



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL- GEOTECNIA

MEDICIONES DE VELOCIDADES DE ONDAS SÍSMICAS EN ARCILLAS DEL EX
LAGO DE TEXCOCO MEDIDAS EN LABORATORIO

T E S I S

PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:
MARÍA DEL ROSARIO MARTÍNEZ ÁLVAREZ

DIRECTOR DE TESIS:
DR. EFRAÍN OVANDO SHELLEY
INSTITUTO DE INGENIERÍA

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., Mayo, 2021



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. Francisco José Sánchez Sesma

Vocal: Dr. Martín Cárdenas Soto

Secretario: Dr. Efraín Ovando Shelley

1^{er.} Suplente: Dr. Víctor Cruz Atienza

2^{do.} Suplente: Dr. Antonio Pola Villaseñor

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Instituto de Geología e Instituto de Ingeniería, UNAM

TUTOR DE TESIS:

Dr. Efraín Ovando Shelley

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme grandes oportunidades que antes no pensé que fueran posibles y al instituto de ingeniería quien me recibió para realizar mi trabajo de investigación en el laboratorio de mecánica de suelos.

Gracias infinitas a mi asesor el Dr. Efraín Ovando Shelley, quien me acepto como su becaria y creyó en mí, por sus consejos y conocimientos transmitidos, pero sobre todo por su paciencia, buen trato y amistad. Dr. Efraín muchas gracias.

Mi agradecimiento también va dirigido hacia la Maestra Zaira Hernández por convertirse en mi maestra y por todo el apoyo brindado en todo momento en la realización de mi trabajo experimental, Además de cosechar una bonita amistad. Zaira muchas gracias.

También agradezco al Dr. Alfonso Fernández Lavín por su apoyo con el análisis de señales sísmicas, por sus consejos y conocimientos compartidos.

También agradezco a Javier y Norma por su apoyo brindado en los trabajos del laboratorio de mecánica de suelos.

El presente trabajo se enriqueció con las sugerencias, consejos y opiniones de mi jurado asignado para la revisión de tesis. A los doctores Francisco José Sánchez Sesma, Martín Cárdenas Soto, Víctor Cruz Atienza y Antonio Pola Villaseñor mis más sinceros agradecimientos.

A mi familia

Primero agradezco a mis padres el señor José Ángel Martínez Báez y a la señora María Carlota Álvarez García, quienes siempre me han apoyado en todo, gracias por enseñarme valores y la importancia de cumplir mis metas, gracias papas sin ustedes hoy no sería lo que soy. Los amo mucho

A mis hermanas quienes siempre me han apoyado, por su cariño y por estar siempre en los momentos más importantes de mi vida.

Agradezco a luz, quien ha estado conmigo a lo largo de esta aventura, gracias por tu ayuda desinteresada, tus porras, consejos y buenos momentos en los que convivimos, pero sobre todo tu amistad incondicional. También agradezco a doña Lucy quien me ha tratado como una hija más, gracias por sus ricas y nutritivas comidas que me acompañaron día con día en mi vida estudiantil.

A todos ustedes mil gracias.

RESUMEN

En el siguiente trabajo se realizaron seis pruebas triaxiales instrumentadas con cristales piezoeléctricos a muestras de suelo arcilloso del ex Lago de Texcoco extraídas con sondeos inalterados de tubo de pared delgada (tubo shelby). Las pruebas triaxiales constan de tres etapas: saturación, consolidación y falla de las muestras. Estos ensayos permiten conocer las velocidades de ondas de cortante (V_s) y de compresión (V_p) de las arcillas, con las que es posible conocer el comportamiento del suelo y calcular sus módulos de rigidez.

Para estimar los módulos de rigidez del suelo, el módulo de Young (E), el de cortante (G) y la relación de Poisson (ν) a partir de V_s y V_p , se adquirieron señales de ondas elastodinámicas durante toda la etapa de falla de los ensayos, para pruebas consolidadas no drenadas (CU) y pruebas consolidadas drenadas (CD). Debido a que no existe un método estandarizado para el análisis de señales obtenidas con elementos bender, éstas fueron analizadas con diferentes métodos visuales (primera deflexión, pico-pico máximo, pico-pico mínimo y primer arribo) y los matemáticos (correlación cruzada y transformadas Wavelets continuas) para identificar la estrategia que proporciona las mediciones más robustas de su velocidad de propagación. Los métodos que arrojan los mejores resultados son los matemáticos.

El trabajo comprende la preparación de la muestra, el montaje del equipo triaxial, la fabricación de los elementos bender e instrumentación del cabezal y pedestal, desarrollo de las pruebas durante las etapas experimentales, el análisis de los resultados y las conclusiones.

El método matemático de transformadas Wavelets continuas arrojó valores muy consistentes de los tiempos de arribo de las señales. Por el contrario, los métodos visuales de primera deflexión, pico-pico máximo, pico-pico mínimo y primer arribo resultaron satisfactorios sólo en ausencia de ruido significativo. El análisis de las señales de onda con ambos tipos de métodos es importante para poder determinar cuál es el mejor en cada ensayo. En el caso de las pruebas CD, las velocidades de onda aumentaron durante los ensayos por el cambio de volumen que se dio en el suelo al expulsar agua, producto del aumento de los esfuerzos de compresión que provocaron un aumento en la rigidez del suelo en la etapa de falla, mientras que en las pruebas CU disminuyeron, esta disminución se debe al aumento del exceso de presión de poro. Por otro lado, los módulos de rigidez secante (E_{sec}) y el tangente (E_{tan}) fueron sistemáticamente menores que el módulo de rigidez obtenido con las velocidades V_s y V_p adquiridas con elementos bender (E_{bender}) como resultado de las diferentes frecuencias de excitación aplicadas a los elementos bender y de los niveles de deformación que se utilizaron en cada técnica de ensayo.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| RESUMEN..... | I |
| NOMENCLATURA..... | XI |
| CAPÍTULO 1..... | 1 |
| 1 INTRODUCCIÓN..... | 2 |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 4 |
| 1.2 OBJETIVOS..... | 4 |
| 1.3 HIPÓTESIS..... | 5 |
| CAPÍTULO 2..... | 6 |
| MARCO TEÓRICO | 6 |
| 2.1 ONDAS SÍSMICAS | 7 |
| Ondas primarias u ondas P..... | 7 |
| Ondas secundarias u ondas S..... | 8 |
| 2.2 PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS SUELOS | 9 |
| 2.2.1 Módulos de rigidez del suelo | 9 |
| 2.3 CONSOLIDACIÓN, COMPRESIBILIDAD Y ESFUERZO DE PRECONSOLIDACIÓN | 12 |
| 2.3.1 Comportamiento elástico..... | 13 |
| 2.3.2 Comportamiento elastoplástico..... | 14 |
| 2.3.3 Esfuerzo de fluencia | 15 |
| 2.4 PIEZOELECTRICIDAD | 16 |
| 2.5 ELEMENTOS BENDER | 16 |
| 2.5.1 Elementos de flexión (Vs)..... | 17 |
| 2.5.2 Elementos de compresión (Discos) Vp | 18 |
| CAPÍTULO 3..... | 19 |
| MATERIALES Y MÉTODOS..... | 19 |
| 3.1 ANTECEDENTES..... | 20 |
| 3.2 DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS DE ARCILLA DEL LAGO DE TEXCOCO | 22 |
| 3.3 MUESTRAS ENSAYADAS | 23 |
| 3.4 ENSAYO TRIAXIAL | 24 |
| 3.4.1 Equipo triaxial..... | 26 |
| 3.5 CRISTALES PIEZOELÉCTRICOS EN EL EQUIPO TRIAXIAL | 28 |
| 3.6 INSTRUMENTACIÓN DE CABEZAL Y PEDESTAL CON ELEMENTOS BENDER | 30 |
| 3.7 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE RETARDO..... | 31 |
| 3.8 EQUIPO DE ADQUISICIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA SÍSMICA | 34 |
| Generador de funciones | 34 |
| Osciloscopio..... | 35 |
| Software de adquisición de datos..... | 35 |
| 3.9 SOFTWARE PARA EL PROCESADO DE LAS SEÑALES SÍSMICAS..... | 36 |
| 3.10 MÉTODOS PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE ARRIBO DE LAS ONDAS..... | 37 |
| 3.10.1 Primera deflexión..... | 38 |
| 3.10.2 Pico-pico mínimo y máximo | 39 |
| 3.10.3 Correlación cruzada | 39 |

| | |
|---|-----|
| 3.10.4 Wavelets..... | 41 |
| CAPÍTULO 4..... | 45 |
| TÉCNICAS EXPERIMENTALES | 45 |
| 4.1 CONSIDERACIONES GENERALES | 46 |
| 4.2 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA | 46 |
| 4.3 MONTAJE EN LA CÁMARA TRIAXIAL | 48 |
| 4.4 ETAPA DE SATURACIÓN | 50 |
| 4.5 ETAPA DE CONSOLIDACIÓN..... | 51 |
| 4.6 ETAPA DE FALLA | 57 |
| 4.7 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE ONDA..... | 59 |
| 4.7.1 Efecto de campo cercano | 59 |
| CAPÍTULO 5..... | 63 |
| PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS | 63 |
| 5.1 SEÑALES DE ONDA DE CORTANTE Y DE COMPRESIÓN CON DIFERENTES FRECUENCIAS | 64 |
| 5.2 MEDICIONES DE LOS PRIMEROS ARRIBOS DE LAS SEÑALES CON DIFERENTES MÉTODOS | 67 |
| 5.3 COMPORTAMIENTO DE ONDA SÍSMICA EN ETAPAS DE LA PRUEBA TRIAXIAL | 76 |
| 5.3.1 Medición de B de Skempton contra las velocidades de Vs y Vp (etapa de saturación) | 81 |
| 5.3.2 Relación de vacíos e contra Vs y Vp (etapa de consolidación) | 84 |
| 5.3.3 Mediciones de Vs y Vp durante la etapa de falla | 87 |
| 5.4 RESULTADOS DE ENSAYES EN LA ETAPA DE FALLA DEL SONDEO SM-TP-23..... | 91 |
| 5.4.1 Trayectorias de esfuerzos de las pruebas A1 y A2..... | 91 |
| 5.5 RESULTADOS DE ENSAYES EN LA ETAPA DE FALLA DEL SONDEO TBH-430..... | 95 |
| 5.5.1 Trayectorias de esfuerzos de las pruebas B1, B2, B3 y B4 | 95 |
| 5.6 ANÁLISIS DE MÓDULOS DINÁMICOS..... | 105 |
| 5.6.1 Módulo de elasticidad tangente (E_{tan}) | 105 |
| 5.6.2 Módulo de elasticidad secante (E_{sec}) | 111 |
| 5.6.3 Módulo elástico transversal o de corte (G_{bender})..... | 113 |
| 5.6.4 Modulo elástico de Young (E_{bender})..... | 116 |
| 5.6.5 Relación de Poisson..... | 117 |
| 5.6.6 Relación de los módulos E_{sec} , E_{tan} y E_{bender} | 119 |
| CAPÍTULO 6..... | 124 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 124 |
| REFERENCIAS | 128 |
| ANEXO A..... | 131 |
| INSTRUMENTACIÓN DE ELEMENTOS BENDER..... | 131 |
| ANEXO B..... | 135 |
| TRANSFORMADA WAVELET (WT)..... | 135 |
| B. 1 TRANSFORMADA WAVELET (TWC) | 136 |

| | |
|---|-----|
| ANEXO C | 143 |
| RESULTADOS DE LOS PRIMEROS ARRIBOS DE LA SEÑAL DE CORTANTE VS CON DIFERENTES MÉTODOS VISUALES Y MATEMÁTICOS..... | 143 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Movimiento longitudinal característico de la onda P (Figura tomada de Tarbuck, 2005)..... | 7 |
| Figura 2.2 Sismograma típico que ilustra los tiempos de llegada de la onda P, S y superficiales. Las amplitudes de la onda P son pequeñas (figura tomada de Tarbuck, 2005)..... | 8 |
| Figura 2.3 Movimiento de la onda S con polarización vertical (figura tomada de Tarbuck, 2005)..... | 8 |
| Figura 2.4 Pendientes E_{sec} y E_{tan} de una curva esfuerzo – deformación | 10 |
| Figura 2.5 Curva de compresibilidad donde se representa la rana normalmente consolidada (NC), la preconsolidada (OC) y el esfuerzo de preconsolidación (σ'_p) ... | 13 |
| Figura 2.6 Idealización de la curva esfuerzo-deformación de un suelo en una prueba CU con comportamiento elastoplástico y de una prueba CD con comportamiento plástico | 14 |
| Figura 2.7 Punto de fluencia en la Curva esfuerzo-deformación, donde se muestra la deformación elástica (recuperable) y la deformación elastoplástica (no recuperable) | 15 |
| Figura 2.8 Elemento bender de flexión en bruto de fabrica sin instrumentar | 17 |
| Figura 2.9 partes que componen a un elemento de flexión (PIEZO.COM)..... | 17 |
| Figura 2.10 Respuesta de un elemento de flexión cuando se le aplica un voltaje (PIEZO.COM)..... | 17 |
| Figura 2.11 Respuesta del elemento de compresión al aplicarle un voltaje (PIEZO.COM) | 18 |
| Figura 2.12 Tamaño de los elementos de compresión (Piezo System, inc) | 18 |
| Figura 3.1 Sitio donde se extrajeron las muestras de estudio (figura editada de vista satelital y de Normas Técnicas complementarias para diseño y construcción Cimentaciones, Reglamento de Construcción del Distrito Federal, 2004)..... | 22 |
| Figura 3.2 Componentes de la Cámara triaxial | 27 |
| Figura 3.3 Modificación en la base de la cámara triaxial para la salida de los cables coaxiales que están conectados a los cables piezoeléctricos (Flores, 2013)..... | 28 |
| Figura 3.4 Diseño del cabezal y pedestal de nylamid para equipo triaxial (Flores, 2013). 29 | |
| Figura 3.5 Instrumentación de cabezal y pedestal con los elementos vender; a) elementos de flexión instrumentados, b) elementos de compresión instrumentados, c) colocación de elementos bender en el cabezal y pedestal, d) colocación de resina epóxica, e) secado de resina epóxica, f) conexión de cables coaxiales y g) cabezal y pedestal instrumentados..... | 30 |
| Figura 3.6 Determinación del tiempo de retardo de los elementos de compresión (izquierda) y determinación del tiempo de retardo de los elementos de flexión (derecha)..... | 31 |
| Figura 3.7 Señales del tiempo de retardo de elementos de flexión, con una frecuencia de 4 kHz..... | 32 |
| Figura 3.8 Señales del tiempo de retardo de elementos de compresión (Disco), con una frecuencia de 40 kHz..... | 32 |
| Figura 3.9 Tiempos de retardo al variar las frecuencias de 3 a 7 kHz en los elementos de flexión..... | 33 |
| Figura 3.10 Tiempos de retardo al variar las frecuencias de 40 a 70 kHz en los elementos de compresión (Discos)..... | 33 |
| Figura 3.11 Equipo de adquisición de señales sísmicas | 34 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 3.12 | Generador de funciones modelo Wavetek 175 | 34 |
| Figura 3.13 | Osciloscopio digital modelo HP HEWLETT PACKARD 54540A | 35 |
| Figura 3.14 | Software en operación LabVIEW | 36 |
| Figura 3.15 | Señal emisora y receptora en programa TIEMPOS ARRIBO_BE_IUNAM los puntos de colores indican los arribos de la señal obtenidos con cada método | 37 |
| Figura 3.16 | Identificación del tiempo de arribo con el método de la primera deflexión (A-A) | 38 |
| Figura 3.17 | Identificación de puntos de interés pico-pico máximo (B-B), pico-pico mínimo (C-C) | 39 |
| Figura 3.18 | Espectro receptor (izquierda superior) y espectro emisor (derecha superior), para determinar el tiempo de arribo con correlación cruzada y resultado de la correlación cruzada de la señal donde se elige el punto característico del primer arribo..... | 41 |
| Figura 3.19 | Transformada Wavelet de tiempo-frecuencia a tiempo-escala | 41 |
| Figura 3.20 | Ventana donde se muestra la descomposición de una Wavelet (TWC) | 42 |
| Figura 3.21 | señal de entrada Vs y espectro Wavelet en tres ejes (tiempo, frecuencia y coeficiente)..... | 44 |
| Figura 3.22 | Localización de la primera llegada | 44 |
| Figura 3.23 | Coincidencia del arribo Wavelet con la primera deflexión de la señal sísmica recibida | 44 |
| Figura 4.1 | Tubo Shelby del sondeo con la muestra de suelo | 46 |
| Figura 4.2 | Corte de tubo Shelby | 46 |
| Figura 4.3 | Pasos de preparación de probeta de suelo | 47 |
| Figura 4.4 | Realización de hueco para colocación de los elementos (BE) en el suelo. | 48 |
| Figura 4.5 | Pasos de montaje de muestra en la cámara triaxial..... | 50 |
| Figura 4.6 | Aplicación de esfuerzos en una prueba triaxial isótropa y anisótropa..... | 52 |
| Figura 4.7 | Curva de Consolidación del suelo obtenida con el programa de operación del Instituto de Ingeniería de la UNAM | 53 |
| Figura 4.8 | Curva de compresibilidad y determinación del punto de consolidación A1 NC (SM-TP-23) | 54 |
| Figura 4.9 | Curva de compresibilidad y determinación del punto de consolidación A2 PC (SM-TP-23) | 54 |
| Figura 4.10 | Curva de compresibilidad y determinación del punto de consolidación B1 NC (TBH-430) | 55 |
| Figura 4.11 | Curva de compresibilidad y determinación del punto de consolidación B2 PC (TBH-430) | 56 |
| Figura 4.12 | Curva de compresibilidad y determinación del punto de consolidación B3 NC (TBH-430) | 56 |
| Figura 4.13 | Curva de compresibilidad y determinación del punto de consolidación B4 PC (TBH-430) | 57 |
| Figura 4.14 | Etapas de falla en un ensayo CU obtenida del programa de operación del Instituto de Ingeniería de la UNAM | 58 |
| Figura 4.15 | Falla tipo CU (Izquierda) y falla tipo CD (Derecha)..... | 58 |
| Figura 4.16 | Variación de Rd contra la frecuencia inicial de excitación (Díaz, 2014) | 61 |
| Figura 5.1 | Relación entre las diferentes frecuencias de excitación y velocidades de cortante Vs con diferentes métodos | 65 |
| Figura 5.2 | Velocidades Vp tomadas con diferentes métodos y diferentes frecuencias..... | 65 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.3 Señales de cortante adquiridas con frecuencias de 1 a 7 kHz | 66 |
| Figura 5.4 Señales de cortante con frecuencias de 1 a 3 kHz, en las que se observa el efecto de campo cercano (efecto de campo cercano encerrado con círculo negro)... | 66 |
| Figura 5.5 Señales Vs con frecuencias de 4 a 7 kHz en las que no se observa el efecto de campo cercano..... | 67 |
| Figura 5.6 Tiempos de arribo con cada método analizado en la prueba triaxial A1 NC CU (SM-TP-23) | 70 |
| Figura 5.7 Porcentaje de diferencia de cada método respecto al valor medio A1 NC CU (SM-TP-23) | 70 |
| Figura 5.8 Tiempos de arribo con cada método analizado en la prueba triaxial A2 PC CU (SM-TP-23) | 71 |
| Figura 5.9 Porcentaje de diferencia de cada método respecto al valor medio A2 PC CU (SM-TP-23) | 71 |
| Figura 5.10 Tiempos de arribo con cada método analizado en la prueba triaxial B1 NC CU (TBH-430) | 72 |
| Figura 5.11 Porcentaje de diferencia de cada método respecto al valor medio B1 NC CU (TBH-430) | 72 |
| Figura 5.12 Tiempos de arribo con cada método analizado en la prueba triaxial B2 PC CU (TBH-430) | 73 |
| Figura 5.13 Porcentaje de diferencia de cada método respecto al valor medio B2 PC CU (TBH-430) | 73 |
| Figura 5.14 Tiempos de arribo con cada método analizado en la prueba triaxial B3 NC CD (TBH-430) | 74 |
| Figura 5.15 Porcentaje de diferencia de cada método respecto al valor medio B3 NC CD (TBH-430) | 74 |
| Figura 5.16 Tiempos de arribo con cada método analizado en la prueba triaxial B4 PC CD (TBH-430) | 75 |
| Figura 5.17 Porcentaje de diferencia de cada método respecto al valor medio B4 PC CD (TBH-430) | 75 |
| Figura 5.18 Señales de cortante Vs adquiridas en las etapas de saturación, consolidación y falla de la prueba A2 PC CU del sondeo SM-TP-23 (las flechas indican los arribos de las señales)..... | 77 |
| Figura 5.19 Señales de compresión Vp adquiridas en las etapas de saturación, consolidación y falla de la prueba A2 PC CU del sondeo SM-TP-23 Vp (las flechas indican los arribos de las señales)..... | 78 |
| Figura 5.20 Señales de cortante Vs adquiridas en las etapas de saturación, consolidación y falla de la prueba B1 NC CU del sondeo TBH-430 | 79 |
| Figura 5.21 Señales de cortante Vs adquiridas en las etapas de saturación, consolidación y falla de la prueba B3 NC CD del sondeo TBH-430 | 80 |
| Figura 5.22 Parámetro B de Skempton contra Vs y Vp (SM-TP-23)..... | 83 |
| Figura 5.23 Parámetro B de Skempton contra Vs y Vp (TBH-430)..... | 83 |
| Figura 5.24 Comportamiento de Vs y Vp contra la relación de vacíos e (SM-TP-23)..... | 86 |
| Figura 5.25 Comportamiento de Vs y Vp contra la relación de vacíos e (TBH-430)..... | 86 |
| Figura 5.26: Comportamiento de Vs y Vp contra la deformación unitaria axial (SM-TP-23). | 90 |
| Figura 5.27 Comportamiento de Vs y Vp contra la deformación unitaria axial (TBH-430) | 90 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.28 Esfuerzo de deformación axial contra esfuerzo desviador y comportamiento de las Vs en la prueba A1 NC CU (SM-TP-23)..... | 91 |
| Figura 5.29 Esfuerzo de deformación axial contra esfuerzo desviador y comportamiento de las Vs de la prueba A2 PC CU (SM-TP-23)..... | 92 |
| Figura 5.30 Deformación axial contra presión de poro y velocidades Vs de la prueba A1 NC CU SM-TP-23 (Δu - ϵ -Vs)..... | 93 |
| Figura 5.31 Deformación axial contra presión de poro y velocidades Vs de la prueba A2 PC CU SM-TP-23 (Δu - ϵ -Vs)..... | 93 |
| Figura 5.32 Esfuerzo octaédrico contra esfuerzo desviador y velocidades Vs de la prueba A1 NC CU SM-TP-23 (q - p' -Vs)..... | 94 |
| Figura 5.33 Esfuerzo octaédrico contra esfuerzo desviador y velocidades Vs de la prueba A2 PC CU SM-TP-23 (q - p' -Vs)..... | 95 |
| Figura 5.34 Esfuerzo de deformación axial contra esfuerzo desviador y comportamiento de las Vs de la prueba B1 NC CU (TBH-430)..... | 96 |
| Figura 5.35 Esfuerzo de deformación axial contra esfuerzo desviador y comportamiento de las Vs de la prueba B2 PC CU (TBH-430)..... | 96 |
| Figura 5.36 Esfuerzo de deformación axial contra esfuerzo desviador y comportamiento de las Vs de la prueba B3 NC CD (TBH-430)..... | 97 |
| Figura 5.37 Esfuerzo de deformación axial contra esfuerzo desviador y comportamiento de las Vs de la prueba B4 PC CD (TBH-430)..... | 98 |
| Figura 5.38 Deformación axial contra presión de poro y velocidades Vs de la prueba B1 NC CU TBH-430 (Δu - ϵ -Vs)..... | 99 |
| Figura 5.39 Deformación axial contra presión de poro y velocidades Vs de la prueba B2 PC CU TBH-430 (Δu - ϵ -Vs)..... | 99 |
| Figura 5.40 Deformación axial contra presión de poro y velocidades Vs de la prueba B3 NC CD TBH-430 (ΔV - ϵ -Vs)..... | 100 |
| Figura 5.41 Deformación axial contra presión de poro y velocidades Vs de la prueba B4 PC CD TBH-430 (ΔV - ϵ -Vs)..... | 100 |
| Figura 5.42 Esfuerzo octaédrico contra esfuerzo desviador y velocidades Vs de la prueba B1 NC CU TBH-430 (q - p' -Vs)..... | 101 |
| Figura 5.43 Esfuerzo octaédrico contra esfuerzo desviador y velocidades Vs de la prueba B2 PC CU TBH-430 (q - p' -Vs)..... | 102 |
| Figura 5.44 Esfuerzo octaédrico contra esfuerzo desviador y velocidades Vs de la prueba B3 NC CD TBH-430 (q - p' -Vs)..... | 102 |
| Figura 5.45 Esfuerzo octaédrico contra esfuerzo desviador y velocidades Vs de la prueba B4 PC CD TBH-430 (q - p' -Vs)..... | 103 |
| Figura 5.46 Comportamiento de Vs contra el esfuerzo axial desviador (SM-TP-23)..... | 104 |
| Figura 5.47 Comportamiento de Vs contra el esfuerzo axial desviador (TBH-430)..... | 104 |
| Figura 5.48 Obtención de los módulos de elasticidad E_{tan} de una curva esfuerzo-deformación (SM-TP-23) A1 NC CU..... | 106 |
| Figura 5.49 Obtención de los módulos de elasticidad E_{tan} de una curva esfuerzo-deformación (SM-TP-23) A2 PC CU..... | 106 |
| Figura 5.50 Obtención de los módulos de elasticidad E_{tan} de una curva esfuerzo-deformación (TBH-430) B1 NC CU..... | 107 |
| Figura 5.51 Obtención de los módulos de elasticidad E_{tan} de una curva esfuerzo-deformación (TBH-430) B2 PC CU..... | 108 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.52 Obtención de los módulos de elasticidad E_{tan} de una curva esfuerzo-deformación (TBH-430) B3 NC CD..... | 108 |
| Figura 5.53 Obtención de los módulos de elasticidad E_{tan} de una curva esfuerzo-deformación (TBH-430) B4 PC CD..... | 109 |
| Figura 5.54 Comportamiento de E_{tan} contra la deformación axial (SM-TP-23) | 110 |
| Figura 5.55 Comportamiento de E_{tan} contra la deformación axial (TBH-430) | 110 |
| Figura 5.56 Comportamiento de E_{sec} contra la deformación axial (SM-TP-23)..... | 112 |
| Figura 5.57 Comportamiento de E_{sec} contra la deformación axial (TBH-430)..... | 112 |
| Figura 5.58 Comportamiento de G_{bender} contra la deformación axial (SM-TP-23) | 114 |
| Figura 5.59 Comportamiento de G_{bender} contra la deformación axial (TBH-430) | 114 |
| Figura 5.60 $G/G_{máx}$ contra la deformación unitaria axial del sondeo (SM-TP-23) | 115 |
| Figura 5.61 $G/G_{máx}$ contra la deformación unitaria axial del sondeo (TBH-430) | 115 |
| Figura 5.62 Comportamiento de E_{bender} contra la deformación axial (SM-TP-23)..... | 116 |
| Figura 5.63 Comportamiento de E_{bender} contra la deformación axial (TBH-430)..... | 117 |
| Figura 5.64 La relación de Poisson contra deformación axial (SM-TP-23)..... | 118 |
| Figura 5.65 La relación de Poisson contra deformación axial (TBH-430)..... | 119 |
| Figura 5.66 Comparación de los módulos elásticos E_{sec} , E_{tan} y E_{bender} contra la deformación axial (SM-TP-23)..... | 120 |
| Figura 5.67 Comparación de los módulos elásticos E_{sec} , E_{tan} y E_{bender} contra la deformación axial (TBH-430)..... | 120 |
| Figura 5.68 $E/E_{máx}$ contra la deformación unitaria axial del sondeo (SM-TP-23) | 121 |
| Figura 5.69 $E/E_{máx}$ contra la deformación unitaria axial del sondeo (TBH-430) | 122 |
| Figura 5.70: Relación del módulo secante y tangente (SM-TP-23). | 123 |
| Figura 5.71: Relación del módulo secante y tangente (TBH-430). | 123 |
| Figura A.1 Material para instrumentación de los elementos (BE)..... | 132 |
| Figura A.2 Proceso de instrumentación de elementos (BE) | 134 |
| Figura B.1 Onduleta de sombrero mexicano..... | 136 |
| Figura B.2 Corrimiento de las Wavelets en tiempo con (a) constante..... | 137 |
| Figura B.3 Variación de (a) y corrimiento de la Wavelet en tiempo..... | 137 |
| Figura B.4 Señal sísmica y escalograma producto de la aplicación de la transformada Wavelet en Matlab..... | 138 |
| Figura B.5 Selección del primer arribo de la señal | 138 |
| Figura B.6 Relación de la señal original y escalograma resultado de aplicar la Wavelet (CWT) | 139 |
| Figura B.8 Escalogramas productos de la aplicación de la transformada Wavelet en Matlab a señales en la etapa de saturación, a) SATURACIÓN 1, b) SATURACIÓN 2 Y c) SATURACIÓN 3..... | 140 |
| Figura B.9 Escalogramas productos de la aplicación de la transformada Wavelet en Matlab a señales en la etapa de consolidación, a) CONSOLIDACIÓN 1, b) CONSOLIDACIÓN 2, c) CONSOLIDACIÓN 3, d) CONSOLIDACIÓN 4 y e) CONSOLIDACIÓN 5 | 141 |
| Figura B.10 Escalogramas productos de la aplicación de la transformada Wavelet en Matlab a señales en la etapa de falla, a) FALLA1, b) FALLA2, c) FALLA3, y d) FALLA4 | 142 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 2.1 Rango de valores típicos de la relación de Poisson (Kulhawy & Mayne, 1990) . | 12 |
| Tabla 3.1 Resumen de cómo fueron ensayados cada uno de los sondeos trabajados SM-TP-23 y TBH-43 | 23 |
| Tabla 3.2 Propiedades índice de los sondeos trabajados SM-TP-23 y TBH-430. | 24 |
| Tabla 4.1 Resultados de señales Vs con diferentes métodos sin el efecto de campo cercano | 61 |
| Tabla 4.2 Resultados de señales Vs con diferentes métodos con el efecto de campo cercano | 62 |
| Tabla 5.1 Parámetro de B de Skempton y velocidades Vs y Vp en el sondeo SM-TP-23 | 82 |
| Tabla 5.2: Parámetro de B de Skempton y velocidades Vs y Vp en el sondeo TBH-430. | 82 |
| Tabla 5.3 Relación de vacíos y velocidades Vs y Vp (SM-TP-23)..... | 84 |
| Tabla 5.4 Relación de vacíos y velocidades Vs y Vp (TBH-430)..... | 85 |
| Tabla 5.5 Deformación unitaria axial y velocidades Vs y Vp (SM-TP-23)..... | 88 |
| Tabla 5.6 Deformación unitaria axial y velocidades Vs y Vp (TBH-430)..... | 89 |
| Tabla C.1 Resultados de los arribos de la onda de cortante con diferentes métodos prueba A1 NC CU (SM-TP-23)..... | 144 |
| Tabla C.2 Porcentaje de diferencias con respecto al valor medio para cada método prueba A1 NC CU (SM-TP-23)..... | 144 |
| Tabla C.3 Resultados de los arribos de las ondas de cortante con diferentes métodos prueba A2 PC CU (SM-TP-23)..... | 144 |
| Tabla C.4 Porcentaje de diferencias con respecto al valor medio para cada método prueba A2 PC CU (SM-TP-23)..... | 144 |
| Tabla C.5 Resultados de los arribos de las ondas de cortante con diferentes métodos prueba B1 NC CU (TBH-430)..... | 144 |
| Tabla C.6 Porcentaje de diferencias con respecto al valor medio para cada método prueba B1 NC CU (TBH-430)..... | 144 |
| Tabla C.7 Resultados de los arribos de las ondas de cortante con diferentes métodos prueba B2 PC CU (TBH-430)..... | 144 |
| Tabla C.8 Porcentaje de diferencias con respecto al valor medio para cada método prueba B2 PC CU (TBH-430)..... | 144 |
| Tabla C.9 Resultados de los arribos de las ondas de cortante con diferentes métodos prueba B3 NC CD (TBH-430)..... | 144 |
| Tabla C.10 Porcentaje de diferencias con respecto al valor medio para cada método prueba B3 NC CD (TBH-430)..... | 144 |
| Tabla C.11 Resultados de los arribos de las ondas de cortante con diferentes métodos prueba B4 PC CD (TBH-430)..... | 144 |
| Tabla C.12 Porcentaje de diferencias con respecto al valor medio para cada método prueba B4 PC CD (TBH-430)..... | 144 |

NOMENCLATURA

| | |
|----------------------------------|---|
| <i>B</i> | Parametro de Skempton |
| <i>CD</i> | Ensayo triaxial consolidado- si drenado |
| <i>CU</i> | Ensayo triaxial consolidado- no drenado |
| <i>E</i> | Módulo de Young, MPa |
| <i>E_{bender}</i> | Módulo de Young obtenido con elementos bender, MPa |
| <i>E_{sec}</i> | Módulo secante, MPa |
| <i>E_{tan}</i> | Módulo tangente, MPa |
| <i>e</i> | Relación de vacíos |
| <i>FFT</i> | Transformada rápida de Fourier |
| <i>FT</i> | Función de transferencia |
| <i>f</i> | Frecuencia, Hz |
| <i>f₀</i> | Frecuencia fundamental del sistema, Hz |
| <i>G</i> | Módulo de rigidez al corte, MPa |
| <i>G_{bender}</i> | Módulo de rigidez al corte obtenido con elementos bender, MPa |
| <i>G_{max}</i> | Módulo de rigidez al corte máximo, MPa |
| <i>G_s</i> | Densidad de sólidos |
| <i>H₀</i> | Altura inicial |
| <i>Hz</i> | Hertzios |
| <i>IL</i> | Índice de liquidez |
| <i>L_{efec}</i> | Distancia entre cristal emisor y cristal receptor |
| <i>L_s</i> | La distancia efectiva de recorrido de la onda |
| <i>M</i> | Pendiente de la envolvente de falla |
| <i>nF</i> | Nanofaradios |
| <i>OCR</i> | Relación de preconsolidación |
| <i>p'</i> | Esfuerzo octaédrico promedio, kPa |
| <i>PI</i> | Índice de plasticidad, % |
| <i>q</i> | Esfuerzo desviador, kPa |

| | |
|-----------------|--|
| SUCS | Sistema unificado de clasificación de suelos |
| t_{efec} | Tiempo real de recorrido de la onda |
| UU | Ensayo triaxial no consolidado- no drenado |
| Vs | Velocidad de onda de cortante, m/s |
| Vp | Velocidad de onda de compresión, m/s |
| W | Contenido de agua |
| WL | Límite líquido |
| WP | Límite plástico |
| γ | Deformación angular, % |
| ε_a | Deformación axial |
| μ | Presión de poro |
| ∇t | Tiempo de viaje de la onda en el suelo |
| ∇V | Cambio de volumen |
| ν | Relación de Poisson |
| ρ | Densidad del suelo |
| σ' | Esfuerzo efectivo, kPa |
| σ_p | Esfuerzo de preconsolidación, kPa |
| σ_1 | Esfuerzo principal mayor, kPa |
| σ_3 | Esfuerzo principal menor, kPa |

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTOS INICIALES

1 INTRODUCCIÓN

Este trabajo es una continuación de una línea de investigación propia del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, que comenzó en 2013 y se ha seguido a través de los últimos años como se menciona en el capítulo 3. Esta tesis se realizó para obtener las velocidades de cortante V_s y de compresión V_p en las diferentes etapas de la prueba triaxial (saturación, consolidación y falla). En este trabajo se busca determinar los módulos de rigidez durante la etapa de falla de la prueba triaxial y para eso se analizan las señales sísmicas con diferentes métodos, tanto en el dominio del tiempo como el de la frecuencia; en la actualidad no existe un método estandarizado para el análisis de las señales sísmicas obtenidas con elementos bender, en esta investigación se encontrará cuál método es el más adecuado para el análisis de las señales sísmicas.

Los parámetros dinámicos más importantes del suelo son los módulos de cortante (G), el de elasticidad (E) y la relación de Poisson (ν) y estos se utilizan para conocer la respuesta de un suelo ante vibraciones y cargas aplicadas. En la actualidad existen diversas técnicas y equipos de laboratorio, utilizados desde hace varias décadas, para la obtención de parámetros dinámicos en suelos entre los que destacan la columna resonante, el ensaye triaxial cíclico, el corte simple cíclico, el corte torsional y la mesa vibradora. Más recientemente se ha popularizado una técnica mediante el empleo de transductores piezoeléctricos para obtener los parámetros dinámicos del suelo a muy bajas deformaciones, representando una técnica no destructiva, ya que se emplean deformaciones angulares muy pequeñas, por ejemplo ($\gamma < 10^{-5} \%$), que se encuentran dentro del rango elasto-dinámico del suelo y, por ende, no ocasionan deformaciones permanentes.

Existen transductores piezoeléctricos para generar ondas compresionales o de corte, siendo los elementos de flexión quienes generan las ondas V_s y los discos las V_p . Los transductores piezoeléctricos pueden instalarse en diferentes equipos de laboratorio como cámaras triaxiales, consolidómetros y columnas resonantes. Además, son relativamente baratos y su conexión es muy sencilla (Santa Marina et al. 2001). A partir de las velocidades de cortante V_s obtenidas con los elementos piezoeléctricos, también se pueden obtener los valores de los módulos de Young (E), de rigidez al corte máximo ($G_{\text{máx}}$) y la relación de Poisson (ν).

Para llevar a cabo este trabajo, primero se realizó la instrumentación de los elementos bender, dicha instrumentación se muestra paso a paso en el anexo A. Una vez instrumentados, los elementos bender fueron colocados en el cabezal y pedestal de una cámara triaxial, después se determinó el tiempo de retardo de los elementos bender.

En el capítulo 4 se muestra cómo se preparan las muestras a ensayar y cómo se realiza el montaje del suelo en el equipo triaxial. Ya montada la muestra de suelo en la cámara triaxial se inicia en proceso de ensaye de la muestra, la cual se divide en varias etapas (saturación, consolidación y falla). Se tomaron mediciones de velocidades V_s y V_p en cada paso, esto, con la finalidad de observar su comportamiento en cada una de las etapas de la prueba.

Una vez obtenidas las señales se procedió a realizar su análisis para obtener los primeros arribos de la señal. Proceso que se llevó a cabo con un programa de Matlab, en el cual se realizó un análisis con métodos en el dominio del tiempo (visual) y métodos en el dominio de la frecuencia (matemáticos) con la finalidad de obtener los resultados de los primeros arribos más representativos.

Diversas investigaciones del suelo lacustre de la ciudad de México usando elementos bender (Flores, 2013; Vázquez, 2015; Cázarez, 2018) han estimado tanto las velocidades de ondas sísmicas como algunos parámetros dinámicos. Sin embargo, esto ha ocurrido solo en la etapa de consolidación, por ello, en este trabajo se decidió adquirir señales a lo largo de toda la etapa de falla a determinados tiempos.

1.1 Planteamiento del problema

La aplicación de cargas axiales sobre el suelo saturado da origen a la deformación de las partículas que lo constituyen y a la salida de aire o agua presente en él, dando origen al fenómeno de la consolidación y si se le siguen aplicando cargas cortantes al suelo, este es llevado a la falla. Por lo cual se quiere saber:

¿Cómo afectan los procesos de consolidación a la propagación de ondas sísmicas de cortante V_s y de compresión V_p ? ¿Cómo afectan los cambios de esfuerzos efectivo a la velocidad con la que se propagan las ondas sísmicas V_s y V_p a través de la masa de suelo? Y, de la misma forma, nos interesa conocer la variación de los módulos elásticos del suelo ante las deformaciones de este.

Esta información sería de gran importancia para la ingeniería Geotécnica, ya que con estos datos se podrían realizar estimaciones de los asentamientos del suelo y, posteriormente, se tendrían los parámetros para el diseño de cimentaciones. En la actualidad, no existe un método estandarizado para el análisis de señales sísmicas obtenidas con elementos bender, por lo que, en este trabajo se utilizaron varios métodos en el dominio del tiempo y la frecuencia, para determinar cuál es el mejor.

1.2 Objetivos

De acuerdo con lo anterior los objetivos de este trabajo son los siguientes:

- Realizar pruebas en cámaras triaxiales instrumentadas con elementos bender para medir velocidades de onda de cortante V_s y de compresión V_p .
- Observar las variaciones de las velocidades con el grado de consolidación y grado de deformación del suelo, para observar cómo son afectadas con los esfuerzos aplicados al suelo.
- Analizar la manera en la que varían los parámetros de rigidez E , G y ν durante la etapa de falla.
- Determinar qué método es mejor para el análisis de señales sísmicas obtenidas con elementos bender.

1.3 Hipótesis

- Los resultados de las velocidades de onda de cortante deben mostrar cambios significativos, cuando el suelo es deformado, por lo que su investigación debería ser muy importante y más en suelos donde se presentan sismos con frecuencia; como lo son los suelos de la Ciudad de México.
- Los métodos matemáticos, son la mejor opción para el análisis de señales de onda. Esto porque analizan las señales con mayor precisión.
- Las velocidades de onda tienen una fuerte relación con los parámetros dinámicos del suelo, por lo que analizar los módulos dinámicos con los resultados de onda, ayudará a comprender mejor la relación que existe entre las deformaciones del suelo y sus módulos dinámicos.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Ondas sísmicas

La propagación de las ondas sísmicas está determinada por la mecánica de los medios elásticos y, por tanto, sus velocidades dependen de las características elásticas del medio, cuya distribución puede estudiarse mediante la observación de los tiempos de recorrido y amplitudes de ondas. Estas se originan por la liberación de energía mecánica en un proceso de ruptura que tiene lugar en el foco de un terremoto debido a la relajación de los esfuerzos es energía de tipo elástico que se propaga a través de un medio. Existen dos tipos de ondas: ondas internas y ondas superficiales; las internas viajan en todas las direcciones y las superficiales se generan por consecuencia de las primeras (debido a la existencia de las capas superficiales).

En 1880, Poisson usó las ecuaciones del movimiento y las leyes constitutivas elásticas para mostrar que dos tipos fundamentales de ondas se propagan a través del interior de los sólidos Homogéneos: Las ondas P (ondas compresionales) y ondas S (ondas de corte) y su velocidad depende de las características del material en el que se propagan (densidad, propiedades elásticas, etc.). A continuación, se describen las ondas internas P y S.

Ondas primarias u ondas P

Ondas de compresión, también llamadas ondas primarias u ondas P, estas son ondas longitudinales que viajan es en la dirección de propagación de la onda (Figura 2.1). Son las primeras ondas en llegar y su velocidad de propagación es mayor a la de las ondas S. Estas ondas son las que menor daño causan a las estructuras ya que suelen tener amplitudes menores y generalmente inducen vibraciones verticales.

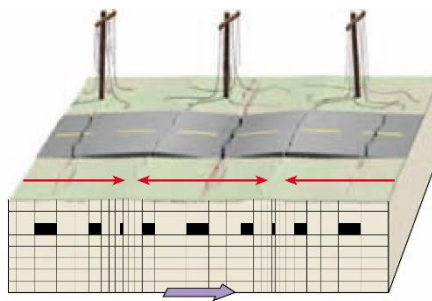


Figura 2.1 Movimiento longitudinal característico de la onda P (Figura tomada de Tarbuck, 2005)

La onda P tiene una velocidad en el agua de 1450 m/s y en un sólido de Poisson ($\nu = 0.25$) la onda P es 1.73 veces más rápida que la onda S. En la Figura 2.2 se muestran los arribos de las ondas S y P, donde la onda P es la más rápida.

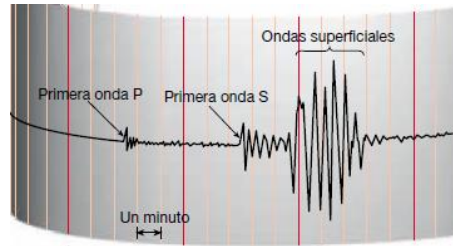


Figura 2.2 Sismograma típico que ilustra los tiempos de llegada de la onda P, S y superficiales. Las amplitudes de la onda P son pequeñas (figura tomada de Tarbuck, 2005)

Ondas secundarias u ondas S

La velocidad de onda de cortante, llamada onda secundaria u onda S, es uno de los parámetros dinámicos más importante para la caracterización de suelos. Las ondas de cortante actualmente son muy utilizadas en la ingeniería Geotécnica para calcular parámetros como el módulo de cortante G.

La onda de cortante viaja a través de las partículas sólidas del suelo con una velocidad V_s , proporcionando información muy relevante acerca de cualquier cambio que se de en la estructura interna del suelo; de ahí su importancia. Las ondas S viajan en dirección perpendicular a la dirección de propagación y producen esfuerzos cortantes, por tanto, hacen vibrar a la superficie del suelo en dirección horizontal causando muchos daños a las estructuras que se hallan orientadas en esta dirección (en la Figura 2.3 se ilustra el caso de polarización vertical).

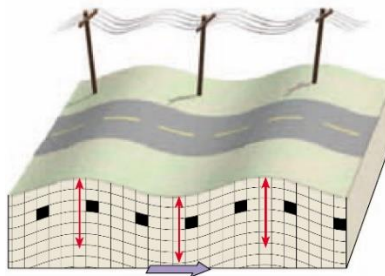


Figura 2.3 Movimiento de la onda S con polarización vertical (figura tomada de Tarbuck, 2005)

2.2 Propiedades dinámicas de los suelos

El comportamiento o respuesta que pueda tener un suelo ante cargas cíclicas está determinado por las propiedades dinámicas del suelo. Entre estas, la rigidez del suelo y el amortiguamiento son las propiedades principales para conocer la respuesta de un suelo. Desde la introducción en 1660 de la ley de Hooke, que indica una proporcionalidad entre tensión y deformación, hasta el desarrollo de ecuaciones para la teoría de la elasticidad por Navier y Cauchy en 1821-1822, la comprensión del comportamiento de los materiales sólidos ha evolucionado rápidamente.

En la actualidad gracias a pruebas de campo y de laboratorio se obtienen las propiedades dinámicas más importantes del suelo que son el módulo de cortante (G), que se calcula por medio de las velocidades de cortante V_s , el módulo de Young (E) y la relación de Poisson (ν).

2.2.1 Módulos de rigidez del suelo

Se pueden definir varios módulos a partir de los resultados de una prueba triaxial y de los resultados de velocidades de onda sísmica (V_s y V_p), en este caso se analizarán el módulo de Young (E), el cortante G, el secante (E_{sec}), el tangente (E_{tan}) y el calculado con las V_s y V_p (E_{bender}).

El módulo de Young, E, se relaciona con el módulo cortante, G, y con Poisson, ν , con la siguiente expresión:

$$E = 2(1 + \nu)G \quad (2.1)$$

La siguiente expresión matemática se utilizó para obtener el módulo de elasticidad secante:

$$E_S = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{\Delta\varepsilon_E} \quad (2.2)$$

Sustituyendo, se obtiene una expresión para el módulo de rigidez secante:

$$G_{sec} = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{2(1 + \nu)\Delta\varepsilon_E} \quad (2.3)$$

Donde:

$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$ es el diferencial de los esfuerzos aplicados al suelo, también se le conoce como el diferencial del esfuerzo desviador

ν es la relación de Poisson

$\Delta\varepsilon_E$ son las deformaciones producidas

La E_{tan} se obtuvo de la pendiente elástica de un gráfico esfuerzo-deformación (ver Figura 2.4) De la cual se trazaron varias pendientes a lo largo de las trayectorias esfuerzo deformación.

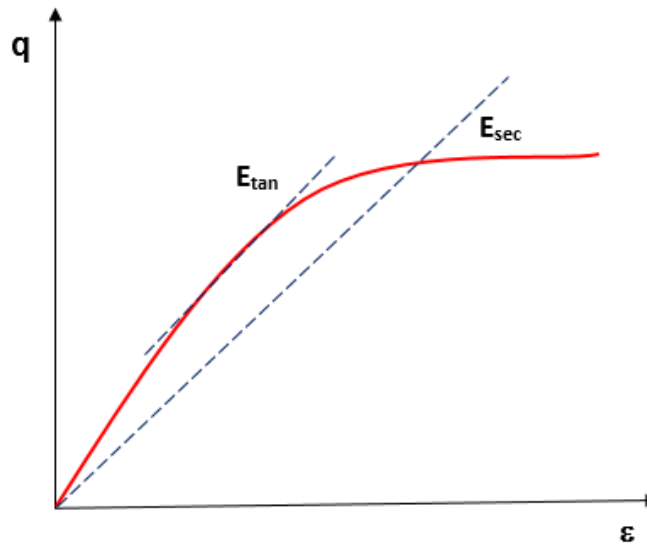


Figura 2.4 Pendientes E_{sec} y E_{tan} de una curva esfuerzo – deformación

Las velocidades de onda proveen una forma alternativa de obtener parámetros de rigidez, ya que están relacionadas con los módulos elásticos, principalmente el G que es una medida cuantitativa de la capacidad de deformación de los suelos cuando se aplican esfuerzos cortantes, es decir, es una medida de la dureza del material.

G se puede calcular con la teoría elástica y con el conocimiento de las velocidades de onda de corte V_s con la siguiente expresión:

$$G = \rho V_s^2 \quad (2.4)$$

Donde:

G es el módulo de rigidez al corte

ρ es la densidad del suelo

V_s es la velocidad de onda cortante

El cociente de Poisson es otro parámetro elástico que se define como la relación entre las deformaciones longitudinales y laterales al someter un material a un esfuerzo, y este se requiere para determinar las deformaciones unitarias del suelo.

$$\nu = \frac{\varepsilon_{radial}}{\varepsilon_{axial}} \quad (2.5)$$

Además, con los valores de las velocidades de ondas V_s y V_p , es posible calcular la relación de Poisson, con la expresión 2.6 se obtiene el valor de esta relación.

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2 \left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right]} \quad (2.6)$$

Donde:

V_p es la velocidad de onda de compresión

V_s es la velocidad de onda de corte

ν es la relación de Poisson

En la Tabla 2.1 se muestran los valores típicos de Poisson para una arcilla y arena, siendo la relación de Poisson para arcillas no drenadas un valor de 0,5 y para arcillas drenadas 0,3.

Tabla 2.1 Rango de valores típicos de la relación de Poisson (Kulhawy & Mayne, 1990)

| Suelo | Comportamiento | Relación de Poisson |
|-------------------------------|----------------|---------------------|
| Arcilla saturada | No drenado | 0,5 |
| Arcilla parcialmente saturada | | 0.2 – 0.4 |
| Arena densa | Drenado | 0.3 – 0.4 |
| Arena suelta | | 0.1 – 0.3 |

2.3 Consolidación, compresibilidad y esfuerzo de preconsolidación

Los suelos al ser sometidos a esfuerzos sufren cambios en su estructura; el grado de deformación de estos depende de los esfuerzos aplicados, propiedades del material y el tiempo. Al proceso de disminución de volumen, que es provocado por el aumento de esfuerzos sobre un suelo, se le llama proceso de consolidación.

La compresibilidad es la propiedad de los suelos de reducir su volumen cuando son sometidos a esfuerzos ($\Delta\sigma$). También es expresado como el cambio de la relación de vacíos (Δe) o cambio de volumen (Δv) por la magnitud de los esfuerzos efectivos aplicados (σ').

El esfuerzo de preconsolidación nos da información acerca de los esfuerzos que ha soportado el suelo a través de su historia geológica y tradicionalmente se ha definido como el esfuerzo máximo al cual se ha visto sometido el suelo. Este se puede encontrar con la curva de compresibilidad de un suelo ensayado, la cual se obtiene de la relación de vacíos y de los esfuerzos verticales efectivos aplicados en el suelo.

A continuación, se describen dos tipos de comportamiento:

1. Rama preconsolidada (OC) o rama estructurada
2. Rama normalmente consolidada (NC) o rama virgen. El suelo nunca ha soportado cargas efectivas superiores a las que tiene en el momento de estudio.

En la Figura 2.5 se muestra la curva que une la rama OC con la rama NC, la cual representa una transición entre la condición NC y OC, donde se obtiene el esfuerzo de preconsolidación σ'_p .

El σ'_p representa la carga máxima que el suelo ha soportado a lo largo de su historia geológica (Casagrande 1936).

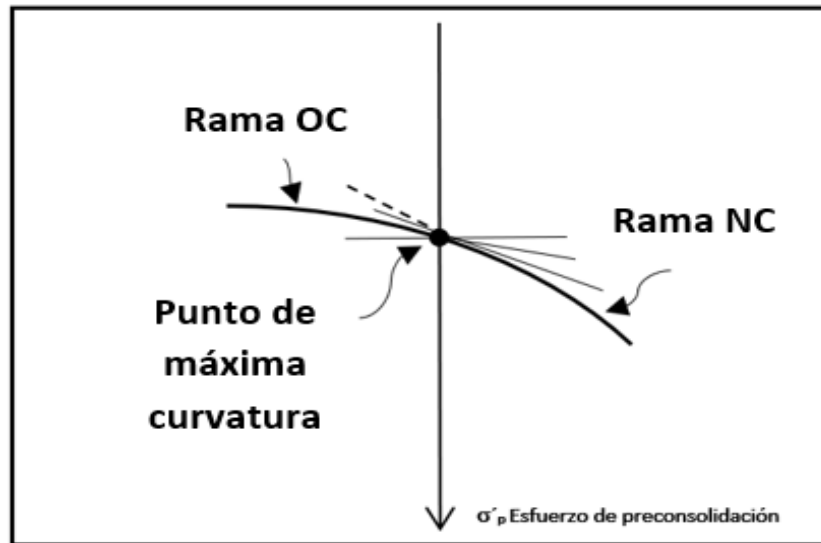


Figura 2.5 Curva de compresibilidad donde se representa la rama normalmente consolidada (NC), la preconsolidada (OC) y el esfuerzo de preconsolidación (σ'_p)

2.3.1 Comportamiento elástico

El suelo tiene un comportamiento elástico cuando se le han aplicado esfuerzos pequeños; cuando estos esfuerzos permanecen constantes a través del tiempo y son retirados e inmediatamente el suelo se recupera, se dice que el suelo tiene un comportamiento elástico. Por el contrario, si los esfuerzos siguen aumentando, el comportamiento del suelo cambia de elástico a plástico y, pasado el punto de fluencia, las deformaciones del suelo ya no se recuperan. Se dice que cuando el suelo deja de comportarse elásticamente el suelo alcanza su límite elástico o su punto de fluencia (o de cadencia).

2.3.2 Comportamiento elastoplástico

Se dice que un material es elástico-plástico o también llamado elastoplástico cuando tiene definidos los rangos y condiciones de su comportamiento elástico, así como las condiciones esfuerzo-deformación a partir de las cuales se presenta la plasticidad. Una manera de idealizar el comportamiento de algunos suelos arcillosos, como el de la Ciudad de México es considerarlo como un material elástico-plástico. Este tipo de comportamiento constituye una simplificación de lo que se observa en el laboratorio en pruebas triaxiales drenadas (CD) y en las pruebas no drenadas (CU) al aparecer el fenómeno de reblandecimiento o rigidización (ver Figura 2.6).

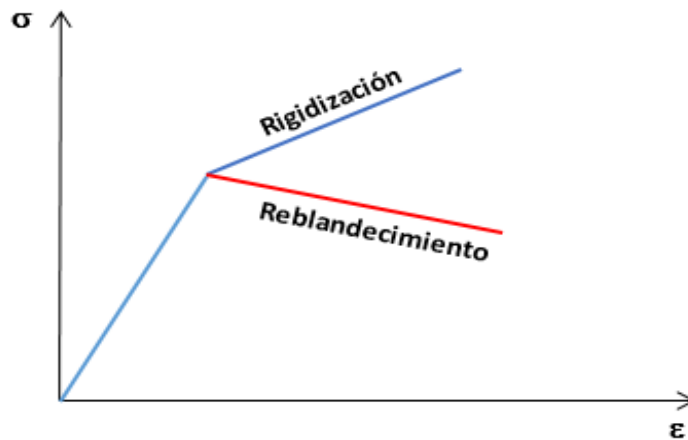


Figura 2.6 Idealización de la curva esfuerzo-deformación de un suelo en una prueba CU con comportamiento elastoplástico y de una prueba CD con comportamiento plástico

Una forma de presentar el comportamiento elastoplástico perfecto es formulada de la relación entre los tipos de deformaciones, tasas de deformación elásticas y plásticas mediante la ley de Hooke:

$$\underline{\dot{\epsilon}} = \underline{\dot{\epsilon}^e} + \underline{\dot{\epsilon}^p} \quad (2.7)$$

$$\varepsilon' = D^e \dot{\underline{\varepsilon}}^e = D^e (\dot{\underline{\varepsilon}} - \dot{\underline{\varepsilon}}^p) \quad (2.8)$$

Donde:

ε^e es la deformación elástica recuperable (elástica)

ε^p es la deformación elástica no recuperable (plástica)

D^e es la matriz de rigidez elástica del material

2.3.3 Esfuerzo de fluencia

La fluencia es asociada con la transmisión de una rigidez a otra rigidez menor. Se presenta cuando el suelo sobrepasa el rango plástico y se presentan deformaciones plásticas. En una gráfica esfuerzo-deformación ($q-\varepsilon$) de un suelo, cuando este deja de comportarse elásticamente (deformaciones recuperables); es decir que el estado de esfuerzos está dentro de la superficie de fluencia y solo se presentaran deformaciones elásticas. Por lo contrario, cuando el estado de esfuerzos está sobre la superficie de fluencia (punto de fluencia); el suelo entra a una fase elastoplástica (deformaciones no recuperables) y a este esfuerzo se le denomina esfuerzo de fluencia ver Figura 2.7.

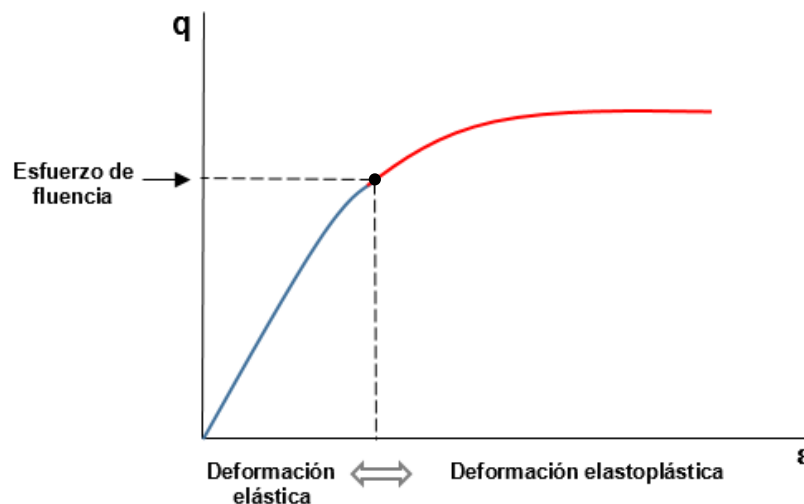


Figura 2.7 Punto de fluencia en la Curva esfuerzo-deformación, donde se muestra la deformación elástica (recuperable) y la deformación elastoplástica (no recuperable)

2.4 Piezoelectricidad

La piezoelectricidad o electricidad a presión es el fenómeno descubierto en 1880 por los hermanos Curie, que fueron los primeros en demostrar la generación de electricidad en cristales de cuarzo bien preparados como resultado de la presión mecánica. La piezoelectricidad es una propiedad de ciertos materiales dieléctricos para deformarse físicamente en presencia de un campo eléctrico, o, por el contrario, para producir una carga eléctrica cuando se deforma mecánicamente. Existe una amplia variedad de materiales que presentan este fenómeno, incluidos los cristales de cuarzo natural, el polímero de polivinilideno semicristalino, la piezocerámica policristalina, el hueso e incluso la madera.

2.5 Elementos bender

Los elementos bender están compuestos por dos placas piezocerámicas delgadas y polarizadas transversalmente, unidas entre sí, estos elementos fueron adquiridos con la empresa *Piezo System, inc.*, en la Figura 2.8 se muestra un elemento de flexión bender en bruto (de fabrica sin instrumentar). Estos elementos proporcionan pequeñas deformaciones angulares del orden de ($\gamma < 10^{-5} \%$), que es una de las ventajas más importante por las que se utilizan para evaluar al suelo. Con la ayuda de los instrumentos necesarios, un elemento bender puede vibrar y generar ondas de corte (S) y ondas de compresión (P) que viajan en el suelo mediante un pulso eléctrico.

Por otro lado, el elemento bender también se utiliza como receptor de señales. Es decir, uno es un transmisor y otro es un receptor y se utilizan en la medición de ondas. Los elementos bender actúan como sensores que se distorsionan o doblan (movimiento de flexión), cuando se someten a un cambio de voltaje. La razón del movimiento de flexión es el alargamiento y la contracción de diferenciales que dependen de la polaridad de la carga. Debido a la orientación de la cerámica piezoeléctrica, un lado del elemento bender se alarga o contrae y el lado opuesto hace lo contrario. Mientras estén fijadas entre sí, el movimiento producido se convierte en un movimiento de flexión. Por lo que el elemento de flexión se coloca en el suelo para que genere y se propaguen ondas de corte y de compresión.

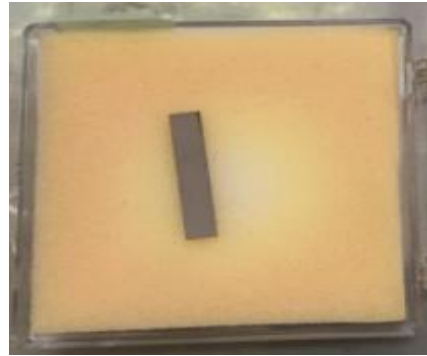


Figura 2.8 Elemento bender de flexión en bruto de fabrica sin instrumentar

2.5.1 Elementos de flexión (Vs)

Los elementos de flexión están compuestos por dos placas de piezocerámica unidas a una placa metálica (ver Figura 2.9). Al aplicarle un voltaje el elemento doblador obliga a una capa a expandirse, mientras que la otra se contrae, como se muestra en la Figura 2.10. El elemento bender de flexión se incrusta en la muestra de suelo y cuando se le aplica un voltaje este vibra y funciona como generador de ondas de cortante S, que viajan a través del suelo, donde otro elemento de flexión funciona como receptor de ondas.

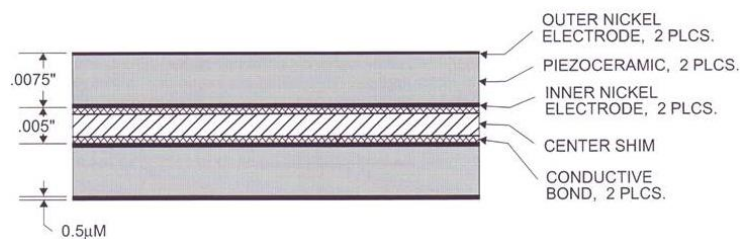


Figura 2.9 partes que componen a un elemento de flexión (PIEZO.COM)

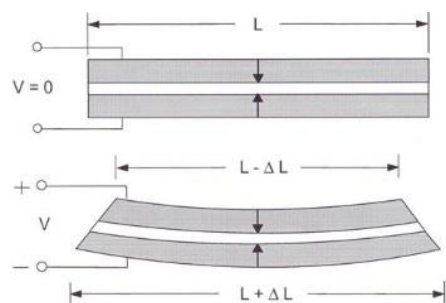


Figura 2.10 Respuesta de un elemento de flexión cuando se le aplica un voltaje (PIEZO.COM)

2.5.2 Elementos de compresión (Discos) Vp

Los elementos de compresión, al igual que los elementos de flexión, también están compuestos por dos placas piezocerámicas unidas por una placa metálica que se encuentra al centro (ver Figura 2.11). Los elementos de compresión son empotrados en un cabezal y un pedestal, quedando encima de la parte central de la muestra de suelo. Al aplicarles un voltaje estos vibran y generan una onda de compresión P, que viaja a través del suelo y es recibido por otro disco el cual funciona como receptor. En la Figura 2.12 se muestran los tamaños de los diferentes discos y en la tabla encerrado con rojo cuales son los que se utilizaron en este trabajo.

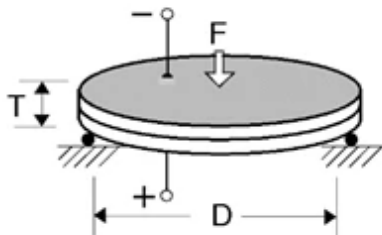


Figura 2.11 Respuesta del elemento de compresión al aplicarle un voltaje (PIEZO.COM)

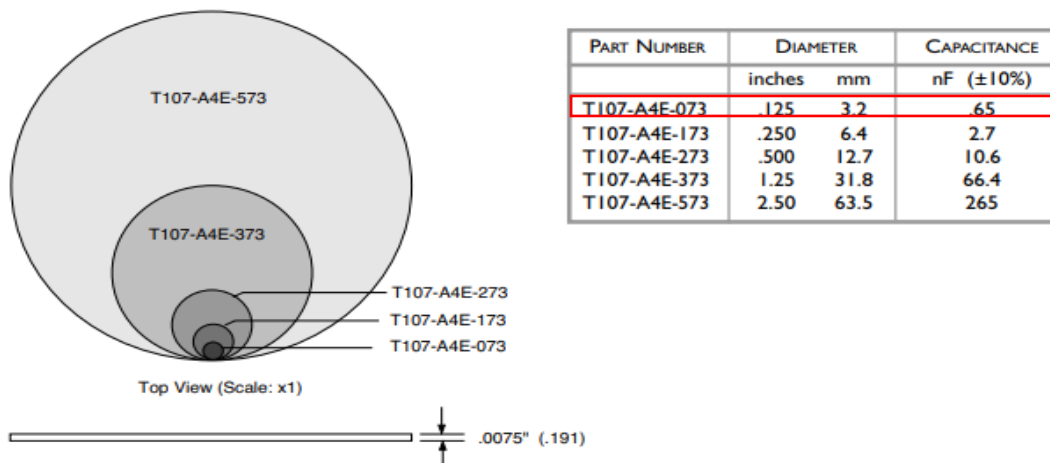


Figura 2.12 Tamaño de los elementos de compresión (Piezo System, inc)

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Antecedentes

Un importante problema de la ingeniería Geotécnica es la determinación de los esfuerzos y deformaciones que ocurren en los materiales por el efecto de cargas externas, para ello se han instrumentado diferentes equipos de laboratorio con cristales piezoeléctricos; como son la cámara triaxial para aplicar cargas monotónicas o cíclica, así como consolidómetros.

Históricamente, Lawrence (1963) fue el primero en utilizar cristales piezoeléctricos en una cámara triaxial para enviar y recibir ondas de cortante en muestras de arena y arcilla. Más tarde, Shirley y Anderson (1975) explicaron que los elementos de flexión (elementos bender) son un excelente generador y receptor de ondas cortantes. Dyvik y Madshus (1985) probaron los elementos bender en suelos saturados e introdujeron un recubrimiento epóxico en la cerámica del elemento bender, para aislarlo de la conductividad del suelo y evitar que se afectaran las señales recibidas.

Años más tarde, Jovičić et al. (1996) introdujeron una técnica para mejorar la señal recibida por los elementos bender, esta consiste en un cuidadoso blindaje de los cables que conectan los elementos, para así evitar interferencias, haciendo que las señales no requieran amplificación, filtrado o promediación de datos. También informaron que para analizar una señal de elemento bender, un pulso de onda sinusoidal es preferible a una onda cuadrada; las ondas cuadradas demostraron ser demasiado complejas para el análisis debido al amplio espectro de frecuencias que pueden resultar por el efecto de campo cercano.

La primera instrumentación de una cámara triaxial que se llevó a cabo en el laboratorio del Instituto de Ingeniería de la UNAM la realizó el Dr. Mario Flores Guzmán (Flores, 2013), quien realizó pruebas al suelo del valle de México de alta plasticidad; comparó resultados de pruebas de laboratorio con pruebas de campo, con lo que el método de obtención de velocidades utilizando cristales piezoeléctricos quedó validado, ya que los resultados de las velocidades fueron congruentes con los obtenidos con otros métodos y con los resultados de campo. Posteriormente, Díaz (2014) mediante esta técnica instrumentó un consolidómetro con el objetivo de medir velocidades de ondas sísmicas en muestras de suelo en suelos Marinos y del valle de México.

Más adelante, Vázquez (2015) ensayó muestras de suelo del lago de Texcoco las cuales fueron sometidas a pruebas CU en los equipos triaxiales instrumentados, aplicando a las probetas diferentes trayectorias de esfuerzo efectivo durante la etapa de consolidación. A lo largo de estas pruebas se tomaron lecturas de onda al final de cada incremento de esfuerzos, en las etapas de saturación y consolidación.

Por su parte, Chamorro (2016) trabajó con arcillas del ex lago de Texcoco, donde analizó el módulo al cortante (G_0), determinándolo a través de la medición de velocidades V_s , utilizando dos consolidómetros de palanca instrumentados con cristales piezoeléctricos, además realizó una comparación de sus resultados de laboratorio con resultados obtenidos en campo de una sonda suspendida, donde encontró resultados muy similares de las velocidades de onda.

En 2017, Cervantes realizó mediciones (en arcillas lacustres) de ondas de cortante a lo largo de la etapa de falla (CU), con el objetivo de observar el comportamiento de las propiedades elásticas del suelo al aplicarle carga hasta llevarlo a la falla, encontrando que al principio de la etapa de falla el suelo tuvo un comportamiento elástico, donde la velocidad de cortante tendió a aumentar, pero al llegar al pico de esfuerzo desviador, la velocidad comienza a descender de forma asintótica con respecto de la deformación.

Finalmente, Fernández y Ovando (2018) emplearon diferentes métodos en el dominio del tiempo y de la frecuencia para el análisis de señales sísmicas medidas en arcillas de ex lago de Texcoco, donde obtuvieron resultados alentadores en señales de ondas de cortante con diferentes métodos visuales y matemáticos. (Fernández & Ovando, 2018).

3.2 Descripción de las muestras de arcilla del lago de Texcoco

Para este trabajo se utilizaron muestras de arcillas lacustres del ex lago de Texcoco que fueron extraídas por medio de sondeos a diferentes profundidades y con la ayuda de tubos muestreadores de pared delgada, para el proyecto del que sería el nuevo aeropuerto internacional de México (NAIM).

El sitio estudiado se encuentra en la zona III (zona de lago) de la zonificación geotécnica del artículo 170 del capítulo VIII del título sexto del reglamento de construcción. El suelo se caracteriza por estar constituido por sedimentos finos (arcillas principalmente), con un alto contenido de agua y alta plasticidad (ver Figura 3.1) donde se muestra la ubicación de extracción de las muestras.

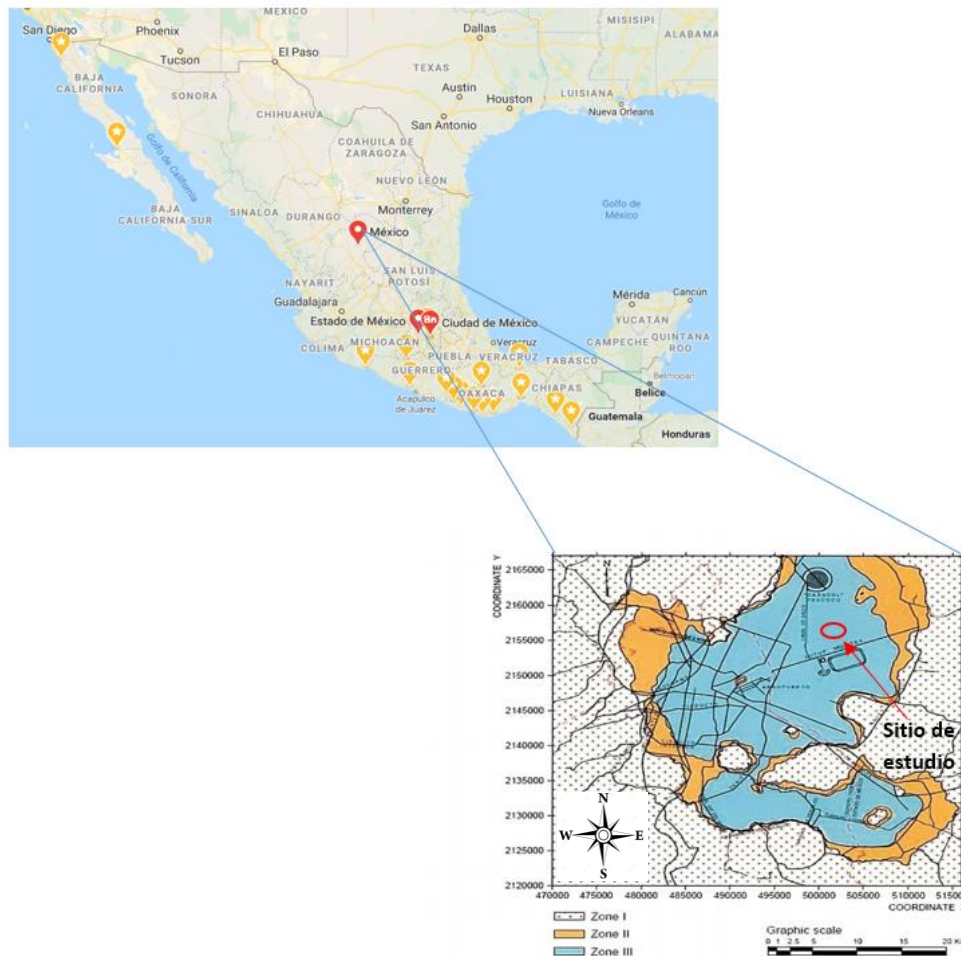


Figura 3.1 Sitio donde se extrajeron las muestras de estudio (figura editada de vista satelital y de Normas Técnicas complementarias para diseño y construcción Cimentaciones, Reglamento de Construcción del Distrito Federal, 2004)

Las muestras que se trabajaron pertenecen a los sondeos SM-TP 23, con una profundidad de 4.05 – 4.65 metros y TBH-430 de 9.3 – 9.9 metros.

3.3 Muestras ensayadas

En la Tabla 3.1 se muestra un resumen de las condiciones en las que se ensayaron los especímenes que se emplearon en esta investigación. Del sondeo SM-TP 23 se trabajaron dos muestras gemelas y cuatro para el sondeo TBH-430. Por lo que las muestras ensayadas para cada sondeo tienen la misma profundidad. También se da una descripción de cada una de las muestras y con qué elementos se midieron las ondas sísmicas Vs y Vp.

Tabla 3.1 Resumen de cómo fueron ensayados cada uno de los sondeos trabajados SM-TP-23 y TBH-43

| Sondeo | Muestra | Profundidad (m) | Consolidación | | | Tipo de falla | | | Descripción | Elementos bender | | Discos |
|----------|---------|-----------------|---------------|------------|----|---------------|----|----|--|------------------|----|--------|
| | | | Isótropa | Anisótropa | K= | NC | PC | CU | | CD | Vs | |
| SM-TP-23 | M-10 | 4.05-4.65 | x | | 1 | x | | x | Arcilla color gris-verde | x | | x |
| SM-TP-23 | M-10 | 4.05-4.65 | x | | 1 | | x | x | Arcilla color negra | x | | x |
| TBH-430 | M-20 | 9.3-9.9 | x | | 1 | x | | x | Arcilla café- verde con intercalaciones de arena | x | | x |
| TBH-430 | M-20 | 9.3-9.9 | x | | 1 | | x | x | Arcilla verde con presencia de arena | x | | x |
| TBH-430 | M-20 | 9.3-9.9 | x | | 1 | x | | x | Arcilla verde claro- café y verde oscuro. | x | x | |
| TBH-430 | M-20 | 9.3-9.9 | x | | 1 | | x | x | Arcilla verde claro y verde oscuro. | x | x | |

Además, a cada uno de los sondeos trabajados se les determinaron los límites de consistencia o límites de Atterberg, los cuales nos ayudan a identificar y clasificar a los suelos cualitativamente, se obtuvo el límite líquido, límite plástico (de acuerdo con la Norma ASTM D4318), la densidad de sólidos (ASTM D854) y el porcentaje de saturación de las muestras (ASTM D4959-94). También se calculó el índice de plasticidad y el índice de liquidez con las expresiones 3.1 y 3.2. En la Tabla 3.2 se resumen las propiedades índice de los sondeos ensayados.

$$I_P = W_L - W_P \quad (3.1)$$

$$I_L = \frac{W - W_P}{I_P} \quad (3.2)$$

Tabla 3.2 Propiedades índice de los sondeos trabajados SM-TP-23 y TBH-430.

| Propiedades índice y límites de consistencia de los sondeos ensayados | | | | | | | | | | |
|---|---------|-------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Sondeo | Muestra | Código de muestra | Contenido natural de agua | Límite líquido W_L (%) | Límite plástico W_P (%) | Índice de liquidez IL | Índice de plasticidad IP | Densidad de sólidos (%) | Peso volumétrico (g/cm^3) | Grado de saturación % |
| SM-TP-23 | M-10 | A1 | 123.52 | | | 0.746 | | | 1.39 | 100 |
| SM-TP-23 | M-10 | A2 | 160.92 | 142.8 | 66.91 | 1.239 | 75.89 | 3.5 | 1.3 | 98.77 |
| TBH-430 | M-20 | B1 | 203.7 | | | 0.630 | | | 1.32 | 100 |
| TBH-430 | M-20 | B2 | 207.4 | 284 | 66.87 | 0.647 | 217.13 | 2.8 | 1.25 | 99.06 |
| TBH-430 | M-20 | B3 | 202.8 | | | 0.626 | | | 1.32 | 100 |
| TBH-430 | M-20 | B4 | 212.74 | | | 0.672 | | | 1.21 | 95.73 |

3.4 Ensayo triaxial

La finalidad de este ensayo es obtener parámetros de la relación esfuerzo-deformación y la resistencia de los suelos en condiciones drenadas y no drenadas. Estas son pruebas en las que se puede variar las presiones actuantes en tres direcciones ortogonales sobre un espécimen de suelo, realizando mediciones sobre sus características mecánicas en forma completa. Los ensayos triaxiales de este trabajo fueron realizados de acuerdo con las normas ASTM D 4767-95 y D 2850-82.

A continuación, se enlistan algunas de las características de este ensayo:

- Los especímenes de suelo estudiado son de forma cilíndrica y están sujetos a presiones laterales de un líquido (agua) y se protegen con una membrana de látex impermeable.
- La muestra de suelo se confina con una cámara cilíndrica de Lucita, con bases metálicas.

- En la base inferior y superior de la muestra se colocan piedras porosas, las cuales tienen comunicación con una bureta externa, con la cual se mide la cantidad de agua que entra o sale de la muestra.
- Si la muestra está saturada los volúmenes de agua entrantes o salientes son iguales a los cambios de volumen que sufre el suelo.
- El agua de la cámara puede adquirir cualquier presión con la ayuda de un compresor.
- El esfuerzo axial que se aplica al suelo es por medio de un vástago que se encuentra en la parte superior de la cámara.

Tipos de pruebas que se realizan en un equipo triaxial:

Prueba rápida – sin consolidación y sin drenaje (UU)

En esta prueba no se permite en ningún momento la consolidación de la muestra de suelo. La válvula de comunicación entre el suelo y la bureta permanece siempre cerrada, impidiendo el drenaje. Primero se aplica una presión hidrostática y, de inmediato, se hace fallar a la muestra de suelo, con la aplicación rápida de la carga axial. Otra característica de esta prueba es que los esfuerzos efectivos de esta prueba no se conocen, pues normalmente no se mide la presión de poro, ni tampoco su distribución, en ningún momento; sea anterior o durante la aplicación de la carga axial.

Prueba lenta - consolidada drenada (CD)

Una característica principal de esta prueba es que los esfuerzos totales son también efectivos, pues durante el transcurso del ensaye no hay acumulación de presión de poro. Primero se somete al suelo a una presión hidrostática (σ_c), teniendo abierta la línea que va a la bureta y dejando transcurrir el tiempo necesario para que se lleve a cabo la consolidación bajo la presión actuante. Cuando el equilibrio estático interno se haya restablecido, todas las fuerzas exteriores estarán actuando sobre la muestra del suelo, es decir, producen esfuerzos efectivos; en tanto que los esfuerzos neutrales en el agua corresponden a la condición hidrostática. Después la muestra se lleva a la etapa de falla aplicando una carga axial, en pequeños incrementos, cada uno de los incrementos se mantiene el tiempo necesario para que la presión en el agua se reduzca a cero. Este ensaye se realiza principalmente en suelos granulares (arenas), sin embargo, se puede aplicar en suelos finos, pero estos requieren tiempos muy prolongados de hasta semanas.

Prueba rápida – consolidada no drenada (CU)

En esta prueba, el espécimen de suelo se consolida primero bajo presión hidrostática σ_c ; como en la primera etapa de la prueba anterior; así, el esfuerzo σ_c llega a ser efectivo σ'_c , actuando sobre la fase sólida del suelo. La muestra es llevada a la falla por un rápido incremento axial, de manera que no se permita cambio de volumen en el espécimen de suelo. El hecho esencial de este tipo de prueba es no permitir ninguna consolidación adicional durante la falla. Esto se logra cerrando las válvulas de salida de las piedras porosas a la bureta. Midiendo la presión de poro durante el desarrollo de la prueba, se pueden conocer los esfuerzos efectivos.

3.4.1 Equipo triaxial

La cámara triaxial permite realizar pruebas triaxiales estáticas a carga y desplazamiento controlado. Su operación es semiautomática y se pueden realizar pruebas no consolidada no drenada (UU), consolidada drenada (CD) y consolidada no drenada (CU), de acuerdo con la norma ASTM D 2850-82. La primera letra se refiere a la etapa I o etapa de consolidación, es decir, no consolidada (U) o consolidada (C). La segunda letra se refiere a las condiciones de drenaje, es decir, si esta es no drenada (U) o drenada (D).

Este equipo está compuesto por un sensor de presión de poro, un sensor de contrapresión, un sensor de confinamiento, un transductor de cambio volumétrico, un transductor de desplazamiento (LVDT), una celda de carga sumergible, un cabezal y un pedestal (ver Figura 3.2).

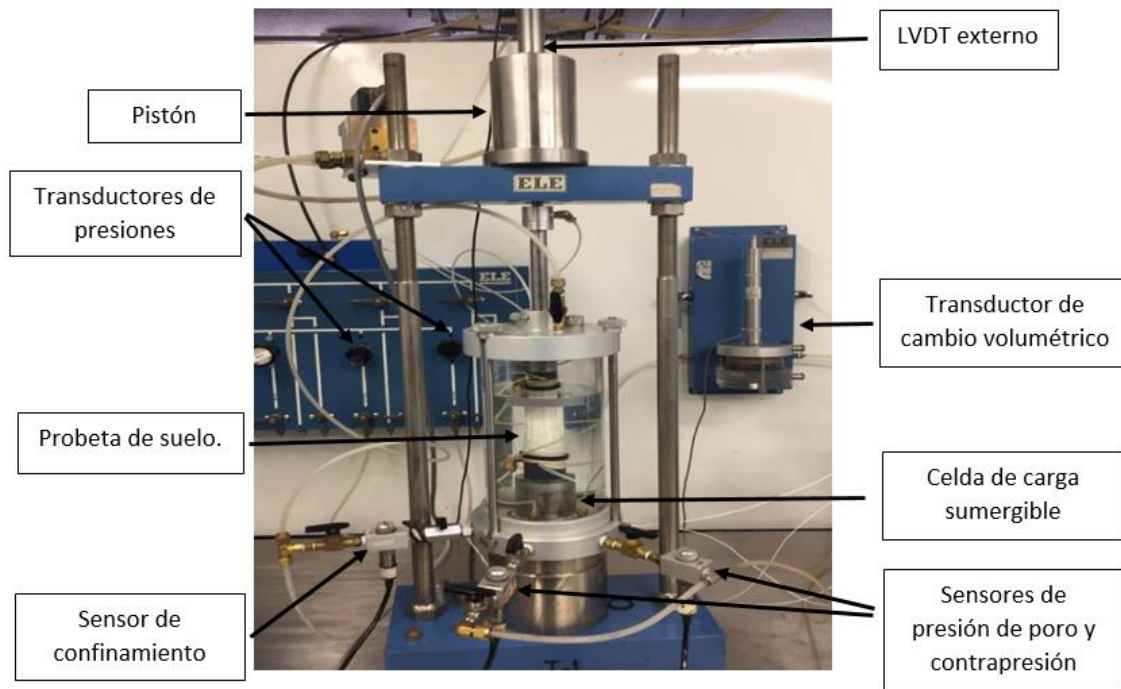


Figura 3.2 Componentes de la Cámara triaxial

A continuación, se describen cada uno de los componentes de la cámara triaxial:

- Sensor de presión DRUCK LTD modelo PDCR 810, con un rango de 7 bars (700 kPa), este mide la contrapresión al interior de la muestra.
- Sensor de presión DRUCK LTD modelo PDCR 810, con un rango de 7 bars (700 kPa), mide la presión confinante que es controlada por un regulador en forma manual.
- Transductor de cambio volumétrico modelo 27-1641, con un rango de 80 cm³.
- Transductor de desplazamiento LVDT modelo E1000, registra la deformación axial externa.
- Celda de carga sumergible OMEGADYNE, modelo LCUW-250, registra la carga aplicada (axial).
- Cabezal y pedestal instrumentados con cristales piezoeléctricos para medir velocidades de ondas en el suelo.

3.5 Cristales piezoeléctricos en el equipo triaxial

Para realizar los experimentos se utilizarán dos tipos de cristales piezoeléctricos, PSI-5H4E (elemento de flexión) y PSI-5A4E (disco), ambos fabricados por Piezo System, inc. El elemento bender de flexión mide las ondas Vs y un disco mide las ondas Vp.

Estos cristales se utilizan en pares, donde uno funciona como emisor y otro como receptor. La forma en la que se coloquen en el suelo no importa, ya sea en la parte superior o inferior, ya que el arreglo no influye en los resultados.

Los elementos bender se colocan en la cámara triaxial estática, la cual fue adaptada y acondicionada para su colocación; consistió en diseñar y modificar la base de la cámara con glándulas (graseras) para pasar los cables coaxiales de los elementos bender del interior de la cámara al exterior y posteriormente realizar su conexión (ver Figura 3.3).

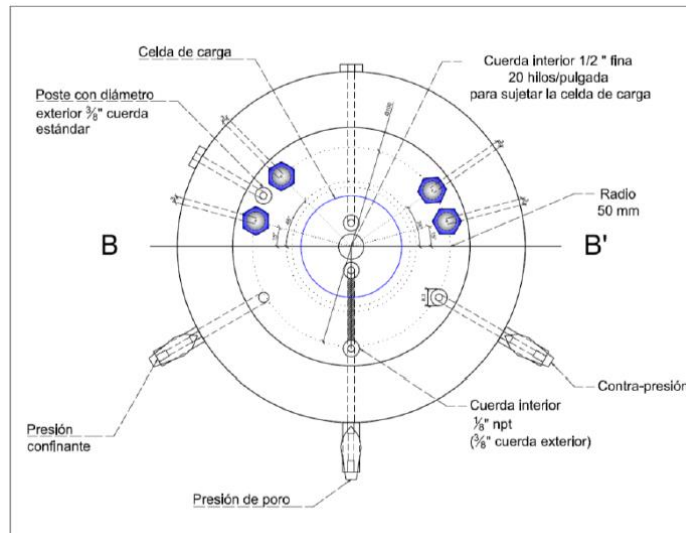


Figura 3.3 Modificación en la base de la cámara triaxial para la salida de los cables coaxiales que están conectados a los cables piezoeléctricos (Flores, 2013)

Para colocar los elementos bender en la cámara triaxial se requirió de la elaboración de un cabezal y un pedestal con un diámetro de 3.2 centímetros (ver Figura 3.4). Su construcción se realizó en el taller mecánico de la Secretaria Técnica del Instituto de Ingeniería.

El cabezal y pedestal se fabricaron con un material llamado “Nylamid”, el cual es ligero y fácil de moldear en comparación con la lucita, y no presenta reacción química como en otro material (Flores, 2013).

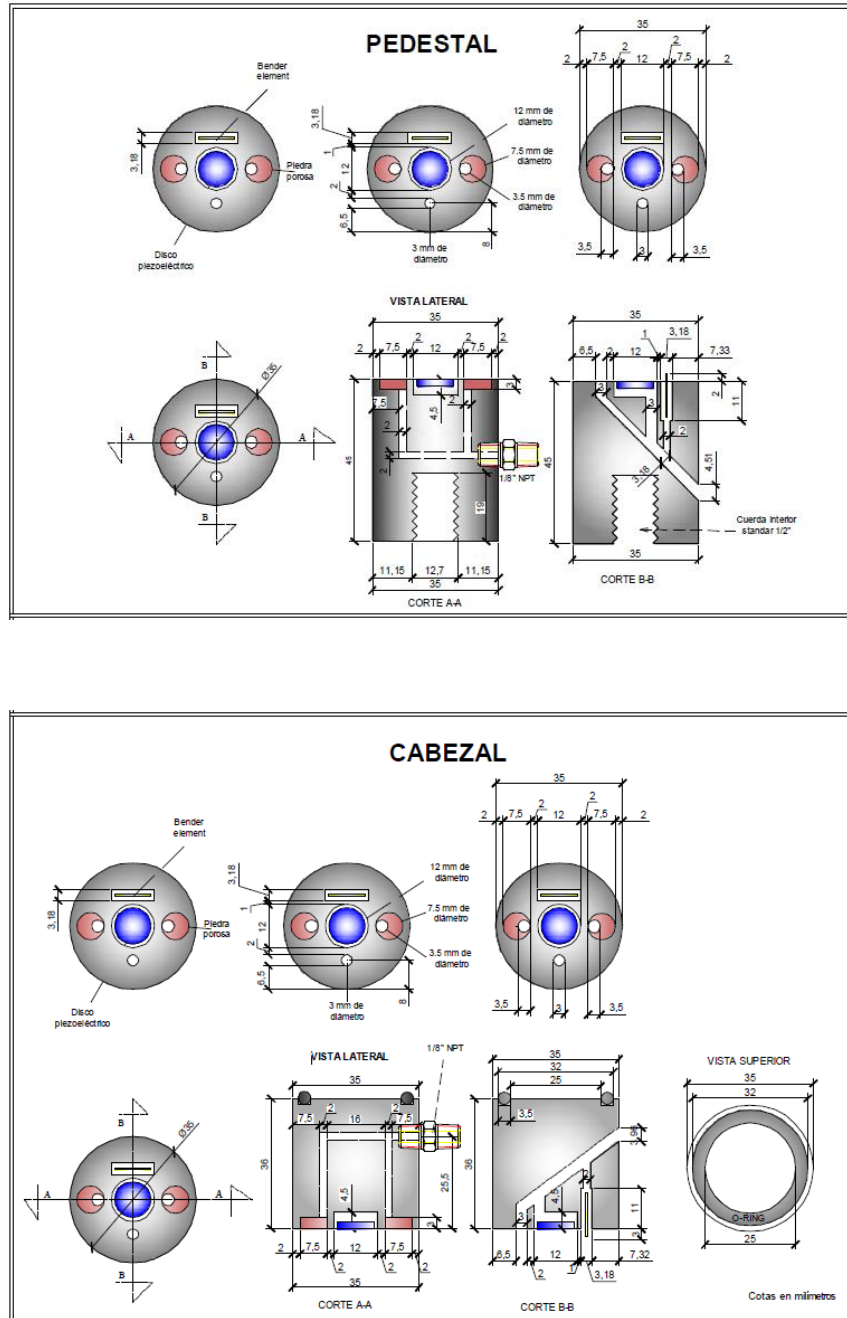


Figura 3.4 Diseño del cabezal y pedestal de nylamid para equipo triaxial (Flores, 2013)

3.6 Instrumentación de cabezal y pedestal con elementos bender

Una vez fabricados los elementos bender, estos se colocan en pares en cada cabezal y pedestal de la cámara triaxial, donde se aplica una resina epóxica que evita que se filtre agua del suelo a los cables coaxiales provocando un corto circuito. Ya seca la resina se realiza la conexión de los cables coaxiales a los cables que van conectados a los equipos que generaran y almacenaran las señales de onda sísmica. En la Figura 3.5 se muestra el procedimiento de la instrumentación del cabezal y pedestal con los elementos bender.



Figura 3.5 Instrumentación de cabezal y pedestal con los elementos bender; a) elementos de flexión instrumentados, b) elementos de compresión instrumentados, c) colocación de elementos bender en el cabezal y pedestal, d) colocación de resina epóxica, e) secado de resina epóxica, f) conexión de cables coaxiales y g) cabezal y pedestal instrumentados

En el anexo A se muestra detalladamente la instrumentación de los elementos bender de flexión y de compresión, instrumentación que se lleva a cabo antes de ser colocados en el cabezal y pedestal.

3.7 Determinación del tiempo de retardo

El tiempo de retardo afecta la velocidad real de las ondas sísmicas y es causado por el equipo electrónico utilizado, los cristales piezoeléctricos y el cable coaxial (Flores, 2013). Para calcular el tiempo de retardo que existe entre la señal emisora y receptora ($t_{retardo}$), es necesario poner en contacto los elementos bender de flexión y compresión como se muestra en la Figura 3.6. Después se hace uso del sistema de adquisición de velocidades de onda sísmica para emitir, recibir y almacenar las señales senoidales de retardo.

Es importante mencionar que esto se realiza antes de la colocación de los elementos de flexión en el cabezal y pedestal, ya que, si se colocaran primero los dichos elementos, sería imposible realizar el tiempo de retardo, dado que ya no existiría contacto entre ellos; por lo que primero se determina el tiempo de retardo de los elementos de compresión (discos).



Figura 3.6 Determinación del tiempo de retardo de los elementos de compresión (izquierda) y determinación del tiempo de retardo de los elementos de flexión (derecha)

En la Figura 3.7 se muestran las señales emisora y receptora del tiempo de retardo de elementos de flexión en contacto directo, con una frecuencia de 4 kHz, donde se obtuvo un tiempo de retardo de 5 μ s.

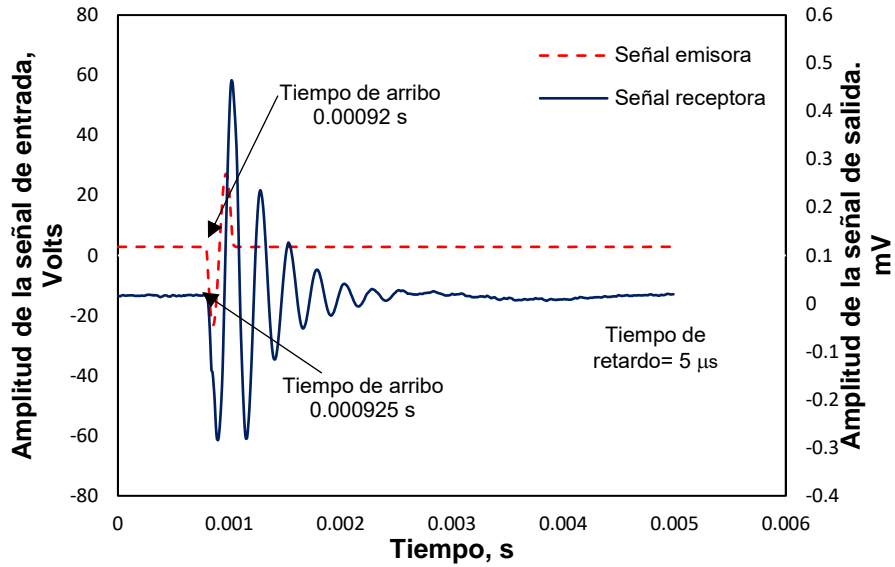


Figura 3.7 Señales del tiempo de retardo de elementos de flexión, con una frecuencia de 4 kHz

En la Figura 3.8 se muestran las señales emisora y receptora del tiempo de retardo de elementos de compresión (discos), adquiridas con frecuencias de 40 kHz. Obteniendo un tiempo de retardo de 9 μ s.

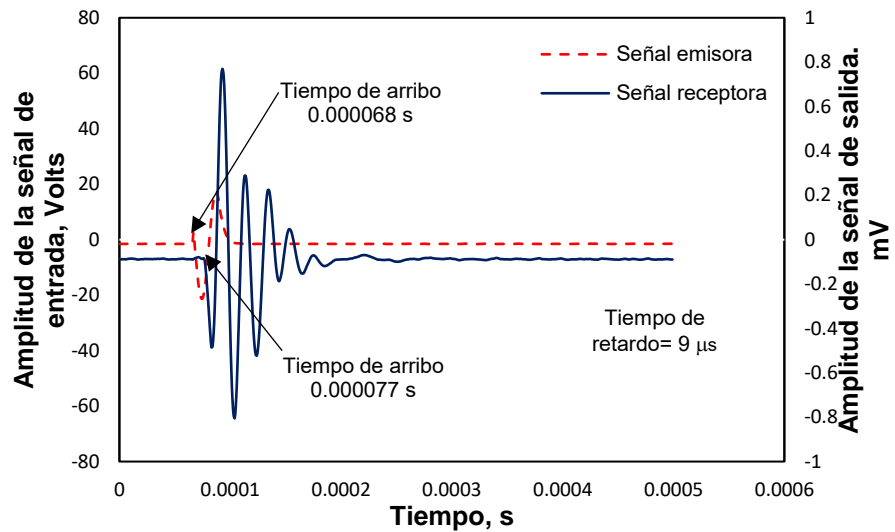


Figura 3.8 Señales del tiempo de retardo de elementos de compresión (Disco), con una frecuencia de 40 kHz

Se utilizaron frecuencias de 3 a 7 kHz, para determinar el tiempo de retardo de los elementos de flexión. En la Figura 3.9 se presentan los tiempos de retardo al variar la frecuencia en los elementos de flexión, donde se observa una tendencia lineal.

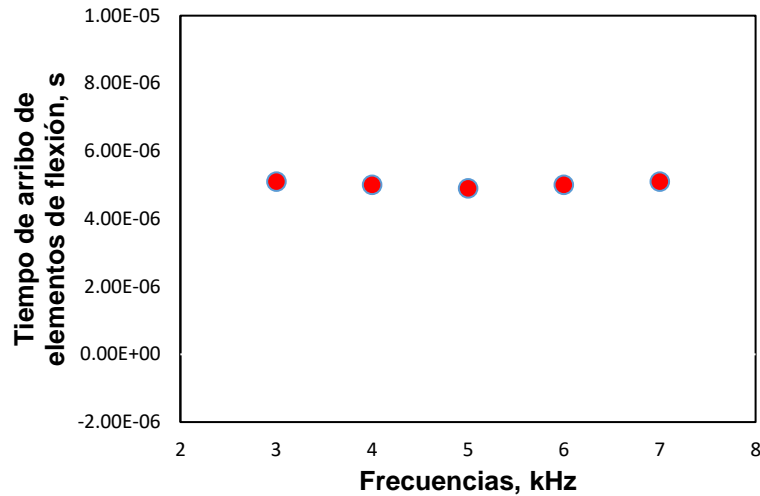


Figura 3.9 Tiempos de retardo al variar las frecuencias de 3 a 7 kHz en los elementos de flexión

En la Figura 3.9 también se muestran los resultados del tiempo de retardo al variar la frecuencia de 40 a 70 kHz de los elementos de compresión, donde se obtuvieron valores muy cercanos a 9 μ s.

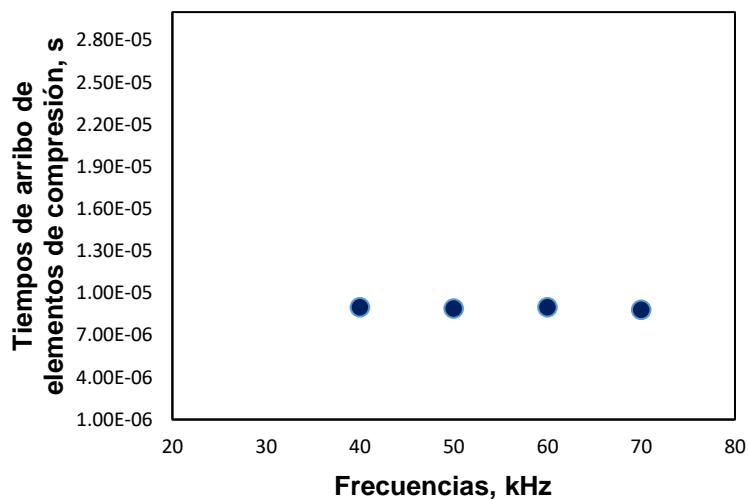


Figura 3.10 Tiempos de retardo al variar las frecuencias de 40 a 70 kHz en los elementos de compresión (Discos)

3.8 Equipo de adquisición de velocidades de onda sísmica

En esta investigación se realizó la adquisición de señales de onda sísmica, se utilizó un generador de funciones, un osciloscopio para ver las señales en tiempo real, un programa para la adquisición de datos y un software para el procesado de las señales sísmicas (ver Figura 3.11).

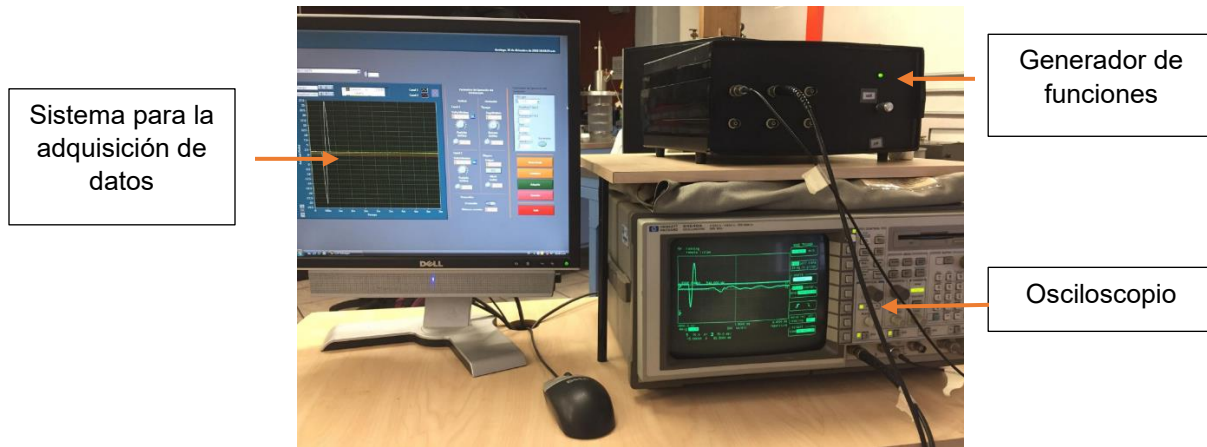


Figura 3.11 Equipo de adquisición de señales sísmicas

A continuación, se describen cada uno de estos equipos:

Generador de funciones

El generador de funciones que se utiliza en este trabajo es del modelo Wavetek 175. Este se encarga de generar una señal eléctrica que recibe el cristal emisor, el cual genera un movimiento mecánico en el cristal provocando que una onda viaje a través de la muestra de suelo y sea recibida por el cristal receptor. Este puede aplicar hasta frecuencias de 800 kHz (ver Figura 3.12).



Figura 3.12 Generador de funciones modelo Wavetek 175

Osciloscopio

El osciloscopio digital es un modelo HP HEWLETT PACKARD 54540A (ver Figura 3.13). En él se visualiza en tiempo real la señal emisora y receptora que viajan en la muestra de suelo generadas por el generador de funciones descrito anteriormente, el cristal piezoeléctrico genera una señal eléctrica la cual se visualiza en una gráfica. Este cuenta con dos canales de entrada, uno conectado al generador de funciones y otro al cristal receptor. Las señales que se reciben son de forma senoidal y son guardadas en el equipo de cómputo para realizar su posterior análisis.

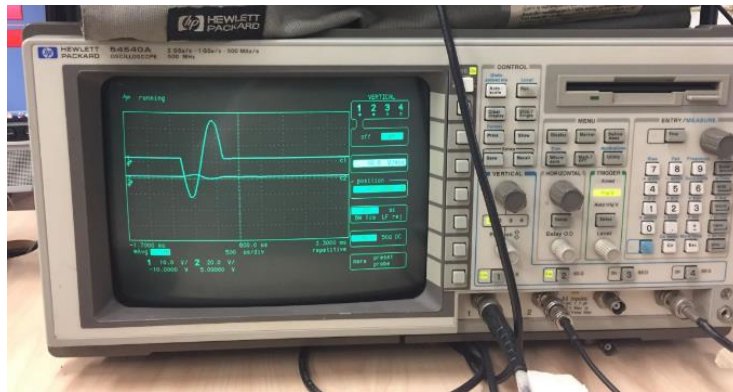


Figura 3.13 Osciloscopio digital modelo HP HEWLETT PACKARD 54540A

Software de adquisición de datos

Fue diseñado por el área de Geotecnia y la coordinación de instrumentación del Instituto de Ingeniería de la UNAM. El programa LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) se encarga de generar, adquirir y guardar las señales de onda sísmica. Con él le ordenamos al generador de señales cuántos Hz y Volts se envían al cristal emisor, para que los reciba el cristal receptor. Además, se le ordena al programa guardar las señales obtenidas con los cristales piezoeléctricos, para su posterior análisis. En la Figura 3.14 se muestra la pantalla del programa en ejecución.

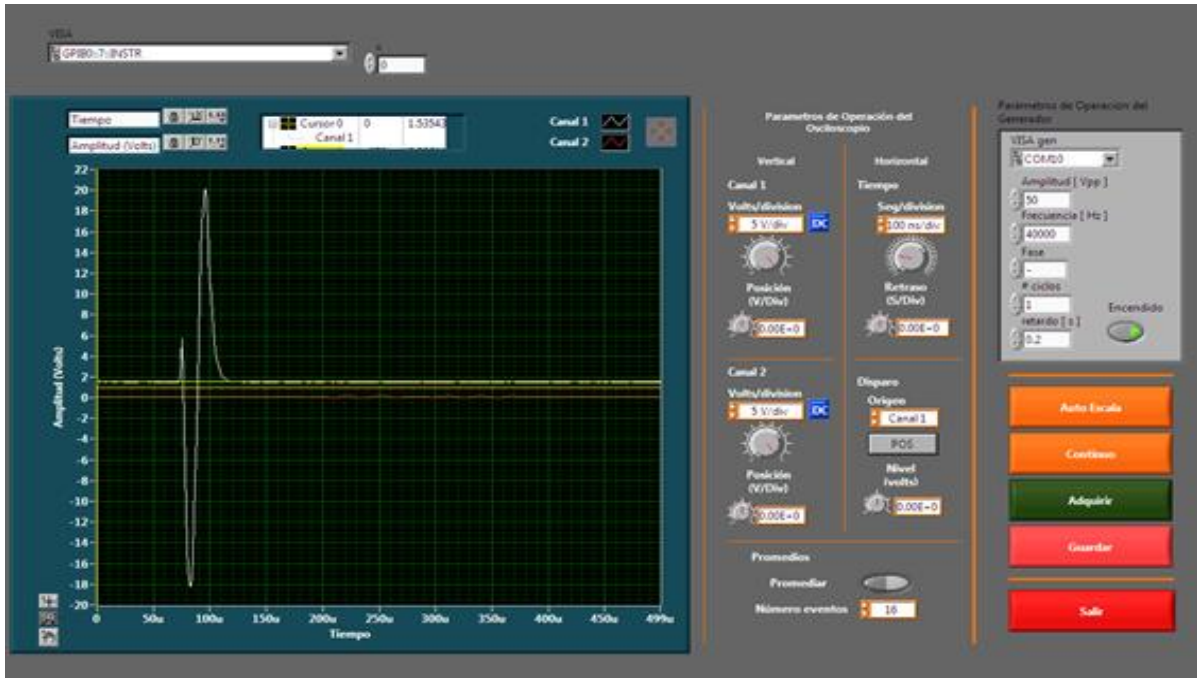


Figura 3.14 Software en operación LabVIEW

3.9 Software para el procesamiento de las señales sísmicas

Para el análisis de señales sísmicas se utilizó un programa diseñado en MATLAB, realizado por el doctor Fernández Lavín, el cual permite analizar las señales en el dominio del tiempo, frecuencia y tiempo-escala (Fernández A. , 2020).

El programa trabaja de manera semiautomática; al introducir los datos de la señal manualmente se eligen los puntos de interés en la señal a trabajar, además de realizar los cálculos matemáticos de las transformadas de Fourier y transformadas Wavelets continuas, guardando y graficando los resultados en una hoja trabajada de Excel. En la Figura 3.15 se muestra la señal emisora y receptora, donde con puntos de colores se señalan los arribos calculados con cada método analizado.

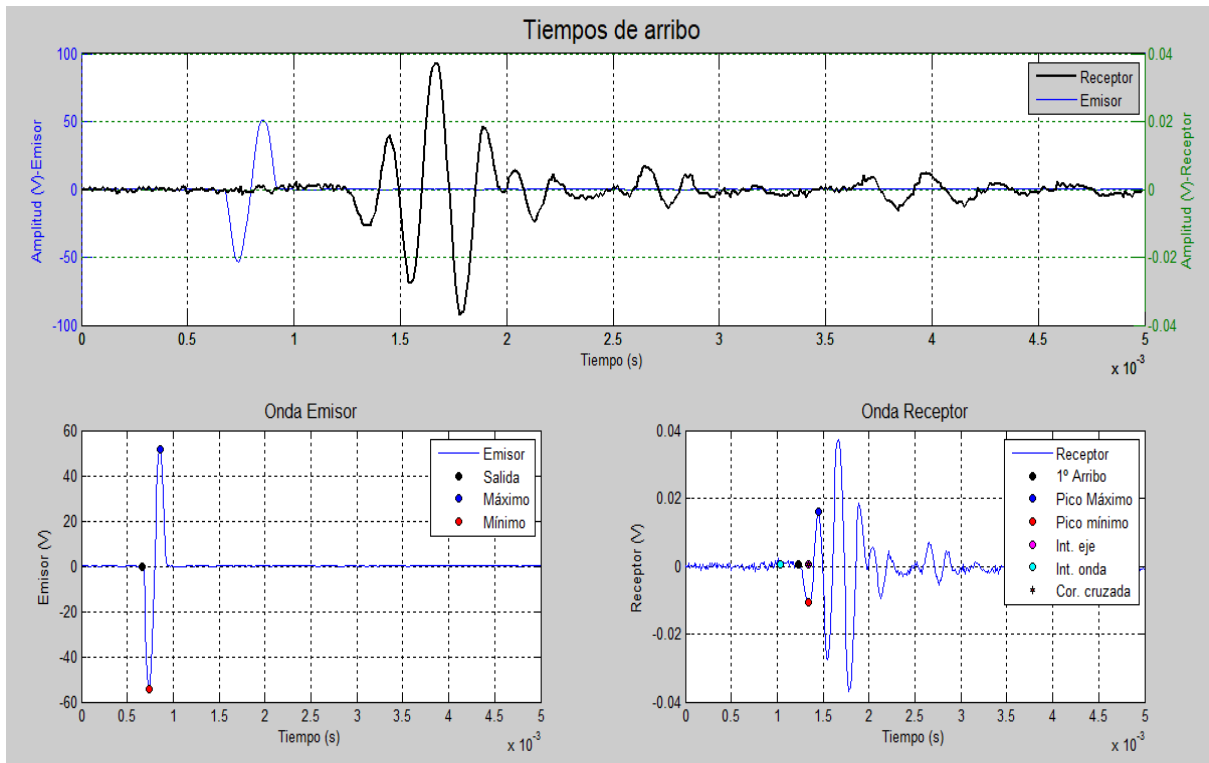


Figura 3.15 Señal emisora y receptora en programa TIEMPOS ARRIBO_BE_IIUNAM los puntos de colores indican los arribos de la señal obtenidos con cada método

3.10 Métodos para determinar el tiempo de arribo de las ondas

En la actualidad no se tiene un método estandarizado para la determinación del tiempo de arribos de la señal sísmica obtenidas con elementos bender, por lo que varios autores han discutido diferentes métodos de interpretación como (Viggiani & Atkinson, 1995; Greening, P, *et al.*, 2003; Viana, A, *et al.*, 2009; Airey & Mohsin, 2013; Fernández & Ovando, 2018). En esta investigación se analizan las señales con seis diferentes criterios para definir cuál es el más representativo y la diferencia global que existe en cada método. Se analizaron cuatro métodos en el dominio del tiempo y dos en el de la frecuencia.

Los análisis en el dominio del tiempo (métodos visuales), se basan en las mediciones directas que hay del tiempo de puntos característicos de la señal emisora y receptora. El análisis se realiza por medio de gráficos de las señales en función del tiempo. Los cuatro métodos empleados se enuncian a continuación:

- Primera deflexión
- Pico- pico máximo

- Pico-pico mínimo
- Primer arribo.

En los análisis en el dominio de la frecuencia (métodos matemáticos), se requiere la transformación de las señales obtenidas en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Los dos métodos en el dominio de la frecuencia que se usaron en este trabajo son:

- Correlación cruzada
- Transformadas Wavelets continuas.

Los métodos para determinar el tiempo de arribo de las ondas de compresión (V_p) y de corte (V_s) se describen a continuación.

3.10.1 Primera deflexión

Este método es intuitivo, siendo el más fácil de analizar, consiste en la medición del tiempo que hay entre la señal emisora y la primera deflexión importante de la señal receptora (ver Figura 3.16). Este método asume un frente de ondas planas en ausencia de ondas reflejadas o refractadas a través de la probeta de suelo. (Arulnathan, *et al.*, 1998)

Una desventaja de este método es que muy frecuentemente la llegada de la primera deflexión es enmascarada por el ruido por efectos del campo cercano u otras interferencias.

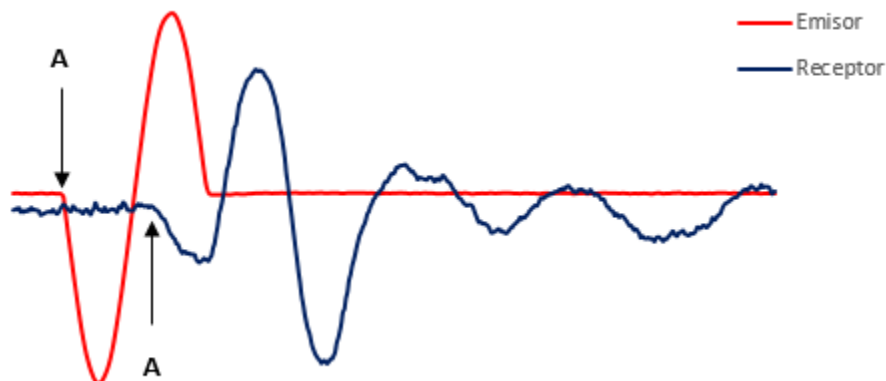


Figura 3.16 Identificación del tiempo de arribo con el método de la primera deflexión (A-A)

3.10.2 Pico-pico mínimo y máximo

Este método también asume el mismo principio de ondas planas y ausencia de ondas reflejadas. Consiste en la suposición de que la señal recibida tiene una gran similitud con la señal transmitida, midiendo el tiempo de puntos casi idénticos de la señal emisora y receptora, el cual es tomado como el tiempo de viaje de la onda (ver Figura 3.17).

La ventaja de este método es la facilidad de ubicar estos puntos y la desventaja es cuando la señal tiene varios picos consecutivos de muy pequeñas diferencias de amplitud ya que esto lo hace difícil de interpretar.

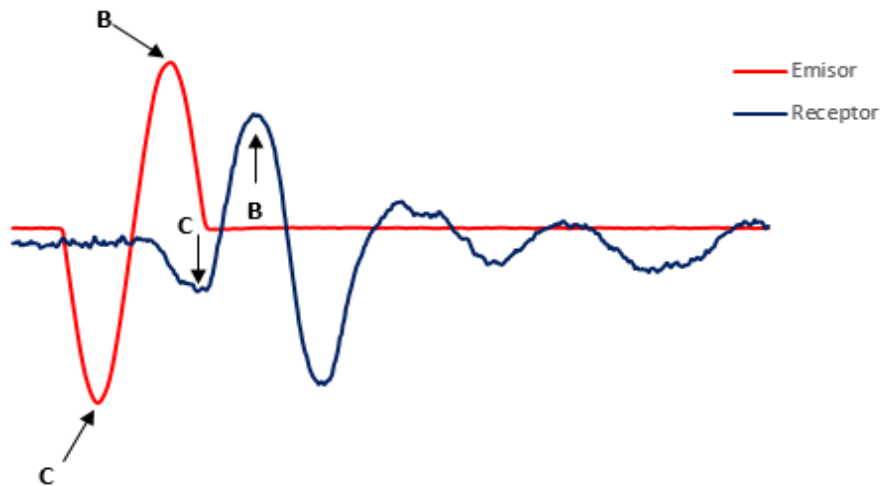


Figura 3.17 Identificación de puntos de interés pico-pico máximo (B-B), pico-pico mínimo (C-C)

3.10.3 Correlación cruzada

Este método fue utilizado por primera vez por Viggini & Atkinson (1995), quienes analizaron señales obtenidas con elementos bender en suelos. El método mide el grado de interdependencia o similitud de dos señales (emisora y receptora), si las señales no cumplen con este requisito los resultados obtenidos por correlación cruzada pueden ser erróneos, la correlación cruzada se expresa de la siguiente manera:

$$CC_{TR}(t_s) = \lim_{T_r \rightarrow \infty} \frac{1}{T_r} \int_{T_r} T(t + t_s)R(t)dt \quad (3.3)$$

Donde T_r es el registro de tiempo y t_s es el cambio de tiempo entre la señal emisora y receptora.

Para utilizar este método es necesario convertir las señales del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, por lo que la descomposición de las señales produce grupos de ondas armónicas con amplitud y frecuencia conocidas. Se trabaja con la transformada rápida de Fourier (FFT) e inversa de la transformada de Fourier (IFFT).

$$DT(t) \xrightarrow{FFT} DT(\omega) \xrightarrow{IFFT} DT(t) \quad (3.4)$$

El análisis de correlación cruzada se basa en la suposición de que el tiempo de viaje (t_{cc}) es igual al cambio de tiempo (t_s) correspondiente para la siguiente ecuación.

$$CC_{TR}(t_s) = IFFT [G_{TR}(f)] \quad (3.5)$$

Las señales originales obtenidas en este trabajo de pulso sinusoidal fueron introducidas al programa Matlab, en el cual fueron trabajadas. En la Figura 3.18 se muestra el espectro emisor y receptor obtenidos del análisis con este método, y en la parte inferior se encuentra el resultado de la correlación cruzada de la señal, donde se elige el punto característico del primer arribo de la onda receptora.

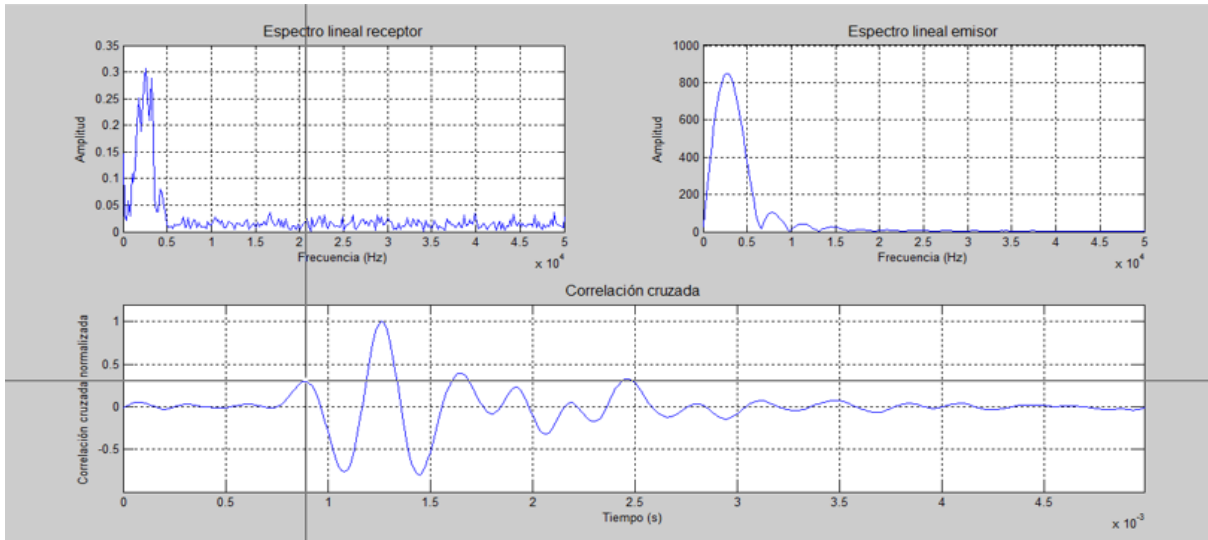


Figura 3.18 Espectro receptor (izquierda superior) y espectro emisor (derecha superior), para determinar el tiempo de arribo con correlación cruzada y resultado de la correlación cruzada de la señal donde se elige el punto característico del primer arribo.

3.10.4 Wavelets

Una de las razones por la que la teoría Wavelet ha sobresalido en los últimos años es porque permite realizar un análisis multiresolución o multiescala en tiempo-escala (ver Figura 3.19) en fenómenos estacionarios y no estacionarios relacionando esto con la naturaleza de las señales sísmicas. Al igual que el análisis de Fourier las wavelets también se basan en el concepto de aproximación de señales usando la superposición de señales.

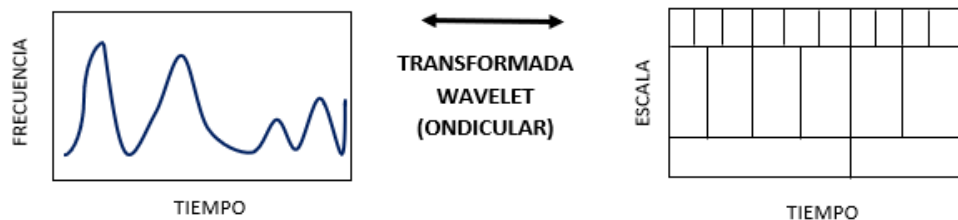


Figura 3.19 Transformada Wavelet de tiempo-frecuencia a tiempo-escala

Las wavelets son una herramienta matemática poderosísima para el análisis de señales, por lo cual recientemente se desarrolló un nuevo método para la interpretación de los tiempos de arribo de las señales. Estas permiten realizar un análisis tiempo-coeficientes-escala sin tener pérdida de información. Este método

descompone las señales en series sinusoidales con diferentes frecuencias, transformando las señales del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, y luego estudia cada componente con diferente resolución (Fernández, A & Ovando, E, 2019), como se puede apreciar en la Figura 3.20.

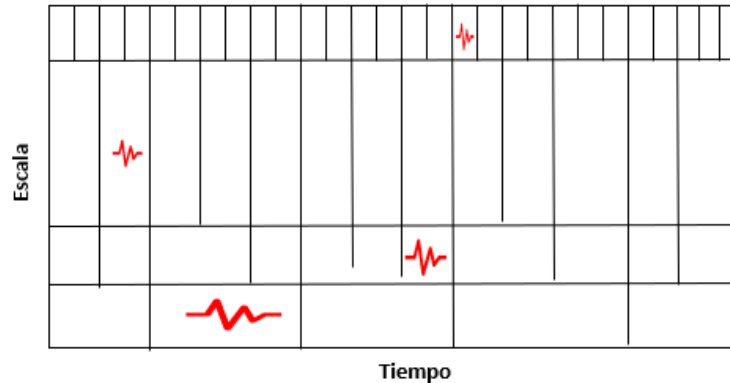


Figura 3.20 Ventana donde se muestra la descomposición de una Wavelet (TWC)

Las transformadas Wavelets son útiles para la detección de discontinuidades y otros puntos de interés en las señales de tiempo. Por ejemplo, un punto de interés en las señales captadas por los cristales receptores es el punto en donde arriban las ondas sísmicas P o S. Suele ser difícil identificar a algunos de estos puntos por el efecto de campo cercano o por el ruido presente en las señales. Con este método es posible eliminar ruido, comprimir señales y detectar similitudes en las señales.

Una wavelet (ondícula) es un tipo de onda con limitada duración y promedio igual a cero. Las señales analizadas son fraccionadas escaladamente y desplazadas de una wavelet madre. La transformada wavelet continua (TWC) se expresa de la siguiente manera:

$$(T^{wav} f)(a, b) = |a|^{-1/2} \int dt f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.6)$$

Donde:

$\psi^{a, b}$, es una función continua en el dominio del tiempo y de la frecuencia llamada wavelet madre

a , es el factor de escala ($a > 0$)

b , traslación en el eje del tiempo

Los valores pequeños de a corresponden a wavelets comprimidas en las que se identifican cambios rápidos en altas frecuencias, por el contrario, valores altos de a corresponden a wavelets dilatadas identificando cambios pequeños en bajas frecuencias.

Las wavelets (TWC) permiten descomponer las señales en el dominio del tiempo-escala estando la escala relacionada inversamente con la frecuencia y permiten identificar discontinuidades en las señales, por lo que son una buena herramienta para determinar los tiempos de arribo de las ondas analizadas.

En ingeniería sísmica es comúnmente utilizada la wavelet conocida como pulso de Ricker o sombrero mexicano, esta ondicula se utiliza a menudo en modelado y fabricación de sismogramas sintéticos. Una peculiaridad de la wavelet madre es que se asemeja a la forma inicial de la onda receptora, y se expresa de la siguiente manera:

$$\psi(x) = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{-1/4} (1 - x^2) e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (3.7)$$

Se utilizó esta wavelet madre debido a que su forma se asemeja mucho a la forma inicial de la onda receptora estudiada (Fernández, A & Ovando, E, 2019). En el anexo A se describe cómo se aplicó esta técnica.

A continuación, se muestra cómo es que se trabajó con el programa diseñado en MATLAB para analizar las señales de este trabajo con la transformada de Wavelet continua:

En la Figura 3.21 se observa en la parte superior una señal sísmica de salida (V_s), el eje x , corresponde al tiempo y, el eje y , a la amplitud. En la parte inferior se muestra un escalograma de wavelet de esa misma señal, la cual se encuentra en tres ejes (tiempo, frecuencia y coeficientes).

En la Figura 3.22 se localiza el punto de interés en este caso se utilizó el criterio de primera llegada el cual consiste en localizar el primer pico o primera irregularidad de la señal dando como resultado 1.34×10^{-3} s.

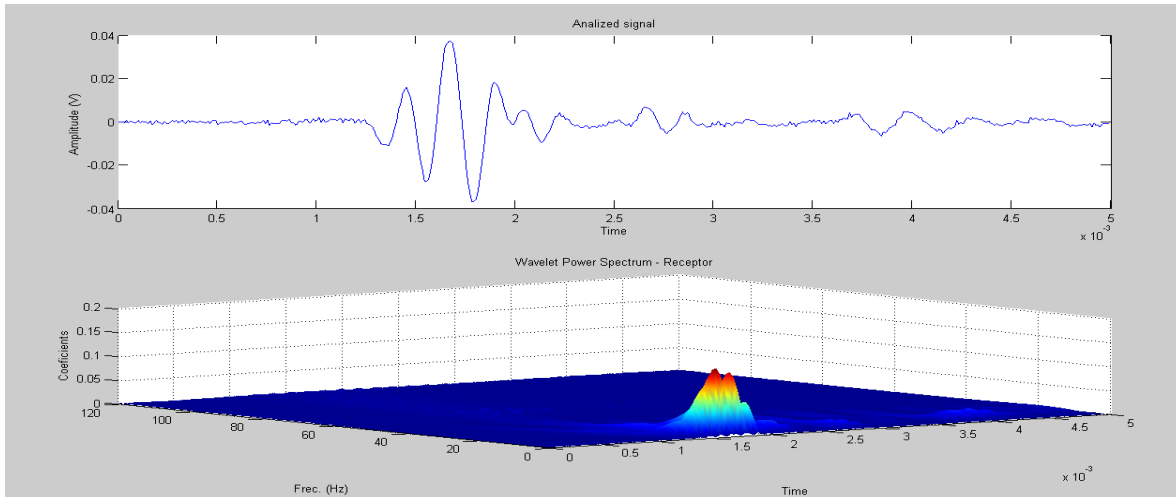


Figura 3.21 señal de entrada Vs y espectro Wavelet en tres ejes (tiempo, frecuencia y coeficiente)

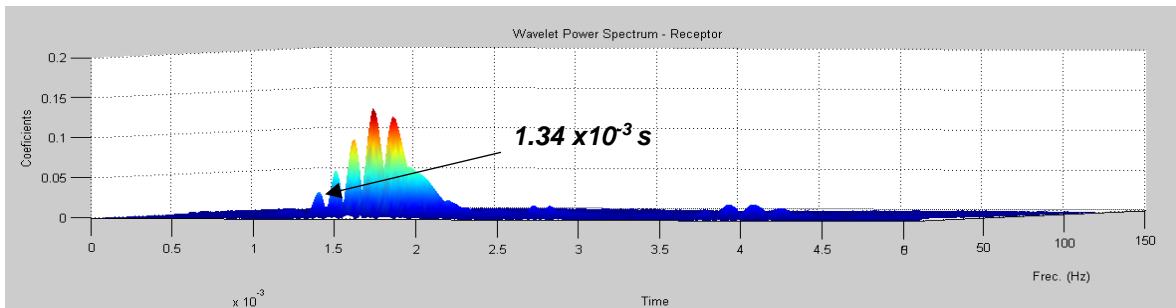


Figura 3.22 Localización de la primera llegada

La señal analizada no se encuentra afectada por el efecto de campo cercano, razón por la que fue muy fácil localizar el primer arribo de la señal, coincidiendo la primera deflexión de la señal con la transformada wavelet como se observa en la Figura 3.23.

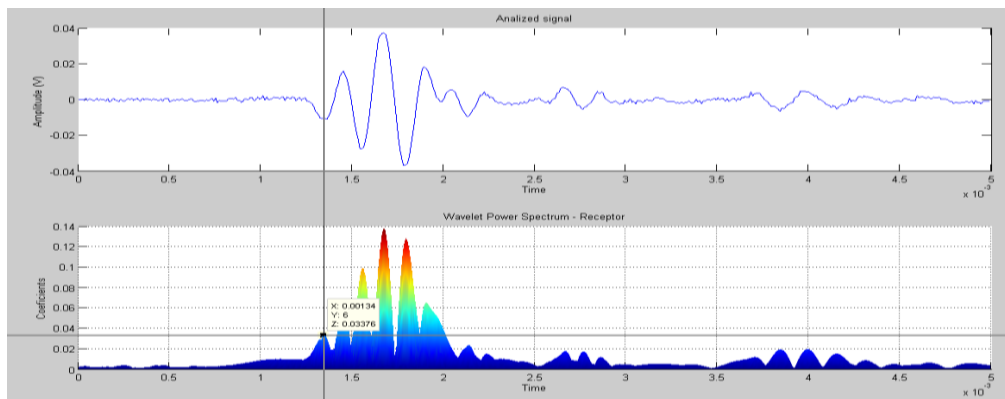


Figura 3.23 Coincidencia del arribo Wavelet con la primera deflexión de la señal sísmica recibida

CAPÍTULO 4

TÉCNICAS EXPERIMENTALES

4.1 Consideraciones generales

Para llevar a cabo el trabajo experimental, primero se preparó la muestra de suelo que se ensayó en el equipo triaxial. El suelo estudiado se obtuvo de sondeos que se llevaron a cabo en el Lago de Texcoco a diferentes profundidades (ver Figura 3.1). Para obtener estas muestras se usó la técnica del muestreo inalterado con un tubo muestreador tipo Shelby. El tubo es de acero y este lleva en su interior otro tubo cortado en segmentos, la punta del muestreador es una zapata de acero templado. Al hincarse el muestreador al suelo este queda atrapado en el tubo. Las muestras obtenidas se dividen en 5 secciones de 20 cm para facilitar la extracción y estos son llevados al laboratorio con extremos cuidados para evitar alteraciones en las propiedades del suelo.

4.2 Preparación de la muestra

En el laboratorio se identifica el tubo Shelby del sondeo que se trabajara (ver Figura 4.1) y se lleva a cabo el siguiente proceso:



Figura 4.1 Tubo Shelby del sondeo con la muestra de suelo

- a) Primero se corta el tubo para la extracción del suelo, aproximadamente 12 cm. Esto para garantizar que se tenga suficiente suelo al momento de labrar la muestra; ya que la medida de la probeta de suelo debe ser de 8.5 cm de altura y 3.5 cm de diámetro (ver Figura 4.2).



Figura 4.2 Corte de tubo Shelby

En la Figura 4.3 se muestran en incisos los pasos de la preparación de la muestra de suelo una vez extraída del tubo shelby, los cuales se describen a continuación:

- b) Una vez cortado el tubo se extrae el suelo y se coloca en una base
- c) Se corta el suelo en cuatro secciones, para obtener cuatro probetas que después serán ensayadas. El corte se lleva a cabo con un alambre delgado
- d) Ya que se tiene una sección del suelo extraído del tubo, este se labra para dar la forma y tamaño deseado. La forma que se da al suelo durante el labrado es cilíndrica. Esto es posible gracias a una técnica minuciosa de labrado ya que es muy importante no alterar al suelo. El labrado se lleva a cabo con un torno, una charrasca y una regla de aluminio
- e) Terminada la probeta se toman las medidas del diámetro superior, medio e inferior además de la altura de la probeta. Esto ya que las medidas pueden variar por el labrado de la muestra
- f) Con el labrado se obtienen recortes del suelo con los que se determinan parámetros índices del suelo
- g) Se pesa la probeta de suelo, ya que el peso como el diámetro de la probeta son datos muy importantes que se ocupan antes de iniciar el ensayo

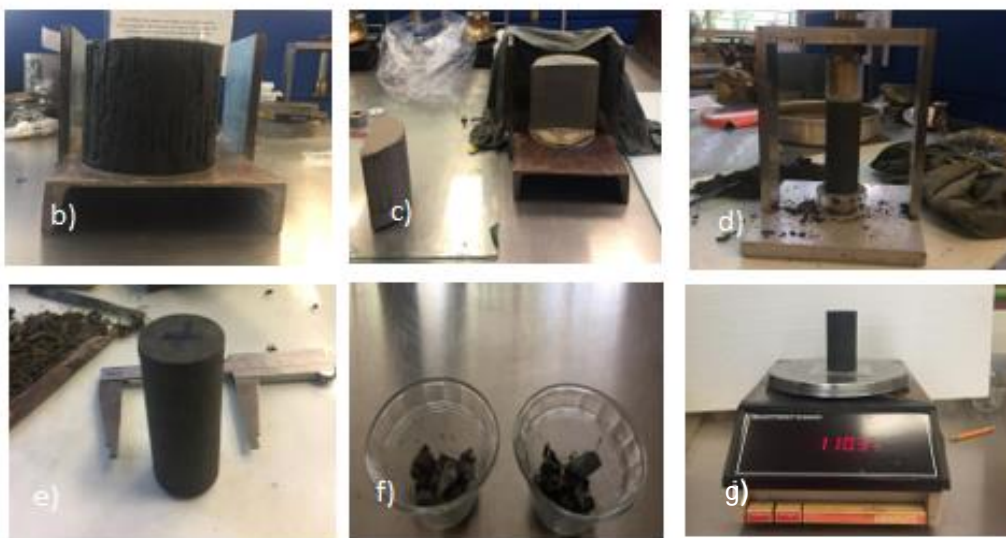


Figura 4.3 Pasos de preparación de probeta de suelo

- h) En la probeta de suelo se realiza un hueco de forma rectangular en cada cara del cilindro y una hendidura circular (ver Figura 4.4), ya que en el hueco y en la hendidura van incrustados los elementos bender. La posición de los huecos en el suelo debe coincidir con el arreglo de los elementos bender en el cabezal y pedestal, y, la profundidad de los huecos debe coincidir con la altura de los elementos bender.



Figura 4.4 Realización de hueco para colocación de los elementos (BE) en el suelo.

4.3 Montaje en la cámara triaxial

Es muy importante que el procedimiento del montaje sea llevado a cabo con el mayor cuidado y delicadeza posible, ya que de esto depende la veracidad de los resultados obtenidos al finalizar la prueba.

Una vez lista la probeta se procede a colocarla en la cámara triaxial para realizar el ensaye, por lo que se necesita el siguiente material:

1. Rejilla para cubrir la probeta de suelo
2. Filtros para piedras porosas del cabezal y pedestal
3. Membrana de látex de 15 cm de alto y 0.5 mm de espesor
4. Aro-sellos
5. Aceite
6. Grasa de silicón
7. Molde para colocar membrana
8. Agua destilada
9. Cuatro graseras.

Una vez obtenidos los materiales, se procede al montaje de la probeta. A continuación, se describe el procedimiento del montaje que se muestra en la Figura 4.5:

- a) Se colocan en agua destilada las piedras porosas, los filtros y la rejilla. Los filtros evitan que las piedras porosas sean tapadas por el suelo y la rejilla ayuda a la saturación y consolidación.

- b) Se saturan todas las líneas para evitar que queden atrapadas burbujas de aire y verificar que no estén tapadas las líneas.
- c) Se colocan las piedras porosas en el cabezal y pedestal.
- d) Los filtros se colocan en las piedras porosas del el cabezal y el pedestal.
- e) Se coloca la rejilla en el suelo.
- f) Se prepara la mezcla de caolín con agua destilada.
- g) La mezcla de caolín se coloca en los elementos (BE) del cabezal y pedestal para asegurar el contacto entre los elementos (BE) y el suelo.
- h) Inmediatamente se coloca la probeta de suelo en el cabezal y el pedestal.
- i) Se coloca una membrana de látex para proteger el suelo y evitar el contacto con el agua de confinamiento. Esta es colocada con la ayuda de un molde al que se le colocan aro-sellos y este es conectado al vacío, ayudando a que el proceso de colocación de la membrana sea más fácil.
- j) A las cuatro graseras se les coloca grasa de silicón, para evitar fugas por las salidas del cable coaxial de los elementos (BE).
- k) Se coloca la cámara de confinamiento junto con la tapa, pero antes esta se engrasa en la base con aceite de silicón para evitar fugas de agua. Al colocarla, el pistón debe hacer contacto con la probeta del suelo, pero se debe tener cuidado para que el pistón no ejerza esfuerzos a la probeta del suelo, ya que esto alteraría los resultados.
- l) Por último, se atornilla perfectamente la cámara y después se satura con agua destilada.



Figura 4.5 Pasos de montaje de muestra en la cámara triaxial

4.4 Etapa de saturación

Una vez montada la muestra en la cámara triaxial, se inicia la etapa de saturación, esta consiste en aplicar presiones de confinamiento y de contrapresión, siendo el esfuerzo efectivo de 9.86 kPa. Lo anterior, se realiza en varios incrementos de la prueba; los esfuerzos se aplican en función del esfuerzo efectivo en campo y al nivel de agua freáticas, siempre cuidando no sobrepasar estos esfuerzos. El esfuerzo efectivo es la diferencia entre el esfuerzo de confinamiento y el de contrapresión.

$$\sigma' = \sigma_c - \sigma_{cp} \quad (4.1)$$

En la primera etapa de saturación el esfuerzo confinante que se aplicó a estas pruebas fue 58.83 de kPa y el de contrapresión de 49.33 kPa, siendo el esfuerzo

efectivo de 9.86 kPa. Cada etapa de saturación se lleva a cabo en un lapso de 24 horas con las líneas de drenaje abiertas y al finalizar cada etapa se mide la B de Skempton.

Es importante que la muestra de suelo este 100 % saturada ya que esta perdió agua durante el proceso de muestreo, transporte, almacenamiento y labrado. La saturación da la precisión de las mediciones de los cambios de volumen y de la presión de poro. Para saber si la probeta de suelo está saturada se toman como referencia las presiones iniciales, y se aumenta 98.06 kPa a la presión de confinamiento, se cierra el drenaje para evitar la consolidación del suelo.

Se dice que el suelo está saturado o parcialmente saturado cuando el parámetro de B de Skempton es 0.95 o 1. En esta investigación se midió este parámetro hasta que diera 0.95, por lo que los esfuerzos aplicados al suelo en esta etapa van aumentando conforme se acerca el parámetro a 1.

El grado de saturación S del suelo se verifica con la medición de B de Skempton. A continuación, se muestra la expresión con la que se calculó la B de Skempton.

$$B = \Delta u / \Delta \sigma_c \quad (4.2)$$

Donde:

Δu es el incremento de la presión de poro

$\Delta \sigma_c$ es el incremento de la presión confinante

Si el parámetro B es (≥ 0.95) se puede decir que la muestra está 100% saturada, por lo que se puede continuar a la primera etapa de consolidación.

4.5 Etapa de consolidación

Terminada la etapa de saturación se procede con la etapa de consolidación. Este paso se puede realizar aplicando esfuerzos isótropos o hidrostáticos (σ_c) con esfuerzos desviadores nulos (σ_d). También se puede llevar a cabo aplicando esfuerzos cortantes durante la consolidación anisótropa en cuyo caso la relación entre los esfuerzos efectivos horizontales y verticales se mantiene constante durante la mayor parte del proceso. En la Figura 4.6 se observa cómo se aplican los esfuerzos para una prueba triaxial isótropa y una anisótropa.

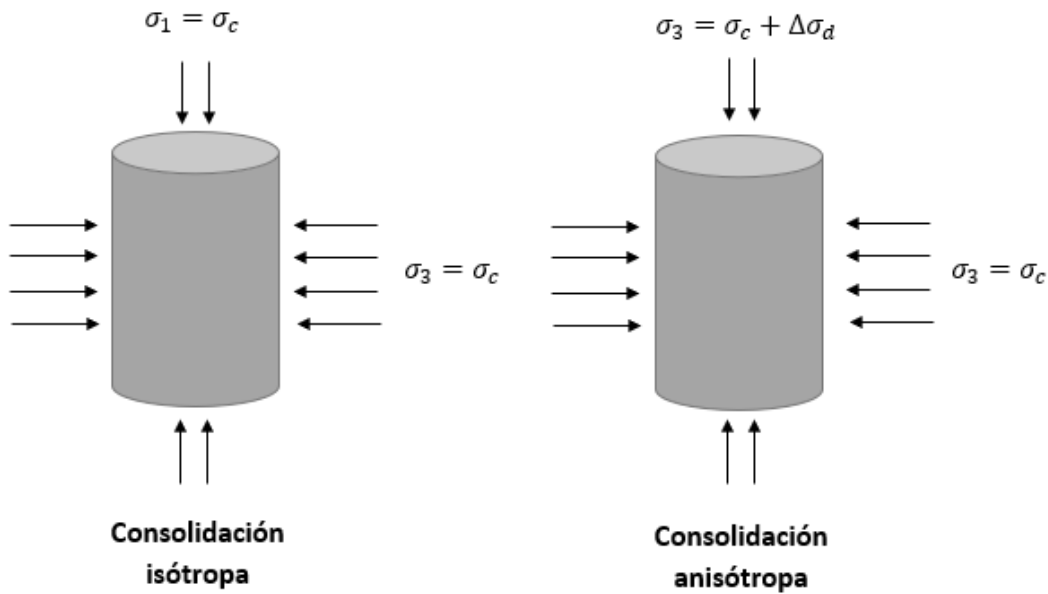


Figura 4.6 Aplicación de esfuerzos en una prueba triaxial isotrópica y anisótropa

Es importante mencionar que al final de cada etapa de consolidación se realizaron mediciones de onda sísmica V_s y V_p , para analizar posteriormente el cambio que se dio en las señales con el reajuste que sufrió el suelo al expulsar agua.

Como ya se mencionó en esta investigación se realizaron pruebas triaxiales con consolidación isotrópica en muestras de suelo extraídas de diferentes sondeos de suelo, el sondeo SM-TP-23 a una profundidad de 4.05 m a 4.65 m, del cual se realizaron dos pruebas y el sondeo TBH-430, al que se le realizaron cuatro pruebas triaxiales isotrópicas.

Durante la etapa de consolidación las muestras de suelo se someten a esfuerzos efectivos isotrópicos, que se mantienen constantes por 24 horas después de las cuales se incrementan los esfuerzos efectivos, que nuevamente se mantienen constantes durante otras 24 horas. El proceso se repite hasta que la curva de consolidación quede bien definida como se observa en la Figura 4.7. Durante todo este proceso el suelo presenta cambios de volumen (se comprime), debido a la expulsión del agua intersticial. Fenómeno que es conocido como consolidación.

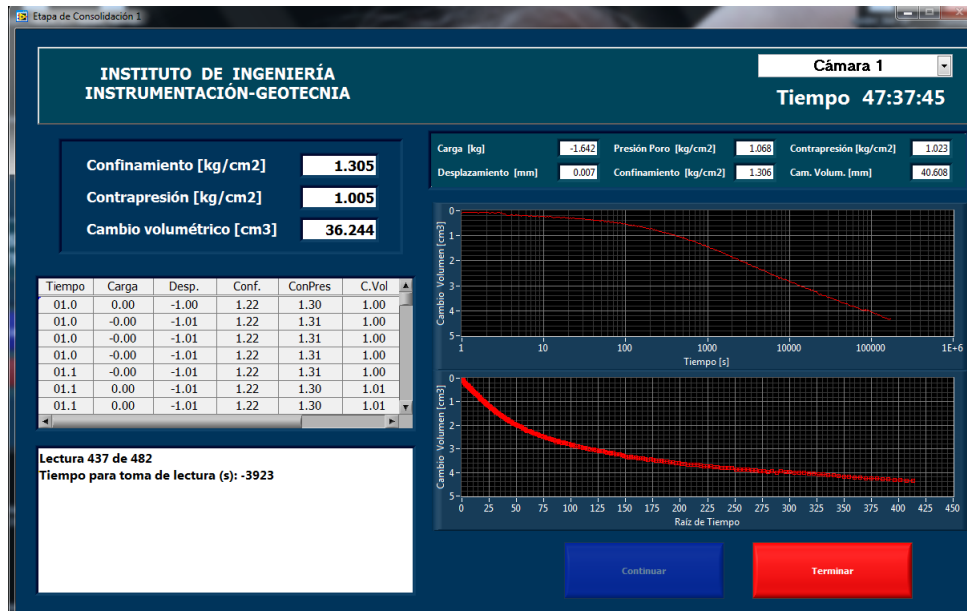


Figura 4.7 Curva de Consolidación del suelo obtenida con el programa de operación del Instituto de Ingeniería de la UNAM

Para determinar el esfuerzo de preconsolidación σ'_p se utilizó el criterio (Casagrande,1936), quien construyo un gráfico para la determinación de dicho esfuerzo.

A continuación, se enumeran los pasos propuestos por Casagrande:

1. Escoger un punto de mínima curvatura punto A
2. Del punto A dibujar una línea horizontal AB
3. Dibujar una línea tangente AC en A
4. Dibujar una bisectriz AD de los ángulos AB y AC
5. Proyectar la línea EF de la rama NC
6. La intersección entre el punto AD Y FE es el esfuerzo de preconsolidación σ'_p .

Con los pasos anteriores se determinó el esfuerzo de preconsolidación de cada una de las muestras ensayadas. En el sondeo SM-TP-23 se realizaron dos pruebas con diferentes tipos de consolidación: la primera A1 ver Figura 4.8 se consolido normalmente (NC), dando un esfuerzo de preconsolidación (σ'_p) de 43 kPa. La segunda A2 en la Figura 4.9 fue preconsolidada (PC), obteniendo un esfuerzo de preconsolidación de 41.1 kPa.

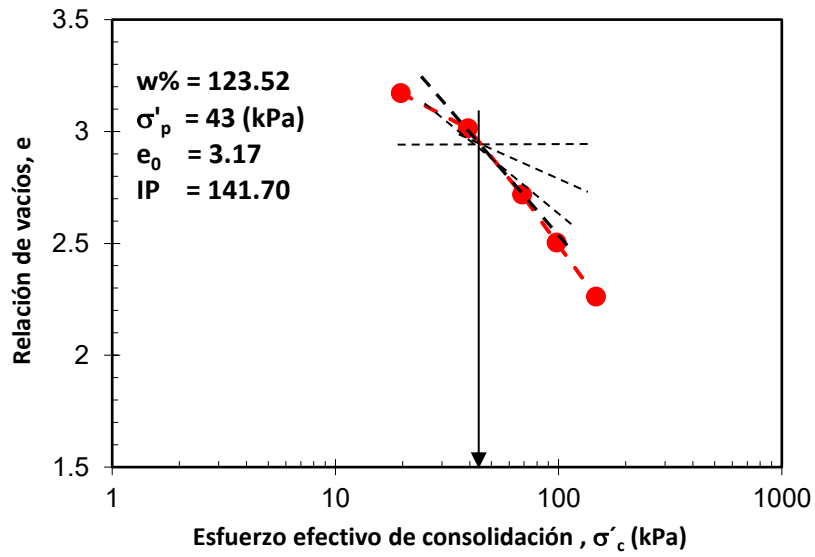


Figura 4.8 Curva de compresibilidad y determinación del punto de consolidación A1 NC (SM-TP-23)

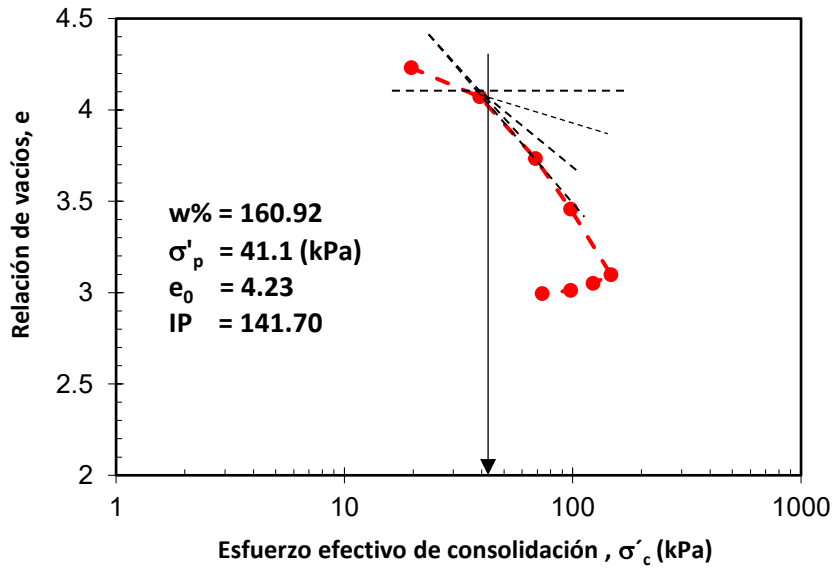


Figura 4.9 Curva de compresibilidad y determinación del punto de consolidación A2 PC (SM-TP-23)

Al sondeo TBH-430 se le practicaron cuatro pruebas con diferentes tipos de consolidación. La primera se consolidó normalmente (NC), obteniendo un esfuerzo de preconsolidación de 38 kPa. La segunda fue preconsolidada (PC), obteniendo un esfuerzo de preconsolidación de 33 kPa. La tercera prueba fue normalmente consolidada (NC), obteniendo un esfuerzo de preconsolidación de 35 kPa y la cuarta también normalmente consolidada (NC) arrojando un esfuerzo de preconsolidación de 36 kPa (ver las figuras de 4.10 a 4.13).

Los valores obtenidos del esfuerzo de preconsolidación (σ'_p) para cada uno de los sondeos anteriormente mencionados no varían significativamente dado a que se trabajó con muestras gemelas, obteniendo valores de preconsolidación de 41.1 kPa a 43 kPa para el sondeo SM-TP-23. En el sondeo TBH-430 al igual que el sondeo anterior se trabajó con muestras gemelas, obteniendo esfuerzos de preconsolidación que van de 33 kPa a 38 kPa.

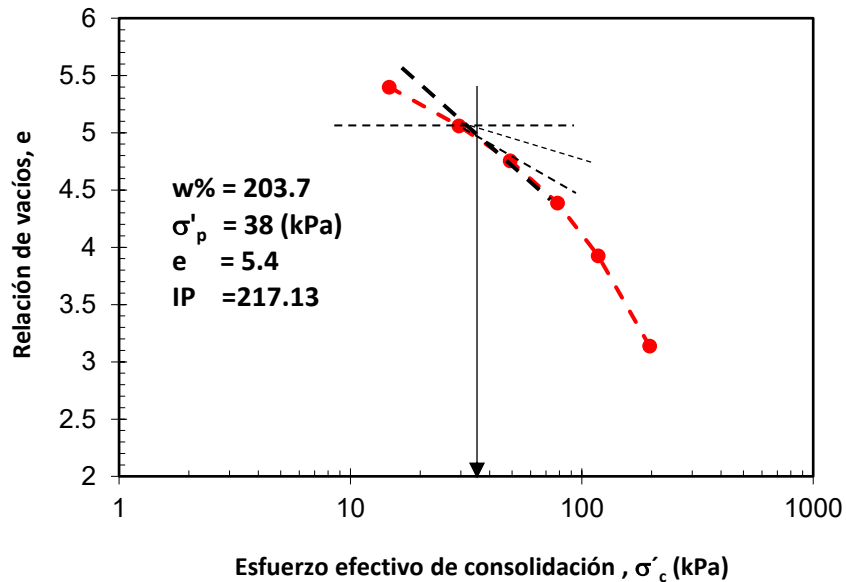


Figura 4.10 Curva de compresibilidad y determinación del punto de consolidación B1 NC (TBH-430)

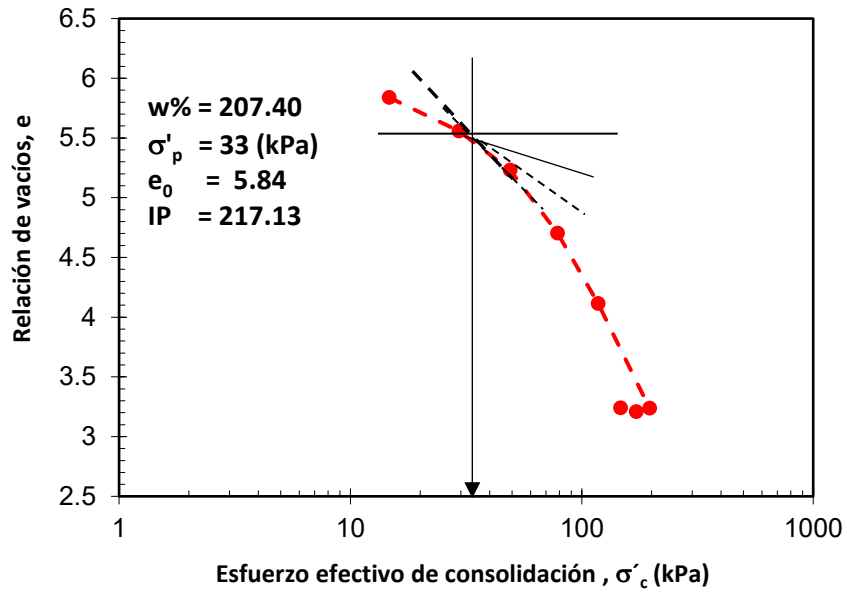


Figura 4.11 Curva de compresibilidad y determinación del punto de consolidación B2 PC (TBH-430)

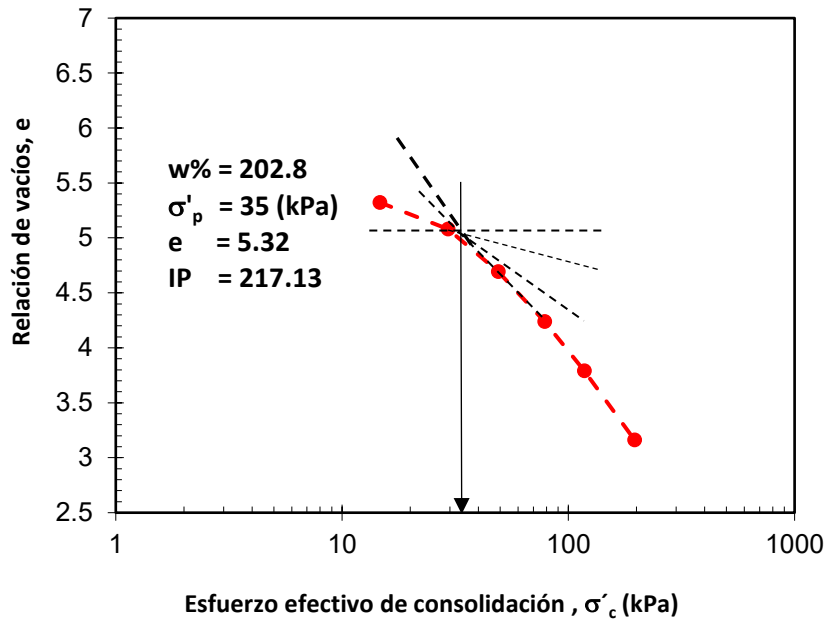


Figura 4.12 Curva de compresibilidad y determinación del punto de consolidación B3 NC (TBH-430)

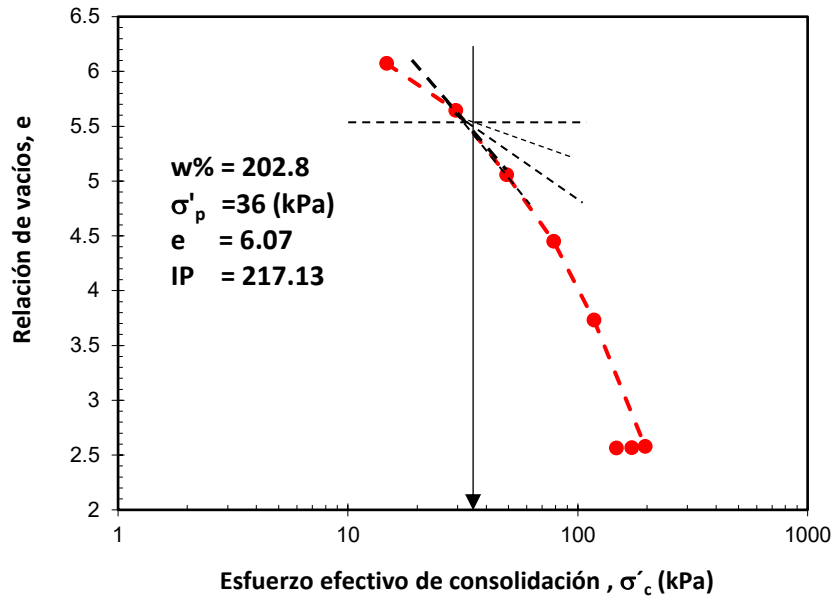


Figura 4.13 Curva de compresibilidad y determinación del punto de consolidación B4 PC (TBH-430)

4.6 Etapa de falla

Durante la etapa de falla se le aplica a la probeta de suelo una carga axial, esta se encarga de deformar la probeta en determinado tiempo, mismo que depende del tipo de prueba que se realice. En la Figura 4.14 se muestra cómo es que se lleva a cabo la etapa de falla de una prueba CU con el programa de operación del Instituto de Ingeniería de la UNAM, donde es posible observar el comportamiento que está teniendo el suelo al ser deformado.

En esta investigación se realizaron pruebas no drenadas (CU) y si drenadas (CD). Para las pruebas no drenadas (CU) se aplicó una tasa de deformación de 0.041 mm/min que equivalen a 16 horas y en ella no se permite el drenaje de la probeta de suelo durante esta etapa para medir el incremento de la presión de poro. Para las pruebas si drenadas (CD), se aplicó una tasa de deformación de 0.0046 mm/min que equivalen a 6 días de falla (144 horas), la velocidad de deformación tan pequeña que se aplicó fue para que no se diera un aumento en la presión de poro y esta sea nula en la etapa de falla si drenada (CD). En esta prueba se permite el drenaje de la probeta de suelo durante toda la etapa de la falla (ver Figura 4.15).

Durante esta etapa se realizaron mediciones de onda sísmica Vs y Vp a cada determinado tiempo esto para apreciar el comportamiento de las propiedades elasto-dinámicas del suelo.

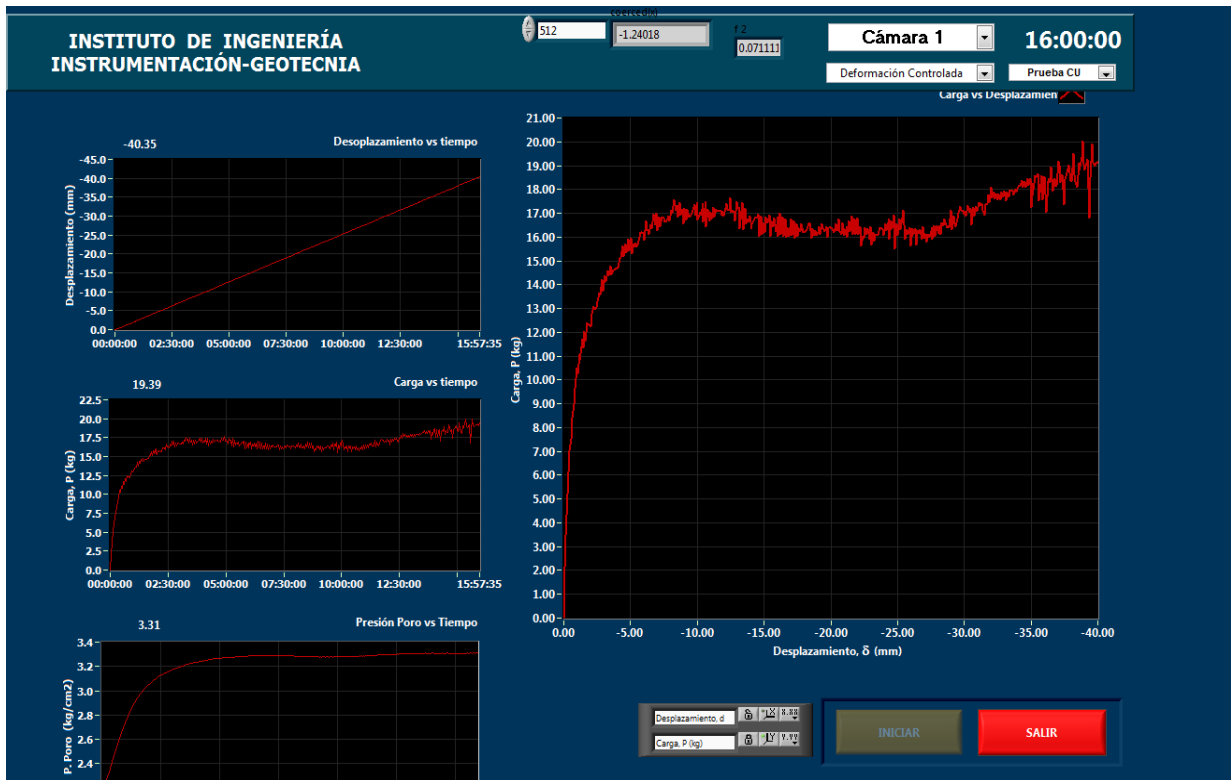


Figura 4.14 Etapa de falla en un ensaye CU obtenida del programa de operación del Instituto de Ingeniería de la UNAM

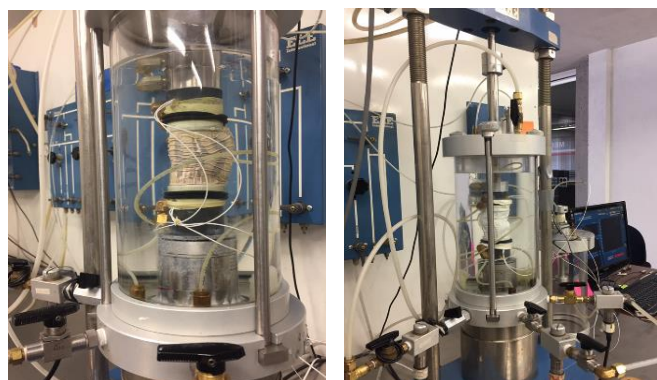


Figura 4.15 Falla tipo CU (Izquierda) y falla tipo CD (Derecha)

4.7 Cálculo de la velocidad de onda

Para analizar la velocidad de propagación de las ondas sísmicas V_p y V_s se parte del concepto de velocidad, es decir de la distancia que recorren las ondas y del tiempo en el que se recorre dicha distancia. Para este caso dicha distancia es la que existe entre el cristal emisor y el cristal receptor (L_{efec}) y el tiempo real que la onda recorre el suelo (t_{efec}).

$$V_s = \frac{L_{efec}}{t_{efec}} \quad (4.3)$$

Donde:

$$L_{efec} = H_{probeta} - (H_{emisor} - H_{receptor})$$

$$t_{efec} = t - t_{retardo}$$

Para obtener el tiempo efectivo (t_{efec}), primero se determina el tiempo que tarda en viajar la onda emisora y la onda receptora en el suelo, menos el tiempo de retardo del equipo eléctrico (elementos bender y cable coaxial). La distancia efectiva, L_{efec} , se obtiene restando la altura de los dos elementos de flexión a la altura del suelo, ya que estos son introducidos en la probeta de suelo y también, la deformación que el suelo sufre al ser cargado. Para la medición de las velocidades V_p la posición de los elementos disco no afecta la altura de la probeta ya que estos se encuentran posicionados sobre la base de la probeta, por lo que solo se le resta la deformación del suelo.

4.7.1 Efecto de campo cercano

El efecto de campo cercano es uno de los principales problemas por los que el método del primer arribo no siempre es confiable, ya que esconde la información de llegada de la onda de compresión, por lo que (Sánchez, Roesset, & Stokoe, 1986) introdujeron el factor R_d con la finalidad de minimizar este efecto por lo que propusieron la siguiente expresión:

$$R_d = \frac{L_s}{\lambda} \quad (4.4)$$

Donde:

L_s es la distancia efectiva de recorrido de la onda

λ es la longitud de onda.

En su investigación, Diaz (2014), para determinar el parámetro R_d propuesto por (Sánchez , Roesset, & Stokoe, 1986), utilizó la frecuencia fundamental del sistema (f_0) obteniendo:

$$R_d = \Delta t * f_0 \quad (4.5)$$

Donde:

Δt es el tiempo de viaje de la onda

f_0 es la frecuencia fundamental del sistema (elemento emisor, suelo y elemento receptor). Para la cual, Diaz en 2014 propuso su estimación con una técnica empleando funciones de transferencia (FT).

Encontrando que conforme varia la frecuencia de excitación (f_{ini}), de 1 a 3 kHz el factor R_d no es constante hasta que la frecuencia de excitación (f_{ini}) es de 4 a 7 kHz el valor de R_d es constante, lo que quiere decir que este valor ya no depende de la frecuencia y a la frecuencia donde R_d se mantiene constante la denomino frecuencia critica (f_{crit}). En la Figura 4.16 se observa la variación de R_d con las diferentes frecuencias de inicio; se recalca que las frecuencias óptimas para analizar las señales sísmicas de cortante son a partir de los 4 kHz, donde el efecto de campo cercano ya no afecta.

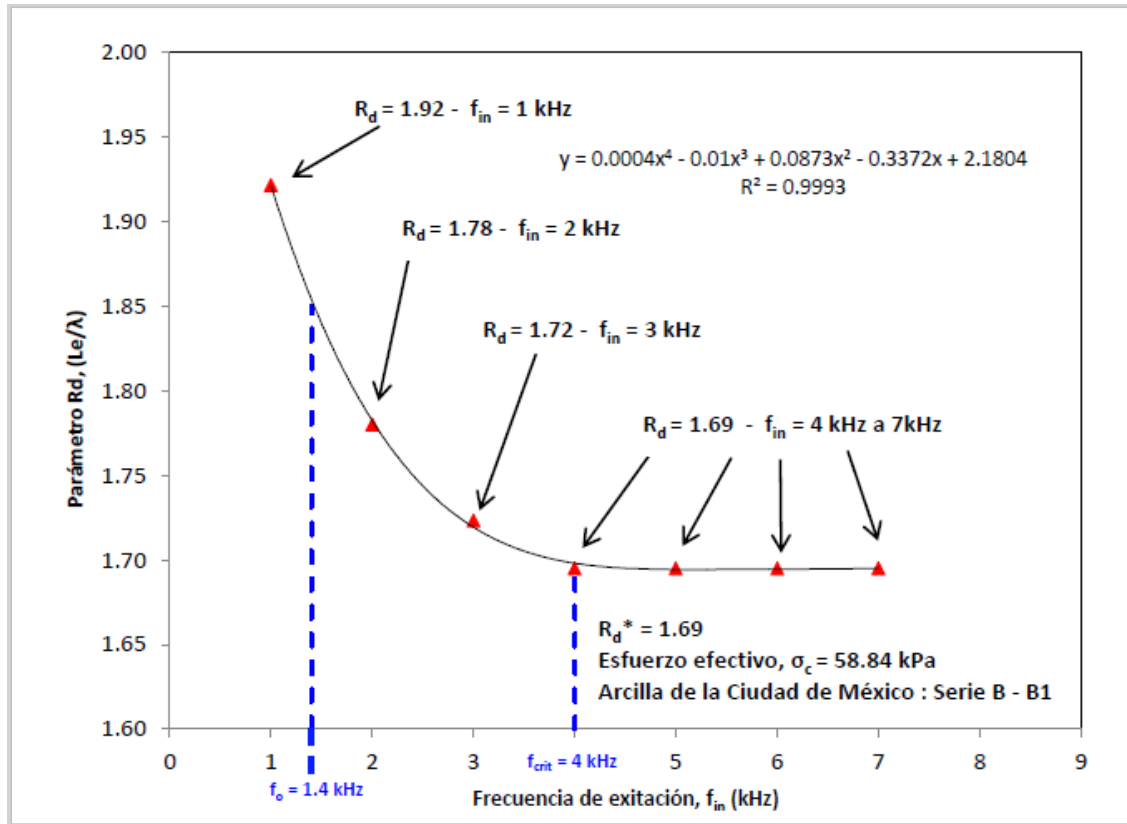


Figura 4.16 Variación de R_d contra la frecuencia inicial de excitación (Diaz, 2014)

A continuación, en la Tabla 4.1 se muestran los resultados de una señal (V_s), obteniendo valores muy similares con cada uno de los criterios utilizados, dado a que la señal no se encuentra afectada por el efecto de campo cercano, obteniendo valores que van de 1.4×10^{-3} s a 1.5×10^{-3} s.

Tabla 4.1 Resultados de señales V_s con diferentes métodos sin el efecto de campo cercano

| Métodos de análisis de señales sísmicas | | |
|---|-------------------|------------------------------|
| Criterios | | Tiempo ($\times 10^{-3}$ s) |
| Visuales | Primera llegada | 1.5 |
| | Primera deflexión | 1.4 |
| | Pico-pico máximos | 1.5 |
| | Pico-pico mínimos | 1.5 |
| Matemáticos | Cross correlation | 1.4 |
| | Wavelet (CWT) | 1.5 |

En la Tabla 4.2, se muestra el caso en el que el método de la primera llegada si es afectada por el efecto de campo cercano con 1.1×10^{-3} s, ya que los otros criterios van de 1.4×10^{-3} s a 1.5×10^{-3} s, siendo más concisos entre ellos.

Tabla 4.2 Resultados de señales Vs con diferentes métodos con el efecto de campo cercano

| Métodos de análisis de señales sísmicas | | |
|--|-------------------|--|
| Criterios | | Tiempo ($\times 10^{-3}$s) |
| Visuales | Primera llegada | 1.1 |
| | Primera deflexión | 1.5 |
| | Pico-pico máximos | 1.4 |
| | Pico-pico mínimos | 1.5 |
| Matemáticos | Cross correlation | 1.6 |
| | Wavelet (CWT) | 1.5 |

CAPÍTULO 5

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos de cada ensaye de los sondeos trabajados en una cámara triaxial instrumentada con elementos bender. De los resultados obtenidos se analizan los siguientes temas:

- Variación de V_s y V_p al variar la frecuencia.
- Análisis de las señales de onda con diferentes métodos visuales y matemáticos.
- Análisis de velocidades de onda V_s y V_p en las diferentes etapas de la prueba: saturación, consolidación y falla.
- Módulos dinámicos en la etapa de falla.

5.1 Señales de onda de cortante y de compresión con diferentes frecuencias

Para analizar los resultados obtenidos de cada medición de las señales de cortante y de compresión, en cada etapa de la prueba, se utilizaron diferentes métodos para analizar las señales. Además, se tomaron las señales de onda a diferentes frecuencias de entrada, las cuales fueron de 1 a 7 kHz para V_s y de 40 a 70 kHz para las V_p .

Observándose que los resultados de las velocidades de onda variaban mucho en las frecuencias de 1 a 3 kHz para las señales de V_s y de 40 a 60 kHz para las V_p . Por lo anterior, se decidió adquirir las señales de cortante solamente con frecuencias de excitación entre 4 y 7 kHz y para las de compresión de 40 a 90 kHz, ya que a partir de esas frecuencias los primeros arribos de la señal son más claros y se identifican con mayor facilidad.

A continuación, se muestran los resultados de mediciones de la onda de cortante y de compresión, con cada uno de los métodos utilizados; variando la frecuencia de excitación de las señales.

En la Figura 5.1 se muestran los resultados, donde se observa que las velocidades obtenidas dependen de la frecuencia, debido al efecto de campo cercano. Sin embargo, entre los 4 y 6 kHz las velocidades tienden a ser constantes; aunque también es notoria la diferencia entre los valores de los diferentes métodos analizados. Las velocidades estimadas con el método de primera llegada son las que más difieren de las estimadas con los otros métodos, por la dificultad de identificar la primera llegada de las ondas a causa del ruido introducido por el efecto de campo cercano.

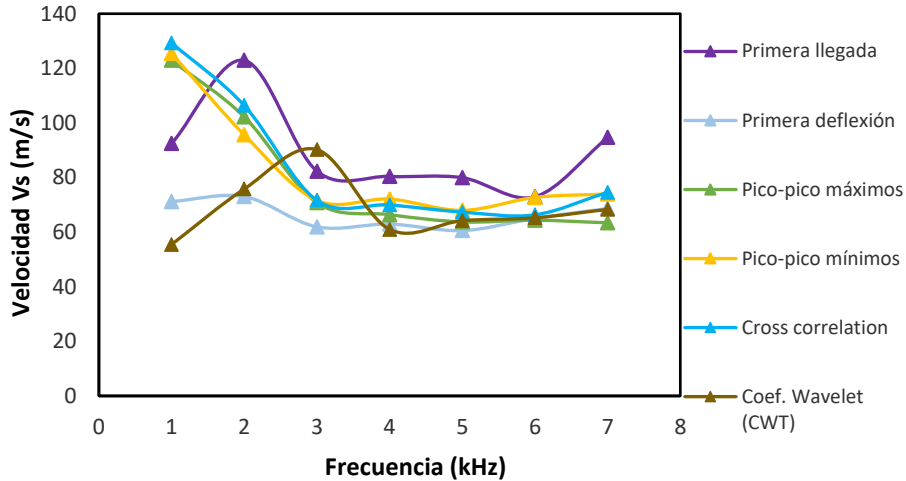


Figura 5.1 Relación entre las diferentes frecuencias de excitación y velocidades de cortante Vs con diferentes métodos

Para la Figura 5.2 se muestran los valores de velocidad V_p , obtenidos con cada uno de los métodos, variando las frecuencias de las señales de excitación. Es claro que entre 40 y 60 kHz el efecto de campo cercano afecta levemente los resultados, con velocidades de 1328.38 m/s a 1976.23 m/s. entre los 70 y 90 kHz la dispersión de los valores de V_p es menor; con velocidades que van de 1354.37 m/s a 1531.36 m/s.

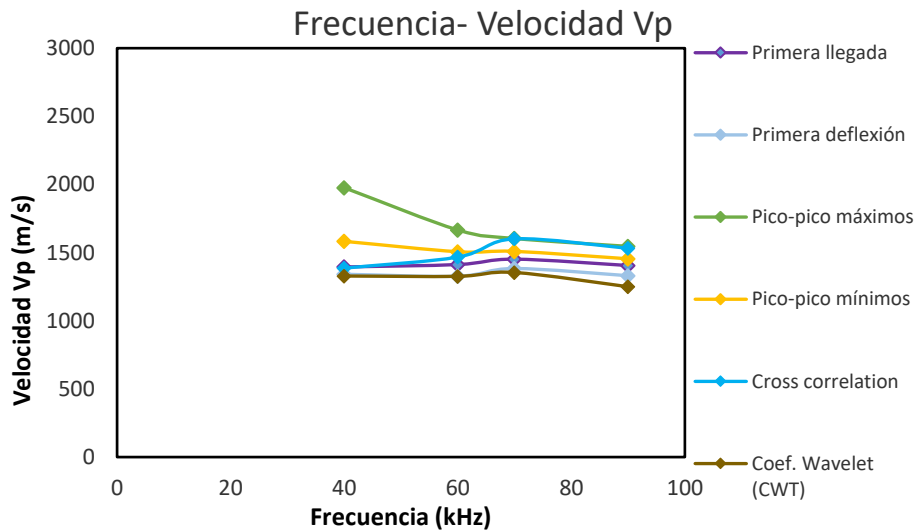


Figura 5.2 Velocidades V_p tomadas con diferentes métodos y diferentes frecuencias

En la Figura 5.3, se observan las señales de onda de cortante obtenidas a partir de señales de entrada, en la que las frecuencias variaron entre 1 y 7 kHz. En estas se observa un desfase en el primer arribo de la señal, en las frecuencias de 1 y 3 kHz ver Figura 5.4 (primeros arribos señalados con flechas negras), producto del efecto de campo cercano. A medida que aumenta la frecuencia, se observa que el efecto de campo cercano ya no afecta a las frecuencias de 4 a 7 kHz, observándose que el primer arribo de la señal se mantiene constante para esas frecuencias ver Figura 5.5.

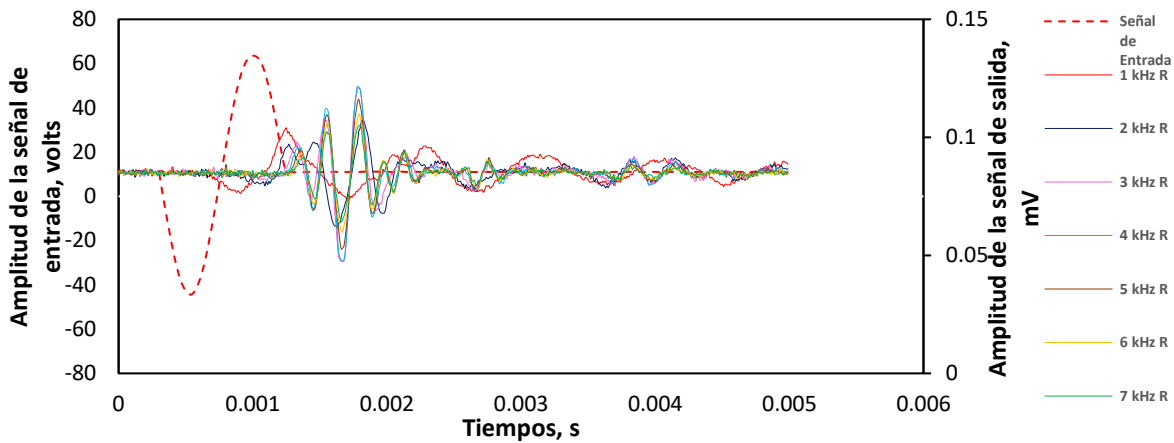


Figura 5.3 Señales de cortante adquiridas con frecuencias de 1 a 7 kHz

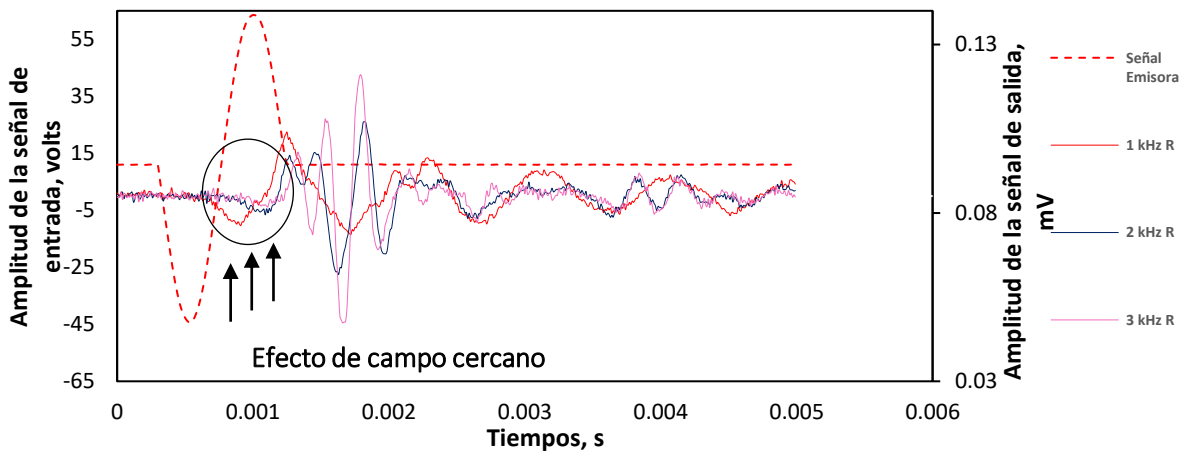


Figura 5.4 Señales de cortante con frecuencias de 1 a 3 kHz, en las que se observa el efecto de campo cercano (efecto de campo cercano encerrado con círculo negro)

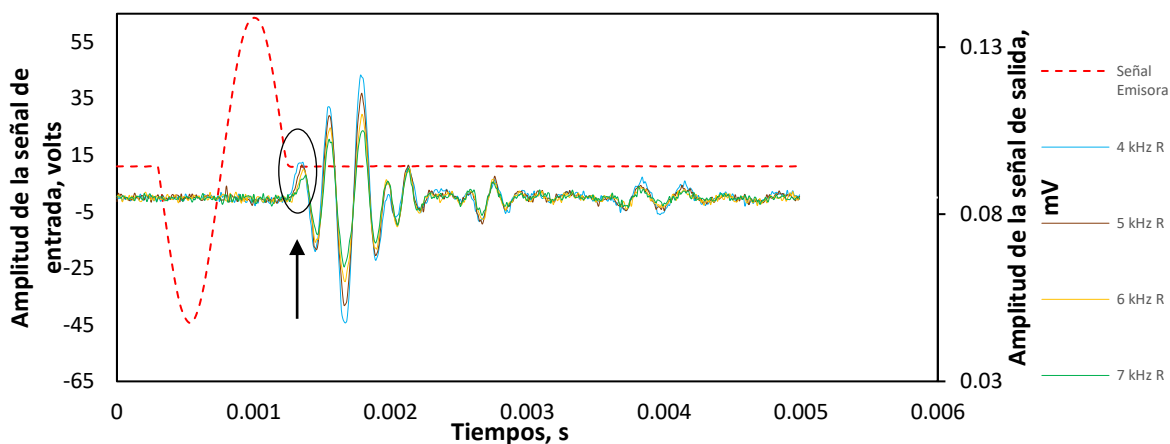


Figura 5.5 Señales Vs con frecuencias de 4 a 7 kHz en las que no se observa el efecto de campo cercano

5.2 Mediciones de los primeros arribos de las señales con diferentes métodos

El procesado de las señales fue realizado con el programa Matlab, se le introdujeron los datos de las señales de onda de cortante y de compresión de cada una de las etapas de la prueba triaxial, analizando las señales con diferentes métodos, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. Se tomaron señales sísmicas Vs y Vp para dos muestras de suelo tomadas del (SM-TP-23), y para cuatro del sondeo (TBH-430).

En esta sección, se presentan graficados los resultados de los arribos de la señal de cortante con cada uno de los métodos antes descritos, en cada una de las etapas de todas las pruebas realizada. También, se muestran las diferencias con respecto al valor medio de cada método, en las etapas de las pruebas y la diferencia global de cada método a lo largo de todo el ensayo (ver Anexo B) donde se presentan estos resultados en tablas.

Sondeo SM-TP-23

En la Figura 5.6 se muestran los resultados de los arribos de la prueba A1 NC CU. Mismos que se encuentran en la Tabla C.1 del Anexo B. La saturación, se dividió en tres etapas, obteniendo arribos de 0.0010 a 0.0013 s, con los métodos visuales. Para los métodos matemáticos los tiempos de arribo fueron de 0.0012 a 0.0013 s. En la consolidación los tiempos comienzan con 0.0010 s y conforme aumenta la etapa de consolidación aumenta la velocidad llegando a 0.0006 s. En la etapa de

falla para la prueba A1, con una falla CU los arribos van de 0.0006 a 0.0007 s. Donde no se presenta gran cambio en los arribos de esta etapa.

En la Figura 5.8 se observan los resultados de la prueba A2 PC CU. Con seis etapas de saturación, los tiempos de arribo van de 0.0010 a 0.0018 s. El tiempo de arribo de 0.0010 s, es más constante para el método del primer arribo y para los otros existe una variación 0.0014 a 0.0016 s. En la primera etapa de consolidación, los tiempos fueron de 0.0013 a 0.0015 s y finalizó la última etapa con arribos de 0.0005 a 0.0007 s. Con una falla CU los arribos van de 0.0005 a 0.0006 s. Estos resultados se encuentran en la Tabla C.3 del anexo B.

Sondeo TBH-430

En la Figura 5.10 se muestran los resultados de la prueba B1 NC CU. En la saturación, con dos etapas se obtuvieron arribos de 0.0011 a 0.0018 s. Siendo 0.0011 s para el método del primer arribo y 0.0016 s para Wavelets y otros métodos visuales. Para la consolidación, se muestran valores al principio que van de 0.0011 s a 0.0015 s y finalizando con 0.0005 s. La etapa de falla, con falla no drenada (CU) tiene valores de 0.004 s a 0.008 s. Estos resultados se encuentran en la Tabla C.5 del anexo B.

La Figura 5.12 muestra los resultados de la prueba B2 PC CU. Con cuatro etapas de saturación los tiempos de arribo variaron entre 0.0012 y 0.0016 s. La consolidación, comienza con valores de 0.0015 s a 0.0018 s y finaliza con 0.0006 s. Con falla no drenada (CU) van de 0.006 s a 0.007 s. Estos resultados se encuentran en la Tabla C.7 del anexo B.

En Figura 5.14, se muestran los resultados de los arribos con diferentes métodos de la prueba B3 NC CD. Con tres etapas de saturación, obtuvo valores de 0.0014 a 0.0018 s. La consolidación obtuvo valores al inicio de 0.0015 s a 0.0016 s y finalizó con 0.0005 s. En la falla si drenada (CD) las velocidades comienzan con arribos de 0.0005 s y concluyó la etapa con 0.0001 s. Estos resultados se encuentran en la Tabla C.9 del anexo B.

La Figura 5.16, muestra los resultados de la prueba B4 PC CD, con tres etapas de saturación obtuvo valores de 0.0013 a 0.0018 s. La etapa de consolidación inicio con valores de 0.0013 s a 0.0017 s y finaliza con 0.0005 s. Con una falla si drenada (CD), las velocidades comienzan con arribos de 0.0005 s y finalizan la etapa con 0.0001 s. Estos resultados se encuentran en la Tabla C.11 del anexo B.

Se calcularon los porcentajes de las diferencias con respecto al valor medio de cada método analizado, durante todas las etapas de las pruebas. Tomando como

referencia el promedio de todos los métodos analizados. En la Figura 5.7 y Figura 5.9, se muestran los resultados de las pruebas realizadas al sondeo SM-TP-23. Donde para la prueba A1 NC CU, las diferencias son más altas para los criterios visuales que van de -8.6 a 7.6 % y para los matemáticos de -2.3 a 2.7 %. Para la prueba A2 PC CU, las diferencias para los métodos visuales van de -14 a 10 % y los matemáticos de -2 a 0.03 %.

En las figuras 5.11, 5.13, 5.15 y 5.17, se muestran los resultados para el sondeo TBH-430. En la prueba B1NC CU, las diferencias para los criterios visuales van de -15 a 5 % y los matemáticos de 0 a 5 %. Para el B2 PC CU, la diferencia para los visuales va de -9 a 4 % y para los matemáticos de 2 %. En la prueba B3 NC CD, las diferencias para los métodos visuales van de -8 a 11 % y los matemáticos de 0 a 2 %. Para la prueba B4 PC CD, son de -17 a 2 % para los métodos visuales y para los matemáticos de -16 a 2 %.

Para este trabajo, los resultados fueron muy similares en los métodos matemáticos. Los métodos visuales fueron los que más variaron, esto porque algunas señales se encontraban muy afectadas por el ruido, el cual dificulta la interpretación; principalmente en el criterio de la primera llegada, primera deflexión y picos mínimos. Representando un escenario donde los métodos matemáticos ayudan a una mejor interpretación de las señales, en este caso con el método Wavelets se obtuvieron muy buenos resultados, aun cuando las señales tenían mucho ruido.

De acuerdo con lo anterior, se recomienda que las señales obtenidas con elementos bender sean analizadas con métodos matemáticos. Como lo son las Wavelets y la correlación cruzada, y se recomiendan analizarlos con métodos visuales solo cuando se tengan señales de buena calidad visual y sin ruido.

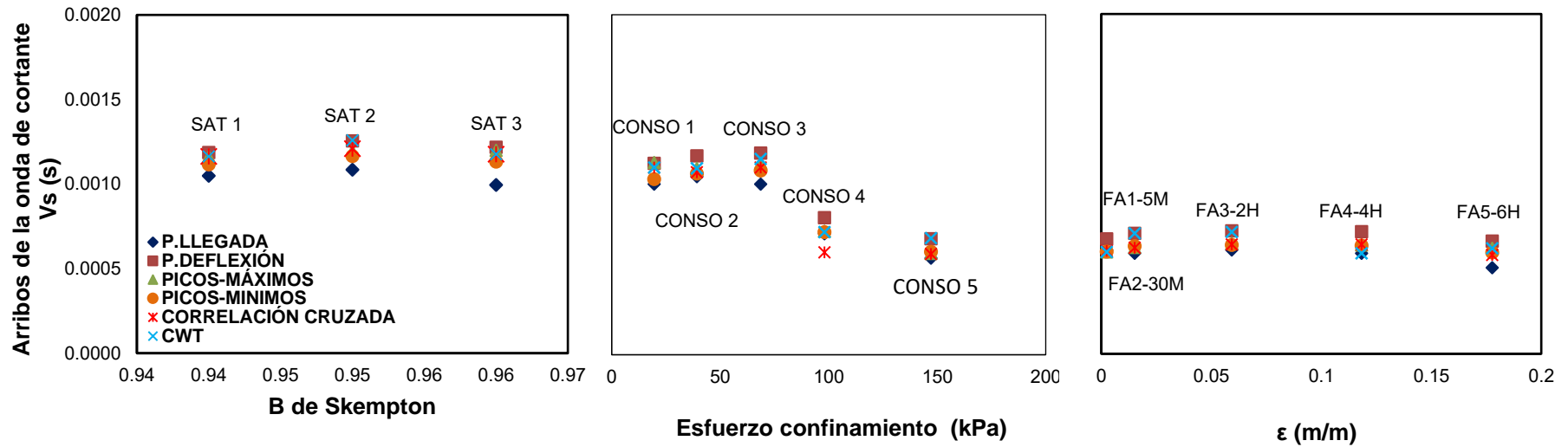


Figura 5.6 Tiempos de arribo con cada método analizado en la prueba triaxial A1 NC CU (SM-TP-23)

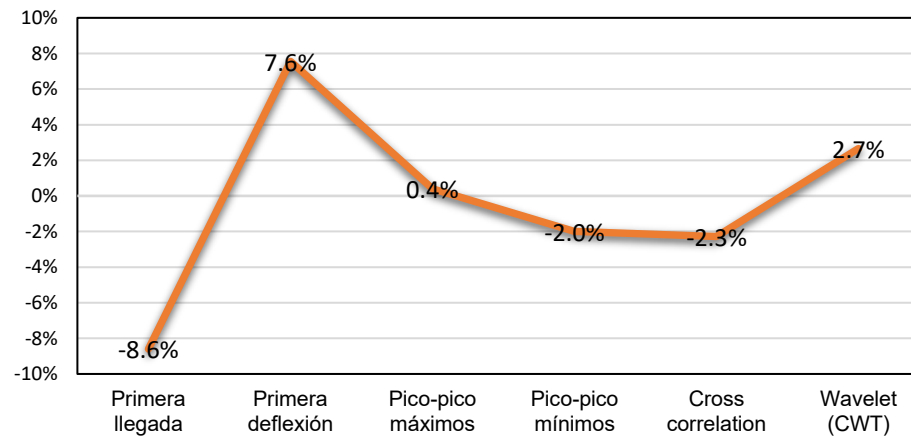


Figura 5.7 Porcentaje de diferencia de cada método respecto al valor medio A1 NC CU (SM-TP-23)

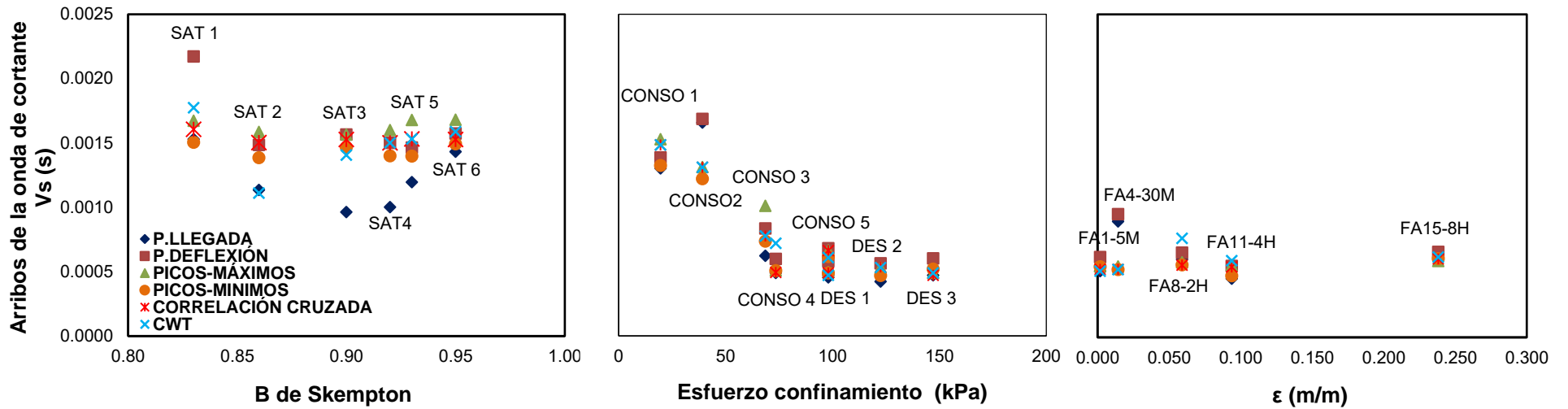


Figura 5.8 Tiempos de arribo con cada método analizado en la prueba triaxial A2 PC CU (SM-TP-23)

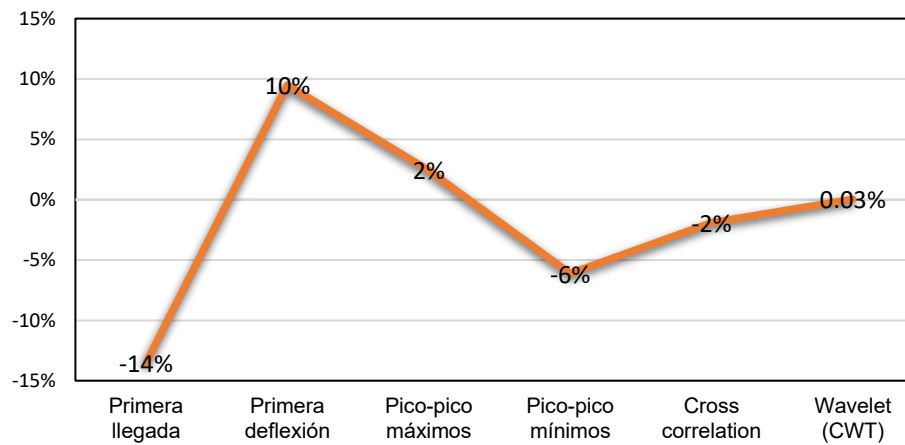


Figura 5.9 Porcentaje de diferencia de cada método respecto al valor medio A2 PC CU (SM-TP-23)

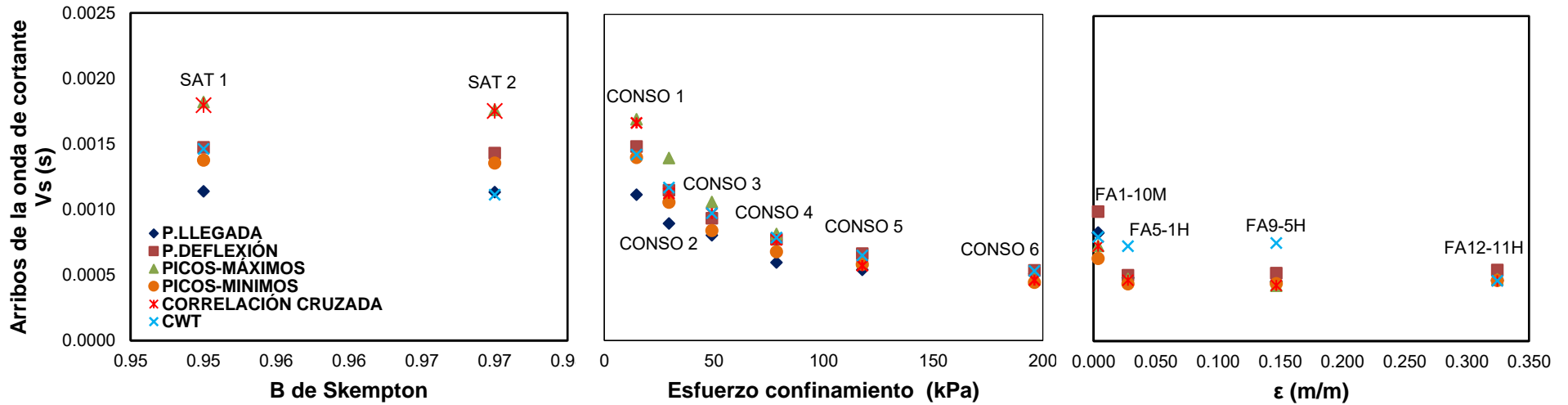


Figura 5.10 Tiempos de arribo con cada método analizado en la prueba triaxial B1 NC CU (TBH-430)

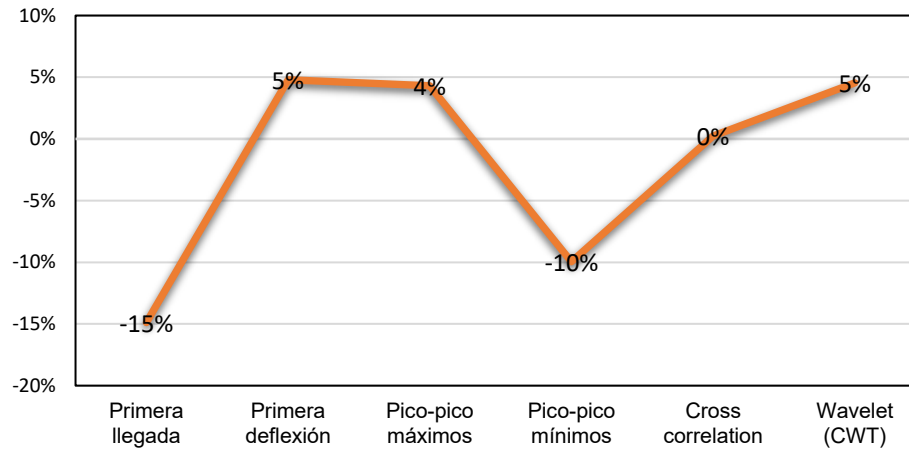


Figura 5.11 Porcentaje de diferencia de cada método respecto al valor medio B1 NC CU (TBH-430)

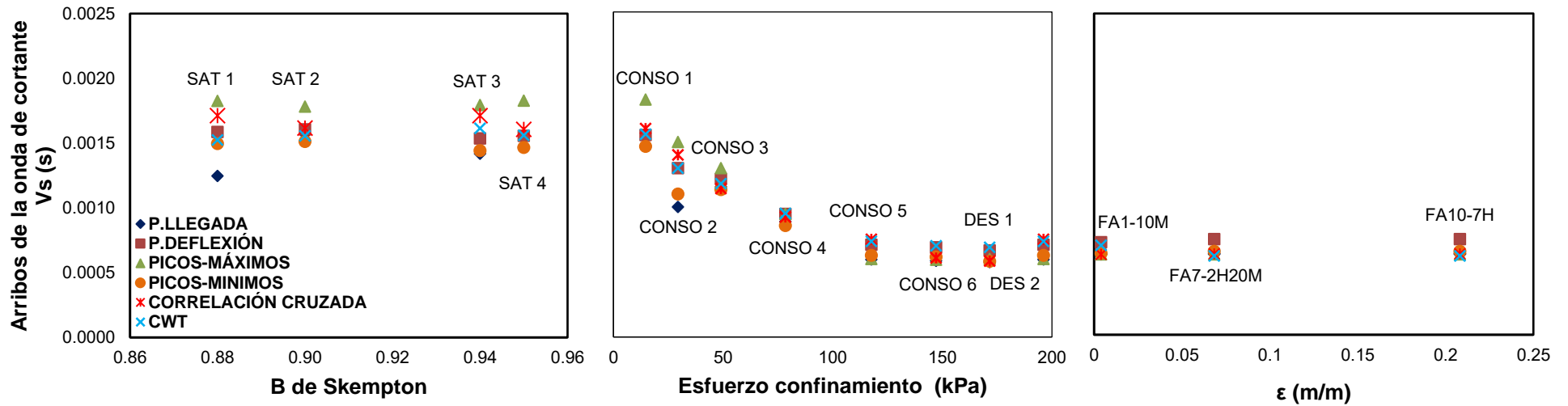


Figura 5.12 Tiempos de arribo con cada método analizado en la prueba triaxial B2 PC CU (TBH-430)

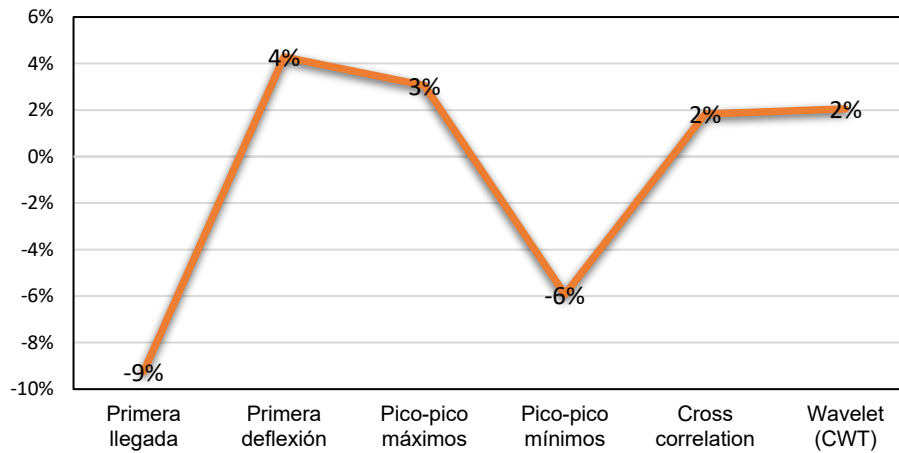


Figura 5.13 Porcentaje de diferencia de cada método respecto al valor medio B2 PC CU (TBH-430)

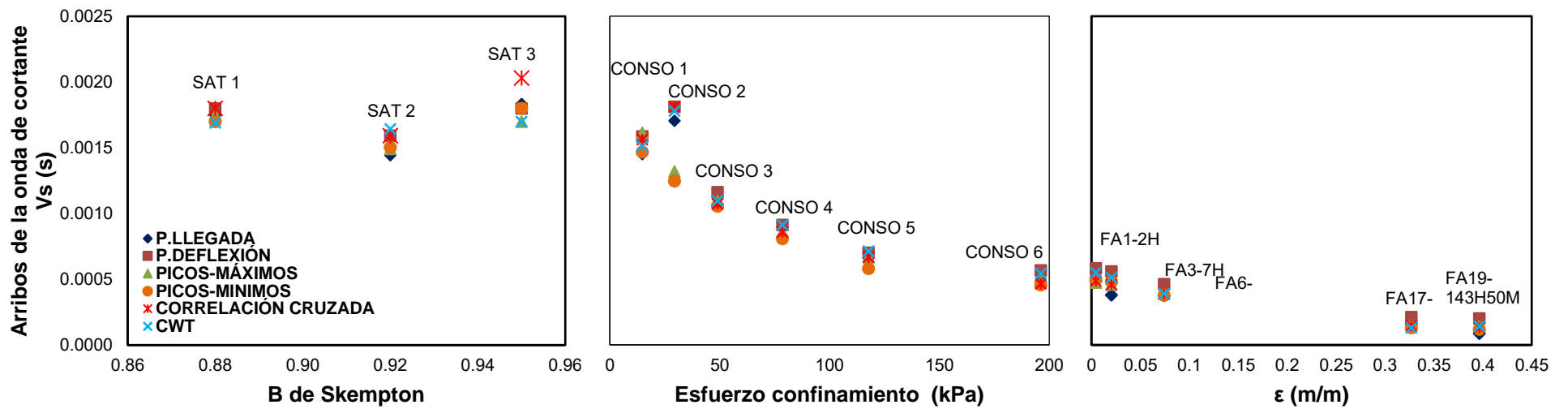


Figura 5.14 Tiempos de arribo con cada método analizado en la prueba triaxial B3 NC CD (TBH-430)

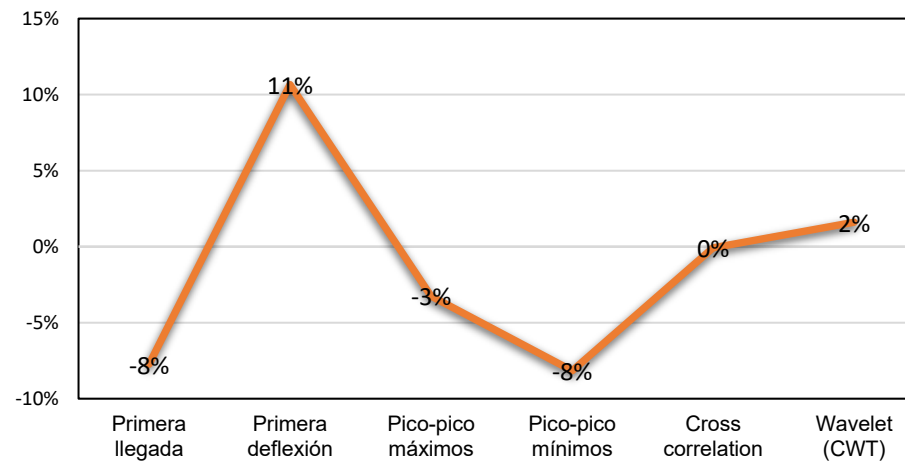


Figura 5.15 Porcentaje de diferencia de cada método respecto al valor medio B3 NC CD (TBH-430)

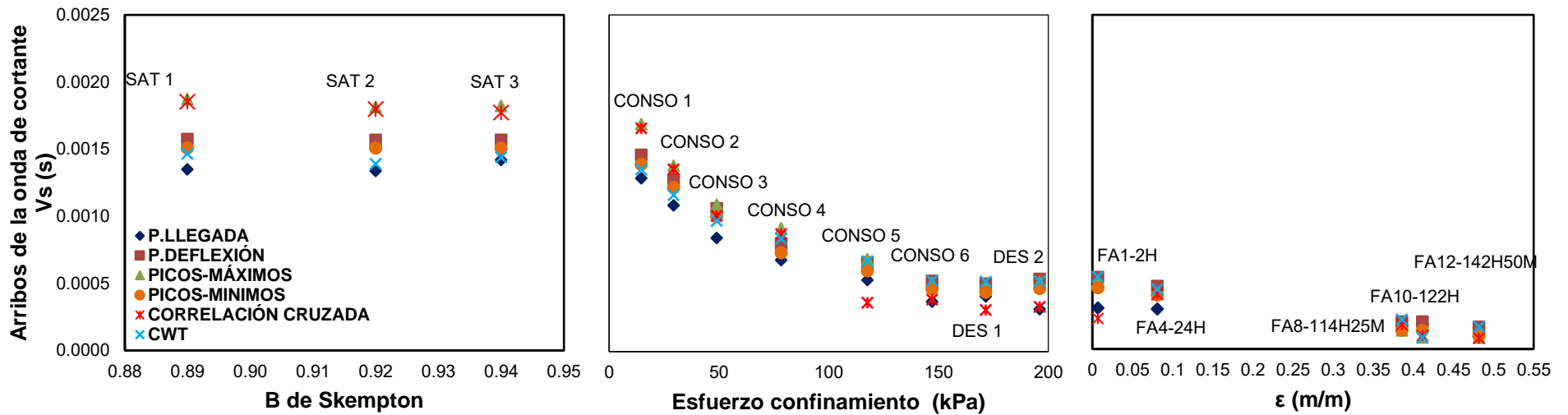


Figura 5.16 Tiempos de arribo con cada método analizado en la prueba triaxial B4 PC CD (TBH-430)

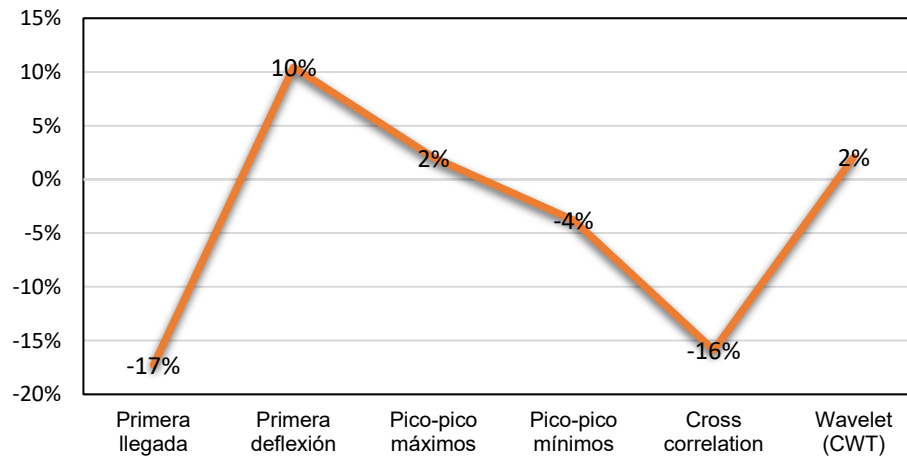


Figura 5.17 Porcentaje de diferencia de cada método respecto al valor medio B4 PC CD (TBH-430)

5.3 Comportamiento de onda sísmica en etapas de la prueba triaxial

En esta sección se presentan algunos sismogramas de las señales de cortante V_s y compresión V_p , obtenidas con elementos bender instrumentados en la cámara triaxial. Las señales fueron adquiridas al finalizar cada una de las etapas trabajadas: saturación, consolidación y falla. Las frecuencias aplicadas al elemento bender para las señales de cortante fueron de 4 kHz y para el elemento bender para las señales de compresión de 40 kHz.

En la Figura 5.18 se muestran las señales de onda de cortante de la prueba A2 PC CU del sondeo SM-TP-23. Las señales se encuentran divididas por las diferentes etapas de la prueba. En la etapa de saturación las señales no muestran un corrimiento en su arribo, es decir, no hay un aumento en la velocidad; esto es porque la onda de cortante no viaja en líquidos.

La consolidación está dividida en cinco etapas de carga y tres de descarga, donde las señal fueron tomadas al finalizar cada etapa con diferentes esfuerzos efectivos σ' (0.2, 0.4, 0.7, 1.0, 1.5, 1.25, 1.0 y 0.75 kPa). En las cinco etapas de carga las señales presentan un corrimiento hacia la izquierda en su arribo, lo que significa un aumento de velocidad al aumentar el esfuerzo efectivo aplicado al suelo. Este aumento de velocidades es producto del reacomodo de partículas del suelo (rigidización del suelo), ya que al reducir el espacio donde se encontraba agua y aire las partículas se unen unas con otras, permitiendo que la onda de cortante viaje por las partículas suelo-suelo, obteniendo como resultado un aumento en la velocidad. En las tres etapas de descarga, no se observa corrimiento en los arribos de la señal, por lo que la velocidad no tuvo un aumento.

En la etapa de falla, las señales fueron tomadas a partir del inicio de esta etapa a diferentes tiempos (5,15, 60, 150, 240, 300 y 480 minutos). En las señales no se muestra ningún corrimiento de los primeros arribos, obteniendo velocidades muy similares a lo largo de esta etapa. Es decir, no se presenta un aumento en la velocidad de V_s para este tipo de prueba ya que no se permite el drenaje de agua del suelo y, por lo tanto; el movimiento de las partículas de suelo no se ve afectado.

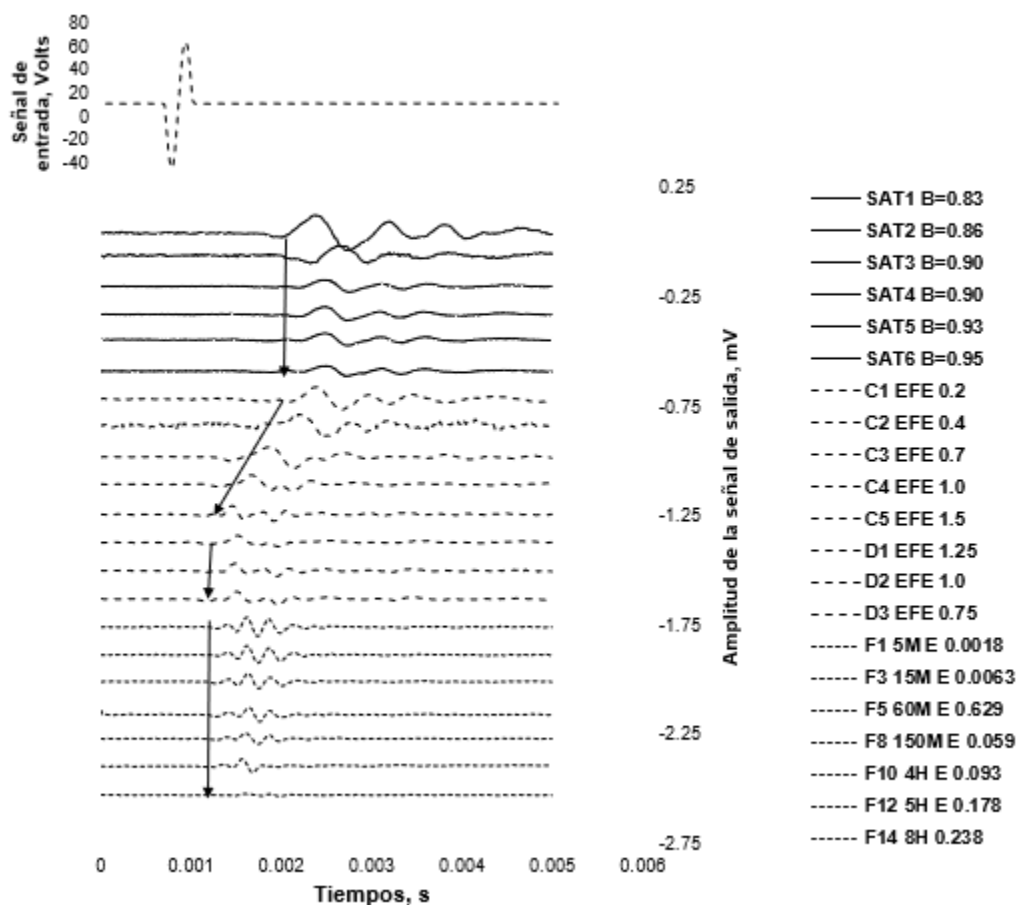


Figura 5.18 Señales de cortante Vs adquiridas en las etapas de saturación, consolidación y falla de la prueba A2 PC CU del sondeo SM-TP-23 (las flechas indican los arribos de las señales)

La Figura 5.19 muestra un sismograma con señales de compresión de la prueba A2 PC CU del sondeo SM-TP-23. En la saturación, se observa un corrimiento muy marcado de los arribos de las señales en las primeras tres etapas de saturación con un B de Skempton de 0.83 a 0.90 y en menor grado para las últimas tres señales. Las cuales van de 0.92 a 0.95, donde se puede decir que el suelo ya se encontraba parcialmente saturado. En la etapa de consolidación y falla las señales Vp no muestran un cambio considerable de corrimiento, por lo que, no hay un aumento en la velocidad. Esto a que las señales Vp no son influenciadas por un cambio en la estructura del suelo.

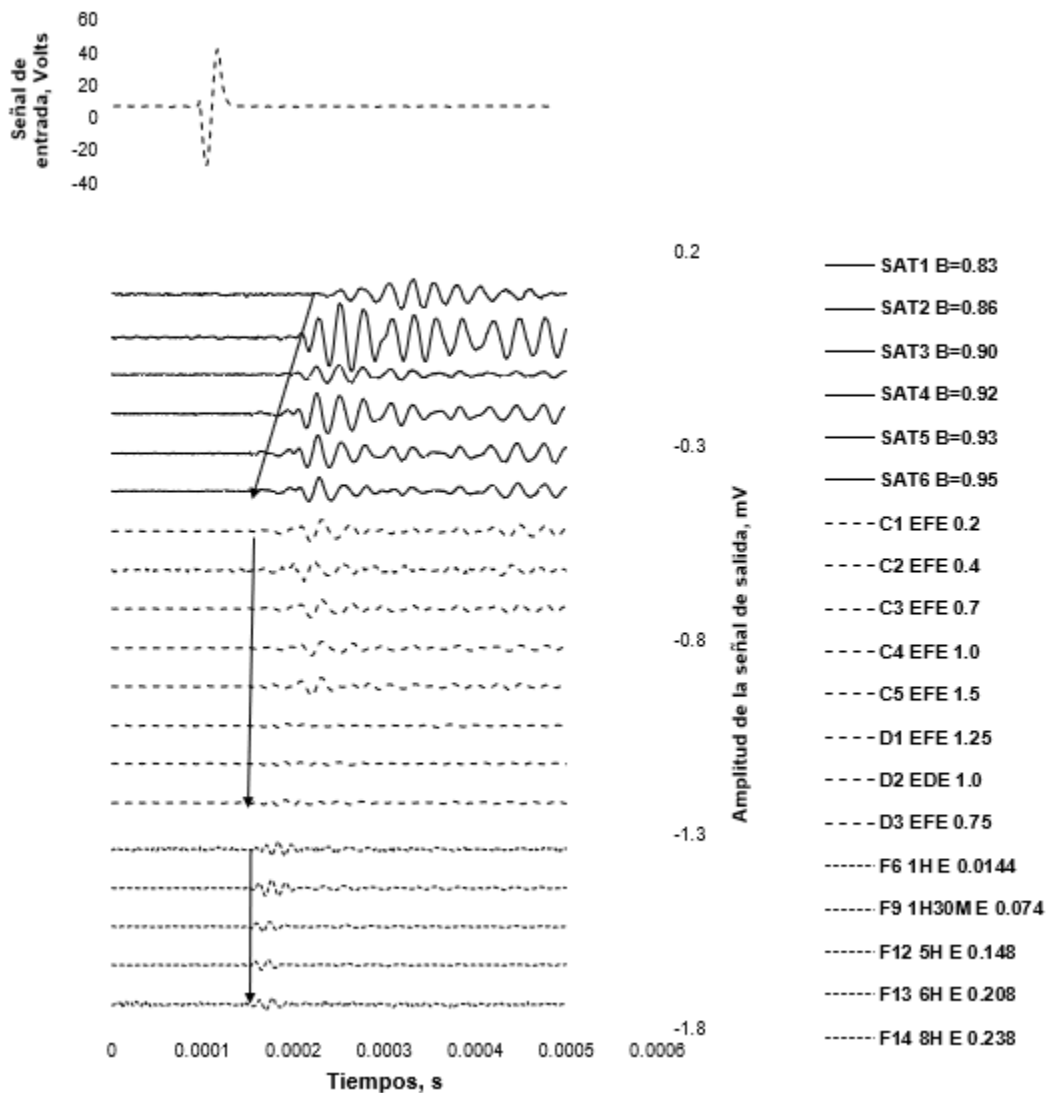


Figura 5.19 Señales de compresión Vp adquiridas en las etapas de saturación, consolidación y falla de la prueba A2 PC CU del sondeo SM-TP-23 Vp (las flechas indican los arribos de las señales)

En la Figura 5.20 se muestran señales de cortante de la prueba B1 NC CU del sondeo TBH-430. Al igual que en las señales de cortante anteriores, los primeros arribos en las etapas de saturación y falla no muestran un cambio. En la consolidación si se observa el corrimiento de los primeros arribos, esto es, por que el suelo en estas etapas es modificado estructuralmente por la aplicación de esfuerzos efectivos σ' (0.15, 0.30, 0.50, 0.80, 1.2 y 2 kPa).

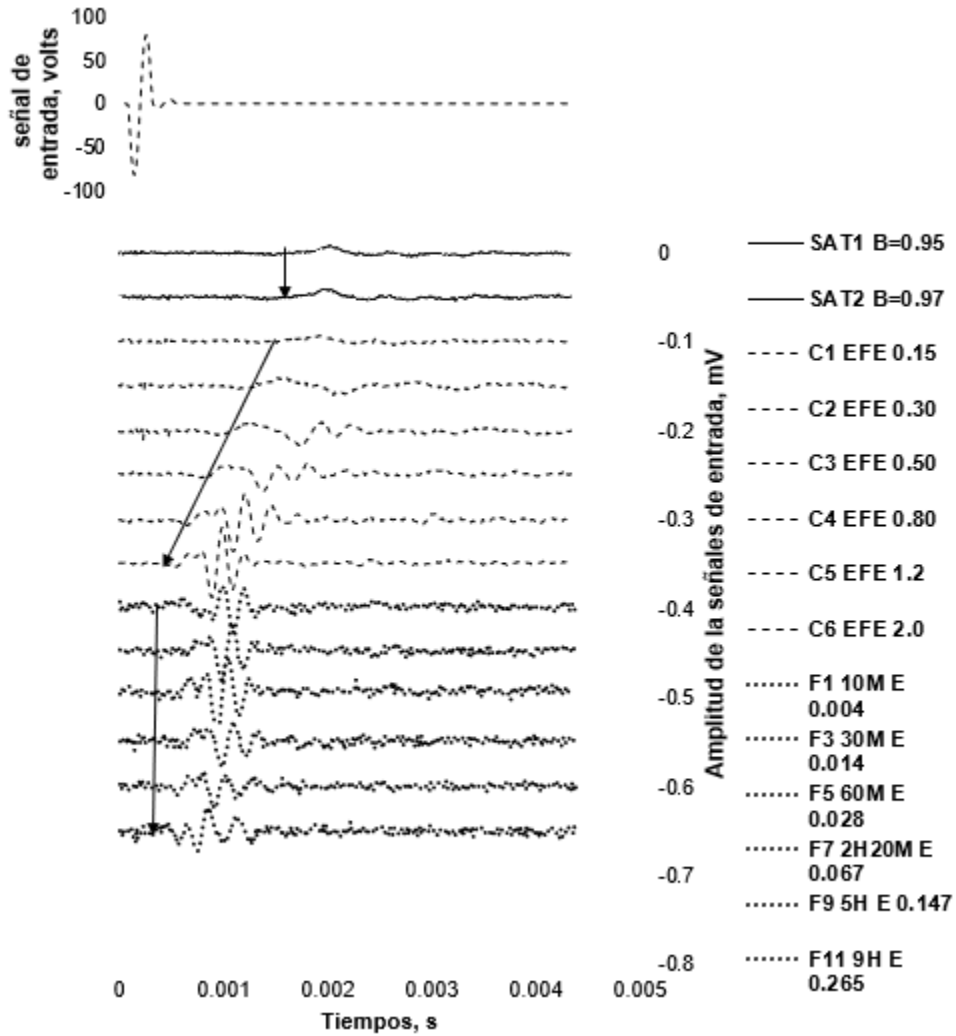


Figura 5.20 Señales de cortante Vs adquiridas en las etapas de saturación, consolidación y falla de la prueba B1 NC CU del sondeo TBH-430

En la Figura 5.21 se muestran las señales de cortante para una prueba si drenada B3 NC CD TBH-430. En saturación no se muestra ningún cambio en los arribos de las señales. En la consolidación, se observa el corrimiento de los primeros arribos provocados por la aplicación de esfuerzos efectivos σ' (0.15, 0.30, 0.50, 0.80, 1.2 y 2 kPa). En la etapa de falla las señales adquiridas también fueron tomadas a diferentes tiempos (2, 7, 26, 51, 73, 194 y 143 horas) y a diferencia de la prueba CU, en esta prueba los primeros arribos si muestran un desplazamiento a la izquierda, producto del endurecimiento del suelo (rigidización), lo cual se traduce a un aumento de las velocidades de cortante V_s que van desde 139.47 a 283.45 m/s.

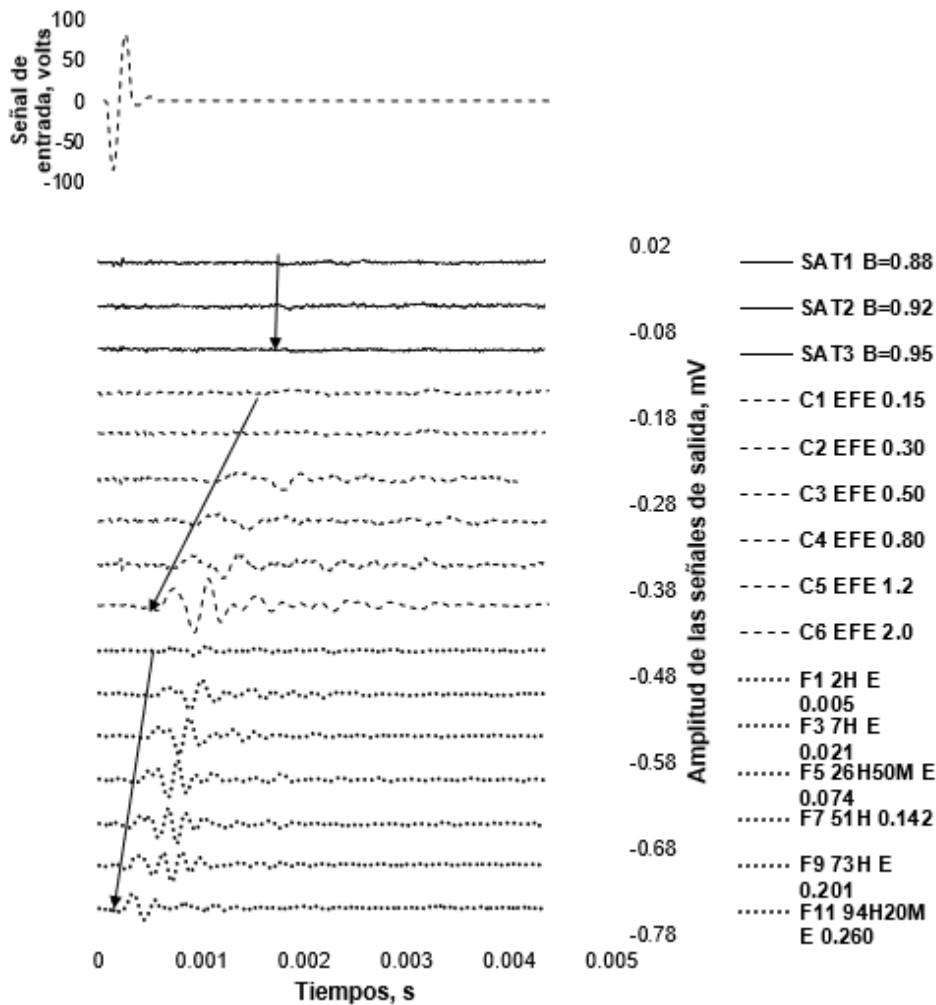


Figura 5.21 Señales de cortante V_s adquiridas en las etapas de saturación, consolidación y falla de la prueba B3 NC CD del sondeo TBH-430

5.3.1 Medición de B de Skempton contra las velocidades de Vs y Vp (etapa de saturación)

El parámetro B de Skempton es utilizado para evaluar el grado de saturación de un suelo. En este trabajo a lo largo de la etapa de saturación se tomaron mediciones de las señales de onda Vs y Vp.

En la saturación, la medición más importante es la de Vp, ya que esta onda viaja en cualquier medio y su velocidad en el agua es de 1450 m/s. Debe señalarse que este valor puede variar dependiendo de la temperatura y de la cantidad de sólidos disueltos en el medio acuoso. Con los resultados de los primeros arribos se calcularon las velocidades de las pruebas en la etapa de saturación, los resultados se muestran en las Tablas 5.1 y 5.2. En la prueba A1 NC (SM-TP-23) se aplicaron tres incrementos efectivos, obteniendo B de Skempton de 0.94 a 0.96 y una velocidad de 1729.42 m/s a 1736.33 m/s. De lo anterior, se concluye que la muestra se encontraba parcialmente saturada, ya que, el parámetro de saturación no presenta gran aumento; por consiguiente, la velocidad Vp tampoco presenta un aumento significativo.

En la prueba A2 PC (SM-TP-23), el parámetro de B de Skempton es bajo al inicio de la saturación, empezando con una velocidad de 1310.85 m/s con un B de 0.83. Conforme aumenta el parámetro por la saturación la velocidad aumenta a 1638.20 m/s. En la Figura 5.22, se observa el comportamiento de las velocidades de Vs y Vp en la etapa de saturación, donde se observa el aumento de las velocidades de Vp conforme aumenta el parámetro de B de Skempton. Aumento que está relacionado con la entrada de agua al suelo, es decir, la velocidad de Vp aumenta conforme el suelo tiene más agua.

Para el sondeo TBH-430, los contenidos de agua del suelo van desde 202.8 % a 212.74 %. Obteniendo parámetros de B de Skempton altos al principio de la saturación, por lo que se infiere que la muestra estaba parcialmente saturada. En la prueba B1 NC (TBH-430), con un contenido de agua de 203.74 % la B de Skempton varía de 0.95 a 0.97 y la Vp es de 1676.71 m/s a 1701 m/s. Comprobando que el suelo se encontraba altamente saturado. En la prueba B2 PC y B3 NC (TBH-430) del mismo sondeo con contenidos de agua de 207.40 y 202.80 %, se observa un claro aumento en la velocidad Vp conforme aumenta el parámetro de B de Skempton, el cual va en la prueba B2 PC de 0.83 a 0.95 con velocidades de 1570.11 m/s a 1652.64 m/s. y en la prueba B3 NC (TBH-430) con un B de Skempton de 0.78 a 0.95 con velocidades de 1579.38 m/s a 1675.63 m/s. Para la prueba B4 PC (TBH-430) con un contenido de humedad de 212.74 %, los parámetros de B de Skempton van de 0.89 a 0.94. Con velocidades de 1508.26 m/s a 1782.97 m/s. En la Figura

5.23 se observa el aumento ya mencionado de V_p conforme aumenta el parámetro de saturación.

Tabla 5.1 Parámetro de B de Skempton y velocidades V_s y V_p en el sondeo SM-TP-23

| Pruebas | Sondeo | Profundidad m | Descripción | W_L % | B de Skempton | V_s m/s | V_p m/s |
|---------|----------|------------------|--------------------------|---------|---------------|--------------|--------------|
| A1 NC | SM-TP-23 | 4.05-4.65 | Arcilla color gris-verde | 123.52 | 0.94 | 48.76 | 1729.42 |
| | | | | | 0.95 | 48.60 | 1729.93 |
| | | | | | 0.96 | 48.53 | 1736.33 |
| | | | | | 0.83 | 37.69 | 1310.85 |
| | | | | | 0.86 | 38.77 | 1329.26 |
| A2 PC | SM-TP-23 | 4.05-4.65 | Arcilla color gris-verde | 160.18 | 0.9 | 40.78 | 1529.81 |
| | | | | | 0.92 | 40.56 | 1624.87 |
| | | | | | 0.93 | 40.49 | 1637.22 |
| | | | | | 0.95 | 40.36 | 1638.20 |

Tabla 5.2: Parámetro de B de Skempton y velocidades V_s y V_p en el sondeo TBH-430.

| Pruebas | Sondeo | Profundidad m | Descripción | W_L % | B de Skempton | V_s m/s | V_p m/s |
|---------|---------|------------------|---|---------|---------------|--------------|--------------|
| B1 NC | TBH-430 | 9.3 - 9.9 | Arcilla color verde-café con presencia de arena | 203.74 | 0.95 | 46.35 | 1676.71 |
| | | | | | 0.97 | 45.88 | 1701.00 |
| B2 PC | TBH-430 | 9.3 - 9.9 | Arcilla color verde-café con presencia de arena | 207.405 | 0.88 | 41.14 | 1570.11 |
| | | | | | 0.9 | 41.28 | 1641.71 |
| | | | | | 0.94 | 41.18 | 1643.93 |
| B3 NC | TBH-430 | 9.3 - 9.9 | Arcilla color verde-café con presencia de arena | 202.8 | 0.95 | 40.85 | 1652.64 |
| | | | | | 0.88 | 37.64 | 1579.38 |
| B4 PC | TBH-430 | 9.3 - 9.9 | Arcilla color verde-café con presencia de arena | 212.74 | 0.92 | 41.28 | 1607.79 |
| | | | | | 0.95 | 36.75 | 1675.63 |
| | | | | | 0.89 | 44.38 | 1508.26 |
| | | | | | 0.92 | 46.13 | 1761.23 |
| | | | | | 0.94 | 43.73 | 1782.98 |

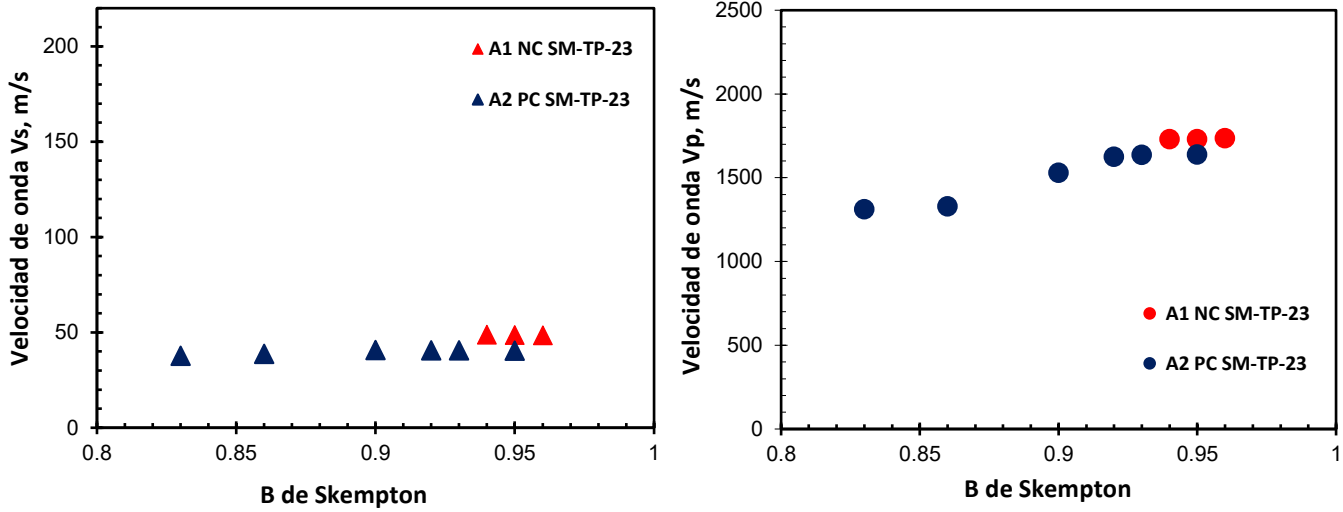


Figura 5.22 Parámetro B de Skempton contra V_s y V_p (SM-TP-23)

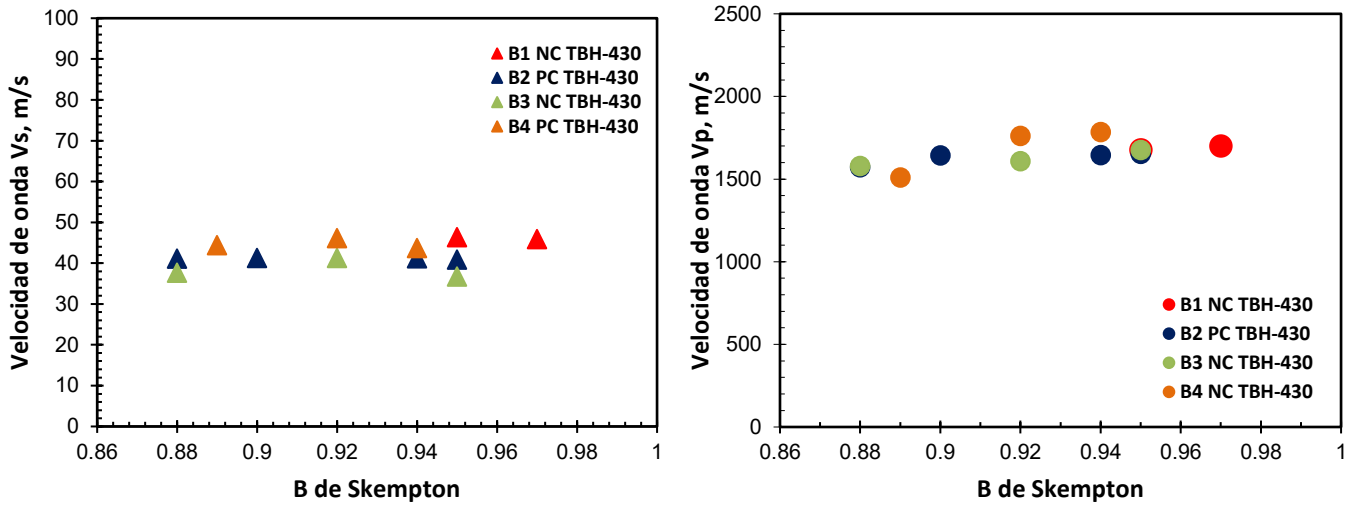


Figura 5.23 Parámetro B de Skempton contra V_s y V_p (TBH-430)

La onda de cortante V_s solo puede viajar a través de sólidos, por lo que en la etapa de saturación la velocidad de V_s no aumenta como se observa en la Figura 5.22 y Figura 5.23. Esto quiere decir que el suelo en la etapa saturación no presenta cambios en su estructura sólida.

5.3.2 Relación de vacíos e contra Vs y Vp (etapa de consolidación)

Cuando el suelo es consolidado por los esfuerzos efectivos de confinamiento que son aplicados al suelo, este presenta un cambio en su relación de vacíos debido a la expulsión de agua y aire que se presenta en el fenómeno de consolidación. Fenómeno que provoca que las partículas del suelo estén más en contacto entre ellas. Por lo anterior, la velocidad de las ondas de corte, Vs, aumenta conforme aumentan los esfuerzos efectivos aplicados y al disminuir las relaciones de vacíos del suelo (ver Tabla 5.3 y Tabla 5.4).

Tabla 5.3 Relación de vacíos y velocidades Vs y Vp (SM-TP-23)

| <i>Sondeo (SM-TP-23)</i> | | | | |
|--------------------------|----------------------|----------|-------------------|-------------------|
| <i>Pruebas</i> | <i>Profundidad m</i> | <i>e</i> | <i>Vs m/s</i> | <i>Vp m/s</i> |
| A1 NC | 4.05-4.65 | 3.17 | 48.59 | 1788.91 |
| | | 3.01 | 49.55 | 1808.69 |
| | | 2.72 | 58.19 | 1821.41 |
| | | 2.50 | 75.13 | 1841.81 |
| | | 2.26 | 113.46 | 1842.46 |
| A2 PC | 4.05-4.65 | 4.23 | 41.59 | 1679.65 |
| | | 4.07 | 53.49 | 1660.89 |
| | | 3.73 | 75.90 | 1614.77 |
| | | 3.46 | 93.93 | 1661.09 |
| | | 3.10 | 116.16 | 1642.98 |
| | | 3.05 | 115.73 | 1642.98 |
| | | 3.01 | 115.81 | 1660.89 |
| 2.99 | 116.96 | 1644.52 | | |

Tabla 5.4 Relación de vacíos y velocidades Vs y Vp (TBH-430)

| Sondeo TBH-430 | | | | |
|-----------------------|----------------------|----------|-------------------|-------------------|
| Pruebas | Profundidad m | e | Vs m/s | Vp m/s |
| B1 NC | 9.3-9.9 | 5.40 | 48.55 | 1708.95 |
| | | 5.06 | 58.87 | 1705.27 |
| | | 4.76 | 69.90 | 1716.10 |
| | | 4.39 | 86.81 | 1699.90 |
| | | 3.93 | 114.07 | 1707.94 |
| | | 3.14 | 144.24 | 1701.49 |
| B2 PC | 9.3-9.9 | 5.84 | 43.16 | 1776.03 |
| | | 5.56 | 49.74 | 1666.98 |
| | | 5.23 | 57.71 | 1678.96 |
| | | 4.70 | 72.70 | 1698.26 |
| | | 4.11 | 113.48 | 1633.25 |
| | | 3.24 | 113.48 | 1699.11 |
| | | 3.21 | 114.32 | 1661.34 |
| 3.24 | 113.08 | 1663.23 | | |
| B3 NC | 9.3-9.9 | 5.32 | 44.31 | 1731.55 |
| | | 5.08 | 52.08 | 1732.84 |
| | | 4.69 | 61.78 | 1736.70 |
| | | 4.24 | 78.72 | 1702.36 |
| | | 3.79 | 104.49 | 1719.90 |
| | | 3.16 | 142.72 | 1757.77 |
| B4 PC | 9.3-9.9 | 6.07 | 48.49 | 1758.08 |
| | | 5.64 | 55.56 | 1796.21 |
| | | 5.06 | 67.67 | 1774.78 |
| | | 4.45 | 86.51 | 1785.00 |
| | | 3.73 | 104.54 | 1835.45 |
| | | 2.58 | 134.15 | 1857.06 |
| | | 2.57 | 134.48 | 1847.38 |
| 2.56 | 132.26 | 1870.74 | | |

En las tablas, se observa como aumentan las Vs conforme disminuye la relación de vacíos para cada uno de los sondeos experimentados; además se observa que la relación de vacíos no sufre cambios en la etapa de descarga (encerrado en cuadro negro) por lo que la velocidad de Vs prácticamente no cambia.

Cuando un suelo es preconsolidado, es decir, cuando $OCR > 1$, disminuye la presión de confinamiento que se le estaba aplicando al suelo y conforme el OCR se incrementa, el suelo se descarga. En dicho proceso para cada una de las pruebas realizadas se observa como la relación de vacíos ya no muestra cambios considerables. Para el sondeo SM-TP-23 en la prueba A2 PC con tres etapas de descarga de 3.05 a 2.99, como se puede apreciar en la Tabla 5.3 (cuadro negro). Para el sondeo TBH-430 en la prueba B2 PC con dos etapas de descarga la relación de vacíos va de 3.21 a 3.24 y para la prueba B4 PC con tres etapas de descarga va de 2.58 a 2.56, observándose en la Tabla 5.4 (cuadros negros). Las velocidades de

cortante tienen relación con el reacomodo de las partículas del suelo y dado a que en las etapas de descarga no existe un cambio considerable de la estructura del suelo, por ende, ya no existe un aumento en las velocidades de cortante V_s y tampoco existe un cambio en las V_p ya que estas solo dependen del grado de saturación del suelo.

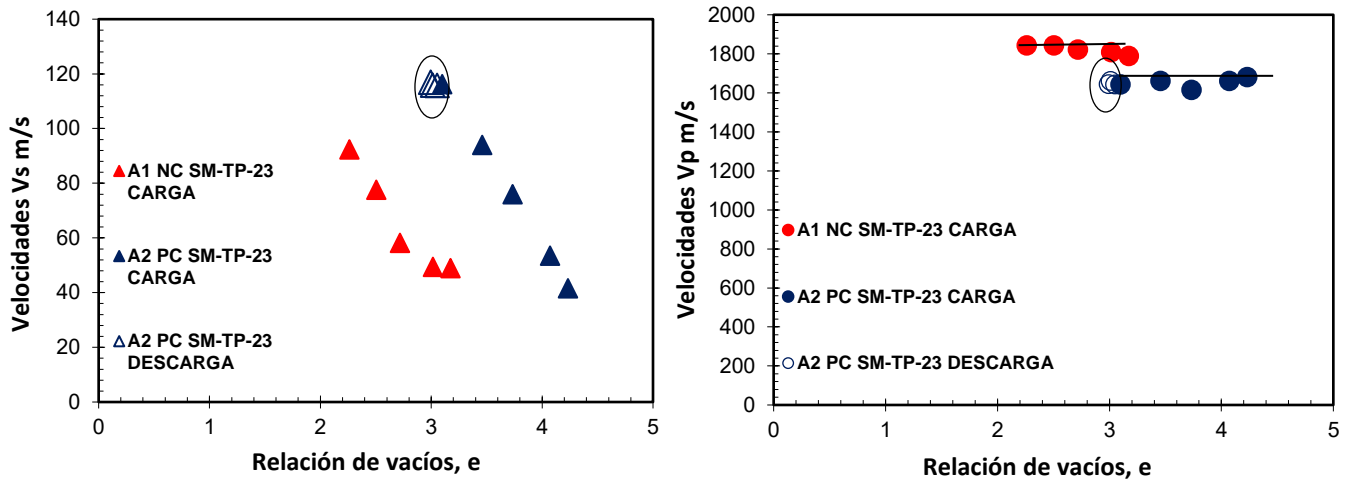


Figura 5.24 Comportamiento de V_s y V_p contra la relación de vacíos e (SM-TP-23)

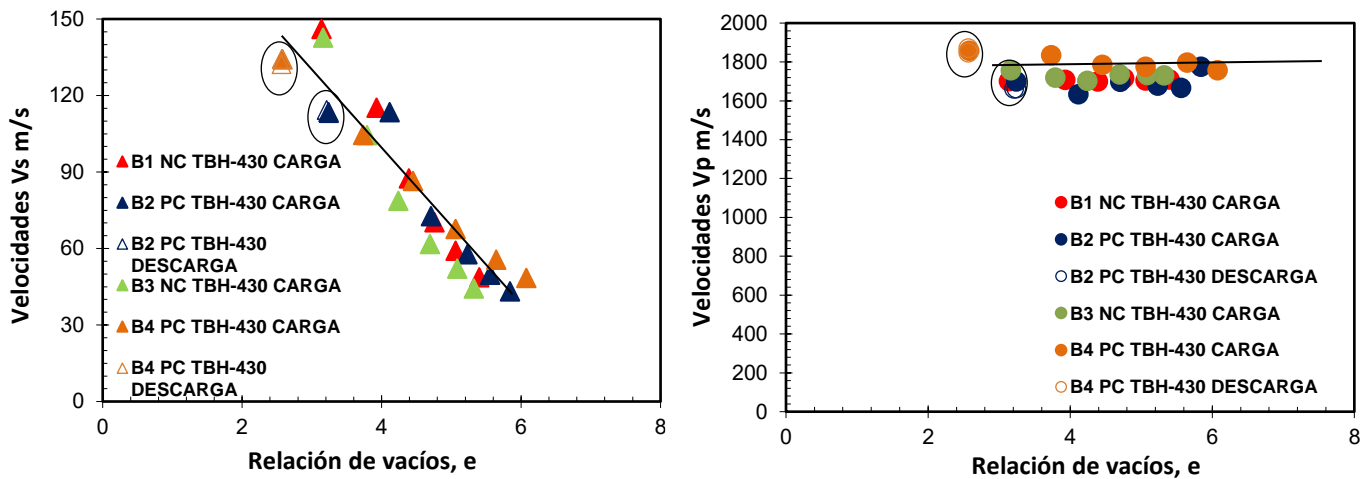


Figura 5.25 Comportamiento de V_s y V_p contra la relación de vacíos e (TBH-430)

Al graficar la relación de vacíos contra las velocidades V_s y V_p , en la etapa de consolidación se observa como la onda V_s aumenta conforme disminuye la relación de vacíos (ver Figura 5.24 y Figura 5.25 en la gráfica izquierda), este efecto se da ya que las partículas del suelo son reacomodadas ante cada esfuerzo que se aplica al suelo y al estar más juntas la velocidad aumenta. Las velocidades V_p no

presentan un cambio significativo en la etapa de consolidación (ver Figura 5.24 y Figura 5.25 en la gráfica derecha). También se observa como las velocidades de cortante ya no presentan un aumento en la etapa de descarga (encerradas en círculos negros).

5.3.3 Mediciones de V_s y V_p durante la etapa de falla

Como ya se mencionó en el capítulo 4, en la etapa de falla se somete al suelo a una carga axial aplicada a través del vástago superior de la cámara, la cual se registra y regula con la celda de carga sumergible instalada en la base de la probeta ensayada. Para este trabajo se realizaron dos tipos de falla: el no drenado (CU) y el sí drenado (CD). En el primero se impide la entrada o salida de agua a la probeta de suelo, provocando cambios en la presión de poro en su interior. En el segundo se deja abierta la válvula de drenaje para que el agua fluya libremente hacia el exterior o interior de la probeta. La velocidad de aplicación de carga en los ensayos CD, debe ser suficientemente lenta para evitar la acumulación de excesos de presiones de poro no drenados. A lo largo de la etapa de falla, a cada determinado tiempo se tomaron mediciones de señales V_s y V_p .

A continuación, se muestran los resultados de las velocidades de cortante y de compresión obtenidas en la etapa de falla. En la Tabla 5.5 se muestran los resultados de las dos pruebas realizadas al sondeo SM-TP-23 y en la Tabla 5.6 los resultados de las cuatro pruebas realizadas al sondeo TBH-430.

Tabla 5.5 Deformación unitaria axial y velocidades Vs y Vp (SM-TP-23)

| Sondeo (SM-TP-23) | | | | |
|--------------------------|-----------------------|---|---------------|---------------|
| Pruebas | Mediciones min | Deformación unitaria axial ϵ (mm/mm) | Vs m/s | Vp m/s |
| A1 NC CU | 5 | 0.003 | 93.48 | |
| | 10 | 0.005 | 92.47 | |
| | 15 | 0.008 | 91.95 | |
| | 30 | 0.015 | 87.73 | 1667.30 |
| | 45 | 0.022 | 84.60 | |
| | 60 | 0.030 | 82.69 | 1701.64 |
| | 90 | 0.045 | 81.08 | |
| | 120 | 0.059 | 77.88 | 1661.27 |
| | 150 | 0.075 | 75.57 | |
| | 180 | 0.089 | 74.04 | 1635.29 |
| | 240 | 0.118 | 71.40 | 1694.61 |
| | 300 | 0.148 | 67.78 | 1661.77 |
| | 360 | 0.178 | 65.22 | 1706.75 |
| A2 PC CU | 5 | 0.002 | 116.24 | |
| | 10 | 0.004 | 116.19 | |
| | 15 | 0.006 | 113.79 | |
| | 30 | 0.014 | 112.37 | 1652.57 |
| | 60 | 0.029 | 109.11 | 1680.74 |
| | 120 | 0.059 | 103.81 | 1676.53 |
| | 150 | 0.075 | 101.63 | |
| | 240 | 0.094 | 94.15 | 1702.01 |
| 300 | 0.149 | 90.07 | 1682.81 | |

Tabla 5.6 Deformación unitaria axial y velocidades Vs y Vp (TBH-430)

| Sondeo (SM-TP-23) | | | | | | | | | |
|--------------------------|-----------------------|---|---------------|---------------|----------------|-----------------------|---|---------------|---------------|
| Pruebas | Mediciones min | Deformación unitaria axial ϵ (mm/mm) | Vs m/s | Vp m/s | Pruebas | Mediciones min | Deformación unitaria axial ϵ (mm/mm) | Vs m/s | Vp m/s |
| B1 NC CU | 10 | 0.004 | 144.18 | | | 120 | 0.005 | 142.45 | 1670.00 |
| | 15 | 0.006 | 139.66 | | | 300 | 0.015 | 141.65 | 1730.32 |
| | 30 | 0.014 | 139.17 | 1732.61 | | 420 | 0.021 | 142.43 | 1729.01 |
| | 45 | 0.021 | 137.33 | | | 1440 | 0.065 | 163.06 | 1753.70 |
| | 60 | 0.028 | 135.53 | | | 1610 | 0.074 | 162.03 | 1768.48 |
| | 90 | 0.043 | 133.79 | 1739.51 | | 2050 | 0.095 | 168.20 | 1762.70 |
| | 140 | 0.067 | 131.45 | | B3 NC CD | 3060 | 0.142 | 190.75 | 1769.17 |
| | 180 | 0.087 | 129.00 | 1708.40 | | 4240 | 0.194 | 226.88 | 1796.07 |
| | 300 | 0.147 | 125.19 | 1711.52 | | 4380 | 0.201 | 247.44 | 1784.51 |
| | 420 | 0.206 | 122.20 | 1699.13 | | 4710 | 0.216 | 246.19 | 1741.04 |
| | 480 | 0.265 | 106.96 | 1697.64 | | 5660 | 0.260 | 265.06 | 1783.47 |
| 660 | 0.325 | 84.63 | 1739.05 | | 7165 | 0.327 | 301.10 | 1816.28 | |
| | | | | | 8630 | 0.397 | 309.84 | 1778.70 | |
| B2 PC CU | 10 | 0.004 | 108.40 | | | 120 | 0.007 | 132.97 | 1895.90 |
| | 15 | 0.006 | 108.15 | | | 240 | 0.014 | 133.01 | 1918.19 |
| | 30 | 0.014 | 107.64 | | | 1140 | 0.067 | 140.46 | 1950.45 |
| | 45 | 0.022 | 105.82 | | | 1440 | 0.081 | 147.05 | 1960.44 |
| | 60 | 0.029 | 105.09 | | B4 PC CD | 4320 | 0.243 | 180.70 | 1935.74 |
| | 90 | 0.045 | 104.37 | 1643.12 | | 5940 | 0.334 | 219.26 | 1969.59 |
| | 150 | 0.068 | 100.22 | | | 6840 | 0.386 | 225.00 | 1971.12 |
| | 180 | 0.089 | 94.80 | 1679.19 | | 7320 | 0.411 | 249.98 | 2033.89 |
| | 300 | 0.149 | 89.93 | 1677.85 | | 8340 | 0.468 | 256.52 | 2265.95 |
| | 420 | 0.208 | 88.83 | 1697.95 | | 8520 | 0.482 | 297.75 | 2449.09 |

En la Figura 5.26 se muestran graficados los resultados de la Tabla 5.5, que corresponden a las dos pruebas realizadas al sondeo SM-TP-23. Se observa que conforme la muestra de suelo se va deformando, las velocidades de cortante disminuyen con una trayectoria descendente y en las velocidades de compresión las velocidades ya no muestran un cambio significativo en sus velocidades; por lo que se observa un comportamiento lineal. En la Figura 5.27 se muestran los resultados de la Tabla 5.6 de las cuatro pruebas realizadas al sondeo TBH-430. Las velocidades de cortante para las pruebas no drenadas disminuyen y para las pruebas si drenadas aumentan. Las velocidades de compresión no presentan gran cambio mostrando un comportamiento lineal.

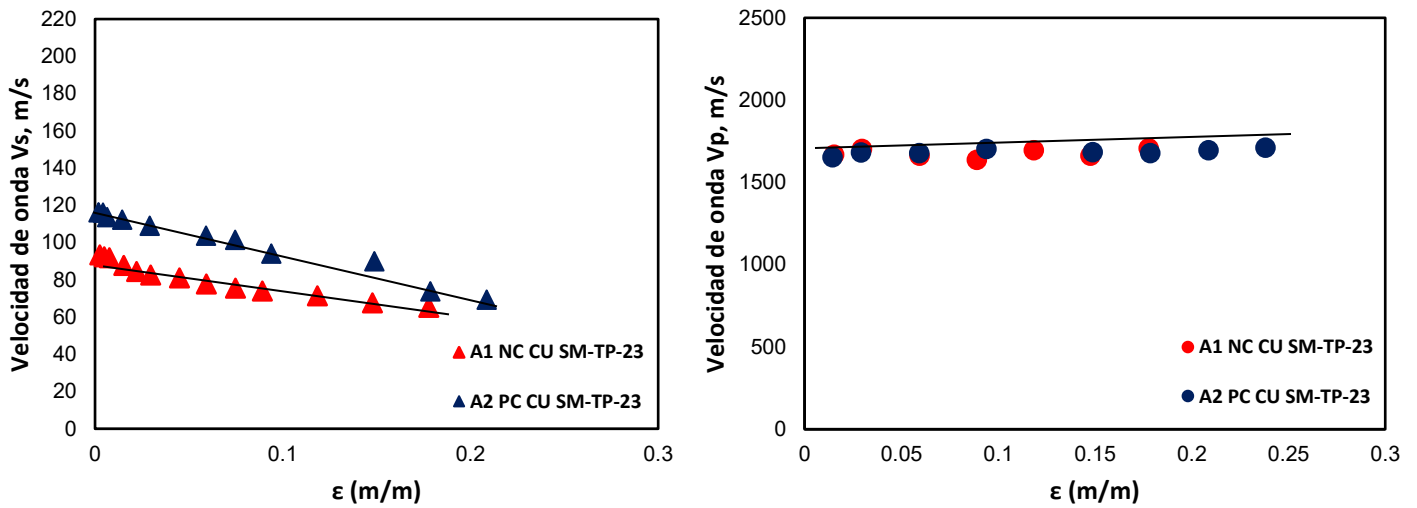


Figura 5.26: Comportamiento de V_s y V_p contra la deformación unitaria axial (SM-TP-23).

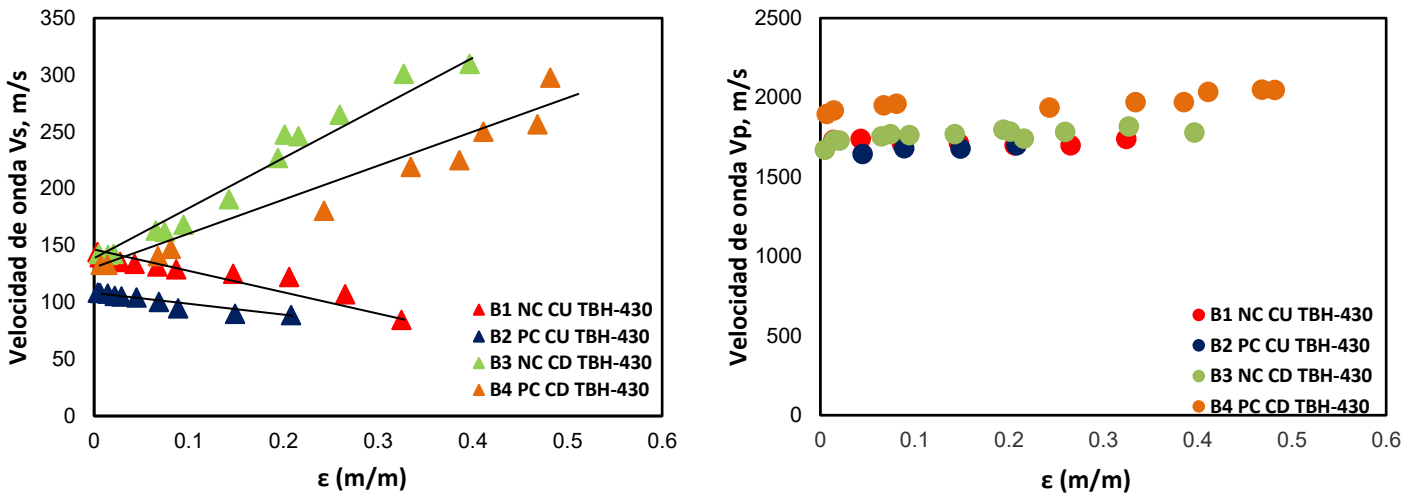


Figura 5.27 Comportamiento de V_s y V_p contra la deformación unitaria axial (TBH-430)

Nota:

(CU) consolidado – no drenado; en la etapa de falla no se permite el drenaje de agua de la muestra de suelo.

(CD) consolidado – si drenado; en la etapa de falla se permite el drenaje de agua de la muestra de suelo.

5.4 Resultados de ensayos en la etapa de falla del sondeo SM-TP-23

A continuación, se presentarán los resultados mecánicos obtenidos en la etapa de falla de las pruebas A1 y A2 del sondeo SM-TP-23, mismos que se grafican contra los resultados de las velocidades de cortante V_s en gráficos de doble eje.

5.4.1 Trayectorias de esfuerzos de las pruebas A1 y A2

En la Figura 5.28 y Figura 5.29 se muestran las curvas esfuerzo-deformación ($q-\epsilon$), en la etapa de falla de las pruebas A1 NC CU y A2 PC CU. Donde se representan los resultados en gráficas de doble eje. En el eje de ordenadas de la izquierda se dan los valores del esfuerzo desviador, q , y a la derecha las velocidades de onda cortante V_s . Las abscisas dan valores de la deformación unitaria axial. En cada figura se observa un círculo encerrando a un punto, el cual hace referencia a un cambio en la relación lineal en la trayectoria de las velocidades V_s ; cuando (q) llega a su pico máximo. Observándose a partir de ese punto otra tendencia lineal de las V_s , cuando (q) empieza a bajar. Este cambio se puede asociar a un punto de cedencia, lo cual a su vez marca el fin del comportamiento elástico y el inicio del comportamiento plástico. Simplificadamente, antes de la cedencia las deformaciones son recuperables y después de esta se generan deformaciones plásticas no recuperables.

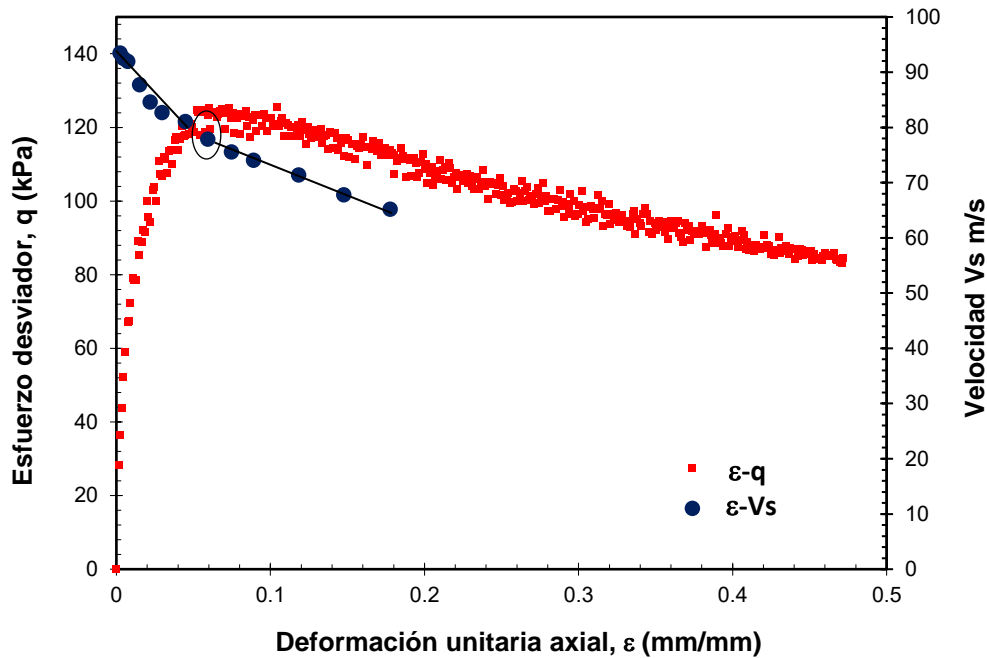


Figura 5.28 Esfuerzo de deformación axial contra esfuerzo desviador y comportamiento de las V_s en la prueba A1 NC CU (SM-TP-23)

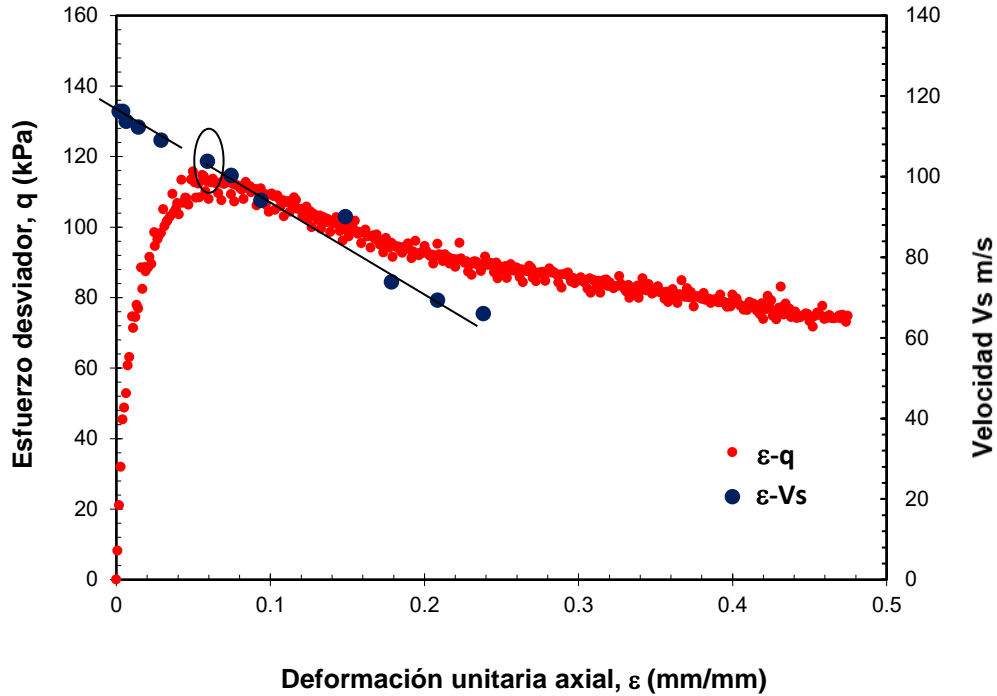


Figura 5.29 Esfuerzo de deformación axial contra esfuerzo desviador y comportamiento de las Vs de la prueba A2 PC CU (SM-TP-23)

En la etapa de falla, el suelo es deformado axialmente y al no permitirse el drenaje de agua en estas pruebas, se presenta un aumento en la presión de poro. En la Figura 5.30 y Figura 5.31 se muestra el comportamiento de la presión de poro contra la deformación axial ($u-\epsilon$) y la velocidad de cortante contra la deformación axial ($V_s-\epsilon$); en un gráfico de doble eje. Al inicio, cuando el suelo comienza a deformarse la presión de poro empieza a aumentar, hasta que llega a un punto en el que este aumento empieza a decrecer. Las velocidades de cortante muestran un cambio en la tendencia (encerrado con círculo), y a partir de ese punto comienza otra tendencia en las velocidades V_s .

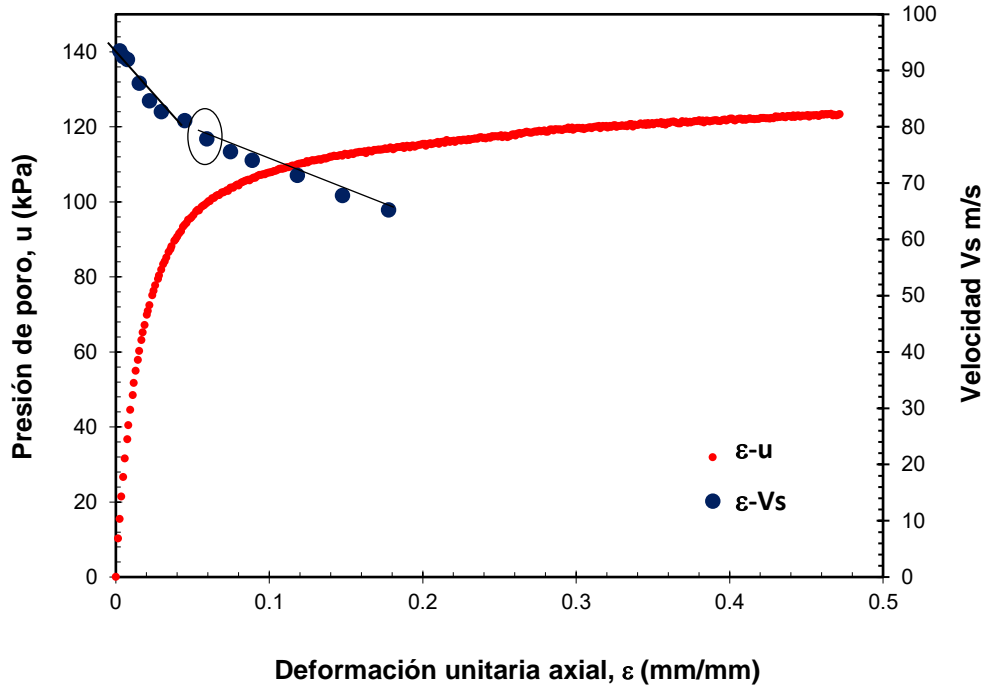


Figura 5.30 Deformación axial contra presión de poro y velocidades V_s de la prueba A1 NC CU SM-TP-23 (Δu - ε - V_s)

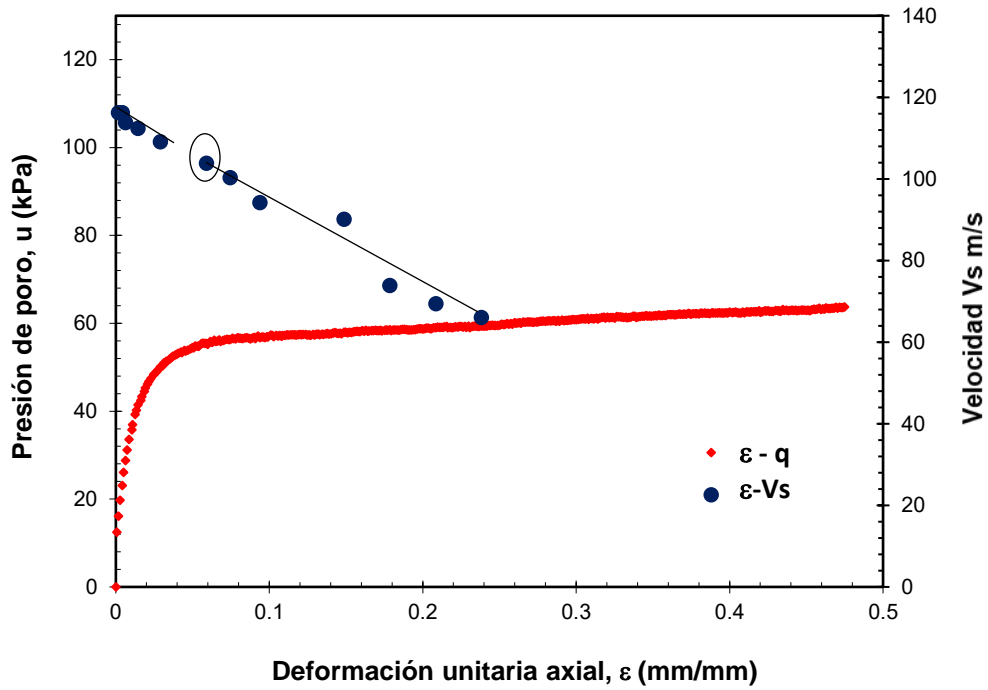


Figura 5.31 Deformación axial contra presión de poro y velocidades V_s de la prueba A2 PC CU SM-TP-23 (Δu - ε - V_s)

En las Figura 5.32 y Figura 5.33 se muestran gráficos de doble eje, donde se graficaron los resultados de los esfuerzos aplicados en la etapa de falla (p' - q) y las velocidades de cortante contra el esfuerzo promedio p' (V_s - p'). Para la prueba A1 NC CU se obtuvo un valor de M de 1.67, con un valor del ángulo de fricción ϕ' de 40° . Para la prueba A2 PC CU el valor de M fue de 2.16, con un valor de ϕ' de 52.62° . A pesar de que las pruebas se realizaron a dos muestras gemelas, los valores de M son muy diferentes.

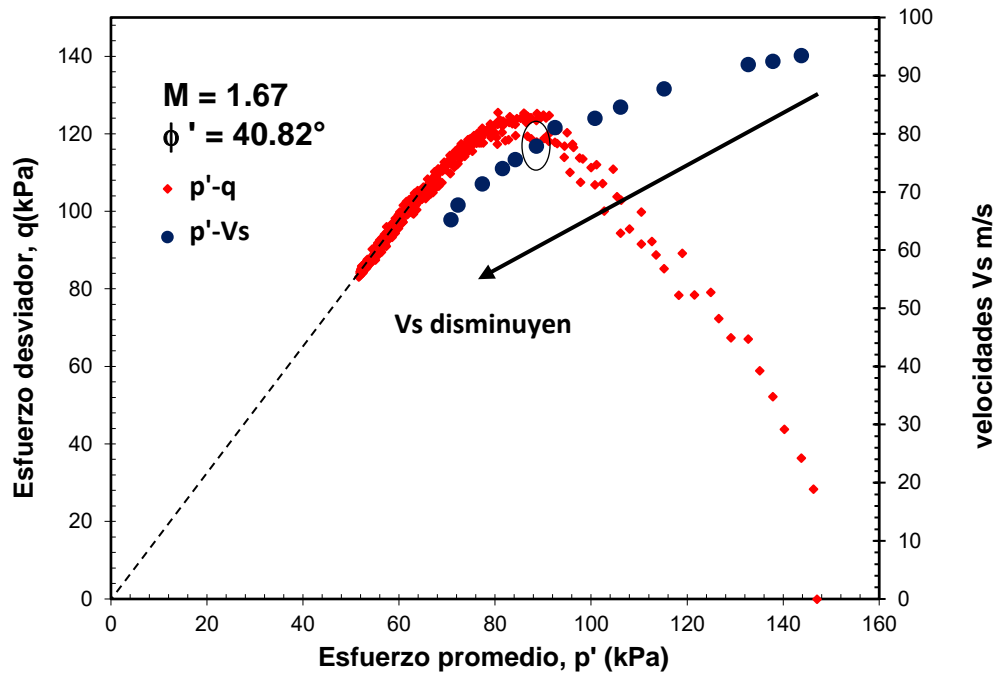


Figura 5.32 Esfuerzo octaédrico contra esfuerzo desviador y velocidades V_s de la prueba A1 NC CU SM-TP-23 (q - p' - V_s)

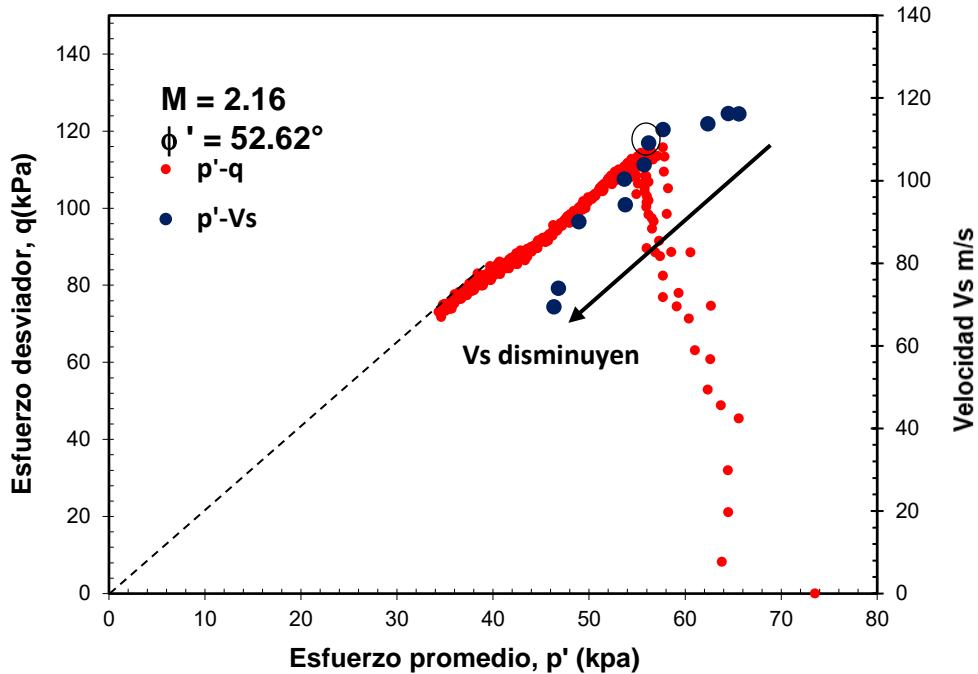


Figura 5.33 Esfuerzo octaédrico contra esfuerzo desviador y velocidades V_s de la prueba A2 PC CU SM-TP-23 ($q-p'-Vs$)

5.5 Resultados de ensayos en la etapa de falla del sondeo TBH-430

A continuación, se presentarán los resultados mecánicos obtenidos en la etapa de falla de las pruebas B1 y B2, B3 y B4 del sondeo STBH-430, mismos que se grafican contra los resultados de las velocidades de cortante V_s en gráficos de doble eje.

5.5.1 Trayectorias de esfuerzos de las pruebas B1, B2, B3 y B4

En las Figura 5.34 y Figura 5.35 se muestran las trayectorias esfuerzo-deformación de las dos pruebas no drenadas (CU) B1 y B2. Con un círculo se encuentra encerrado el punto que hace referencia a un cambio en la relación lineal en las trayectorias de las velocidades de cortante cuando el esfuerzo desviador (q) llega o se aproxima a su pico máximo, teniendo a partir de ese punto un cambio en la tendencia lineal de las V_s cuando (q) empieza a bajar. Como se dijo antes, este cambio se asocia a la cedencia o fluencia del material. En estas pruebas las velocidades de onda cortante V_s decrecen.

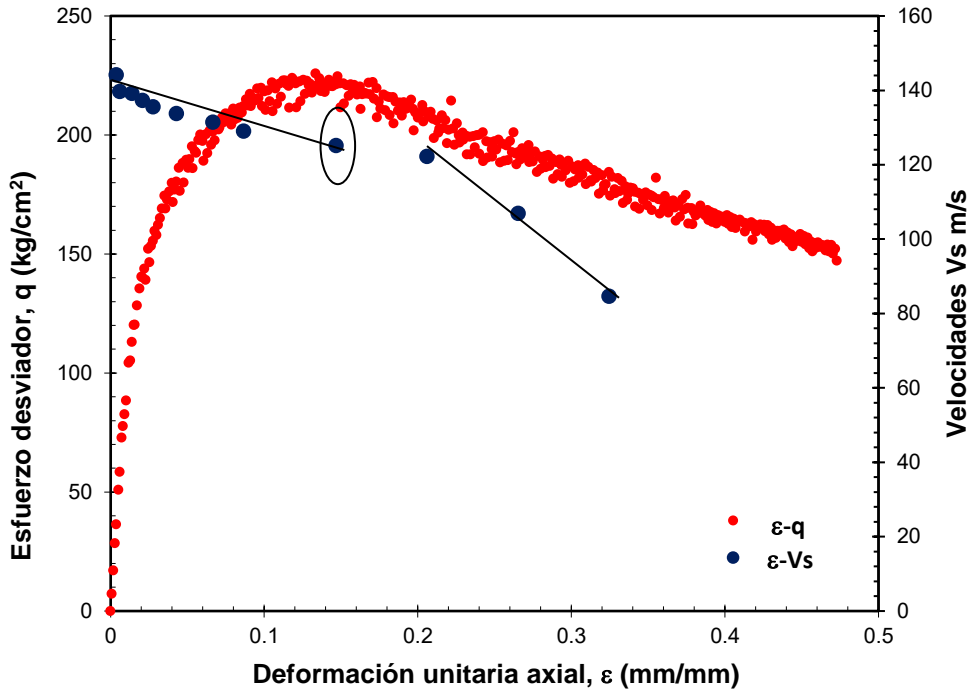


Figura 5.34 Esfuerzo de deformación axial contra esfuerzo desviador y comportamiento de las Vs de la prueba B1 NC CU (TBH-430)

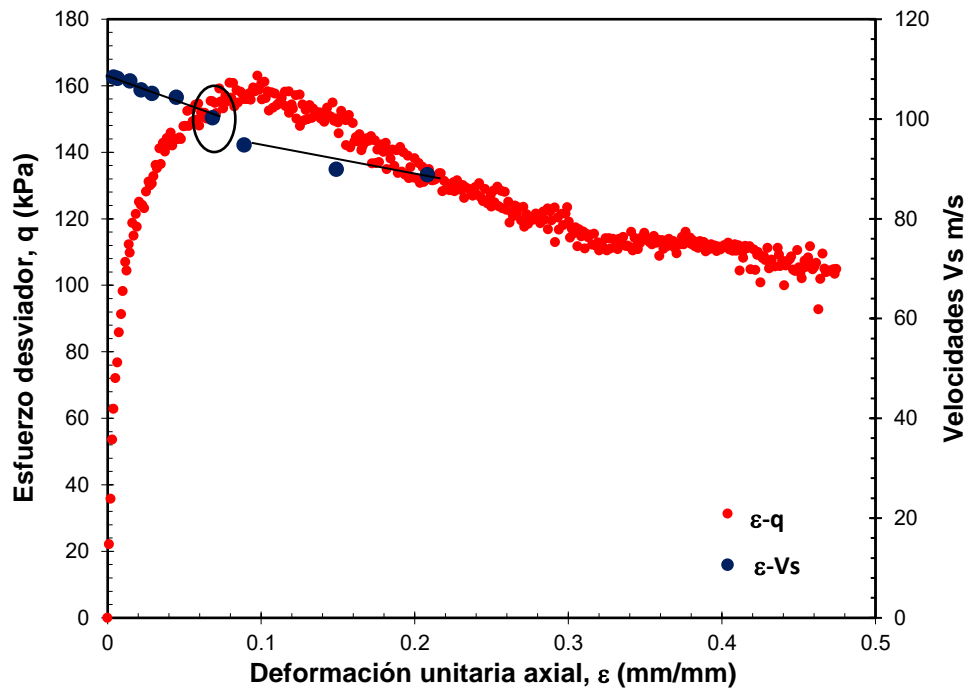


Figura 5.35 Esfuerzo de deformación axial contra esfuerzo desviador y comportamiento de las Vs de la prueba B2 PC CU (TBH-430)

En la Figura 5.36 y Figura 5.37 se muestran las trayectorias esfuerzo-deformación ($q-\varepsilon$), de las pruebas si drenadas (CD) B3 y B4. Se observa que en las pruebas el esfuerzo desviador (q) no muestra un pico máximo, esto es porque se permite el drenaje de agua y por consiguiente el suelo continúa rigidizándose. Las velocidades de onda cortante V_s aumentan.

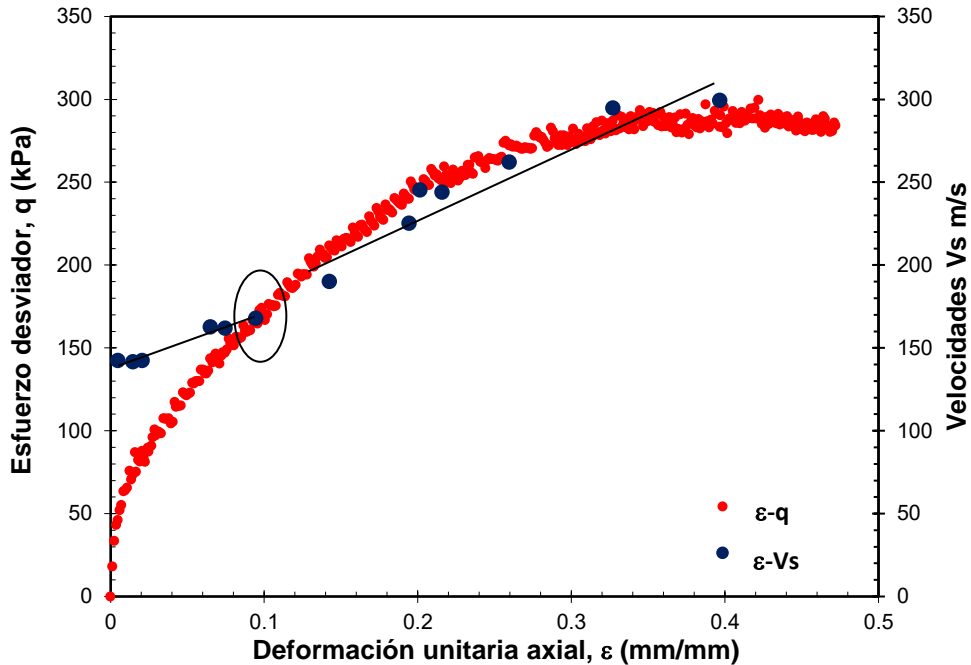


Figura 5.36 Esfuerzo de deformación axial contra esfuerzo desviador y comportamiento de las V_s de la prueba B3 NC CD (TBH-430)

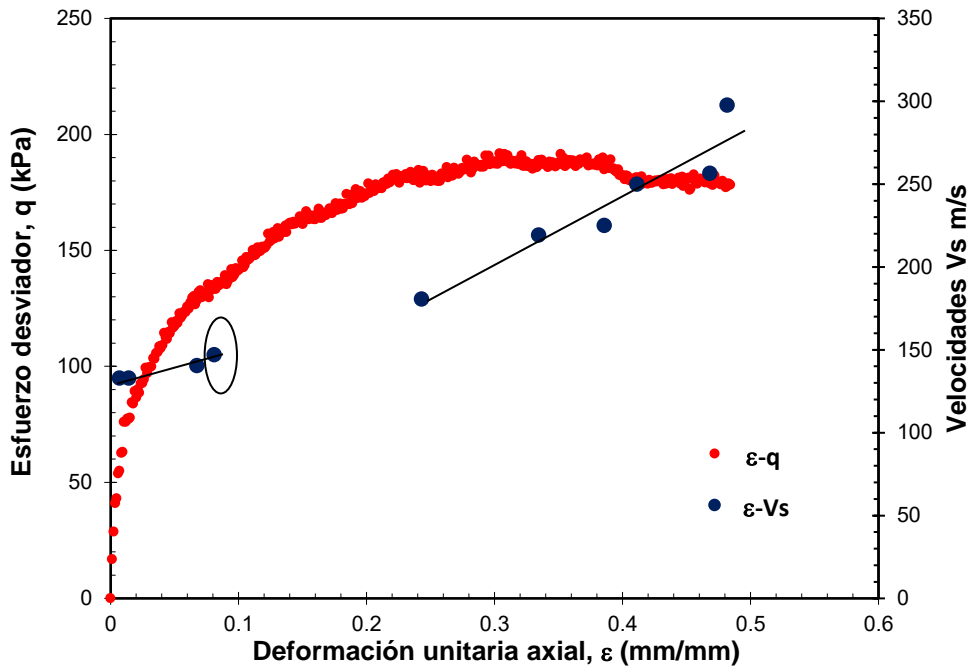


Figura 5.37 Esfuerzo de deformación axial contra esfuerzo desviador y comportamiento de las Vs de la prueba B4 PC CD (TBH-430)

En la Figura 5.38 y Figura 5.39 se muestran el comportamiento de la presión de poro contra la deformación axial ($u-\epsilon$) y la velocidad de cortante contra la deformación axial ($V_s-\epsilon$) de las pruebas no drenadas en un gráfico de doble eje. Se observa que conforme aumenta la deformación del suelo la presión de poro tiende a aumentar, esto es por no se permite el drenaje de agua. Además, existe un cambio en la tendencia de las velocidades de onda V_s , que está relacionado con el cambio de tendencia del aumento de la presión de poro (ver punto encerrado con círculo).

En la Figura 5.40 y Figura 5.41 se muestra el cambio volumétrico contra la deformación axial ($\Delta V-\epsilon$), dado a que en las pruebas si drenadas (CD) no se mide la presión de poro. También, se graficó la velocidad de cortante contra la deformación axial ($V_s-\epsilon$) en un gráfico de doble eje. La prueba B3 expulso 23.21 cm^3 de agua y obtuvo una velocidad de onda V_s de 309.84 m/s y la prueba B4 expulso 16 cm^3 de agua, con una velocidad de onda de V_s de 297.75 m/s . La velocidad de onda más alta de la prueba B3, se debe a que la prueba expulso más agua y por consiguiente la onda viaja a mayor velocidad por la estructura suelo-suelo.

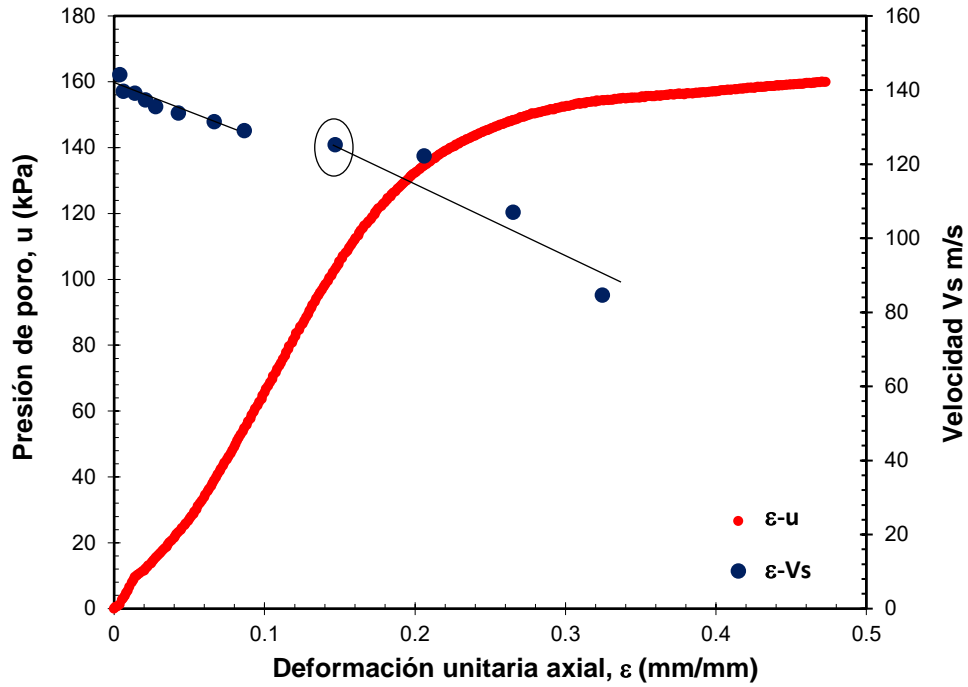


Figura 5.38 Deformación axial contra presión de poro y velocidades V_s de la prueba B1 NC CU TBH-430 (Δu - ϵ - V_s)

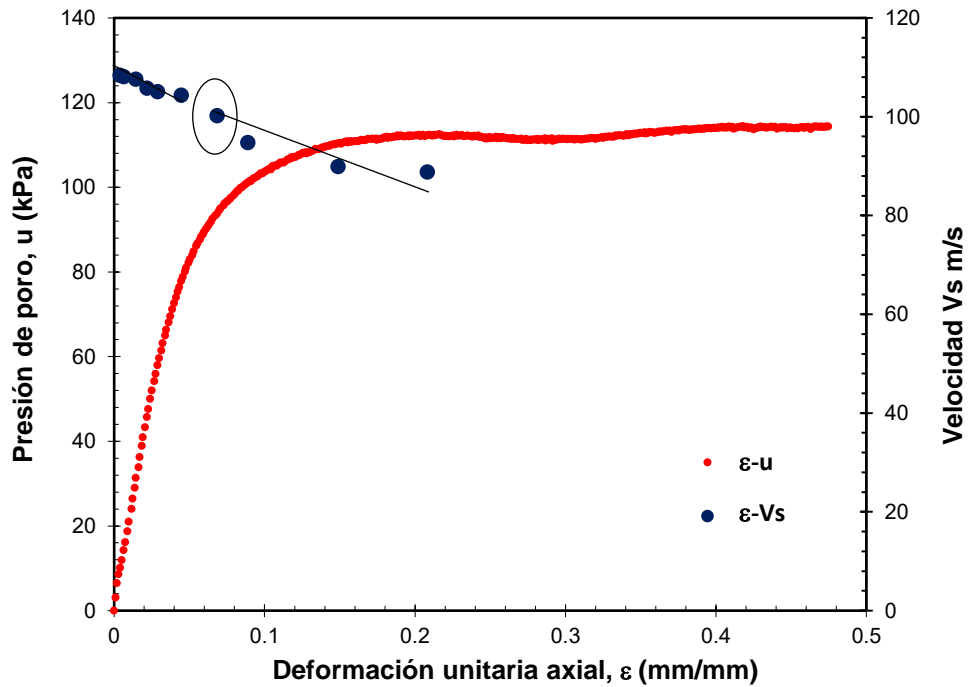


Figura 5.39 Deformación axial contra presión de poro y velocidades V_s de la prueba B2 PC CU TBH-430 (Δu - ϵ - V_s)

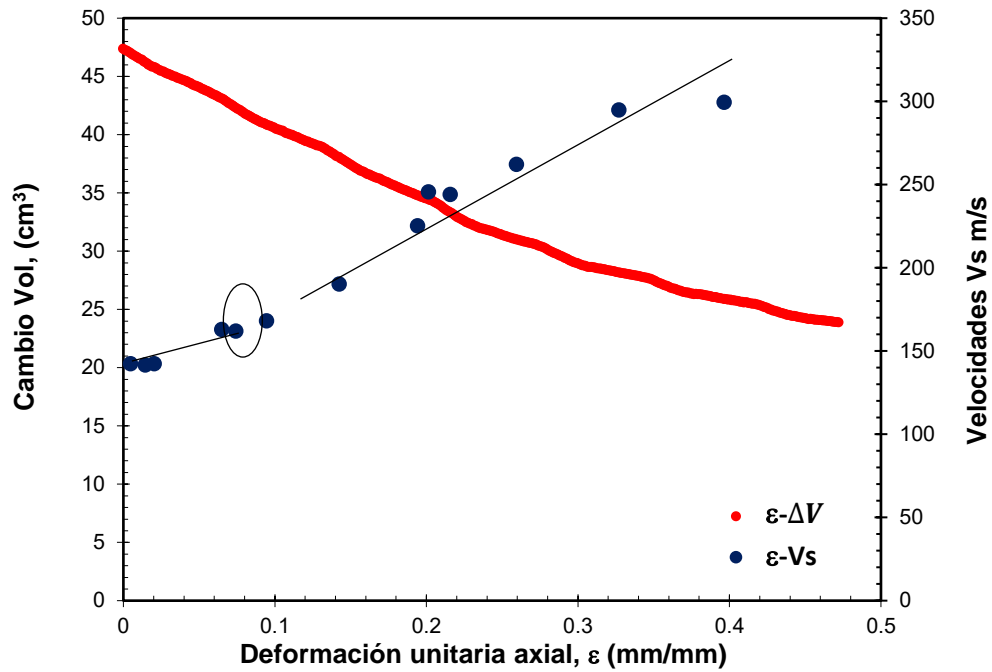


Figura 5.40 Deformación axial contra presión de poro y velocidades V_s de la prueba B3 NC CD TBH-430 (ΔV - ϵ - V_s)

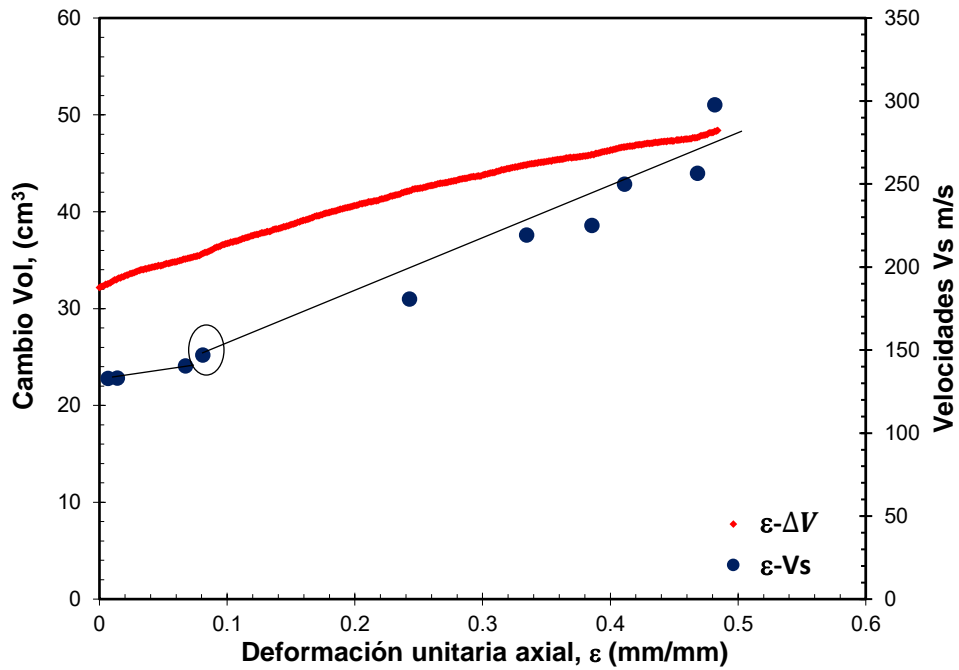


Figura 5.41 Deformación axial contra presión de poro y velocidades V_s de la prueba B4 PC CD TBH-430 (ΔV - ϵ - V_s)

En la Figura 5.42 y Figura 5.43 se muestran gráficos de doble eje, donde se graficaron los resultados de los esfuerzos aplicados a pruebas no drenadas (CU) en la etapa de falla ($p'-q$) y las velocidades de cortante contra el esfuerzo promedio p' (V_s-p'). Para la prueba B1 se obtuvo un valor de M de 1.80, con un valor del ángulo de fricción ϕ' de 403.78° . En la prueba B2 el valor de M fue de 1.75, con un valor de ϕ' de 42.61° . En estas pruebas no drenadas los valores de M y ϕ' son muy similares.

En la Figura 5.44 y Figura 5.45 también se muestran gráficos de doble eje, donde se graficaron los resultados de los esfuerzos aplicados a pruebas sí drenadas (CD) en la etapa de falla ($p'-q$) y las velocidades de cortante contra el esfuerzo promedio p' (V_s-p'). En la prueba B3 el valor de M fue de 1.02 y el valor de ϕ' de 25.86° para la prueba B4 el valor de M de 0.93 y ϕ' de 23.71° . Los valores de M y ϕ' son menores para las pruebas sí drenadas (CD) que para las no drenadas (CD). Esto es, porque en las pruebas no drenadas las trayectorias de esfuerzos son desplazadas a la izquierda y las sí drenadas a la derecha.

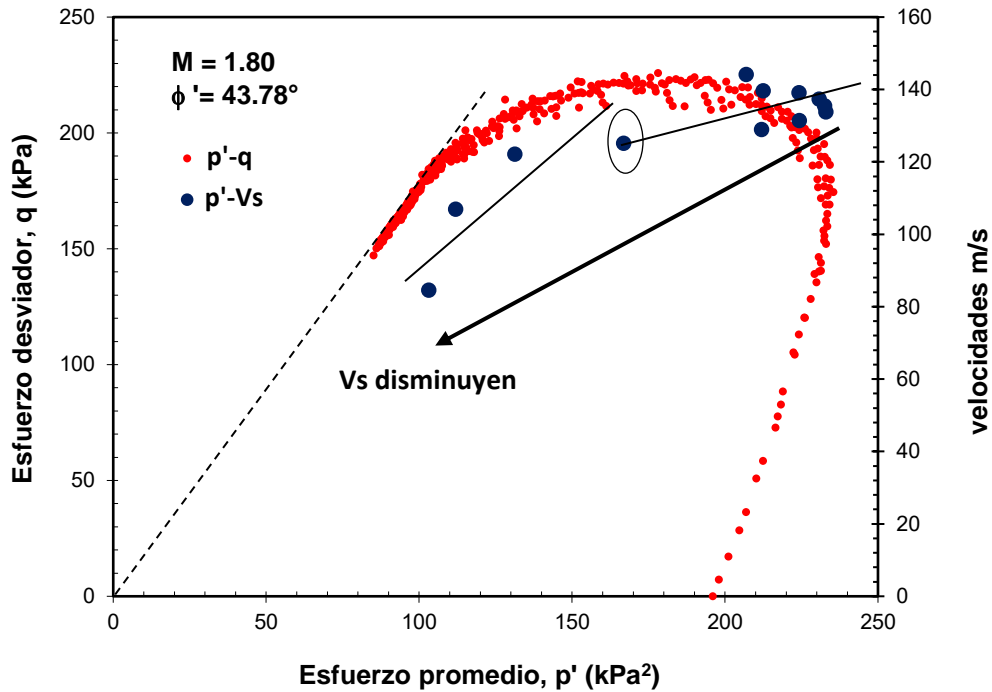


Figura 5.42 Esfuerzo octaédrico contra esfuerzo desviador y velocidades V_s de la prueba B1 NC CU TBH-430 ($q-p'-V_s$)

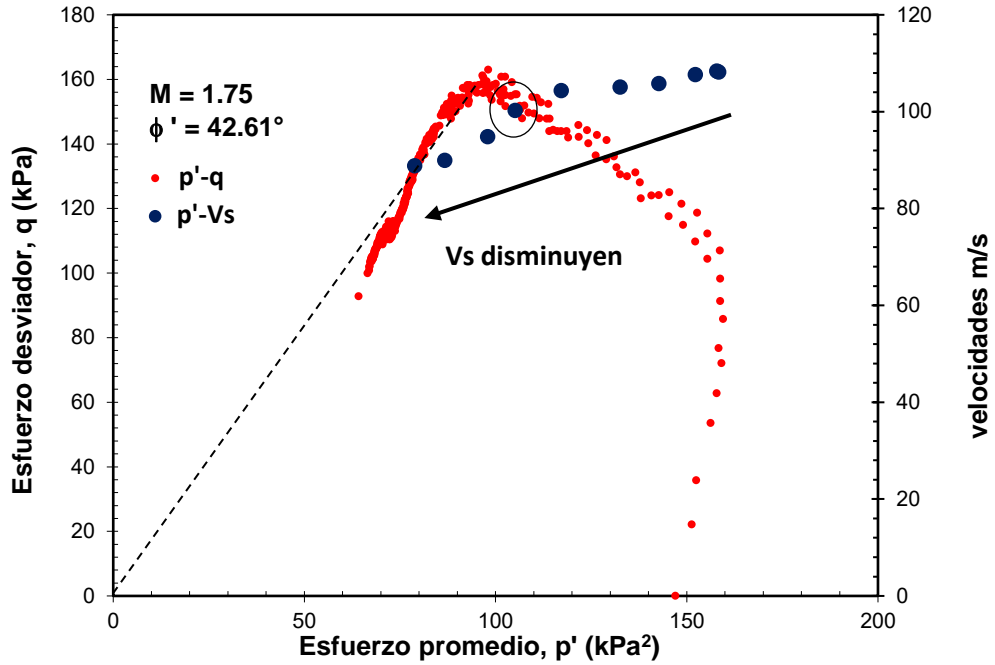


Figura 5.43 Esfuerzo octaédrico contra esfuerzo desviador y velocidades V_s de la prueba B2 PC CU TBH-430 (q - p' - V_s)

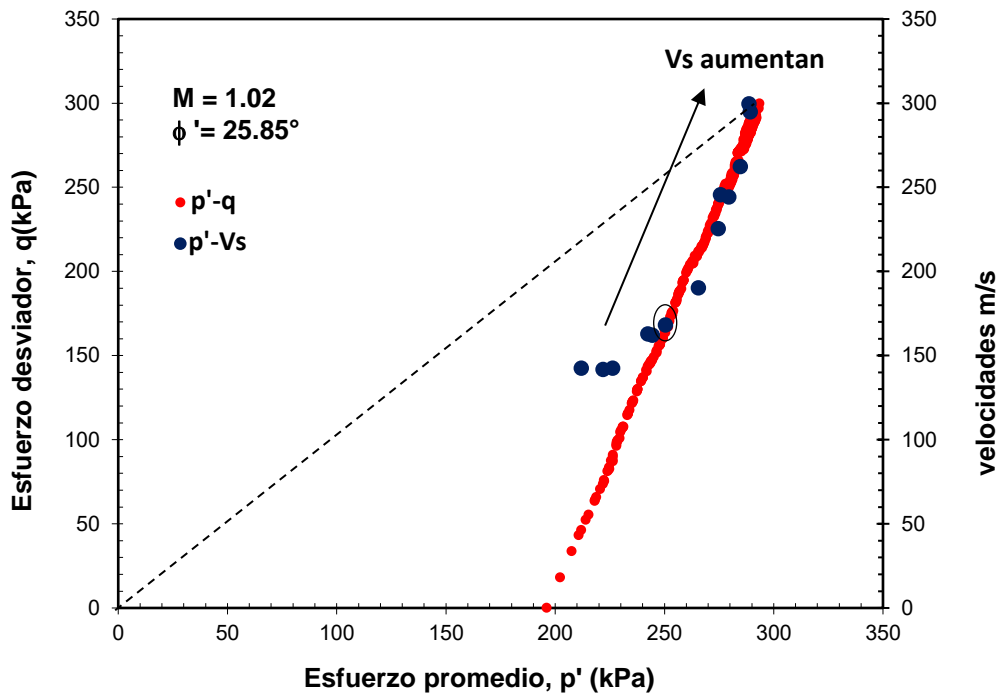


Figura 5.44 Esfuerzo octaédrico contra esfuerzo desviador y velocidades V_s de la prueba B3 NC CD TBH-430 (q - p' - V_s)

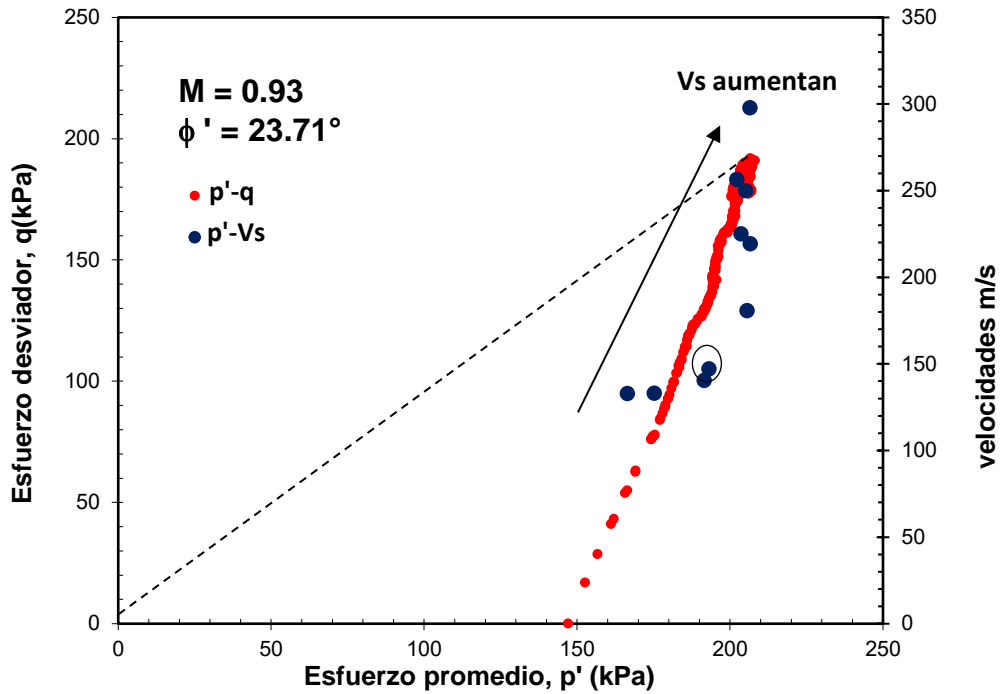


Figura 5.45 Esfuerzo octaédrico contra esfuerzo desviador y velocidades V_s de la prueba B4 PC CD TBH-430 (q - p' - V_s)

En cada una de las pruebas se identificó un punto de cedencia. En las Figura 5.46 y Figura 5.47 se graficaron q - V_s de los sondeos SM-TP-23 y TBH-430. En dichos gráficos también se observa la relación lineal que existe entre las velocidades V_s y los esfuerzos desviadores aplicados al suelo, observándose que dicho cambio se presenta más fuerte en las pruebas no drenadas (CU); ya que las pruebas drenadas (CD) presentan un aumento en su velocidad V_s como si el suelo se siguiera rigidizando.

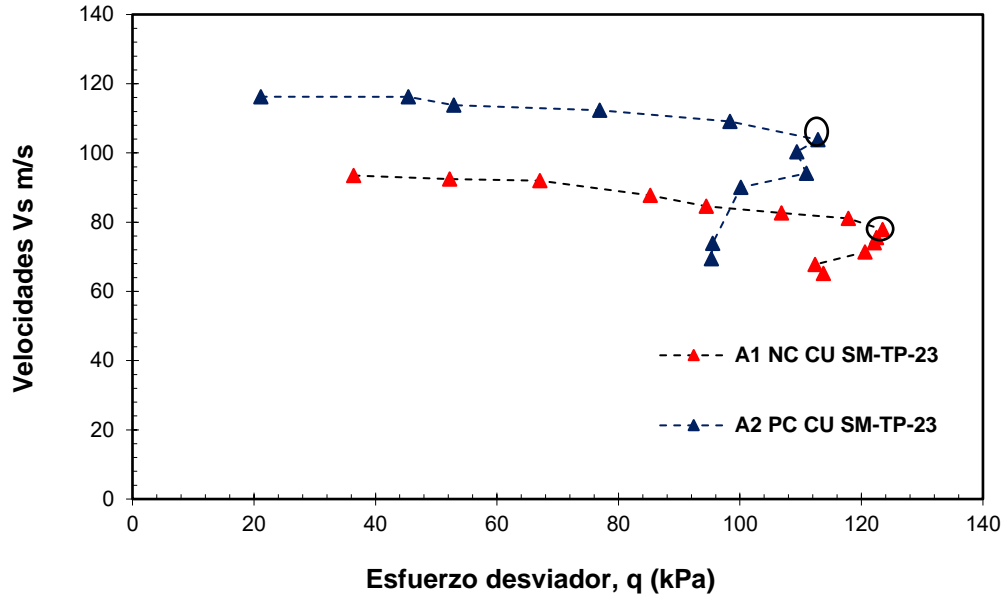


Figura 5.46 Comportamiento de V_s contra el esfuerzo axial desviador (SM-TP-23)

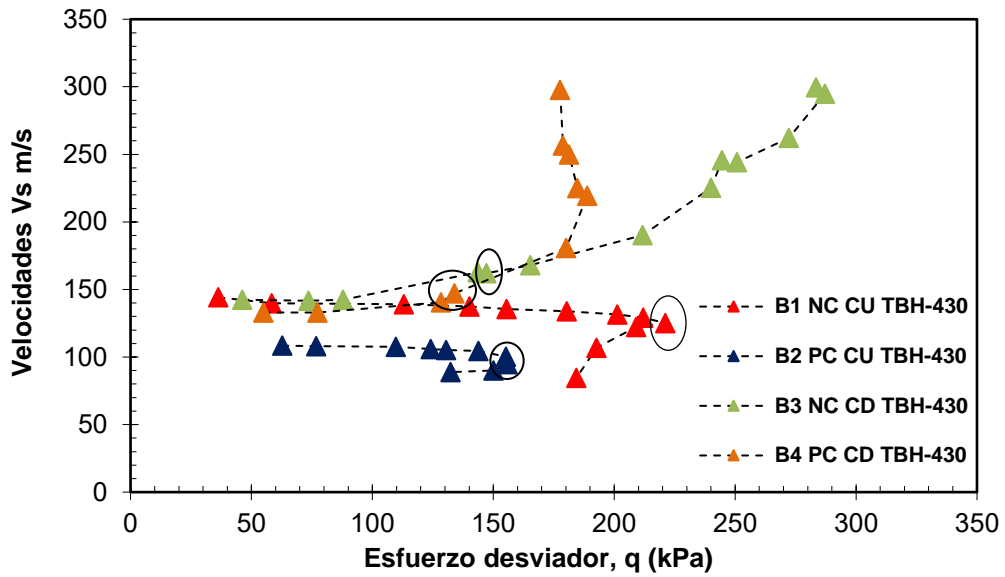


Figura 5.47 Comportamiento de V_s contra el esfuerzo axial desviador (TBH-430)

5.6 Análisis de módulos dinámicos

Como ya se mencionó anteriormente, los módulos dinámicos son de gran importancia para el estudio de los suelos, principalmente el módulo de corte G , ya que este caracteriza el cambio de forma que experimenta el suelo cuando se le aplican esfuerzos cortantes. La rigidez del suelo puede obtenerse con el módulo de elasticidad (módulo de Young), el cual a su vez se obtiene de una curva esfuerzo-deformación ($q - \varepsilon$). En la ingeniería práctica suelen emplearse otras medidas de la rigidez de los suelos y por ello, para esta investigación se calcularon el módulo de elasticidad tangente (E_{tan}) y el secante (E_{sec}). También, se calculó módulo de Young E a partir de G y el coeficiente de Poisson (ν), los cuales se generaron con las velocidades de ondas V_s y V_p ; obtenidas con los cristales piezoeléctrico por lo que en este trabajo los llamaremos E_{be} y G_{be} .

5.6.1 Módulo de elasticidad tangente (E_{tan})

Con los datos obtenidos de las pruebas triaxiales en la etapa de falla, donde la tensión vertical aumenta gradualmente, es posible dibujar una curva esfuerzo-deformación ($q - \varepsilon$). En la Figura 5.48 y Figura 5.49 se muestran estas curvas obtenidas de la prueba A1 y A2 del sondeo SM-TP-23, donde se trazaron varias pendientes locales a lo largo de la rama elástica. Por lo que, el módulo tangente es el valor de las pendientes trazadas en las curvas de cada prueba. En la prueba A1 el primer módulo de E_{tan} fue de 6.84 MPa y finalizó con 0.32 MPa. La prueba A2 con un E_{tan} de 10.21 a 0.31 MPa.

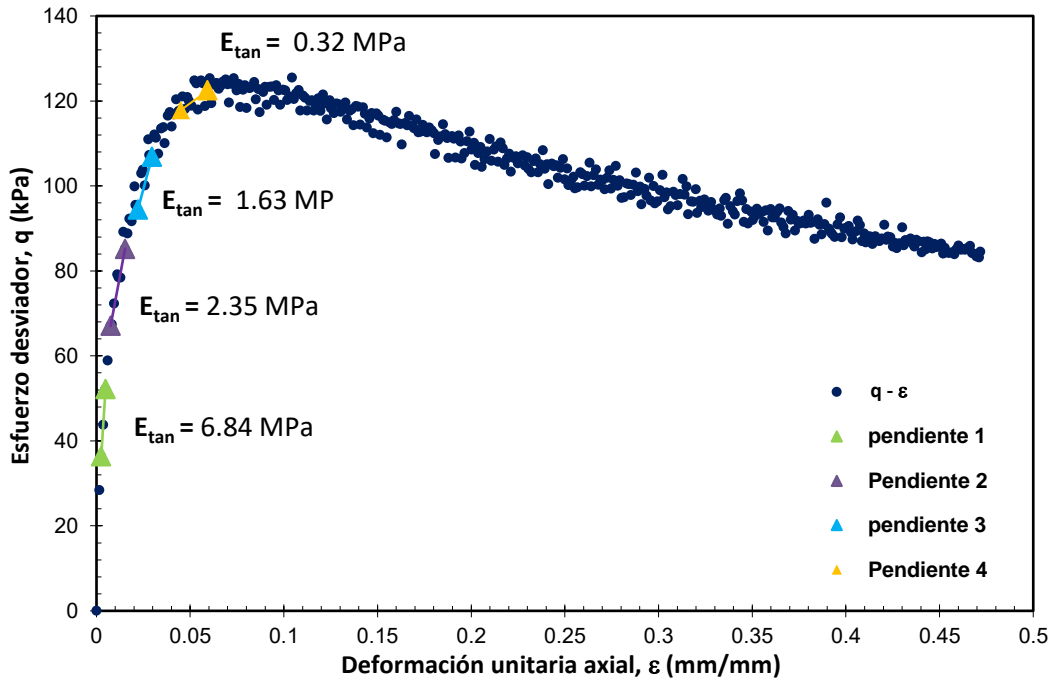


Figura 5.48 Obtención de los módulos de elasticidad E_{tan} de una curva esfuerzo-deformación (SM-TP-23) A1 NC CU

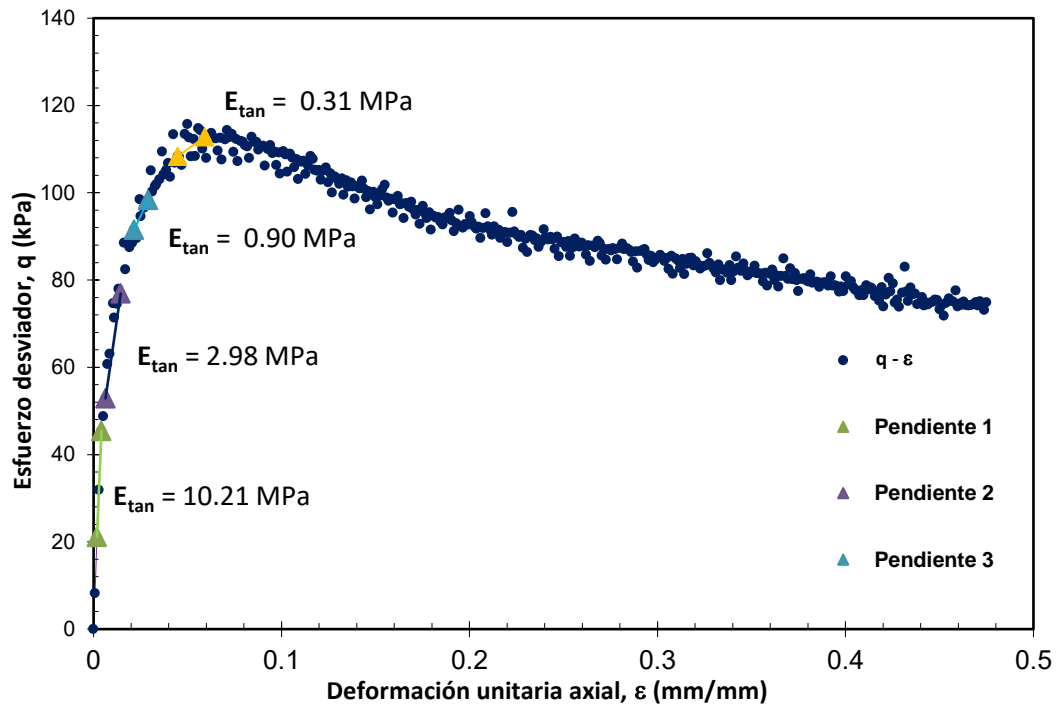


Figura 5.49 Obtención de los módulos de elasticidad E_{tan} de una curva esfuerzo-deformación (SM-TP-23) A2 PC CU

A continuación, se muestran las curvas esfuerzo-deformación de las pruebas B1, B2, B3 y B4 del sondeo TBH-430. En la prueba B1 no drenada (CU) se obtuvieron valores de E_{tan} de 9.34 a 0.88 MPa (ver Figura 5.50). La prueba B2 también no drenada (CU) al inicio con un E_{tan} de 5.95 a 0.48 MPa (ver Figura 5.51).

En la Figura 5.52 se muestra la prueba B3 si drenada (CD), que obtuvo valores de E_{tan} de 2.78 a 0.49 MPa. Para la prueba B4 también si drenada (CD) se consiguieron valores de E_{tan} de 3.06 a 0.09 MPa, ver Figura 5.53.

Los valores iniciales de E_{tan} fueron más altos para las pruebas preconsolidadas (PC), que para las normalmente consolidadas (NC) y generalmente los valores de E_{tan} fueron más altos para las pruebas no drenadas (CU), que para las sí drenadas (CD).

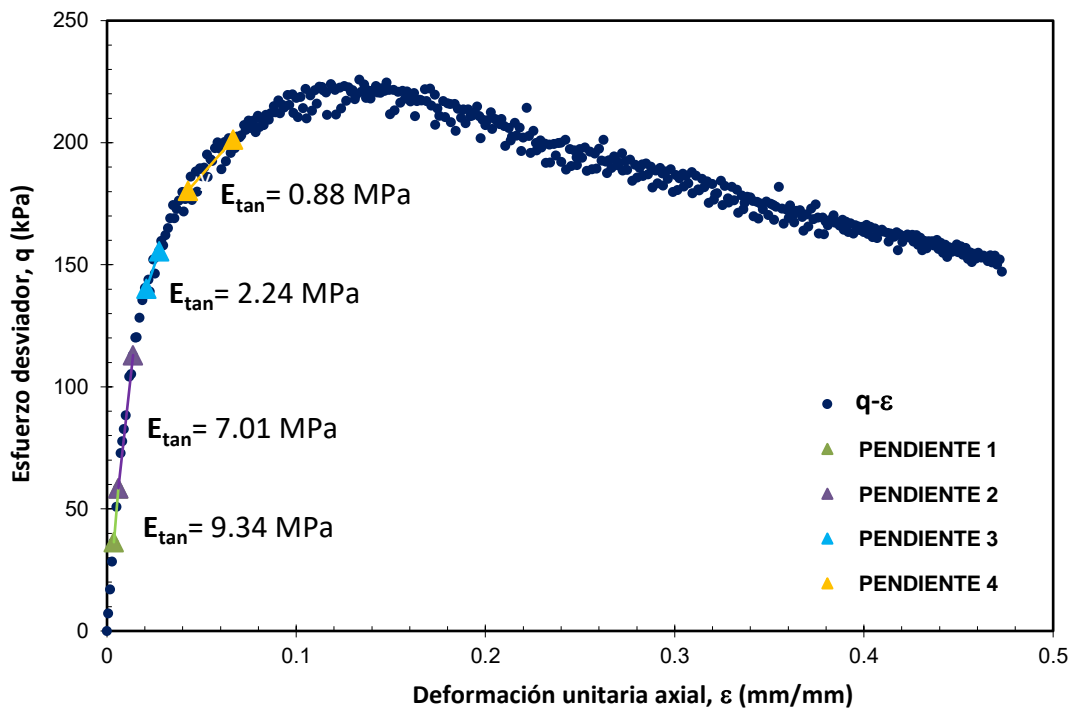


Figura 5.50 Obtención de los módulos de elasticidad E_{tan} de una curva esfuerzo-deformación (TBH-430) B1 NC CU

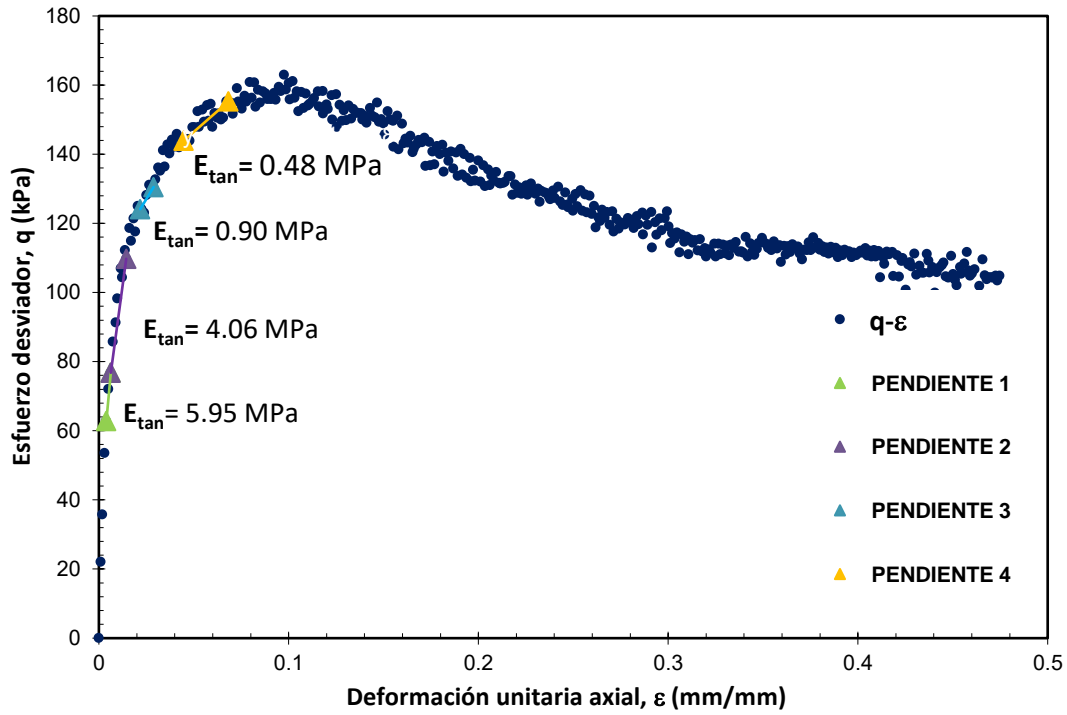


Figura 5.51 Obtención de los módulos de elasticidad E_{tan} de una curva esfuerzo-deformación (TBH-430) B2 PC CU

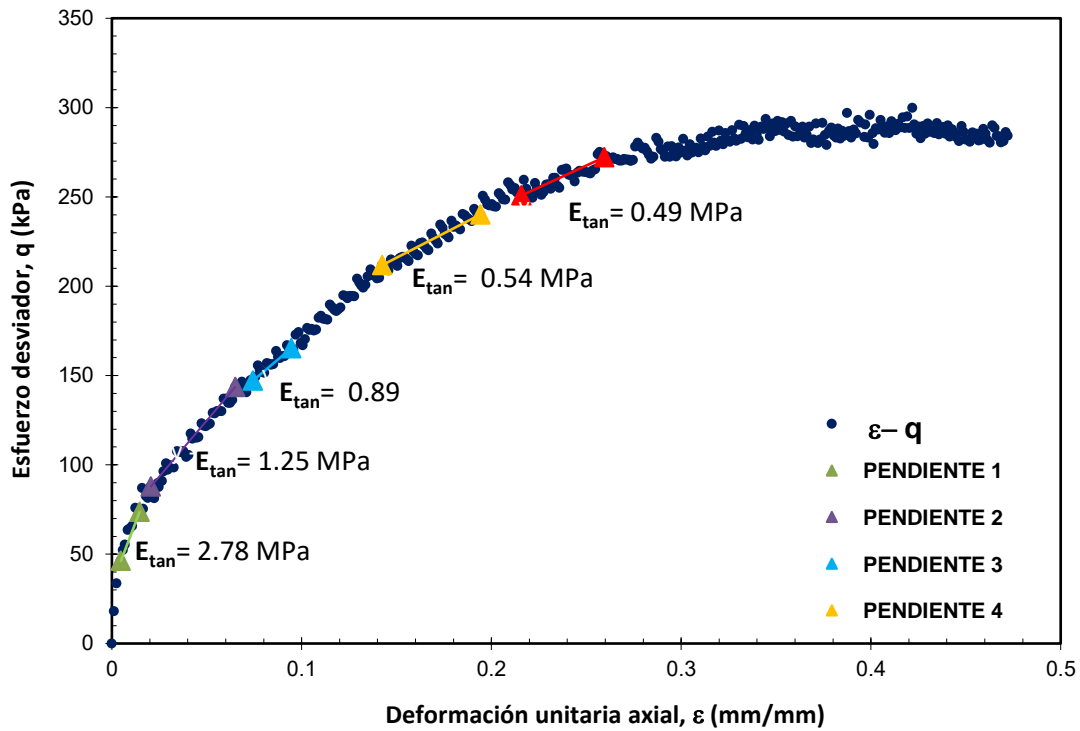


Figura 5.52 Obtención de los módulos de elasticidad E_{tan} de una curva esfuerzo-deformación (TBH-430) B3 NC CD

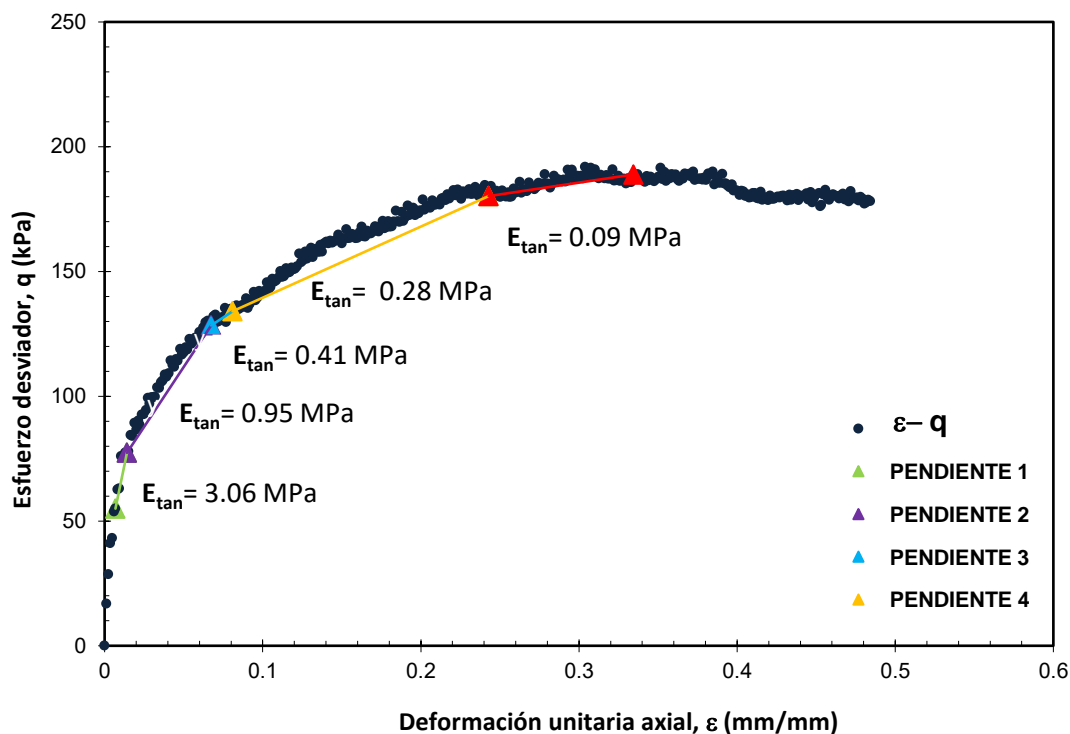


Figura 5.53 Obtención de los módulos de elasticidad E_{tan} de una curva esfuerzo-deformación (TBH-430) B4 PC CD

En la Figura 5.54 se muestran graficados los resultados del módulo elástico tangente E_{tan} contra la deformación unitaria axial ε , de las pruebas A1 y A2 del sondeo SM-TP-23, donde se observa que el módulo E_{tan} disminuye conforme aumenta la deformación axial del suelo. Cabe mencionar que cuando las deformaciones axiales sobrepasan 0.025 mm/mm los valores de E_{tan} tienden a comportarse linealmente.

La Figura 5.55 muestra los resultados de los módulos E_{tan} contra la deformación unitaria axial, de las pruebas B1, B2, B3 y B4 del sondeo TBH-430. También se muestra que disminuye el módulo E_{tan} conforme aumente la deformación axial del suelo. Para estas pruebas cuando la deformación axial sobrepasa los 0.05 mm/mm el comportamiento de E_{tan} se considera lineal, esto porque ya no hay gran cambio en sus valores.

La reducción de los valores del módulo elástico E_{tan} , quiere decir que conforme el suelo está siendo deformado, este va perdiendo elasticidad.

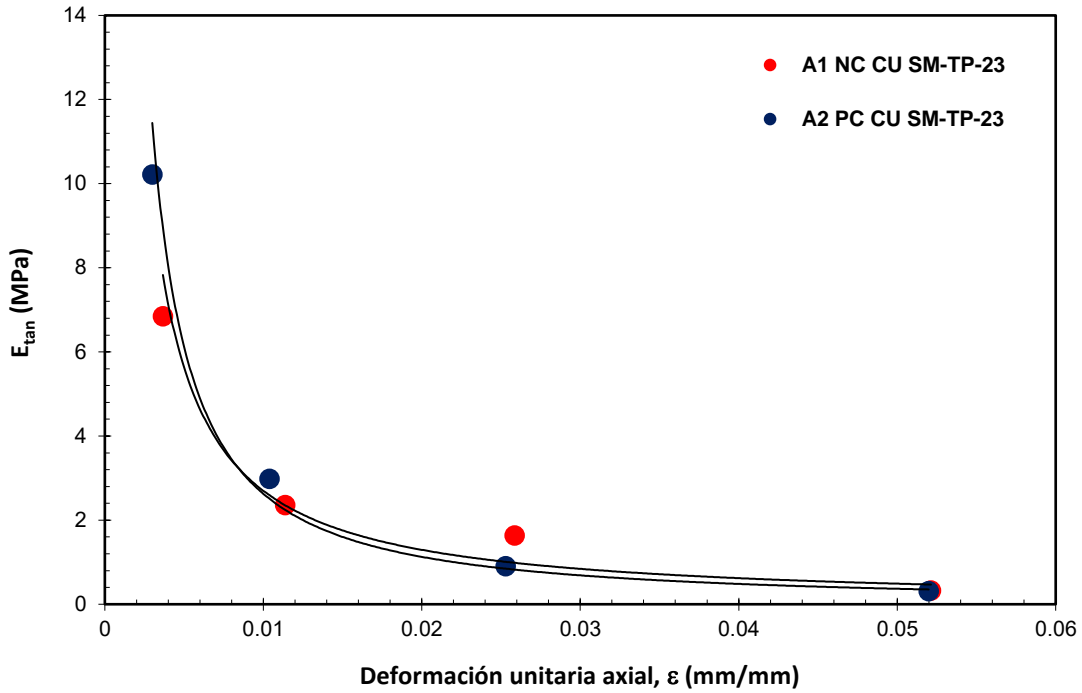


Figura 5.54 Comportamiento de E_{tan} contra la deformación axial (SM-TP-23)

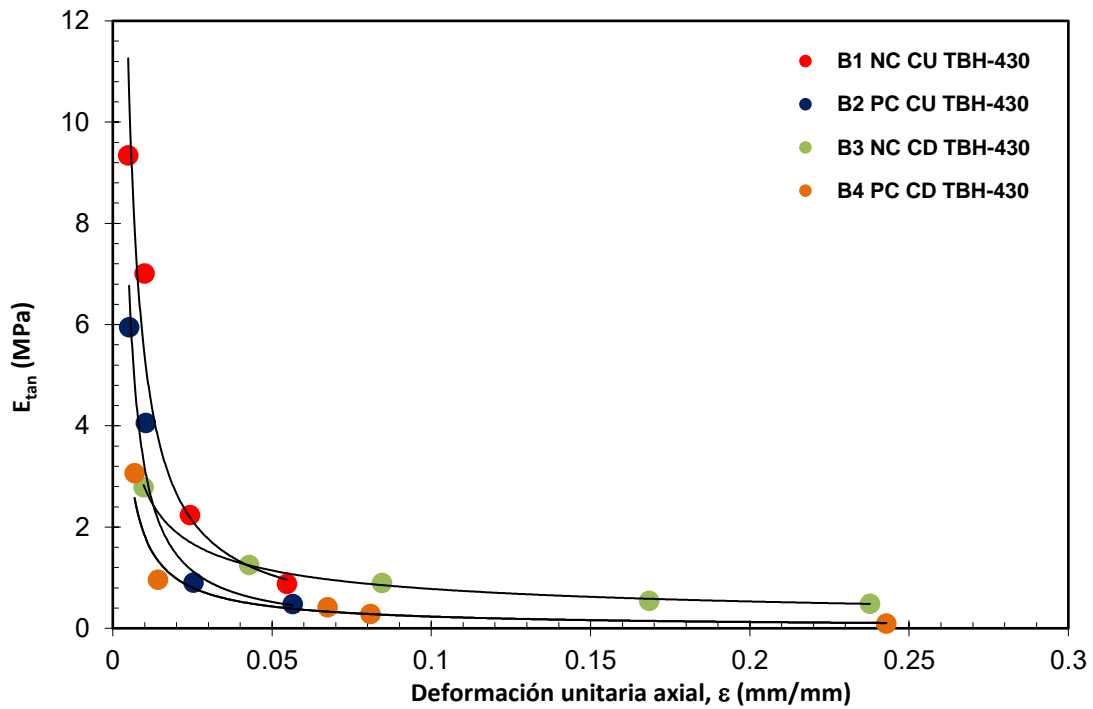


Figura 5.55 Comportamiento de E_{tan} contra la deformación axial (TBH-430)

5.6.2 Módulo de elasticidad secante (E_{sec})

Lambe et. Whitman (1969) propusieron que, en problemas prácticos de ingeniería bajo condiciones de trabajo estéricas, se use un módulo definido como la pendiente de la recta secante a la curva que va desde el origen de esa curva (desviador cero), hasta el punto en el que el esfuerzo desviador es igual a la mitad del esfuerzo desviador máximo o pico. También se pueden definir módulos secantes desde el origen de la curva esfuerzo-deformación hasta el esfuerzo desviador asociado a cualquier nivel de deformación.

Como se menciona en el capítulo 2 de este trabajo, el módulo secante (E_{sec}) se calculó con la expresión 2.2, a partir de los resultados de las pruebas triaxiales que se realizaron. Se calculó la E_{sec} en determinados puntos de la prueba, donde se tomaron mediciones de velocidades de onda cortante V_s . En la Figura 5.56 se muestran los resultados de E_{sec} para las dos pruebas del sondeo SM-TP-23 y en la Figura 5.57 para las cuatro realizadas al sondeo TBH-430, donde se observa que conforme aumenta la deformación del suelo el módulo E_{sec} se degrada paulatinamente. Por otra parte, el sondeo SM-TP-23 muestra que los valores de E_{sec} tienden a ser lineales a partir de 0.15 mm/mm de deformación y para el sondeo TBH-430 a partir de 0.2 mm/mm de deformación.

Los valores de los módulos secantes son mayores para las pruebas preconsolidadas (PC) que para las pruebas normalmente consolidadas (NC).

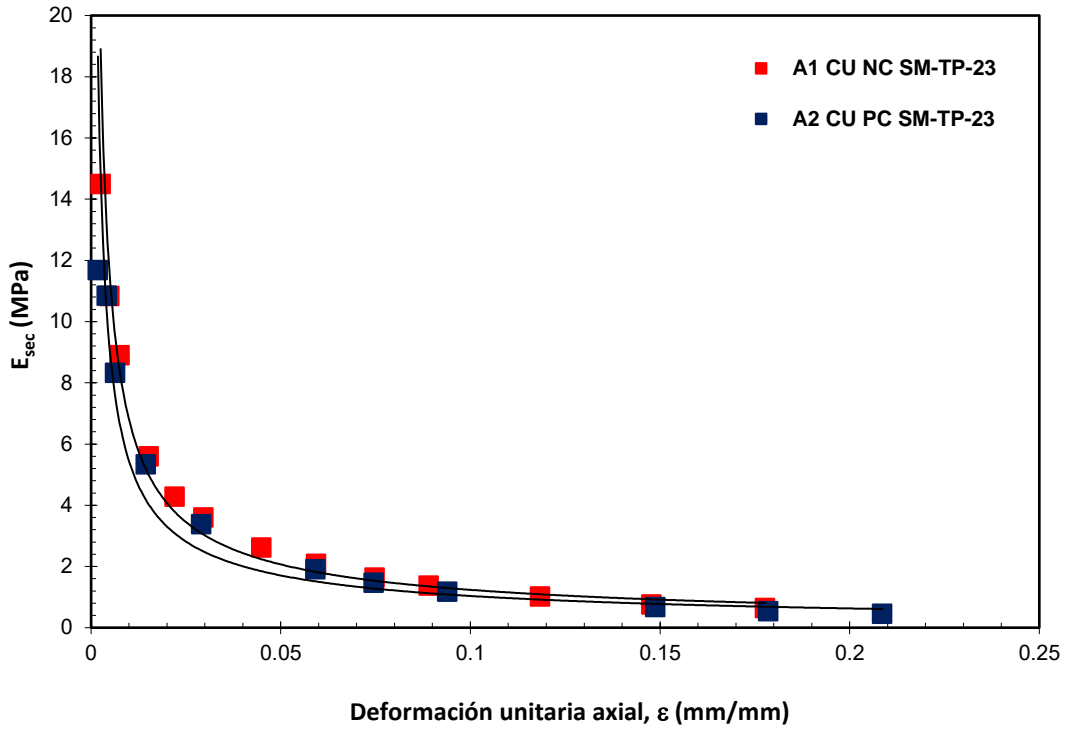


Figura 5.56 Comportamiento de E_{sec} contra la deformación axial (SM-TP-23)

:

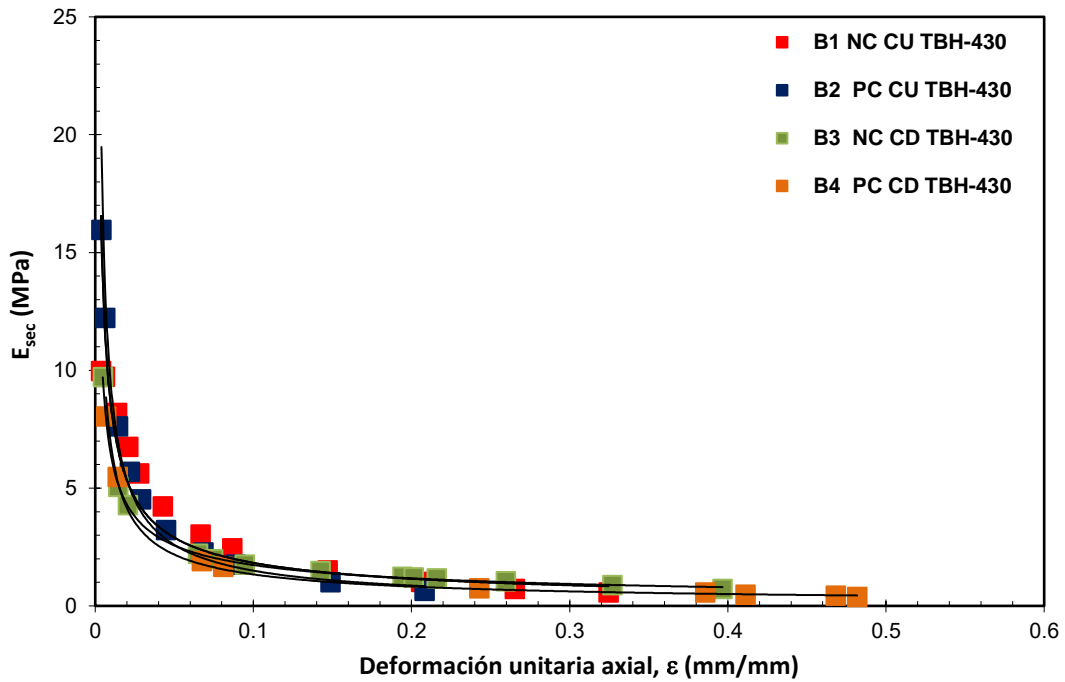


Figura 5.57 Comportamiento de E_{sec} contra la deformación axial (TBH-430)

5.6.3 Módulo elástico transversal o de corte (G_{bender})

A partir de lo anteriormente enunciado, el módulo G se obtuvo de las velocidades de onda de cortante V_s determinadas con los elementos bender, siendo este un método no destructivo que se emplea para la caracterización mecánica del suelo sin que este sea dañado. En la Figura 5.58 y Figura 5.59 se muestran los resultados obtenidos de G_{bender} en la etapa de falla. Obtenidos de seis pruebas realizadas a los sondeos SM-TP-23 y TBH-430. En los resultados se observa como para las pruebas no drenadas (CU) el módulo de rigidez G_{bender} tiende a disminuir conforme aumenta la deformación en el suelo, pero para las pruebas sí drenadas (CD) el comportamiento es diferente ya que el módulo G_{bender} tiene a aumentar. La razón de este fenómeno es que, por un lado, durante todo el ensaye aumentan los esfuerzos efectivos, lo cual también conlleva a la disminución de su volumen. Es decir, su relación de vacíos da lugar a la rigidización del suelo.

Se presentan las curvas del módulo de cortante normalizado G con respecto al $G_{\text{máx}}$ ($G/G_{\text{máx}}$ contra la deformación unitaria axial ε). El $G_{\text{máx}}$ se obtuvo de los valores de onda V_s adquiridas con elementos Bender al inicio de la etapa de falla de cada ensaye. En la Figura 5.60 del sondeo SM-TP-23 se observa como el $G/G_{\text{máx}}$, de estos ensayos disminuyen conforme aumentan los niveles de deformación axial. En la Figura 5.61 del sondeo TBH-430, se muestra como $G/G_{\text{máx}}$ disminuye para las pruebas no drenadas (CU) y aumenta en las sí drenadas (CD). Esto es también por el fenómeno de la rigidización del suelo.

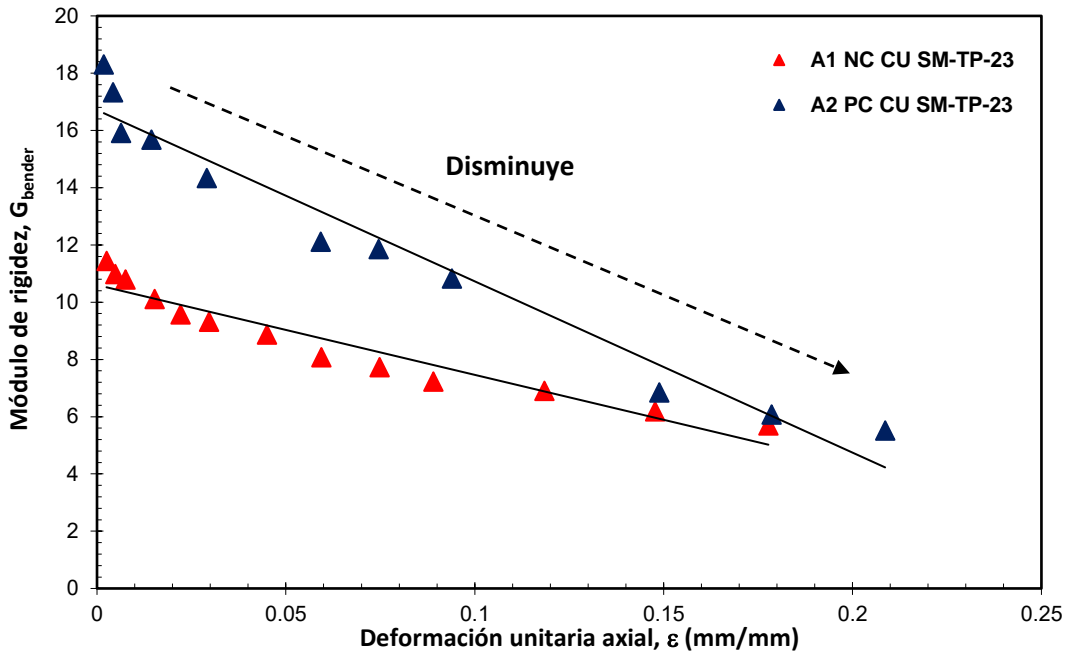


Figura 5.58 Comportamiento de G_{bender} contra la deformación axial (SM-TP-23)

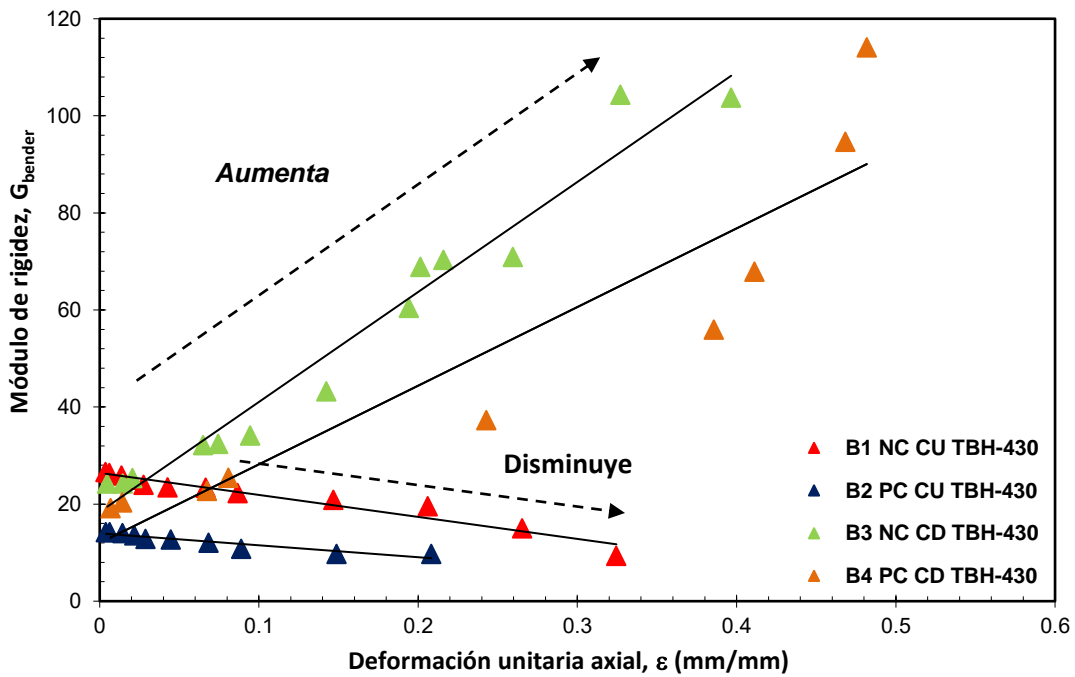


Figura 5.59 Comportamiento de G_{bender} contra la deformación axial (TBH-430)

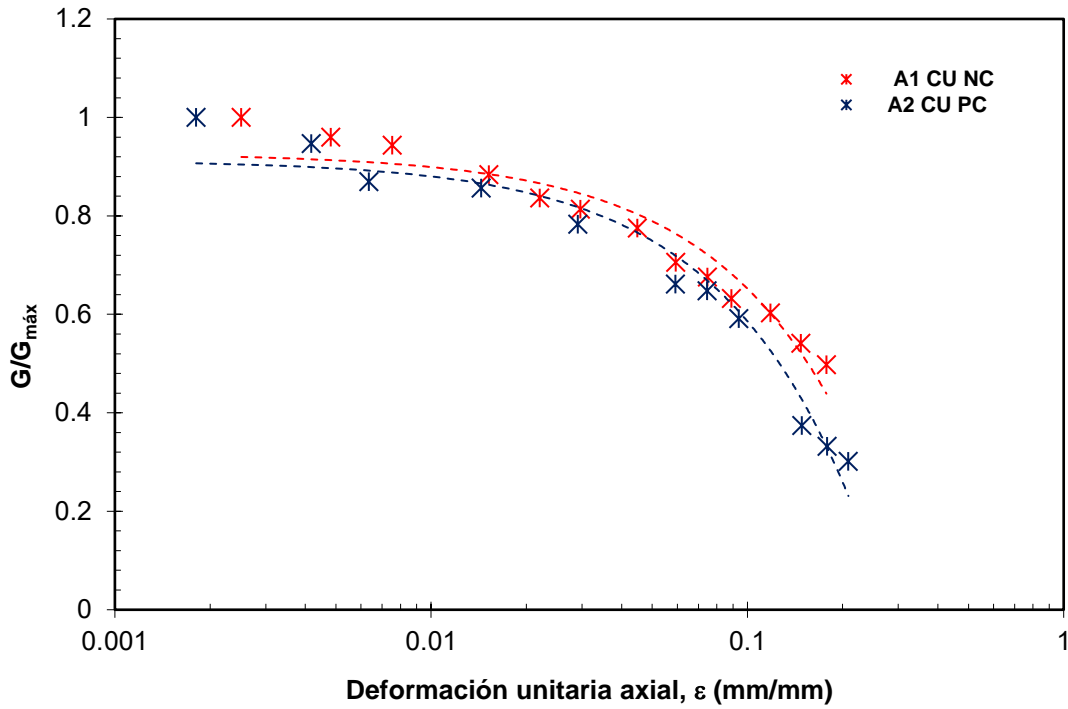


Figura 5.60 $G/G_{máx}$ contra la deformación unitaria axial del sondeo (SM-TP-23)

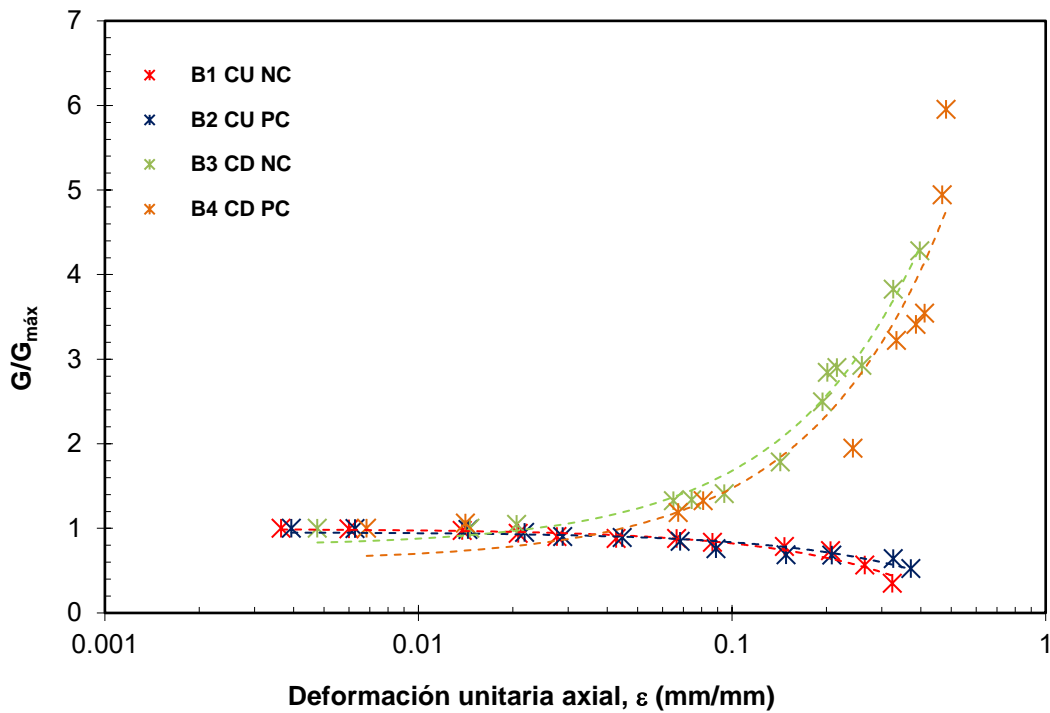


Figura 5.61 $G/G_{máx}$ contra la deformación unitaria axial del sondeo (TBH-430)

5.6.4 Modulo elástico de Young (E_{bender})

El módulo de Young se calculó con la expresión 2.1, la cual está relacionada con el módulo de corte (G) y con el módulo de Poisson (ν). Siendo estos calculados con las velocidades de onda cortante V_s y compresión V_p , por lo que en este trabajo al módulo de Young lo llamamos E_{bender} . En la Figura 5.62 se muestran los resultados de E_{bender} de las pruebas A1 y A2 del sondeo SM-TP-23. Donde los valores de E_{bender} tienden a disminuir conforme aumente la deformación axial.

En la Figura 5.63 se muestran los resultados de las cuatro pruebas realizadas al sondeo TBH-430. Donde los valores de E_{bender} de las pruebas no drenadas tienen a disminuir y los valores de las pruebas si drenadas (CD) tienen a aumentar.

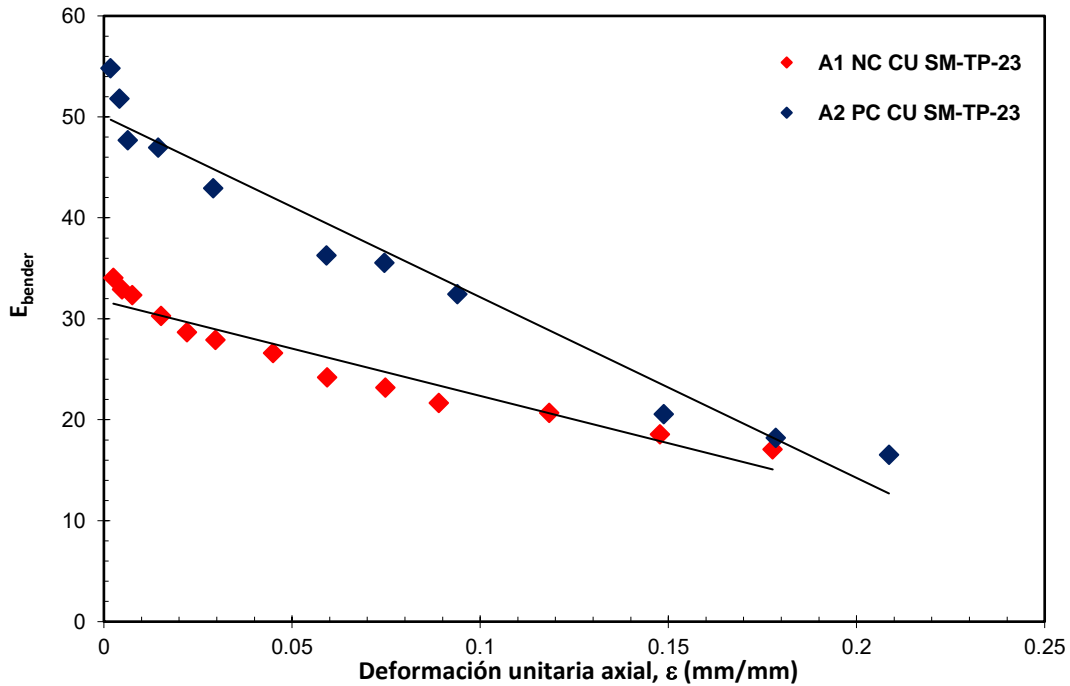


Figura 5.62 Comportamiento de E_{bender} contra la deformación axial (SM-TP-23)

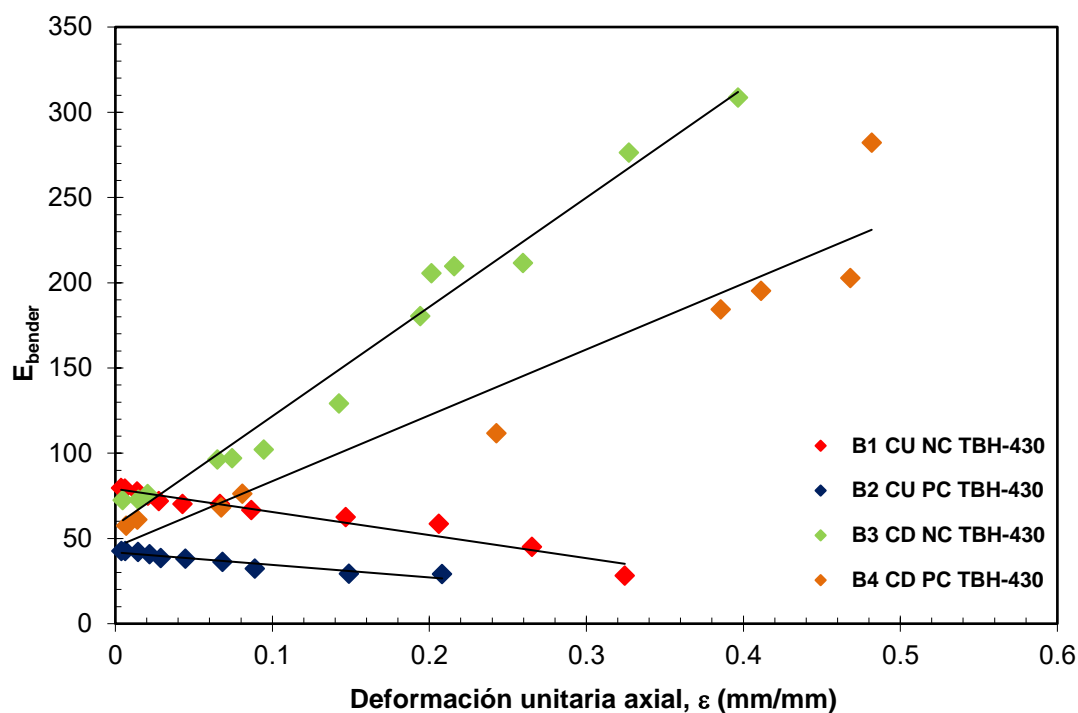


Figura 5.63 Comportamiento de E_{bender} contra la deformación axial (TBH-430)

5.6.5 Relación de Poisson

La relación de Poisson mide la susceptibilidad de los materiales a deformarse en direcciones transversales a la dirección del esfuerzo principal. En este trabajo la relación de Poisson se adquirió a partir de los valores de onda de cortante V_s y de compresión V_p , obtenidos con los cristales piezoeléctricos.

En la Figura 5.64 se muestran los valores de la relación de Poisson en la etapa de falla del sondeo SM-TP-23. Se observa como la relación de Poisson tiende a aumentar linealmente conforme el suelo se deforma. En la prueba A1 NC CU los valores de la relación de Poisson van de 0.496 a 0.499 y para la prueba A2 PC CU los valores van de 0.497 a 0.499.

Para el sondeo TBH-430, en el que se realizaron cuatro pruebas, la relación de Poisson para la prueba B1 NC CU varió de 0.496 a 0.498. Para la prueba B2 PC CU de 0.497 a 0.499. En la prueba B3 NC CD de 0.497 a 0.487 y en la prueba B4 PC CD de 0.498 a 0.489 (ver Figura 5.65).

Como se observa los materiales más suaves tienen valores de Poisson más altos, en este caso las pruebas consolidadas no drenadas (CU) y las pruebas si drenadas

(CD) tienen valores más bajos, donde, además los valores de Poisson tienden a disminuir.

Los valores de Poisson obtenidos en este trabajo en las pruebas CU son muy cercanos al 0.5, valor teórico de la elasticidad para procesos de carga a volumen constante.

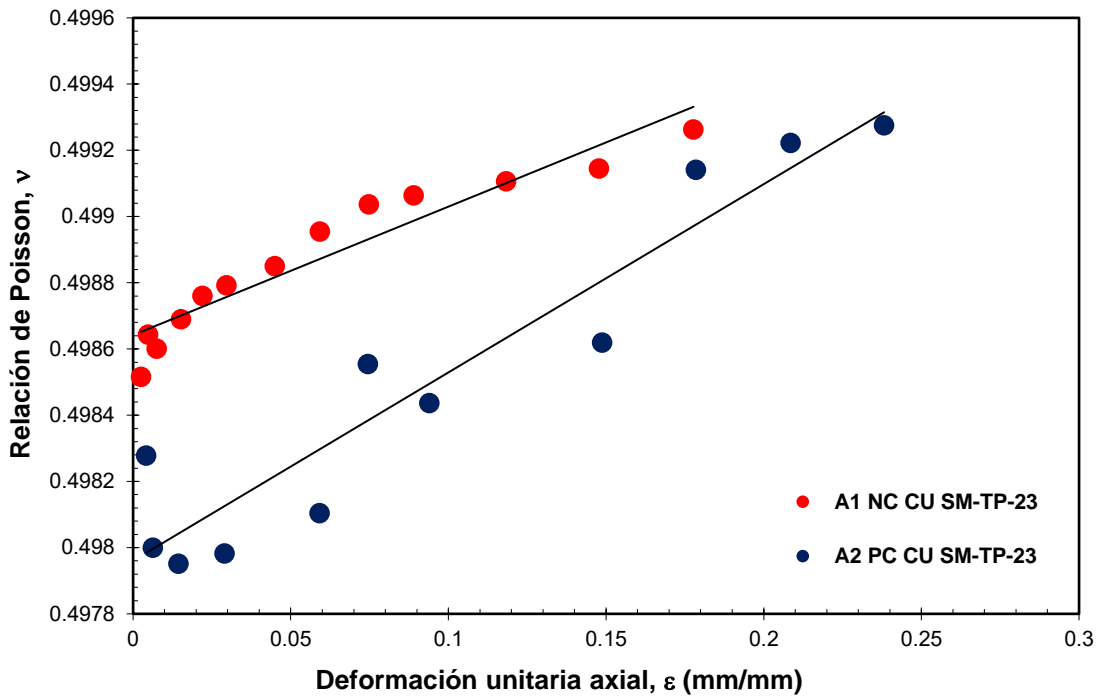


Figura 5.64 La relación de Poisson contra deformación axial (SM-TP-23)

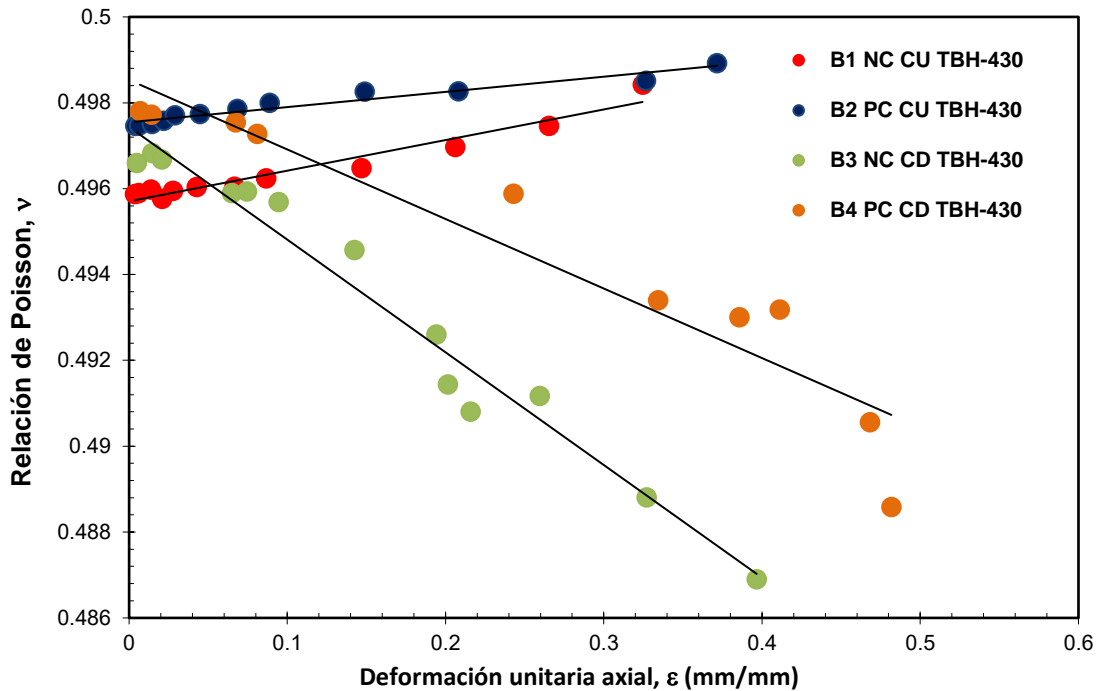


Figura 5.65 La relación de Poisson contra deformación axial (TBH-430)

5.6.6 Relación de los módulos E_{sec} , E_{tan} y E_{bender}

En esta investigación se obtuvieron los módulos elásticos en la etapa de falla, que es cuando el suelo se deforma debido a la aplicación de esfuerzos cortantes inducidos por la aplicación de cargas axiales. Los módulos E_{sec} , E_{tan} y E_{bender} están relacionados entre sí, ya que el módulo de Young se puede determinar con el módulo tangente de una curva esfuerzo-deformación ($q-\epsilon$), obtenida en este caso de pruebas triaxiales y también con el módulo secante. Algunos autores como (POULOS, H & DAVIS, E, 1980) consideran que este parámetro es el módulo de elasticidad del suelo (módulo de Young), el cual se obtiene de la relación de las diferencias del esfuerzo desviador y las deformaciones producto de las cargas axiales aplicadas. La definición de este módulo puede variar, pero para muchos problemas de ingeniería geotécnica, esta definición es aceptable en tanto que ha dado resultados ingenierilmente adecuados.

Si analizamos lo visto hasta este punto, respecto a los valores obtenidos para los módulos E_{sec} , E_{tan} y E_{bender} podemos observar que, los resultados del módulo E_{bender} son hasta una o dos veces mayores que los obtenidos con E_{sec} y E_{tan} . Esto se debe a la frecuencia de excitación que se aplicó a los elementos bender y al nivel de deformación que utiliza cada técnica para la adquisición de datos (ver Figura 5.66 y Figura 5.67), donde se muestran los resultados de cada sondeo trabajado.

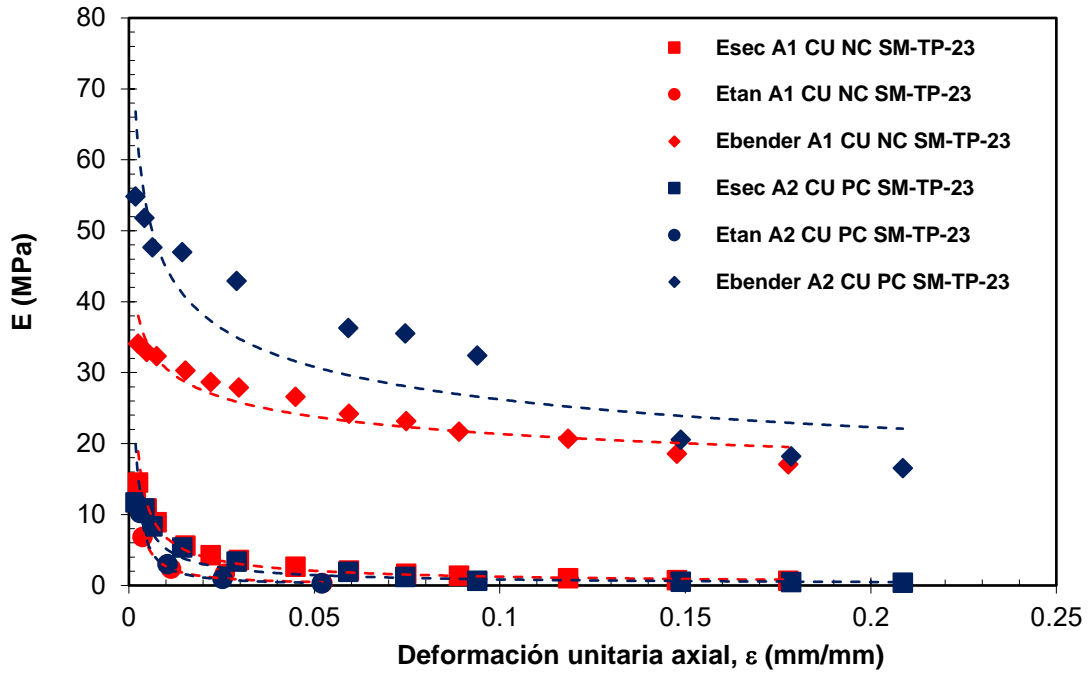


Figura 5.66 Comparación de los módulos elásticos E_{sec} , E_{tan} y E_{bender} contra la deformación axial (SM-TP-23)

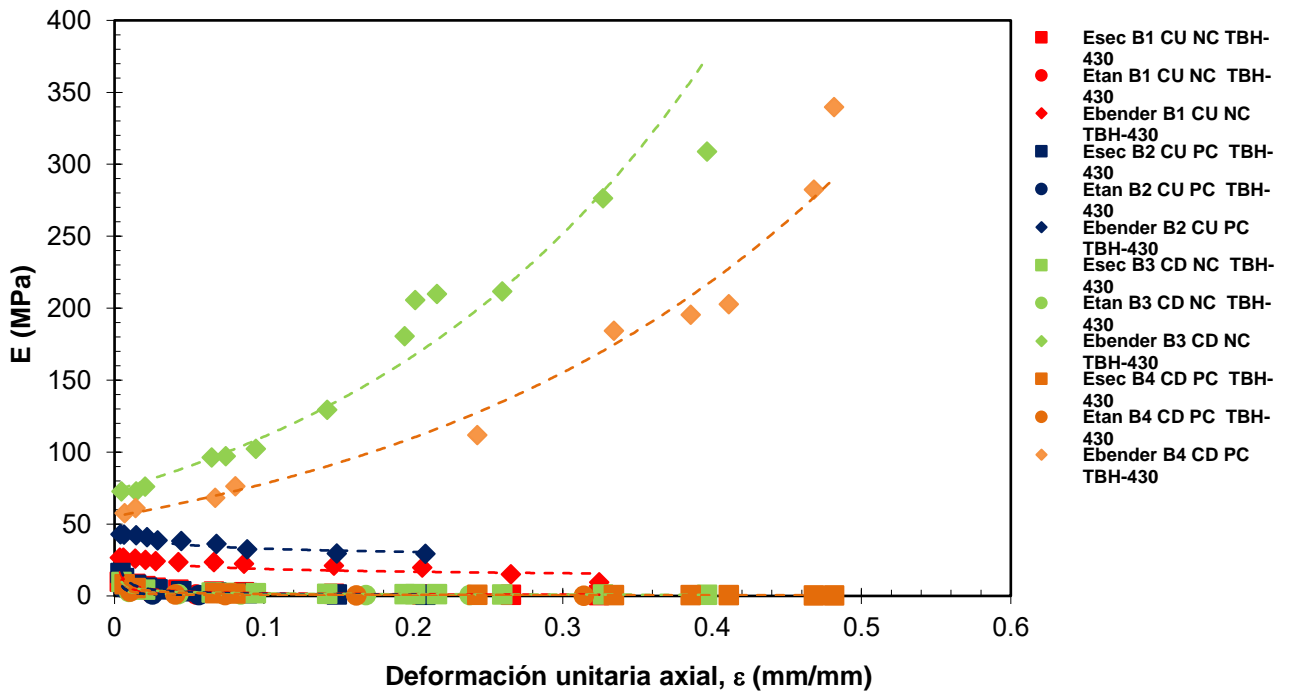


Figura 5.67 Comparación de los módulos elásticos E_{sec} , E_{tan} y E_{bender} contra la deformación axial (TBH-430)

Los valores de E_{sec} , E_{tan} y E_{bender} se normalizaron con respecto al valor inicial del módulo, $E_{m\acute{a}x}$, obtenido de las velocidades de onda cortante V_s , que se determinaron con los elementos bender. En la Figura 5.68 se muestran los resultados obtenidos para las dos pruebas del sondeo SM-TP-23 y en la Figura 5.69 los resultados de las cuatro pruebas al sondeo TBH-430. En las gráficas se observa que en las pruebas no drenadas (CU), los módulos E_{sec} , E_{tan} y E_{bender} decrecen conforme aumentan las deformaciones, mientras que el módulo E_{bender} tiende a crecer durante el desarrollo de las pruebas sí drenadas (CD).

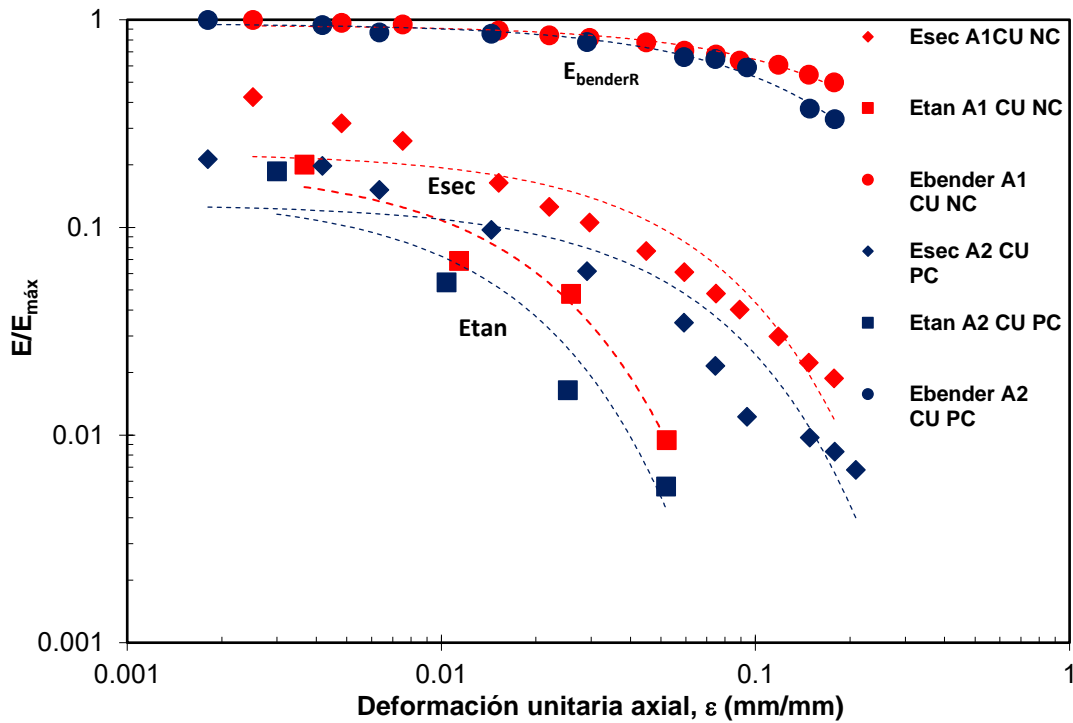


Figura 5.68 $E/E_{m\acute{a}x}$ contra la deformación unitaria axial del sondeo (SM-TP-23)

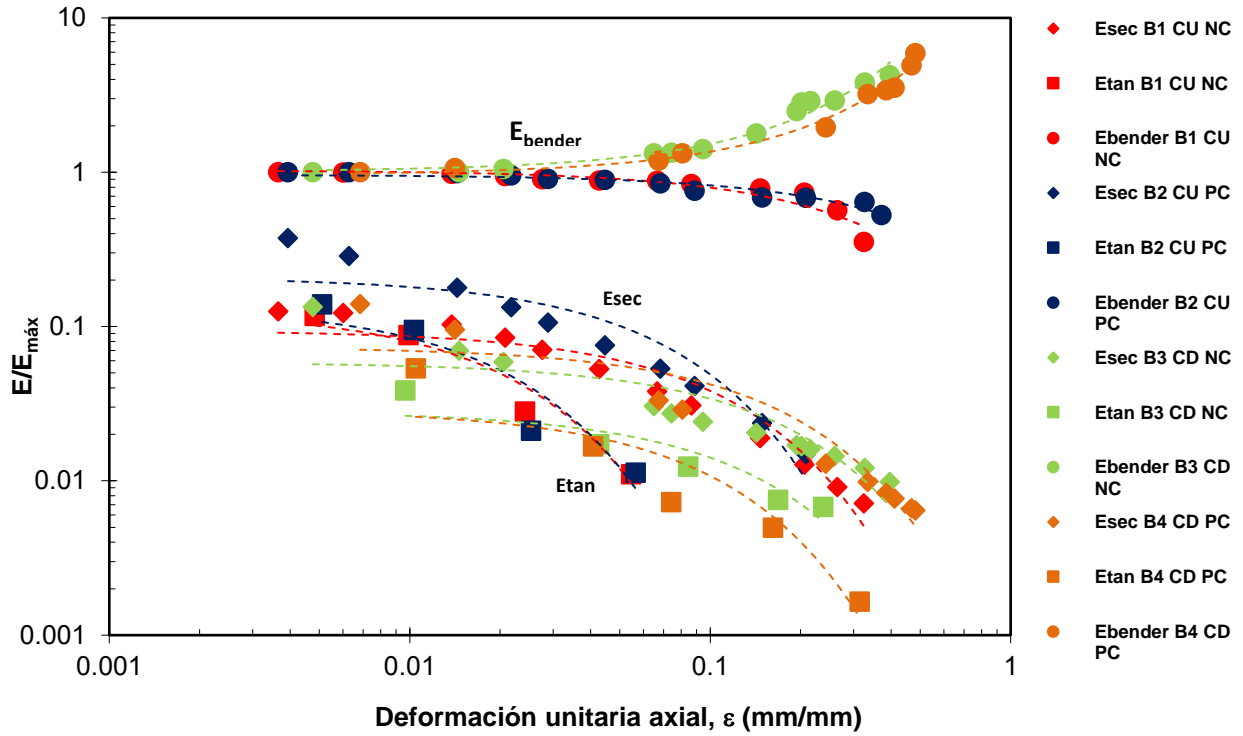


Figura 5.69 $E/E_{\text{máx}}$ contra la deformación unitaria axial del sondeo (TBH-430)

Además, en la Figura 5.70 y Figura 5.71 se muestra la relación entre los módulos E_{sec} y E_{tan} para diferentes deformaciones. Para el sondeo SM-TP-23 es de 2.40 MPa y para el sondeo TBH-430 es de 2.55 MPa.

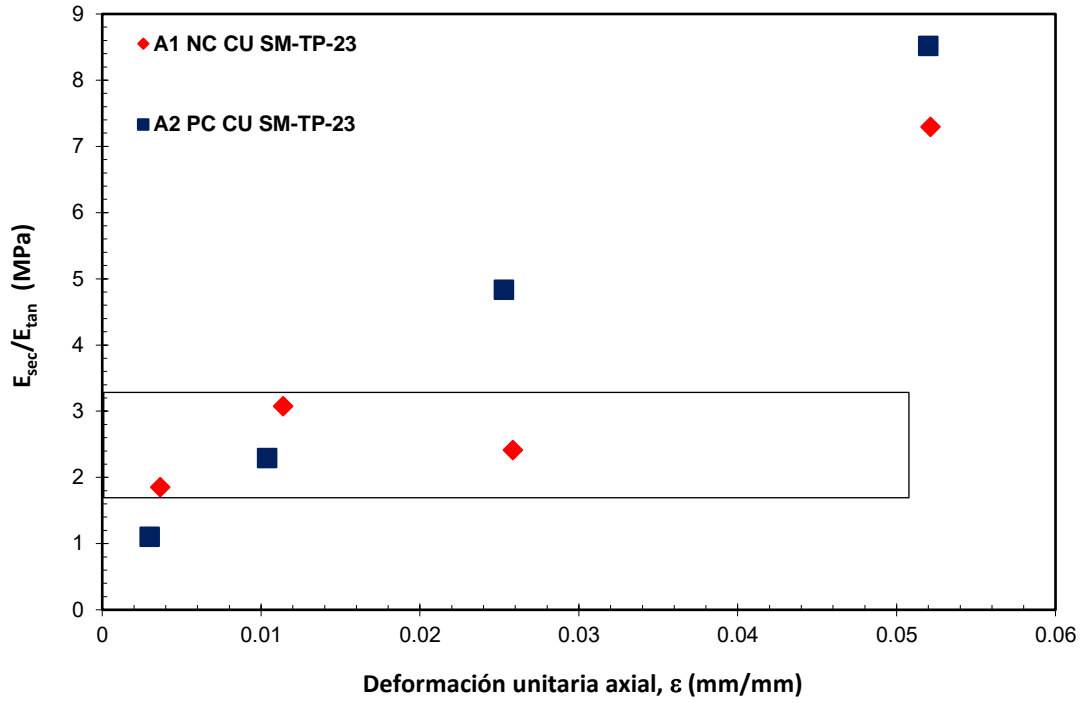


Figura 5.70: Relación del módulo secante y tangente (SM-TP-23).

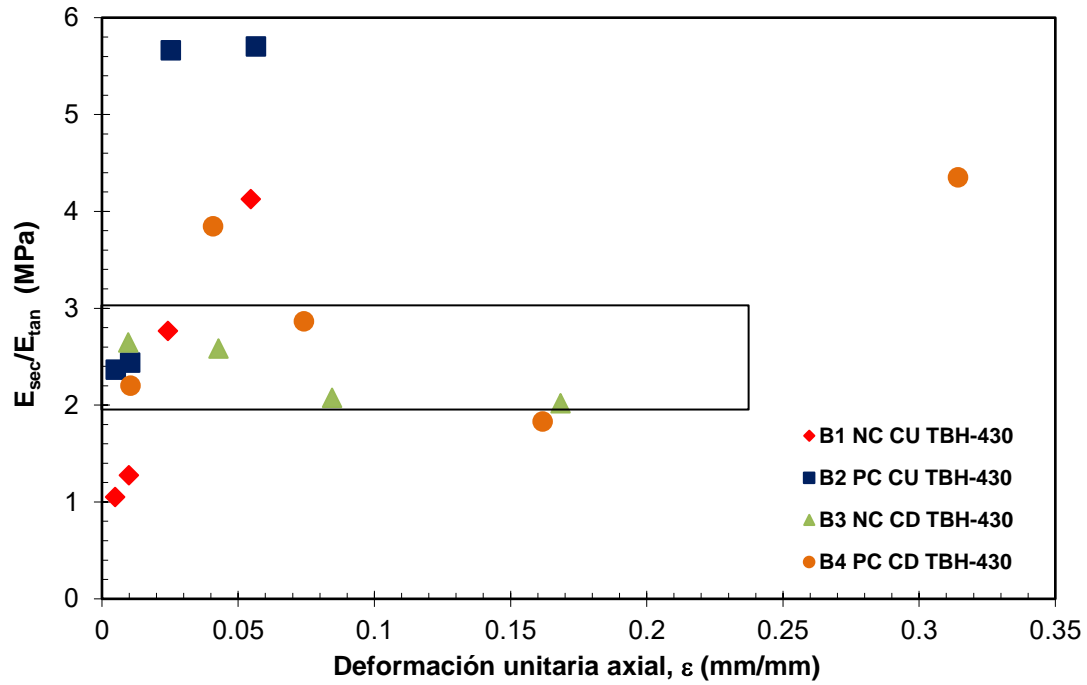


Figura 5.71: Relación del módulo secante y tangente (TBH-430).

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

En este apartado se presentan las conclusiones de esta investigación, en la cual se midieron las velocidades de ondas sísmicas con cristales piezoeléctricos colocados en probetas de suelos arcillosos dentro de cámaras triaxiales. Las técnicas para llevar a cabo estas mediciones se han venido utilizando en el Instituto de Ingeniería desde hace varios años.

En este trabajo se utilizan técnicas analíticas desarrolladas recientemente, para procesar las señales de onda y determinar cuál es el método idóneo para analizar las señales de onda obtenidas con elementos bender. Además, se llevaron a cabo mediciones de velocidades de las ondas sísmicas durante todas las etapas del ensaye, incluyendo la etapa de falla. Esto último ha sido poco estudiado y por ello constituye la contribución principal de este trabajo.

En lo que respecta a la metodología para generar y analizar las ondas sísmicas, se concluyó que:

- a) En las señales de cortante V_s con frecuencias de 1 y 3 kHz el efecto de campo cercano dificulta la identificación del primer arribo de las ondas generadas por el cristal emisor, razón por la que se decidió adquirir el resto de las señales generándolas con frecuencias de 4 a 7 kHz.
- b) Con el método visual de la primera deflexión se obtuvieron valores de las velocidades de onda con mayor dispersión con respecto a los valores obtenidos con otros métodos. Se observó que los tiempos de arribo obtenidos aplicando este método solo son aceptables cuando se tienen señales limpias.
- c) Los resultados muestran que los métodos visuales utilizados para el análisis de onda sísmica difirieron entre sí de -17 a 11 % y los matemáticos de -16 a 5 %. Es decir, los valores de los tiempos de arribo obtenidos con métodos matemáticos tienen dispersiones menores que los que se obtienen con métodos visuales.
- d) El análisis de las señales de onda adquiridas con la transformada wavelet continua (TWC), condujo a valores de los tiempos de arribo que presentaron las menores dispersiones. Los valores obtenidos variaron de 0.03 a 5 % con respecto a la media de los valores medidos.
- e) El método de correlación cruzada solamente da buenos resultados, cuando las señales generadas y las recibidas en el elemento receptor son muy similares entre sí, de lo contrario este método no es válido. Los porcentajes de promedio de diferencia fueron de -16 a 2 %.

Con relación a la evolución de las velocidades de corte durante las diferentes etapas de los ensayos, se concluyó que:

- a) En las etapas de descarga de las pruebas preconsolidadas (PC), la velocidad de onda V_s permanece constante, lo cual obedece a que el volumen del suelo tampoco cambia o bien experimentó cambios poco importantes. De lo anterior, se concluye que en estas pruebas el cambio de volumen y no el cambio de esfuerzos efectivos es el factor que determina el cambio de V_s .
- b) En las pruebas CU la velocidad de onda cortante V_s disminuye conforme disminuyen los esfuerzos efectivos. Esta disminución se debe al aumento del exceso de presión de poro ya que estas pruebas ocurren a volumen constante, sin expulsión de agua. Se concluye que esta última es la que determina la disminución de los valores de V_s .
- c) En la etapa de falla para una prueba CD las velocidades de V_s aumentan, Esto es porque el suelo sigue rigidizándose por la expulsión de agua, la cual causa un cambio en el volumen del suelo. El aumento de la velocidad de V_s en estas pruebas fue significativo, hasta 309.84 m/s.

De lo anterior se puede derivar que las principales causas de los cambios de la velocidad de cortante en el suelo son el cambio de volumen y los cambios en la presión de poro.

Con relación a los parámetros de rigidez de los suelos, se concluyó que:

- a) Los módulos E_{sec} y E_{tan} se obtuvieron a partir de las curvas esfuerzo-deformación durante la etapa de falla de las pruebas triaxiales. Estos valores se compararon con los respectivos módulos E_{bender} y G_{bender} , obtenidos a partir de las velocidades de V_s y V_p con elementos bender. Como se esperaba, los módulos E_{sec} y E_{tan} fueron menores a E_{bender} , lo cual resulta principalmente de la dependencia de estos módulos con el nivel de deformaciones impuestas al suelo durante la etapa de falla estática monotónica. También resulta que las velocidades de deformación impuestas al suelo son muy altas, dadas las frecuencias de excitación en la ondas generadas en los elementos bender y por bajísimos niveles de deformación que se utilizan en esta técnica. Para las arcillas estudiadas resultó que el módulo de corte (G_{bender}) es hasta 2 o 3 veces menor que el módulo de Young (E_{bender}).

- b) Los módulos de rigidez dependen de las condiciones de carga a las que el suelo fue llevado, siendo mayores para suelos con carga-descarga (preconsolidados) que para los que solo fueron cargados (normalmente consolidados).
- c) A pequeñas deformaciones del orden de 10^{-4} % en el suelo los módulos de rigidez son altos y conforme aumenta la deformación disminuyen, pero esto solo para las pruebas no drenadas CU ya que para las pruebas drenadas CD tienen a aumentar. Lo cual refleja la dependencia de las velocidades de onda a la presión de poro (pruebas CU) y de las reducciones de volumen (pruebas CD).
- d) El valor del coeficiente de Poisson obtenido de los ensayos no drenados a volumen constante resulto ser muy cercano al valor teórico de la teoría de la Elasticidad, 0.5. Es decir, se confirma que el valor teórico es correcto y los resultados de este trabajo lo reafirman.

Derivado de los resultados de este trabajo de investigación, se concluye que obtener los parámetros dinámicos de rigidez del suelo con elementos bender es apropiado solo cuando se den deformaciones proporcionales a las frecuencias de excitación, ya que de lo contrario los módulos obtenidos son muy diferentes a la realidad. También, se recomienda usar ampliamente el análisis de señales sísmicas con métodos matemáticos (wavelets y correlación cruzada), ya que son los que mejores resultados dieron comparándolos con los métodos visuales, aun en señales contaminadas con ruido.

Por lo que se recomienda en futuras investigaciones que busquen determinar el comportamiento de los módulos de rigidez del suelo, realizar un análisis con diferencias finitas, apoyándose en programas que permitan simular el comportamiento del suelo en escenarios reales, para que estos les ayuden a obtener valores más representativos y con ellos acercarse a la predicción del comportamiento de un suelo o estructura ante un fenómeno telúrico.

REFERENCIAS

- Airey, D., & Mohsin, A. (2013). Evaluation of Shear Wave Velocity from Bender Elements Using Cross-correlation. *Geotechnical Testing Journal*, 36, 506-514.
- Arroyo, M. (2001). Pulse test in soil samples. Universidad de Bristol: Pulse test in soil samples.
- Arulnathan, R., Boulanger, R., & Riemer, M. (1998). Analysis of bender element tests. *Geotechnical Testing Journal*, 21, 120-131.
- ASTM D 2850-82. (2007). Unconsolidated Undrained Compressive Strength of Cohesive Soils in Triaxial Compression. USA.
- ASTM D 4767-95. (1995). Standard Triaxial compression test method in undrained consolidated cohesive soils. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- Briaud, J., & Buchanan, S. (2001). Introduction to Soil Moduli. *Geotechnical News*.
- Brocanelli, D., & Rinaldi, V. (1998). Measurement of low-strain material damping and wave. *Canadian Geotechnical Journal*, 1032-1040.
- Camacho, J. J. (2012). A PROCEDURE TO CALIBRATE AND PERFORM THE BENDER. *Dyna*, 10-18.
- Casagrande, A. (1940). Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers, Boston Society of Civil Engineers*, 257-276.
- Cázar, A. F. (2018). Determinación de velocidades: cortante (V_s) y de compresión (V_p), en muestras de suelo pre consolidados y normalmente consolidados del Ex Lago de Texcoco. XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica.
- Cervantes, J. (2017). Caracterización de las arcillas del lago de Texcoco, mediante medición de velocidades de transmisión de onda. Tesis Maestría.
- Chamorro, C. (2016). MEDICIÓN DE LOS VALORES DE VELOCIDAD DE ONDA CORTANTE (V_s) EN SUELOS. México.
- Charles, C. (1992). *An Introduction to Wavelets (Vol. 1)*. San Diego, New York, Boston, London, Sydney, Tokyo, Toronto: ACADEMIC PRESS.
- Chee, M. (2010). Bender Element Test in Soil Specimens. Malaysia.
- Crespo, C. (2007). MECÁNICA DE SUELOS Y CIMENTACIONES. México: LIMUSA.
- Daubechies, I. (1990). Ten lectures on wavelets. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Díaz, M. (2014). Medición de las ondas sísmicas en pruebas de consolidación usando cristales piezoeléctricos. México: Tesis Maestría.

- Fernández, A., & Ovando, E. (2019). Interpretación de Señales Usando Transformadas Wavelet Continuas. Universidad Nacional Autónoma de México: Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges.
- Fernández, A. (2020). Interpretación de señales: uso de transformada Wavelet para obtener parámetros dinámicos en suelos. Universidad Nacional Autónoma de México, México: Tesis de Doctorado en Ingeniería Civil.
- Fernández, A., & Ovando, E. (2018). Interpretación de señales del ex lago de Texcoco, usando métodos en el dominio del tiempo y de la frecuencia. México: XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica.
- Flores, M. (2013). Microprospección de ondas dinámicas en muestras de suelo en una cámara triaxial. México: Tesis Doctorado.
- GENS, A., & POTTS, D. (1988). MODELOS ELASTO-PLASTICOS DE ESTADO CRITICO PARA ANALISIS NUMERICOS DE PROBLEMAS GEOTECNICOS. I-FORMULACION BASICA Y PRINCIPALES MODIFICACIONES. METODOS NUMERICOS PARA EL CALCULO Y DISEÑO DE INGENIERIA, 4, 497- 522.
- Giner, J. M. (2001). SISMICIDAD Y RIESGO SÍSMICO EN LA C.A.V. Club Universitario.
- Greening, P, Benahmed, N, Nash, D, & Fonseca, C. (2003). Comparison Of Shear Wave Velocity Measurements In Different Materials Using Time And Frecuency Domaing Techniquess. 3rd International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, IS-Lyon'03, At Lyon, Volume: 1.
- Juárez, B., & Rodríguez, R. (1978). Mecánica de Suelos (Vol. Tomo 1). México: Limusa.
- Kulhawy, F, & Mayne, P. (1990). Manual on estimating soil properties for foundation design. Geotechnical Engineering Group.
- Lawrence, F. (1963). Propagation Velocity of Ultrasonic Waves Through Sand. MIT Research Report , 179.
- Marsal, R., & Mazari, M. (2016). The subsoil of Mexico City. México: Instituto de Ingeniería.
- Mohed, F, & Santamarina, C. (1995). Study of geoprocesses with complementary mechanical and electromagnetic wave measurements in an oedometer. Geotechnical Testing Journal, 307-314.
- 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.
- POULOS, H, & DAVIS, E. (1980). Pile Foundations Analysis and Design. NEW YORK : John Wiley and Sons.
- Sánchez, I., Roesset, M., & Stokoe, E. (1986). ANALYTICAL STUDIES OF BODY WAVE PROPAGATION AND ATTENUATION . United States: Office of Scientific Research.
- Santamarina, J, Klein, A, & Fam, M. (2001). Soils and waves:Particulate materials behavior, characterization and process monitoring. Journal of Soils and Sediments.

- Shearer, P. M. (1990). Introduction to seismology. Cambridge University : Prensa.
- Shirley, D, & Anderson, A. (1975). Acoustic and engineering properties of sediments. Report-ARL-TR-75-78.
- Smith, G. (1979). Elements of soil mechanics for civil and mining engineering. (Vol. Fourth edition). Granada Publishing.
- Tarbuck, E, & Lutgens, F. (2005). Ciencias de la Tierra una introducción a la geología física. (8. edición, Ed.) Madrid: Pearson Educación S. A.
- Valerio, O. (2011). Ensayos triaxiales para suelos. Portal de Revistas Académicas, 1.
- Vázquez, R. (2015). obtención experimental de parámetros elásticos del suelo mediante la utilización de cristales piezoeléctricos. México.
- Viana, A, Ferreira, C, & Fahey, M. (2009). A Framework Interpreting Bender Element Tests, Combining Time-Domain and Frequency-Domain Methods. Geotechnical Testing Journal 32, 91-107.
- Viggiani, G., & Atkinson, J. (1995). Interpretation of bender element tests. Géotechnique, 149–154.
- Wang, j., Yang, Y., Jiping , B., Jian , Y., & Tian , Z. (2018). Coefficient of Earth Pressure at Rest of a Saturated Artificially Mixed Soil from Oedometer Tests. KSCE Journal of Civil Engineering .

ANEXO A

Instrumentación de elementos bender

Para realizar el proceso de instrumentación de cabezal y pedestal mediante la utilización de cristales piezoeléctricos, son necesarios los siguientes materiales y equipo.

1. Cristales piezoeléctricos (dos elementos de flexión y dos elementos de compresión)
2. Alambre de cobre galvanizado
3. Pintura de plata
4. Mica transparente auto adherible
5. Acetona pura
6. Brochas
7. Tijeras
8. Pinzas para cortar alambre
9. Base para cristales (para encapsular los cristales piezoeléctricos)
10. Soldadura de plata
11. Resina fotosintética
12. Cable coaxial de 1 mm
13. Resina epóxica transparente
15. Multímetro digital
16. Cautín eléctrico de estación



Figura A.1 Material para instrumentación de los elementos (BE)

Para los elementos bender de flexión, se sigue el siguiente procedimiento para la instrumentación de cada cristal piezoeléctrico:

Nota: es importante no tocar los cristales con las manos hasta que este esté totalmente con resina.

1.- Se corta el bender a la mitad, se liman las orillas y se pone en acetona pura al menos 5 min (para limpiar cualquier impureza).

2.- Se cortan dos alambres de cobre uno más grande que el otro a los cuales se les quita el recubrimiento de las puntas utilizando el caufín y se limpian con acetona.

3.- Se liman las orillas del cristal y se vuelven a limpiar con acetona.

4.- Se mide su capacitancia en cada uno de sus lados, el cual debe dar una medida entre 7-12 nF.

5.- Se define un polo negativo (-) y un polo positivo (+) en cada cristal.

6.- Para soldar colocamos fundente en el cable de cobre y en el cristal, se pone plata para soldar con un solo punto lado por lado "cara positiva (alambre más largo) y cara negativa (alambre más corto)".

7.- Se corta mica transparente adherible con la que se recubre el lado positivo del cristal (+) y dejando descubierto el lado negativo (-).

8.- Se cubre con la pintura de plata dieléctrica (conductiva) ambos lados del cristal con lo que se genera un incremento del área del polo negativo (-), proceso que reduce el ruido eléctrico del cristal durante las pruebas.

9.- Ya seca la pintura se prueba la capacitancia de los cristales (en la punta de cada alambre).

10.- Ahora el cristal se coloca en un molde previamente engrasado, después colocamos resina UV con la cual se encapsula el cristal.

11.- El cristal se coloca en una cámara de luz UV, este procedimiento se realiza para los dos lados del cristal para que quede totalmente recubierto.

12.- Se liman los bordes del cristal para obtener la forma deseada para que estos embonen en el cabezal y pedestal.

13.- Se realiza una conexión del cable coaxial a los alambres de cobre, el cual se prepara estañando y recubriendo con plata. El alambre negativo (-) se suelda al recubrimiento y el alambre positivo (+) al núcleo del cable.

15.- Por último, se aísla el núcleo con thermofit, y con un thermofit de mayor diámetro se aíslan ambos cables.

Para los elementos de compresión, se sigue el siguiente procedimiento para la instrumentación de cada cristal piezoeléctrico.

- 1.- Se limpian los discos con acetona pura para quitar impurezas.
- 2.- Se repite el paso del procedimiento anterior 2.
- 3.- Se mide su capacitancia en cada uno de sus lados, el cual debe dar una medida entre 0.8- 1.2 nF.
- 4.- El paso 6 del procedimiento anterior es muy parecido solo cambia que la soldadura del alambre debe ser a 1mm del centro del disco.
- 6- Para continuar y finalizar con la instrumentación se siguen los procedimientos anteriores de los elementos BE del 7 al 15.

Al finalizar para ambos cristales (bender de flexión y elementos de compresión) se mide la capacitancia con un generador de funciones midiendo su funcionamiento de cada uno de los cristales.

-Bender de flexión 10 K Hz.

-Elemento de Compresión 1 K Hz.

Ya que tenemos los dos juegos de cristales, lo que procede es colocarlos en el cabezal y pedestal como se ve en la Figura A.2.

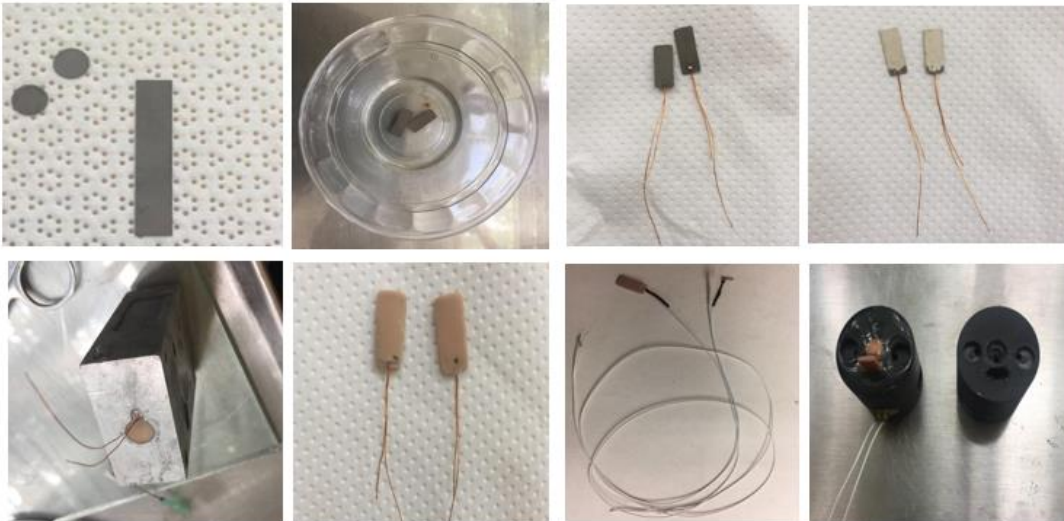


Figura A.2 Proceso de instrumentación de elementos (BE)

ANEXO B

Transformada Wavelet (WT)

B. 1 Transformada Wavelet (TWC)

La transformada Wavelet continua es una herramienta que permite comparar una señal sísmica con versiones desplazadas, comprimidas y estiradas de una Wavelet madre a través de una señal, permitiendo una descomposición de la señal en el dominio de tiempo-escala donde la escala está relacionada inversamente con la frecuencia. A continuación, se enumeran los pasos de cómo fueron obtenidas las Wavelet para las señales de este trabajo.

1. Lo primero y más importante es elegir la Wavelet madre con la cual se trabajará, ya que esta servirá como base para las ventanas que se trabajaran, la selección se debe realizar con base a la similitud de las señales estudiadas y la Wavelet madre. Para este trabajo se decidió trabajar con Mexican Hat ya que su forma se asemeja a la forma inicial de la onda receptora estudiada ver Figura B.1.
- 2.

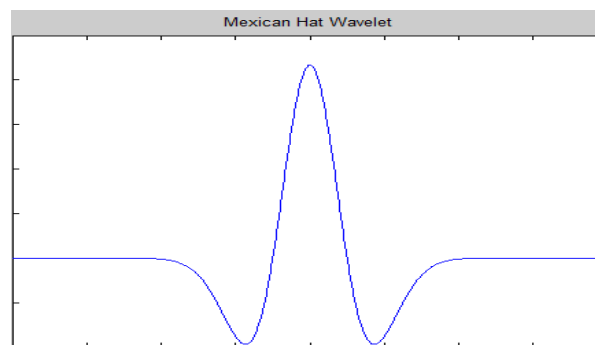


Figura B.1 Onduleta de sombrero mexicano

3. Después se determina un valor para a (escala), en este caso se utilizó 1 y se ubica al comienzo de la señal analizada ($t = 0$), se pueden trabajar hasta 120 escalas diferentes entre 1 y 120.
4. Multiplicar cada coeficiente por la wavelet correctamente escalada y desplazada lo cual produce wavelets constituyentes de la señal original. Los resultados dependerán de la wavelet madre elegida.
5. Con la Wavelet se realiza un barrido a la señal con la que se está trabajando, es decir, se corre hacia la derecha en tiempo manteniendo constante la escala $a = 1$ hasta llegar al final de la señal como se muestra en Figura B.2.

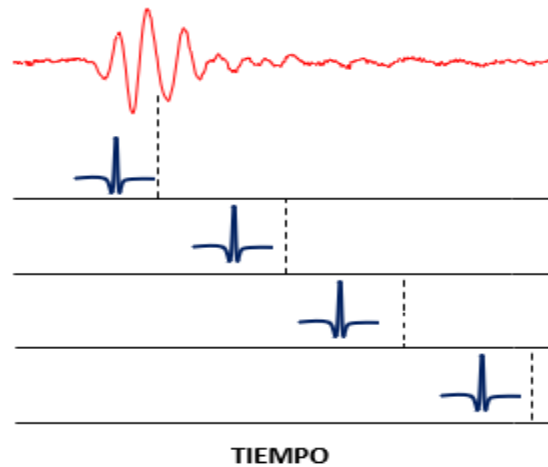


Figura B.2 Corrimiento de las Wavelets en tiempo con (a) constante

6. Después se varía el valor de a y se repiten los pasos 3 y 4, esto se realiza hasta que se realice todo el barrido de frecuencias que se trabajarán (ver Figura B.3).

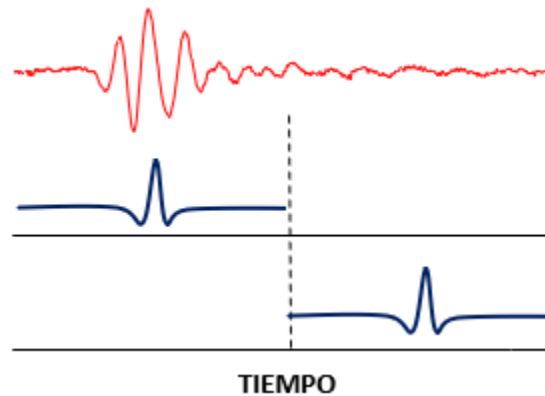


Figura B.3 Variación de (a) y corrimiento de la Wavelet en tiempo

7. Los resultados de la transformada Wavelet se obtendrán cuando se hayan realizado todos los valores de a .

Como ya se mencionó en el capítulo 3 las Wavelets u ondículas fueron trabajadas con un programa de Matlab al cual se le introducen los datos de la señal sísmica.

En la Figura B.4 en la parte superior se muestra una señal introducida al programa Matlab, el eje de las x, corresponde al tiempo y el eje de las y, a la frecuencia. En la parte inferior se muestra un escalograma resultado de la aplicación de la

transformada Wavelet a la señal sísmica introducida la cual se encuentra en tiempo-escala-coeficientes.

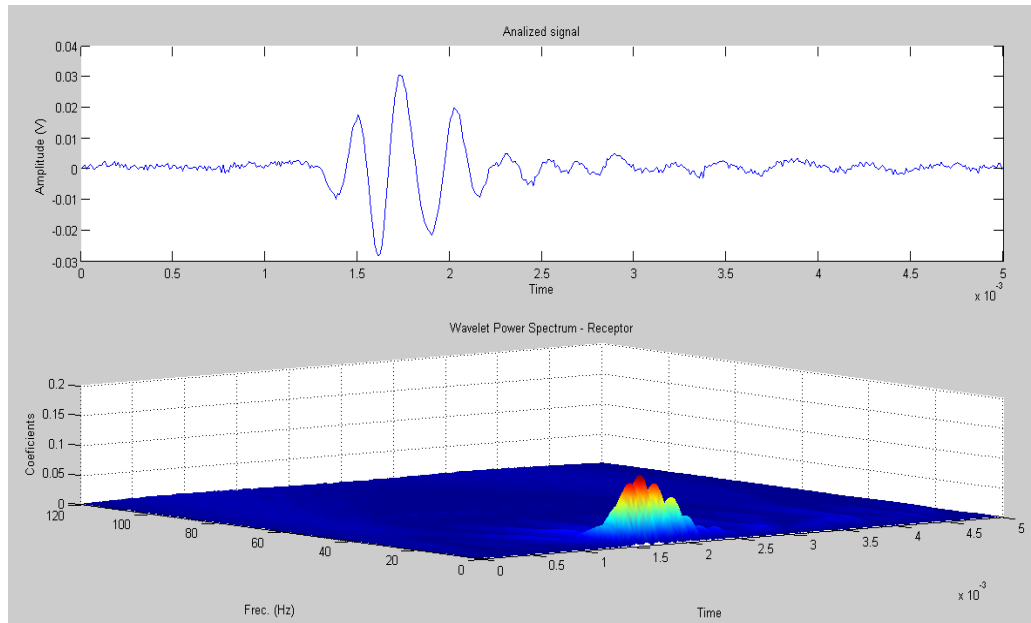


Figura B.4 Señal sísmica y escalograma producto de la aplicación de la transformada Wavelet en Matlab

Se utilizo el criterio de la primera llegada, el cual consiste en localizar en el escalograma la primera fluctuación o pico en la escala de tiempo. Ver Figura B.5.

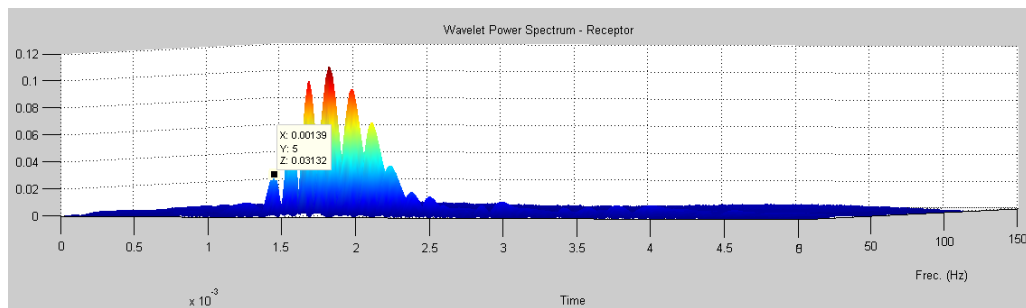


Figura B.5 Selección del primer arribo de la señal

La selección del pico en el escalograma coincide con la primera llegada de la señal original ver Figura B.6.

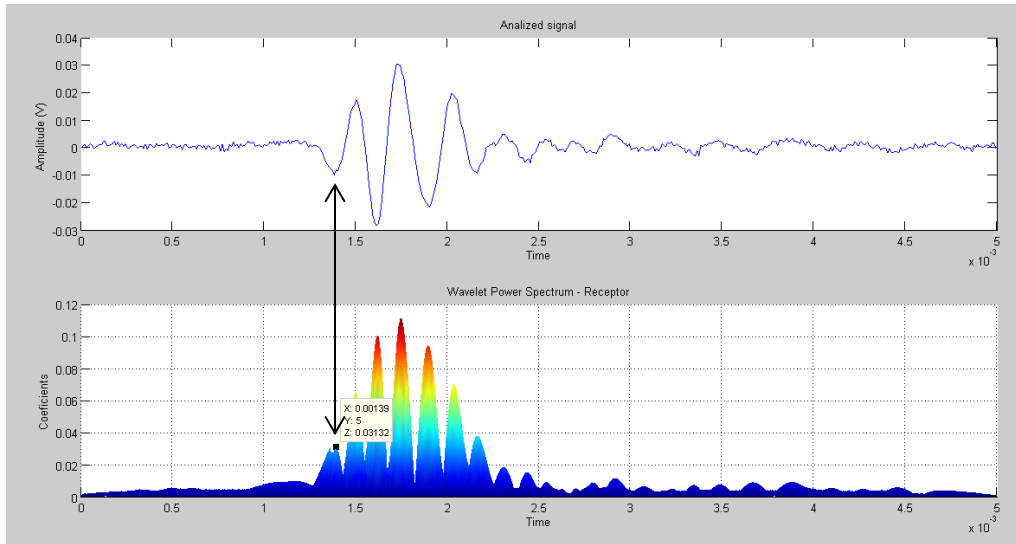
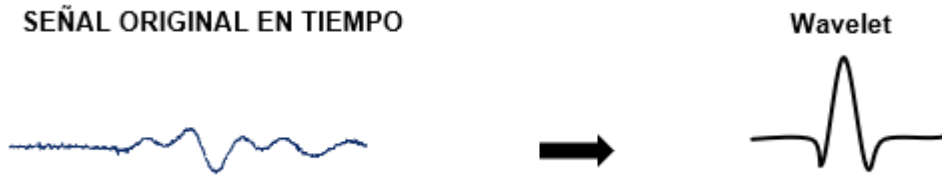
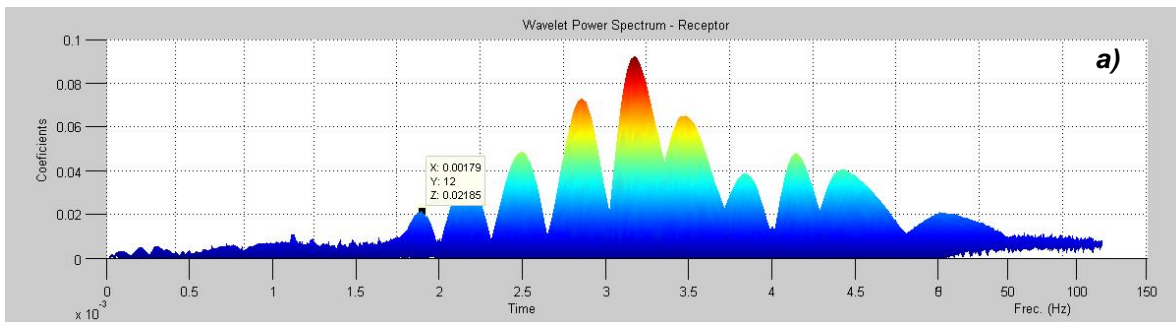


Figura B.6 Relación de la señal original y escalograma resultado de aplicar la Wavelet (CWT)

Las señales sísmicas Vs y Vp obtenidas en cada una de las etapas de saturación, consolidación y falla fueron analizadas por este método. A continuación, en las Figuras B.7, B.8 y B.9, se muestra el análisis en Matlab para una prueba en todas sus etapas.



Saturación



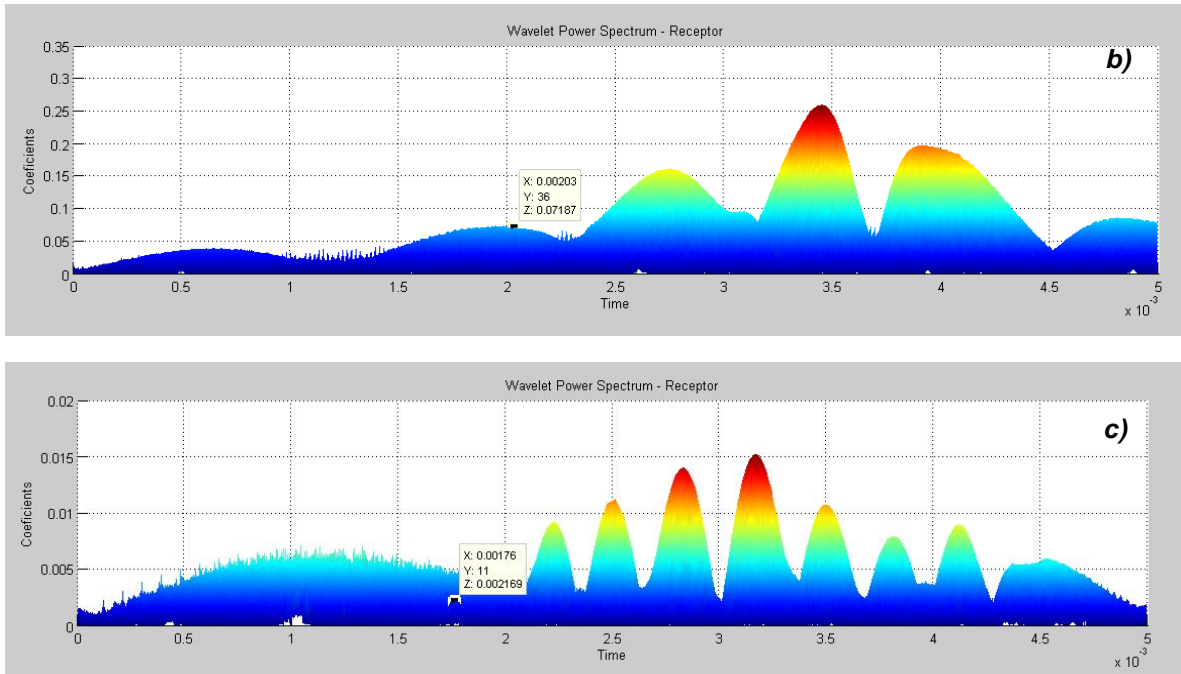
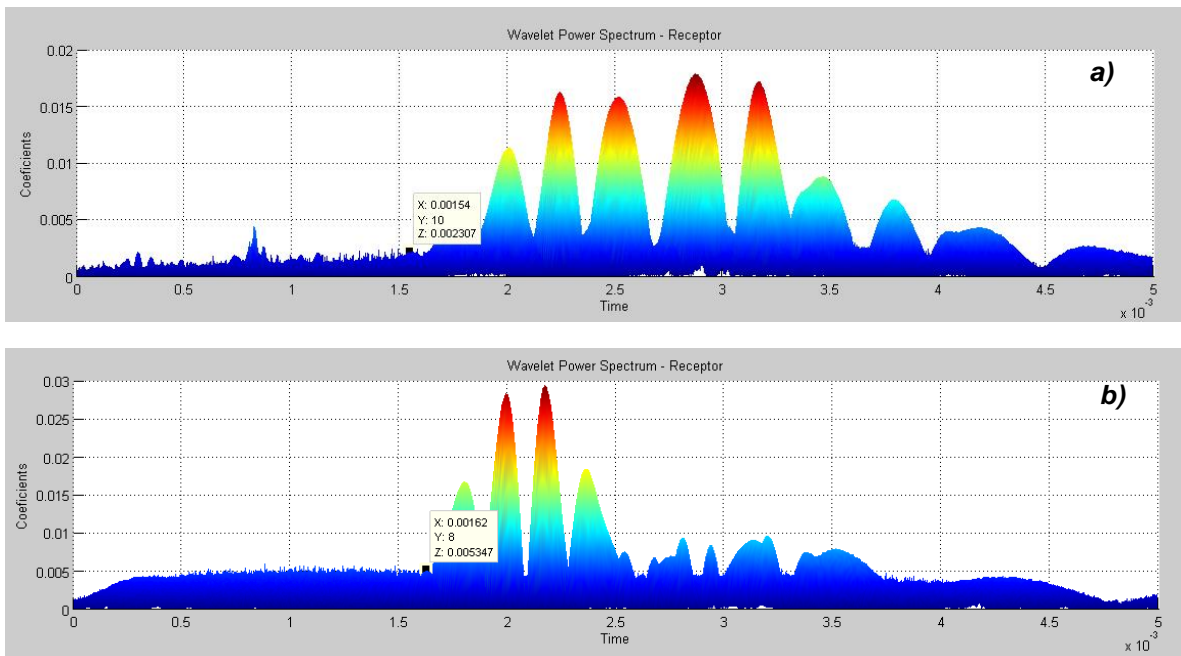


Figura B.7 Escalogramas productos de la aplicación de la transformada Wavelet en Matlab a señales en la etapa de saturación, a) SATURACIÓN 1, b) SATURACIÓN 2 Y c) SATURACIÓN 3

Consolidación



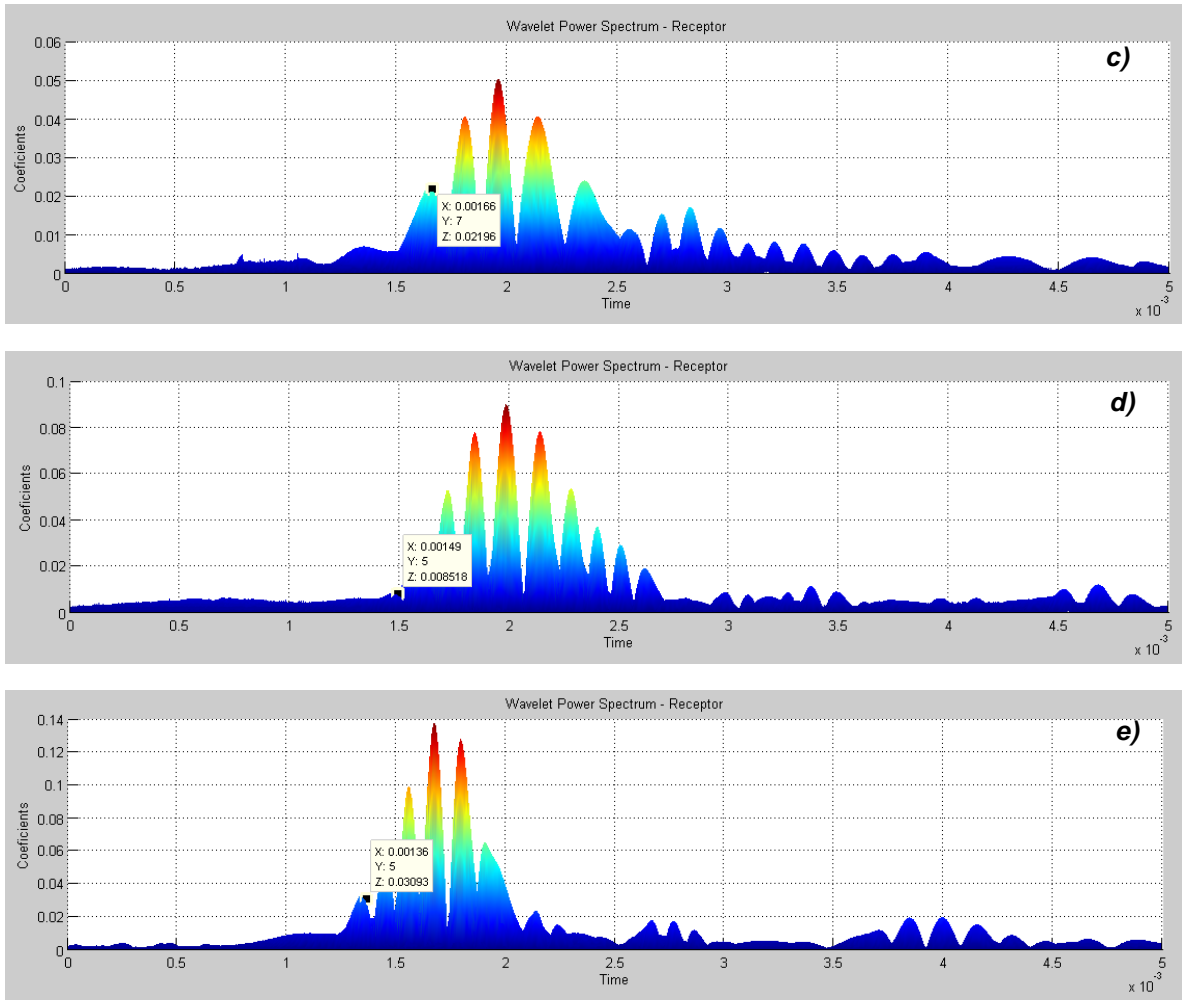
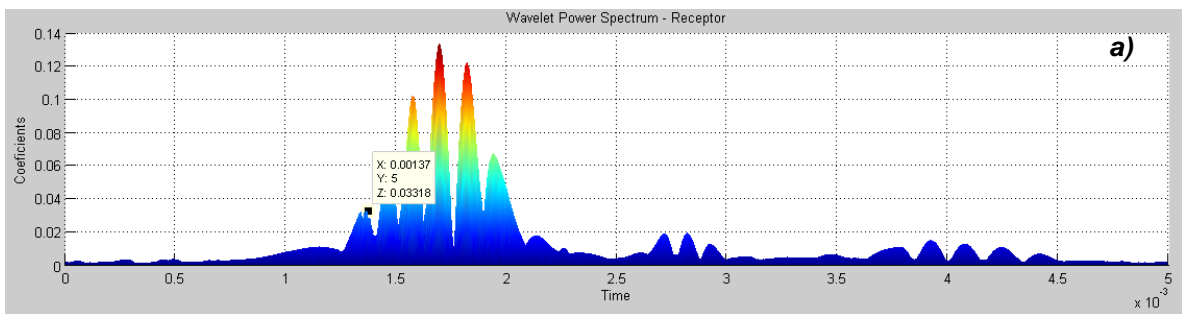


Figura B.8 Escalogramas productos de la aplicación de la transformada Wavelet en Matlab a señales en la etapa de consolidación, a) CONSOLIDACIÓN 1, b) CONSOLIDACIÓN 2, c) CONSOLIDACIÓN 3, d) CONSOLIDACIÓN 4 y e) CONSOLIDACIÓN 5

Falla



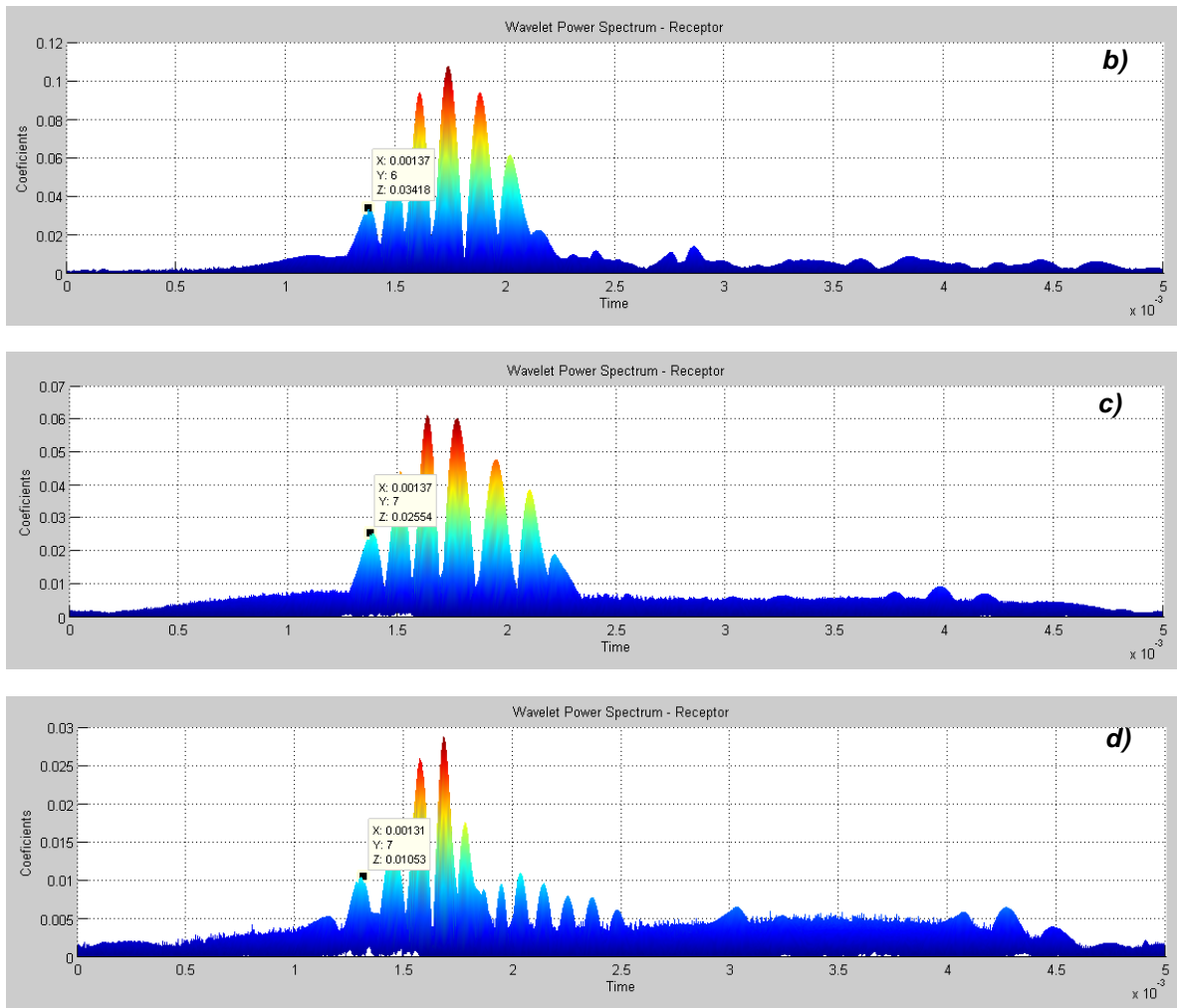


Figura B.9 Escalogramas productos de la aplicación de la transformada Wavelet en Matlab a señales en la etapa de falla, a) FALLA1, b) FALLA2, c) FALLA3, y d) FALLA4

ANEXO C

**Resultados de los primeros arribos de la señal de
cortante Vs con diferentes métodos visuales y
matemáticos**

Anexo C. Resultados de los primeros arribos de la señal de cortante Vs con diferentes métodos visuales y matemáticos

Tabla C.1 Resultados de los arribos de la onda de cortante con diferentes métodos prueba A1 NC CU (SM-TP-23)

| TIEMPOS A1 NC CU (SM-TP-23) | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------|------------|--------|--------|---------------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|---------|
| Criterios | | Tiempo (s) | | | | | | | | | | | | |
| | | SATURACIÓN | | | CONSOLIDACIÓN | | | | | FALLA | | | | |
| | | SAT1 | SAT2 | SAT3 | CONSO1 | CONSO 2 | CONSO3 | CONSO4 | CONSO5 | FA1-5M | FA4-30M | FA8-2H | FA11-4H | FA13-6H |
| Visuales | Primera llegada | 0.0010 | 0.0011 | 0.0010 | 0.0010 | 0.0010 | 0.0010 | 0.0007 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0005 |
| | Primera deflexión | 0.0012 | 0.0013 | 0.0012 | 0.0011 | 0.0012 | 0.0012 | 0.0008 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0007 | |
| | Pico-pico máximos | 0.0012 | 0.0012 | 0.0012 | 0.0011 | 0.0011 | 0.0011 | 0.0007 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0007 | 0.0006 | 0.0006 |
| | Pico-pico mínimos | 0.0011 | 0.0012 | 0.0011 | 0.0010 | 0.0011 | 0.0011 | 0.0007 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 |
| Matemáticos | Cross correlation | 0.0012 | 0.0012 | 0.0012 | 0.0011 | 0.0011 | 0.0011 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 |
| | Wavelet (CWT) | 0.0012 | 0.0013 | 0.0012 | 0.0011 | 0.0011 | 0.0012 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0006 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0006 | 0.0006 |

Tabla C.2 Porcentaje de diferencias con respecto al valor medio para cada método prueba A1 NC CU (SM-TP-23)

| TIEMPOS A1 NC CU (SM-TP-23) | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------|---|------|------|---------------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|---------|--------------|
| Criterios | | PORCENTAJE DE DIFERENCIAS CON RESPECTO AL VALOR MEDIO | | | | | | | | | | | | | |
| | | SATURACIÓN | | | CONSOLIDACIÓN | | | | | FALLA | | | | | |
| | | SAT1 | SAT2 | SAT3 | CONSO1 | CONSO 2 | CONSO3 | CONSO4 | CONSO5 | FA1-5M | FA4-30M | FA8-2H | FA11-4H | FA13-6H | PROMEDIO |
| Visuales | Primera llegada | -9% | -10% | -16% | -8% | -4% | -11% | 0% | -9% | -1% | -10% | -9% | -8% | -18% | -8.6% |
| | Primera deflexión | 4% | 5% | 6% | 4% | 7% | 7% | 11% | 9% | 9% | 9% | 8% | 11% | 10% | 7.6% |
| | Pico-pico máximos | 2% | 0% | 4% | 4% | 0% | 2% | 1% | -4% | -3% | -4% | -2% | 1% | 4% | 0.4% |
| | Pico-pico mínimos | -2% | -2% | -2% | -5% | -2% | -2% | 1% | -3% | -2% | -2% | -4% | 0% | 0% | -2.0% |
| Matemáticos | Cross correlation | 2% | 1% | 2% | 2% | -2% | -1% | -19% | -5% | -2% | -4% | -3% | 1% | -3% | -2.3% |
| | Wavelet (CWT) | 2% | 5% | 2% | 2% | 0% | 4% | 1% | 9% | -3% | 9% | 7% | -8% | 4% | 2.7% |

Anexo C. Resultados de los primeros arribos de la señal de cortante Vs con diferentes métodos visuales y matemáticos

Tabla C.3 Resultados de los arribos de las ondas de cortante con diferentes métodos prueba A2 PC CU (SM-TP-23)

| TIEMPOS A2 PC CU (SM-TP-23) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|
| Criterios | | Tiempo (s) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | SATURACIÓN | | | | | | CONSOLIDACIÓN | | | | | | | | FALLA | | | | | |
| | | SAT1 | SAT2 | SAT3 | SAT4 | SAT5 | SAT6 | CONSO1 | CONSO 2 | CONSO3 | CONSO4 | CONSO5 | CONSO6 | CONSO7 | CONSO8 | FA 1-5M | FA4-30M | FA8-2H | FA11-4H | FA15-8H | |
| Visuales | Primera llegada | 0.0015 | 0.0011 | 0.0010 | 0.0010 | 0.0012 | 0.0014 | 0.0013 | 0.0017 | 0.0006 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0004 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0009 | 0.0006 | 0.0005 | 0.0006 |
| | Primera deflexión | 0.0022 | 0.0015 | 0.0016 | 0.0015 | 0.0015 | 0.0016 | 0.0014 | 0.0017 | 0.0008 | 0.0007 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0010 | 0.0007 | 0.0006 | 0.0007 |
| | Pico-pico máximos | 0.0017 | 0.0016 | 0.0016 | 0.0016 | 0.0017 | 0.0017 | 0.0015 | 0.0013 | 0.0010 | 0.0007 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 |
| | Pico-pico mínimos | 0.0015 | 0.0014 | 0.0015 | 0.0014 | 0.0014 | 0.0015 | 0.0013 | 0.0012 | 0.0007 | 0.0006 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0006 | 0.0005 | 0.0006 |
| Matemáticos | Cross correlation | 0.0016 | 0.0015 | 0.0015 | 0.0015 | 0.0015 | 0.0015 | 0.0015 | 0.0013 | 0.0008 | 0.0007 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0006 | 0.0005 | 0.0006 |
| | Wavelet (CWT) | 0.0018 | 0.0011 | 0.0014 | 0.0015 | 0.0015 | 0.0016 | 0.0015 | 0.0013 | 0.0008 | 0.0006 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0007 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0008 | 0.0006 | 0.0006 |

Tabla C.4 Porcentaje de diferencias con respecto al valor medio para cada método prueba A2 PC CU (SM-TP-23)

| TIEMPOS A2 PC CU (SM-TP-23) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------|---|------|------|------|------|------|---------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------------|
| Criterios | | PORCENTAJE DE DIFERENCIAS CON RESPECTO AL VALOR MEDIO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | SATURACIÓN | | | | | | CONSOLIDACIÓN | | | | | | | | FALLA | | | | | PROMEDIO |
| | | SAT1 | SAT2 | SAT3 | SAT4 | SAT5 | SAT6 | CONSO1 | CONSO 2 | CONSO3 | CONSO4 | CONSO5 | CONSO6 | CONSO7 | CONSO8 | FA 1-5M | FA4-30M | FA8-2H | FA11-4H | FA15-8H | |
| Visuales | Primera llegada | -12% | -20% | -47% | -42% | -23% | -8% | -9% | 15% | -28% | -35% | -8% | -21% | -6% | -13% | -6% | 26% | -3% | -17% | -1% | -14% |
| | Primera deflexión | 21% | 8% | 10% | 6% | 0% | 2% | -2% | 16% | 5% | 10% | 16% | 10% | 14% | 8% | 12% | 31% | 5% | 4% | 7% | 10% |
| | Pico-pico máximos | -2% | 14% | 10% | 11% | 13% | 8% | 7% | -8% | 22% | 8% | -4% | 4% | -1% | -9% | 1% | -21% | -7% | 5% | -4% | 2% |
| | Pico-pico mínimos | -14% | 1% | 3% | -1% | -5% | -4% | -7% | -16% | -8% | 0% | 2% | -9% | -2% | -9% | 1% | -26% | -11% | -11% | -1% | -6% |
| Matemáticos | Cross correlation | -6% | 9% | 7% | 6% | 4% | -2% | 4% | -8% | -2% | 7% | -8% | 5% | -2% | -12% | -3% | -26% | -11% | 3% | -2% | -2% |
| | Wavelet (CWT) | 4% | -23% | -1% | 6% | 4% | 2% | 4% | -8% | -2% | -1% | -4% | 4% | -6% | 23% | -6% | -26% | 19% | 11% | 1% | 0.03% |

Anexo C. Resultados de los primeros arribos de la señal de cortante Vs con diferentes métodos visuales y matemáticos

Tabla C.5 Resultados de los arribos de las ondas de cortante con diferentes métodos prueba B1 NC CU (TBH-430)

| TIEMPOS B1 NC CU (TBH-430) | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------------------|------------|--------|---------------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|----------|
| Criterios | | Tiempo (s) | | | | | | | | | | | |
| | | SATURACIÓN | | CONSOLIDACIÓN | | | | | | FALLA | | | |
| | | SAT1 | SAT2 | CONSO1 | CONSO 2 | CONSO3 | CONSO4 | CONSO5 | CONSO6 | FA1-10M | FA5-1H | FA9-5H | FA12-11H |
| Visuales | Primera llegada | 0.0011 | 0.0011 | 0.0011 | 0.0009 | 0.0008 | 0.0006 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0008 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 |
| | Primera deflexión | 0.0015 | 0.0014 | 0.0015 | 0.0012 | 0.0009 | 0.0008 | 0.0007 | 0.0005 | 0.0010 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 |
| | Pico-pico máximos | 0.0018 | 0.0018 | 0.0017 | 0.0014 | 0.0011 | 0.0008 | 0.0006 | 0.0005 | 0.0007 | 0.0005 | 0.0004 | 0.0005 |
| | Pico-pico mínimos | 0.0014 | 0.0014 | 0.0014 | 0.0011 | 0.0008 | 0.0007 | 0.0006 | 0.0004 | 0.0006 | 0.0004 | 0.0004 | 0.0005 |
| Matemáticos | Cross correlation | 0.0018 | 0.0018 | 0.0017 | 0.0011 | 0.0010 | 0.0008 | 0.0006 | 0.0005 | 0.0007 | 0.0005 | 0.0004 | 0.0005 |
| | Wavelet (CWT) | 0.0015 | 0.0011 | 0.0014 | 0.0012 | 0.0010 | 0.0008 | 0.0007 | 0.0005 | 0.0008 | 0.0007 | 0.0008 | 0.0005 |

Tabla C.6 Porcentaje de diferencias con respecto al valor medio para cada método prueba B1 NC CU (TBH-430)

| TIEMPOS B1 NC CU (TBH-430) | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------------------|---|------|---------------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|----------|-------------|
| Criterios | | PORCENTAJE DE DIFERENCIAS CON RESPECTO AL VALOR MEDIO | | | | | | | | | | | | |
| | | SATURACIÓN | | CONSOLIDACIÓN | | | | | | FALLA | | | | PROMEDIO |
| | | SAT1 | SAT2 | CONSO1 | CONSO 2 | CONSO3 | CONSO4 | CONSO5 | CONSO6 | FA1-10M | FA5-1H | FA9-5H | FA12-11H | |
| Visuales | Primera llegada | -33% | -26% | -31% | -26% | -16% | -23% | -12% | 3% | 5% | -7% | -11% | -3% | -15% |
| | Primera deflexión | -3% | 0% | 1% | 2% | 0% | 5% | 9% | 8% | 21% | -2% | 3% | 12% | 5% |
| | Pico-pico máximos | 17% | 19% | 14% | 19% | 12% | 9% | 1% | -5% | -8% | -8% | -18% | -1% | 4% |
| | Pico-pico mínimos | -10% | -5% | -5% | -7% | -11% | -9% | -4% | -11% | -24% | -18% | -14% | -3% | -10% |
| Matemáticos | Cross correlation | 16% | 19% | 12% | -1% | 4% | 4% | -5% | -7% | -8% | -11% | -18% | -3% | 0% |
| | Wavelet (CWT) | -3% | -28% | -3% | 3% | 4% | 6% | 7% | 7% | 2% | 29% | 33% | -3% | 5% |

Anexo C. Resultados de los primeros arribos de la señal de cortante Vs con diferentes métodos visuales y matemáticos

Tabla C.7 Resultados de los arribos de las ondas de cortante con diferentes métodos prueba B2 PC CU (TBH-430)

| TIEMPOS B2 PC CU (TBH-430) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------------------|------------|--------|--------|--------|---------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|-----------|---------|--------|
| Criterios | | Tiempo (s) | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | SATURACIÓN | | | | CONSOLIDACIÓN | | | | | | FALLA | | | | | |
| | | SAT1 | SAT2 | SAT3 | SAT4 | CONSO1 | CONSO 2 | CONSO3 | CONSO4 | CONSO5 | CONSO6 | DES1 | DES2 | FA1-10M | FA7-2H20M | FA10-7H | |
| Visuales | Primera llegada | 0.0012 | 0.0016 | 0.0014 | 0.0015 | 0.0015 | 0.0010 | 0.0012 | 0.0009 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 |
| | Primera deflexión | 0.0016 | 0.0016 | 0.0015 | 0.0016 | 0.0016 | 0.0013 | 0.0012 | 0.0009 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0007 |
| | Pico-pico máximos | 0.0018 | 0.0018 | 0.0018 | 0.0018 | 0.0018 | 0.0015 | 0.0013 | 0.0009 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 |
| | Pico-pico mínimos | 0.0015 | 0.0015 | 0.0014 | 0.0015 | 0.0015 | 0.0011 | 0.0011 | 0.0009 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 |
| Matemáticos | Cross correlation | 0.0017 | 0.0016 | 0.0017 | 0.0016 | 0.0016 | 0.0014 | 0.0011 | 0.0009 | 0.0008 | 0.0008 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 |
| | Wavelet (CWT) | 0.0015 | 0.0016 | 0.0016 | 0.0016 | 0.0016 | 0.0013 | 0.0012 | 0.0010 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0006 | 0.0006 |

Tabla C.8 Porcentaje de diferencias con respecto al valor medio para cada método prueba B2 PC CU (TBH-430)

| TIEMPOS B2 PC CU (TBH-430) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------------------|---|------|------|------|---------------|---------|--------|--------|--------|--------|-------|------|---------|-----------|---------|------------|
| Criterios | | PORCENTAJE DE DIFERENCIAS CON RESPECTO AL VALOR MEDIO | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | SATURACIÓN | | | | CONSOLIDACIÓN | | | | | | FALLA | | | | | PROMEDIO |
| | | SAT1 | SAT2 | SAT3 | SAT4 | CONSO1 | CONSO 2 | CONSO3 | CONSO4 | CONSO5 | CONSO6 | DES1 | DES2 | FA1-10M | FA7-2H20M | FA10-7H | |
| Visuales | Primera llegada | -26% | -2% | -12% | -8% | -8% | -27% | -3% | -4% | -13% | -13% | -7% | -8% | -4% | -3% | -3% | -9% |
| | Primera deflexión | 1% | 0% | -3% | -2% | -2% | 3% | 2% | 3% | 6% | 6% | 7% | 8% | 9% | 13% | 13% | 4% |
| | Pico-pico máximos | 14% | 10% | 12% | 14% | 14% | 16% | 9% | 3% | -11% | -11% | -3% | -7% | -5% | -4% | -4% | 3% |
| | Pico-pico mínimos | -5% | -6% | -10% | -8% | -8% | -15% | -5% | -7% | -7% | -7% | -6% | -3% | -3% | 0% | 0% | -6% |
| Matemáticos | Cross correlation | 9% | 1% | 7% | 2% | 2% | 10% | -4% | 1% | 11% | 11% | -5% | -4% | -5% | -3% | -3% | 2% |
| | Wavelet (CWT) | -3% | -3% | 2% | -1% | -1% | 3% | -1% | 3% | 9% | 9% | 11% | 10% | 6% | -6% | -6% | 2% |

Anexo C. Resultados de los primeros arribos de la señal de cortante Vs con diferentes métodos visuales y matemáticos

Tabla C.9 Resultados de los arribos de las ondas de cortante con diferentes métodos prueba B3 NC CD (TBH-430)

| TIEMPOS B3 NC CD (TBH-430) | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------------------|------------|--------|--------|---------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|-----------|--------------|
| Criterios | | Tiempo (s) | | | | | | | | | | | | | |
| | | SATURACIÓN | | | CONSOLIDACIÓN | | | | | | FALLA | | | | |
| | | SAT1 | SAT2 | SAT3 | CONSO1 | CONSO 2 | CONSO3 | CONSO4 | CONSO5 | CONSO6 | FA1-2H | FA3-7H | FA6-26H | FA17-119H | FA19-143H50M |
| Visuales | Primera llegada | 0.0017 | 0.0014 | 0.0018 | 0.0015 | 0.0017 | 0.0011 | 0.0008 | 0.0007 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0004 | 0.0004 | 0.0002 | 0.0001 |
| | Primera deflexión | 0.0018 | 0.0016 | 0.0018 | 0.0016 | 0.0018 | 0.0012 | 0.0009 | 0.0007 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0005 | 0.0002 | 0.0002 |
| | Pico-pico máximos | 0.0017 | 0.0015 | 0.0017 | 0.0016 | 0.0013 | 0.0011 | 0.0009 | 0.0007 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0004 | 0.0001 | 0.0001 |
| | Pico-pico mínimos | 0.0017 | 0.0015 | 0.0018 | 0.0015 | 0.0012 | 0.0011 | 0.0008 | 0.0006 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0004 | 0.0001 | 0.0001 |
| Matemáticos | Cross correlation | 0.0018 | 0.0016 | 0.0020 | 0.0016 | 0.0018 | 0.0011 | 0.0009 | 0.0007 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0004 | 0.0001 | 0.0001 |
| | Wavelet (CWT) | 0.0017 | 0.0016 | 0.0017 | 0.0015 | 0.0018 | 0.0011 | 0.0009 | 0.0007 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0004 | 0.0001 | 0.0001 |

Tabla C.10 Porcentaje de diferencias con respecto al valor medio para cada método prueba B3 NC CD (TBH-430)

| TIEMPOS B3 NC CD (TBH-430) | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------------------|---|------|------|---------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|-----------|--------------|------------|
| Criterios | | PORCENTAJE DE DIFERENCIAS CON RESPECTO AL VALOR MEDIO | | | | | | | | | | | | | | |
| | | SATURACIÓN | | | CONSOLIDACIÓN | | | | | | FALLA | | | | | |
| | | SAT1 | SAT2 | SAT3 | CONSO1 | CONSO 2 | CONSO3 | CONSO4 | CONSO5 | CONSO6 | FA1-2H | FA3-7H | FA6-26H | FA17-119H | FA19-143H50M | PROMEDIO |
| Visuales | Primera llegada | 0% | -7% | 1% | -6% | 5% | -2% | -6% | -1% | -4% | -6% | -25% | -6% | 4% | -57% | -8% |
| | Primera deflexión | 3% | 3% | -1% | 3% | 11% | 6% | 6% | 5% | 12% | 12% | 15% | 14% | 27% | 32% | 11% |
| | Pico-pico máximos | 0% | -4% | -7% | 5% | -22% | 0% | 0% | 0% | -4% | -8% | -4% | -2% | -5% | 3% | -3% |
| | Pico-pico mínimos | -3% | -3% | -1% | -4% | -29% | -4% | -6% | -15% | -9% | -3% | 1% | -5% | -18% | -16% | -8% |
| Matemáticos | Cross correlation | 3% | 3% | 11% | 2% | 11% | -2% | 0% | 0% | -7% | -6% | -3% | -2% | -6% | -5% | 0% |
| | Wavelet (CWT) | -3% | 6% | -7% | -1% | 9% | 0% | 6% | 7% | 8% | 7% | 7% | -2% | -18% | 3% | 2% |

Anexo C. Resultados de los primeros arribos de la señal de cortante Vs con diferentes métodos visuales y matemáticos

Tabla C.11 Resultados de los arribos de las ondas de cortante con diferentes métodos prueba B4 PC CD (TBH-430)

| | | TIEMPOS B4 PC CD (TBH-430) | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------------------|----------------------------|--------|--------|---------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|-------------|-----------|--------------|
| Criterios | | Tiempo (s) | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | SATURACIÓN | | | CONSOLIDACIÓN | | | | | | FALLA | | | | | | |
| | | SAT1 | SAT2 | SAT3 | CONSO1 | CONSO 2 | CONSO3 | CONSO4 | CONSO5 | CONSO6 | DES1 | DES2 | FA1-2H | FA4-24H | FA8-114H25M | FA10-122H | FA12-142H50M |
| Visuales | Primera llegada | 0.0014 | 0.0013 | 0.0014 | 0.0013 | 0.0011 | 0.0008 | 0.0007 | 0.0005 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0004 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0001 |
| | Primera deflexión | 0.0016 | 0.0016 | 0.0016 | 0.0015 | 0.0013 | 0.0011 | 0.0008 | 0.0007 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 |
| | Pico-pico máximos | 0.0019 | 0.0018 | 0.0018 | 0.0017 | 0.0014 | 0.0011 | 0.0009 | 0.0007 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0004 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 |
| | Pico-pico mínimos | 0.0015 | 0.0015 | 0.0015 | 0.0014 | 0.0012 | 0.0010 | 0.0007 | 0.0006 | 0.0005 | 0.0004 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0004 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 |
| Matemáticos | Cross correlation | 0.0019 | 0.0018 | 0.0018 | 0.0017 | 0.0014 | 0.0010 | 0.0009 | 0.0004 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0002 | 0.0004 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0001 |
| | Wavelet (CWT) | 0.0015 | 0.0014 | 0.0014 | 0.0014 | 0.0012 | 0.0010 | 0.0008 | 0.0007 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0004 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0002 |

Tabla C.12 Porcentaje de diferencias con respecto al valor medio para cada método prueba B4 PC CD (TBH-430)

| | | TIEMPOS B4 PC CD (TBH-430) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------------------|---|------|------|---------------|---------|--------|--------|--------|--------|-------|------|--------|---------|-------------|-----------|--------------|------|----------|
| Criterios | | PORCENTAJE DE DIFERENCIAS CON RESPECTO AL VALOR MEDIO | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | SATURACIÓN | | | CONSOLIDACIÓN | | | | | | FALLA | | | | | | | | PROMEDIO |
| | | SAT1 | SAT2 | SAT3 | CONSO1 | CONSO 2 | CONSO3 | CONSO4 | CONSO5 | CONSO6 | DES1 | DES2 | FA1-2H | FA4-24H | FA8-114H25M | FA10-122H | FA12-142H50M | | |
| Visuales | Primera llegada | -19% | -17% | -12% | -14% | -15% | -18% | -19% | -10% | -43% | -9% | -25% | -40% | -36% | -1% | 27% | -26% | -17% | |
| | Primera deflexión | -2% | 0% | -1% | -1% | 2% | 6% | 0% | 12% | 17% | 11% | 12% | 20% | 14% | 13% | 34% | 31% | 10% | |
| | Pico-pico máximos | 14% | 13% | 13% | 13% | 10% | 9% | 12% | 15% | 13% | 10% | 9% | 16% | 1% | -27% | -52% | -35% | 2% | |
| | Pico-pico mínimos | -6% | -4% | -5% | -6% | -2% | 1% | -10% | 2% | 4% | -1% | 1% | 6% | -1% | -25% | 3% | -17% | -4% | |
| Matemáticos | Cross correlation | 13% | 13% | 10% | 11% | 8% | 1% | 8% | -61% | -34% | -44% | -20% | -88% | 1% | 2% | -33% | -40% | -16% | |
| | Wavelet (CWT) | -9% | -13% | -10% | -9% | -7% | -3% | 4% | 13% | 14% | 14% | 12% | 20% | 9% | 20% | -52% | 31% | 2% | |