) sugirieron que las mediciones en el campo lejano pueden ser poco precisas.

Varios autores han presentado alternativas para la interpretación del tiempo de viaje, basados en los dominios del tiempo y de la frecuencia (Viggiani & Atkinson, 1995b; Brocanelli & Rinaldi, 1998;

---

Moshin, et al., 2004). (Arulnathan, et al., 1998) sugirió usar múltiples reflexiones para tratar las incertidumbres tanto en la distancia como en el tiempo de viaje. (Lee & Santamarina, 2005) recomendaron la correlación cruzada (*cross correlation*) entre el primer y el segundo evento de llegada, pero las reflexiones múltiples no siempre se pueden detectar por efecto de la atenuación de la onda y la correlación cruzada es recomendada sólo si el efecto de campo cercano no se pronuncia y los dos receptores poseen funciones de transferencia muy similares (Wang, et al., 2007).

Dentro del dominio de la frecuencia, un método que se ha estudiado mucho en los últimos años es el del retardo de fase (*phase-delay*), usado primero por (Viggiani & Atkinson, 1995b). Usando esta técnica (Arroyo, et al., 2003) desarrollaron un criterio para asegurar que las mediciones de velocidad están fuera de la influencia del campo cercano, sin embargo, (Greening, et al., 2003) encontraron que se llega a valores de  $V_s$  menores en comparación con los determinados en el dominio del tiempo.

(Brandenberg, et al., 2008) usaron ondículas (wavelets) para medir el tiempo de viaje. Observaron que sus mediciones son menos sensibles al ruido y al efecto de campo cercano, en comparación con los criterios visuales de la Figura 10. (Arroyo, 2007) también usó ondículas y desarrolló un mecanismo para interpretar la señal de salida usando crestas o patrones dentro de límites estrechos.

### 3.2. Pruebas de campo

Este tipo de pruebas tiene la ventaja de que las condiciones de esfuerzo, químicas, térmicas y estructurales están presentes. Otra ventaja es que no se requiere de la extracción de muestras de ningún tipo, por lo que la perturbación no es un inconveniente. El contra de estos ensayos es que, la condición de campo es la única que puede ser estudiada, pues no se pueden variar las condiciones establecidas, y tampoco se puede controlar la variación en la presión de poro.

Se pueden ejecutar ensayos tanto en la superficie del suelo, como en el interior a través de perforaciones. Los ensayos en superficie (reflexión y refracción sísmica, vibración aleatoria, SASW, MASW) son útiles cuando se tiene un terreno difícil de perforar, más aún, de obtener muestras para estudiarlas en laboratorio. Son ensayos generalmente baratos y pueden ser ejecutados rápidamente. Las pruebas que requieren perforaciones (*Cross-hole*, *down-hole*, *up-hole*, como sísmico de penetración, sonda suspendida) son más costosas, pero su interpretación es más directa y la información que proporcionan como las características visuales del suelo y la localización del nivel freático se obtienen directamente de los registros.

### 3.3. Parámetros que inciden en el valor de $G_0$

Varias investigaciones han demostrado que el valor de  $G_0$  depende de varios parámetros, complicando así la interpretación del comportamiento del módulo de rigidez al corte. Hace varias décadas Hardin presentó una ecuación (3-3) que define  $G_0$  en función de los parámetros que se supone influyen al valor de  $G_0$  (estructura del suelo, de la relación de vacíos, estado de esfuerzos y relación de preconsolidación), (Hardin, 1978).

$$G_0 = AF(e)\sigma'_m{}^n \sigma_r^{(1-n)}(OCR)^k \quad 3-3$$

Donde  $AF(e)(OCR)^k$  es una medida de la rigidez que depende de  $e$  y del OCR.  $A$  es una constante empírica que depende del tipo de suelo y del esfuerzo de referencia elegido.  $F(e)$  es una función de la relación de vacíos,  $\sigma'_m$  es el esfuerzo efectivo confinante medio,  $\sigma_r$  es el esfuerzo de referencia, generalmente la presión atmosférica ( $p_a = 100$  kPa); y, OCR es la relación de preconsolidación.  $n$  y  $k$  son exponentes que dependen del tipo de suelo,  $k$  depende del índice de plasticidad.

Adicionalmente, pruebas de laboratorio realizadas por varios investigadores han mostrado la variación de  $G_0$  con el tiempo de consolidación y con el índice de plasticidad, siendo éste un parámetro de gran influencia (Knutsen, 2014).

Un resumen de los efectos de diferentes parámetros sobre  $G_0$  se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros que influyen en el valor de  $G_0$  (Dobry & Vucetic, 1987)

| Parámetro  | $G_0$  | $G/G_0$   |
|--|--|---|
| Presión media de confinamiento, $\sigma'_m$                | Se incrementa con $\sigma'_m$  | Permanece constante o se incrementa con $\sigma'_m$   |
| Relación de vacíos, $e$                                    | Decrece con $e$  | Se incrementa con $e$   |
| Edad geológica, $t_g$                                      | Se incrementa con $t_g$  | Se puede incrementar con $t_g$  |
| Cementación, $c$   | Se incrementa con $c$  | Se puede incrementar con $c$  |
| Relación de preconsolidación, OCR                          | Se incrementa con OCR  | No se afecta  |
| Índice de plasticidad, $I_p$                               | Se incrementa si $OCR > 1$   | Se incrementa con $I_p$   |
|  | Permanece constante si $OCR = 1$   |   |
| Deformación cíclica $\gamma_c$                             | -  | Decrece con $\gamma_c$  |
| Tasa de deformación $\gamma$ (frecuencia de carga cíclica) | Se incrementa con $\gamma$   | Probablemente no se afecta si $G$ y $G_0$ son medidos a la misma deformación.                   |
| Número de ciclos de carga, $N$                             | Decrece después de $N$ ciclos de deformación cíclica grande pero se recupera con el tiempo | Decrece después de $N$ ciclos de deformación cíclica grande ( $G_0$ medido antes de $N$ ciclos) |

En el presente trabajo se estudia la variación de  $G_0$  con la variación de esfuerzo efectivo aplicado, esfuerzo de preconsolidación y algunas relaciones fundamentales, pero principalmente se estudia el comportamiento de  $G_0$  con la dirección de propagación de la onda de cortante, como una medida de la anisotropía del material.

---

## 4. METODOLOGÍA

En este capítulo se aborda la ejecución de la investigación experimental comprendida, por una parte, por varios ensayos de propagación de ondas de corte y compresión en diferentes direcciones dentro del odómetro instrumentado; y por otra, por el ensayo de columna resonante efectuado sobre especímenes cortados en dirección horizontal ( $0^\circ$ ), vertical ( $90^\circ$ ) y a  $60^\circ$ . Cabe aclarar que los ensayos de columna resonante se realizaron para contrastar y verificar los resultados obtenidos de las pruebas de elementos bender.

### 4.1. Ensayo de elementos bender en odómetro

En este capítulo se detalla el proceso de fabricación de los transductores piezoeléctricos y su instalación en el equipo de consolidación con énfasis en el método de ensayo.

#### 4.1.1. Especificaciones y fabricación de los transductores

En este trabajo se utilizaron placas piezocerámicas 5H4E provistas por Piezo systems. Inc. Además de la polarización y la configuración que se utilicen (ver sección 2.2), dependiendo de qué tipo de ondas se desean generar, el proceso de fabricación del transductor piezoeléctrico, previo a su montaje en cualquier equipo de ensayo incluye: la aplicación de un aislamiento eléctrico a base de pintura de plata para prevenir problemas de acople electromagnético (cross-talk) que son indeseables en el sentido de que alteran la llegada de la onda e impiden una determinación precisa del tiempo de arribo; y, finalmente un encapsulado que lo proteja de la acción corrosiva y de la humedad del suelo ensayado. Generalmente se utiliza un recubrimiento de poliuretano líquido como encapsulado final (Valle, 2006; Sawangsuriya, 2012; Patel, et al., 2010; Lee & Santamarina, 2006), pero algunos autores han utilizado también resina epóxica (Pennington, 1999; Mitaritona, et al., 2010; Prasad & Kuwano, 2013) y cemento a base de PVC (Zhu & Bate, 2014).

Respecto de esta última etapa, y teniendo en cuenta que el material utilizado como encapsulado final puede influir notablemente en la rigidez del elemento y por lo tanto disminuir su sensibilidad mecánica, se probaron diferentes tipos de encapsulado para el elemento emisor: poliuretano líquido (M-Coat), acetato, resina fotosensible (Fotoplast) y termofit; mientras que el encapsulado del receptor en todos los casos fue de resina fotosensible, como se ve en la Figura 11.

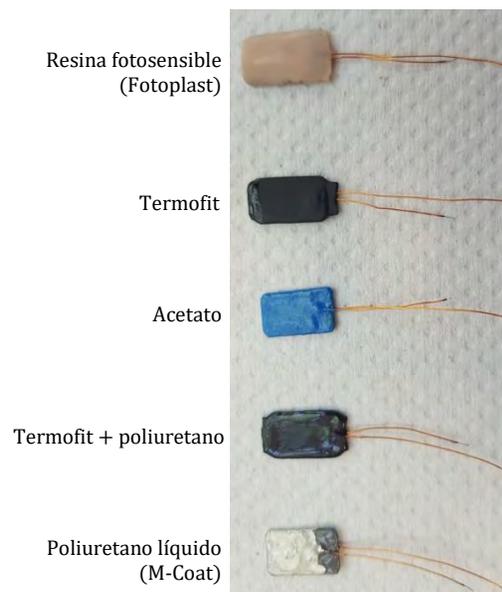


Figura 11. Materiales usados como encapsulado final.

| Frecuencia,<br>kHz | Velocidad de propagación, m/s |                        |                        |          |                           |
|--------------------|-------------------------------|------------------------|------------------------|----------|---------------------------|
|                    | Acetato                       | Resina<br>fotosensible | Poliuretano<br>líquido | Termofit | Termofit +<br>poliuretano |
| 1                  | 37.25                         | 29.35                  | 52.37                  | 33.87    | 30.57                     |
| 4                  | 43.90                         | 33.87                  | 36.07                  | 34.11    | 33.76                     |
| 7                  | 35.77                         | 32.78                  | 33.30                  | 33.89    | 33.58                     |
| 10                 | 1380.36                       | 1332.76                | 1136.76                | 34.71    | 1515.69                   |
| 20                 | 1405.45                       | 1458.49                | 1207.81                | 1136.76  | 1546.00                   |
| 30                 | 1405.45                       | 1405.45                | 1189.23                | 1153.73  | 1515.69                   |
| 40                 | 1431.48                       | 1380.36                | 1207.81                | 1153.73  | 1515.69                   |

Las pruebas se realizaron en una muestra inalterada de arcilla, contenida en su tubo shelby, al aire libre y sin aplicar esfuerzo axial. Se aplicó un barrido de frecuencias desde 1 kHz hasta 40 kHz y se registró la onda de llegada.

Se pudo observar que los cristales, conectados en serie y con polaridad opuesta, cambian su comportamiento con la variación de la frecuencia, encontrando así que en estricto rigor no se requiere de elementos de polaridad opuesta y diferente configuración de conexión eléctrica para generar y registrar ondas de compresión y de corte (Chamorro & Ovando, 2019). Si la muestra tiene un porcentaje de saturación inferior al 100 los valores de velocidad de onda de compresión registrados serán inferiores a los que se han obtenido en ensayos anteriores para este tipo de suelo. Los resultados se resumen en la Tabla 2; y, en la Figura 12 se muestra solamente la velocidad de onda de cortante.

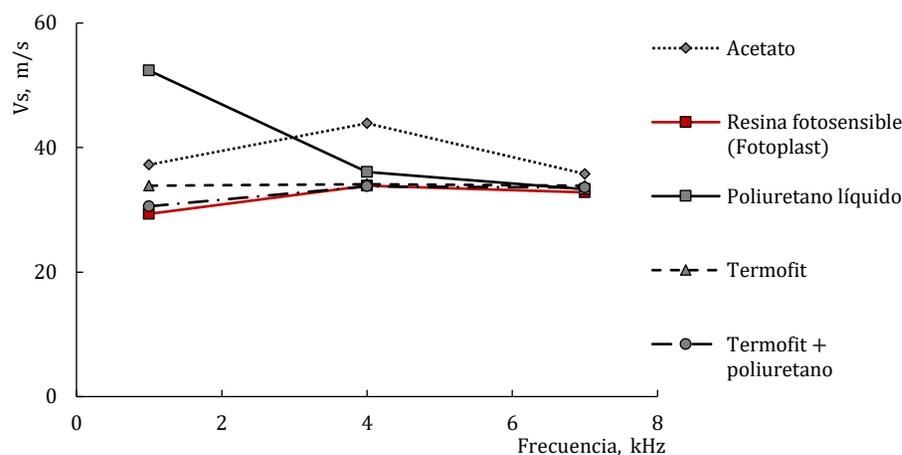


Figura 12. Velocidad de propagación de ondas con diferentes materiales de encapsulado.

Con base en los resultados de la Tabla 2 y de la Figura 12, se concluyó que el funcionamiento de los transductores piezoeléctricos se vio afectado al utilizar recubrimientos de acetato y de poliuretano líquido. Por otro lado, al utilizar resina fotosensible (Fotoplast), termofit y una combinación de termofit y poliuretano líquido, los resultados son muy semejantes entre sí y semejantes a los esperados para este tipo de suelo. Finalmente, por cuestiones de disposición de material se optó por utilizar la resina fotosensible (Fotoplast) en todos los ensayos.

#### 4.1.2. Evaluación del tiempo de retardo y prueba de funcionamiento de los transductores

Posterior a la fabricación de los transductores y previo al montaje en el equipo de consolidación, se probó el desempeño de los cristales y se calibró mediante la determinación del tiempo de retardo. Esta

práctica permite conocer además el tiempo que la señal tarda en llegar al receptor desde el momento en que es emitida, y no es instantánea debido a los equipos periféricos que se utilizan. Este valor es importante pues debe ser restado del tiempo de viaje desde el emisor hacia el receptor para determinar con mayor precisión la velocidad de onda, tanto de corte como de compresión que atraviesa la probeta de suelo.

Para esto se colocó el emisor en contacto directo con el receptor y se aplicó una señal de tipo de pulso sinusoidal, utilizando un barrido de frecuencias similar al que se utilizó durante las pruebas. En la Figura 13 se muestra la diferencia que existe entre la primera deflexión de la señal emitida y la primera deflexión de las señales recibidas. Para la misma señal emisora algunos de los receptores presentan polaridad opuesta, siendo un problema que puede ocasionar errores en la determinación de la velocidad de onda cortante. Se resuelve invirtiendo la señal recibida.

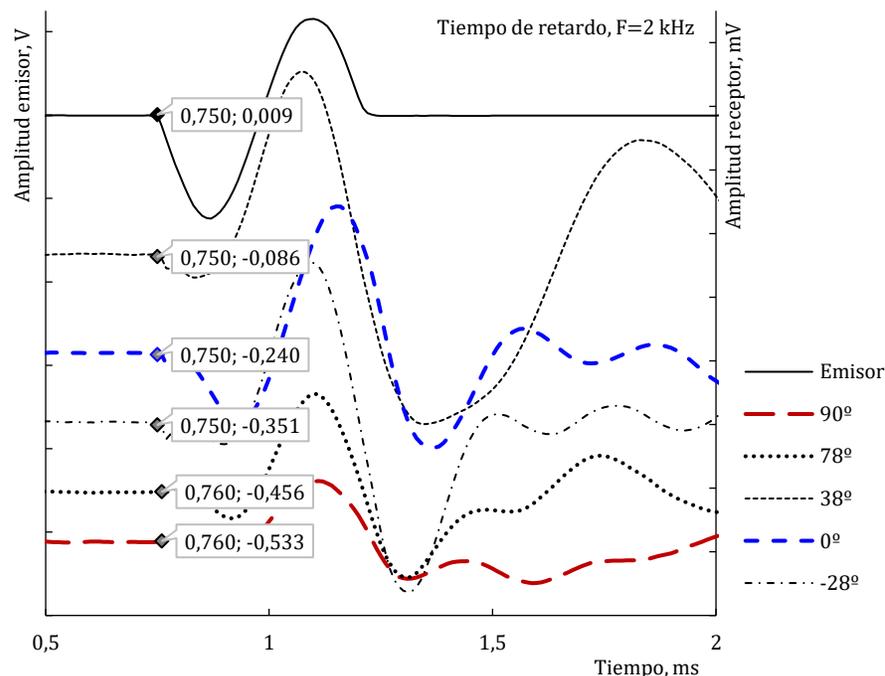


Figura 13. Determinación del tiempo de retardo para la frecuencia de 2kHz.

En la Tabla 3 se muestran los tiempos de retardo medidos para el conjunto de transductores utilizados en la prueba P1-D. Se observa que el mayor tiempo de retardo para las frecuencias entre 2 y 6 kHz fue

de 0.00005 segundos y el menor fue de 0 segundos. Para las frecuencias de 20 y 30 kHz el tiempo de retardo está entre 0.000003 y 0.00001 segundos.

**Tabla 3. Tiempo de retardo del sistema medido en diferentes direcciones**

| Dirección | Frecuencia (kHz) | Tiempo de retardo del sistema, $\times 10^{-3}$ s |      |       |       |  |
|-----------|------------------|---|------|-------|-------|--|
|           | 2                | 4   | 6    | 20    | 30    |  |
| 90°       | 0.01             | 0.05  | 0.00 | 0.006 | 0.005 |  |
| 78°       | 0.01             | 0.05  | 0.02 | 0.010 | 0.010 |  |
| 38°       | 0.00             | 0.00  | 0.00 | 0.003 | 0.003 |  |
| 0°        | 0.00             | 0.00  | 0.00 | 0.006 | 0.008 |  |
| -28°      | 0.00             | 0.00  | 0.00 | 0.006 | 0.005 |  |

#### 4.1.3. Medición de la velocidad de ondas de corte y compresión

Generalmente, durante la ejecución de una prueba con transductores piezoeléctricos se utiliza un par de elementos bender para propagar ondas de corte (S) y un par de discos para propagar ondas de compresión (P); pero debido a la heterogeneidad del suelo, varios investigadores han volcado esfuerzos para desarrollar técnicas que permitan propagar los dos tipos de onda en la misma trayectoria. Un ejemplo de esto es el elemento bender-extender (Lings & Greening, 2001) que utiliza una modificación en la conexión de los elementos bender para que puedan generar ambos tipos de ondas; sin embargo, este procedimiento involucra equipo periférico adicional para que los transductores se comporten como elementos de flexión o de compresión. Otros investigadores (Prasad & Kuwano, 2013) demostraron que una combinación de elementos piezoeléctricos en forma de discos de gran espesor, conectados y polarizados adecuadamente, permiten propagar ondas P y S evitando la perturbación local que se produce al introducir los elementos bender en la probeta; esta variante involucra equipo periférico adicional y cierta complejidad en la conexión eléctrica.

En el presente trabajo se presenta una alternativa más simple y económica a los procedimientos establecidos para la generación de ondas de cortante y de compresión en la misma trayectoria, utilizando elementos bender polarizados en  $x$  y conectados en serie, los cuales emiten ondas de cortante a frecuencias menores a 8 kHz y ondas de compresión a frecuencias mayores a 40 kHz. Los resultados se

compararon con pruebas realizadas anteriormente en donde se utilizaron discos para la determinación de  $V_P$  y elementos bender para  $V_S$ , en muestras de similar origen y tamaño observándose muy buenos resultados. Mayores detalles se pueden encontrar en (Chamorro & Ovando, 2019).

#### 4.1.4. Equipo utilizado

En la presente investigación se utilizó un consolidómetro de palanca de grandes dimensiones. Siguiendo el esquema de ensayo ejecutado por (Chamorro, 2016), las muestras de suelo se ensayaron dentro del tubo de aluminio de pared delgada en el cual se extrajeron de campo, en reemplazo de anillo de consolidación con el objeto de disminuir la alteración producida por la extracción y montaje. Los ensayos de consolidación se efectuaron principalmente sobre muestras procedentes de la formación arcillosa superior (entre 10 m y 20 m de profundidad) del antiguo lago de Texcoco, en etapas de carga, descarga y recarga, con incrementos de esfuerzo efectivo de  $0.20 \text{ kg/cm}^2$  hasta llegar al máximo de  $1.00 \text{ kg/cm}^2$  y a partir de ahí con incrementos de  $0.50 \text{ kg/cm}^2$  hasta llegar a  $2.00 \text{ kg/cm}^2$  o hasta alcanzar la deformación axial máxima permitida por el equipo (24 mm). A continuación, se realizaron las etapas de descarga y recarga. La longitud inicial de cada espécimen fue de 12 cm.

En cada espécimen se colocaron cuatro transductores piezoeléctricos laterales en un plano horizontal a 9.4 cm medidos desde la base de la cazuela, usando un mini taladro con disco para cortar metal. Para esto se hicieron cuatro cortes correspondientes sobre el tubo de aluminio. De estos cuatro transductores, dos se polarizaron en el plano horizontal (ondas  $S_{HH}$ ) y dos en el plano vertical (ondas  $S_{HV}$ ). Se dispuso un transductor en el pedestal y dos en la tapa (ondas  $S_{VH}$ ) (Figura 15).

Se propagó un pulso senoidal como señal de entrada o emisor, el cual fue producido por un generador de ondas fabricado por el departamento de Instrumentación del Instituto de Ingeniería, UNAM. Las señales, tanto la emitida como la recibida, se visualizaron en un osciloscopio de marca HP, modelo 50504<sup>a</sup> y se adquirieron utilizando un software previamente desarrollado en el programa gráfico

*LabVIEW* de la empresa *National Instruments* en el Instituto de Ingeniería UNAM. El archivo generado contiene información en función del tiempo, de la amplitud de la señal emisora y amplitud de la señal receptora. Este archivo es de tipo texto y es fácilmente trabajable en una hoja electrónica. La Figura 14 muestra un esquema del equipo utilizado y su funcionamiento.

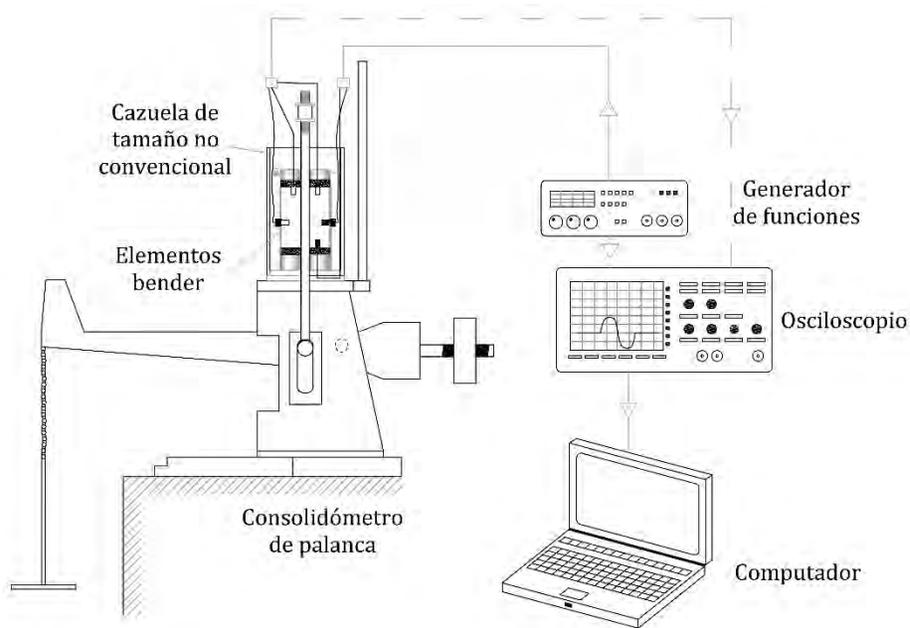


Figura 14. Esquema de instrumentación

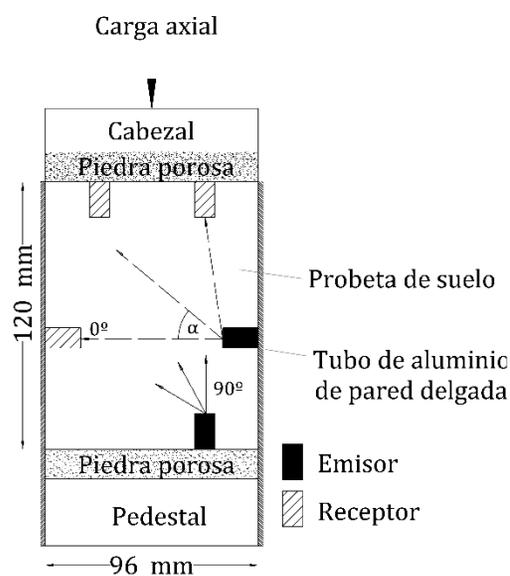


Figura 15. Polarización de las señales

Cada incremento de esfuerzo efectivo se aplicó una vez que se alcanzó el 100% de la consolidación primaria y como máximo después de 72 horas de aplicado el incremento anterior o lo cual se verificó en la curva de consolidación. Antes de realizar el incremento de esfuerzo se midieron las velocidades de propagación de ondas de corte y de compresión en diferentes direcciones con respecto al plano horizontal ( $-76^\circ$ ,  $-46^\circ$ ,  $-28^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $38^\circ$ ,  $65^\circ$ ,  $78^\circ$  y  $90^\circ$ ) usando frecuencias de 2, 4 y 6 kHz para la propagación de ondas de corte y de 40 kHz y 60 kHz para ondas de compresión.

#### 4.1.5. Análisis e interpretación de señales

Para estimar el tiempo de arribo de la onda cortante se han desarrollado varios métodos de interpretación que buscan superar factores adversos como son el efecto de campo cercano, el ruido y el acoplamiento electromagnético entre otros, que pueden enmascarar y hasta ocultar la llegada de la onda cortante. Estos métodos de interpretación se clasifican de acuerdo al dominio en el que aplican, sea del tiempo (DT) o de la frecuencia (DF). Los métodos del dominio del tiempo se conocen también como criterios visuales pues se basan en la identificación visual de puntos característicos en las señales, mientras que los métodos del dominio de la frecuencia son métodos matemáticos que conllevan cierta complejidad. Además, se puede utilizar el método de la correlación cruzada en el dominio del tiempo (discreta) o en el dominio de la frecuencia (continua). El análisis de las señales correspondientes a las ondas de compresión es más sencillo pues debido a que estas ondas se propagan a altas frecuencias (mayores a 30 kHz) están libres de los efectos de campo cercano y, aunque hubiera acople electromagnético, el pulso emisor está lo suficientemente alejado de la señal receptora en términos de tiempo, por lo tanto, no le produce ninguna perturbación. En este trabajo se empleó el criterio de primera deflexión para el análisis de las señales de compresión.

En esta sección se muestra una breve descripción de los criterios utilizados (visuales y matemáticos) en este trabajo para determinar la velocidad de propagación de ondas de corte y de compresión, así como

una hoja electrónica desarrollada para visualizar de manera simultánea los resultados de tiempo de arribo y de velocidad con cada uno de los criterios empleados, también se pueden observar gráficos comparativos de estos valores, lo que permite al usuario tener un mejor criterio de selección del método a emplear.

## Criterios visuales

### Primera deflexión

Este método consiste en seleccionar la primera deflexión tanto de la onda emisora como de la onda receptora. La diferencia entre los tiempos correspondientes a las deflexiones seleccionadas (Figura 24) es el tiempo de llegada (Viggiani & Atkinson, 1995b; Jovicic, et al., 1996). La principal desventaja de este método es la distorsión que se genera en la onda de llegada por influencia del campo cercano, la cual puede enmascarar la llegada. Esta distorsión es mayor al utilizar frecuencias de excitación bajas y disminuye conforme se incrementa la frecuencia

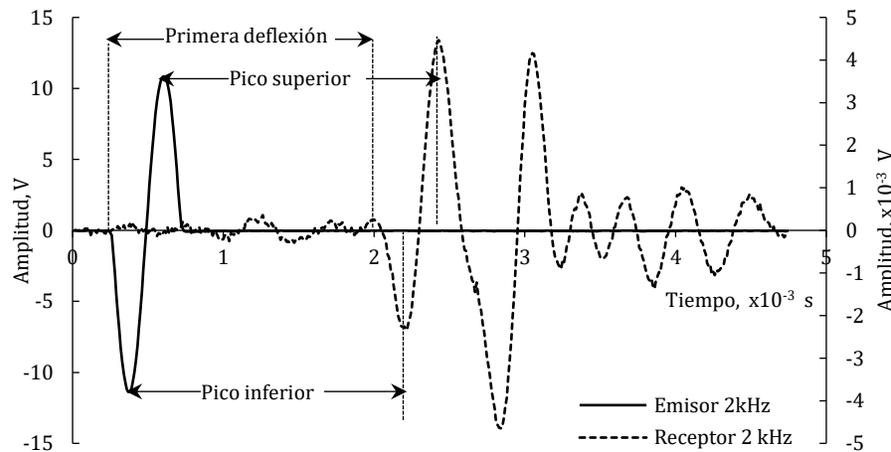


Figura 16. Criterios de primera deflexión y pico-pico superior e inferior.

### Pico a pico

Este método está basado en el supuesto de que la señal receptora muestra una gran similitud con la señal emisora (Viggiani & Atkinson, 1995b). Consiste en seleccionar los picos superiores o inferiores de

las dos señales; la diferencia de tiempo correspondiente a cada par de picos (superior e inferior) será el tiempo de arribo (Figura 16). Debido al efecto de dispersión causado por la geometría de la muestra y la absorción de energía por el suelo (atenuación o amortiguamiento), la señal receptora se distorsiona y no siempre es fácil determinar los picos correctos.

### Intersección de ondas

Consiste en tomar un barrido de frecuencias i.e., 2, 4 y 6 kHz y sobreponer las ondas emisoras haciéndolas coincidir en su tramo central, en el punto de cero amplitud. Al hacer esto se observa que las correspondientes ondas receptoras también coinciden entre sí, o se intersectan en un punto cercano al cero de amplitud, que no cambia en relación con la frecuencia de excitación como se ve en la Figura 17. La diferencia de tiempo entre la intersección de las ondas emisoras y la intersección de las ondas receptoras corresponde al tiempo de arribo. Este criterio es una nueva propuesta que se ha trabajado en conjunto con el M.I. Alfonso Fernández.

Este método ha demostrado ser efectivo para ondas de cortante, es decir, induciendo frecuencias de oscilación menores a 10 kHz y ha sido probado en señales experimentales y sintéticas fuertemente afectadas por efecto de campo cercano, ruido y acople electromagnético.

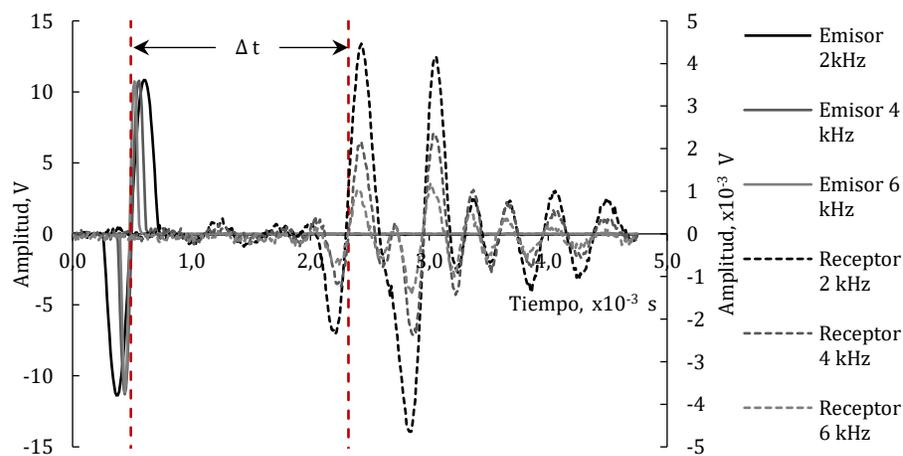


Figura 17. Criterio de intersección de ondas

Dada la facilidad y mayor eficiencia de este método de intersección con respecto a los otros métodos del dominio del tiempo, como se ve más adelante, se lo ha utilizado para analizar las señales en el presente trabajo.

### Criterios matemáticos

#### Correlación cruzada discreta

El análisis de correlación cruzada proporciona una medida de la correspondencia o interrelación entre dos señales: emisor y receptor. A diferencia del método introducido por Viggiani y Atkinson (1995) en el cual es necesario convertir las señales del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia para obtener señales armónicas de amplitud y frecuencia conocidas, el método que se emplea en este trabajo, utiliza las señales originales, obtenidas en el dominio del tiempo y las correlaciona mediante la siguiente expresión:

$$\text{Corr}_{x,y}[k] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] y[k - n] \quad 4-1$$

Donde  $\text{Corr}_{x,y}[k]$  es el coeficiente de correlación,  $x[k]$  es la señal emisora,  $y[k]$  es la señal receptora y  $n=0,\pm 1,\pm 2,\pm 3,\dots$ . Con esta técnica se obtiene, de una manera fácilmente programable el tiempo de arribo entre las señales, restando la subjetividad que implica cualquier método visual empleado.

En la Figura 18a se observa un par de señales, emisora y receptora, obtenidas con elementos bender en el equipo de consolidación, mientras que en la Figura 18b se muestra el resultado de la correlación de amplitudes, o correlación cruzada, en donde el mayor pico positivo marca el tiempo de llegada de la onda receptora.

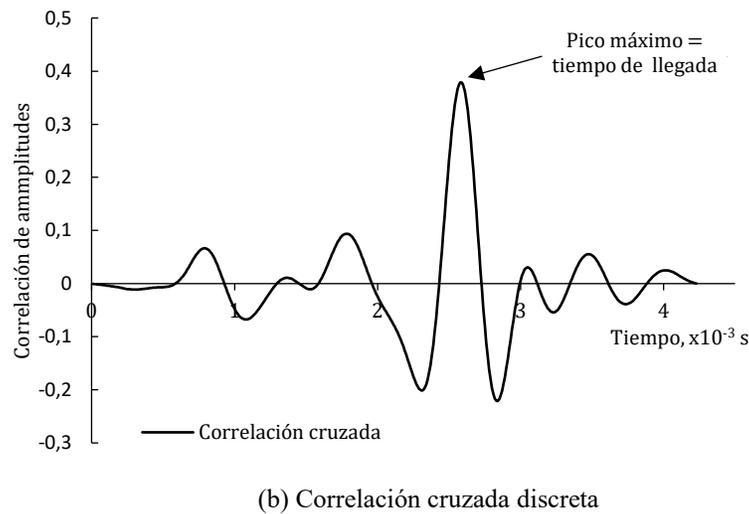
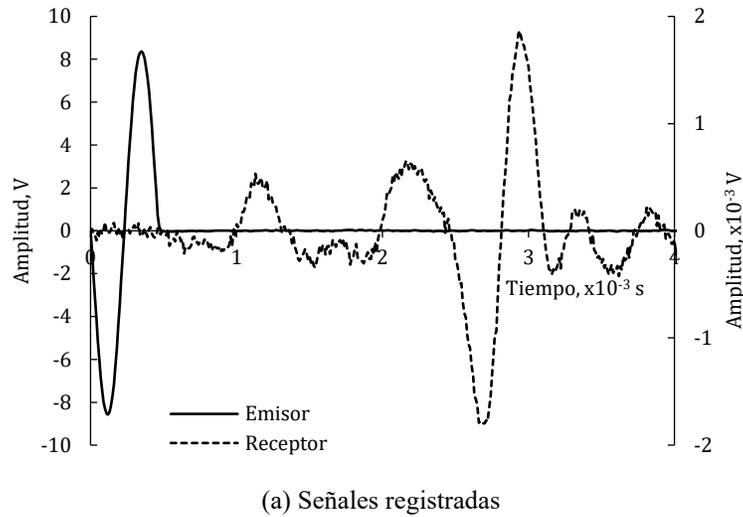


Figura 18. Correlación cruzada en el dominio del tiempo

Es importante recordar que, debido al proceso de fabricación de los transductores piezoeléctricos, las señales receptoras no siempre están en fase con las emisoras, es decir que pueden estar invertidas totalmente. De no corregirse la fase, los resultados por cualquiera de los métodos serán errados.

### Comparación entre los criterios utilizados

Una vez registrada la propagación de las ondas de cortante, se procedió a determinar visualmente el tiempo de llegada utilizando los criterios visuales descritos; y, matemáticamente con el método de la correlación cruzada discreta (ec. 4-1) para un barrido de frecuencia de entre 2 kHz y 6 kHz (Tabla 4).

Tabla 4. Diferencia en el tiempo de llegada usando varios criterios

| Criterio              | Tiempo (ms)      |       |       |       |       |       |
|-----------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                       | Frecuencia (khz) | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| Correlación cruzada   |                  | 1.440 | 1.470 | 1.470 | 1.489 | 1.489 |
| Pico superior         |                  | 1.440 | 1.470 | 1.500 | 1.509 | 1.489 |
| Pico inferior         |                  | 1.470 | 1.470 | 1.440 | 1.469 | 1.469 |
| Primera deflexión     |                  | 1.290 | 1.390 | 1.390 | 1.379 | 1.389 |
| Intersección de ondas |                  | 1.450 | 1.450 | 1.450 | 1.450 | 1.450 |

Nota: La diferencia de tiempo se calculó con respecto al promedio de las mediciones con cada método.

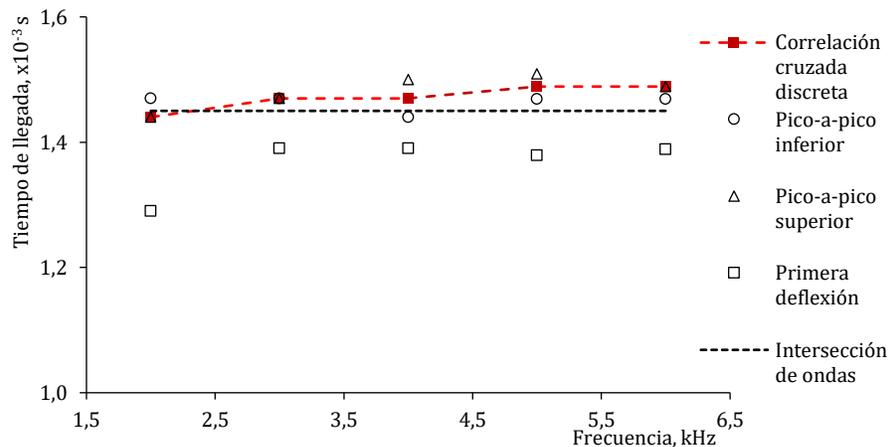


Figura 19. Relación entre frecuencia de excitación y tiempo de arribo

En la Figura 19 se presenta la relación entre frecuencia de excitación y el tiempo de arribo de la onda cortante. Se observa que la mayoría de los métodos visuales empleados en este trabajo están influenciados por el efecto de campo cercano cuando se utilizan frecuencias inferiores a los 3 kHz, a partir de esta frecuencia la tendencia es claramente lineal e independiente del criterio adoptado; sin embargo, el mejor criterio será aquel cuyos valores tengan menor variación con respecto a la frecuencia de excitación.

Se observa (Figura 19) que el criterio de intersección de ondas proporciona resultados que no varían con la frecuencia de excitación, por lo que este criterio es el más apropiado para analizar las señales. Además, se ha calculado el error que genera la interpretación de los resultados utilizando los otros criterios (Tabla 5), con relación al criterio de intersección de ondas. Se observa que el criterio de la primera deflexión presenta el porcentaje de error promedio más alto (5.7%), siendo del 11% el error a frecuencia de 2 kHz, seguido por el criterio de pico-a-pico superior (2.2%). Por otro lado, el criterio que

relaciona el tiempo entre los picos inferiores presenta el error más bajo (0.9%) seguido por el criterio de la correlación cruzada (1.5%) siendo estos criterios los más comparable al criterio de intersección de ondas. En el presente trabajo se aplicó un análisis redundante de las señales registradas utilizando estos tres últimos criterios.

Tabla 5. Porcentaje de error con respecto al método de intersección de ondas

| Criterio            | Frecuencia (kHz) |      |      |      |      |          |
|---------------------|------------------|------|------|------|------|----------|
|                     | Error (%)        |      |      |      |      |          |
|                     | 2                | 3    | 4    | 5    | 6    | Promedio |
| Correlación cruzada | 0.7              | -1.4 | -1.4 | -2.7 | -2.7 | -1.5     |
| Pico superior       | 0.7              | -1.4 | -3.4 | -4.1 | -2.7 | -2.2     |
| Pico inferior       | -1.4             | -1.4 | 0.7  | -1.3 | -1.3 | -0.9     |
| Primera deflexión   | 11.0             | 4.1  | 4.1  | 4.9  | 4.2  | 5.7      |

Del análisis realizado se desprenden las siguientes conclusiones:

- A bajas frecuencias de excitación (menores a 3 kHz) la onda propagada se ve afectada por el efecto de campo cercano. A partir de este valor el tiempo de arribo es independiente de la frecuencia.
- Los métodos visuales comúnmente empleados en los ensayos con elementos bender están sujetos al criterio y experiencia del observador, por lo que el tiempo de arribo puede variar de un operador a otro.
- En este contexto, utilizando los criterios de intersección de ondas, pico inferior y correlación cruzada discreta se puede reducir el error en la interpretación lo que hace que el tiempo de arribo y, por lo tanto, la velocidad de propagación sea un parámetro comparable en investigaciones realizadas por otros investigadores.

#### 4.2. Ensayo de columna resonante

La prueba de columna resonante en el Instituto de Ingeniería, UNAM, permite caracterizar las propiedades de rigidez y amortiguamiento del suelo bajo condiciones controladas. Consiste en someter a un espécimen cilíndrico sólido a carga torsional armónica por medio de un sistema de carga

electromagnético. Después de que el espécimen ha sido preparado y consolidado en la columna resonante se aplica la carga cíclica. La frecuencia de carga inicial aplicada es baja y se incrementa gradualmente hasta que la respuesta (amplitud de deformación) alcanza un máximo. La frecuencia más baja a la cual la respuesta es localmente maximizada es la frecuencia fundamental del espécimen ( $f_0$ ).

El módulo cortante se relaciona con la frecuencia fundamental a través de la velocidad cortante (ec. 1-2), puesto que

$$G = \rho * V_s^2$$

Donde  $\rho$  es la densidad y  $V_s$  es la velocidad de cortante. La velocidad de cortante se determina a partir de la ecuación

$$V_s = \frac{2 * \pi * f_0 * L}{\beta} \quad 4-2$$

Donde  $f_0$  es la frecuencia fundamental,  $L$  es la longitud inicial del espécimen y  $\beta$  es una constante que se calcula a partir de la relación de momentos de inercia del espécimen ( $I_m$ ) y del sistema ( $I_s$ ):

$$\frac{I_m}{I_s} = \beta \tan \beta \quad 4-3$$

#### 4.2.1. Calibración del sistema móvil

El momento de inercia de un sólido es una magnitud escalar que viene dada por:

$$I = \sum_{i=1}^N m_i R_i^2 \quad 4-4$$

Donde  $m$  es la masa y  $R$  es la distancia al eje de giro. De su definición se deduce que el momento de inercia de un sólido depende del eje de giro (puesto que el radio de giro de cada partícula depende del eje). Como un sólido está constituido por un número muy grande de partículas, en vez de tratarlo como un sistema discreto puede ser analizado como un sistema continuo. Por tanto, el sumatorio de la ecuación anterior puede ser sustituido por la siguiente integral:

$$I = \int dm R^2 \quad 4-5$$

Donde  $dm$  es un elemento de masa del sólido y  $R^2$  su distancia al eje de giro del mismo.

El elemento de masa  $dm$  está relacionado con la densidad  $\rho$  del sólido y, si éste es homogéneo, al sustituir  $dm$  en la expresión del momento de inercia podemos sacar la densidad de la integral:

$$dm = \rho dV$$

$$I = \rho \int R^2 dV \quad 4-6$$

$dV$  es un elemento de volumen del sólido y, para calcular el momento de inercia de un sólido homogéneo es preciso resolver la integral de la ecuación 4-6.

### Cálculo del momento de inercia del espécimen

El espécimen ensayado y ciertas partes del sistema móvil que aplica la carga cíclica son cilindros homogéneos y sus momentos de inercia se calculan con respecto a uno de sus ejes de simetría, el eje longitudinal  $z$  que pasa por su centro de masas. El elemento de volumen en este caso es el volumen de la corteza cilíndrica (representada en azul en la figura) de espesor  $dR$  que se encuentra a una distancia  $R$  del eje de giro, y viene dado por:

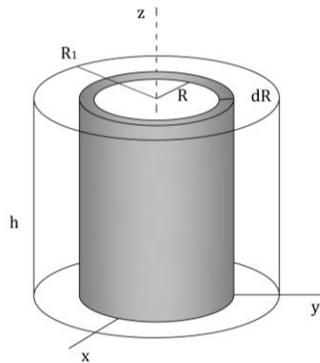


Figura 20. Momento de inercia de cuerpos cilíndricos

$$dV = 2\pi R dR h$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\pi h R_1^2}$$

Sustituyendo en la expresión del momento de inercia:

$$I = \rho \int_0^{R_1} R^2 dV = \rho \int_0^{R_1} 2\pi h R^3 dR$$

Integrando:

$$I = \frac{2\rho\pi h}{4} R_1^4$$

Finalmente, sustituyendo la densidad en la expresión anterior, el momento de inercia del cilindro con respecto al eje  $z$  es:

$$I = \frac{1}{2} m R_1^2 \quad 4-7$$

El momento de inercia de un cilindro hueco (con un radio interior  $R_2$ , como se muestra en la Figura 21), se calcula de la misma manera que el del cilindro macizo desarrollado en el ejemplo anterior, pero integrando entre  $R_2$  y  $R_1$ ).

El momento de inercia de un cilindro hueco viene dado por la ecuación 4-8:

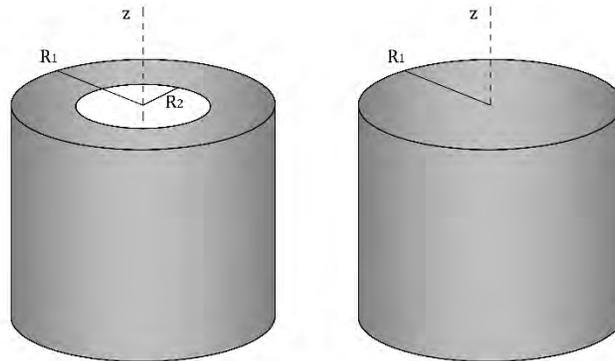


Figura 21. Momento de inercia de un cilindro hueco

$$I = \frac{1}{2} m (R_1^2 + R_2^2) \quad 4-8$$

Por tanto, a igual masa, un cilindro hueco tiene mayor momento de inercia que uno macizo, particular que se debe considerar en caso de utilizar especímenes huecos.

## Cálculo del momento de inercia del móvil

El sistema móvil es una figura compuesta, por lo tanto, su momento de inercia debe ser calculado elemento por elemento, con respecto al eje z sobre el cual gira el sistema. El teorema de Steiner permite calcular el momento de inercia de un sólido rígido respecto de un eje de rotación que pasa por un punto O, cuando conocemos el momento de inercia respecto a un eje paralelo al anterior y que pasa por el centro de masas. Esta relación es:

$$I = I_{cm} + md^2 \quad 4-9$$

donde I es el momento de inercia del cuerpo respecto al eje paralelo al original,  $I_{cm}$  es el momento de inercia del eje que pasa por el centro de masas, m es la masa total del cuerpo y d es la distancia entre estos ejes paralelos.

El momento de inercia de un determinado cuerpo se puede determinar sabiendo que:

1. La simetría del cuerpo permite a veces realizar sólo parte del cálculo.
2. Como el momento de inercia es aditivo el cálculo de un momento de inercia de un cuerpo compuesto se puede tomar como la suma de los momentos de inercia de sus partes.

Muchas veces se obtiene el momento de inercia de un cuerpo respecto a un cierto eje mediante el momento respecto a otro eje usando el teorema de Steiner.

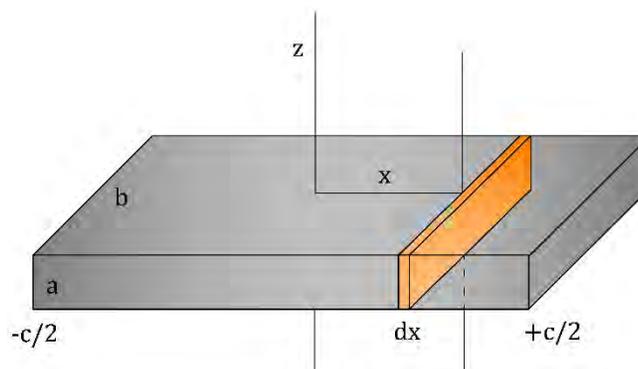


Figura 22. Momento de inercia de un paralelepípedo

La mayor parte de las piezas que componen el sistema móvil como la placa, los puentes y los imanes tienen la forma de paralelepípedos de masa  $M$  y de lados  $a$ ,  $b$  y  $c$  respecto del eje  $z$  (Figura 22).

Dividimos el paralelepípedo en placas rectangulares de lados  $a$  y  $b$  y de espesor  $dx$ . El momento de inercia de cada una de las placas respecto de su eje de simetría es

$$I_{cm} = \frac{1}{12} b^2 dm \quad 4-10$$

Aplicando el teorema de Steiner, se calcula el momento de inercia de esta placa respecto de un eje paralelo situado a una distancia  $x$  es:

$$\frac{1}{12} b^2 dm + x^2 dm = \left( \frac{1}{12} b^2 + x^2 \right) \frac{M}{abc} ab * dx = \left( \frac{1}{12} b^2 + x^2 \right) \frac{M}{c} dx$$

El momento de inercia del sólido en forma de paralelepípedo es:

$$I_z = \int_{-c/2}^{c/2} \left( \frac{1}{12} b^2 + x^2 \right) \frac{M}{c} dx$$

$$I_z = \frac{M}{12} (b^2 + c^2) \quad 4-11$$

### **Cálculo de momento de inercia del sistema móvil.**

En el acápite anterior se dedujeron las ecuaciones 4-7 y 4-11 para calcular el momento de inercia de los cuerpos cilíndricos y paralelepípedos respectivamente, con respecto al eje  $z$  que pasa por su centro de masas. A continuación, se aplica el teorema de Steiner para calcular el momento de inercia de cada parte del sistema móvil con respecto al eje  $z$ , sobre el que gira el sistema. Para esto se dividió el sistema en elementos y se identificó cada elemento con un número, como se muestra en las Figuras 23, 24, 25 y 26.

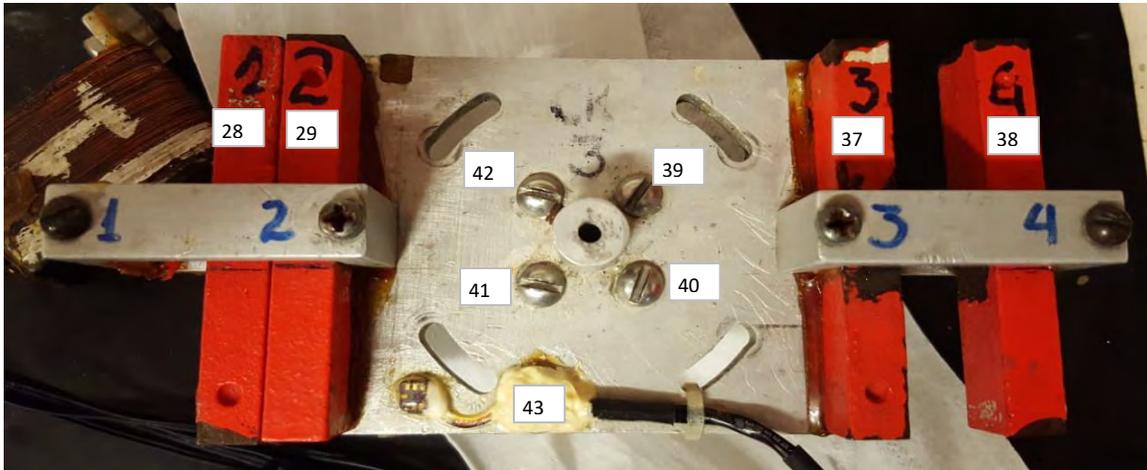


Figura 23. Vista general del sistema móvil de la columna resonante

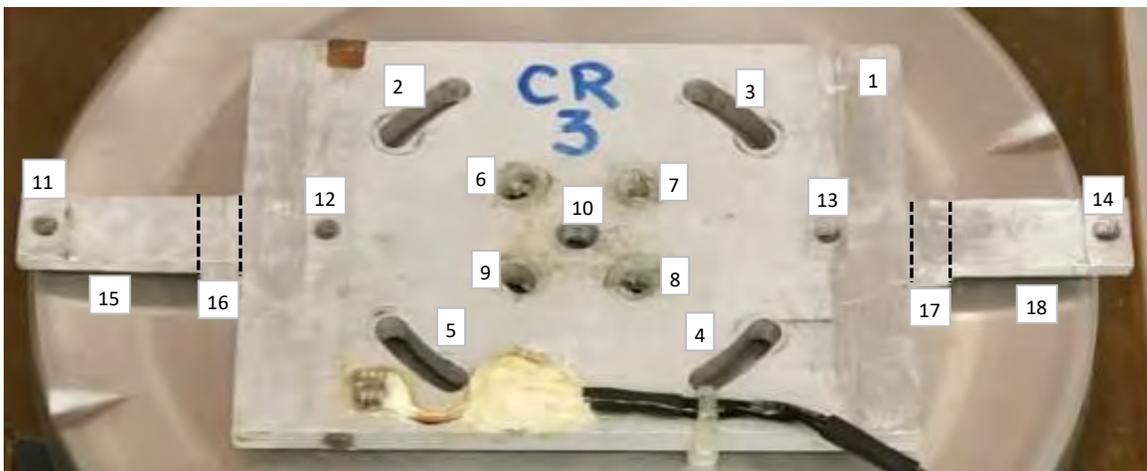


Figura 24. Placa de aluminio con perforaciones y acelerómetro

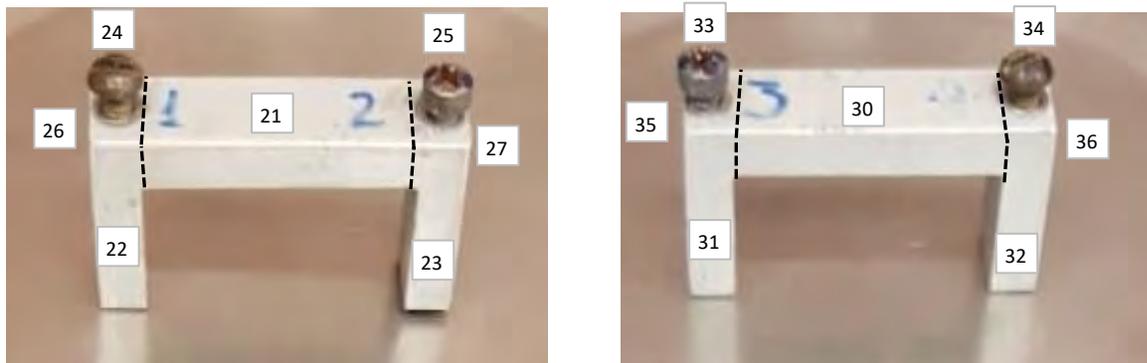


Figura 25. Puentes y tornillos

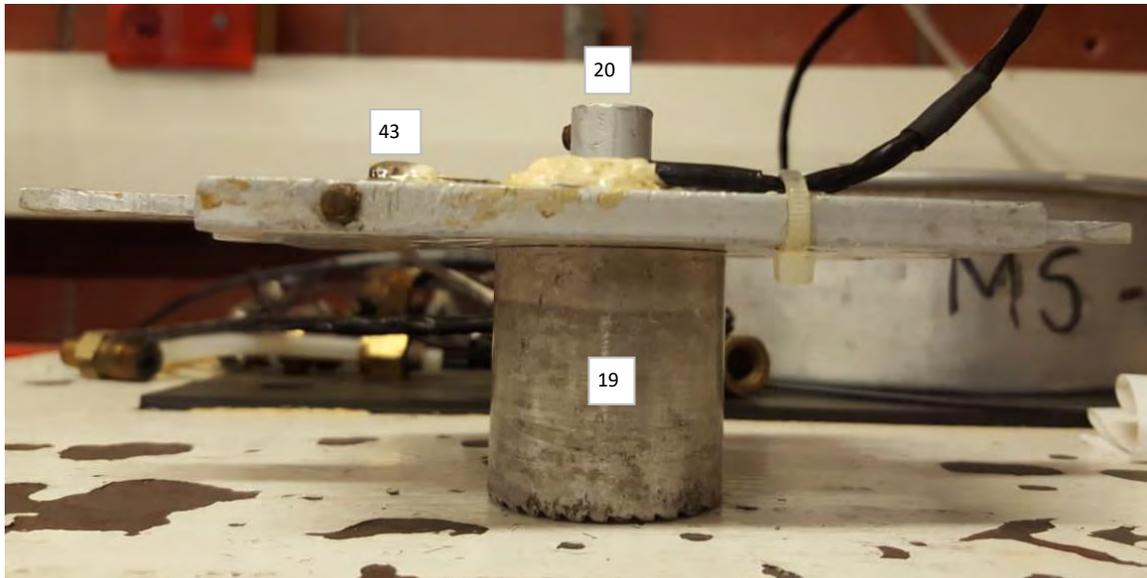


Figura 26. Cabezal

La distancia entre el eje que pasa por el centro de masas de cada elemento y el eje de giro del sistema (eje z) fue determinado a partir de un dibujo realizado con las dimensiones reales de los elementos, como se muestra en la Figura 27.

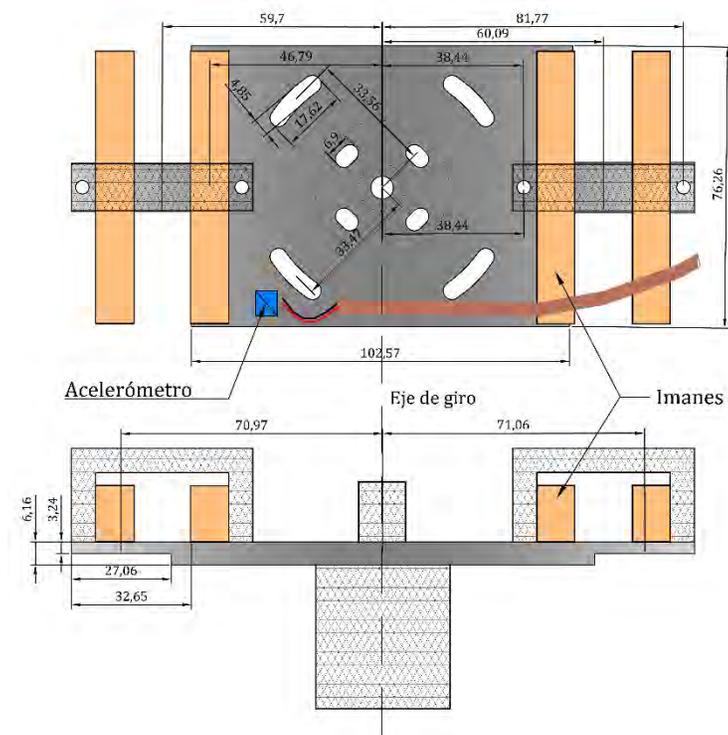


Figura 27. Dibujo a detalle del sistema móvil

---

Finalmente se presentan en la Figura 28 el momento de inercia calculado para la columna resonante utilizada en esta etapa experimental (CR-3), en donde se considera un momento de inercia positivo si el elemento tiene masa y negativo si es hueco. El momento final del sistema es la sumatoria de los respectivos momentos de inercia de todos los elementos. Para mayor rigor en los cálculos se asignó al acelerómetro junto con su cable una masa que resultó del pesaje del elemento (placa más acelerómetro) menos el peso de la placa de aluminio perforada, calculado a partir del peso unitario del material (2.65).

CÁLCULO DEL MOMENTO POLAR DE INERCIA DE LA COLUMNA RESONANTE No 3

| Elemento | Forma           | Material | Tipo de Elemento | a<br>mm  | b<br>mm | t<br>mm | r<br>mm | d<br>m | Peso vol.<br>t/m <sup>3</sup> | Volumen<br>m <sup>3</sup> | W<br>kg  | m<br>kg-seg <sup>2</sup> /m | I'        | md <sup>2</sup> | I<br>kg-m-seg <sup>2</sup> |
|----------|-----------------|----------|------------------|----------|---------|---------|---------|--------|-------------------------------|---------------------------|----------|-----------------------------|-----------|-----------------|----------------------------|
| 1        | rectangular     | aluminio | placa            | 102.8400 | 76.3600 | 6.1600  | 0.0000  | 0.0000 | 2.65                          | 0.0000484                 | 0.12819  | 0.013                       | 1.79E-05  | 0.00E+00        | 0.00001787                 |
| 2        | elipse grande   | huevo    | placa            | 4.5300   | 17.6980 | 6.1600  | 0.0000  | 0.0336 | -2.65                         | 0.0000005                 | -0.00131 | -1.33E-04                   | -3.71E-09 | -1.50E-07       | -0.00000015                |
| 3        | elipse grande   | huevo    | placa            | 4.8500   | 17.6200 | 6.1600  | 0.0000  | 0.0336 | -2.65                         | 0.0000005                 | -0.00140 | -1.42E-04                   | -3.96E-09 | -1.60E-07       | -0.00000016                |
| 4        | elipse grande   | huevo    | placa            | 4.8500   | 17.6200 | 6.1600  | 0.0000  | 0.0335 | -2.65                         | 0.0000005                 | -0.00140 | -1.42E-04                   | -3.96E-09 | -1.59E-07       | -0.00000016                |
| 5        | elipse grande   | huevo    | placa            | 4.8500   | 17.6200 | 6.1600  | 0.0000  | 0.0335 | -2.65                         | 0.0000005                 | -0.00140 | -1.42E-04                   | -3.96E-09 | -1.59E-07       | -0.00000016                |
| 6        | elipse tornillo | huevo    | placa            | 6.9000   | 3.9410  | 6.1600  | 0.0000  | 0.0129 | -2.65                         | 0.0000002                 | -0.00044 | -4.52E-05                   | -2.38E-10 | -7.47E-09       | -0.00000001                |
| 7        | elipse tornillo | huevo    | placa            | 6.9000   | 3.9410  | 6.1600  | 0.0000  | 0.0129 | -2.65                         | 0.0000002                 | -0.00044 | -4.52E-05                   | -2.38E-10 | -7.47E-09       | -0.00000001                |
| 8        | elipse tornillo | huevo    | placa            | 6.9000   | 3.9410  | 6.1600  | 0.0000  | 0.0129 | -2.65                         | 0.0000002                 | -0.00044 | -4.52E-05                   | -2.38E-10 | -7.47E-09       | -0.00000001                |
| 9        | elipse tornillo | huevo    | placa            | 6.9000   | 3.9410  | 6.1600  | 0.0000  | 0.0129 | -2.65                         | 0.0000002                 | -0.00044 | -4.52E-05                   | -2.38E-10 | -7.47E-09       | -0.00000001                |
| 10       | circular        | huevo    | placa            | -        | -       | 6.1600  | 3.0900  | 0.0000 | -2.65                         | 0.0000002                 | -0.00049 | -4.9E-05                    | -2.38E-10 | 0.00E+00        | 0.00000000                 |
| 11       | circular        | huevo    | placa            | -        | -       | 6.1600  | 1.9400  | 0.0813 | -2.65                         | 0.0000001                 | -0.00019 | -1.97E-05                   | -3.70E-11 | -1.30E-07       | -0.00000013                |
| 12       | circular        | huevo    | placa            | -        | -       | 6.1600  | 1.8750  | 0.0381 | -2.65                         | 0.0000001                 | -0.00018 | -1.84E-05                   | -3.23E-11 | -2.67E-08       | -0.00000003                |
| 13       | circular        | huevo    | placa            | -        | -       | 6.1600  | 1.8300  | 0.0384 | -2.65                         | 0.0000001                 | -0.00017 | -1.75E-05                   | -2.93E-11 | -2.59E-08       | -0.00000003                |
| 14       | circular        | huevo    | placa            | -        | -       | 6.1600  | 1.8100  | 0.0818 | -2.65                         | 0.0000001                 | -0.00017 | -1.71E-05                   | -2.81E-11 | -1.15E-07       | -0.00000011                |
| 15       | rectangular     | aluminio | placa            | 27.0800  | 13.2800 | 3.2400  | 0.0000  | 0.0704 | 2.65                          | 0.0000012                 | 0.00309  | 3.15E-04                    | 2.39E-08  | 1.56E-06        | 0.00000036                 |
| 16       | rectangular     | aluminio | placa            | 5.5800   | 13.2800 | 6.1600  | 0.0000  | 0.0541 | 2.65                          | 0.0000005                 | 0.00122  | 1.24E-04                    | 2.15E-09  | 3.71E-07        | 0.00000037                 |
| 17       | rectangular     | aluminio | placa            | 5.6200   | 13.2800 | 6.1600  | 0.0000  | 0.0547 | 2.65                          | 0.0000005                 | 0.00122  | 1.24E-04                    | 2.15E-09  | 3.71E-07        | 0.00000037                 |
| 18       | rectangular     | aluminio | placa            | 27.0800  | 13.2800 | 3.2400  | 0.0000  | 0.0712 | 2.65                          | 0.0000012                 | 0.00309  | 3.15E-04                    | 2.39E-08  | 1.60E-06        | 0.00000162                 |
| 19       | cilindro        | pesado   | cabezal          | -        | -       | 39.1000 | 18.2500 | 0.0000 | -                             | 0.0000409                 | 0.10379  | 1.06E-02                    | 1.76E-06  | 0.00E+00        | 0.00000176                 |
| 20       | cilindro        | pesado   | cabezal          | -        | -       | 16.2400 | 6.3600  | 0.0000 | -                             | 0.0000021                 | 0.00612  | 6.24E-04                    | 1.26E-08  | 0.00E+00        | 0.00000001                 |
| 21       | rectangular     | aluminio | punte 1-2        | 36.1400  | 12.7800 | 6.6400  | 0.0000  | 0.0597 | 2.65                          | 0.0000031                 | 0.00813  | 8.28E-04                    | 1.01E-07  | 2.95E-06        | 0.00000305                 |
| 22       | rectangular     | aluminio | punte 1-2        | 6.5800   | 12.7800 | 25.4000 | 0.0000  | 0.0810 | 2.65                          | 0.0000021                 | 0.00566  | 5.77E-04                    | 9.94E-09  | 3.79E-06        | 0.00000380                 |
| 23       | rectangular     | aluminio | punte 1-2        | 6.5200   | 12.7800 | 25.4000 | 0.0000  | 0.0883 | 2.65                          | 0.0000021                 | 0.00561  | 5.72E-04                    | 9.81E-09  | 8.40E-07        | 0.00000085                 |
| 24       | tornillo        | pesado   | punte 1-2        | -        | -       | 31.5000 | 1.9400  | 0.0310 | -                             | 0.0000004                 | 0.00302  | 3.08E-04                    | 5.79E-10  | 2.02E-06        | 0.00000202                 |
| 25       | tornillo        | pesado   | punte 1-2        | -        | -       | 32.0000 | 1.8750  | 0.0383 | -                             | 0.0000004                 | 0.00304  | 3.10E-04                    | 5.45E-10  | 4.56E-07        | 0.00000046                 |
| 26       | huevo tornillo  | huevo    | punte 1-2        | -        | -       | 25.3400 | 1.9400  | 0.0810 | -2.65                         | 0.0000003                 | -0.00079 | -8.09E-05                   | -1.52E-10 | -5.31E-07       | -0.00000053                |
| 27       | huevo tornillo  | huevo    | punte 1-2        | -        | -       | 25.8400 | 1.8750  | 0.0383 | -2.65                         | 0.0000003                 | -0.00076 | -7.71E-05                   | -1.36E-10 | -1.13E-07       | -0.00000011                |
| 28       | inman           | pesado   | punte 1-2        | 10.4500  | 73.9200 | 15.3000 | 0.0000  | 0.0725 | -                             | 0.0000118                 | 0.07770  | 7.92E-03                    | 3.68E-06  | 4.16E-05        | 0.00004532                 |
| 29       | inman           | pesado   | punte 1-2        | 10.3900  | 73.8800 | 15.2000 | 0.0000  | 0.0468 | -                             | 0.0000117                 | 0.07784  | 7.93E-03                    | 3.68E-06  | 1.74E-05        | 0.00002105                 |
| 30       | rectangular     | aluminio | punte 3-4        | 36.1800  | 12.7200 | 6.5800  | 0.0000  | 0.0601 | 2.65                          | 0.0000030                 | 0.00802  | 8.18E-04                    | 1.00E-07  | 2.95E-06        | 0.00000305                 |
| 31       | rectangular     | aluminio | punte 3-4        | 6.5800   | 12.7200 | 25.5000 | 0.0000  | 0.0384 | 2.65                          | 0.0000021                 | 0.00566  | 5.77E-04                    | 9.85E-09  | 8.52E-07        | 0.00000086                 |
| 32       | rectangular     | aluminio | punte 3-4        | 6.6400   | 12.7200 | 25.4000 | 0.0000  | 0.0384 | 2.65                          | 0.0000021                 | 0.00569  | 5.80E-04                    | 9.94E-09  | 3.84E-06        | 0.00000385                 |
| 33       | tornillo        | pesado   | punte 3-4        | -        | -       | 31.1000 | 1.8300  | 0.0384 | -                             | 0.0000003                 | 0.00300  | 3.06E-04                    | 5.12E-10  | 4.52E-07        | 0.00000045                 |
| 34       | tornillo        | pesado   | punte 3-4        | -        | -       | 31.0000 | 1.8100  | 0.0815 | -                             | 0.0000003                 | 0.00298  | 3.04E-04                    | 4.98E-10  | 2.02E-06        | 0.00000202                 |
| 35       | huevo tornillo  | huevo    | punte 3-4        | -        | -       | 24.9400 | 1.8300  | 0.0384 | -2.65                         | 0.0000003                 | -0.00070 | -7.09E-05                   | -1.19E-10 | -1.05E-07       | -0.00000010                |
| 36       | huevo tornillo  | huevo    | punte 3-4        | -        | -       | 24.8400 | 1.8100  | 0.0815 | -2.65                         | 0.0000003                 | -0.00068 | -6.91E-05                   | -1.13E-10 | -4.58E-07       | -0.00000046                |
| 37       | inman           | pesado   | punte 3-4        | 10.2000  | 74.0100 | 15.3000 | 0.0000  | 0.0471 | -                             | 0.0000116                 | 0.07756  | 7.91E-03                    | 3.68E-06  | 1.76E-05        | 0.00002123                 |
| 38       | inman           | pesado   | punte 3-4        | 10.1700  | 73.9500 | 15.3500 | 0.0000  | 0.0730 | -                             | 0.0000115                 | 0.07652  | 7.80E-03                    | 3.62E-06  | 4.16E-05        | 0.00004523                 |
| 39       | tornillo grande | pesado   | placa            | -        | -       | 15.7200 | 2.2600  | 0.0129 | -                             | 0.0000003                 | 0.00220  | 2.24E-04                    | 5.73E-10  | 3.70E-08        | 0.00000004                 |
| 40       | tornillo grande | pesado   | placa            | -        | -       | 15.7000 | 2.3000  | 0.0129 | -                             | 0.0000003                 | 0.00220  | 2.24E-04                    | 5.93E-10  | 3.70E-08        | 0.00000004                 |
| 41       | tornillo grande | pesado   | placa            | -        | -       | 15.6000 | 2.3000  | 0.0129 | -                             | 0.0000003                 | 0.00221  | 2.25E-04                    | 5.96E-10  | 3.72E-08        | 0.00000004                 |
| 42       | tornillo grande | pesado   | placa            | -        | -       | 15.9000 | 2.3100  | 0.0129 | -                             | 0.0000003                 | 0.00222  | 2.26E-04                    | 6.04E-10  | 3.74E-08        | 0.00000004                 |
| 43       | acelerómetro    | estimado | placa            | 56.0000  | 5.0000  | 0.0000  | 0.0000  | 0.0356 | -                             | 0.0000000                 | 0.02594  | 2.64E-03                    | 6.96E-07  | 3.36E-06        | 0.00000405                 |

I<sub>y</sub> = 0.000179

Figura 28. Momento de inercia CR-3

---

## 5. MATERIALES EMPLEADOS

Los materiales empleados en este trabajo provienen de la zona antes ocupada por el lago de Texcoco. Actualmente es un área potencial para el desarrollo de la infraestructura urbana, siendo el proyecto más importante el del Nuevo Aeropuerto de la Ciudad de México. Las propiedades geotécnicas de estos suelos son muy particulares, debido al ambiente salino del lago en el que se sedimentaron durante el periodo cuaternario de la era cenozoica, y que se ha ido secando progresivamente en los últimos 500 años. El sector está conformado de manera general por suelos blandos saturados que se caracterizan por su alta compresibilidad y baja resistencia, además de su salinidad y agrietamiento natural. Aunque en su historia geológica estos suelos no han sido sometidos a sobrecargas, han sufrido el efecto de la sobre explotación del acuífero profundo durante al menos 150 años, lo que ha ocasionado un fenómeno de consolidación o asentamiento regional que continúa en la actualidad. Se identifican tres estratos de arcilla lacustre blanda, intercalada con capas y lentes de materiales más rígidos y más permeables. Los contenidos de agua en el estrato superior de arcilla pueden ser mayores del 300%, por lo tanto, su resistencia es sumamente baja, mientras que su compresibilidad es extremadamente alta. La superficie de este estrato, está ligeramente preconsolidada por desecación debido a que está en contacto directo con la luz del sol. A continuación, se encuentra la primera capa dura y la subyace la formación arcillosa inferior, en donde se realiza la explotación del acuífero. Por debajo de esta se tienen los depósitos profundos superiores, una tercera formación arcillosa y finalmente los depósitos profundos inferiores. Las características mecánicas, contenidos de agua y espesores aproximados de estos estratos se pueden ver en la Figura 29. Aunque históricamente estos suelos han sido objeto de numerosos estudios, sus propiedades mecánicas continúan variando, siendo necesario estudiarlas y actualizarlas permanentemente.

## 5.1. Caracterización de las muestras

Las muestras analizadas en esta etapa provienen del sector de edificios y torre de control del proyecto del NAICM. Se realizaron ensayos para determinar las relaciones volumétricas y límites de consistencia. Se encuentra en estos resultados un elevado valor de densidad de sólidos ( $\gamma_s$ ), que ya ha sido verificado con los valores reportados por (Ramírez, 2015), así como los trabajos ejecutados en el laboratorio de mecánica de suelos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, en muestras procedentes del ex lago de Texcoco.

| Formación                              | Espesor (m) | w (%)     | q <sub>c</sub> (MPa) |
|--|-------------|-----------|----------------------|
| Costra superficial (CS)                | 0.2 - 2.0   | 100 - 300 | 0.5 - 10.0           |
| Formación arcillosa superior (FAS)     | 18.0 - 30.0 | 150 - 300 | 0.1 - 0.5            |
| Capa dura (CD)                         | 1.0 - 5.0   | 20 - 70   | 0.5 - 10.0           |
| Formación arcillosa inferior (FAI)     | 5.0 - 8.5   | < 250     | 0.1 - 0.5            |
| Depósitos profundos (DP)               | 5.0 - 7.0   | 15 - 60   | NSPT > 100           |
| Formación arcillosa profunda (FAP)     | 15.0 - 18.0 | < 200     | > 1                  |
| Formación estratificada profunda (FEP) |             | < 30      |                      |

Figura 29. Estratigrafía típica del ex lago Texcoco

Tabla 6. Propiedades índice de especímenes sometidos a consolidación unidimensional.

| Relaciones Volumétricas    |                |                   |             |             |             |             |             |             |
|----------------------------|----------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Parámetro                  | Símbolo        | Unidad            | P1-D        | P2-D        | P3-D        | P4-D        | P5-D        | P6-D        |
| Profundidad                |                | m                 | 16.6 - 17.6 | 11.8 - 12.8 | 15.6 - 16.6 | 14.0 - 15.0 | 20.4 - 21.4 | 15.9 - 16.9 |
| Peso unitario de sólidos   | $\gamma_s$     | kg/m <sup>3</sup> | 3187.0      | 2937.0      | 2886.3      | 2938.4      | 2767.9      | 2935.9      |
| Peso unitario total        | $\gamma$       | kg/m <sup>3</sup> | 1261.2      | 1324.1      | 1270.0      | 1204.3      | 1305.5      | 1305.4      |
| Humedad inicial            | w              | %                 | 257.1       | 207.7       | 223.9       | 290.8       | 216.9       | 205.0       |
| Relación de vacíos inicial | e              |                   | 8.2         | 6.1         | 6.5         | 8.6         | 6.0         | 6.0         |
| Porosidad                  | n              |                   | 0.91        | 0.89        | 0.88        | 0.90        | 0.89        | 0.88        |
| Grado de saturación        | S <sub>r</sub> | %                 | 100.0       | 100.0       | 100.0       | 100.0       | 100.0       | 100.0       |
| Humedad final              | w              | %                 | 201.2       | 153.9       | 168.2       | 230.2       | 167.9       | 159.9       |
| Límites de Consistencia    |                |                   |             |             |             |             |             |             |
| Límite líquido             | w <sub>L</sub> | %                 | 220.72      | 169.00      | 196.54      | 273.41      | 199.47      | 182.80      |
| Límite plástico            | w <sub>P</sub> | %                 | 73.18       | 41.90       | 61.40       | 75.50       | 59.46       | 54.90       |
| Índice de plasticidad      | I <sub>P</sub> | %                 | 147.54      | 127.10      | 135.14      | 197.91      | 140.01      | 127.90      |
| Índice de liquidez         | I <sub>L</sub> |                   | 1.25        | 1.30        | 1.20        | 1.09        | 1.12        | 1.17        |

| Parámetros Mecánicos         |                      |     |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------|----------------------|-----|------|------|------|------|------|------|
| Esfuerzo de preconsolidación | $\sigma'_p$          | kPa | 64   | 62   | 80   | 85   | 95   | 62   |
| Esfuerzo de campo            | $\sigma'_c$          | kPa | 53.6 | 48.9 | 43.6 | 33.0 | 77.3 | 58.9 |
| OCR                          | $\sigma'_p / \sigma$ | -   | 1.2  | 1.3  | 1.8  | 2.6  | 1.2  | 1.1  |

Estos valores elevados de  $\gamma_s$  se deben principalmente a los sólidos disueltos en el agua (minerales) que al momento de realizar el ensayo de densidad de sólidos pasan a formar parte de la fase sólida del suelo. Las relaciones volumétricas, límites de consistencia y parámetros mecánicos de consolidación se muestran en las Tablas 6 (consolidación unidimensional con propagación de ondas) y 7 (columna resonante).

Tabla 7. Propiedades índice de especímenes ensayados en columna resonante.

| Relaciones Volumétricas      |                      |                   |               |        |         |               |        |         |
|------------------------------|----------------------|-------------------|---------------|--------|---------|---------------|--------|---------|
|                              | Símbolo              | Unidad            | CR1-H         | CR1-V  | CR1-60° | CR2-H         | CR2-V  | CR2-60° |
| Profundidad                  |                      | m                 | 16.60 - 17.60 |        |         | 28.70 - 29.70 |        |         |
| Peso unitario de sólidos     | $\gamma_s$           | kg/m <sup>3</sup> | 3142.4        | 3142.4 | 3142.4  | 2782.1        | 2782.1 | 2782.1  |
| Peso unitario total          | $\gamma$             | kg/m <sup>3</sup> | 1234.4        | 1233.5 | 1229.1  | 1257.5        | 1290.1 | 1276.4  |
| Humedad inicial              | w                    | %                 | 329.0         | 330.2  | 348.7   | 223.8         | 217.3  | 156.9   |
| Relación de vacíos inicial   | e                    |                   | 10.3          | 10.4   | 11.0    | 7.1           | 6.8    | 4.6     |
| Porosidad                    | n                    | %                 | 94.67         | 94.68  | 95.52   | 87.64         | 88.35  | 82.1    |
| Grado de saturación          | S <sub>r</sub>       | %                 | 100.0         | 100.0  | 100.0   | 100.0         | 100.0  | 94.8    |
| Humedad final                | w                    | %                 | 206.2         | 233.0  | 199.5   | 185.0         | 176.6  | 182.4   |
| Límites de Consistencia      |                      |                   |               |        |         |               |        |         |
| Límite líquido               | w <sub>L</sub>       | %                 | 304.69        | 304.69 | 304.69  | 240.70        | 240.70 | 240.70  |
| Límite plástico              | w <sub>P</sub>       | %                 | 60.00         | 60.00  | 60.00   | 103.91        | 103.91 | 103.91  |
| Índice de plasticidad        | I <sub>P</sub>       | %                 | 244.69        | 244.69 | 244.69  | 136.79        | 136.79 | 136.79  |
| Índice de liquidez           | I <sub>L</sub>       |                   | 1.10          | 1.10   | 1.18    | 0.88          | 0.83   | 0.39    |
| Parámetros Mecánicos         |                      |                   |               |        |         |               |        |         |
| Esfuerzo de preconsolidación | $\sigma'_p$          | kPa               | 52            | 40     | 51      | 86            | 80     | 83      |
| Esfuerzo de campo            | $\sigma'_c$          | kPa               | 41.3          | 41.3   | 41.3    | 88.4          | 88.4   | 88.4    |
| OCR                          | $\sigma'_p / \sigma$ | -                 | 1.3           | 1.0    | 1.2     | 1.0           | 0.9    | 0.9     |

## 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En esta sección se presenta el resultado de seis ensayos de consolidación con medición de velocidad de propagación de onda. De manera general, se aplicaron doce etapas de esfuerzo efectivo (carga, descarga y recarga) hasta un valor máximo de 150 kPa en etapas de carga, descarga y recarga, produciendo una deformación axial total cercana a los 25 mm, que es la máxima admitida por el aparato. Se midieron velocidades de onda de corte con frecuencias de 2 kHz, 4 kHz y 6 kHz y de ondas de compresión con 40 kHz y 60 kHz.

### 6.1. Pruebas de compresibilidad

Las muestras ensayadas corresponden a profundidades entre 11.80 m y 21.40 m, es decir que pertenecen a la Formación Arcillosa Superior. Las curvas de compresibilidad se muestran en la Figura 30.

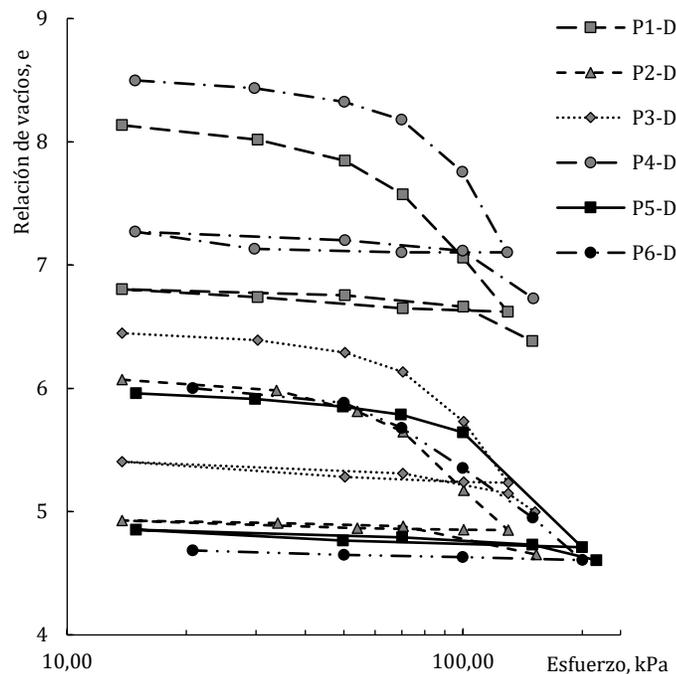


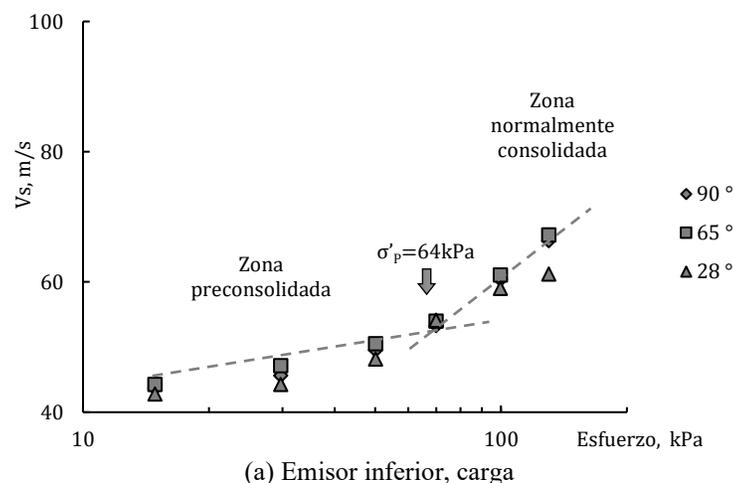
Figura 30. Curvas de compresibilidad (ensayo de consolidación unidimensional)

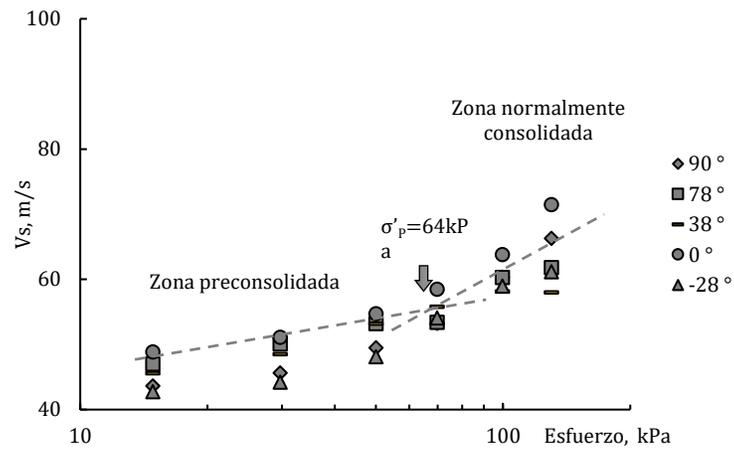
El esfuerzo de preconsolidación fue determinado utilizando el método de (Casagrande, 1936). Los resultados se muestran en la Tabla 6.

### 6.1.1. Medición de velocidad de onda de corte con elementos bender

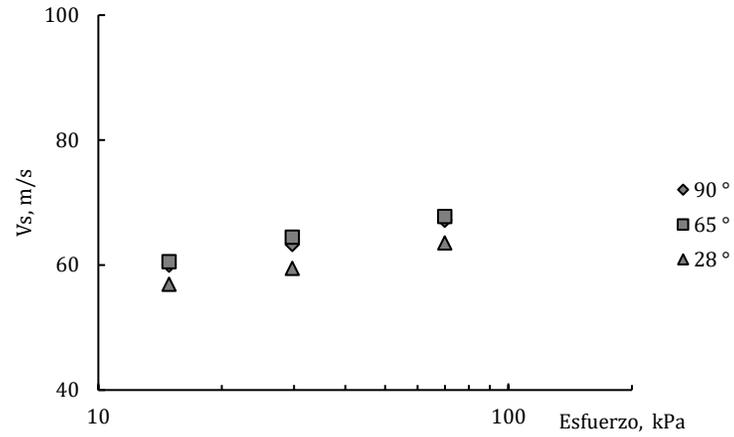
Al finalizar cada incremento de esfuerzo en la etapa de consolidación se midió la velocidad de propagación de ondas de cortante y de compresión en las direcciones de  $90^\circ$ ,  $65^\circ$  y  $28^\circ$  usando el emisor instalado en la base de la cazuela y los receptores colocados en esas direcciones en la etapa de carga (Figura 31.a). También se midieron estas velocidades a  $78^\circ$ ,  $38^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $-28^\circ$  usando el emisor lateral (Figura 31.b). En las Figuras 31 c y d se muestran los mismos resultados medidos durante la descarga y en la Figura 31 e y f lo propio para la etapa de recarga de la prueba P1-D.

La Figura 31 muestra los resultados de la prueba P1-D para su análisis y discusión. Los resultados  $V_s$  de todas las pruebas se reúnen en el Anexo 2. En las Figuras 31 a y b se observa que existe muy poca variación de la velocidad medida en los diferentes planos, con respecto a la velocidad medida en el plano vertical ( $90^\circ$ ), esto podría indicar que la anisotropía inducida por esfuerzos es muy baja en muestras inalteradas. Además, en estas figuras se puede identificar claramente el esfuerzo de preconsolidación que coincide plenamente con el valor determinado en la curva de compresibilidad, por lo que éste se convierte en un método alternativo para determinar el esfuerzo de preconsolidación del suelo en estudio.

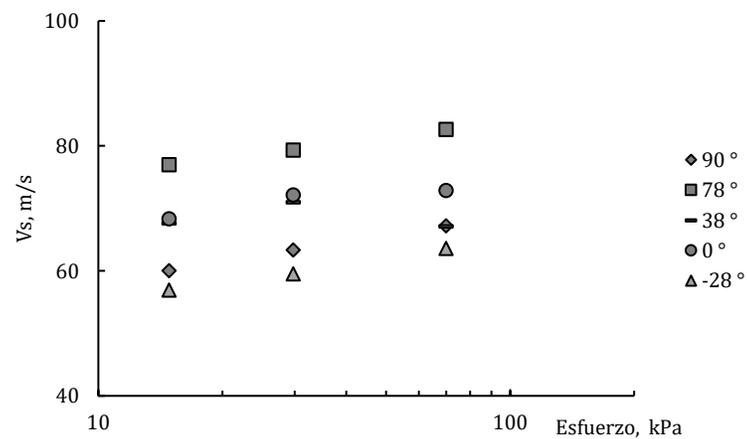




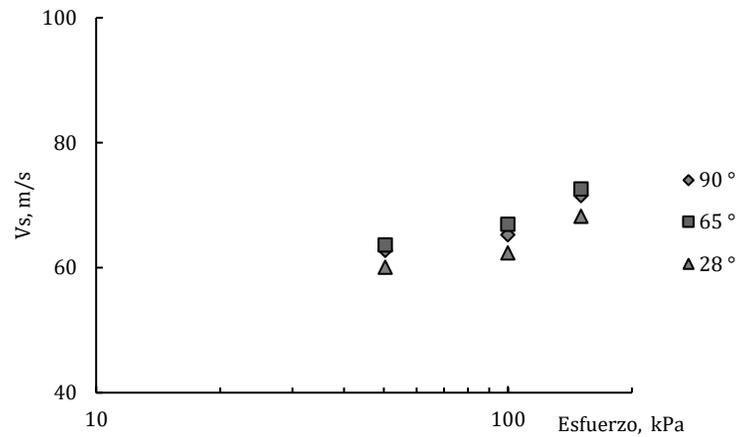
(b) Emisor lateral, carga



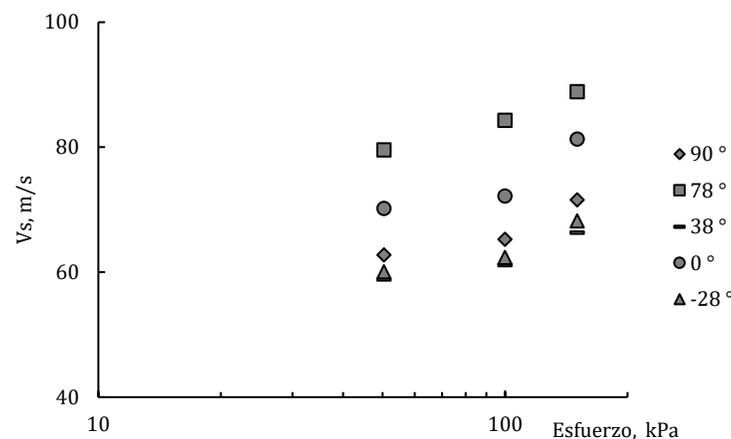
(c) Emisor inferior, descarga



(d) Emisor lateral, descarga



(e) Emisor inferior, recarga



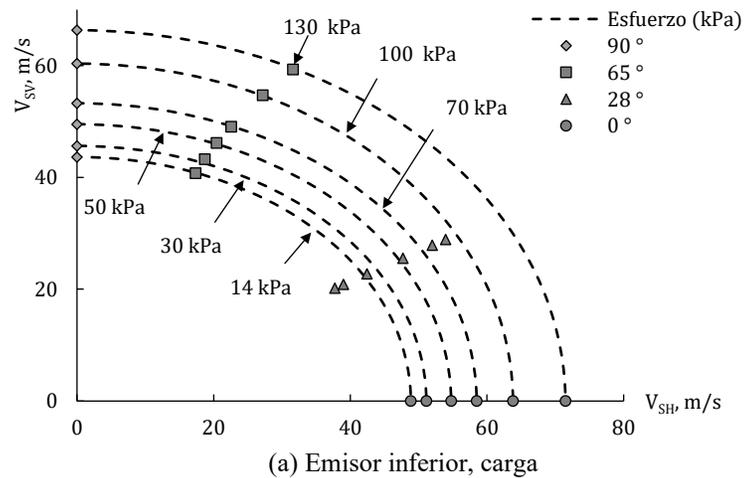
(f) Emisor lateral, recarga

Figura 31. Curvas de velocidad de ondas de corte medidas en diferentes direcciones en las etapas de carga, descarga y recarga.

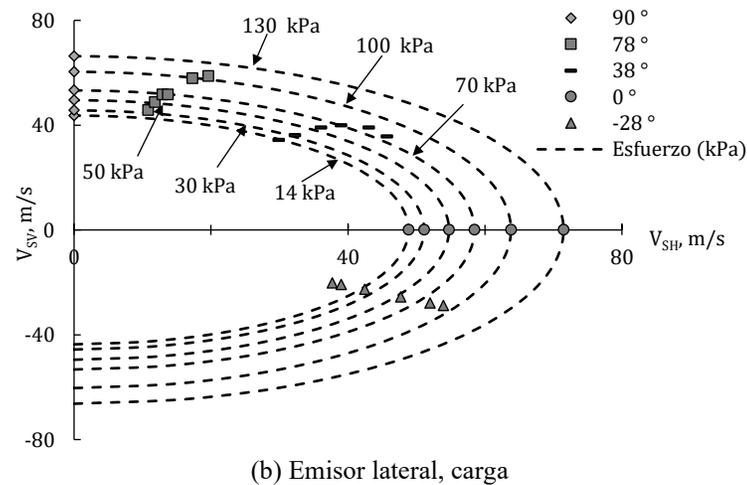
Durante la etapa de descarga (Figuras 31 c y d) se observa una mayor diferencia en las velocidades de propagación de onda, especialmente en los valores medidos usando el emisor lateral, mientras que en los resultados medidos usando el emisor inferior esta diferencia es relativamente más pequeña. Similar comportamiento se observa en la etapa de recarga, en el cual se observa una dispersión creciente de la velocidad con respecto al estado de esfuerzos, como se observa en las Figuras 31 e y f. El comportamiento observado en las etapas de descarga y recarga conduce a suponer que en la porción superior de la probeta se está desarrollando una concentración de esfuerzos que genera mayor deformación y por tanto mayor rigidización en este sector; por esta razón, las velocidades medidas desde el emisor lateral hacia los

receptores colocados en la tapa del odómetro son sustancialmente mayores a las velocidades medidas desde el emisor colocado en la base hacia los mismos receptores.

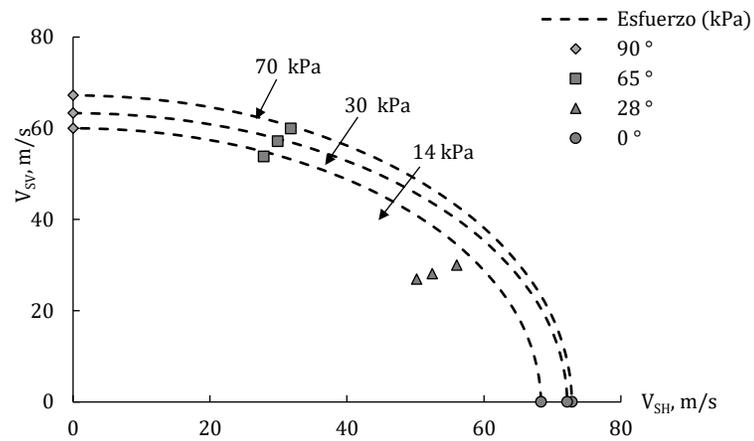
Para una mejor visualización del comportamiento de las velocidades en las diferentes trayectorias medidas se ha recurrido a su representación en coordenadas polares (Figura 32). Los resultados corresponden a la prueba P1-D.



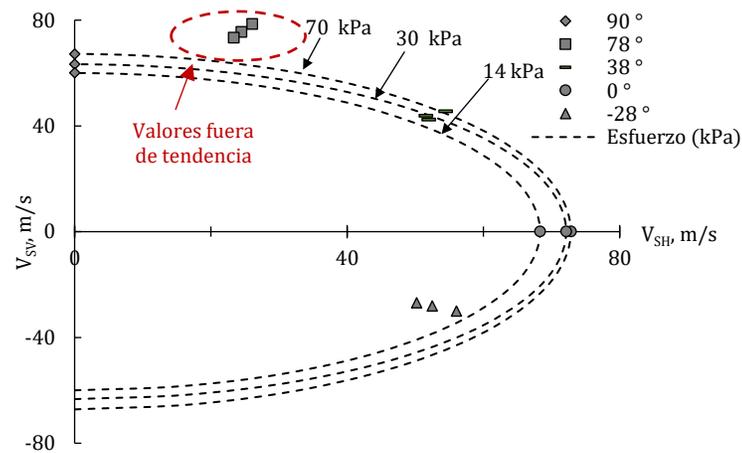
(a) Emisor inferior, carga



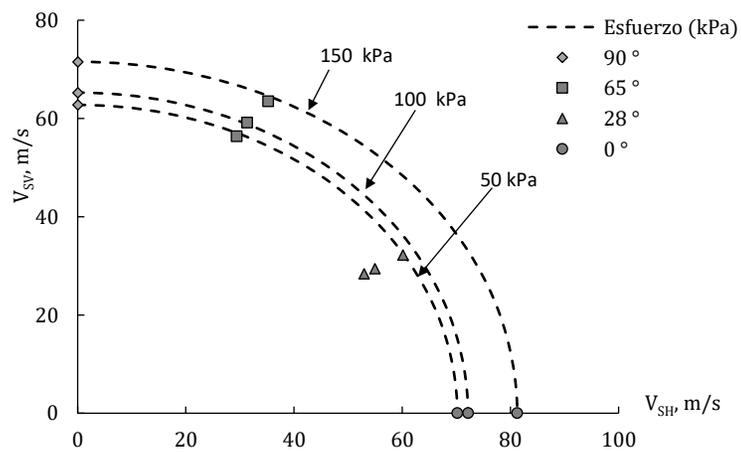
(b) Emisor lateral, carga



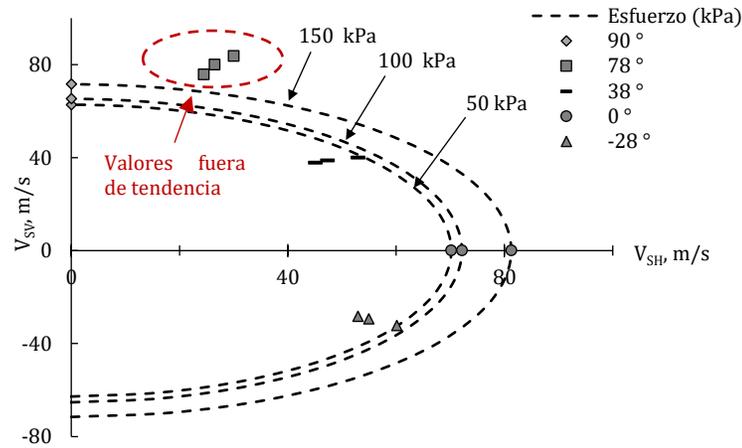
(c) Emisor inferior, descarga



(d) Emisor lateral, descarga



(e) Emisor inferior recarga



(f) Emisor lateral, recarga

Figura 32. Representación polar de las velocidades de ondas de corte medidas en diferentes direcciones en las etapas de carga, descarga y recarga.

## 6.2. Corrección de velocidades fuera de tendencia. Modelado numérico

Se había mencionado que en los gráficos semilogarítmicos de velocidad ( $V_s$ ) contra esfuerzo efectivo ( $\sigma'$ ) se observó una dispersión importante durante las etapas de descarga y recarga, cuando se midieron con el emisor lateral (Figura 31 d y f). Esta dispersión originó que las  $V_s$  determinadas en estas direcciones (emisor lateral – cabezal) sean desplazadas fuera de la representación en coordenadas polares (Figura 32 d y f). Se interpretó esta dispersión como un efecto de concentración de esfuerzos en la mitad superior de la probeta, lo que provocaría una mayor rigidización de ese sector, por lo que fue necesario recurrir al modelado numérico para investigar a fondo esta situación.

### 6.2.1. Parámetros de entrada

La probeta que se modela a continuación se caracteriza por ser una estructura circular con sección transversal radial uniforme en donde un esquema de carga en el eje central permite suponer estados tenso-deformacionales idénticos en cualquier dirección radial. Esta descripción corresponde al modelo axisimétrico del programa Plaxis, en donde la coordenada  $x$  representa el radio y la coordenada  $y$  el eje de simetría. Así, el resultado es un modelo de elementos finitos en dos dimensiones con sólo dos grados de libertad de desplazamiento por nodo ( $x$  e  $y$ ).

Para el modelado numérico se utilizó el módulo de Soft Soil drenado del programa Plaxis. Las condiciones de frontera que se aplicaron restringieron el movimiento horizontal y vertical en el extremo inferior; mientras que en las fronteras verticales se permitió la deformación vertical pero no la horizontal. Se permitió el flujo de agua en la frontera superior y se restringió en las demás fronteras. Las dimensiones de la probeta y condiciones de frontera se muestran en la Figura 33.

Tabla 8. Parámetros experimentales para modelado numérico

| $\gamma_s$        | $\gamma$          | $\gamma_{sat}$    | cc    | cr    | $e_0$ | $\sigma'_p$ | POP   | $\nu$ | c    | $\phi'$ | $K_0$ |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|------|---------|-------|
| kN/m <sup>3</sup> | kN/m <sup>3</sup> | kN/m <sup>3</sup> |       |       | -     | kPa         | kPa   | -     | kPa  | °       | -     |
| 3.19              | 12.61             | 12.63             | 3.864 | 0.187 | 8.19  | 64.00       | 10.40 | 0.33  | 0.01 | 43.0    | 0.44  |

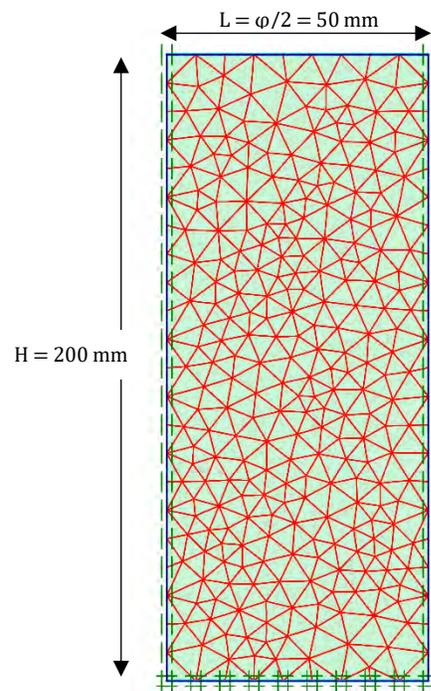


Figura 33. Geometría y condiciones de frontera

Se utilizaron como datos de entrada los parámetros experimentales obtenidos en el ensayo de consolidación que se muestran en la Tabla 8. Se hace notar que la presión de preconsolidación (POP), definida como la diferencia entre el esfuerzo de preconsolidación y el esfuerzo de campo ( $POP = \sigma'_p - \sigma_y$ ) es utilizada en lugar del OCR por caracterizar la presencia del esfuerzo de preconsolidación en el

modelo, el valor del módulo de Poisson es el drenado ( $0.3 < \nu < 0.4$ ) y el coeficiente de empuje de tierras en reposo  $K_0$  es de 0.44, estos valores fueron reportados y usados para la FAS en el modelo *Soft Soil* por (Rodríguez, 2010).

### 6.2.2. Etapa de cálculo

El proceso de consolidación se modeló en doce etapas de cálculo (*staged construction*), de acuerdo a lo realizado durante el ensayo, estableciendo los tiempos usados en laboratorio para la disipación de la presión de poro, como se muestra en la Figura 34.

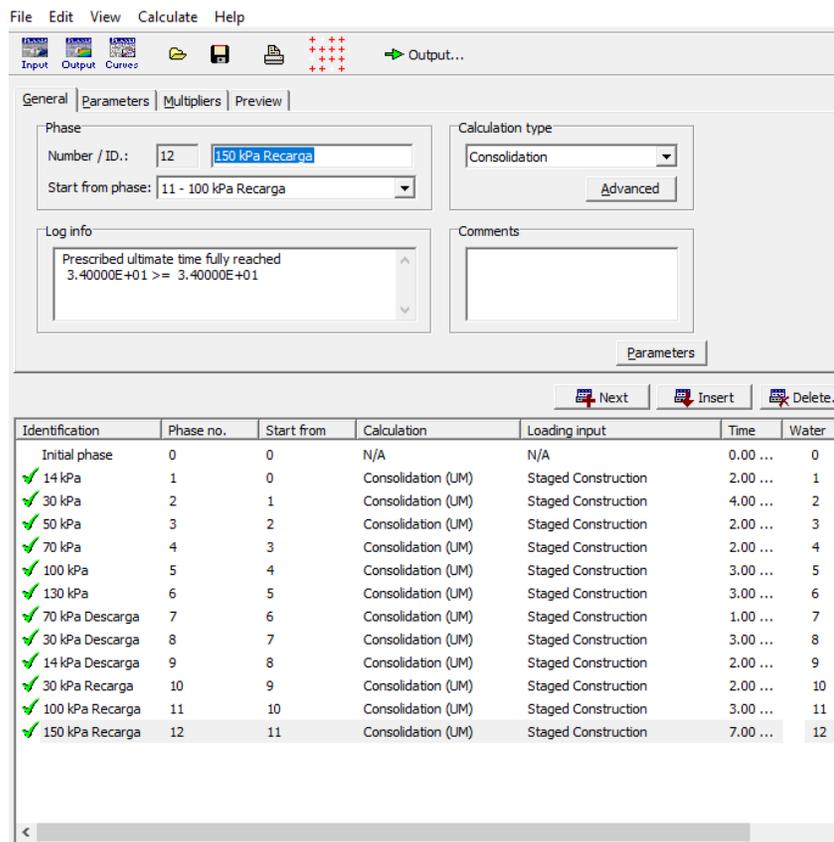


Figura 34. Etapas de cálculo

### 6.2.3. Resultados

Los resultados que se obtuvieron utilizando en el modelo las mismas condiciones de tiempo que en el laboratorio, proporcionaron una curva de compresibilidad con deformaciones axiales mayores que las experimentales, como se muestra en la Figura 35.

Como se puede observar en la Figura 35, el modelo genera desplazamientos mayores que los registrados experimentalmente, por esto fue necesario ajustar los siguientes parámetros: pendientes  $cc$  (3.15),  $cr$  (0.10) y POP (30) Tiempo de consolidación, , como se muestra en la Tabla 9.

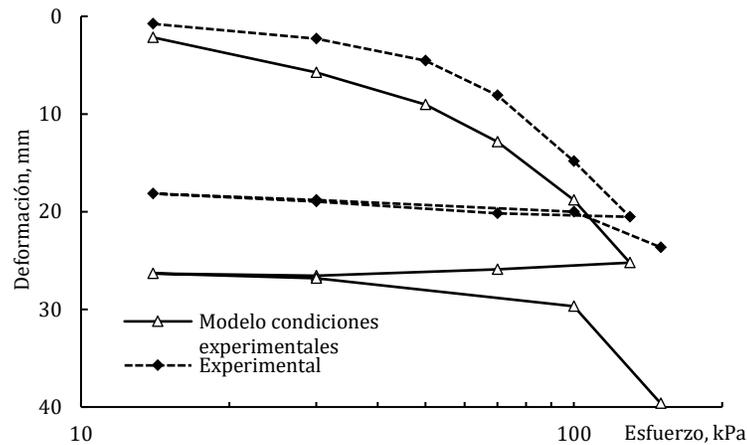


Figura 35. Curvas de consolidación de igual tiempo

Tabla 9. Parámetros corregidos para modelado numérico

| Etapa :                   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| Tiempo experimental días: | 2 | 4 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 3 | 2 | 2  | 3  | 7  |
| Tiempo corregido días:    | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 | 3 | 3 | 3 | 4  | 4  | 6  |

Con estas correcciones, se obtuvo la curva de compresibilidad ajustada que se muestra en la Figura 36.

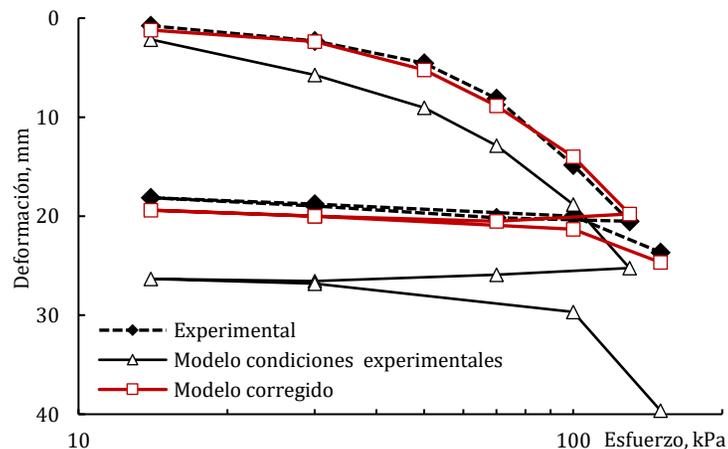


Figura 36. Curva de compresibilidad corregida

### 6.2.4. Factor de corrección

Para cuantificar la diferencia de esfuerzo en las dos mitades de la probeta se graficó la distribución de esfuerzos en kPa obtenido de un corte vertical en el centro de la probeta, en la última etapa de la consolidación donde el esfuerzo efectivo fue de 150 kPa. Esta distribución se muestra en la Figura 37.

Se determinó el esfuerzo medio en la mitad superior (132.6 kPa) y en la mitad inferior (107.7 kPa) y se determinó un factor de corrección (ec. 3).

$$F \text{ corrección} = \sigma'_{\text{superior}} / \sigma'_{\text{inferior}} \quad 6-1$$

$$F \text{ corrección} = 1.23$$

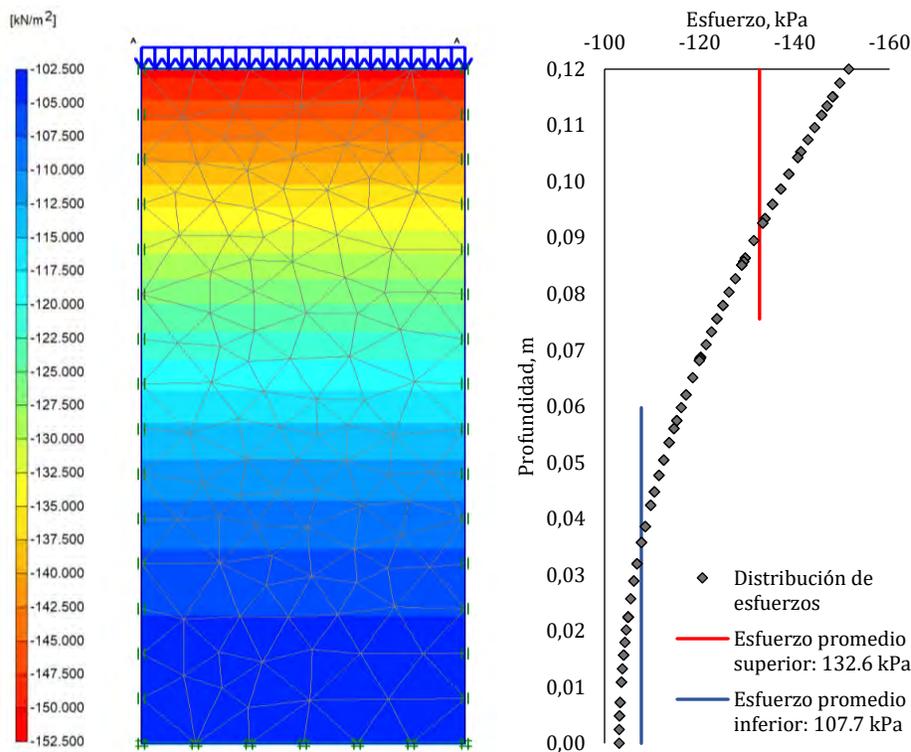


Figura 37. Distribución de esfuerzos en el interior de la probeta

### 6.2.5. Corrección de velocidades fuera de tendencia. Verificación experimental.

Con el objeto de determinar experimentalmente la variación de la relación de vacíos en el interior de la probeta, producto de la distribución no homogénea de esfuerzos, se realizó dicha verificación en la

prueba P6-D. Las relaciones volumétricas, límites de consistencia y parámetros mecánicos se muestran en la Tabla 6.

La distribución de esfuerzos durante el proceso de consolidación no se efectúa de manera uniforme debido a la geometría de la probeta y al tipo de ensayo (anillo fijo); ocasionando que las deformaciones en la parte superior sean mayores a aquellas en la parte inferior. En consecuencia, se tiene una mayor rigidización de esta zona en comparación con el comportamiento global de la probeta. Por esta razón las velocidades  $V_s$  medidas desde el emisor lateral hacia los receptores en la tapa son mayores que las  $V_s$  medidas desde el emisor inferior hacia los mismos receptores. Para verificar lo expuesto, se determinó experimentalmente la variación de contenido de agua y de relación de vacíos en tres bloques de suelo cortados de la probeta, una vez que se terminó el ensayo de consolidación, como se muestra en las Figuras 38 y 39.

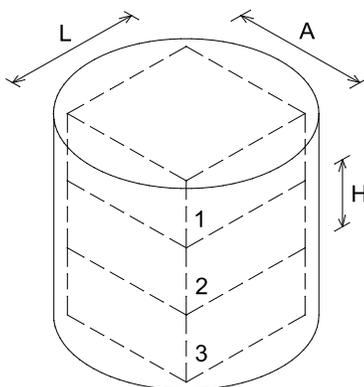


Figura 38. Esquema de obtención de muestras para determinar la variación de  $e$ .

En la Tabla 10 se muestran las dimensiones de cada sección, así como la humedad y la relación de vacíos. Se observa que la sección superior contiene un 27% menos de agua y la relación de vacíos es un 24% menor que en la sección inferior.

Tabla 10. Relaciones volumétricas y propiedades índice de secciones

| Sección    | Dimensiones |        |        | V (cm <sup>3</sup> ) | Humedad |            | Relación de vacíos |             |
|------------|-------------|--------|--------|----------------------|---------|------------|--------------------|-------------|
|            | H (mm)      | L (mm) | A (mm) |                      | %       | Proporción | $e$                | Proporción  |
| 1 superior | 29.11       | 60.8   | 54.0   | 95.4                 | 141.70  | 1.00       | 4.41               | 1.00        |
| 2 medio    | 31.72       | 60.7   | 53.7   | 103.4                | 165.48  | 1.17       | 5.02               | 1.14        |
| 3 inferior | 37.78       | 60.3   | 53.9   | 122.9                | 179.68  | 1.27       | 5.49               | <b>1.24</b> |

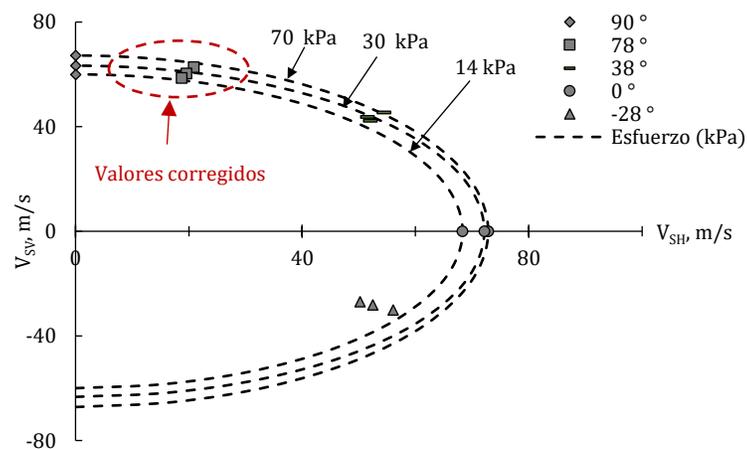
\* H= altura, L= longitud, A= espesor, V= volumen

Los resultados obtenidos en la etapa experimental indican que la relación de vacíos en el tercio inferior de la probeta es un 24% más alta que en el tercio superior, resultado que concuerda con el factor de corrección del 23% determinado en el modelado numérico, el cual se estableció a partir de la concentración de esfuerzos en el interior de la probeta.

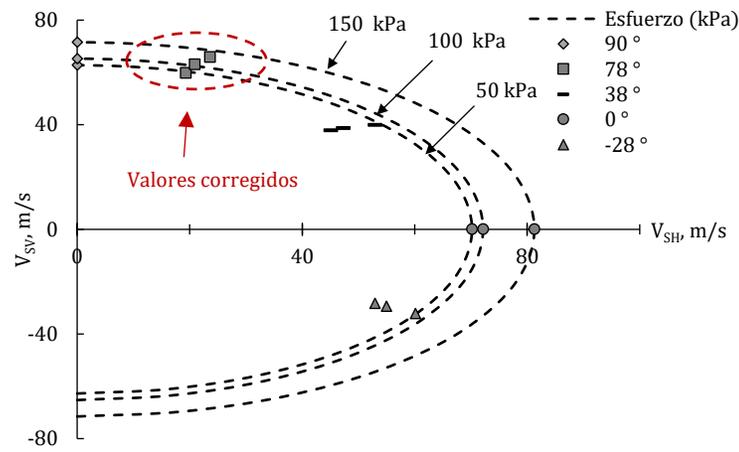
Una vez determinado el factor de corrección del 23%, se aplicó a las velocidades  $V_s$  determinadas con los transductores laterales hacia los receptores de la tapa. La Figura 40 muestra un ejemplo del resultado de esta corrección la cual fue aplicada sólo a las etapas de descarga y recarga.



Figura 39. Pesaje de muestras húmedas extraídas al final del ensayo de B.E.



(a) Emisor lateral, descarga.



(b) Emisor lateral, recarga.

Figura 40. Velocidades corregidas por concentración de esfuerzos.

### 6.3. Ensayo de columna resonante

En esta sección muestran los resultados de dos muestras ensayadas en la columna resonante, de las que se obtuvieron probetas en las direcciones: horizontal ( $0^\circ$ ), vertical ( $90^\circ$ ) e inclinada ( $60^\circ$  respecto a la horizontal) (Figura 41), con el objeto de validar los resultados experimentales de  $V_s$ , obtenidos con elementos bender durante el ensayo de consolidación. De manera general, las probetas fueron sometidas a seis etapas de carga, desde 15 kPa a 130 kPa.



Figura 41. Ensayo de Columna Resonante (izquierda). Extracción de la muestra (centro). Esquema de corte (derecha).

En la Figura 42 se observan las curvas de compresibilidad de los seis especímenes ensayados en donde se hace muy evidente la diferencia de rigidez inicial y de compresibilidad, representadas por la relación

de vacíos. En el espécimen CR2-60° se evidencia una rigidez aún mayor que en las otras dos probetas a pesar de ser obtenidas del mismo tubo y profundidad.

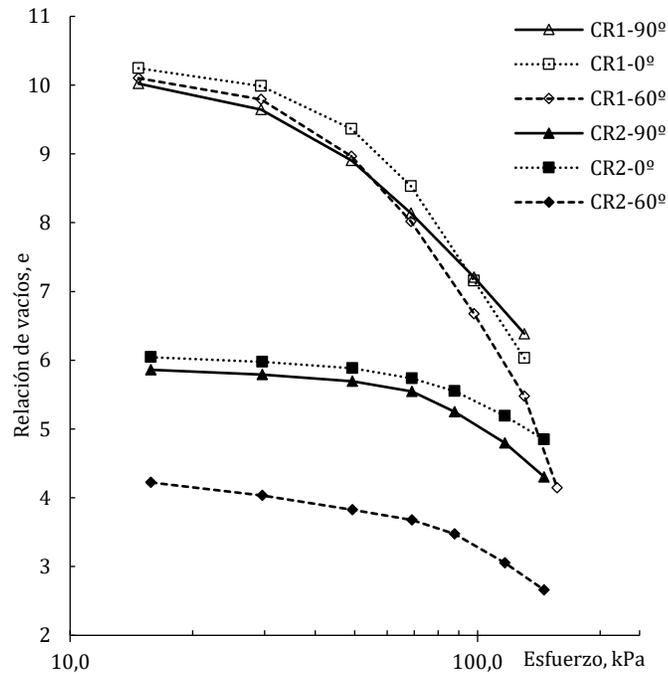
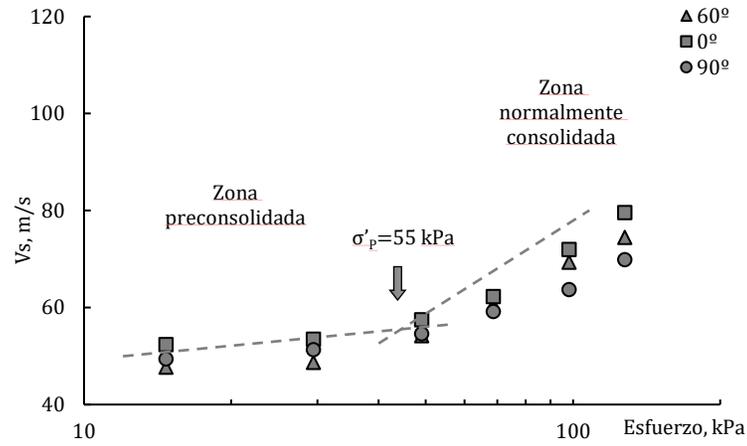


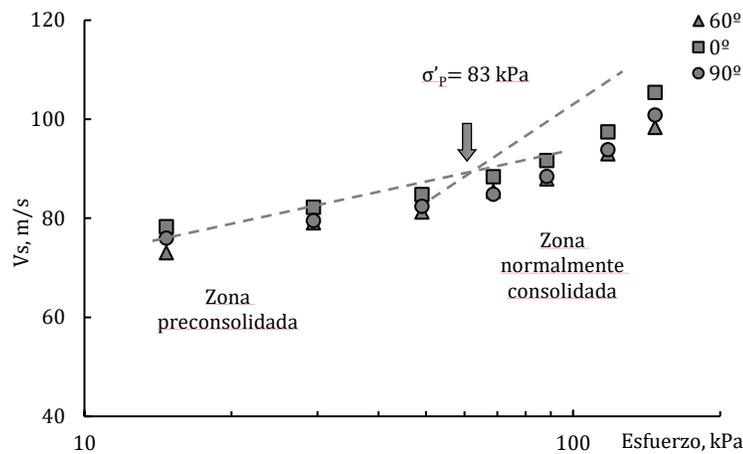
Figura 42. Curvas de compresibilidad columna resonante

### 6.3.1. Velocidad de cortante ( $V_s$ )

Conociendo los parámetros requeridos, se calculó la velocidad  $V_s$  en los ensayos de columna resonante usando la ecuación (4-3). En la Figura 43 se puede observar que las velocidades iniciales registradas en la muestra denominada CR-2 (aproximadamente 77 m/s) son mayores que aquellas registradas para la CR-1 (aproximadamente 45 m/s), lo que permite determinar que esta muestra (CR-2) tuvo una mayor rigidez inicial. Debido a que procede de una mayor profundidad (29.20m) tanto su relación de vacíos inicial como su esfuerzo de preconsolidación (Tabla 7) son consistentes con los resultados. Se observa también que las velocidades registradas en diferentes direcciones son muy semejantes entre sí en cada muestra. Esto ocurre principalmente cuando el esfuerzo aplicado es menor al esfuerzo de preconsolidación, y se empieza a marcar una diferencia entre las velocidades a partir de dicho esfuerzo.



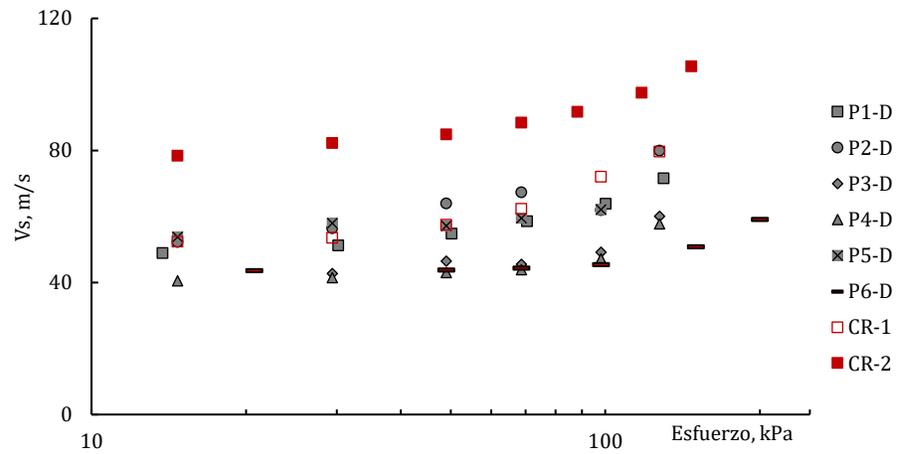
(a) CR-1



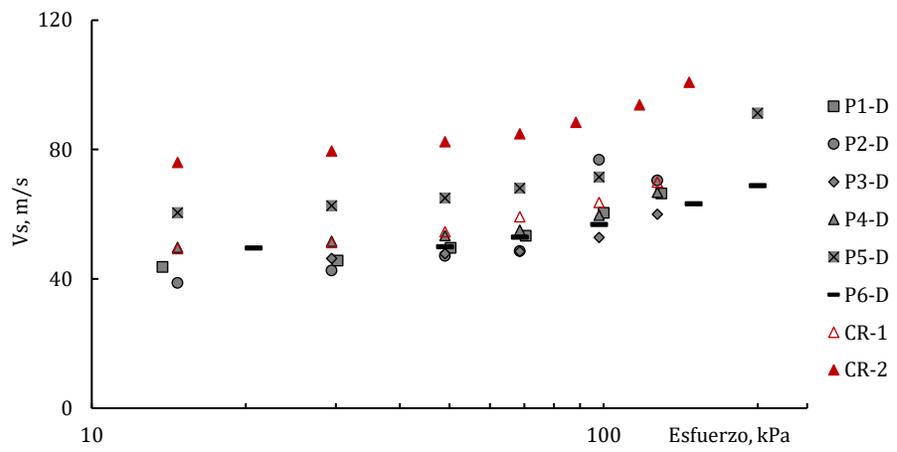
(b) CR-2

Figura 43. Representación semilogarítmica de  $V_s$  en función del esfuerzo y ubicación del esfuerzo de preconsolidación.

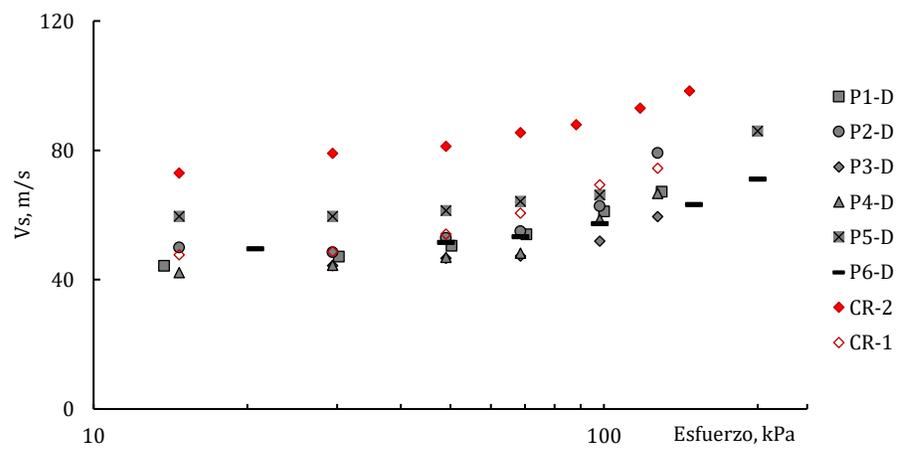
A continuación se muestra (Figura 44) la velocidad de propagación de onda cortante en función del esfuerzo efectivo aplicado. Los resultados corresponden a las pruebas realizadas con elementos bender y en columna resonante en las direcciones horizontal ( $0^\circ$ , Figura 44a), vertical ( $90^\circ$ , Figura 44b) y a  $60^\circ$  (Figura 44c) con respecto a la horizontal.



(a) Vs a 0° respecto a la horizontal



(b) Vs a 90° respecto a la horizontal

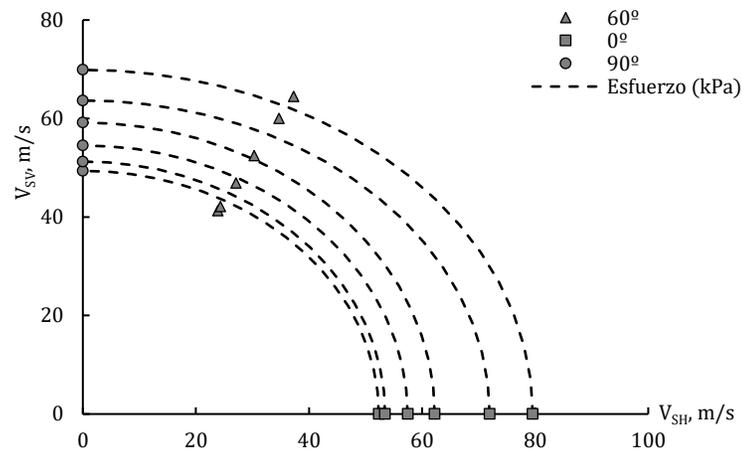


(c) Vs a 90° respecto a la horizontal

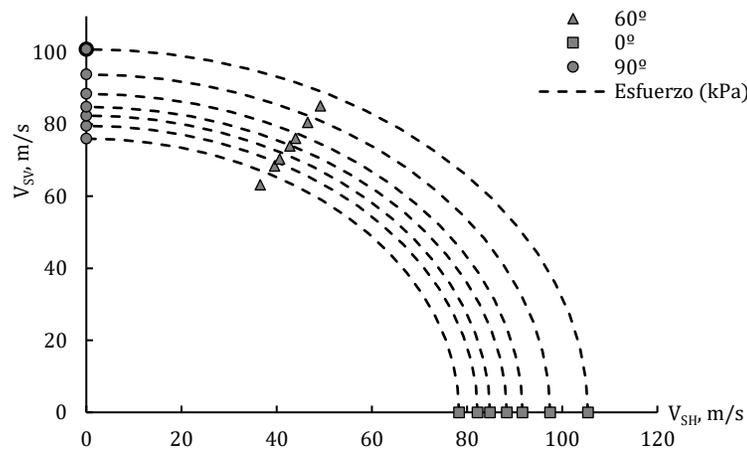
Figura 44. Velocidad Vs contra esfuerzo efectivo medida a 0°, 90° y 60° respecto a la horizontal

### 6.3.2. Representación polar de Vs obtenidas en columna resonante

En la Figura 45 se pueden observar las correspondientes representaciones polares de las velocidades obtenidas en los ensayos de columna resonante CR-1 (Figura 45 a) y CR-2 (Figura 45 b). En esta representación se observa que la velocidad crece conforme se incrementa el esfuerzo efectivo correspondientemente en todas las direcciones. Esto permite describir elipses de esfuerzo paralelas entre sí, en las cuales las Vs obtenidas a  $60^\circ$  tienen muy buena aproximación.



(a) CR-1



(b) CR-2

Figura 45. Representación polar de Vs en función del esfuerzo, columna resonante.

### 6.3.3. Análisis y discusión de resultados experimentales

En esta sección se recopilan de resultados experimentales, con el objetivo de definir un modelo de comportamiento que permita predecir la variación de la anisotropía cruzada con algunas propiedades mecánicas e índice. En la Figura 46 se muestran las curvas de compresibilidad obtenidas de los ensayos de consolidación unidimensional (P1-D a P6-D) y de los ensayos de columna resonante (CR1-90° a CR2-60°). Las relaciones de vacíos iniciales de las muestras ensayadas oscilan entre 4 y 10.5 y los esfuerzos de preconsolidación entre 40 y 95 kPa.

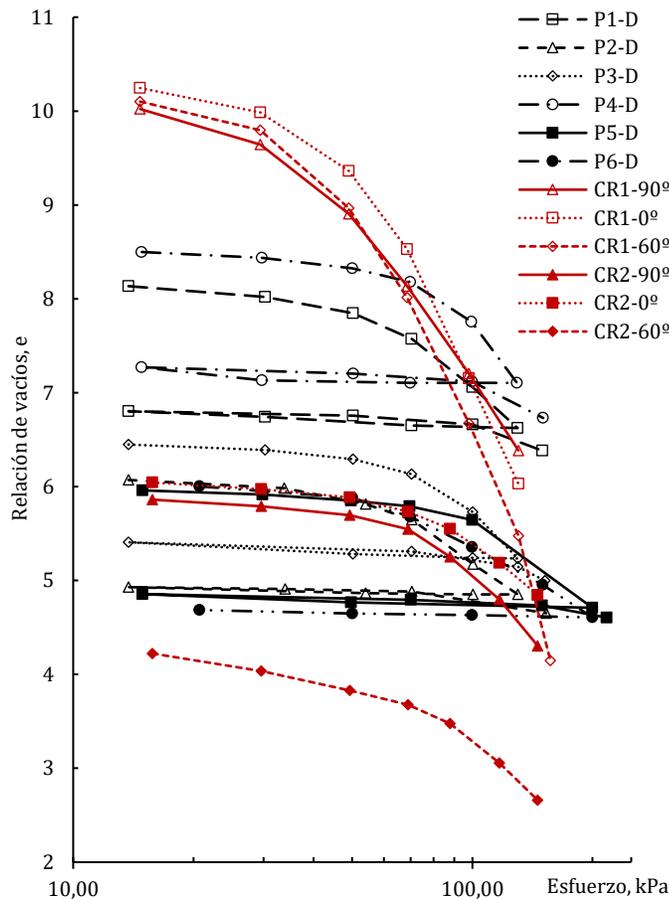


Figura 46. Curvas de compresibilidad

Las curvas de compresibilidad obtenidas en los ensayos de columna resonante, marcadas en rojo en la Figura 46 evidencian la diferencia en el proceso de consolidación y por lo tanto la diferencia en el comportamiento durante el ensayo en relación con el ensayo de consolidación unidimensional, sea por

el alto grado de compresibilidad alcanzado (muestra CR1) como por la diferencia en la relación de vacíos inicial entre las tres probetas obtenidas del mismo espécimen (muestra CR2). Recuérdese que en la columna resonante la consolidación se lleva a cabo con esfuerzos isotrópicos, mientras que en el consolidómetro se ocurre bajo esfuerzo anisótropos con deformación radial nula (condiciones de  $K_0$ ). Por las razones expuestas, a pesar de que los resultados de  $V_s$  obtenidos en la columna resonante pueden ser comparados exitosamente con aquellos obtenidos con elementos bender durante el ensayo de consolidación unidimensional, los coeficientes de anisotropía son muy diferentes, como se ve en la Figura 47. Obsérvese que las curvas de compresibilidad son muy diferentes y de hecho todas las que se obtuvieron de los ensayos con la columna resonante resultaron ser más compresibles.

#### 6.4. Determinación del cociente de anisotropía ( $V_{sa}/V_{sv}$ )

En la Figura 47 se integran los resultados de la normalización con respecto a la  $V_s$  vertical, de todas las pruebas realizadas en la etapa experimental tanto en el consolidómetro instrumentado como en la columna resonante, en la etapa de carga. No se realizó el proceso de descarga – recarga en la columna resonante, por lo que se muestra la representación polar de los resultados solamente en la etapa de carga.

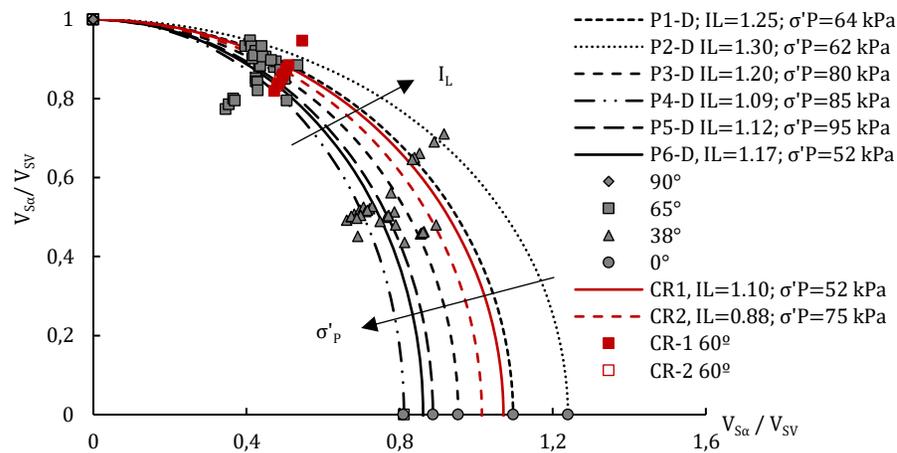
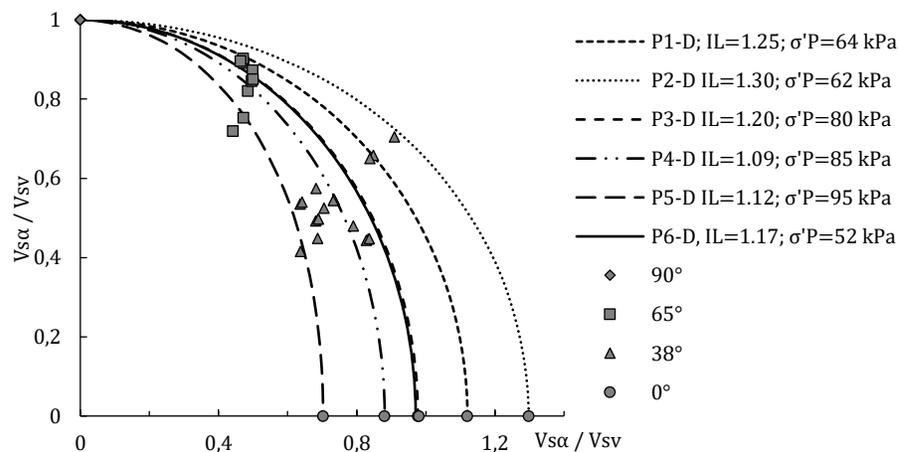


Figura 47. Normalización  $V_{sa}$  respecto a  $V_{sv}$

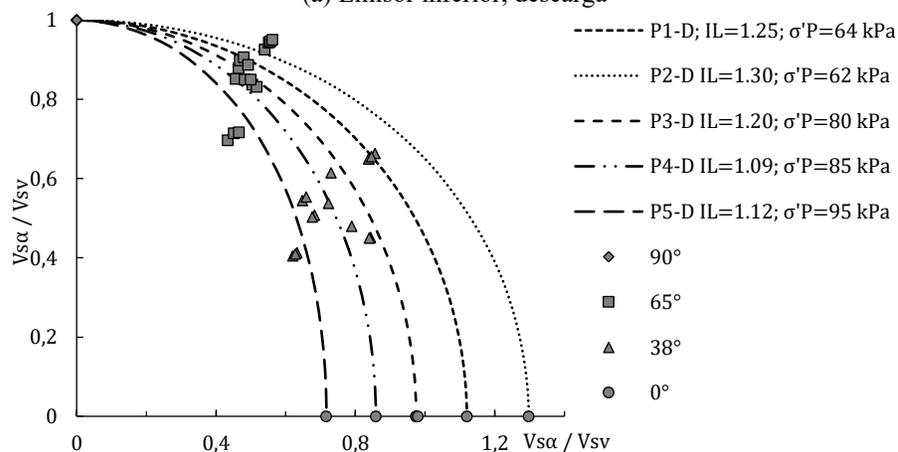
En rojo se muestran las elipses de esfuerzo generadas en los ensayos de columna resonante (Figura 47). En estos resultados se observa que, mientras las elipses generadas en los ensayos de consolidación

se ordenan con respecto a su índice de liquidez y a su esfuerzo de preconsolidación, las elipses producidas por la columna resonante también se ordenan, pero a una escala diferente. Por esta razón, teniendo  $I_L$  de 1.10 y 0.88, en la gráfica general se ubican entre las elipses cuyos  $I_L$  son 1.25 y 1.20. De igual manera sucede en cuanto a su esfuerzo de preconsolidación. Las elipses obtenidas en columna resonante siguen creciendo conforme crece  $I_L$  y disminuyendo conforme crece el esfuerzo de preconsolidación. Este comportamiento se debe a la naturaleza del ensayo, principalmente en lo que se refiere al proceso de consolidación, como ya se mencionó en el acápite anterior.

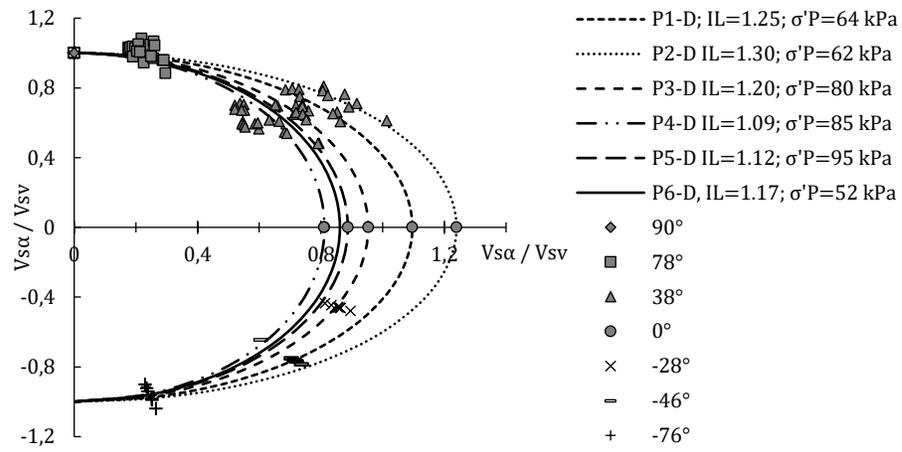
Las velocidades obtenidas en los procesos de descarga y recarga también fueron normalizadas con respecto a la velocidad vertical y se muestran en las Figuras 48 a, b, c, d y e.



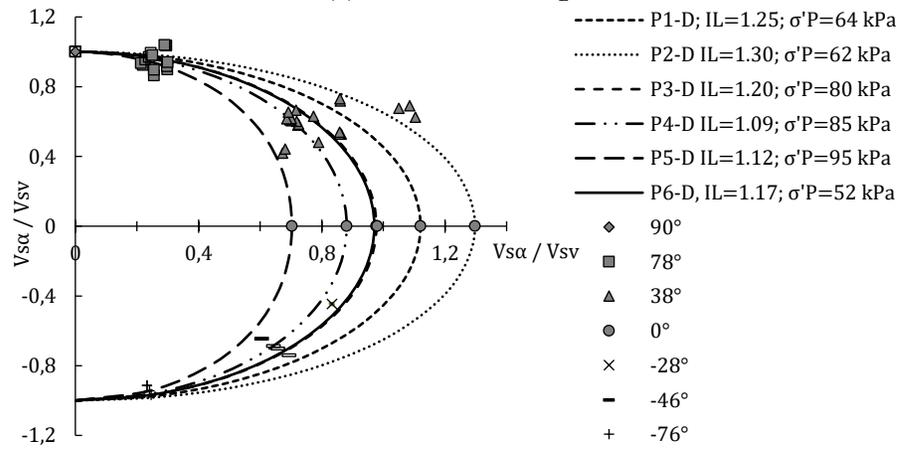
(a) Emisor inferior, descarga



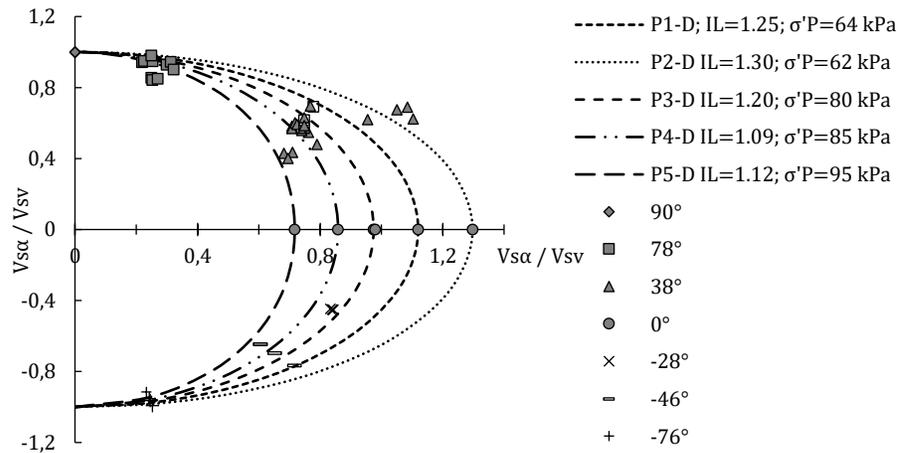
(b) Emisor inferior recarga



(c) Emisor lateral, carga



(d) Emisor lateral, descarga



(f) Emisor lateral, recarga

Figura 48. Normalización de las velocidades de ondas de corte medidas en diferentes direcciones en las etapas de carga, descarga y recarga.

Se puede observar que durante la descarga y recarga las velocidades normalizadas tienen una buena aproximación a la trayectoria elíptica, sin embargo, se requieren realizar más pruebas para definir mejor la trayectoria. Lo que queda claro es que el mayor grado de anisotropía se tiene en la dirección horizontal como resultado del proceso de sedimentación. A continuación,

en la Tabla 11 se resumen los cocientes de anisotropía determinados para las diferentes direcciones de cada una de las pruebas efectuadas, y que son los que fueron graficados en las Figuras 47 y 48. En el Anexo 3 se muestra de forma gráfica la relación entre la anisotropía, el esfuerzo de consolidación y el ángulo de inclinación en el cual se midió  $V_s$  durante las etapas de carga y de descarga-recarga.

Tabla 11.  $V_{sd}/V_{sv}$  determinado en pruebas de consolidación unidimensional.

| P1-D            |                        |                        |                        |                        |                 |
|-----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------|
| $\sigma'$ (kPa) | $V_{S78^\circ}/V_{SV}$ | $V_{S65^\circ}/V_{SV}$ | $V_{S50^\circ}/V_{SV}$ | $V_{S38^\circ}/V_{SV}$ | $V_{SH}/V_{SV}$ |
| 13.75           | 1.08                   | 1.01                   | 1.04                   | 0.98                   | 1.12            |
| 30.25           | 1.10                   | 1.03                   | 1.06                   | 0.97                   | 1.12            |
| 50.27           | 1.07                   | 1.02                   | 1.08                   | 0.97                   | 1.11            |
| 70.48           | 1.00                   | 1.01                   | 1.05                   | 1.02                   | 1.10            |
| 100.15          | 1.00                   | 1.01                   | 0.96                   | 0.98                   | 1.06            |
| 129.86          | 0.93                   | 1.01                   | 0.87                   | 0.92                   | 1.08            |
| 70.48           | 0.95                   | 1.01                   | -                      | 0.95                   | 1.08            |
| 30.25           | 0.96                   | 1.02                   | -                      | 0.94                   | 1.14            |
| 13.75           | 0.99                   | 1.01                   | -                      | 0.95                   | 1.14            |
| 50.27           | 0.98                   | 1.01                   | -                      | 0.96                   | 1.12            |
| 100.15          | 0.99                   | 1.03                   | -                      | 0.96                   | 1.11            |
| 149.71          | 0.96                   | 1.01                   | -                      | 0.95                   | 1.14            |
| P2-D            |                        |                        |                        |                        |                 |
| $\sigma'$ (kPa) | $V_{S78^\circ}/V_{SV}$ | $V_{S65^\circ}/V_{SV}$ | $V_{S50^\circ}/V_{SV}$ | $V_{S38^\circ}/V_{SV}$ | $V_{SH}/V_{SV}$ |
| 13.75           | 0.99                   | 1.15                   | -                      | 1.14                   | 1.36            |
| 33.77           | 1.15                   | 1.13                   | -                      | 1.12                   | 1.32            |
| 54.02           | 1.17                   | 1.11                   | -                      | 1.12                   | 1.13            |
| 70.52           | 1.02                   | 1.13                   | -                      | 1.16                   | 1.15            |
| 100.33          | 0.97                   | 1.19                   | -                      | 1.16                   | 1.19            |
| 130.03          | 1.07                   | 1.18                   | -                      | 1.13                   | 1.29            |
| 100.33          | 1.02                   | 1.21                   | -                      | 0.95                   | 1.31            |
| 54.02           | 1.00                   | 1.18                   | -                      | 0.94                   | 1.31            |
| 13.75           | 0.98                   | 1.09                   | -                      | 0.95                   | 1.28            |
| 33.99           | 1.16                   | 1.10                   | -                      | 1.06                   | 1.30            |
| 70.52           | 1.20                   | 1.10                   | -                      | 1.08                   | 1.31            |
| 153.03          | 1.12                   | 1.19                   | -                      | 1.07                   | 1.29            |
| P3-D            |                        |                        |                        |                        |                 |
| $\sigma'$ (kPa) | $V_{S78^\circ}/V_{SV}$ | $V_{S65^\circ}/V_{SV}$ | $V_{S50^\circ}/V_{SV}$ | $V_{S38^\circ}/V_{SV}$ | $V_{SH}/V_{SV}$ |
| 30.25           | -                      | 0.96                   | 0.89                   | 0.88                   | 0.92            |
| 50.27           | -                      | 0.98                   | 0.89                   | 0.90                   | 0.97            |
| 70.45           | -                      | 0.98                   | 0.87                   | 0.92                   | 0.94            |
| 100.26          | -                      | 0.98                   | 0.96                   | 0.90                   | 0.93            |
| 129.97          | -                      | 0.99                   | 0.99                   | 0.85                   | 1.00            |
| 100.26          | -                      | 0.95                   | -                      | 0.92                   | 0.96            |
| 50.27           | -                      | 0.98                   | -                      | 0.93                   | 0.96            |

| 13.75           | -                      | 1.01                   | -                      | 0.98                   | 1.01            |
|-----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------|
| 70.45           | -                      | 1.07                   | -                      | 0.95                   | 1.05            |
| 129.97          | -                      | 0.98                   | -                      | 0.85                   | 0.96            |
| 151.97          | -                      | 0.98                   | -                      | 0.86                   | 0.91            |
| P4-D            |                        |                        |                        |                        |                 |
| $\sigma'$ (kPa) | $V_{S78^\circ}/V_{SV}$ | $V_{S65^\circ}/V_{SV}$ | $V_{S50^\circ}/V_{SV}$ | $V_{S38^\circ}/V_{SV}$ | $V_{SH}/V_{SV}$ |
| 14.85           | 1.05                   | 0.85                   | 0.82                   | 0.82                   | 0.81            |
| 29.70           | 1.04                   | 0.86                   | 0.80                   | 0.84                   | 0.80            |
| 50.05           | 1.05                   | 0.88                   | 0.80                   | 0.85                   | 0.81            |
| 69.86           | 1.05                   | 0.88                   | 0.80                   | 0.84                   | 0.80            |
| 99.56           | 1.10                   | 0.98                   | 0.82                   | 0.87                   | 0.79            |
| 130.00          | 0.97                   | 1.00                   | 0.87                   | 0.88                   | 0.86            |
| 69.86           | 0.97                   | 1.01                   | -                      | 0.88                   | 0.86            |
| 29.70           | 0.95                   | 1.01                   | -                      | 0.92                   | 0.88            |
| 14.85           | 0.96                   | 1.01                   | -                      | 0.91                   | 0.90            |
| 50.32           | 0.97                   | 0.99                   | -                      | 0.90                   | 0.86            |
| 99.82           | 0.98                   | 0.97                   | -                      | 0.85                   | 0.86            |
| 150.43          | 0.98                   | 0.98                   | -                      | 0.84                   | 0.86            |
| P5-D            |                        |                        |                        |                        |                 |
| $\sigma'$ (kPa) | $V_{S78^\circ}/V_{SV}$ | $V_{S65^\circ}/V_{SV}$ | $V_{S50^\circ}/V_{SV}$ | $V_{S38^\circ}/V_{SV}$ | $V_{SH}/V_{SV}$ |
| 14.91           | 1.05                   | 0.98                   | -                      | 0.91                   | 0.89            |
| 29.82           | 1.00                   | 0.95                   | -                      | 0.94                   | 0.93            |
| 49.71           | 1.07                   | 0.94                   | -                      | 0.92                   | 0.88            |
| 69.64           | 1.03                   | 0.94                   | -                      | 0.92                   | 0.87            |
| 100.02          | 1.03                   | 0.93                   | -                      | 0.83                   | 0.87            |
| 199.99          | 1.00                   | 0.94                   | -                      | 0.89                   | 0.65            |
| 49.71           | 0.90                   | 0.89                   | -                      | 0.82                   | 0.69            |
| 14.91           | 0.93                   | 0.84                   | -                      | 0.76                   | 0.71            |
| 70.14           | 0.89                   | 0.82                   | -                      | 0.76                   | 0.72            |
| 149.67          | 0.88                   | 0.84                   | -                      | 0.74                   | 0.70            |
| 217.05          | 0.89                   | 0.86                   | -                      | 0.75                   | 0.73            |
| P6-D            |                        |                        |                        |                        |                 |
| $\sigma'$ (kPa) | $V_{S78^\circ}/V_{SV}$ | $V_{S65^\circ}/V_{SV}$ | $V_{S50^\circ}/V_{SV}$ | $V_{S38^\circ}/V_{SV}$ | $V_{SH}/V_{SV}$ |
| 20.73           | 1.06                   | 1.00                   | 0.89                   | 0.83                   | 0.88            |
| 50.01           | 1.09                   | 1.03                   | 0.90                   | 0.84                   | 0.88            |
| 69.94           | 0.94                   | 1.01                   | 0.88                   | 0.88                   | 0.84            |
| 99.86           | 0.83                   | 1.01                   | 0.96                   | 0.90                   | 0.80            |
| 150.00          | 0.89                   | 1.00                   | 0.86                   | 0.97                   | 0.80            |
| 200.04          | 1.29                   | 1.03                   | 0.85                   | 1.05                   | 0.86            |
| 99.86           | 1.08                   | 1.16                   | 0.00                   | 1.01                   | 0.97            |
| 50.01           | 1.08                   | 1.17                   | 0.00                   | 1.01                   | 0.98            |
| 20.73           | 1.08                   | 1.16                   | 0.00                   | 1.01                   | 0.96            |

Nota: los guiones (-) indican que no hay lecturas en esa dirección.

Al observar el comportamiento de los cocientes de anisotropía de la Tabla 11 y gráficos del Anexo 3 se concluye que de manera general la variación del esfuerzo efectivo aplicado durante la consolidación no genera variación en el cociente de anisotropía; y, por el contrario, el ángulo o dirección en la que se mide la  $V_s$  sí influye sobre dicho cociente. Durante el proceso de carga se observa una mayor dispersión del cociente de anisotropía en función del ángulo; mientras que durante la descarga-recarga se registraron

---

cocientes de anisotropía con menor dispersión. Esto se refleja en la desviación estándar calculada en cada prueba y que se detalla a continuación.

- En la etapa de carga de la prueba P1-D se observa que la variación de la anisotropía está entre 0.87 y 1.12 con una desviación estándar entre 1% y 8% con respecto al esfuerzo efectivo para una misma dirección, y con desviación estándar entre 3% y 7% con respecto a la dirección para un mismo esfuerzo efectivo. Los cocientes de anisotropía en la rama preconsolidada están entre 0.97 y 1.12; y, en la rama normalmente consolidada entre 0.87 y 1.10. En la etapa de descarga – recarga los cocientes varían entre .94 y 1.14. La desviación estándar está entre 1% y 2% con respecto al esfuerzo efectivo en la misma dirección; y, entre 6% y 8% con respecto a la dirección para el mismo esfuerzo efectivo.
- En la prueba P2-D se observa que el cociente de anisotropía varía entre 0.97 y 1.36 con desviación estándar entre 2% y 10% al variar el esfuerzo efectivo para una misma dirección; mientras que, con respecto a la dirección, para un mismo esfuerzo efectivo la desviación estándar está entre 6% y 15%. Separando el comportamiento de la rama preconsolidada, se tiene que la anisotropía varía entre 0.99 y 1.36; y, entre 0.97 y 1.29 en la rama normalmente consolidada. En la etapa de descarga – recarga se observa una variación de la anisotropía entre 0.94 y 1.31 con desviaciones estándar entre 1% y 9% cuando se varía la dirección y se mantiene constante el esfuerzo efectivo; y, entre 11% y 15% cuando se varía el esfuerzo y se mantiene constante la dirección.
- El cociente de anisotropía durante la etapa de carga, varía entre 0.85 y 1.00 en la prueba P3-D, con desviación estándar entre 1% y 5% cuando se varía el esfuerzo efectivo y se mantiene la dirección; mientras que a la inversa, variando la dirección y manteniendo el esfuerzo, la desviación estándar está entre el 4% y el 7% . Separando el comportamiento de la rama preconsolidada el cociente oscila entre 0.87 y 0.98; y, en la rama normalmente consolidada entre 0.85 y 1.00. Los cocientes de

---

anisotropía durante la descarga – recarga están entre 0.85 y 1.07 con desviación estándar entre 4% y 5% al variar el esfuerzo de consolidación; y, entre 2% y 7% al variar la dirección.

- El cociente de anisotropía en la etapa de carga de la prueba P4-D se ubica entre 0.79 y 1.10 con desviación estándar de 2% a 7% cuando se varía el esfuerzo efectivo; y, de 6% a 12% cuando se varía la dirección. En la rama preconsolidada estos cocientes están oscilando entre 0.80 y 1.05; y, entre 0.79 y 1.10 en la rama normalmente consolidada. En la etapa de descarga – recarga, el cociente de anisotropía oscila entre 0.84 y 1.0 con desviación estándar entre 1% y 3% cuando se varía el esfuerzo; y, entre 5% y 8% cuando se varía la dirección.
- Para la prueba P5-D se tiene que la variación del cociente durante la etapa de carga está entre 0.65 y 1.07 con desviación estándar entre 2% y 10% al variar el esfuerzo y entre 3% y 14% al variar la dirección. En la rama preconsolidada estos coeficientes están entre 0.87 y 1.07 en la rama normalmente consolidada están entre 0.65 y 1.03. La descarga – recarga presenta cocientes entre 0.69 y 0.93 con desviación estándar entre 2% y 3% al variar el esfuerzo; y, entre 11% y 12% al variar la dirección.
- Finalmente, la prueba P6-D exhibe cocientes de anisotropía entre 0.80 y 1.29 con desviación estándar entre 1% y 17% al variar el esfuerzo; y, entre 7% y 16% cuando se varía la dirección. La rama preconsolidada tiene cocientes entre 0.83 y 1.09 y la rama normalmente consolidada entre 0.80 y 1.29. El proceso de descarga (en esta prueba no se aplicó recarga) presenta cocientes entre 0.96 y 1.17 con desviación estándar entre 0% y 1% al variar el esfuerzo y del 8% al variar la dirección.

## 7. EVOLUCIÓN DEL COCIENTE DE ANISOTROPÍA DURANTE LA PRUEBA DE CONSOLIDACIÓN.

Al finalizar cada incremento de esfuerzo efectivo durante el ensayo de consolidación, varía también el contenido de agua y con esto el índice de liquidez ( $I_L$ ). El esfuerzo de preconsolidación ( $\sigma'_p$ ) y la relación de preconsolidación (OCR) también varían; el primero a partir de que se supera el esfuerzo de preconsolidación de campo; y, el segundo hasta alcanzar este mismo valor, a partir del cual se vuelve constante e igual a 1. A continuación, se determinó la variación de los parámetros mencionados, con cada incremento de esfuerzo durante la prueba de consolidación (Tabla 12). En este capítulo se analiza a detalle la evolución del cociente de anisotropía y su relación con los parámetros establecidos.

### 7.1. Relación entre el cociente de anisotropía y el índice de liquidez

El índice de liquidez es un parámetro que depende del contenido de agua ( $w$ , %) y de los límites líquido ( $w_L$ , %) y plástico ( $w_P$ , %) (ec. 7-1). Generalmente se hace referencia a este parámetro utilizando la humedad inicial del material (o la humedad de campo) pero durante el proceso de consolidación, la humedad varía con el esfuerzo efectivo aplicado, por lo tanto, también varía el índice de liquidez.

$$I_L = \frac{w - w_P}{w_L - w_P} \quad 7-1$$

A continuación (Figura 49), se muestran los resultados del coeficiente de anisotropía medido en las direcciones señaladas anteriormente ( $V_{S\alpha}/V_{SV}$ ) en función del índice de liquidez registrado para diferentes esfuerzos de consolidación (carga, descarga y recarga). Las direcciones ( $\alpha$ ) corresponden a los ángulos de 78°, 65°, 50°, 38° y 0° con respecto a la horizontal. En esta figura se muestra en la columna de la izquierda el comportamiento general del coeficiente de anisotropía en función del índice de liquidez, es decir promediando los cocientes obtenidos durante toda la prueba de consolidación para cada dirección (de 78° a 0° de arriba hacia abajo). En la columna central se muestra el comportamiento correspondiente a las ramas normalmente consolidadas; y, en la columna de la derecha se observa el comportamiento de

la etapa preconsolidada y de la etapa de descarga recarga, los cuales se separan claramente uno del otro con tendencias propias.

Tabla 12. Índice de liquidez, esfuerzo de preconsolidación y relación de preconsolidación por esfuerzo efectivo

| P1-D            |       |             |      | P2-D      |       |             |       | P3-D      |       |             |      |
|-----------------|-------|-------------|------|-----------|-------|-------------|-------|-----------|-------|-------------|------|
| $\sigma'$ (kPa) | $I_L$ | $\sigma'_p$ | OCR  | $\sigma'$ | $I_L$ | $\sigma'_p$ | OCR   | $\sigma'$ | $I_L$ | $\sigma'_p$ | OCR  |
| 13.75           | 1.23  | 64.00       | 4.65 | 13.75     | 1.30  | 62.00       | 4.51  | 13.75     | 1.20  | 80.00       | 5.82 |
| 30.25           | 1.21  | 64.00       | 2.12 | 33.77     | 1.27  | 62.00       | 1.84  | 30.25     | 1.18  | 80.00       | 2.64 |
| 50.27           | 1.17  | 64.00       | 1.27 | 54.02     | 1.23  | 62.00       | 1.15  | 50.27     | 1.16  | 80.00       | 1.59 |
| 70.48           | 1.12  | 70.48       | 1.00 | 70.52     | 1.19  | 70.52       | 1.00  | 70.45     | 1.12  | 80.00       | 1.14 |
| 100.15          | 1.01  | 100.15      | 1.00 | 100.33    | 1.07  | 100.33      | 1.00  | 100.26    | 1.02  | 100.26      | 1.00 |
| 129.86          | 0.92  | 129.86      | 1.00 | 130.03    | 0.98  | 130.03      | 1.00  | 129.97    | 0.89  | 129.97      | 1.00 |
| 70.48           | 0.92  | 129.86      | 1.84 | 100.33    | 0.98  | 130.03      | 1.30  | 100.26    | 0.89  | 129.97      | 1.30 |
| 30.25           | 0.94  | 129.86      | 4.29 | 54.02     | 0.99  | 130.03      | 2.41  | 50.27     | 0.90  | 129.97      | 2.59 |
| 13.75           | 0.96  | 129.86      | 9.44 | 13.75     | 1.00  | 130.03      | 9.46  | 13.75     | 0.94  | 129.97      | 9.45 |
| 50.27           | 0.95  | 129.86      | 2.58 | 33.99     | 1.00  | 130.03      | 3.83  | 70.45     | 0.91  | 129.97      | 1.84 |
| 100.15          | 0.93  | 129.86      | 1.30 | 70.52     | 0.99  | 130.03      | 1.84  | 129.97    | 0.87  | 129.97      | 1.00 |
| 149.71          | 0.87  | 149.71      | 1.00 | 153.03    | 0.93  | 153.03      | 1.00  | 151.97    | 0.83  | 151.97      | 1.00 |
| P4-D            |       |             |      | P5-D      |       |             |       | P6-D      |       |             |      |
| $\sigma'$       | $I_L$ | $\sigma'_p$ | OCR  | $\sigma'$ | $I_L$ | $\sigma'_p$ | OCR   | $\sigma'$ | $I_L$ | $\sigma'_p$ | OCR  |
| 14.85           | 1.08  | 85.00       | 5.72 | 14.91     | 1.11  | 95.00       | 6.37  | 20.73     | 1.17  | 62.00       | 2.99 |
| 29.70           | 1.07  | 85.00       | 2.86 | 29.82     | 1.10  | 95.00       | 3.19  | 50.01     | 1.14  | 62.00       | 1.24 |
| 50.05           | 1.05  | 85.00       | 1.70 | 49.71     | 1.09  | 95.00       | 1.91  | 69.94     | 1.08  | 69.94       | 1.00 |
| 69.86           | 1.03  | 85.00       | 1.22 | 69.64     | 1.07  | 95.00       | 1.36  | 99.86     | 1.00  | 99.86       | 1.00 |
| 99.56           | 0.95  | 99.56       | 1.00 | 100.02    | 1.03  | 100.02      | 1.00  | 150.00    | 0.90  | 150.00      | 1.00 |
| 129.26          | 0.84  | 129.26      | 1.00 | 199.99    | 0.80  | 199.99      | 1.00  | 200.04    | 0.81  | 200.04      | 1.00 |
| 69.86           | 0.84  | 129.26      | 1.85 | 49.71     | 0.82  | 199.99      | 4.02  | 99.86     | 0.81  | 200.04      | 2.00 |
| 29.70           | 0.85  | 129.26      | 4.35 | 14.91     | 0.84  | 199.99      | 13.41 | 50.01     | 0.82  | 200.04      | 4.00 |
| 14.85           | 0.87  | 129.26      | 8.70 | 70.14     | 0.82  | 199.99      | 2.85  | 20.73     | 0.83  | 200.04      | 9.65 |
| 50.32           | 0.86  | 129.26      | 2.57 | 149.67    | 0.81  | 199.99      | 1.34  |           |       |             |      |
| 99.82           | 0.84  | 129.26      | 1.29 | 217.05    | 0.78  | 217.05      | 1.00  |           |       |             |      |
| 150.43          | 0.78  | 150.43      | 1.00 |           |       |             |       |           |       |             |      |

\*  $\sigma'$  y  $\sigma'_p$  en kPa

El comportamiento general a 78° tiende a agruparse con tendencia lineal ligeramente creciente y su dispersión va aumentando progresivamente hasta llegar a 0°, en donde se observa claramente la separación de comportamientos. Al separar los puntos obtenidos durante la etapa normalmente consolidada se observa una dispersión similar a lo observado en el comportamiento general, no así durante las etapas preconsolidada y de descarga recarga, que mantienen una clara tendencia lineal, pero de diferentes pendientes entre sí.

Los parámetros  $m$  (pendiente),  $b$  (ordenada) y  $R^2$  (ajuste) de la regresión lineal se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13.  $V_{Sw}/V_{SV}$  vs.  $I_L$ . Parámetros de ajuste  $m$ ,  $b$  y  $R^2$  de la regresión lineal

| Dirección | Comportamiento general |      |       | Preconsolidado |       |       | Descarga-Recarga |       |       | Normalmente consolidado |      |       |
|-----------|------------------------|------|-------|----------------|-------|-------|------------------|-------|-------|-------------------------|------|-------|
|           | $m$                    | $b$  | $R^2$ | $m$            | $b$   | $R^2$ | $m$              | $b$   | $R^2$ | $m$                     | $b$  | $R^2$ |
| 78°       | 0.27                   | 0.75 | 0.23  | 0.23           | 0.81  | 0.16  | 0.81             | 0.24  | 0.51  | -0.03                   | 1.02 | 0.00  |
| 65°       | 0.12                   | 0.89 | 0.03  | 1.00           | -0.16 | 0.81  | 1.26             | -0.14 | 0.69  | 0.33                    | 0.71 | 0.21  |
| 50°       | 0.28                   | 0.62 | 0.15  | 1.33           | -0.61 | 0.72  | -                | -     | -     | 0.41                    | 0.52 | 0.33  |
| 38°       | 0.27                   | 0.67 | 0.14  | 1.03           | -0.25 | 0.64  | 1.12             | -0.11 | 0.70  | 0.48                    | 0.49 | 0.25  |
| 0°        | 0.52                   | 0.47 | 0.15  | 2.04           | -1.36 | 0.85  | 3.18             | -1.87 | 0.96  | 0.60                    | 0.41 | 0.17  |

(-) sin lecturas en esa dirección.

Se observa en la Tabla 13 que la pendiente ( $m$ ) se va incrementando conforme la dirección tiende a 0°. En el comportamiento promedio o general varía de 0.27 a 0.52 y en el comportamiento normalmente consolidado de -0.03 a 0.60; mientras que en el material preconsolidado varía de 0.23 a 2.04 y en la descarga-recarga tiene las pendientes más altas, entre 0.81 y 3.18. Es evidente que el comportamiento promedio durante la prueba es muy semejante al comportamiento normalmente consolidado. En cuanto a la ordenada al origen ( $b$ ), su valor decrece conforme la dirección tiende a 0° y varía entre 0.75 y 0.47 para el comportamiento general; y, entre 1.02 y 0.41 en la rama normalmente consolidada. En la rama preconsolidada varía entre 0.81 y -1.36 y entre 0.24 y -1.87 en la descarga-recarga.

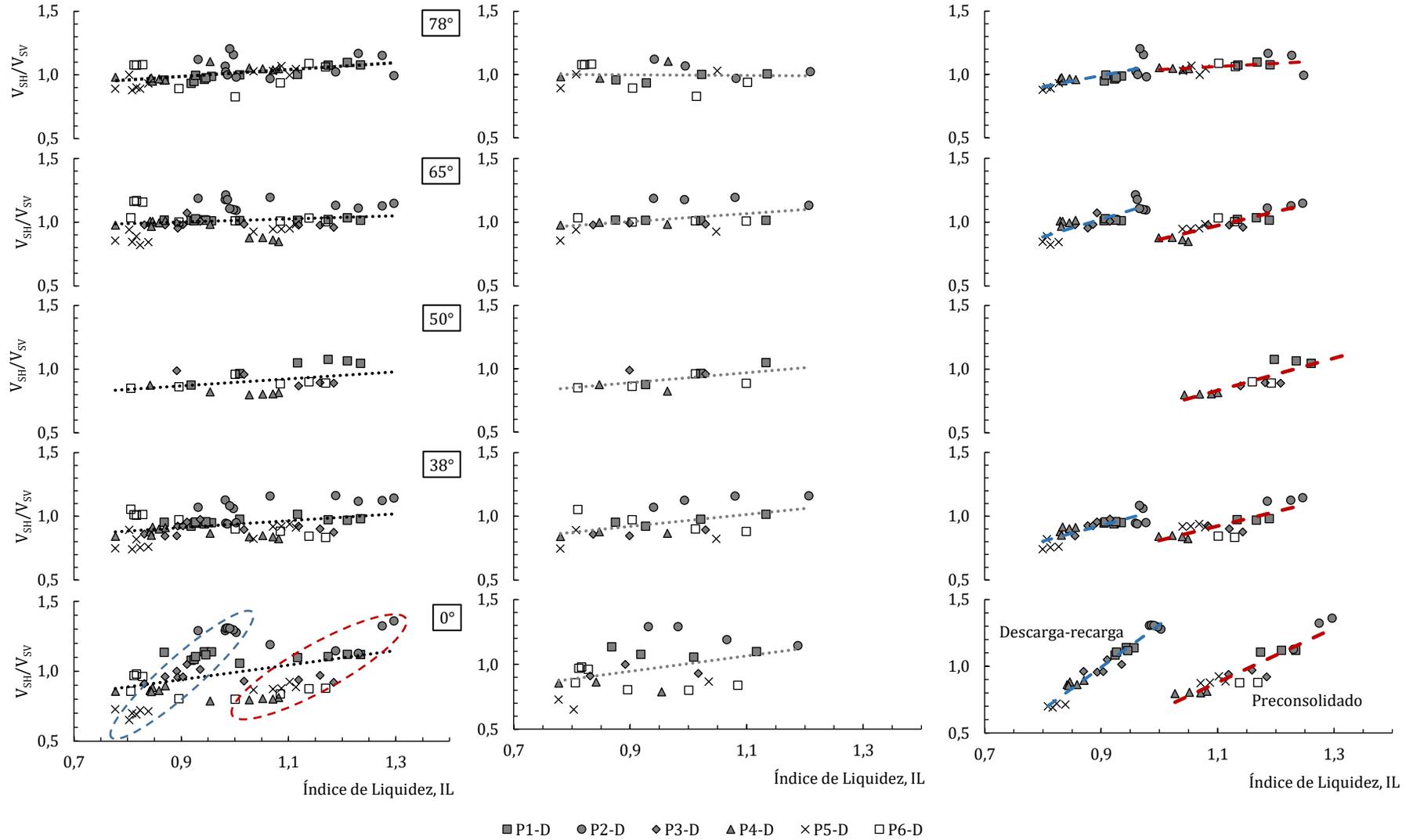


Figura 49. Índice de liquidez en función del cociente de anisotropía en el comportamiento general (izquierda), en la rama normalmente consolidada (centro) y en las ramas preconsolidada y descarga-recarga (derecha). Ambos parámetros determinados para cada esfuerzo efectivo aplicado en la prueba de consolidación unidimensional.

Especial atención merece el análisis de los resultados del comportamiento a  $0^\circ$  de la Figura 49, donde se muestra la evolución del índice de liquidez con el parámetro de anisotropía cruzada ( $V_{SH}/V_{SV}$ ), ambas variables determinadas al final de cada etapa de carga, descarga y recarga del proceso de consolidación unidimensional. La Figura 49 (izquierda) muestra el comportamiento general o promedio a  $0^\circ$  en el cual se han agrupado en color rojo los valores que fueron medidos antes de llegar al esfuerzo de preconsolidación; y, en azul los valores durante las etapas de descarga - recarga. Entre estos dos grupos se observa una nube de valores que fueron medidos en la rama virgen o zona normalmente consolidada; que a primera vista no presenta una tendencia clara. En la Figura 49 (derecha) se muestran las tendencias que toman las zonas preconsolidada y descarga-recarga (rojo y azul, respectivamente), que tienen una estructura definida. Se puede observar que la pendiente ( $m$ ) es menor en la rama preconsolidada, con índices de liquidez más altos (por ser la humedad más alta en las etapas iniciales de la consolidación), en comparación con la pendiente de la zona de descarga-recarga, que tiene menor humedad y por tanto menor índice de liquidez. Por otro lado, la pendiente de la Figura 49 (centro) es menor que las anteriores y se observa una gran dispersión en los valores determinados en la zona normalmente consolidada. Esto se debe a que en esta zona el suelo no presenta una estructura definida.

## 7.2. Relación entre el cociente de anisotropía y el esfuerzo de preconsolidación

El esfuerzo de preconsolidación ( $\sigma'_p$ ) es un parámetro mecánico que describe el esfuerzo máximo al cual el suelo ha sido sometido previamente. Este parámetro separa el comportamiento preconsolidado (donde las deformaciones son pequeñas y recuperables) del comportamiento normalmente consolidado (donde las deformaciones son grandes y no recuperables). Los comportamientos mencionados se estudiaron en el laboratorio aplicando etapas de carga, descarga y recarga a varios especímenes. Durante la etapa de carga se determinó el esfuerzo de preconsolidación de campo. A partir de este valor cada esfuerzo aplicado durante la prueba de consolidación se convierte en el nuevo esfuerzo de

preconsolidación porque es nuevo en la historia de esfuerzos del suelo. Finalmente, en la etapa de descarga-recarga el esfuerzo de preconsolidación corresponde al último esfuerzo efectivo total aplicado durante la carga (el último de la rama normalmente consolidada), hasta que éste sea superado por un esfuerzo mayor. Aunque la tendencia actual es utilizar el esfuerzo de fluencia ( $\sigma'_y$ ) que es el punto de máxima curvatura de la etapa de carga, en este trabajo se ha determinado el esfuerzo de consolidación utilizando el método de (Casagrande, 1936).

En la Figura 50 se observa la evolución del cociente de anisotropía en función del esfuerzo de preconsolidación y se analizan los resultados de la misma manera en que se analizaron los resultados relacionados con el índice de liquidez en el acápite anterior.

Tabla 14.  $V_{So}/V_{SV}$  vs.  $\sigma'_p$ . Parámetros de ajuste  $m$ ,  $b$  y  $R^2$  de la regresión lineal

|     | Comportamiento general |        |        | Preconsolidado |        |        | Descarga-Recarga |        |        | Normalmente consolidado |        |        |
|-----|------------------------|--------|--------|----------------|--------|--------|------------------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|
|     | $m$                    | $b$    | $R^2$  | $m$            | $b$    | $R^2$  | $m$              | $b$    | $R^2$  | $m$                     | $b$    | $R^2$  |
| 78° | -0.0007                | 1.0923 | 0.1481 | -0.0017        | 1.1944 | 0.2835 | -0.0015          | 1.1913 | 0.2896 | 0.0003                  | 0.9615 | 0.0249 |
| 65° | -0.0002                | 1.0336 | 0.0075 | -0.0046        | 1.3374 | 0.5218 | -0.0027          | 1.3807 | 0.5541 | -0.0006                 | 1.1014 | 0.0975 |
| 50° | -0.0008                | 0.9810 | 0.0861 | -0.0078        | 1.4864 | 0.6221 | -                | -      | -      | -0.0009                 | 1.0219 | 0.2339 |
| 38° | -0.0005                | 0.9995 | 0.0571 | -0.0036        | 1.2102 | 0.2324 | -0.0024          | 1.2553 | 0.5956 | -0.0007                 | 1.0363 | 0.0674 |
| 0°  | -0.0012                | 1.1330 | 0.0858 | -0.0086        | 1.6359 | 0.4535 | -0.0051          | 1.7330 | 0.4525 | -0.015                  | 1.1489 | 0.1137 |

La pendiente ( $m$ ) es muy cercana a cero en todas las condiciones de prueba y en todas las direcciones de la Tabla 14. Esto indica que la variación del estado de esfuerzos no influye en el cociente de anisotropía, el cual se mantiene relativamente constante e igual a la ordenada al origen ( $b$ ) en cada dirección analizada. La ordenada al origen crece según la dirección avanza hacia 0°. En el comportamiento general durante la prueba, varía de 1.0923 a 1.1330 y en comportamiento normalmente consolidado entre 0.9615 y 1.1489. En el comportamiento preconsolidado este coeficiente varía entre 1.1944 y 1.6359 mientras que en la etapa de descarga-recarga varía entre 1.1913 y 1.7330. Cada espécimen ensayado es diferente de los otros porque tiene una rigidez inicial propia que se refleja en el esfuerzo de preconsolidación, esto ocasiona que el ajuste ( $R^2$ ) refleje una dispersión muy alta.

---

### **7.3. Relación entre el cociente de anisotropía y la relación de preconsolidación (OCR)**

La relación de preconsolidación (OCR) fue calculada dividiendo el esfuerzo de preconsolidación entre el esfuerzo efectivo, ambos en cada etapa del ensayo de consolidación (Tabla 12). De estos resultados fueron graficados su comportamiento general y en las ramas preconsolidada y normalmente consolidada (Figura 51). No se graficó el comportamiento normalmente consolidado puesto que la abscisa para todos los valores de anisotropía es la unidad, al ser el esfuerzo de preconsolidación igual al esfuerzo efectivo en esa etapa. De la misma forma que en los acápites anteriores se determinaron los parámetros de regresión lineal (Tabla 15), de cuyo análisis se desprende que, al ser la pendiente muy cercana a cero, el OCR no influye en el comportamiento de la anisotropía. Se observa también que las tendencias de las ramas preconsolidada y de descarga-recarga son muy cercanas entre sí por lo tanto, el proceso de descarga-recarga tampoco afecta a la anisotropía.

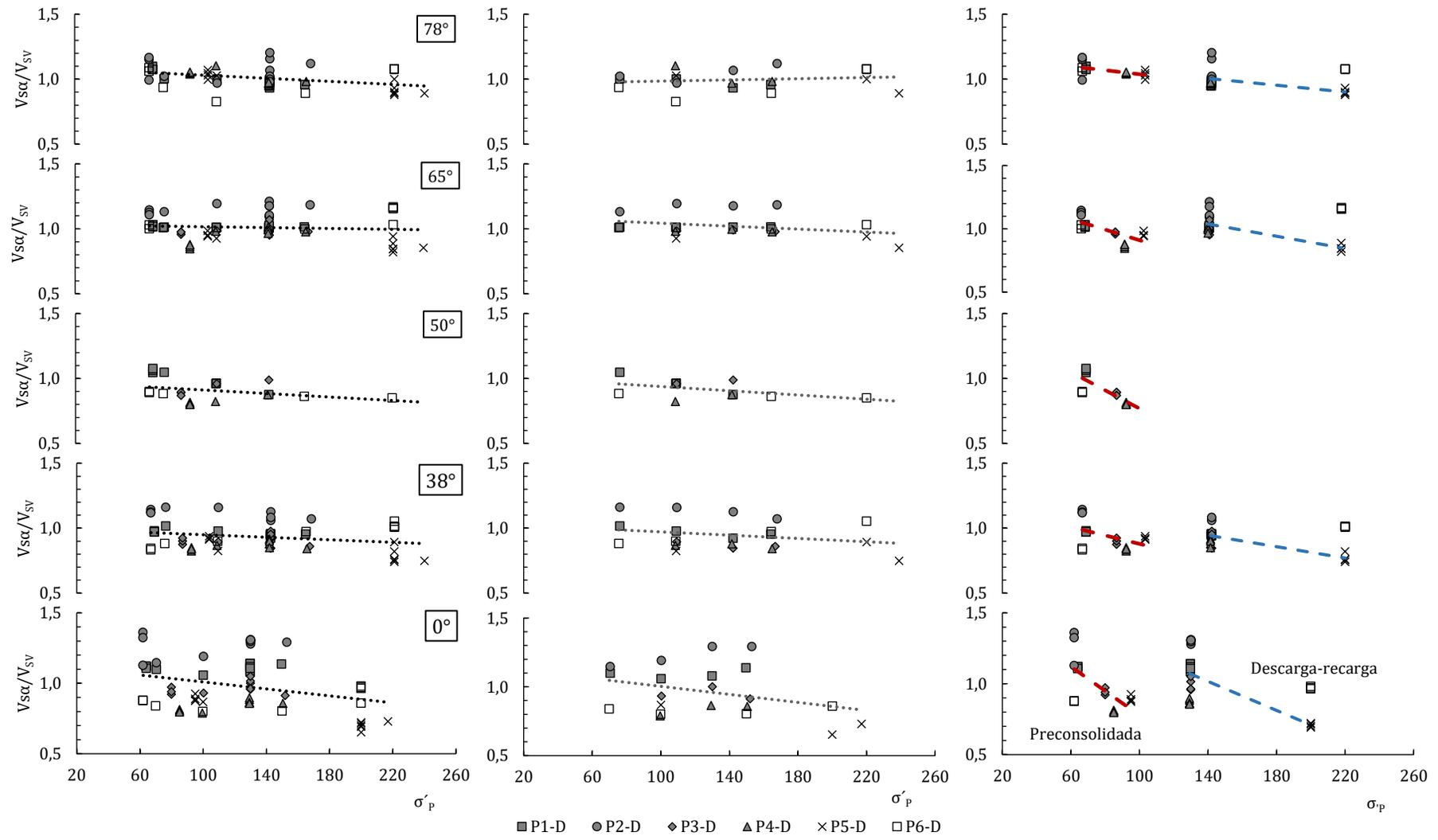


Figura 50. Esfuerzo de preconsolidación en función del cociente de anisotropía en el comportamiento general (izquierda), en la rama normalmente consolidada (centro) y en las ramas preconsolidada y descarga-recarga (derecha). Ambos parámetros determinados para cada esfuerzo efectivo aplicado en la prueba de consolidación unidimensional.

Tabla 15.  $V_{Sa}/V_{SV}$  vs. OCR. Parámetros de ajuste  $m$ ,  $b$  y  $R^2$  de la regresión lineal

|     | Comportamiento general |        |        | Preconsolidado |        |        | Descarga-Recarga |        |        |
|-----|------------------------|--------|--------|----------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
|     | $m$                    | $b$    | $R^2$  | $m$            | $b$    | $R^2$  | $m$              | $b$    | $R^2$  |
| 78° | -0.0027                | 1.0238 | 0.0075 | -0.0113        | 1.096  | 0.1718 | -0.0032          | 0.995  | 0.0202 |
| 65° | -0.0016                | 1.0152 | 0.0022 | -0.0039        | 0.9934 | 0.0055 | -0.0045          | 1.0233 | 0.0268 |
| 50° | -0.0034                | 0.9158 | 0.0024 | -0.0007        | 0.9058 | 0.0001 | -                | -      | -      |
| 38° | -0.0022                | 0.9392 | 0.0037 | -0.0015        | 0.9373 | 0.0006 | -0.0018          | 0.9194 | 0.0057 |
| 0°  | 0.0005                 | 0.9813 | 0.0001 | 0.0029         | 0.9677 | 0.0007 | -0.0048          | 1.0278 | 0.0066 |

Al igual que se observó en la Tabla 14, la pendiente ( $m$ ) es muy cercana a cero en todos los comportamientos y en todas las direcciones de la Tabla 15. Esto indica que la variación del estado de esfuerzos no influye en el cociente de anisotropía, el cual se mantiene relativamente constante e igual a la ordenada al origen ( $b$ ) en cada dirección analizada. El parámetro ( $b$ ) varía entre 1.0238 en la dirección de 78° y va disminuyendo hasta 0.9813 en la dirección a 0° en el comportamiento general. En el comportamiento preconsolidado también disminuye entre 1.096 y 0.9677; y en la etapa de descarga – recarga, se incrementa de 0.995 a 1.0278 cuando alcanza la dirección a 0°. Cada espécimen ensayado es diferente de los otros puesto que tiene un OCR inicial propio, esto ocasiona que el ajuste ( $R^2$ ) refleje una dispersión muy alta.

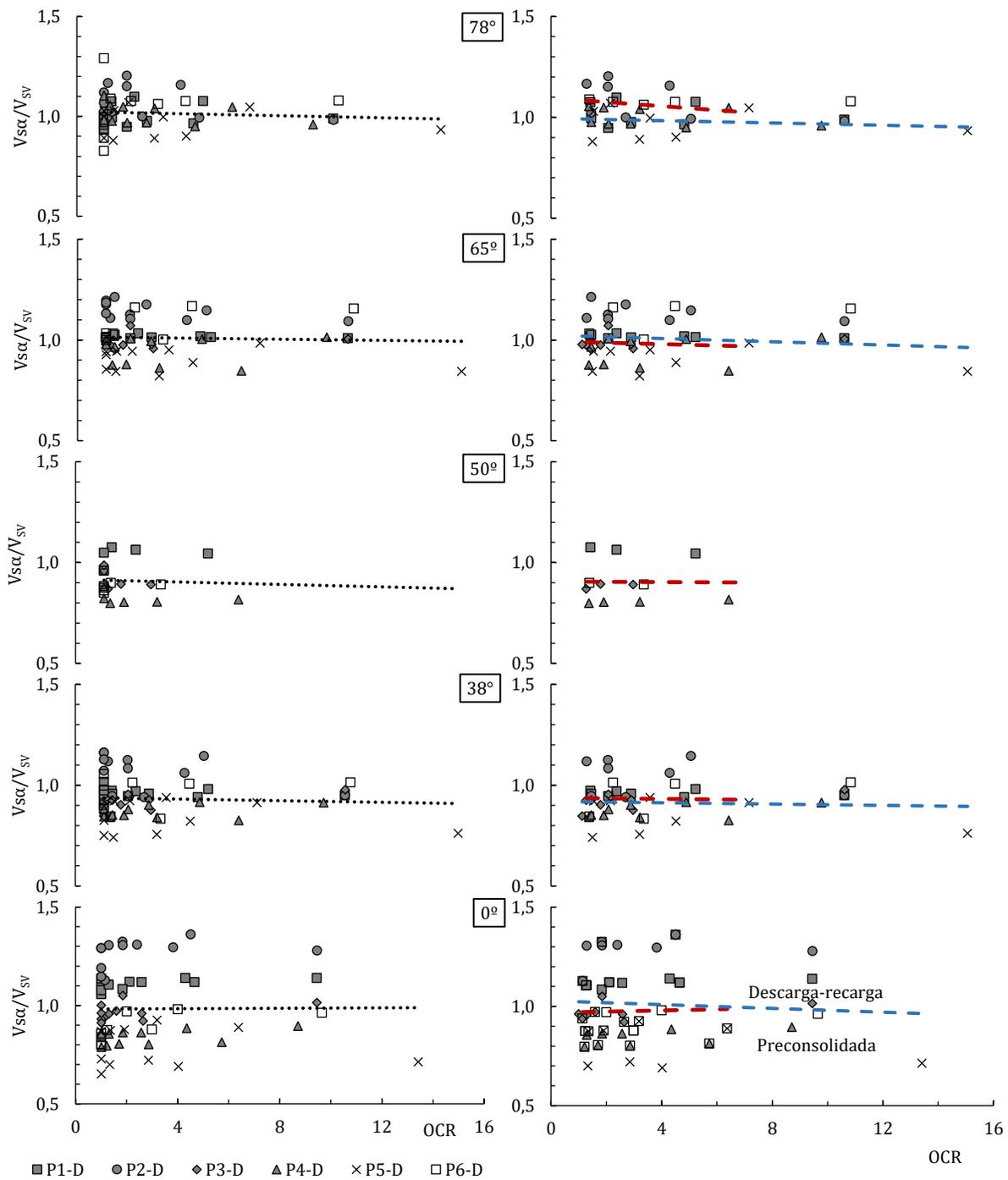


Figura 51. Relación de preconsolidación en función del cociente de anisotropía en el comportamiento general (izquierda) y en las ramas preconsolidada (rojo) y descarga-recarga (azul) (derecha). Ambos parámetros determinados para cada esfuerzo efectivo aplicado en la prueba de consolidación unidimensional

#### 7.4. Anisotropía estimada para condiciones de campo

En esta sección se hace un análisis específico en el cual se relaciona el cociente de anisotropía que el suelo tendría en campo con sus propiedades índice iniciales (Tabla 16). Para esto se recurrió a las curvas de  $V_s$  contra esfuerzo efectivo ( $\sigma'$ ) (Anexo 2) de las cuales se obtuvieron las velocidades de corte para las direcciones de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  correspondientes al esfuerzo de campo de cada probeta. Con estos valores se calcularon los cocientes de anisotropía de todas las pruebas y se graficaron contra las propiedades iniciales de las probetas (Figura 52), obtenidas de la Tabla 5 y que se muestran también en la Tabla 16.

Tabla 16. Anisotropía de campo y propiedades índice iniciales

| PARÁMETRO                      | SÍMBOLO                 | UNIDAD | P1-D  | P2-D  | P3-D  | P4-D  | P5-D  | P6-D  |
|--------------------------------|-------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Profundidad promedio           | H                       | m      | 17.1  | 12.30 | 16.1  | 14.5  | 20.90 | 16.40 |
| Esfuerzo de preconsolidación   | $\sigma'_p$             | kPa    | 64.00 | 62.00 | 80.00 | 85.00 | 95.00 | 62.00 |
| Esfuerzo efectivo de campo     | $\sigma'_c$             | kPa    | 53.61 | 48.90 | 43.61 | 32.97 | 77.32 | 58.93 |
| OCR                            | $\sigma'_p / \sigma'_c$ | -      | 1.19  | 1.27  | 1.83  | 2.58  | 1.23  | 1.05  |
| Índice de liquidez             | $I_L$                   | -      | 1.25  | 1.30  | 1.20  | 1.09  | 1.12  | 1.17  |
|                                | $V_{S78^\circ}/V_{SV}$  | -      | 1.06  | 1.16  | -     | 1.04  | 1.03  | 1.02  |
| Anisotropía de campo calculada | $V_{S65^\circ}/V_{SV}$  | -      | 1.02  | 1.11  | 0.97  | 0.86  | 0.94  | 1.02  |
|                                | $V_{S50^\circ}/V_{SV}$  | -      | 1.07  | -     | 0.89  | 0.80  | -     | 0.89  |
|                                | $V_{S38^\circ}/V_{SV}$  | -      | 0.98  | 1.12  | 0.89  | 0.84  | 0.90  | 0.86  |
|                                | $V_{SH}/V_{SV}$         | -      | 1.11  | 1.18  | 0.96  | 0.80  | 0.87  | 0.86  |

En la Tabla 17 se observa que las ecuaciones que representan la correspondencia lineal entre el cociente de anisotropía y el esfuerzo de preconsolidación e índice de liquidez se asemejan a las ecuaciones determinadas en la rama preconsolidada en el capítulo anterior. Difieren las ecuaciones que correlacionan la anisotropía con el OCR, debido que el esfuerzo de preconsolidación de campo de este tipo de suelo no sigue una tendencia determinada, como sí lo hace en condiciones controladas.

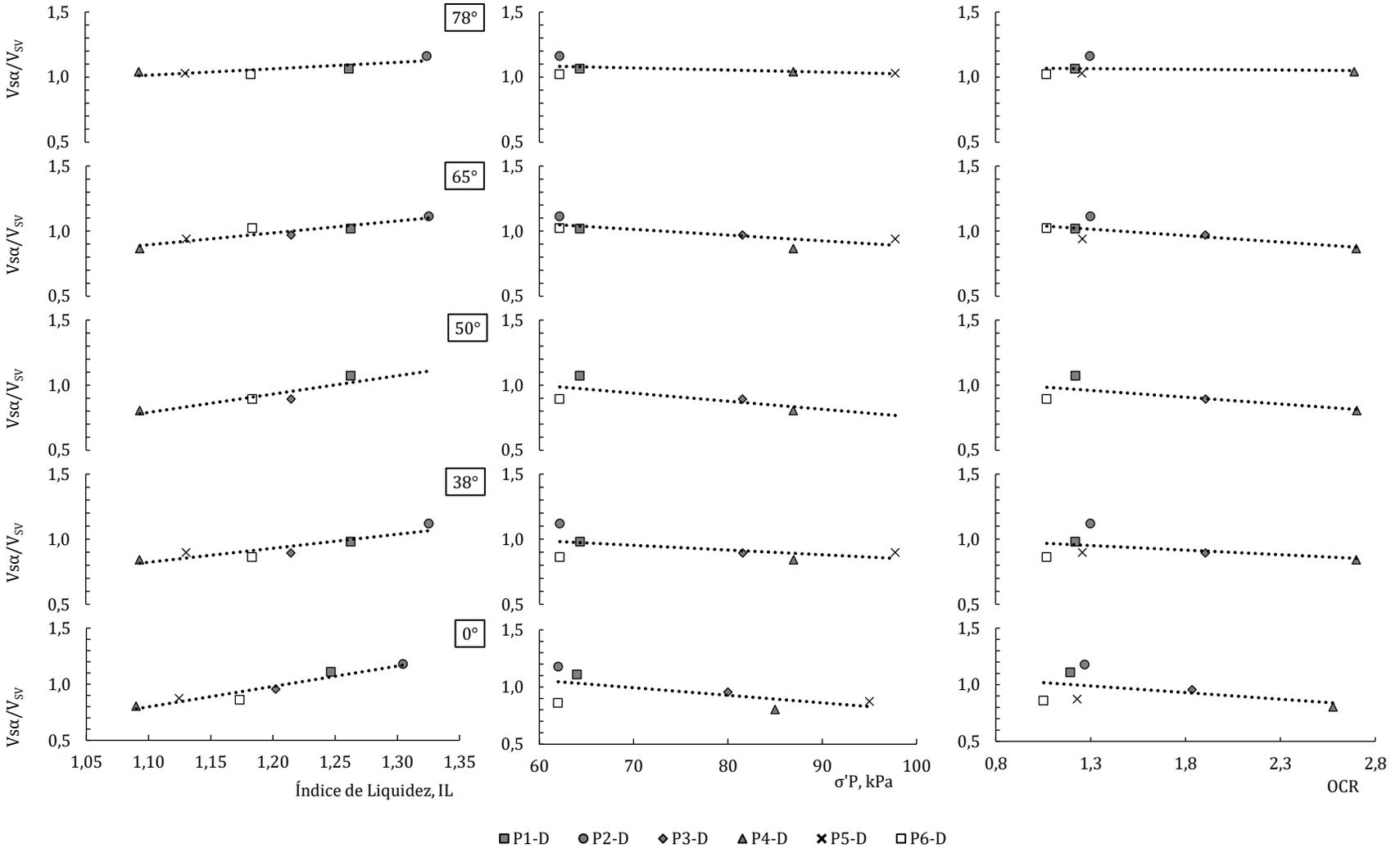


Figura 52. Anisotropía vs. propiedades índice en condiciones de campo: (izquierda)  $I_L$ , (centro)  $\sigma'_p$ ; y, (derecha) OCR

Tabla 17.  $V_{sa}/V_{sv}$  vs.  $I_L$ ,  $\sigma'_p$  y OCR e en condiciones de campo. Parámetros de ajuste m, b y  $R^2$  de la regresión lineal

|     | Índice de liquidez |         |        | Esfuerzo de preconsolidación |        |        | OCR     |        |        |
|-----|--------------------|---------|--------|------------------------------|--------|--------|---------|--------|--------|
|     | m                  | b       | $R^2$  | m                            | b      | $R^2$  | m       | b      | $R^2$  |
| 78° | 0.5326             | 0.4301  | 0.6589 | -0.0017                      | 1.1889 | 0.2093 | -0.0113 | 1.0794 | 0.0151 |
| 65° | 0.9911             | -0.1919 | 0.8589 | -0.0048                      | 1.3428 | 0.6251 | -0.1059 | 1.1494 | 0.534  |
| 50° | 1.5251             | -0.8818 | 0.8136 | -0.0067                      | 1.3991 | 0.4673 | -0.1121 | 1.1015 | 0.4902 |
| 38° | 1.1656             | -0.4557 | 0.7938 | -0.0039                      | 1.2238 | 0.283  | -0.0753 | 1.0465 | 0.1802 |
| 0°  | 1.8163             | -1.1993 | 0.9152 | -0.0066                      | 1.4555 | 0.3822 | -0.1172 | 1.1416 | 0.2075 |

En la Tabla 17 se observa que la pendiente (m) de la regresión lineal que relaciona el cociente de anisotropía con el índice de liquidez es de 0.5326 en la dirección de 78° y se incrementa progresivamente con la dirección hasta llegar al valor máximo de 1.8163 a 0°. Este comportamiento es diferente al de la pendiente que relaciona la anisotropía con el esfuerzo de preconsolidación y con el OCR en donde su variación es muy pequeña y en sentido negativo.

## 8. ESTIMACIÓN DE LA ANISOTROPÍA A PARTIR DE PROPIEDADES ÍNDICE EN SUELOS LACUSTRES.

En esta sección se utilizan las ecuaciones que caracterizan el cociente de anisotropía ( $V_{sa}/V_{sv}$ ) en función del índice de liquidez ( $I_L$ ) (Tabla 13), esfuerzo de preconsolidación ( $\sigma'_p$ ) (Tabla 14) y OCR (Tabla 15) determinadas tanto para las condiciones controladas en laboratorio (evolución durante la prueba de consolidación), como en condiciones de campo (Tabla 16) para construir perfiles de anisotropía a partir de las propiedades mencionadas. Para esto se recurrió a una recopilación de resultados (Fernández-Lavín, 2020) de varios ensayos de columna resonante y triaxial instrumentado con elementos bender realizados en el laboratorio del IIUNAM, recopilación de la cual se tomaron solamente los parámetros necesarios ( $I_L$ ,  $\sigma'_p$  y OCR) para realizar las predicciones. Estos ensayos fueron realizados sobre especímenes de la misma procedencia que los usados en este trabajo y recuperados a diferentes profundidades. El objetivo es comparar los cocientes de anisotropía calculados a partir de las ecuaciones lineales resumidas en las tablas 13,14,15 y 17, con las mediciones experimentales realizadas en este trabajo. En la Figura 53 se muestra la recopilación de información previa y también los resultados de esta investigación en lo que se refiere a  $I_L$ ,  $\sigma'_p$  y OCR, que están marcados en rojo. En dicha recopilación el  $I_L$  fue calculado con la humedad inicial de la muestra y el valor de  $\sigma'_p$  corresponde al de la etapa de carga, con este valor más el esfuerzo efectivo de campo se calculó el OCR. Se observa que conforme se incrementa la profundidad, las propiedades graficadas no muestran una tendencia clara, pero las propiedades de las muestras ensayadas en esta investigación se ubican dentro de la dispersión general.

Con los parámetros  $m$  y  $b$  de las Tablas 13-15 y 17 se establecieron ecuaciones lineales en donde se calculó el cociente de anisotropía en función de las propiedades que se muestran en la Figura 53. En el Anexo 4 se muestran los perfiles de anisotropía generados para todas las direcciones (función del ángulo de incidencia) y agrupados por comportamiento (promedio, preconsolidado, normalmente consolidado,

descarga-recarga y condiciones de campo). En rojo se sobrepusieron los resultados experimentales de anisotropía obtenidos en esta investigación.

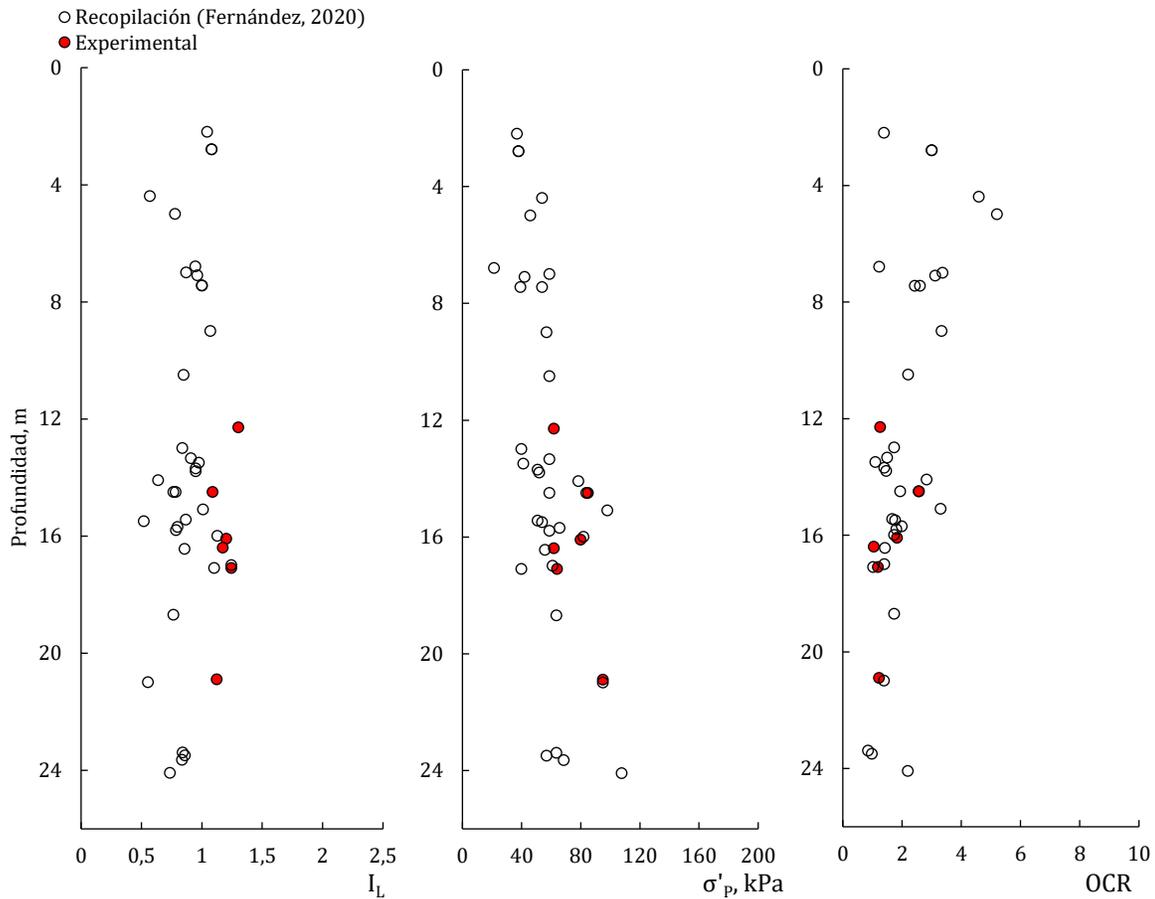


Figura 53. Perfiles de propiedades a correlacionar: (izquierda)  $I_L$ , (centro)  $\sigma'_p$ , y (derecha) OCR. (A partir de Fernández, 2020).

Se ha establecido anteriormente que el suelo presenta de manera general un comportamiento de anisotropía cruzada, es decir, en donde las propiedades elásticas son constantes en un plano y varían en el plano perpendicular a éste. En el caso del suelo lacustre del ex Lago de Texcoco, las condiciones en las que las partículas se sedimentaron dieron lugar a que la estratificación sea horizontal; por esto, a continuación se analiza el comportamiento de la anisotropía registrada en el plano horizontal.

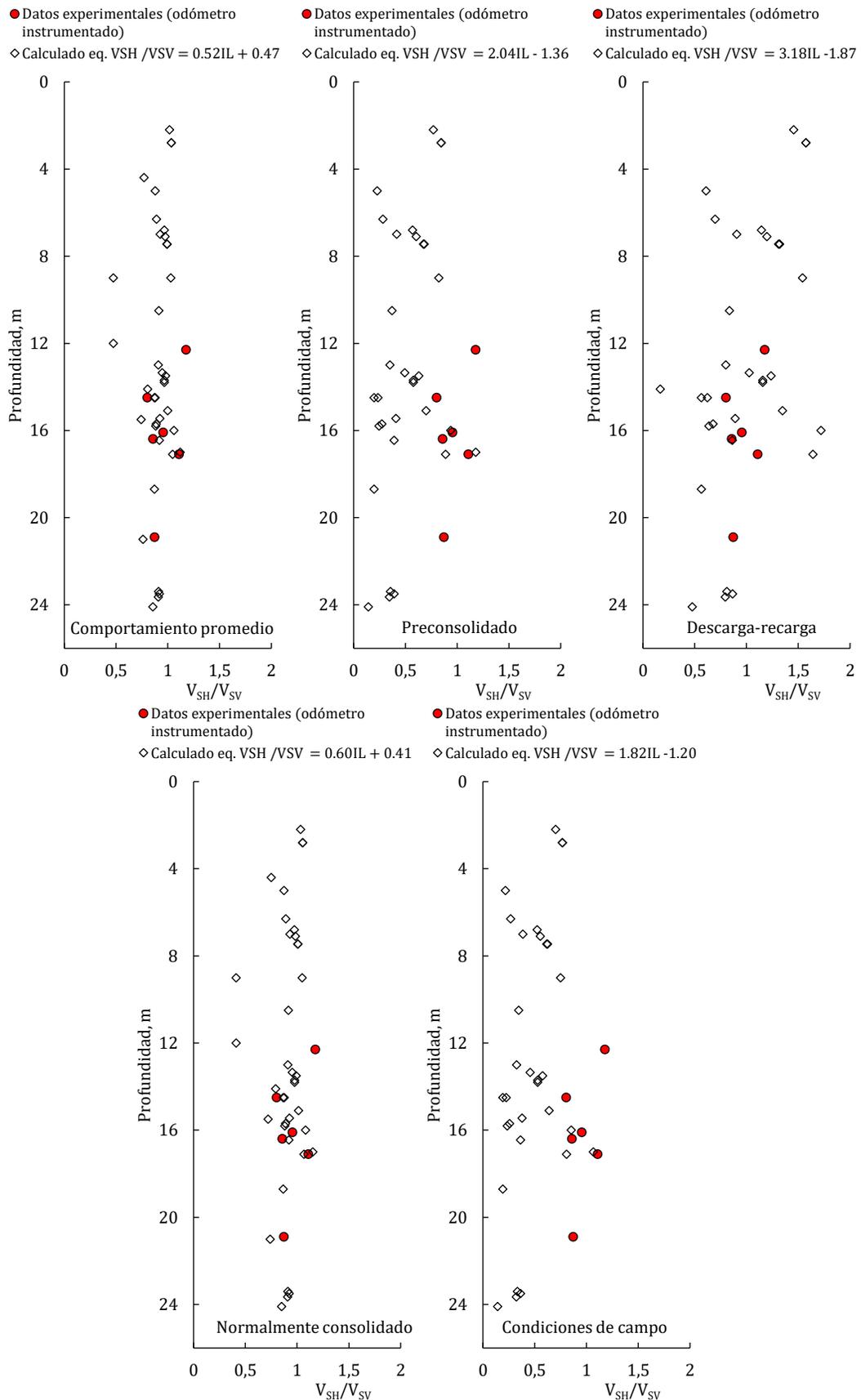


Figura 54. Perfiles de anisotropía determinados a partir de  $I_L$  obtenido en condiciones de campo y de laboratorio.

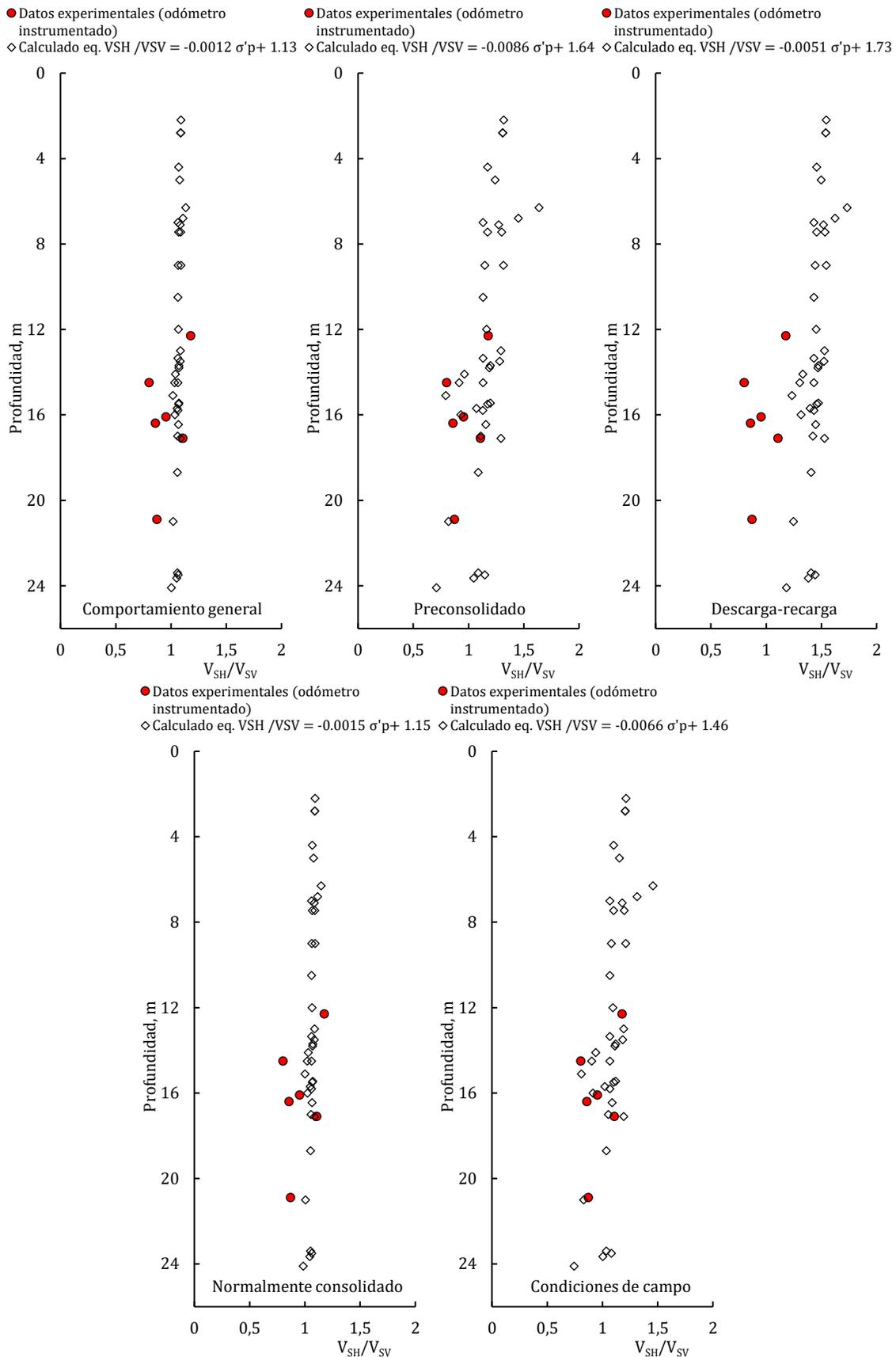


Figura 55. Perfiles de anisotropía determinados a partir de  $\sigma'_p$  obtenido en condiciones de campo y de laboratorio.

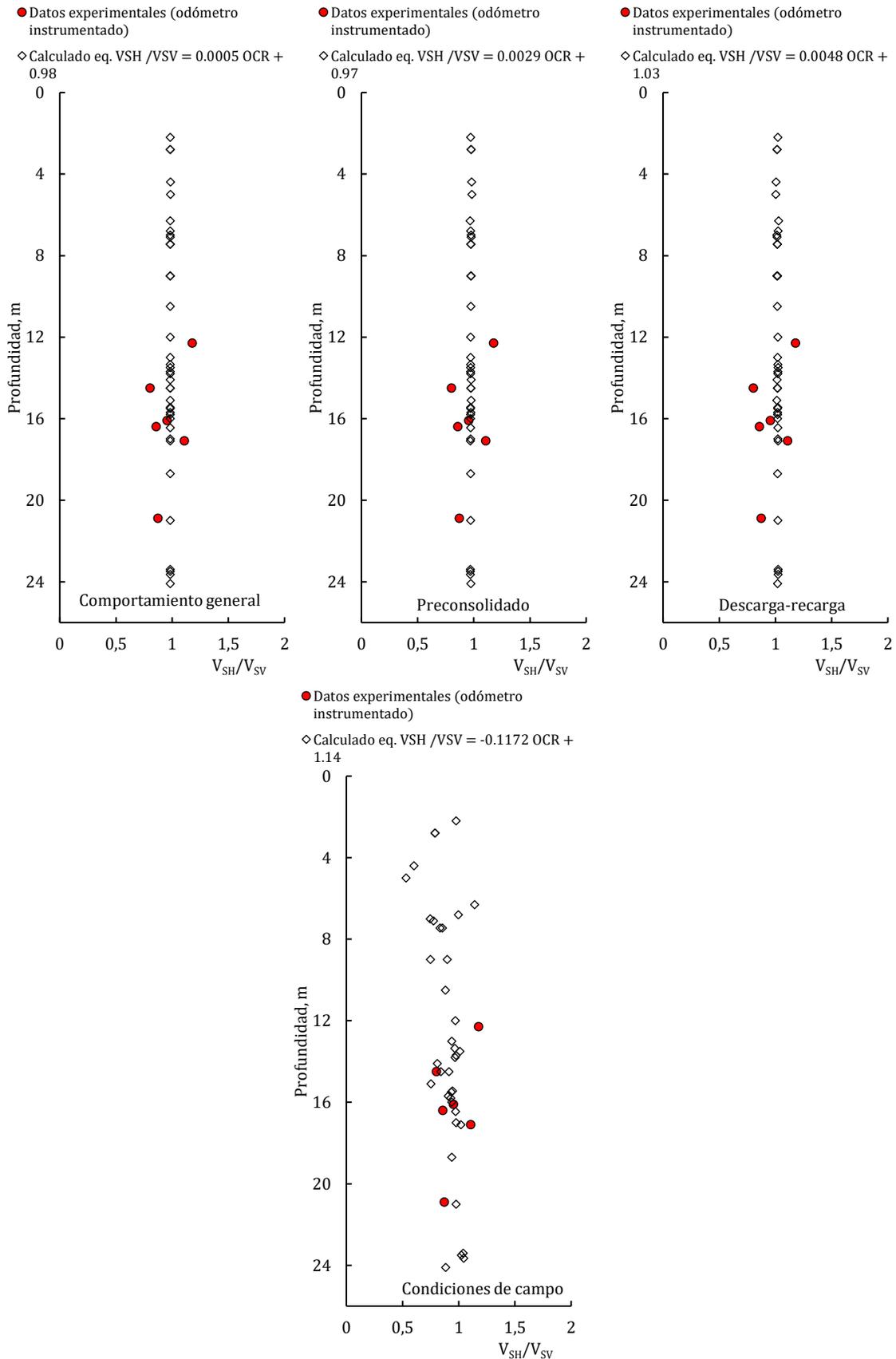


Figura 56. Perfiles de anisotropía determinados a partir de OCR obtenido en condiciones de campo y de laboratorio.

Se observa en la Figura 54 que a partir del índice de liquidez, los resultados determinados experimentalmente en este trabajo tienen una buena correlación con el comportamiento de la anisotropía en la rama normalmente consolidada y con el comportamiento promedio, no así cuando se comparan con los comportamientos preconsolidado, descarga-recarga y de condiciones de campo, comportamientos en los que además no se puede identificar una tendencia ya que la dispersión es muy alta.

La Figura 55 muestra que las mejores correlaciones basadas en el esfuerzo de preconsolidación se lograron comparando los resultados experimentales con el comportamiento de la anisotropía en la rama preconsolidada (laboratorio) y con las condiciones de campo. En los perfiles que corresponden a los comportamientos normalmente consolidado, descarga-recarga y promedio se observa que las predicciones arrojan una tendencia prácticamente lineal que no corresponde a las mediciones experimentales.

Finalmente, en la Figura 56, donde se emplearon los OCR se tiene un buen resultado solamente para las condiciones de campo, observándose en los otros comportamientos una tendencia lineal cuyo valor de anisotropía es muy cercano a 1 y que no corresponde a los registros experimentales.

En relación con el ángulo de incidencia (Anexo 4) se observa de manera general que el cociente o grado de anisotropía es más alto en la dirección a  $0^\circ$  y va disminuyendo progresivamente conforme se alcanza los  $78^\circ$ . A  $90^\circ$  el cociente de anisotropía es 1 ( $V_{sv}/V_{sv}$ ). A continuación se analizan los resultados calculados a partir de  $I_L$ ,  $\sigma'_p$  y OCR:

En relación con el índice de liquidez (Tabla 13):

- Las ecuaciones que predicen el comportamiento general (o comportamiento promedio de la prueba de consolidación) proveen resultados que se apegan a los datos experimentales registrados en todas las direcciones ( $78^\circ$ ,  $65^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $38^\circ$  y  $0^\circ$ ).
- En la rama preconsolidada no se observa una tendencia clara excepto en la dirección de  $78^\circ$  en donde es lineal y cercana a 1.

- Las ecuaciones para la descarga-recarga tampoco generan un comportamiento definido y su dispersión es muy alta en relación con los resultados experimentales.
- El comportamiento normalmente consolidado es muy similar al comportamiento general, en donde las ecuaciones que calculan la anisotropía generan tendencias claras y coherentes con los resultados experimentales en todas las direcciones.
- Las ecuaciones determinadas para las condiciones de campo tampoco proveen una tendencia clara en las diferentes direcciones y tienen una dispersión muy alta en relación con los resultados experimentales.

En relación con el esfuerzo de preconsolidación (Tabla 14):

- Las ecuaciones que se definieron para caracterizar el comportamiento promedio del cociente de anisotropía en función del esfuerzo de preconsolidación producen valores muy cercanos a la unidad en todas las direcciones, cuya dispersión con los resultados experimentales es baja, a excepción de la dirección a  $0^\circ$  ( $V_{SH}/V_{SV}$ ).
- En la rama preconsolidada se tiene una buena correlación entre los valores calculados y los medidos experimentalmente en todas las direcciones.
- Durante la descarga-recarga, los valores experimentales son cercanos a 1 en la dirección de  $78^\circ$ , los cuales tienen buena correspondencia con los valores calculados. Sin embargo, la dispersión aumenta progresivamente con la dirección cuando esta avanza hacia  $0^\circ$ .
- En la rama normalmente consolidada, las ecuaciones proveen valores cercanos a 1, los cuales corresponden en cierta medida a los resultados experimentales registrados entre  $78^\circ$  y  $38^\circ$ , mostrando una dispersión más alta en la dirección a  $0^\circ$ .
- Las ecuaciones generadas para caracterizar el comportamiento de la anisotropía a partir de las condiciones de campo produjeron valores de anisotropía que corresponden en gran medida a los resultados experimentales en todas las direcciones.

En relación con el grado de preconsolidación (Tabla 15)

- Se observó que las ecuaciones producen valores cercanos a 1 en los comportamientos promedio, preconsolidado y descarga-recarga, que no corresponden a las mediciones experimentales en todas las direcciones, siendo los de mayor dispersión los resultados a 0°.
- Las ecuaciones obtenidas para el comportamiento de campo generaron resultados de anisotropía que presentan una mejor coincidencia con los resultados experimentales.

---

---

## CONCLUSIONES

Las propiedades estáticas y dinámicas del suelo lacustre del ex Lago de Texcoco han sido objeto de estudio y discusión durante varias décadas, no así el grado de anisotropía utilizando la combinación de un odómetro de gran tamaño y la técnica de elementos bender para medir la velocidad de propagación de la onda de corte en diferentes direcciones. En este trabajo se realizaron ensayos de consolidación de anillo fijo utilizando un tubo de pared delgada como anillo de consolidación. En estas condiciones se observó que el tercio superior de la muestra se rigidizó aproximadamente un 23% más que el tercio inferior de la probeta, lo que se comprobó modelando el ensayo de consolidación en un programa de elementos finitos y experimentalmente midiendo la relación de vacíos de un ensayo.

Esta variación en la rigidización se evidenció en la variación de la velocidad cortante medida desde el transductor lateral hacia los transductores superiores, la cual fue aproximadamente también del 23%. Para normalizar el comportamiento de la velocidad registrada en estas direcciones con respecto a la velocidad en la dirección vertical, se aplicó un factor de 0.77 a las velocidades registradas desde el transductor lateral hacia los transductores superiores. Con esta corrección se logró que los cocientes de anisotropía se apeguen a la trayectoria elíptica esperada. De esta manera se concluye que la velocidad de onda de corte proporciona una medida de la rigidez del material.

Los ensayos de columna resonante permitieron validar los resultados de  $V_S$  obtenidos con elementos bender en las direcciones horizontal, vertical y a  $60^\circ$  y mostraron también que el cociente de anisotropía obtenido con este ensayo se apega también a una trayectoria elíptica. La diferencia en el proceso de consolidación ocasionó que a pesar de que los resultados de  $V_S$  son congruentes con los dos métodos de medición, los cocientes de anisotropía obtenidos en la columna resonante sean diferentes a los de BE.

Los cocientes de anisotropía calculados a través de la relación  $V_{SH}/V_{SV}$  permitieron determinar que en los ensayos P1-D y P2-D la rigidez horizontal es mayor que la vertical ( $V_{SH}/V_{SV} > 1$ ) en las etapas de

carga, descarga y recarga y decrece conforme la dirección avanza hacia la vertical. El ensayo P3-D presenta un grado de anisotropía cruzada muy pequeño ( $V_{SH}/V_{SV}$  entre 0.91 y 1.05), es decir la rigidez horizontal es similar a la vertical. Por otro lado, los ensayos P4-D, P5-D y P6-D muestran una rigidez horizontal menor que la vertical, lo que se refleja en los cocientes de anisotropía ( $V_{SH}/V_{SV} < 1$ ) con un valor mínimo de 0.71 y un máximo de 0.93. Este comportamiento está ligado al índice de liquidez inicial y al esfuerzo de preconsolidación como se observó en la representación polar del cociente de anisotropía durante la etapa de carga, en donde las pruebas con mayor rigidez horizontal tienen  $I_L$  más altos y  $\sigma'_p$  más bajos y viceversa. Se encontró una excepción en la prueba P6-D en la cual tanto el  $I_L$  como  $\sigma'_p$  son bajos. Esta excepción podría significar que el grado de anisotropía inicial de este tipo de suelo depende principalmente del  $I_L$ .

Durante el ensayo de consolidación se pudo observar que la variación del estado de esfuerzos no ocasionó un cambio en el cociente de anisotropía, pero sí varió con la dirección de medición de las  $V_s$  debido a que la estructura del material es la que gobierna a la anisotropía. Esta situación fue más evidente cuando se relacionó la anisotropía con el índice de liquidez. Se observó a este respecto, que el comportamiento general durante la prueba está dominado por el comportamiento normalmente consolidado el cual también varía respecto a la dirección.

La variación de esfuerzos durante el ensayo de consolidación permitió también variar el esfuerzo de preconsolidación de la probeta, con lo cual fue posible descartar su influencia en la variación del grado de anisotropía, reflejado en la pendiente muy cercana a cero en las gráficas anisotropía vs.  $\sigma'_p$ . Similar situación se encontró al relacionar la anisotropía con el OCR. En estas dos relaciones se puede concluir que el parámetro (b) del ajuste lineal corresponde al cociente de anisotropía inicial de la muestra en cada dirección evaluada.

---

Con base en todas las observaciones realizadas durante el proceso de consolidación se puede inferir que el grado de anisotropía del suelo lacustre del ex Lago de Texcoco oscila entre 0.9 y 1.13 y su variación depende principalmente de la variación del índice de liquidez.

A partir de las curvas de  $V_S$  vs. esfuerzo efectivo se pudo interpolar el cociente de anisotropía correspondiente al esfuerzo de campo de cada probeta ensayada y graficar dicho cociente en función de sus propiedades iniciales o de campo ( $I_L$ ,  $\sigma'_p$  y OCR). De estas gráficas se concluye que el esfuerzo de preconsolidación y OCR no afectan al grado de anisotropía y que la anisotropía inicial oscila entre 1.2 y 1.05, que es similar a la anisotropía registrada durante la etapa preconsolidada del ensayo de consolidación. Por otra parte, el índice de liquidez sí hace variar al grado de anisotropía y oscila entre 0.53 y 1.82 que es un rango más pequeño que aquel establecido en la rama preconsolidada (0.23 a 2.04)

El análisis de esta información permitió caracterizar el comportamiento del grado de anisotropía a partir de ecuaciones lineales que lo relacionan con los parámetros estudiados y con el ángulo de incidencia (dirección). Estas ecuaciones fueron aplicadas a una base de propiedades índice de muestras de similar procedencia para calcular el grado de anisotropía y graficarlo en función de la profundidad de extracción de las muestras comprendidas en la base. Se encontró que las ecuaciones determinadas a partir del  $I_L$  en la rama normalmente consolidada, que es similar al comportamiento promedio de la prueba, proporcionan resultados que se ajustan a los experimentalmente determinados en esta investigación. Comparar las ecuaciones basadas en  $\sigma'_p$  obtenidas en la rama preconsolidada con las del comportamiento inferido para campo también produjeron buenos resultados. Las ecuaciones generadas a partir del OCR durante el ensayo de consolidación no produjeron buenos resultados, pero sí funcionó la ecuación obtenida para condiciones de campo. Estas observaciones se presentaron invariablemente en los diferentes ángulos de incidencia.

Para fines prácticos, el suelo es un material que responde al modelo de isotropía transversa o anisotropía cruzada, donde el plano horizontal es isótropo y las propiedades elásticas varían en el plano vertical. Para fines de cálculo, se muestra a continuación un listado de las ecuaciones que permiten al ingeniero geotecnista, de una manera muy precisa estimar el grado de anisotropía en el módulo de rigidez al cortante a partir de la determinación de parámetros simples y muy conocidos ( $I_L$ ,  $\sigma'_p$  u OCR):

| Parámetro  | Comportamiento          | Ecuación                                       |
|--|-------------------------|--|
| Índice de liquidez, $I_L$                          | Normalmente consolidado | $V_{SH}/V_{SV} = 0.5952 (I_L) + 0.4105$        |
|  | Promedio                | $V_{SH}/V_{SV} = 0.5192 (I_L) + 0.4730$        |
| Esfuerzo de preconsolidación, $\sigma'_p$<br>(kPa) | Preconsolidado          | $V_{SH}/V_{SV} = -0.0086 (\sigma'_p) + 1.6359$ |
|  | Campo                   | $V_{SH}/V_{SV} = -0.0066(\sigma'_p) + 1.4555$  |
| OCR  | Campo                   | $V_{SH}/V_{SV} = -0.1172(OCR) + 1.1416$        |

---

---

**REFERENCIAS**

- Ahmadi, S. & Eskandari, M., 2014. Vibration analysis of a rigid circular disk embedded in a transversely isotropic solid.. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, p. 04014048.
- Arroyo, M., 2007. Wavelet analysis of pulse tests in soil samples. *Italian Geotechnical Journal*, 30(2), pp. 26-38.
- Arroyo, M., Muir Wood, D. & Greening, P., 2003. Source near-field effects and pulse tests in soil samples.. *Géotechnique*, 53(3), pp. 337-345.
- Arulnathan, R., Boulanger, R. & Riemer, M., 1998. Analysis of bender element tests. *Geotechnical Testing Journal*, 21(2), pp. 120-131.
- Atkinson, J., 2000. Non-linear soil stiffness in routine design.. *Geotechnique*, 50(1), pp. 69-81.
- Auvinet, G., Méndez, E. & Juarez, M., 2016. *The subsoil of Mexico City*. 3 ed. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Bishop, A. & Hight, D., 1977. The value of Poisson's ratio in saturated soils and rocks stressed under undrained conditions.. *Geotechnique*, 27(3), pp. 369-384.
- Bonal, J., Donohue, S. & McNally, C., 2012. Wavelet analysis of bender element signals. *Geotechnique*, 62(3), pp. 243-252.
- Brandenberg, S., Kutter, B. & Wilson, D., 2008. Fast stacking and phase corrections of shear wave signals in a noisy environment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(8), pp. 1154-1165.
- Brignoli, E., Gotti, M. & Stokoe, K., 1996. Measurement of shear waves in laboratory specimens by means of piezoelectric transducers. *Geotechnical Testing Journal*, 19(4), pp. 384-397.
- Brocanelli, D. & Rinaldi, V., 1998. Measurement of low-strain material damping and wave velocity with bender elements in the frequency domain. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(6), pp. 1032-1040.
- Casagrande, A., 1936. *The determination of the preconsolidation load and its practical significance*.. s.l., s.n., pp. 60-64.
- Casagrande, A. & Carrillo, N., 1944. Shear failure of anisotropic materials. *Harvard Graduate School of Engineering*.
- Castro, J. & Sivasithamparam, N., 2017. A constitutive model for soft clays incorporating elastic and plastic cross-anisotropy.. *Materials*, Volumen 10, pp. 1-16.
- Chamorro, C., 2016. *Medición de los valores de onda cortante (Vs) en suelos provenientes del ex-lago de Texcoco*. México, México: Tesis de Maestría, UNAM.

- Chamorro, C. & Ovando, E., 2018. *Análisis de señales: Aplicación de la correlación cruzada discreta para la determinación del primer arribo de la onda cortante*. León, Guanajuato, México, s.n.
- Chamorro, C. & Ovando, E., 2019. *Uso de cristales piezoeléctricos (de flexión) en la medición de la velocidad de ondas de corte y compresión*. Cancún, México, Proceedings of the XVI PCSMGE, 89-96.
- Cividini, A., Gatti, G. & Gioda, G., 1979. *Anisotropic consolidation of initially isotropic soil mechanical behavior of anisotropic solids*. s.l., s.n., pp. 581-595.
- Clayton, C. R. I., 2011. Stiffness at small strain: research and practice. *Geotechnique*, 61(1), pp. 5-37.
- Díaz Pardavé, M., 2014. *Medición de las ondas sísmicas en pruebas de consolidación usando cristales piezoeléctricos*. Ciudad de México: Tesis de Maestría, UNAM..
- Dobry, R. & Vucetic, M., 1987. *Dynamic properties and seismic response of soft clay deposit*. Ciudad de México, Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils. SMIG.
- Donohue, S., 2005. *Assessment of sample disturbance in soft clay using shear wave velocity and suction measurements*. Phd Thesis: University College Dublin.
- Dyvik, R. & Madshus, C., 1985. *Lab measurements of Gmax using bender elements*. Detroit, Michigan, ASCE Convention proceedings.
- Dyvik, R. & Olsen, T., 1989. *Gmax measured in oedometer and DSS test using bender elements..* Rio de Janeiro, International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 12, pp. 39-42.
- Eskandari, M., Ahmadi, S. & Khazaeli, S., 2014. Dynamic analysis of a rigid circular foundation on a transversely isotropic half-space under a buried inclined time-harmonic load. *Soils Dynamics and Earthquake Engineering*, Issue 63, pp. 184-192.
- Fernández-Lavín, A., 2020. *Interpretación de señales: uso de transformada wavelet para obtener parámetros dinámicos en suelos..* Ciudad de México: Tesis doctoral, IIUNAM, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Fioravante, V., 2000. Anisotropy of small strain stiffness of Ticino and Kenya sands from seismic wave propagation measured in triaxial testing. *Soils and Foundations*, 40(4), pp. 129-142.
- Flores, M., Ovando, E. & Valle, C., 2014. Small-strain dynamic characterization of clayey soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volumen 63, pp. 1-7.
- Flores, O., 1996. *Propiedades dinámicas de jales*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de maestría..
- Flores, O., Flores, M. & Juarez, O., 2014. *Técnica experimental de campo para determinar las velocidades de compresión y de corte*. Puerto Vallarta, México, XXVII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. SMIG.

- Fu, L., 2004. *Application of piezoelectric sensors in soil property determination (Ph.D. thesis)*. Cleveland-Ohio, U.S.A.: Case Western Reserve University.
- Gonzalez, A., Cesari, R. & Vicioli, R., 2009. *Materiales piezoeléctricos y efecto piezoeléctrico*, Mendoza, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional.
- Greening, P. y otros, 2003. Comparison of shear wave velocity measurements in different materials using time and frequency domain techniques. *Proceedings of the International Symposium, IS-Lyon 03*, pp. 381-386.
- Grolewsky, B. & Zeng, X., 2001. *Measurement of  $G_{max}$  and  $K_0$  of saturated clay using bender elements*. s.l., s.n., pp. 1-8.
- Hardin, B., 1978. *The nature of stress-strain behavior for soils*. California, USA, Proceedings on the Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics. ASCE.
- Hardin, B. O. & Drnevich, V., 1972. Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Div.*, Volumen 98(SM7), pp. 667-692.
- Jamiolkowsky, M., Lancellota, R. & Lo Presti, D., 1995. Remarks on the stiffness at small strains of six Italian clays. En: *Pre-failure Deformation of Geomaterials*. s.l.:Balkema, Rotterdam, pp. 817-836.
- Jamiolkowsky, M., Lo Presti, D. & Pallara, O., 1995. *Role of in situ testing in geotechnical earthquake engineering*. Rolla, Missouri, Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics.
- Jovicic, V., Coop, M. R. & Simic, M., 1996. Objective criteria for determining  $G_{max}$  from bender element tests. *Geotechnique*, 46(2), pp. 357-362.
- Kaliakin, V., 2005. Numerical implementation and integration of bounding surface models for cohesive soils. *Poromechanics*, Volumen 3, pp. 371-376.
- Kawaguchi, T., Mitachi, T. & Shibuya, S., 2001. *Evaluation of shear wave travel time in laboratory bender element test.* Istanbul, Proceedings 15th Int. Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Balkema, pp. 155-158.
- Knutsen, M., 2014. *On determination of  $G_{max}$  by bender element and cross-hole testing*. Master thesis.. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.
- Kramer, S., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Primera ed. New Jersey: Prentice Hall, Inc..
- Lee, J. & Santamarina, C., 2006. Discussion "Measuring shear wave velocity using bender elements" by Leong and Rahardjo. *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, 29(5).
- Lee, J. & Santamarina, J., 2005. Bender elements: Performance and Signal Interpretation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, 1 September, 131(9), pp. 1063-1070.

- Lee, K. M. & Rowe, R. K., 1989. Deformation caused by surface loading and tunnelling: the role of elastic anisotropy. *Geotechnique*, 39(1), pp. 125-140.
- Lekhnitskii, S., 1981. *Theory of elasticity on an anisotropic body*. Segunda ed. Rusia: Mir Publishers.
- Leong, E., Cahyadi, J. & Rahardjo, 2009. Measuring shear and compression wave velocities of soil using bender-extender elements. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(2009), pp. 792-812.
- Lings, M. & Greening, P., 2001. A novel bender/extender element for soil testing. *Geotechnique*, 51(8), pp. 713-717.
- Masin, D., 2012.a. Clay hypoplasticity with explicitly defined asymptotic states. *Acta Geotechnica*, 8(5), pp. 481-496.
- Masin, D., 2012.b. Hypoplastic Cam-clay model. *Geotechnique*, 62(6), pp. 549-553.
- Masin, D. & Rott, J., 2014. Small strain stiffness anisotropy of natural sedimentary clays: review and a model. *Acta Geotechnica*, Volumen 9, pp. 299-312.
- Mitaritona, G., Amorosi, A. & Cotecchia, F., 2010. Multidirectional bender element measurements in the triaxial cell: equipment set-up and signal interpretation. *Rivista Italiana di Geotecnica*, Issue 1, pp. 50-69.
- Mitaritonna, G., Amorosi, A. & Cotecchia, F., 2014. Experimental investigation of the evolution of elastic stiffness anisotropy in a clayey soil. *Geotechnique*, 64(6), pp. 463-475.
- Moshin, A., Donohue, S. & Airey, D., 2004. Development of a simple, economical and robust method of estimating Gmax using bender elements. *Proceedings of the 9th Australia New Zeland Conference on Geomechanics*, Volumen 2, pp. 696-702.
- Nova, R. & Sacchi, G., 1979. *A generalized failure condition for orthotropic solids*. s.l., s.n., pp. 612-641.
- Nye, J., 1985. *Physical properties of crystals. Their representatios by tensors and matrices*. Primera ed. New York: Oxford University Press.
- Ovando, E., Hernández, Z., Flores, O. & Fernández, A., 2019. Cyclic behaviour and dynamic properties of Texcoco Clays near Mexico City. *Geotechnical Engineering journal of the SEAGS & AGSSEA*, 50(4).
- Ovando-Shelley, E., 2011. *Some geotechnical properties to characterize Mexico City clay*. Paper 889, Canadian Geotechnical Society.
- Patel, A., Singh, D. & Singh, K., 2010. Performance analysis of piezo-ceramic elements in soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, Issue 28, pp. 681-694.

- Pennington, D., 1999. *The anisotropic small strain stiffness of Cambridge Gault clay*. Bristol University: PhD Thesis.
- Pennington, D. S., Nash, D. F. T. & Lings, M., 2001. Horizontally mounted bender elements for measuring anisotropic shear moduli in triaxial clay specimens. *Geotechnical testing journal, GTJODJ*, 24(2), pp. 133-144.
- Piezo Systems, Inc., 2008. *Introduction to piezo transducers*. s.l.:Catalog #7C.
- Prasad, L. & Kuwano, R., 2013. Disk shaped piezo-ceramic transducer for P and S wave measurement in a laboratory soil specimen. *Soils and Foundations*, 53(4), pp. 510-524.
- Puzrin, A. M., Burland, J. B. & Standing, J. R., 2012. Simple approach to protecting ground displacements caused by tunnelling in undrained anisotropic elastic soil. *Geotechnique*, 62(4), pp. 341-352.
- Ramírez, M., 2015. *Relación entre el índice de compresión y las propiedades índice en arcillas del Valle de México*. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional.
- Rodríguez, J., 2010. *Modelado del comportamiento de pilotes e inclusiones sometidos a consolidación regional en la zona lacustre de la Ciudad de México*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Romo, M., 1995. *Clay behavior, ground response and soil-structure interaction studies in Mexico City*. Saint Louis Missouri (USA), s.n.
- Sanchez-Salineró, I., Roesset, J. & Stokoe, K. H., 1986. *Analytical studies of body wave propagation and attenuation*, Austin: s.n.
- Sawangsurriya, A., 2012. Wave propagation methods for determining stiffness of geomaterials. En: P. Giovine, ed. *Wave processes in classical and new solids*. s.l.:s.n., pp. 157-200.
- Shirley, D. & Hampton, L., 1978. Shear-wave measurements in laboratory sediments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 63(2), pp. 607-613.
- Simpson, B., Atkinson, J. H. & Jovicic, V., 1996. *The influence of anisotropy on calculations of ground settlements above tunnels*. London, Balkema, pp. 591-594.
- Teachavorasinskun, S. & Lukkanaprasit, P., 2008. Stress induced and inherent anisotropy on elastic stiffness of soft clays. *Soils and Foundations*, 48(1), pp. 127-132.
- Thomsen, L., 1986. Weak elastic anisotropy. *Geophysics*, 51(10), pp. 1954-1966.
- Valle, C., 2006. *Measurements of  $V_p$  and  $V_s$  in dry, unsaturated and saturated sand specimens with piezoelectric transducers*. Austin, Texas: Ph. D. Thesis.

- 
- Viggiani, G. & Atkinson, J., 1995a. Stiffness of fine-grained soil at very small strains.. *Geotechnique*, 45(2), pp. 249-265.
- Viggiani, G. & Atkinson, J. H., 1995b. Interpretation of bender element tests. *Geotechnique*, 45(1), pp. 149-154.
- Wang, Y., Lo, K., Yan, W. & Dong, X., 2007. Measurement biases in the bender element test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(5), pp. 564-574.
- Zeng, X. & Ni, B., 1999. Stress-induced anisotropic  $G_{max}$  of sands and its measurement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 125(9), pp. 741-749.
- Zhu, J. & Bate, B., 2014. *Using shear wave velocity to monitor the curing process of self-consolidating concrete by bender element*, s.l.: Missouri University of Science and Technology.

**ANEXOS**

**Anexo 1. Fabricación de transductores  
piezoeléctricos**

## FABRICACIÓN DE TRANSDUCTORES PIEZOELÉCTRICOS

Los transductores convierten una forma de energía en otra. En el caso de los transductores piezoeléctricos pueden convertir energía eléctrica en movimiento y viceversa. Generalmente están conformados por dos capas de material piezocerámico adheridas fuertemente a una delgada lámina metálica que provee resistencia mecánica y rigidez, pero reduce el movimiento, pero también pueden no tener dicho refuerzo metálico. Aunque se les conoce como transductores de dos capas, en realidad constan de nueve capas que son: cuatro capas de electrodo, dos placas cerámicas, dos capas de adhesivo y una placa metálica. Los transductores de dos capas pueden extenderse, doblarse o torcerse dependiendo de la polarización y la configuración de las capas.

En este trabajo se utilizaron cristales piezoeléctricos de dos capas tipo T215-H4CL-303X provistos por la empresa Piezo Systems, Inc. Las placas cerámicas pueden ser de diferentes tipos y se escoge la que mejor se comporte dependiendo del uso que se le quiere dar. Los tipos de placas cerámicas se muestran en la Tabla A.1

Tabla A. 1 Materiales piezocerámicos disponibles en el mercado

| Material<br>Piezocerámico | Descripción  |
|---------------------------|--|
| A4                        | PSI-5A4E es un piezocerámico de tipo industrial 5A. El delgado electrodo de níquel pulverizado al vacío permite una muy pequeña fuga de corriente y baja permeabilidad magnética. Opera en un amplio rango de temperatura y es relativamente insensible a las variaciones de temperatura.  |
| H4                        | PSI-5H4E es un piezocerámico de tipo industrial 5H. Tiene una alta relación movimiento/voltaje y carga/newton, que es útil cuando el voltaje o la fuerza son limitados. El delgado electrodo de níquel pulverizado al vacío permite una muy pequeña fuga de corriente y baja permeabilidad magnética. Sin embargo, el rango de temperatura en el que opera es limitado y sus propiedades son más sensibles a la temperatura. |
| A3                        | PSI-5A3 es un piezocerámico de tipo industrial 5A. Tiene electrodos de plata totalmente no magnéticos, opera en un amplio rango de temperatura y es relativamente insensible a las variaciones de temperatura.   |

Los cristales que se utilizaron son del tipo H4, pero además son reforzados (CL) lo que permite su uso en aplicaciones que requieren un mejor desempeño. Estos elementos proveen mayor movimiento, mayor fuerza y mayor respuesta. Son polarizados en X para operar con conexión en serie. No tienen refuerzo metálico, por lo que no pueden ser conectados en paralelo. Las dimensiones iniciales del transductor son 31,8 mm x 12,7 mm.

El proceso de fabricación del transductor piezoeléctrico, de manera típica se lo realiza tomando en cuenta la polarización del cristal para determinar si la conexión a realizar será en serie (dos cables), o en paralelo (tres cables).

### 1. Corte

Dependiendo del tamaño inicial del piezocerámico, y del equipo en el que se van a utilizar los transductores, será necesario hacer uno o varios cortes. En la Ilustración 1 se muestran los tamaños de piezocerámicos disponibles.

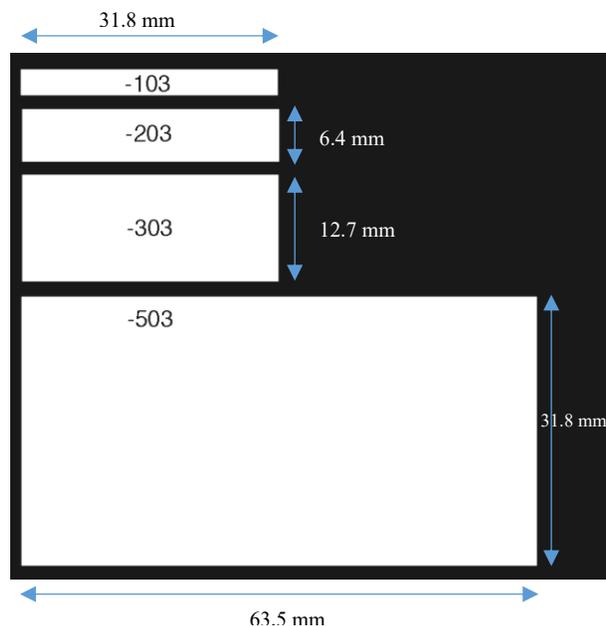


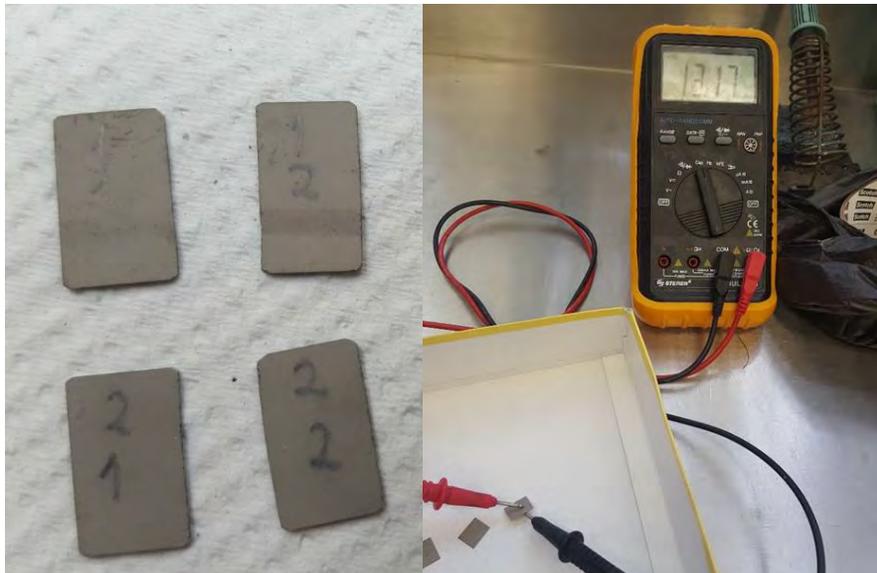
Ilustración 1. Transductores piezoeléctricos. Tamaños disponibles.

Utilizando una herramienta eléctrica y un disco de corte adecuado (muy delgado) se tiene mayor precisión y se evita las fracturas indeseadas de la cerámica. En este trabajo se realizaron tres cortes en la

lámina tipo 303 para obtener cuatro transductores. En la Ilustración 2 a, b, c y d se observa el proceso de corte y las capacitancias iniciales en nano Faradios de los transductores.



a) Transductor piezocerámico 303. b) Herramienta y disco de corte empleados  
Capacitancia: 42.85 nF



c) Tamaño final de los transductores: 7,9 mm x 12.7 mm. d) Capacitancia: 13,17 nF

Ilustración 2. Proceso de corte.

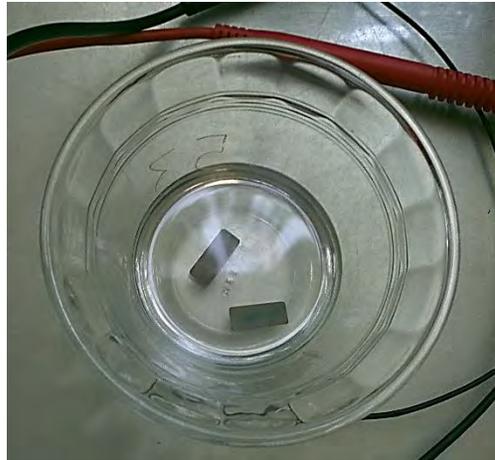


Ilustración 3. Limpieza usando acetona al 100%.

Antes de realizar la conexión eléctrica se deben remover las impurezas, para esto se sumerge los cristales cortados en acetona al 100% (Ilustración 3).

## **2. Conexión eléctrica**

La conexión eléctrica consiste en conectar mediante soldadura a base de plata, un cable coaxial al transductor. Este tipo de cable consta básicamente de un núcleo que es el que conduce el voltaje y que puede ser sólido o trenzado y un aislante o neutro que tiene la función de aterrizar la conexión. El diámetro del cable coaxial dependerá del espacio disponible en la cámara o equipo instrumentado. Para realizar esta conexión alternativamente se puede utilizar una sección de alambre de cobre entre el coaxial y el transductor con el objeto de facilitar el proceso de encapsulado, o se puede soldar directamente el cable sobre el transductor. En los transductores que tienen el refuerzo metálico la conexión puede ser realizada en serie o en paralelo. La conexión en paralelo implica acceder a la capa metálica para conectar el polo positivo en ella, mientras que los negativos se conectan en las placas cerámicas. En este trabajo se usó cable coaxial de 1 mm de diámetro externo y se realizó la conexión en serie (Ilustración 4).

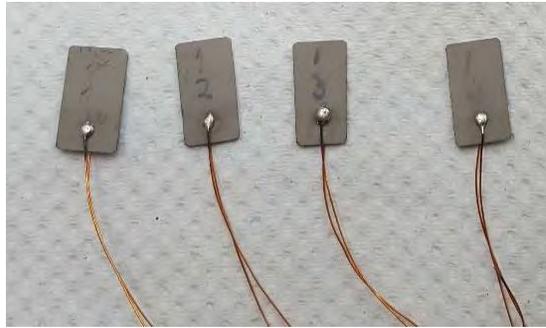
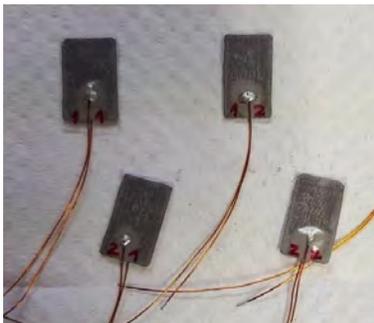


Ilustración 4. Soldadura

El siguiente paso es proveer al cristal piezoeléctrico de un encapsulado electromagnético con el fin de evitar interferencias indeseables (crosstalk). Para este fin se puede utilizar una capa de pintura conductiva, generalmente a base de plata, que se aplica sobre el transductor (Ilustración 5.b) al cual previamente se le ha cubierto su cara positiva (donde se conectará el núcleo del cable coaxial) con mica autoadherente u otro aislante (Ilustración 5.a). El objetivo es que la capa de pintura conductiva tenga contacto con la cara del cristal donde se conectará el neutro del cable coaxial.



- a) Recubrimiento con mica autoaherente.      b) Recubrimiento de pintura conductiva a base de plata

Ilustración 5. Aislamiento electromagnético con pintura conductiva.

Cuando no se dispone de pintura conductiva se puede utilizar cinta adhesiva a base de aluminio (Ilustración 6). Con esta alternativa se omite la aplicación de mica autoadherente. Es importante garantizar el contacto entre la superficie negativa o neutra del transductor y la superficie conductiva de la cinta. Para esto se puede colocar un puente de papel aluminio que conecte estas dos caras.

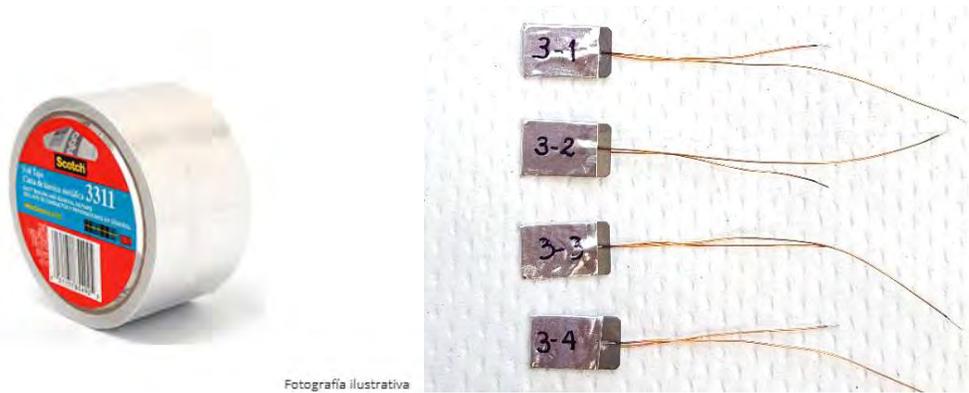


Ilustración 6. Aislamiento electromagnético con aluminio autoadherente.

Finalmente, se debe aplicar un recubrimiento impermeable para evitar cortocircuitos que pueden producirse por la humedad del suelo. Para este fin se cuenta con varias alternativas, entre ellas: poliuretano líquido, resina fotosensible, pintura a base de acetato, etc (Ilustración 7). Antes de seleccionar el tipo de impermeabilizante a aplicar, se debe tener en cuenta que la rigidez del producto una vez que se ha secado, puede limitar el movimiento del cristal y por tanto las señales que se propagan pueden volverse débiles.

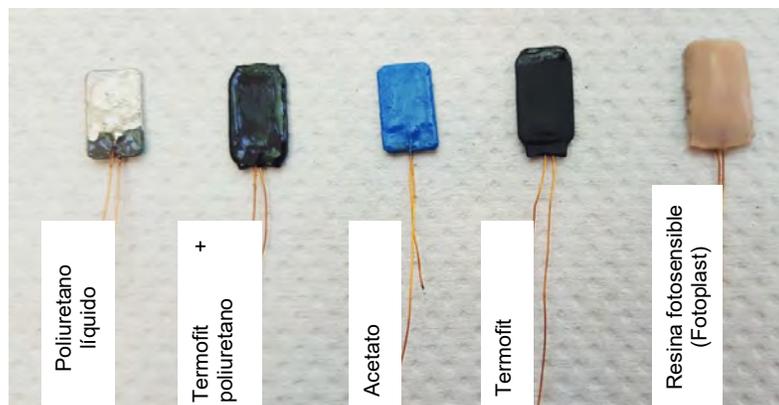


Ilustración 7. Impermeabilización del transductor

En este trabajo se optó por la resina fotosensible, la cual debe ser colocada dentro de un molde y expuesta a una cámara de luz para su secado (Ilustración 8). Se debe procurar que el espesor aplicado sea el mínimo necesario para garantizar la impermeabilización.



Ilustración 8. Aplicación de resina fotosensible.

Una vez que los transductores piezoeléctricos han sido impermeabilizados, y si se utilizó alambre de cobre para la conexión, se procede a conectar con el cable coaxial mediante soldadura. En esta etapa la soldadura a utilizar puede ser o no a base de plata. Como en toda conexión eléctrica, es importante mantener aislado el núcleo del neutro para evitar cortocircuitos, para esto se utiliza termofit recubierto con poliuretano líquido (Ilustración 9).

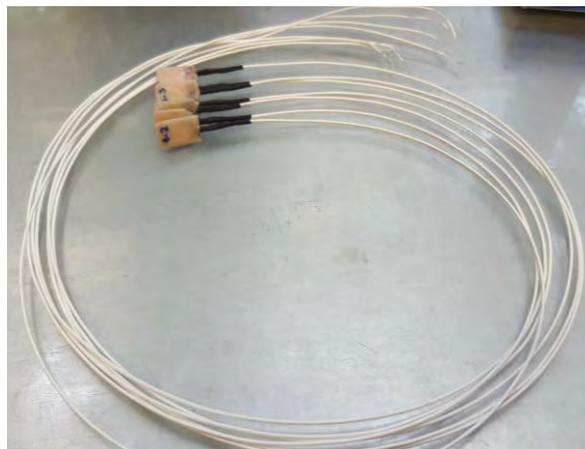


Ilustración 9. Transductores terminados

A continuación, se colocan los transductores en las glándulas o dispositivos que correspondan al equipo que se está instrumentando, garantizando su funcionamiento como una viga empotrada, de otra manera no se producirá el movimiento de flexión. Para fijar el transductor en su base se utiliza una resina

de secado rápido (Devcon 5'), y se procede a medir el tiempo de retardo, colocando un transductor en contacto directo con el otro para propagar señales sinusoidales de pulso (Ilustración 10).

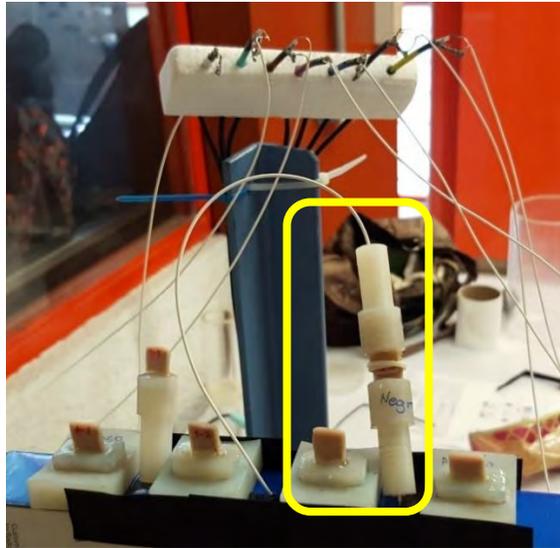
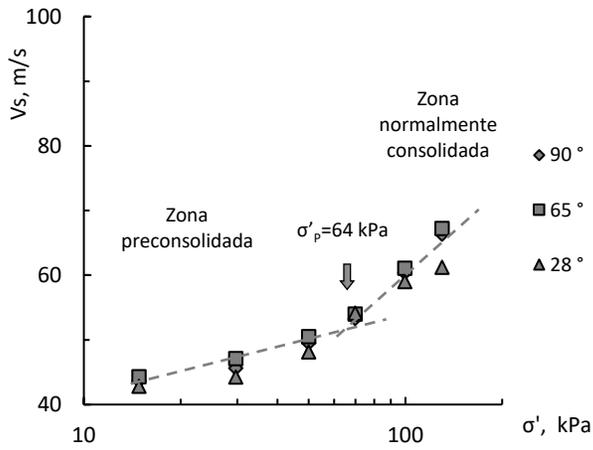
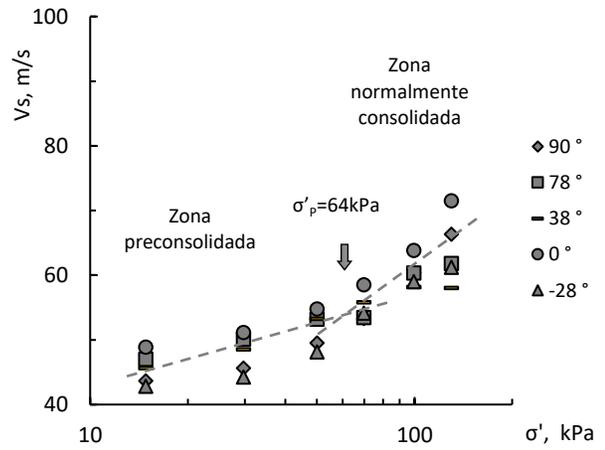


Ilustración 10. Medición del tiempo de retardo.

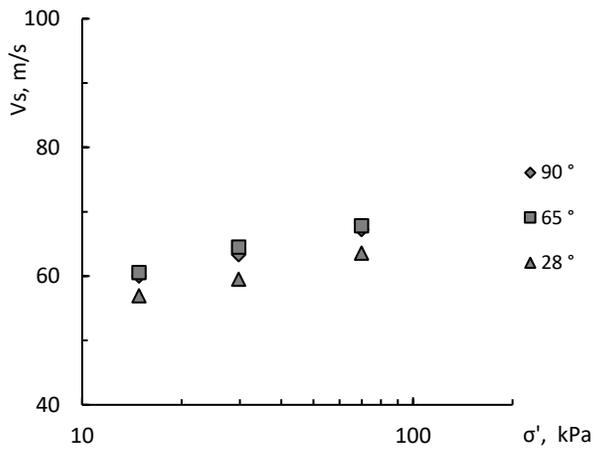
**Anexo 2. Velocidad de onda de corte en función  
del esfuerzo efectivo durante el ensayo de  
consolidación unidimensional**



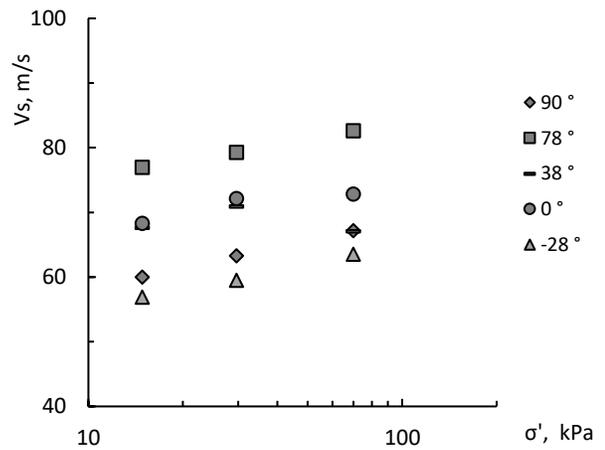
(a) Emisor inferior, carga



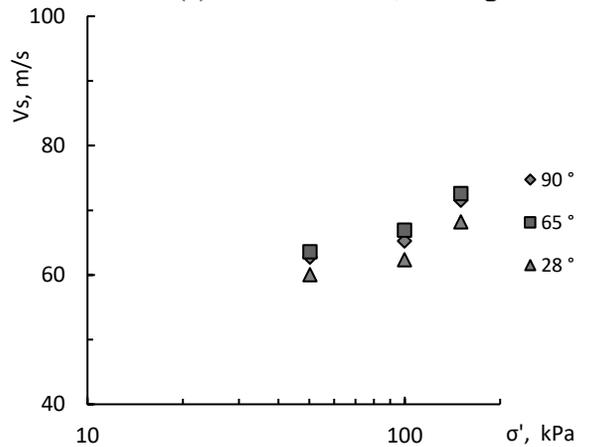
(b) Emisor lateral, carga



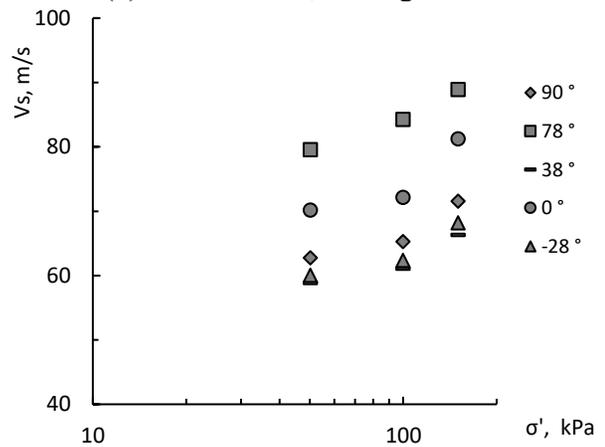
(c) Emisor inferior, descarga



(d) Emisor lateral, descarga

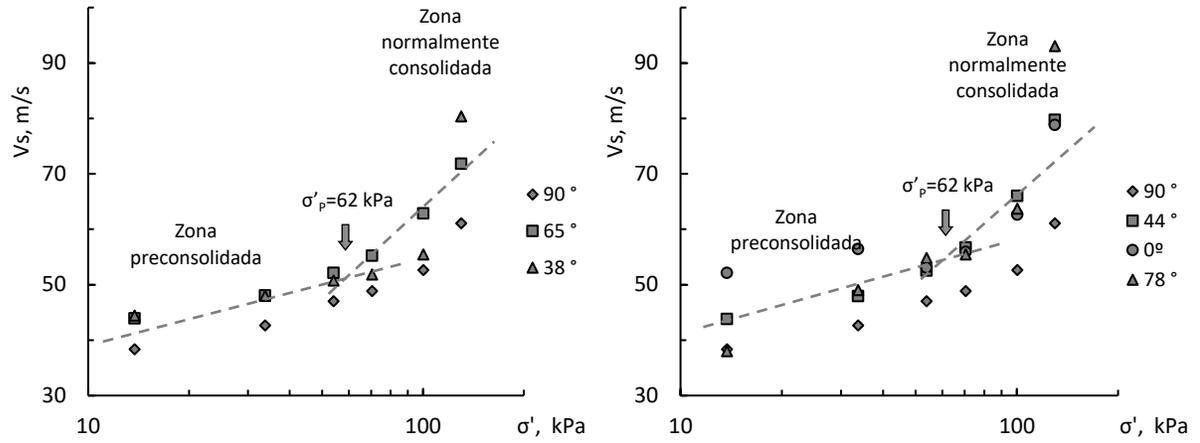


(e) Emisor inferior, recarga



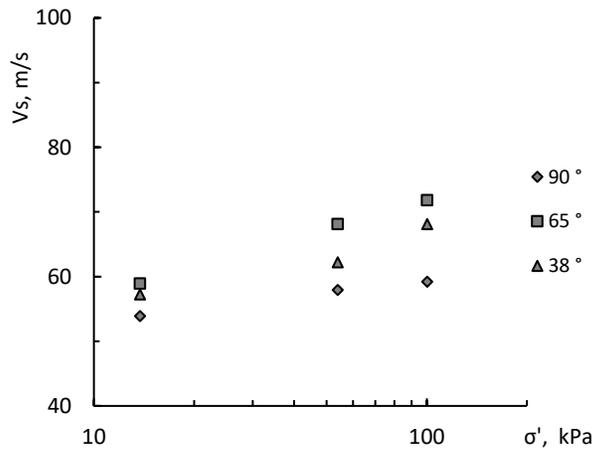
(f) Emisor lateral, recarga

Gráfico 1. Curva  $V_s$ (m/s) -  $\sigma'$ (kPa) prueba P1-D

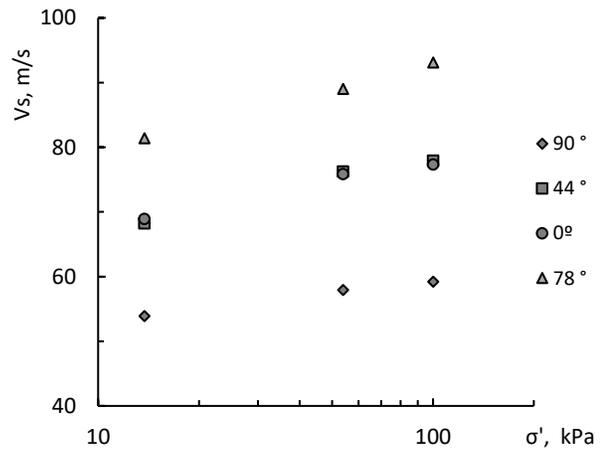


(a) Emisor inferior, carga

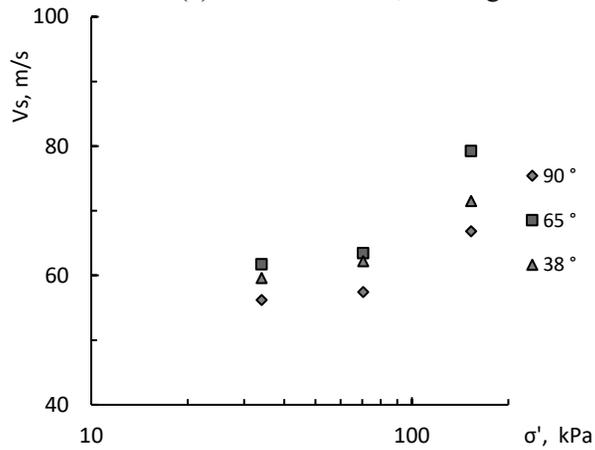
(b) Emisor lateral, carga



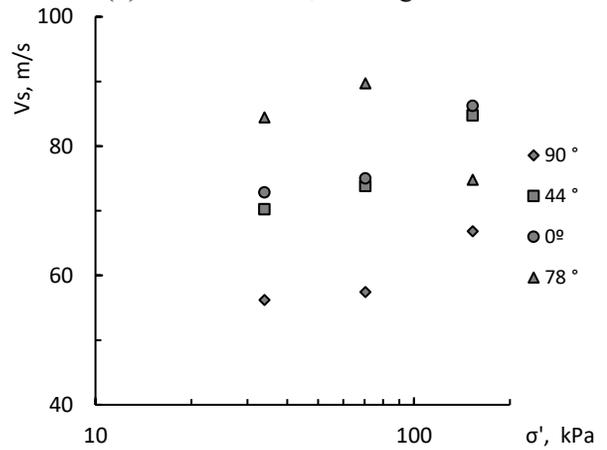
(c) Emisor inferior, descarga



(d) Emisor lateral, descarga

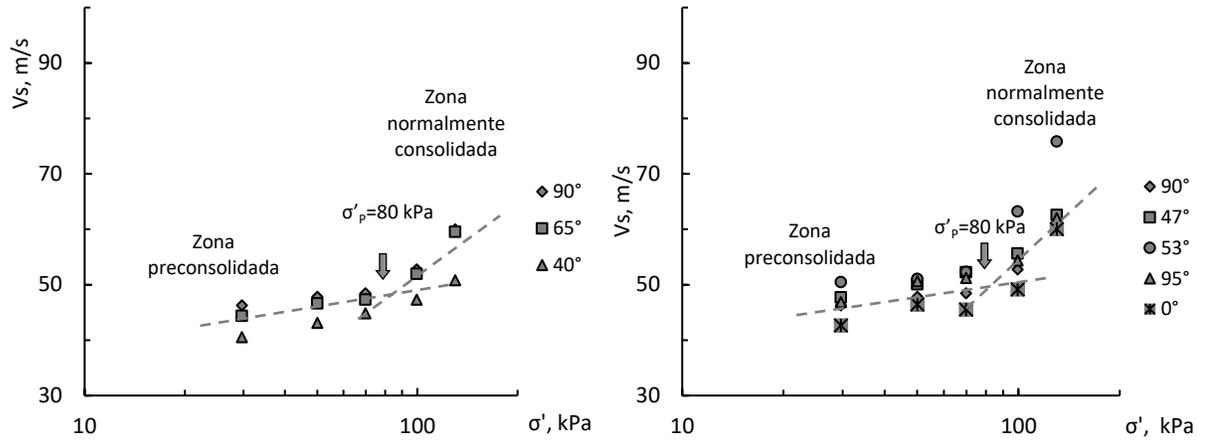


(e) Emisor inferior, recarga



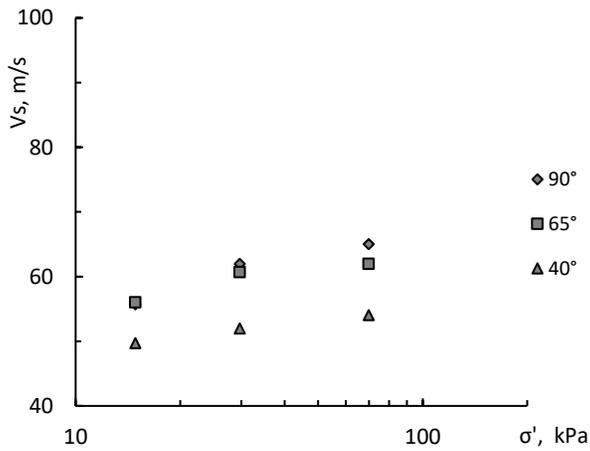
(f) Emisor lateral, recarga

Gráfico 2. Curva  $V_s$ (m/s) -  $\sigma'$ (kPa) prueba P2-D

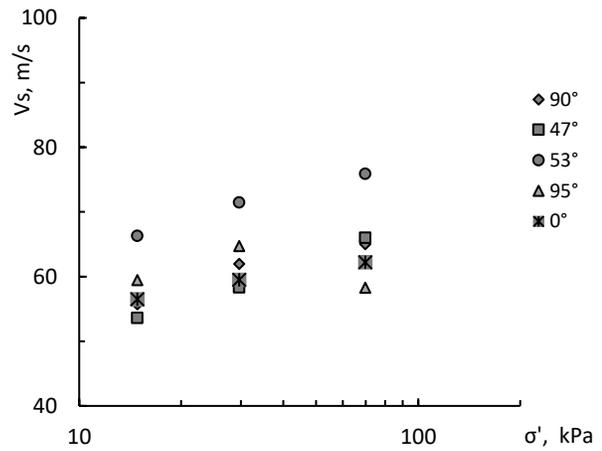


(a) Emisor inferior, carga

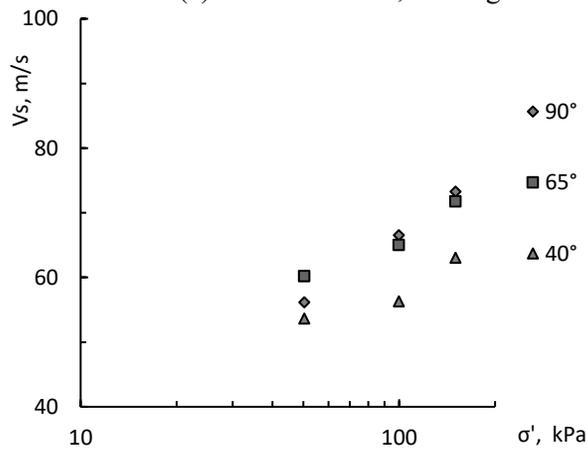
(b) Emisor lateral, carga



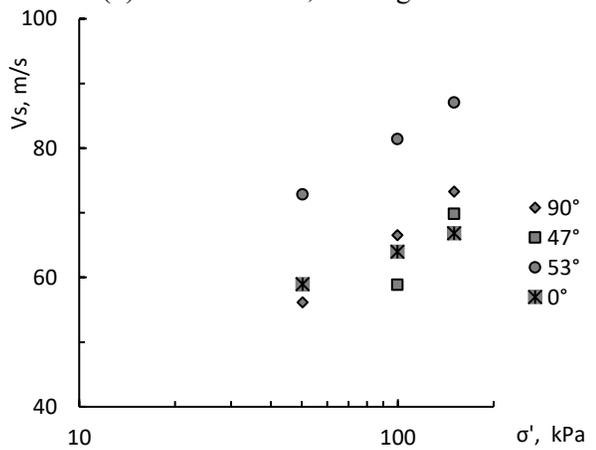
(c) Emisor inferior, descarga



(d) Emisor lateral, descarga

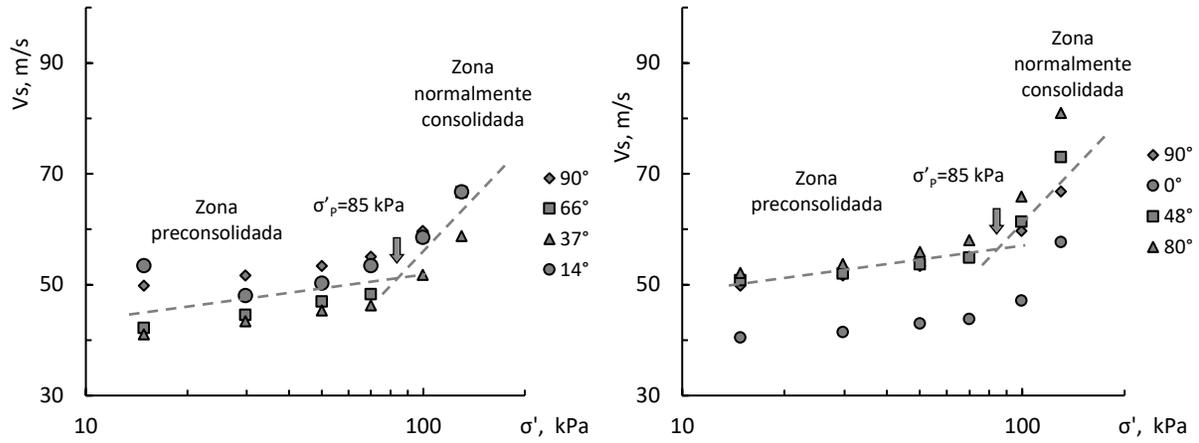


(e) Emisor inferior, recarga



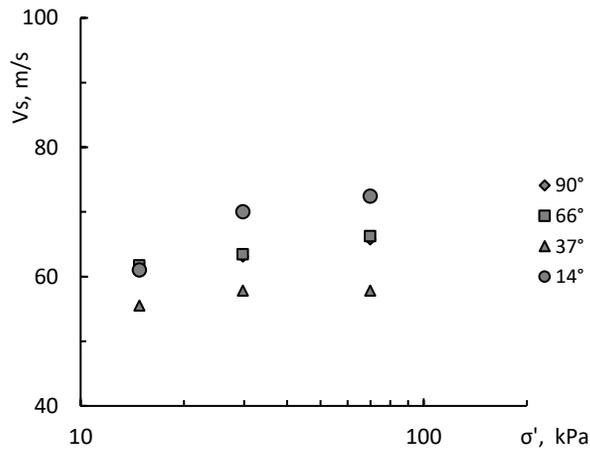
(f) Emisor lateral, recarga

Gráfico 3. Curva  $V_s$ (m/s) -  $\sigma'$ (kPa) prueba P3-D

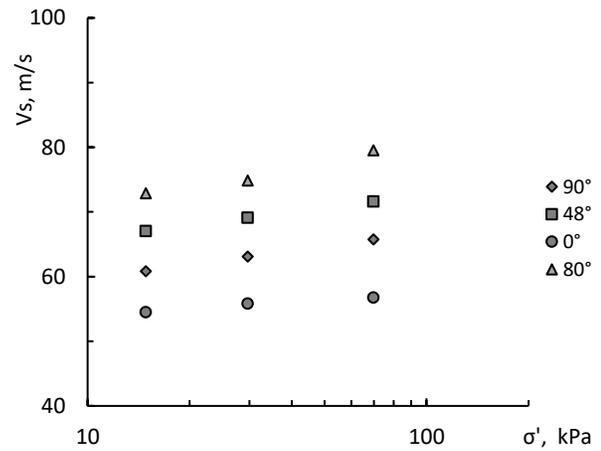


(a) Emisor inferior, carga

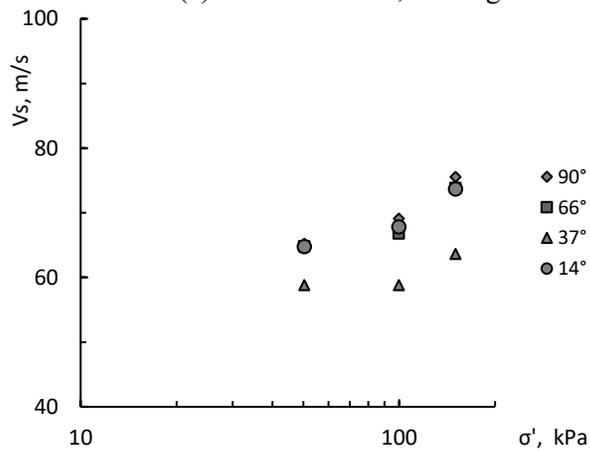
(b) Emisor lateral, carga



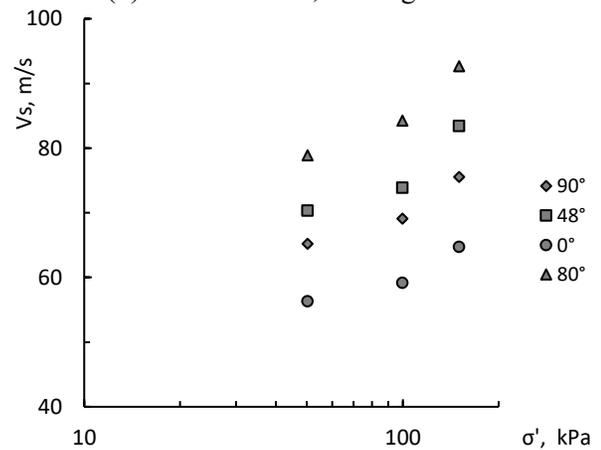
(c) Emisor inferior, descarga



(d) Emisor lateral, descarga

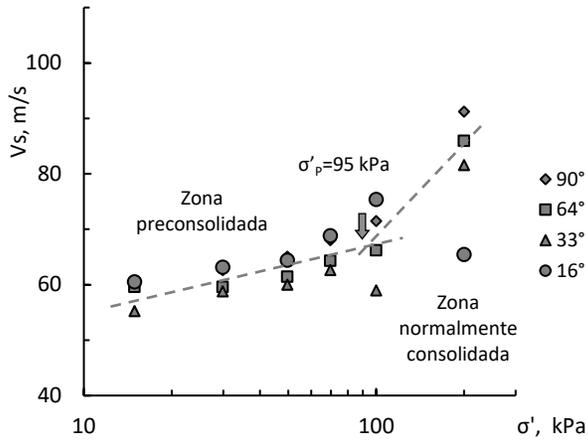


(e) Emisor inferior, recarga

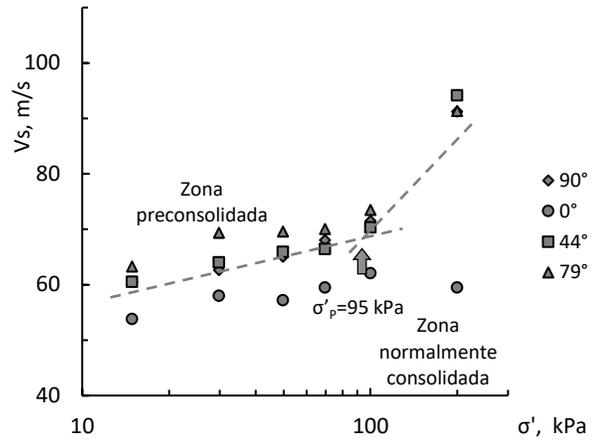


(f) Emisor lateral, recarga

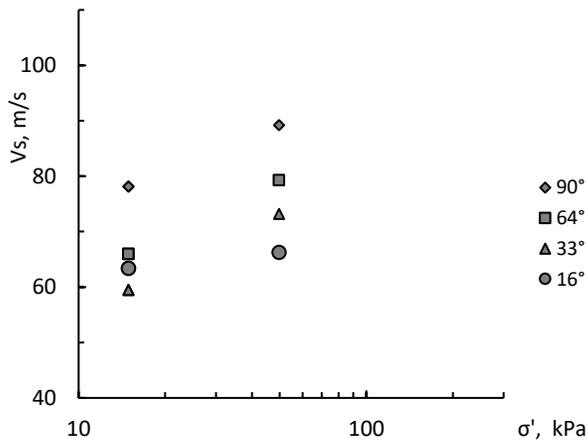
Gráfico 4. Curva  $V_s$ (m/s) -  $\sigma'$ (kPa) prueba P4-D



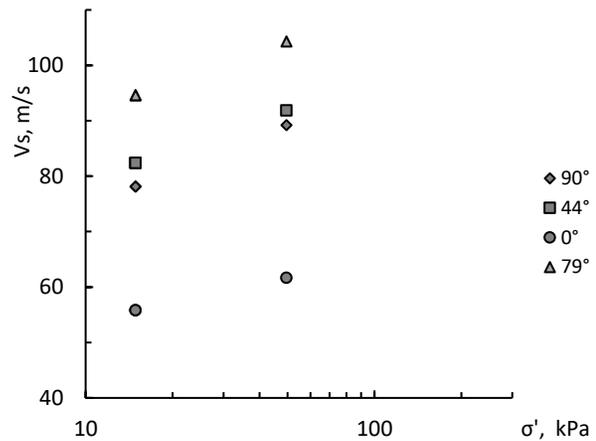
(a) Emisor inferior, carga



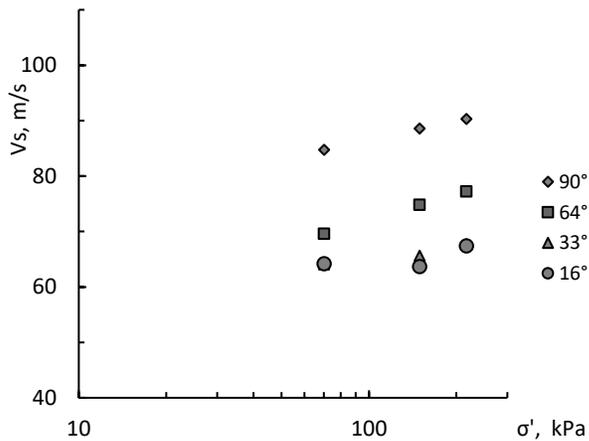
(b) Emisor lateral, carga



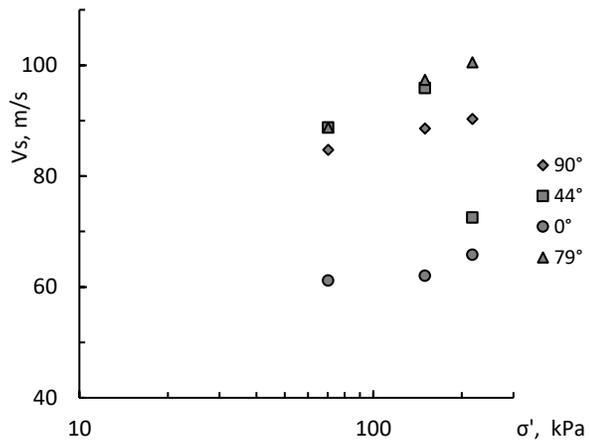
(c) Emisor inferior, descarga



(d) Emisor lateral, descarga

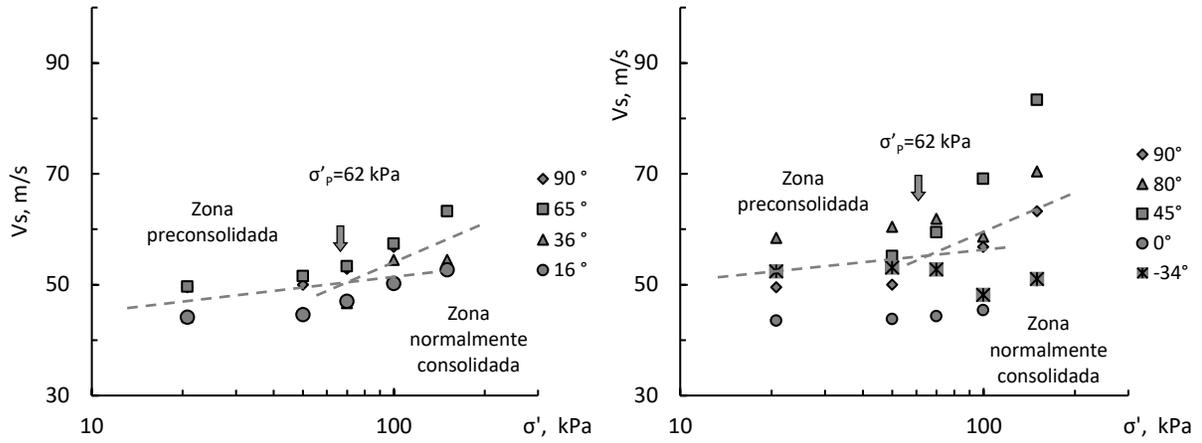


(e) Emisor inferior, recarga



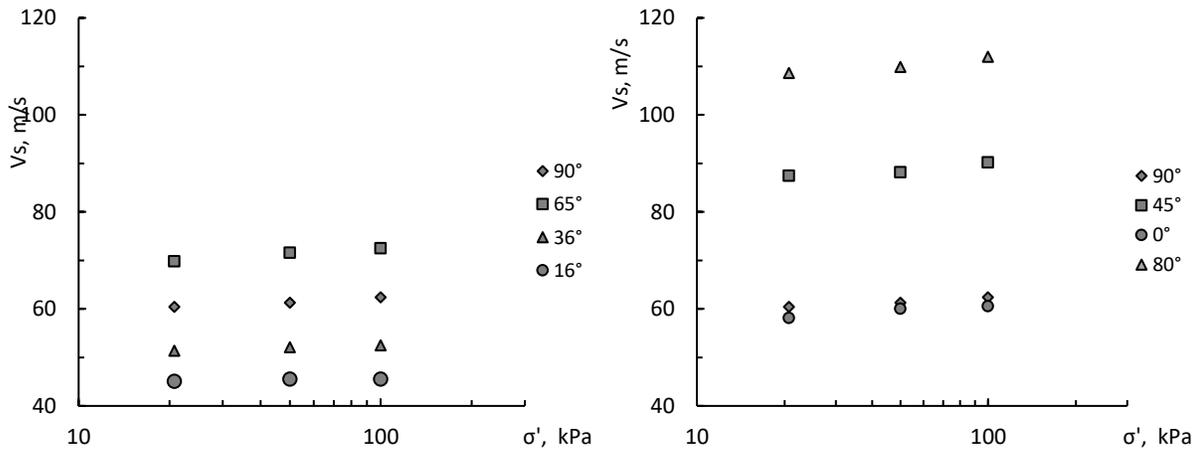
(f) Emisor lateral, recarga

Gráfico 5. Curva  $V_s$ (m/s) -  $\sigma'$ (kPa) prueba P5-D



(a) Emisor inferior, carga

(b) Emisor lateral, carga



(c) Emisor inferior, descarga

(d) Emisor lateral, descarga

Gráfico 6. Curva  $V_s$ (m/s) -  $\sigma'$ (kPa) prueba P6-D

**Anexo 3. Anisotropía vs. Esfuerzo efectivo vs.  
Dirección**

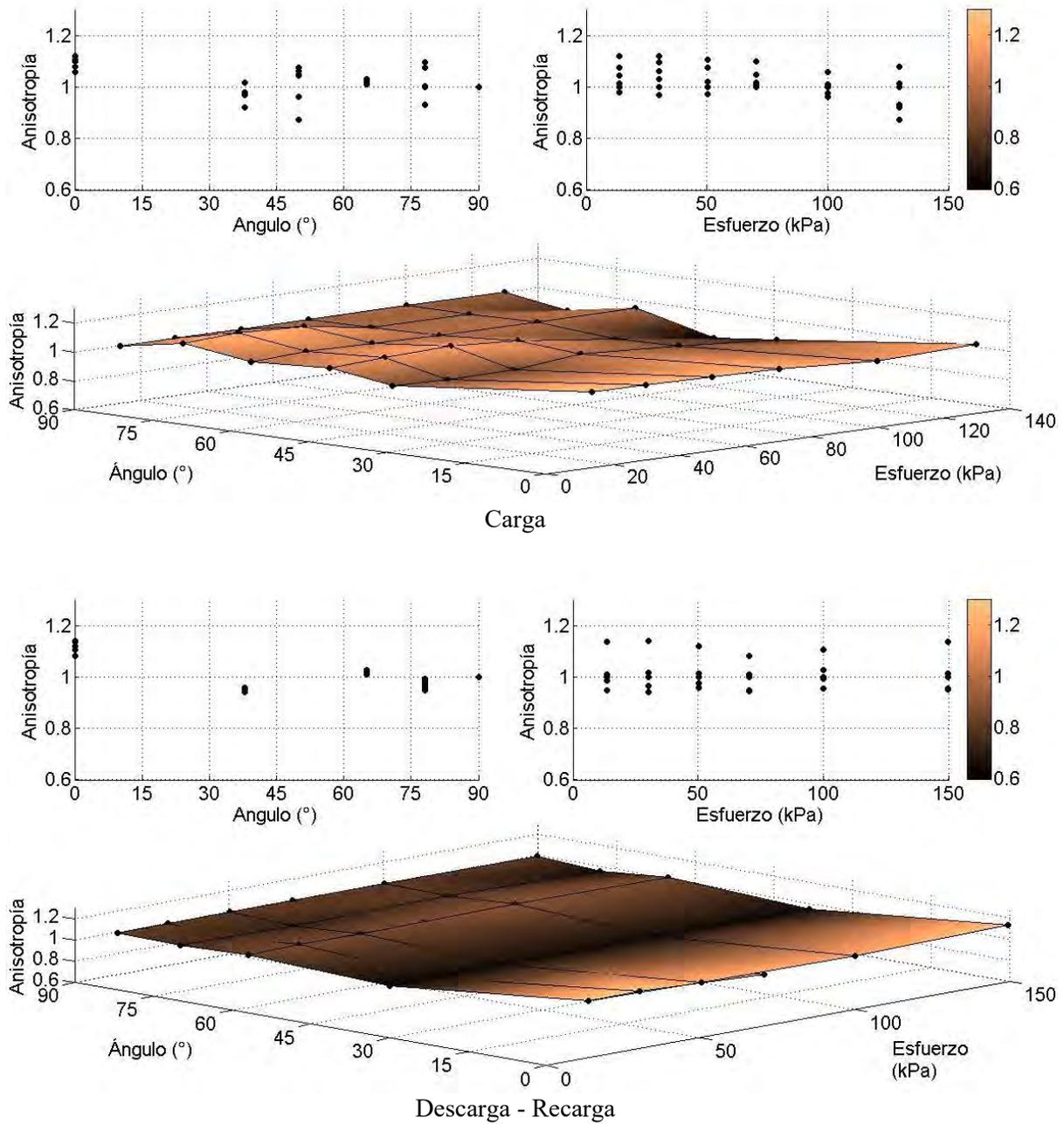


Gráfico 7. Anisotropía-ángulo-esfuerzo efectivo. P1-D. Arriba: carga. Abajo: descarga-recarga

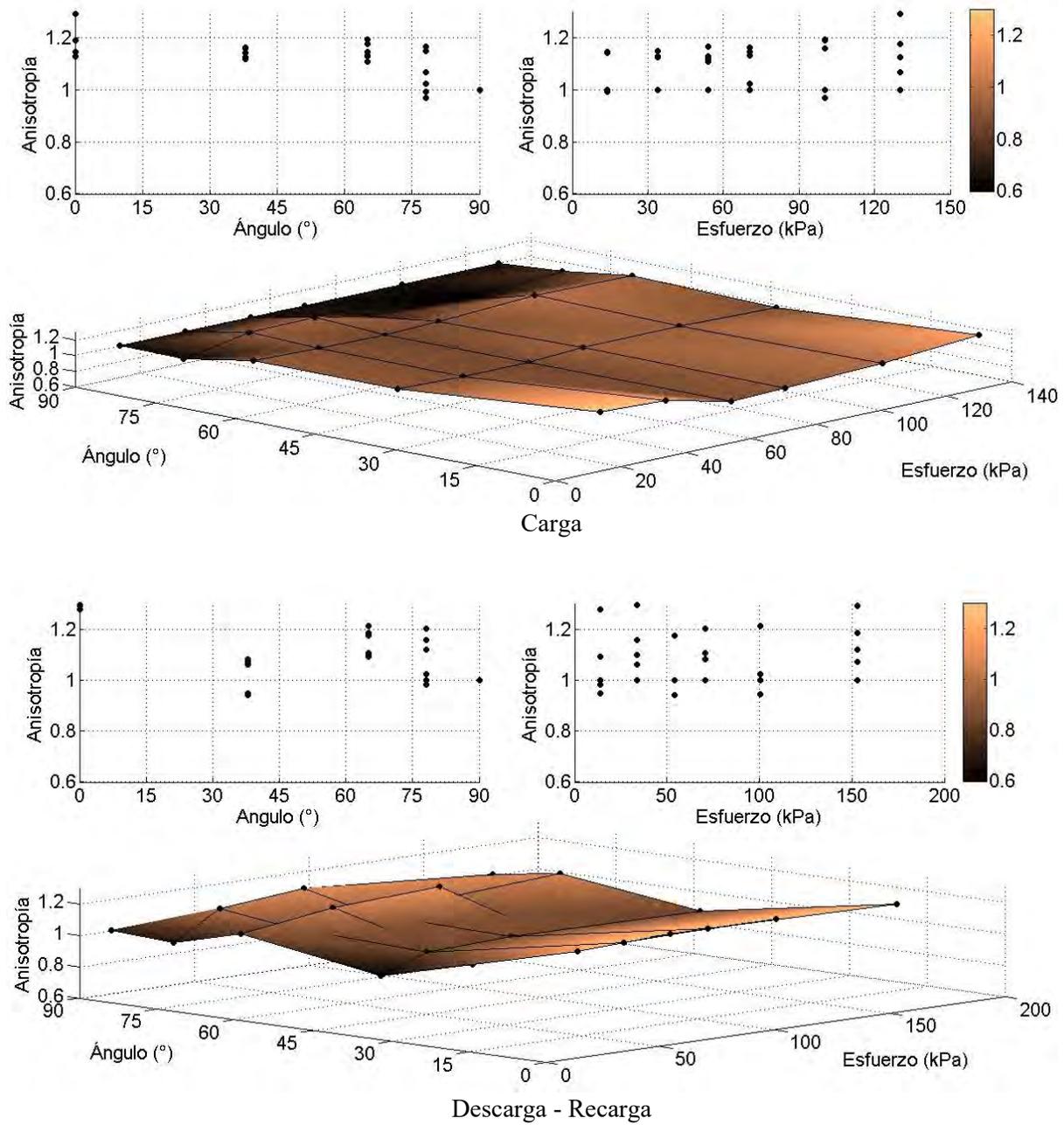


Gráfico 8. Anisotropía-ángulo-esfuerzo efectivo. P2-D. Arriba: carga. Abajo: descarga-recarga

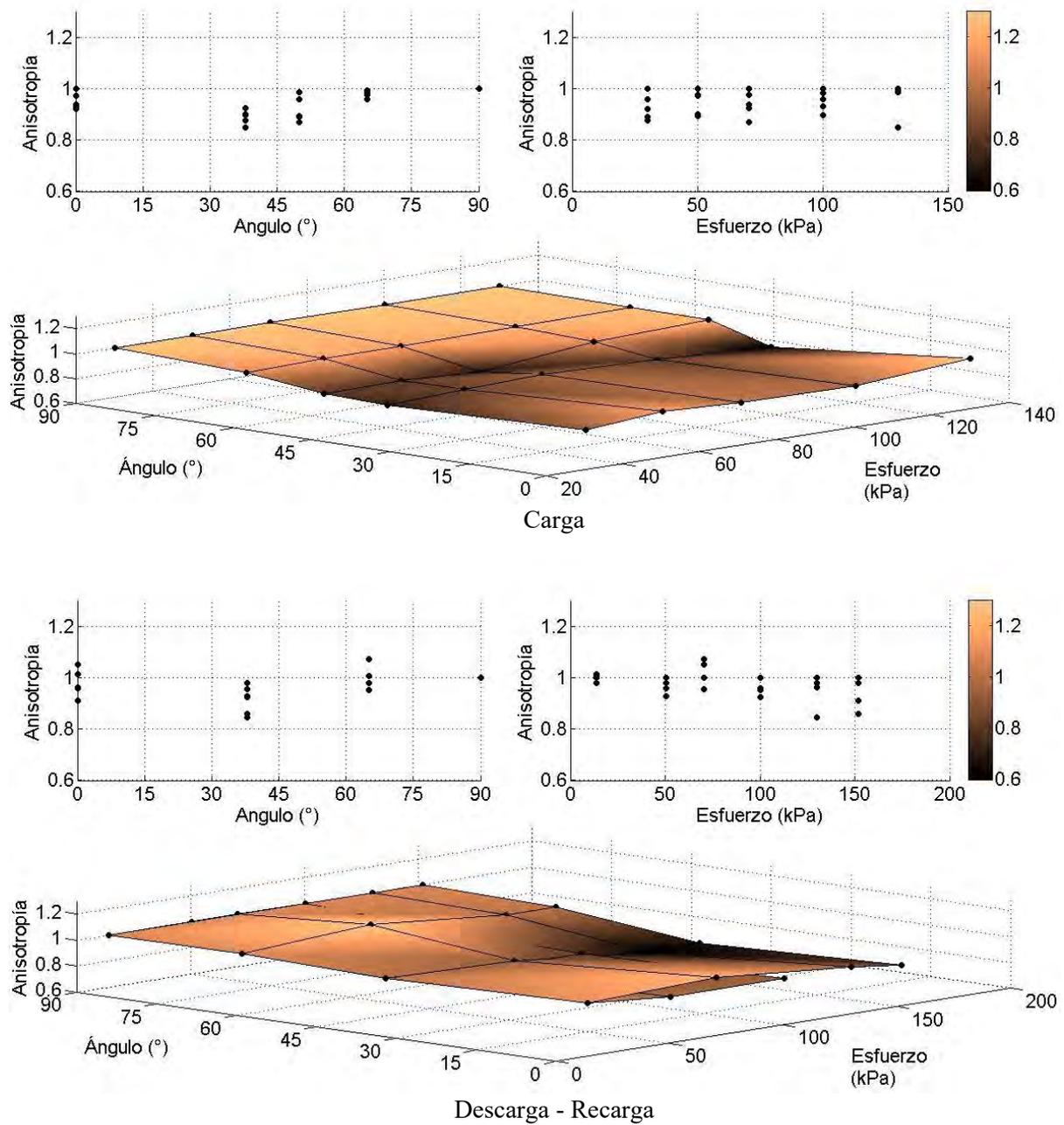


Gráfico 9. Anisotropía-ángulo-esfuerzo efectivo. P3-D. Arriba: carga. Abajo: descarga-recarga

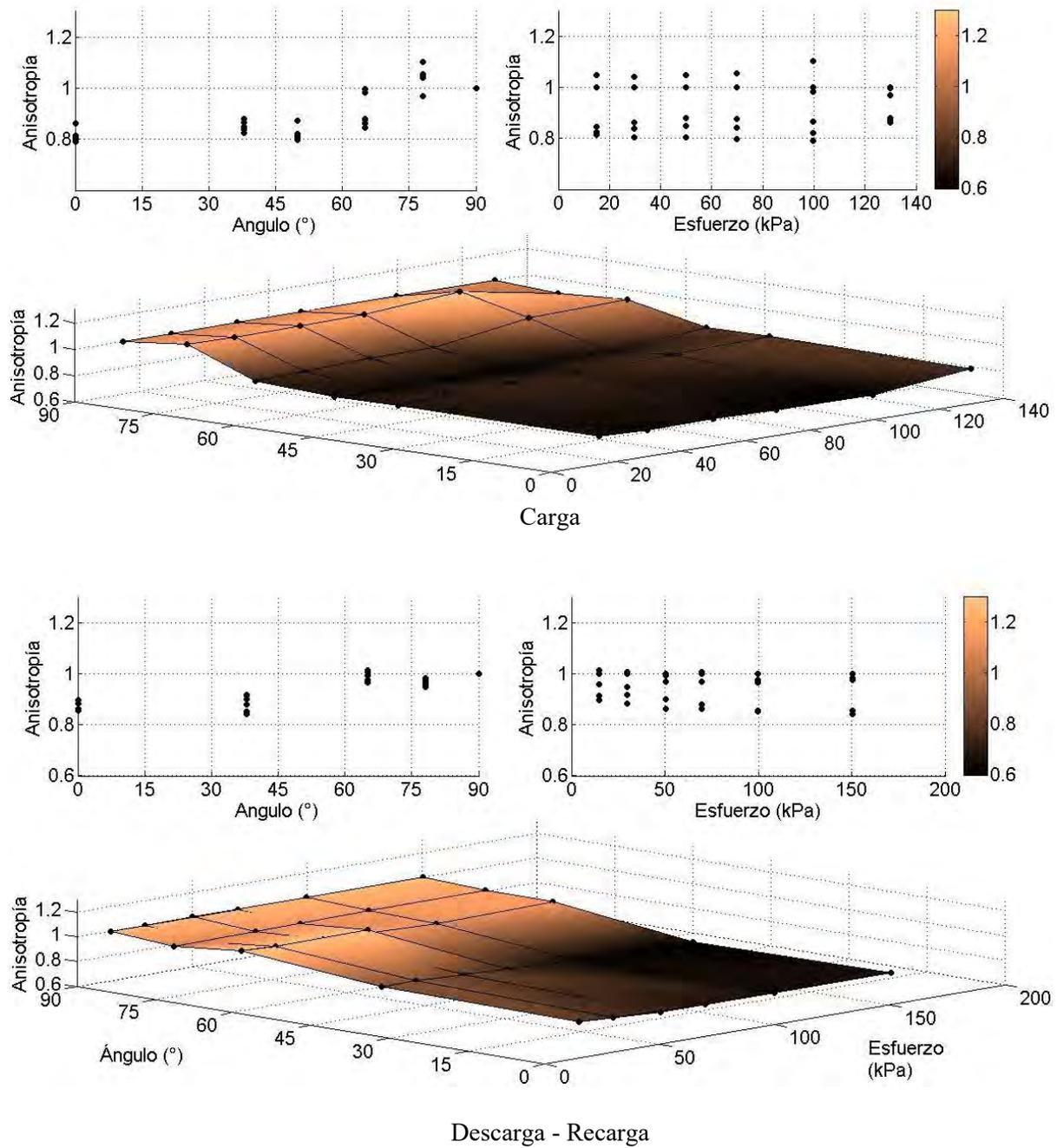


Gráfico 10. Anisotropía-ángulo-esfuerzo efectivo. P4-D. Arriba: carga. Abajo: descarga-recarga

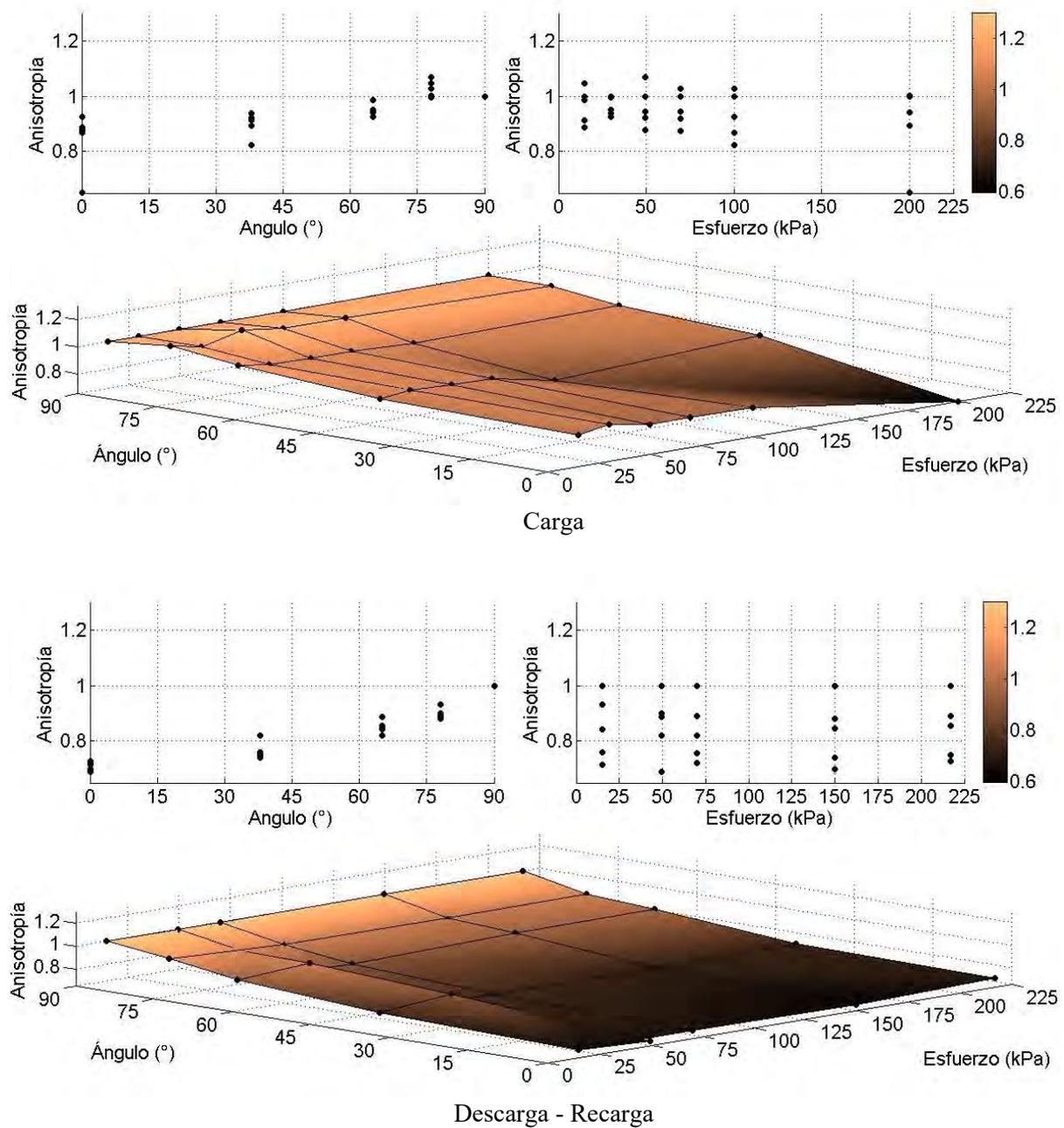


Gráfico 11. Anisotropía-ángulo-esfuerzo efectivo. P5-D. Arriba: carga. Abajo: descarga-recarga

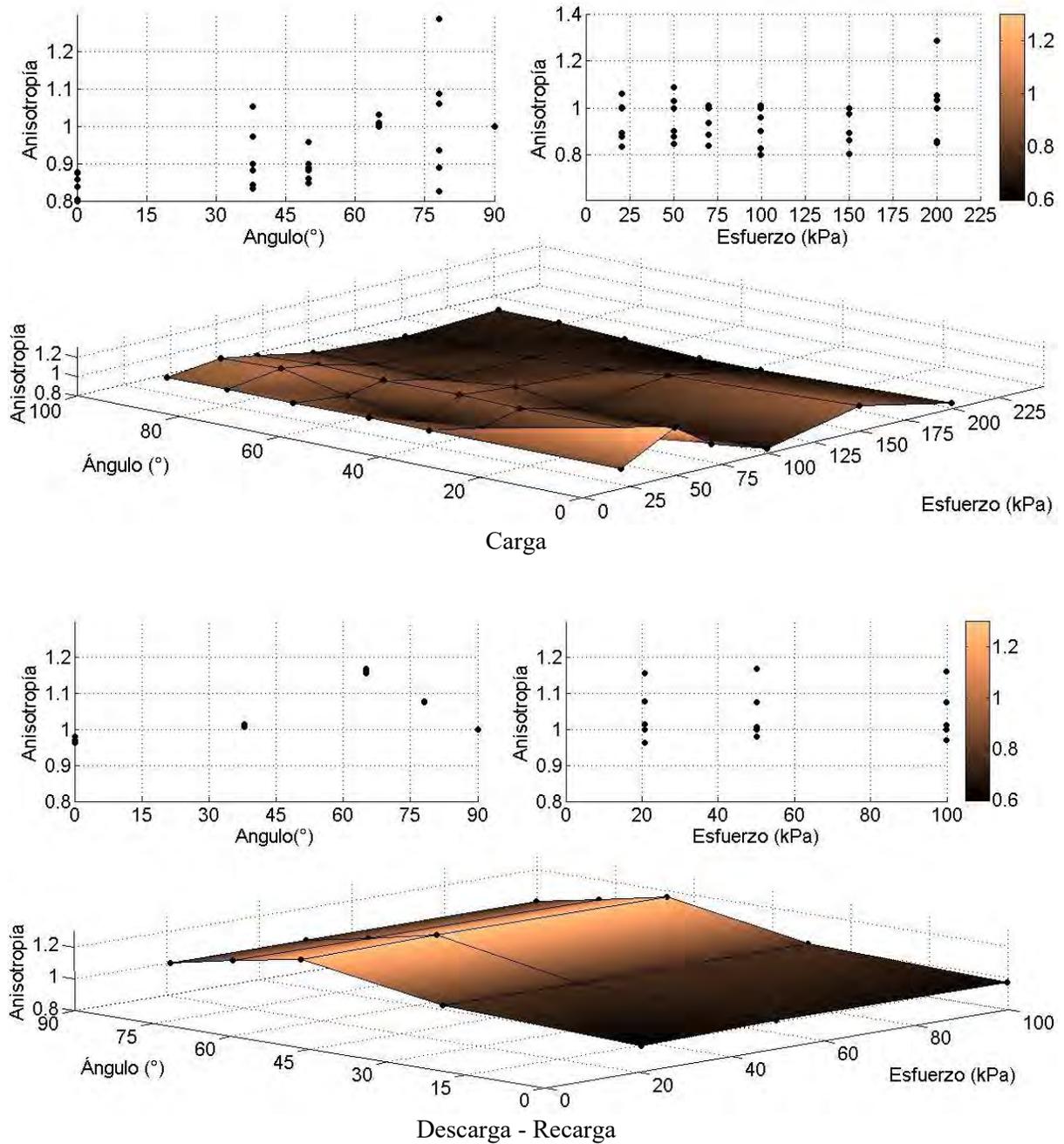


Gráfico 12. Anisotropía-ángulo-esfuerzo efectivo. P6-D. Arriba: carga. Abajo: descarga-recarga

## **Anexo 4. Perfiles de anisotropía calculados**

**Anexo 4.1. Perfiles de anisotropía en función del ángulo de incidencia, obtenidos a partir de la correlación con el índice de liquidez (Tabla 13)**

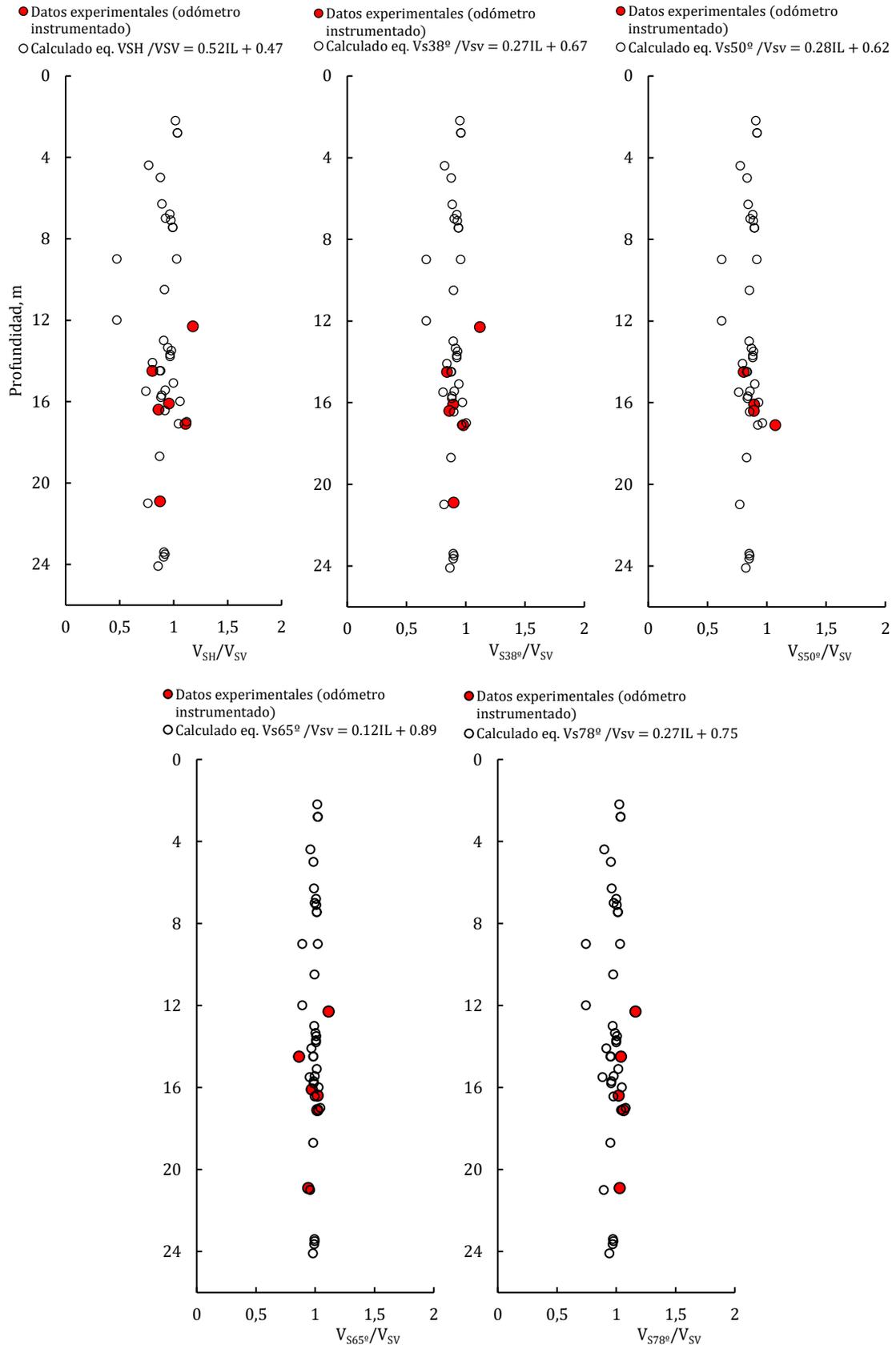


Gráfico 13. Comportamiento general

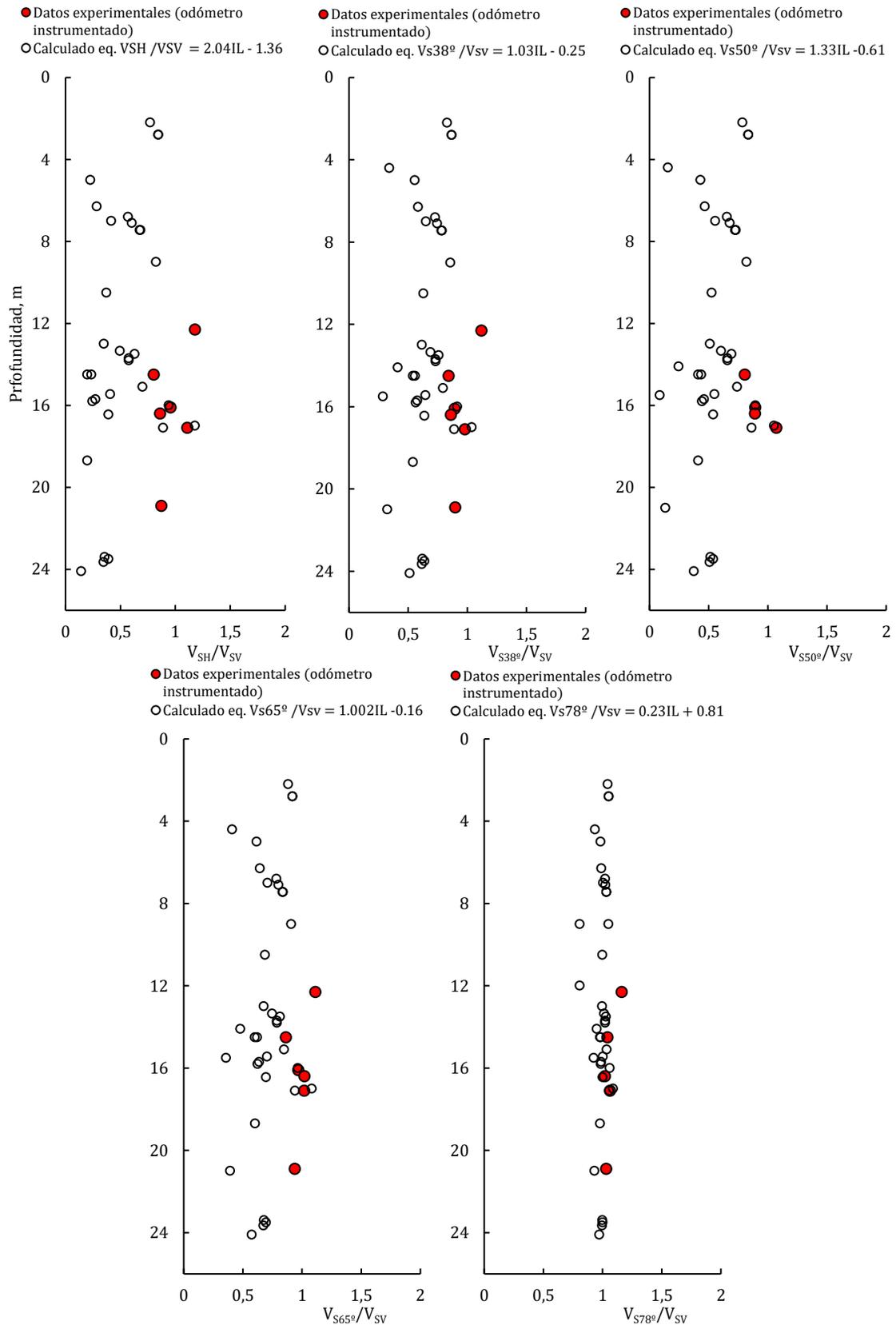


Gráfico 14. Comportamiento en la rama preconsolidada

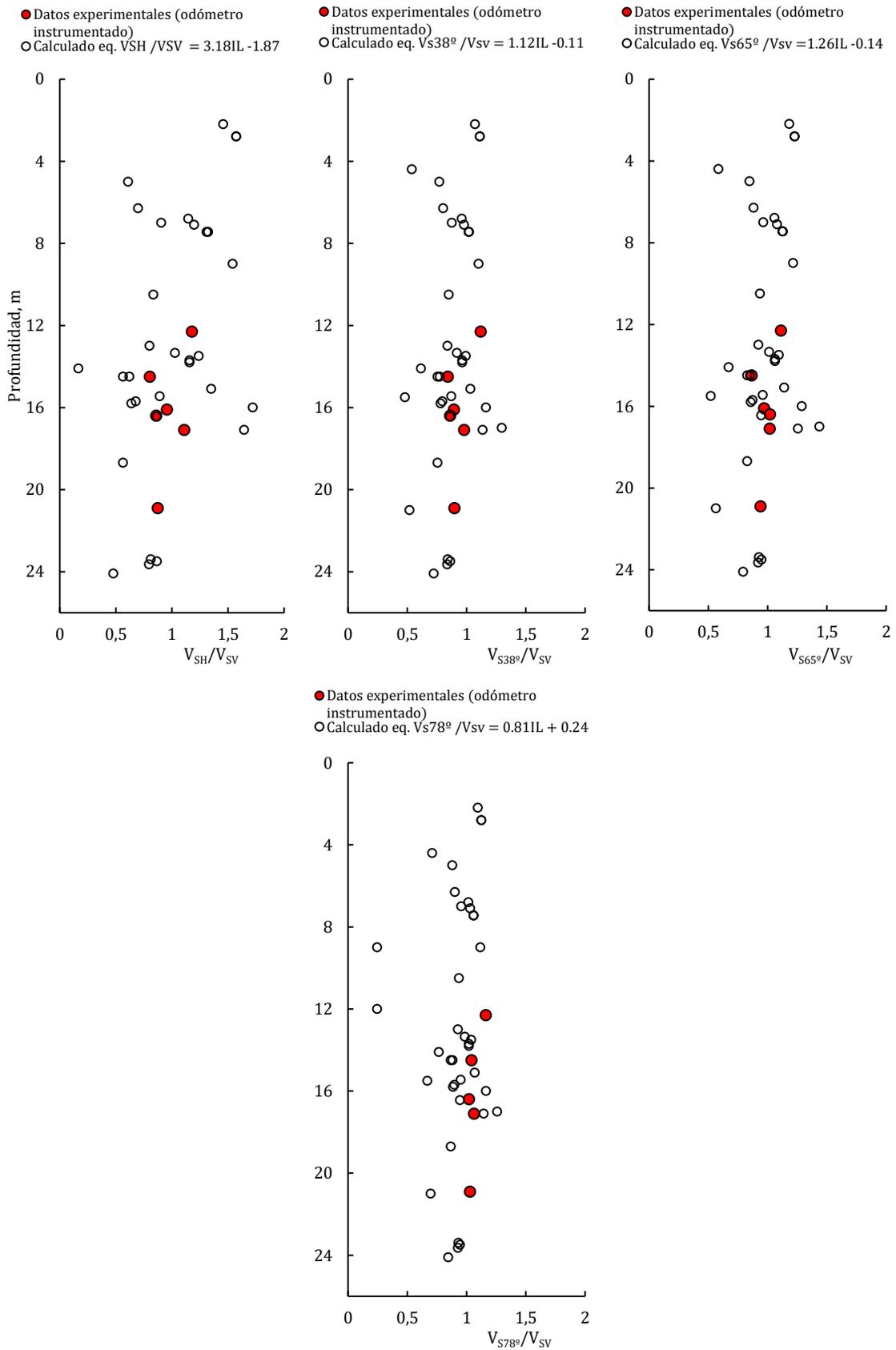


Gráfico 15. Comportamiento en la rama de descarga-recarga

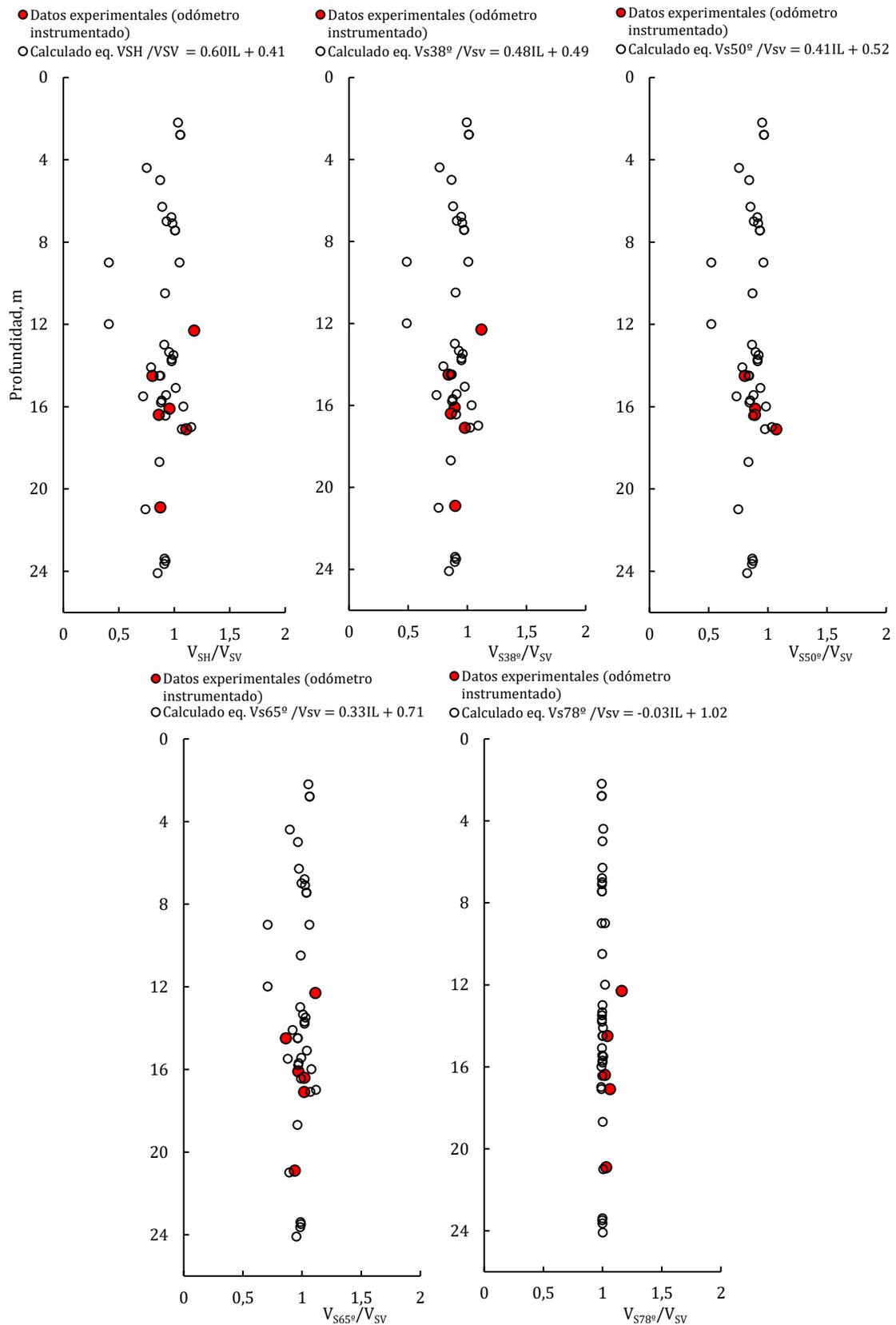


Gráfico 16. Comportamiento en la rama normalmente consolidada

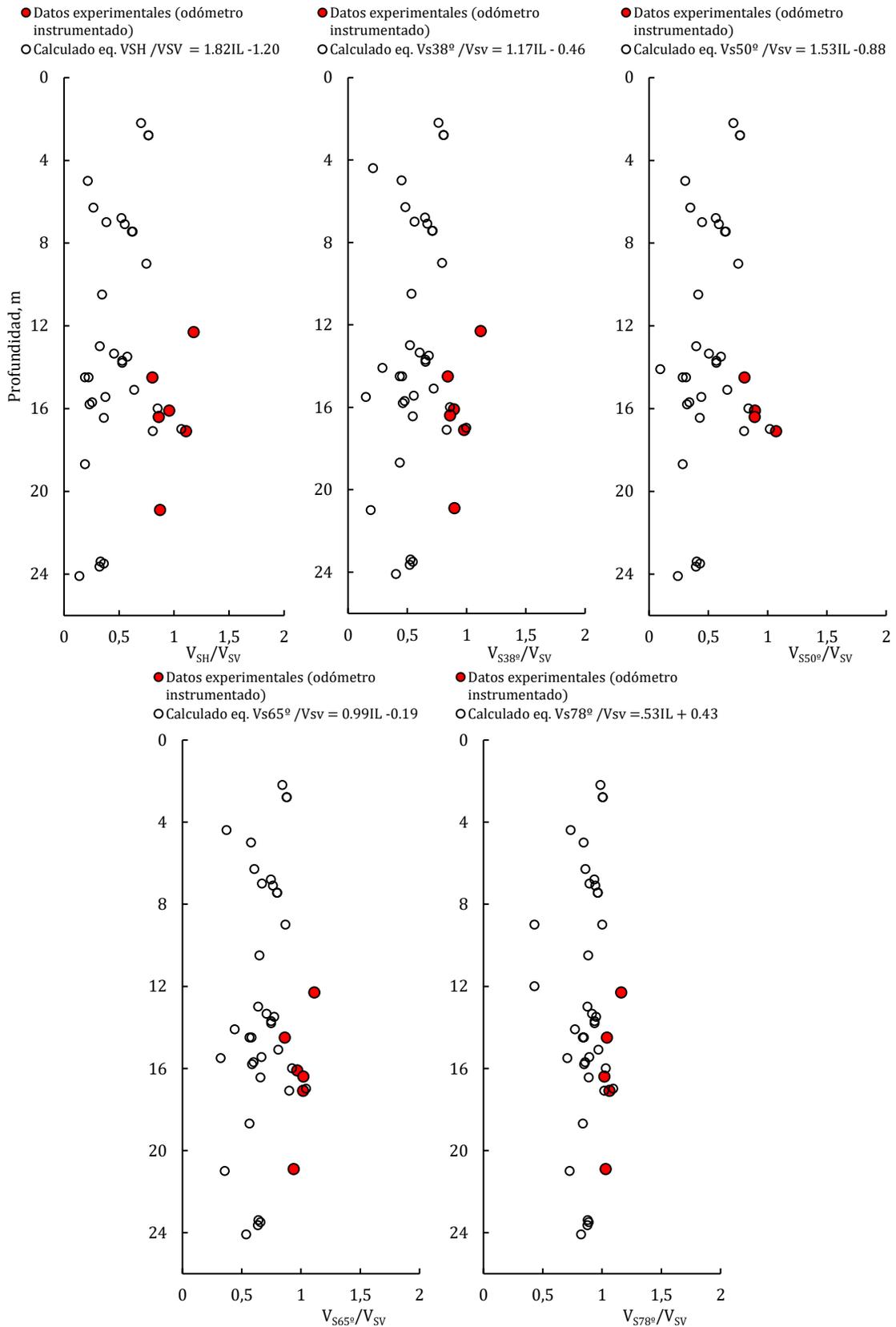


Gráfico 17. Comportamiento calculado para las condiciones de campo

**Anexo 4.2. Perfiles de anisotropía en función del  
ángulo de incidencia, obtenidos a partir de la  
correlación con el esfuerzo de preconsolidación  
(Tabla 14)**

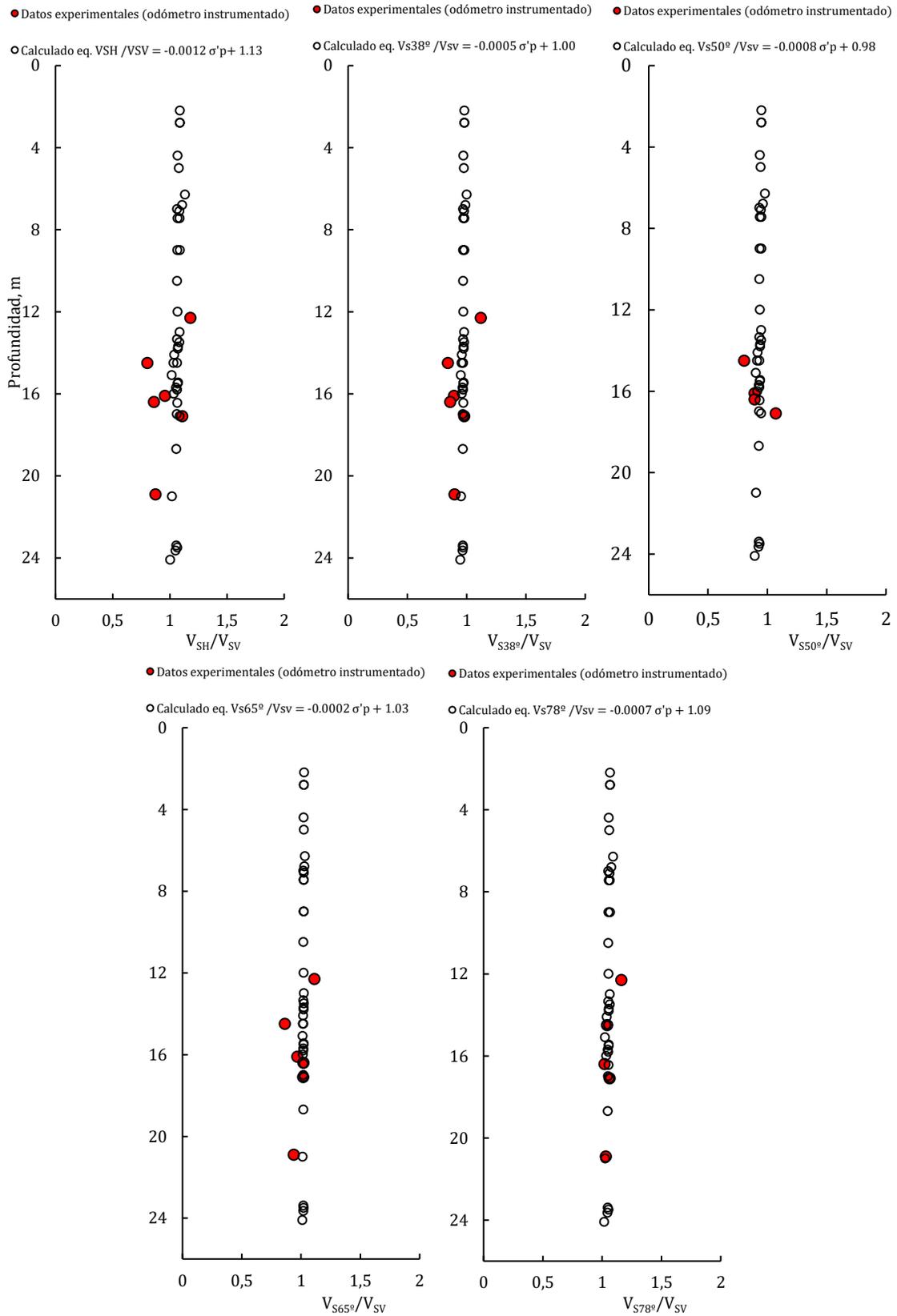


Gráfico 18. Comportamiento general

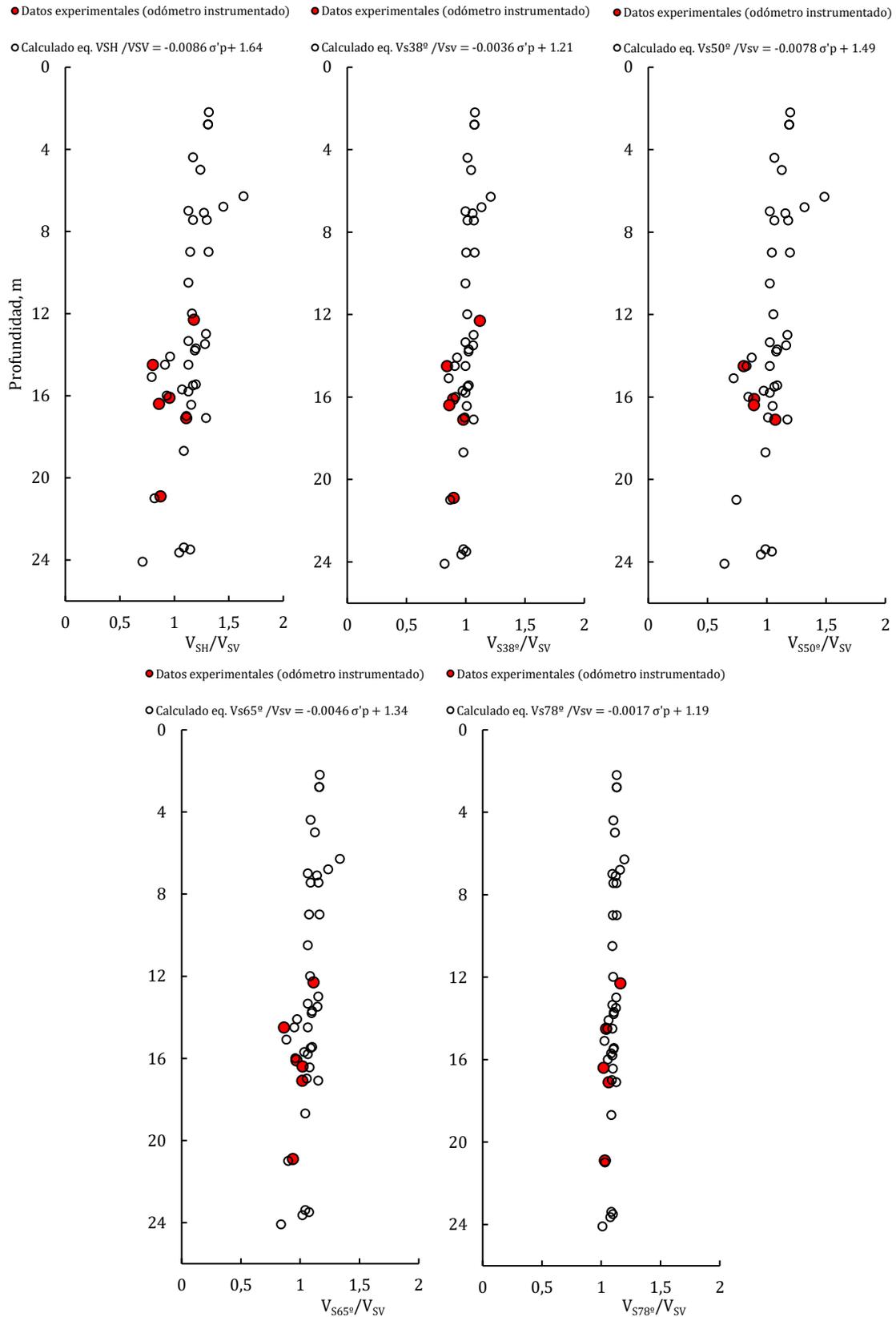


Gráfico 19. Comportamiento en la rama preconsolidada

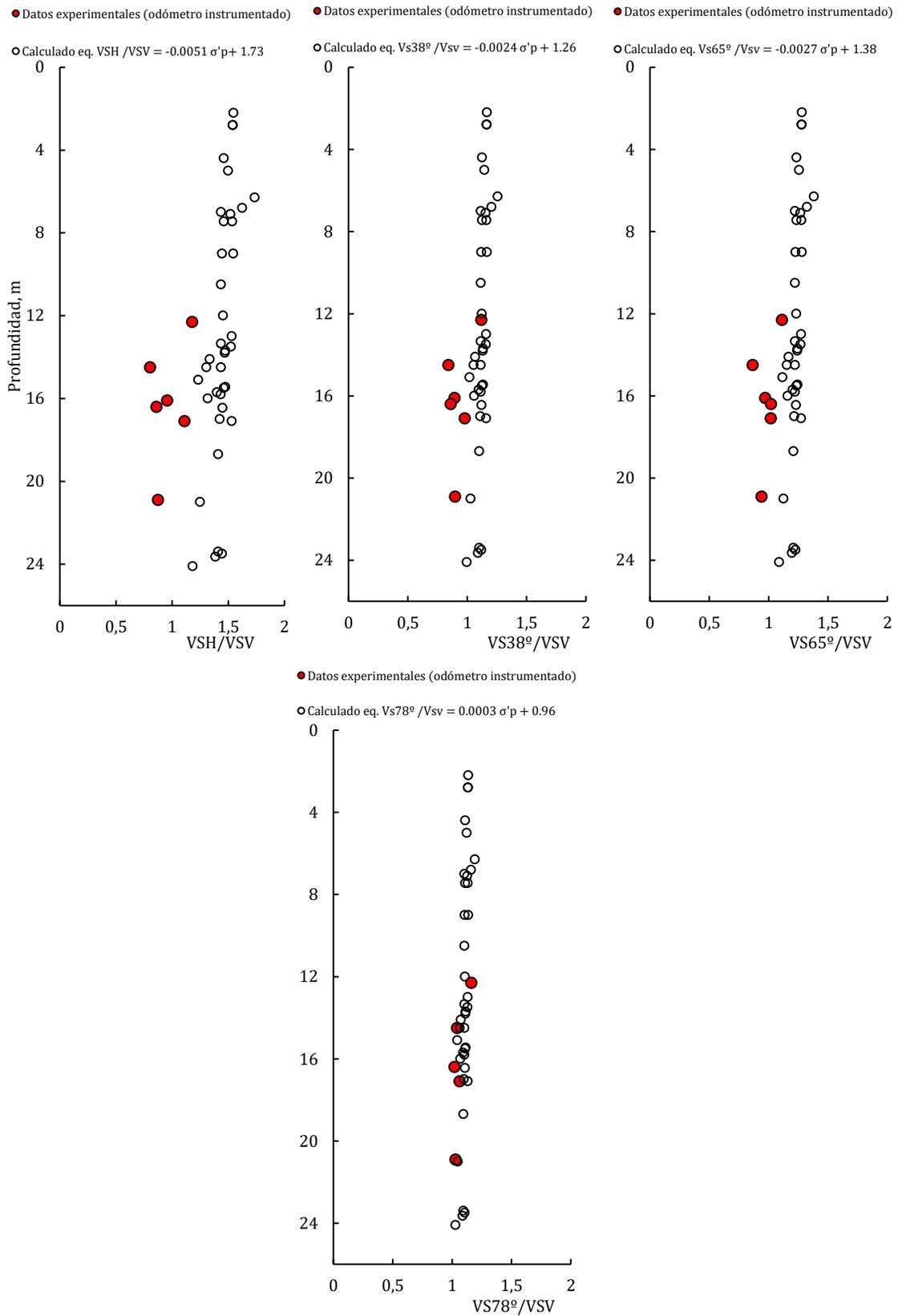


Gráfico 20. Comportamiento en la rama de descarga-recarga

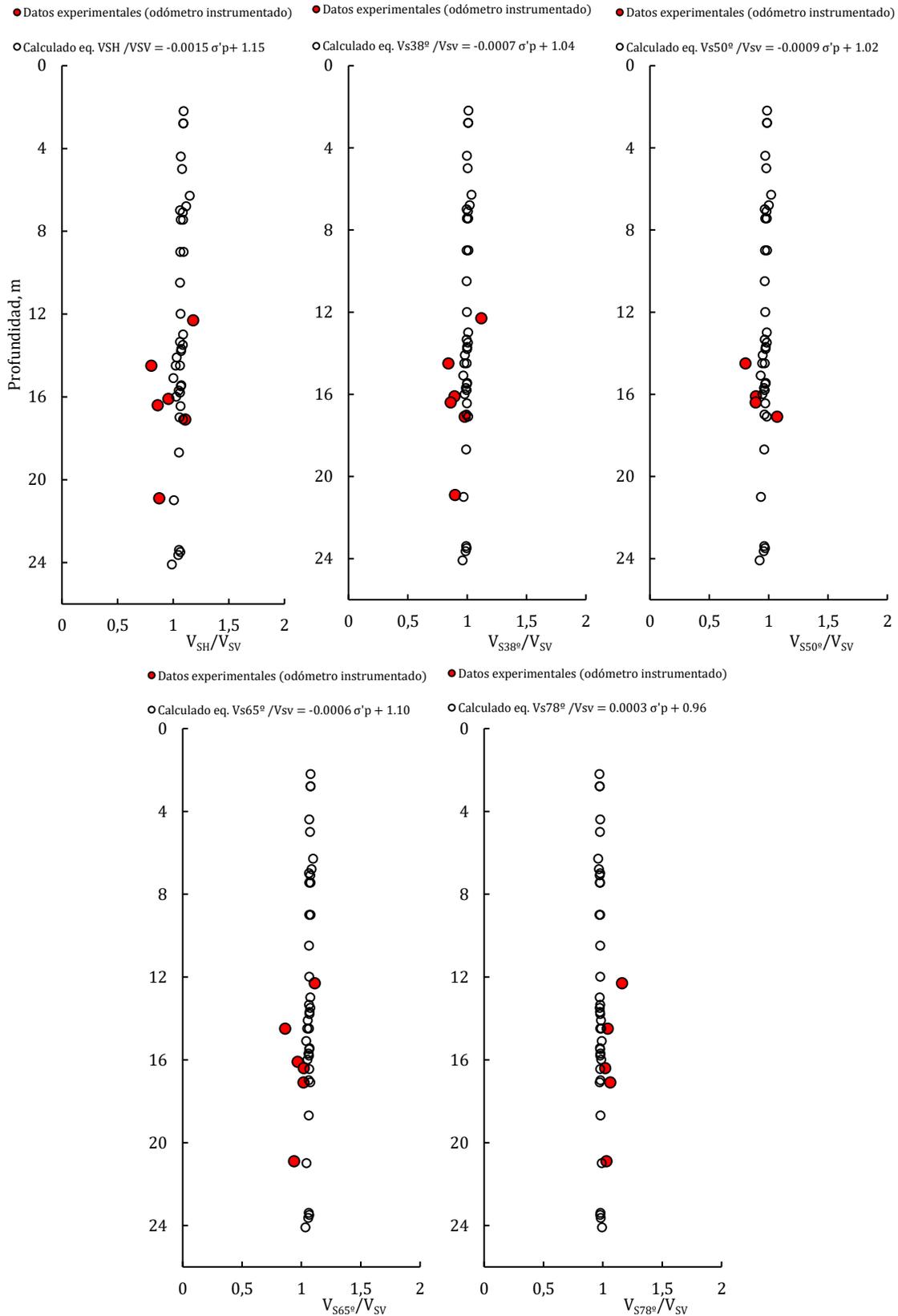


Gráfico 21. Comportamiento en la rama normalmente consolidada

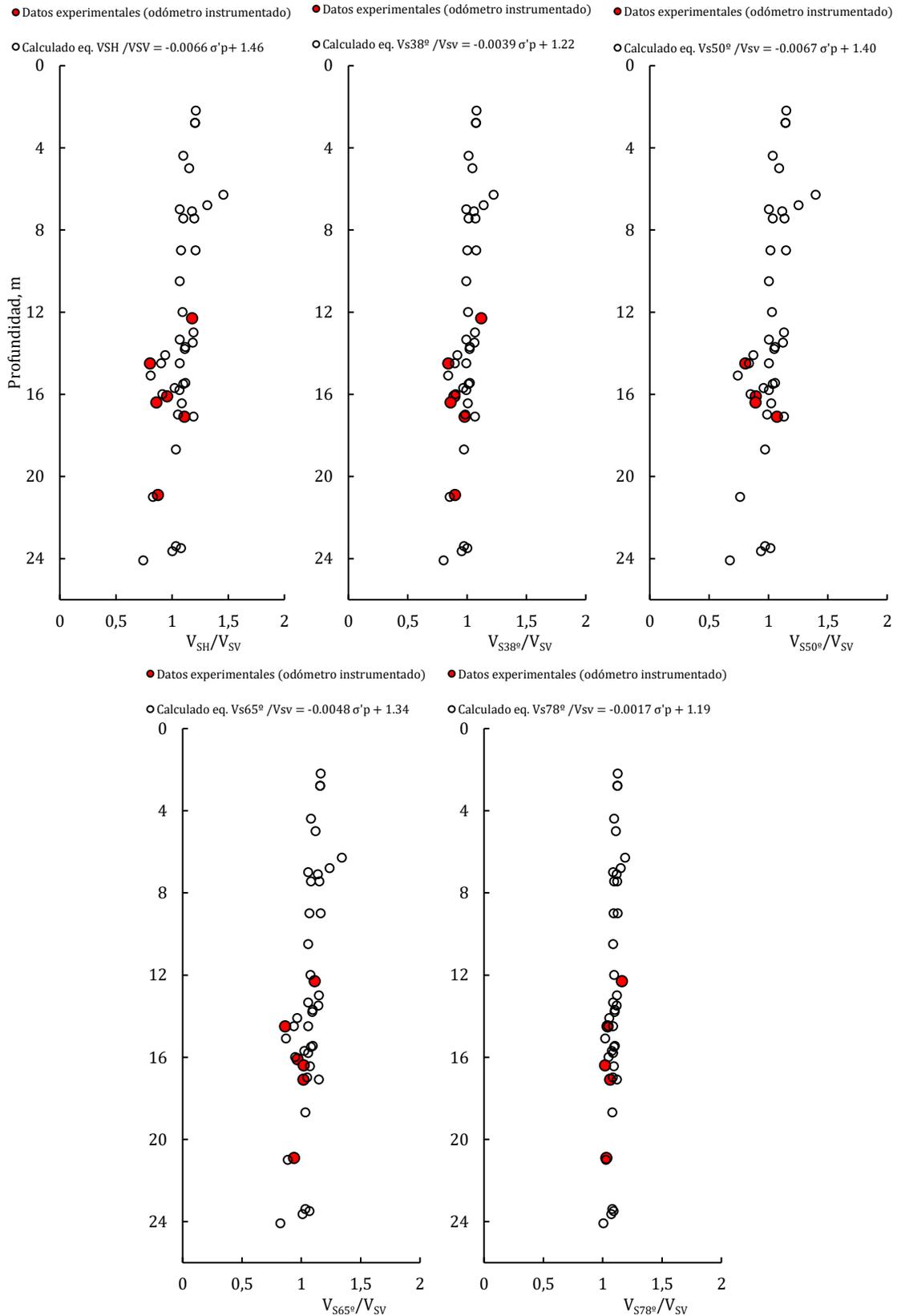


Gráfico 22. Comportamiento calculado para las condiciones de campo

**Anexo 4.3. Perfiles de anisotropía en función del  
ángulo de incidencia, obtenidos a partir de la  
correlación con el grado de preconsolidación  
OCR (Tabla 15)**

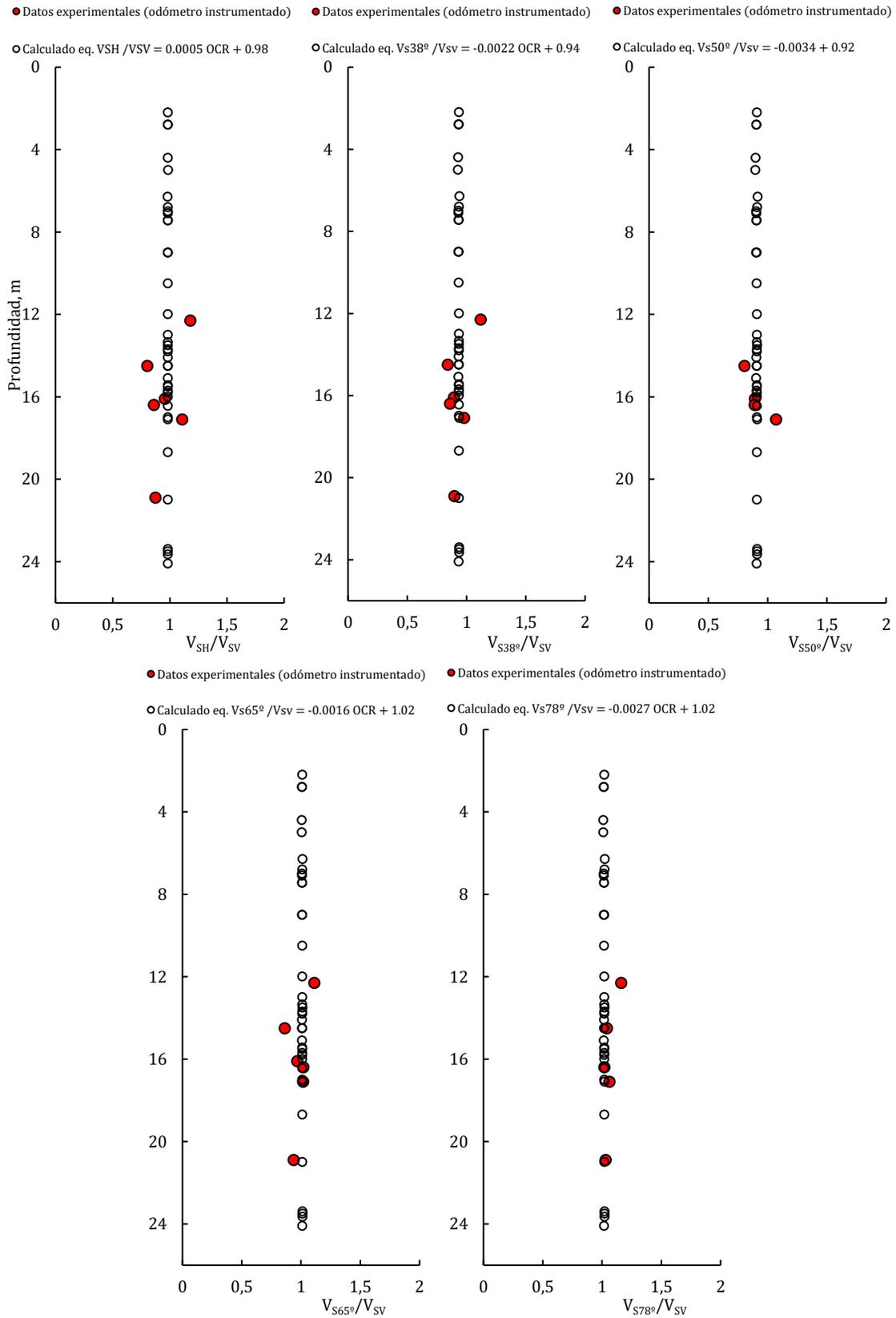


Gráfico 23. Comportamiento general

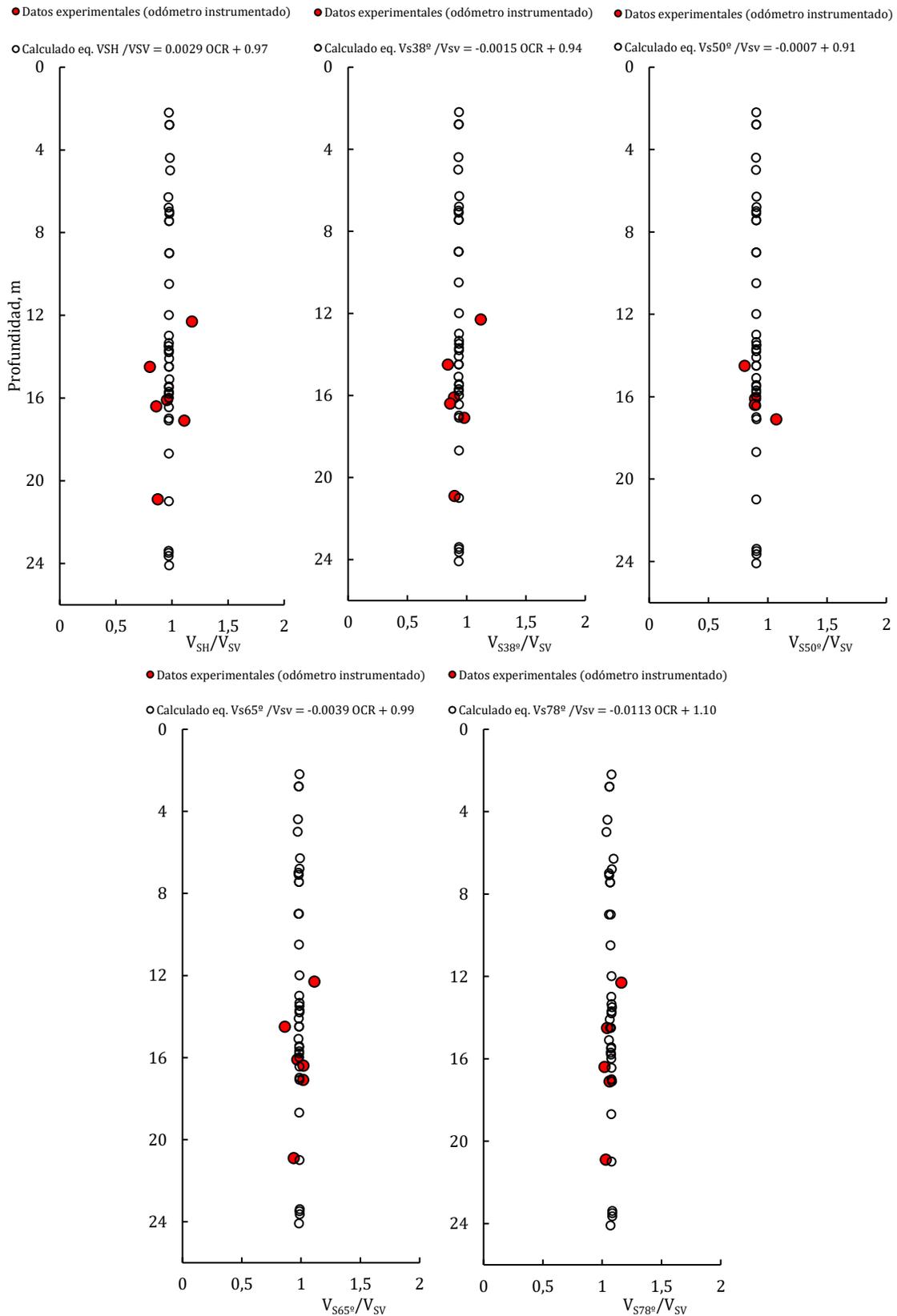


Gráfico 24. Comportamiento en la rama preconsolidada

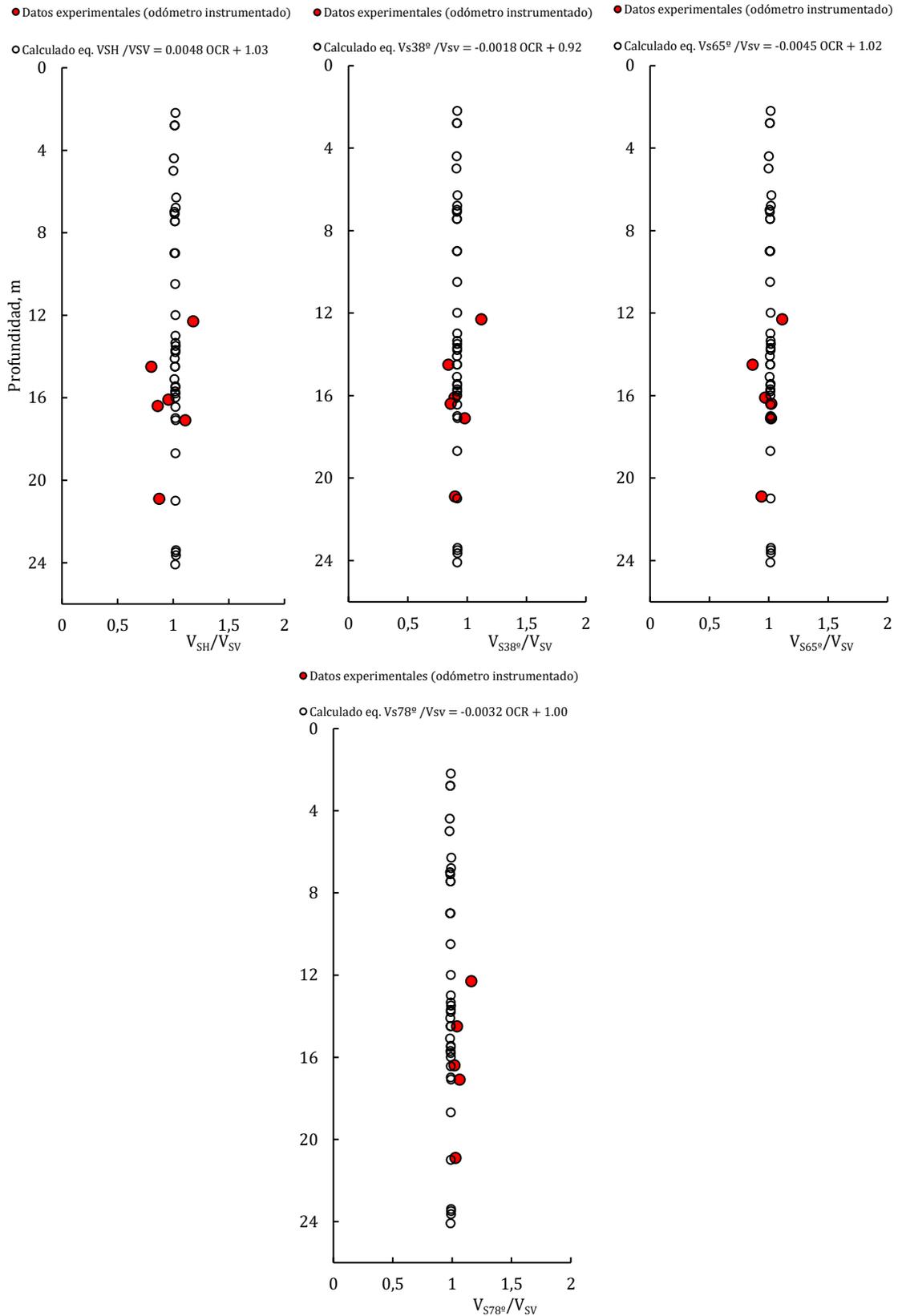


Gráfico 25. Comportamiento en la rama de descarga-recarga

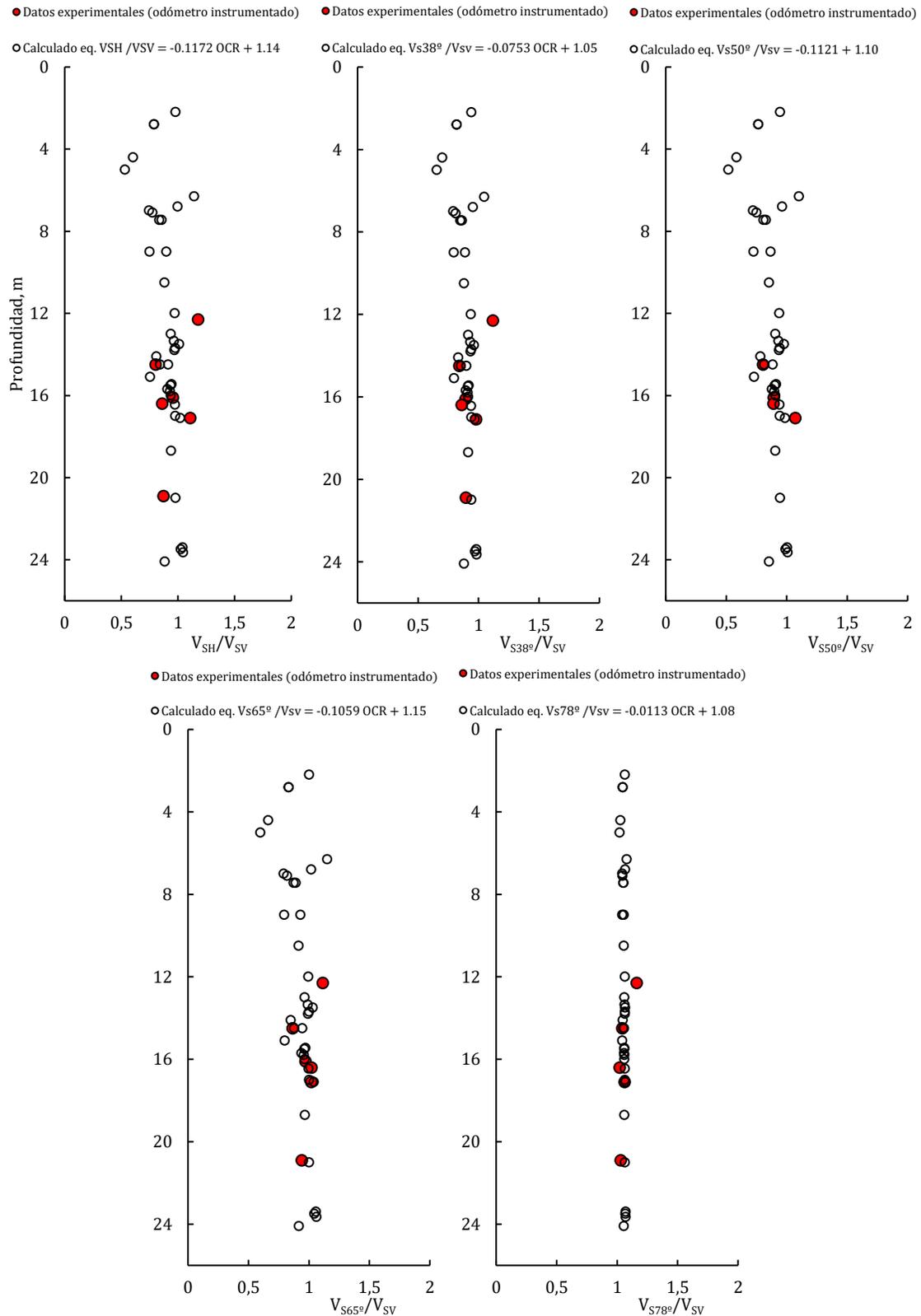


Gráfico 26. Comportamiento calculado para las condiciones de campo