



**BUAP**

**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**Facultad de Ingeniería**

**Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado**

**COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES MÉTODOS DE PRUEBAS DE  
INTEGRIDAD EN PILAS DE CIMENTACIÓN  
EN LA CIUDAD DE MÉXICO.**

**T E S I S**

Que para obtener el grado de

**MAESTRA EN INGENIERÍA**  
Con opción terminal en Geotecnia

Presenta:

**YOLEIDA DEL VALLE SUÁREZ ARELLANO**

Asesor de tesis:

M. en I. Ana Elena Posada Sánchez

Coasesor de tesis:

Dr. Raúl Aguilar Becerril

Puebla, Pue.

Mayo, 2023

## **Agradecimientos**

Quisiera expresar mi profundo agradecimiento a las personas que han sido fundamentales en el desarrollo y culminación de mi tesis. Sus invaluable contribuciones, apoyo y aliento han sido imprescindibles para alcanzar este importante logro en mi vida académica.

En primer lugar, deseo agradecer de corazón a mis padres, Ramón y Rosa Alba, por su apoyo incondicional a lo largo de este arduo camino. Siempre han creído en mí y me han animado a seguir adelante, incluso en las circunstancias más desafiantes.

A mi compañero de vida, Luis Alfredo Solano, quiero expresar mi más profundo agradecimiento. Durante más de 15 años, hemos enfrentado juntos momentos difíciles que nos han fortalecido. Gracias por sostenerme y por acompañarme en esta emocionante aventura de la tesis.

A mis hermanos, Jhon y especialmente a Deivid, por ser mi modelo y mi mayor inspiración. Su apoyo incondicional ha sido una fuente constante de motivación y determinación en mi camino.

A Giovanni Quintos, quiero expresar mi profundo agradecimiento por ser mi impulso y fortaleza durante estos últimos meses. Tu amistad es uno de los mayores regalos que la vida me ha brindado.

A mi señora Lulu Lima, agradezco sinceramente por abrirme las puertas de su hogar, por acogerme y brindarme su cariño incondicional.

Al Dr. Raúl Aguilar, mi gratitud eterna por formarme como ingeniera. Durante casi diez años, ha sido mi guía y mentor. Su apoyo ha sido fundamental en mi crecimiento profesional.

A la Maestra Ana Elena Posada, agradezco enormemente por brindarme siempre su colaboración, revisión y apoyo durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

A Carlos Sánchez y Cristian Medina, les agradezco por su apoyo y asesoramiento durante mi formación académica en la maestría.

A mis compañeros de Sísmica de Suelos, quiero agradecerles por hacer el recorrido más divertido y enriquecedor. Su compañerismo y apoyo mutuo han sido un pilar importante durante este proceso.

A mis compañeros de maestría, Carolina, Veda y Luis, es un verdadero honor haberlos conocido y ahora llamarlos amigos.

Y, por último, quiero agradecer a mi México lindo y querido por todas las oportunidades que me ha brindado y por ser mi hogar.

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES</b> .....	5
<b>CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	8
2.1 Mecanismo de propagación de ondas .....	8
2.2 Teoría de la elasticidad.....	10
2.2 Propagación de ondas P en el concreto .....	12
2.3 Métodos de Impacto de Baja Deformación.....	14
2.3.1 Prueba de Integridad de Impacto de Baja Deformación ( <i>Low Strain Impact Integrity Testing</i> ).....	14
2.3.2 Cross Hole Ultrasónico ( <i>Cross-Hole Sonic Logging, CSL</i> ) .....	19
<b>CAPÍTULO 3. PRUEBAS DE INTEGRIDAD</b> .....	21
3.1 Prueba de Integridad de Impacto de Baja Deformación ( <i>Low Strain Impact Integrity Testing, PIT</i> ).....	21
3.1.1 Equipo e instrumentación .....	21
3.1.2 Ejecución de la prueba .....	22
3.1.3 Tamaños y tipos de martillo.....	25
3.1.4 Procesamiento .....	28
3.1.5 Análisis en el dominio del tiempo .....	33
3.1.6 Análisis en el dominio de la frecuencia o de respuesta transitoria .....	37
3.1.7 Criterios de clasificación .....	39
3.1.8 Limitaciones de la prueba .....	40
3.2 Cross Hole Ultrasónico ( <i>Cross-Hole Sonic Logging, CSL</i> ).....	42
3.2.1 Equipo e Instrumentación .....	42
3.2.2 Preparación de los tubos de acceso para la ejecución de la prueba .....	43
3.2.3 Ejecución de la prueba.....	45
3.2.4 Procesamiento .....	46
3.2.5 Identificación de los defectos y criterios de clasificación .....	52
3.2.6 Tomografía.....	55
3.2.7 Limitaciones.....	57
<b>CAPÍTULO 4. CASOS PRÁCTICOS</b> .....	58
4.1 Casos de estudio en zona geotécnica I (Lomas).....	60
4.1.1 Pila 8-A .....	62

4.1.1	Pila P-9A.....	73
4.2	Casos de estudio en zona geotécnica II (Transición).....	83
4.2.1	Pila 9-A.....	85
4.2.2	Pila 13-D.....	91
4.2.3	Pila 13-B Sur.....	98
4.2.4	Pila P-13.....	104
4.3	Casos de estudio en la zona geotécnica III (Lago).....	116
4.3.1	Obra A.....	117
4.3.2	Obra B.....	128
<b>CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....</b>		<b>138</b>
5.1	Influencia de las características geotécnicas de la zona.....	138
5.2	Influencia de los procesos constructivos de las pilas.....	139
5.3	Discusión de los resultados.....	140
5.3.1	Zona de Lomas.....	141
5.3.2	Zona de Transición.....	143
5.3.3	Zona de Lago.....	144
5.3.4	Observaciones en los resultados obtenidos.....	145
5.4	Criterios para la mejor interpretación y calidad de las pruebas de integridad.....	146
5.4.1	Pruebas de integridad de impacto de baja deformación.....	146
5.4.2	Cross Hole Ultrasónico (CSL).....	147
5.5	Recomendaciones.....	149
5.5.1	Recomendaciones para la Prueba de Integridad de Impacto de Baja Deformación.....	149
5.5.2	Recomendaciones para el Cross Hole Ultrasónico.....	150
5.6	Guía práctica para los ensayos PIT y CSL.....	151
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>154</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>		<b>161</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>164</b>

## RELACIÓN DE FIGURAS

Figura 1. Tipo de propagación de las ondas elásticas.....	9
Figura 2. Propagación de la onda según la Ley de Snell .....	10
Figura 3. Propagación de la onda a través de una pila o polite.....	16
Figura 4. Velocidad de partícula.....	17
Figura 5. Matillo instrumentado del equipo PIT-QFV .....	19
Figura 6. Equipo e instrumentación para la ejecución de la Prueba de Integridad.....	21
Figura 7. Esquema de la ejecución de la Prueba de Integridad .....	22
Figura 8. Reflejo del pulso debido a una disminución de la sección transversal .....	23
Figura 9. Equipo empleado y ejecución del ensayo.....	24
Figura 10. Equipo empleado y ejecución del ensayo.....	25
Figura 11. Comparativa del registro obtenido de una pila con martillos de (a) 450 g y (b) 2.7 kg .....	26
Figura 12. Registros obtenidos del ensaye FV con el martillo instrumentado .....	27
Figura 13. Señal obtenida en campo con amplificación mínima y sin filtrado .....	28
Figura 14. Señal con amplificación .....	29
Figura 15. Procesado de la señal, (A) Señal original, (B) Señal con MA=30 y MD=7.4, (C) Aplicando HI, (D) Aplicando WL.....	31
Figura 16. Influencia de la fricción en el fuste de la pila con una onda descendente.....	32
Figura 17. Esbeltez vs. Atenuación en suelos de diferentes rigideces.....	34
Figura 18. Simulación esquemática del efecto de reducción de impedancia.....	35
Figura 19. Simulación esquemática del efecto de aumento de impedancia.....	35
Figura 20. Simulación esquemática del efecto de reducción local en el pilote .....	36
Figura 21. Simulación esquemática del efecto de ampliación local en el pilote .....	36
Figura 22. (A) Función periódica en el dominio del tiempo, (B) Espectro obtenido en el dominio de la frecuencia.....	38
Figura 23. Análisis en frecuencia en una pila con defecto .....	38
Figura 24. Equipo e instrumentación para la prueba de Cross Hole Ultrasónico (CSL). 43	
Figura 25. Disposición de los tubos de acceso para llevar a cabo el ensayo de integridad de pilas con el método Cross Hole Ultrasónico según la norma ASTM-6760-08.....	44
Figura 26. Imagen ilustrativa de la técnica para determinar la integridad en pilas con el método Cross Hole Ultrasónico.....	46
Figura 27. Ilustración del tiempo de tránsito entre la señal emitida y la señal recibida ..	47
Figura 28. Registro de cascada .....	48
Figura 29. (A) Registro de cascada sin valores de ajustes . (B) Registro de cascada con <i>Sigma</i> de 0.30 y <i>Threshold</i> de 15 .....	49
Figura 30. Aplicación de <i>Trim Top</i> a la señal obtenida por encima de la pila.....	50
Figura 31. Se presenta el registro de cascada con señales por encima del cero .....	50
Figura 32. (A) Curva del tiempo de llegada de la onda en % (B) Curva de disminución de energía en dB .....	51

Figura 33. (A) Señal obtenida para una pila en buen estado (B) Señal obtenida para una pila con defecto .....	52
Figura 34. Representación gráfica de los criterios propuestos de calificación de CSL..	55
Figura 35. Tomografía ejecutada para una pila con defectos .....	57
Figura 36. Ubicación de los casos de estudio dentro del mapa de zonificación geotécnica del Valle de México .....	59
Figura 37. Equipo y ejecución de la prueba de integridad en pilas .....	61
Figura 38. (A) Análisis en el dominio del tiempo (B) Análisis en el dominio de la frecuencia obtenidos para la pila 8A.....	62
Figura 39. Perfil estratigráfico, análisis en el dominio del tiempo y relación entre el volumen teórico y real de la pila 8-A .....	64
Figura 40. Modelo teórico de la pila 8A.....	65
Figura 41. Equipo y ejecución del Cross Hole Ultrasónico.....	66
Figura 42. Perfiles 1-3 y 1-4 obtenidos del CSL para la pila 8-A .....	67
Figura 43. Perfiles 2-3 y 2-4 obtenidos del CSL para la pila 8-A .....	68
Figura 44. Perfiles 4-3 y 4-4 obtenidos del CSL para la pila 8-A .....	69
Figura 45. Registros de cascadas obtenidos de los perfiles de la prueba de CSL para la pila 8-A, los recuadros de colores enmarcan las zonas donde se tienen los defectos y fallas de mayor importancia en la pila .....	72
Figura 46. Tomografía 2D y 3D de la pila 8-A .....	74
Figura 47. (A) Análisis en el dominio del tiempo (B) Análisis en el dominio de la frecuencia obtenidos para la pila P-9A .....	75
Figura 48. Perfil estratigráfico, análisis en el dominio del tiempo y relación entre el volumen teórico y real de la pila P-9A .....	76
Figura 49. Perfiles 1-3 y 1-4 obtenidos del CSL para la pila P-9A .....	77
Figura 50. Perfiles 2-3 y 2-4 obtenidos del CSL para la pila P-9A .....	78
Figura 51. Perfiles 2-3 y 2-4 obtenidos del CSL para la pila P-9A .....	79
Figura 52. Comparativa de los registros de cascada obtenidos del CSL de la pila P-9A	82
Figura 53. Tomografía 2D y 3D para la pila P-9A .....	84
Figura 54. (A) Análisis en el dominio del tiempo (B) Análisis en el dominio de la frecuencia obtenidos para la pila 9-A .....	86
Figura 55. (A) Análisis en el dominio del tiempo (B) Análisis en el dominio de la frecuencia obtenidos para la pila 9-A .....	87
Figura 56. Núcleos recuperados de la Pila 9-A .....	88
Figura 57. (A) Análisis en el dominio del tiempo (B) Análisis en el dominio de la frecuencia obtenidos para la pila 9-A después de inyectada .....	89
Figura 58. Modelo de impedancia de la pila 9-A .....	90
Figura 59. Análisis en el dominio en tiempo y en frecuencia para la pila 13-D realizado en el 2019.....	91
Figura 60. Análisis en el dominio en tiempo y en frecuencia para la pila 13-D realizado en el 2023.....	92

Figura 61. Perfil estratigráfico y registro en el análisis del dominio del tiempo de la pila 13-D .....	94
Figura 62. Esquema de la pila donde se puede observar las tres barrenaciones.....	95
Figura 63. Núcleos recuperados de la pila 13-D.....	96
Figura 64. Modelo de impedancia de la pila 13-D .....	97
Figura 65. Análisis en el dominio en tiempo y en frecuencia para la pila 13-B Sur realizado en el 2019 .....	98
Figura 66. Análisis en el dominio en tiempo y en frecuencia para la pila 13-B Sur realizado en el 2023 .....	99
Figura 67. Perfil estratigráfico y registro en el análisis del dominio del tiempo de la pila 13-B Sur.....	100
Figura 68. Esquema de la perforación y núcleos obtenidos de la pila 13-B Sur .....	101
Figura 69. Análisis en el dominio en tiempo para la pila 13B Sur después de mejorada la pila .....	102
Figura 70. Modelo de impedancia de la pila 13-B Sur.....	103
Figura 71. Análisis en el dominio en tiempo y en frecuencia para la pila P-13 .....	104
Figura 72. Registro de Fuerza-Velocidad para la pila P-13.....	105
Figura 73. Perfiles 1-3 y 1-4 obtenidos de la prueba de CSL para la pila P-13.....	106
Figura 74. Perfiles 2-3 y 2-4 obtenidos de la prueba de CSL para la pila P-13.....	107
Figura 75. Perfiles 4-3 y 1-2 obtenidos de la prueba de CSL para la pila P-13.....	108
Figura 76. Registros de cascadas obtenidos de los perfiles de la prueba de CSL para la pila P-13, los recuadros rosa y amarillo enmarcan las zonas donde se tienen los defectos y fallas de mayor importancia en la pila .....	110
Figura 77. Análisis con tomografía y modelo 3D para la pila P13.....	113
Figura 78. Velocidades de onda obtenida del Down Hole P-13.....	115
Figura 79. Trabajos de campo durante la ejecución de la prueba de integridad en la Pila P-27 .....	118
Figura 80. Análisis en el dominio en tiempo (A) y en frecuencia (B) para la pila P-27	119
Figura 81. Registro de Fuerza-Velocidad para la pila P-27.....	120
Figura 82. Perfil estratigráfico y registro en el análisis del dominio del tiempo de la pila P-27 .....	121
Figura 83. Resultados del ensaye PIT y Down Hole en la pila P-27.....	124
Figura 84. Modelo de impedancia de la pila P-27 .....	125
Figura 85. Análisis en el dominio en tiempo (A) y en frecuencia (B) para la pila P-5	126
Figura 86. Modelo de impedancia de la pila P-5 .....	127
Figura 87. Equipo y ejecución de la prueba de CSL .....	129
Figura 88. Perfiles 1-3 y 1-4 obtenidos del CSL para la pila 1-A .....	132
Figura 89. Perfiles 2-3 y 2-4 obtenidos del CSL para la pila 1-A .....	133
Figura 90. Perfiles 4-3 y 1-2 obtenidos del CSL para la pila 1-A .....	134

Figura 91. Registros de cascada obtenidos de los seis perfiles de la prueba de CSL de la pila 1-A. en recuadros de color amarillo y verde se enmarca las dos zonas transversales con mayor afectación .....	136
Figura 92. Análisis con tomografía y modelo 3D para la pila 1-A.....	137
Figura 93. Estado de las pilas ensayadas en las tres zonas geotécnicas .....	141
Figura 94. Estado de las pilas ensayadas en la zona geotécnica de Lomas .....	142
Figura 95. Estado de las pilas ensayadas en la zona geotécnica de Transición.....	143
Figura 96. Estado de las pilas ensayadas en la zona Geotécnica de Lago .....	144
Figura 97. Guía práctica para la Prueba de Integridad de Impacto de Baja Deformación (PIT).....	152
Figura 98. Guía práctica para el Cross Hole Ultrasonico (CSL) .....	153

## **RELACIÓN DE TABLAS**

Tabla 1. Calidad de un concreto con densidad de 2400 kg/m <sup>3</sup> en función de la velocidad .....	13
Tabla 2. Clasificación de la integridad estructural de la pila en factores Beta calculados .....	40
Tabla 3. Clasificación recomendada de registro de prueba de baja deformación para pilas de concreto .....	41
Tabla 4. Número de combinaciones en función del número de tubos .....	45
Tabla 5. Guía de clasificación de Pile Dynamisc .....	53
Tabla 6. Anomalías detectadas con el CSL en la pila 8-A .....	70
Tabla 7. Anomalías detectadas con el CSL en la pila P- 9A .....	80
Tabla 8. Anomalías detectadas con el CSL en la pila P-13 .....	109
Tabla 9. Anomalías encontradas en la pila 1-A (valores promedios).....	130
Tabla 10. Anomalías detectadas con el CSL en la pila 1-A .....	131

## INTRODUCCIÓN

Existen diferentes métodos de pruebas de integridad que se pueden utilizar para la evaluación de la calidad y continuidad de las pilas. En ocasiones, los resultados de diferentes métodos dan lugar a conclusiones contradictorias, lo que dificulta ser contundente en el resultado final de la calidad e integridad del elemento de cimentación.

En los últimos años las grandes construcciones, sobre todo en suelos como el de la Ciudad de México, requieren de soluciones de cimentaciones con pilas. Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones para la Ciudad de México (NTC-DCC, 2017) establecen el número de pilas o pilotes a ensayar dependiendo del tipo de edificación y de la zona geotécnica donde se ubica. Ello es un reflejo de la importancia del control de calidad durante la construcción de las pilas y en el momento de la ejecución de las pruebas de integridad y la obtención de los resultados.

En esta investigación se plantea comparar los resultados obtenidos mediante la aplicación de dos métodos para estudiar la calidad y continuidad de las pilas. El primer método que se analizará es Prueba de Integridad de Impacto de Baja Deformación (*Low Strain Impact Integrity Testing*, PIT) ejecutado bajo la norma ASTM-D5882 y, el segundo, será el Cross Hole Ultrasónico (*Cross-hole Sonic Logging*, CSL) ejecutado bajo la norma ASTM-D6760.

Aunque las pruebas de Integridad de Impacto de Baja Deformación (PIT) y Cross Hole Ultrasónico (CSL) son técnicas relativamente sencillas de ejecutar, es importante destacar que su adecuada interpretación requiere un profundo conocimiento de las características geotécnicas de la zona. Además, es fundamental contar con reportes detallados de los procesos constructivos de las pilas, incluyendo información sobre el colado, tiempos de fraguado y cualquier incidencia relevante durante la construcción. Por último, la evaluación de especialistas en el campo, como ingenieros estructurales y geotécnicos, resulta imprescindible para una interpretación precisa de los resultados. Estos expertos deben considerar la interacción entre el suelo y la estructura, así como los posibles efectos de la construcción y las condiciones geológicas locales, para determinar

con certeza el estado de integridad de las pilas y tomar decisiones adecuadas en cuanto a su viabilidad y posible rehabilitación.

Por lo expuesto, se busca establecer criterios de ejecución e interpretación aplicando ambos métodos (PIT y CSL) en pilas ubicadas en distintos sitios de la Ciudad de México, que ayuden a definir con mayor precisión la calidad e integridad de las pilas o pilotes.

Por lograr lo anterior, se han propuesto los siguientes objetivos específicos:

- Ejecutar pruebas de integridad utilizando PIT y CSL en pilas ubicadas en distintas obras de la Ciudad de México
- Establecer comparativas de los resultados obtenidos con PIT y CSL en las distintas zonas geotécnicas de la Ciudad de México
- Determinar la influencia de las distintas propiedades geotécnicas características de las zonas de estudio y de los procesos constructivos, en los resultados obtenidos de las pruebas PIT y CSL
- Establecer criterios que permitan dar resultados confiables de la calidad e integridad de las pilas.

Para el cumplir con los objetivos de esta investigación se desarrollaron cinco capítulos. En el Capítulo 1 “Antecedentes” se presentan una descripción detallada de la historia y origen de los métodos de integridad debido a la necesidad y el aumento de construcciones con cimentaciones profundas en el mundo.

En Capítulo 2 “Fundamentos Teóricos” se presentan las bases para entender de manera general la teoría de propagación de las ondas de tensión, así como las bases teóricas y matemáticas generales detrás de los métodos de baja deformación (PIT y CSL) que son de los procedimientos más comunes actualmente para el control de calidad y continuidad de las cimentaciones profundas en México.

En el Capítulo 3 “Pruebas de Integridad” se describe de manera detallada la instrumentación, los procedimientos aplicados en campo para la ejecución de las pruebas (PIT, CSL), así como la metodología empleada para el procesamiento de los registros obtenidos.

En el Capítulo 4 “Casos prácticos” se presentan nueve casos de pilas distribuidas en tres zonas geotécnicas distintas. En cada caso, se llevaron a cabo diversas pruebas para evaluar la integridad y calidad de las pilas. Estas pruebas incluyeron la prueba de Integridad de Impacto de Baja Deformación (PIT), Cross Hole Ultrasónico (CSL), Perforación con extracción de núcleo de algunos de los elementos y la prueba de Down Hole (DH). Para determinar la aceptación o rechazo de los elementos de cimentación, se utilizaron criterios rigurosos basados en los resultados obtenidos de estas pruebas. Estos criterios incluyeron la comparación de las señales registradas, el análisis de amplitudes y energías, así como la evaluación de cambios significativos en la velocidad de propagación de las ondas.

Además, se tomaron en cuenta aspectos geotécnicos, como la presencia de estratos problemáticos o anomalías del subsuelo, los reportes de los procesos constructivos de las pilas y la opinión de expertos en ingeniería estructural y geotecnia. Todos estos elementos fueron considerados de manera integral para tomar decisiones fundamentadas en cuanto a la aceptación o rechazo de las pilas, garantizando así la seguridad y calidad de las estructuras construidas.

En el Capítulo 5 “Análisis de los resultados”, se realiza un exhaustivo análisis de las pruebas de integridad ejecutadas en un total de 345 pilas. El objetivo principal es investigar la influencia de factores como la zona geotécnica y los procesos constructivos de las pilas en los resultados obtenidos de las pruebas de integridad.

Se examinan detalladamente los datos recopilados mediante las pruebas de Integridad PIT y CSL, con el fin de identificar las principales diferencias y similitudes entre ambos métodos cuando se aplican en una misma pila.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas de esta investigación que pretende aportar criterios que permitan llegar a resultados e interpretaciones de mayor calidad en la valoración de la integridad en pilas.

## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

El desarrollo de las civilizaciones desde los tiempos prehispánicos se ha dado cerca de cuerpo de aguas que permitía el progreso de sus comunidades, lo que en la mayoría de los casos llevó a sostener sus viviendas con pilotes de madera. Este tipo de sistema de cimentación se utilizó durante mucho tiempo en ciudades como Venecia y Ámsterdam (Amir, 2016).

Durante el siglo XX, las pilas predominaron debido a la construcción de plataformas de perforación más grandes y profundas, por lo que se desarrollaron equipos para cimentar pilas de cualquier diámetro y longitud en todos los tipos de suelos y roca. Debido a la proliferación de los equipos de pilotaje y sus precios competitivos, este tipo de cimentación empezó a ser más considerada en la construcción de varias edificaciones. Por este motivo nacieron las pruebas de integridad, para poder estudiar la calidad y continuidad del concreto para garantizar el adecuado comportamiento de las estructuras (Amir J. , 2012)

En los años sesenta y setenta se desarrollaron varios métodos de prueba indirectos, en su mayoría utilizando electrónica analógica con registradores u osciloscopios para trazar los datos. Una vez que los microprocesadores rápidos estuvieron disponibles a finales de los años setenta, las computadoras especialmente diseñadas y el procesamiento de señales digitales se incorporaron rápidamente a los aparatos de prueba. El siguiente paso lógico se produjo durante la década de los noventa, cuando las computadoras robustas se convirtieron en un producto asequible y se transformaron en instrumentos virtuales simplemente conectándolas con los transductores adecuados.

Después de que Smith (1960) introdujera la ecuación de onda unidimensional en el análisis del hincado de pilotes, esta teoría fue adoptada para la mayoría de los métodos de integridad.

Beylich en 1963 fue el primero en implementar en la práctica el llamado *Sonic*, o *Low Strain Impact*, donde en la cabeza del pila o pilote se golpea con un pequeño martillo de plástico que envía una onda acústica de compresión hacia abajo del pilote.

Por su parte en Francia, Paquet en 1968 desarrollo la prueba de respuesta de frecuencia, específicamente para manejar discontinuidades relativamente poco profundas. Paquet colocó un agitador electrodinámico encima de la pila, aumentando gradualmente la frecuencia de excitación mientras mantenía constante la fuerza. Para cada frecuencia, se registraron la velocidad medida de la cabeza del pilote  $V$  y la fuerza aplicada  $F$ .

En 1970 debido a las complicaciones de la prueba propuesta por Paquet, se implementaron transductores de fuerza compactos y la transformada rápida de Fourier. El método de respuesta de frecuencia de impacto (Higgs y Robertson, 1979) reemplazó el vibrador con un martillo de mano instrumentado que incorpora un transductor de fuerza.

Paquet (1992) se dio cuenta de que trazar la geometría de la pila o pilote es viable sólo si los datos de excitación de la cabeza se combinan con los datos del suelo circundante, es decir, las velocidades de las ondas de corte en las distintas capas del suelo o el cambio de impedancia de los materiales.

El proyecto más reciente de investigación llamado *PileInspect* fue lanzado en 2013 por la Unión Europea para mejorar y estandarizar los procedimientos de prueba y evaluación de la integridad de los pilotes o pilas. El hardware de *PileInspect* comprende un vibrador controlable, capaz de excitar el pilote en dirección axial, un acelerómetro montado en el vibrador, acelerómetros adicionales montados en la cabeza del pilote y una unidad de control y procesamiento. Toda la configuración es casi idéntica a la producida por Paquet (1968), aunque con una electrónica mejorada. El objetivo esta vez es emplear técnicas sofisticadas de procesamiento de señales para alimentar un sistema autónomo que decidirá si la pila está "dañada" o "no dañada" y estimará la gravedad del daño. En 2016 se finaliza el proyecto donde utilizando el diagnóstico de pilotes basado en el método Impulso Función de Respuesta (IRF), en que el prototipo de *PileInspect* se probó en seis

pilotes de prueba, incluido un pilote sin daños y cinco pilotes dañados. Se lograron resultados de diagnóstico de pilotes satisfactorios a partir del sistema y el método: la punta del pilote y los defectos son claramente detectables y la profundidad de los defectos del pilote se puede identificar con alta resolución y precisión.

Como se expuso, cada vez se hace más necesario el estudio de calidad y continuidad de las pilas o pilotes mediante pruebas que permitan minimizar la incertidumbre del estado de estos elementos a profundidad, por ello en la actualidad los países apuestan más al desarrollo de nuevas pruebas y la estandarización de su normativa que permitan obtener resultados más confiables y certeros.

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La primera investigación del análisis dinámico del hincado de pilotes se originó con la adopción de la teoría de impactos de cuerpos rígidos de Newton. Debido a su simplicidad de aplicación, este enfoque se hizo popular entre los profesionales y la denominada "fórmula dinámica" resultante produjo convenientemente resultados aproximados (HUSSEIN, 2005).

Recientemente, se ha conocido que la dinámica del hincado de pilotes se representa con mayor precisión mediante las teorías de propagación de ondas de compresión y se analiza con base en los principios de la mecánica de ondas unidimensional en barras elásticas.

En este capítulo se presenta los fundamentos teóricos que ayuden a entender los métodos de integridad aplicados al estudio de elementos de cimentación profundos.

### 2.1 Mecanismo de propagación de ondas

Las ondas sísmicas son ondas que causan deformaciones no permanentes en el medio de propagación con una velocidad que depende de las propiedades elásticas y densidad del material.

La ecuación de onda describe la propagación de la energía y la solución de esta ecuación permitió establecer la existencia de diferentes tipos de ondas: ondas internas y superficiales (Figura 1). La relación entre las propiedades físicas de un material y su velocidad de propagación de las ondas se explica mediante la Teoría de Propagación de Ondas para un medio elástico infinito e isótropo.

Las ondas superficiales se generan por la presencia de discontinuidades en el medio y viajan paralelamente a la superficie de la discontinuidad, se clasifican en Ondas Rayleigh y Love. Las ondas superficiales son dispersivas, es decir, a diferente frecuencia

presentan diferente velocidad de propagación. La velocidad de las ondas Rayleigh  $V_r$  y Love  $V_l$  es menor que la velocidad de las ondas de corte.

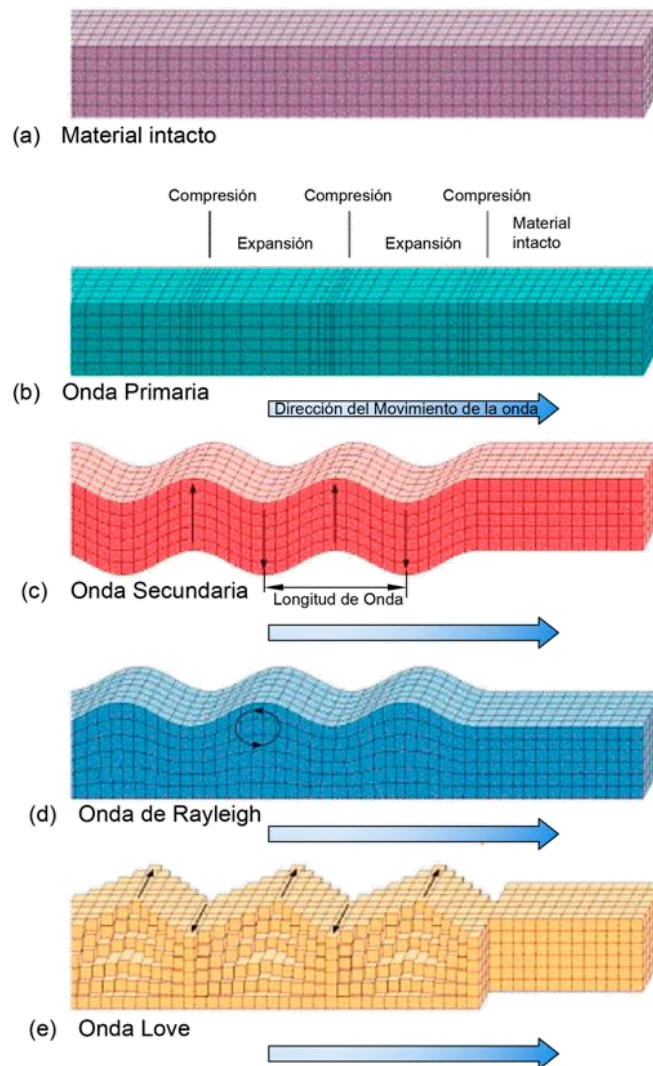


Figura 1. Tipo de propagación de las ondas elásticas (Groundspeak, 2022)

Las leyes que rigen el mecanismo de propagación de onda son (Figuroa, 1974) :

- Principio de Huygens: Cada punto alcanzado por un frente de onda actúa como una nueva fuente de onda que se extiende en todas las direcciones generando ondas secundarias.
- Principio de Fermat: Un rayo dado real sigue de un punto a otro aquel camino que produce el tiempo mínimo en su recorrido.

- Leyes de Reflexión y Refracción: Cuando una onda sísmica encuentra un cambio en las propiedades elásticas del material, como es el caso de una interface entre dos capas geológicas; parte de la energía continúa en el mismo medio (onda incidente), parte se refleja (ondas reflejadas) y el resto se transmite al otro medio (ondas refractadas), con cambios en la dirección de propagación, en la velocidad y en el modo de vibración (Figura 2)
- Ley de Snell: Relaciona los ángulos de incidencia  $\theta_1$ , reflexión  $\theta_{1'}$  y refracción  $\theta_2$  de la onda transmitida y reflejada, con las velocidades de propagación de la onda  $V_s$  y  $V_p$  de los medios en los que está en contacto (Figura 2)
- Esta ley nos dice que si un rayo pasa de un medio de menor velocidad a otro de mayor velocidad se aleja de la normal, mientras que si pasa de un medio de mayor a otro de menor velocidad se acercará a ella.

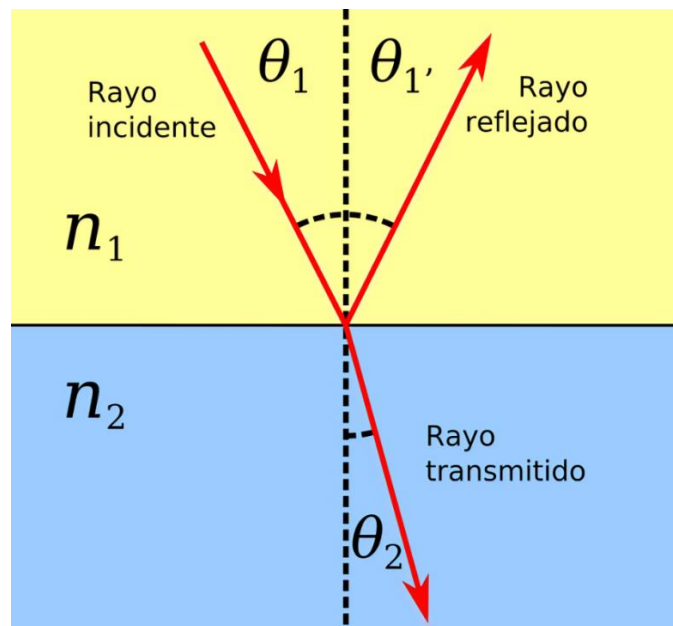


Figura 2. Propagación de la onda según la Ley de Snell (Lopez, 2022)

## 2.2 Teoría de la elasticidad

Las ondas elásticas se originan cuando, en un medio estable, una fuerza externa rompe dicha estabilidad y genera el movimiento de alguna de las partículas que componen dicho

medio. Esta perturbación se transmite a otras partículas por todo el medio con una velocidad que depende de las propiedades elástico-dinámicas del medio.

Cuando una fuerza externa actúa sobre el cuerpo, se produce un esfuerzo. El esfuerzo se define como la razón de fuerza (F) aplicada sobre unidad de área (A), es identificado por la letra  $\sigma$  y se expresa por la ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Ecuación 1}$$

Por convención, se considera que cuando la fuerza se aplica perpendicularmente a alguna cara del cuerpo y en dirección a este se denomina de compresión y tiene signo positivo, mientras que si es en dirección contraria al cuerpo se denomina tensión y se le asigna negativo, de tal manera que:

$$\text{compresion} = \frac{F}{A} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\text{tensión} = \frac{-F}{A} \quad \text{Ecuación 3}$$

Cuando se aplica un esfuerzo sobre un cuerpo, este produce una deformación en el mismo. La deformación se define como el cambio relativo en las dimensiones del cuerpo, es identificado por la letra  $\varepsilon$  y se expresa por la ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\delta u}{\delta l} \quad \text{Ecuación 4}$$

donde:

$\varepsilon$  deformación

$\delta u$  diferencias de dimensiones

$\delta l$  dimensiones originales

La relación entre el esfuerzo y la deformación esta expresado por la *ley de Hooke*, que establece que la “la deformación unitaria,  $\varepsilon$ , que sufre un cuerpo elástico es

directamente proporcional a la fuerza aplicada” (Telford, W. et al, 1990) y se expresa por la Ecuación 5:

$$\sigma = k\varepsilon \quad \text{Ecuación 5}$$

donde  $k$  es la constante de la elasticidad del cuerpo

La constante de elasticidad es una propiedad inherente del material y proporciona una noción acerca de la rigidez del material; mientras mayor sea su valor, mayor será el esfuerzo necesario para generar una deformación.

Debido a que la Ecuación 5 es aplicable sólo a cuerpos unidimensionales, es necesario separar en componentes normales y tangenciales cuando se desea trabajar con cuerpos de más dimensiones, de tal forma que se obtienen dos módulos. El módulo de Young  $E$  (Ecuación 6), que se define para esfuerzos y deformaciones normales, y el módulo de rigidez  $G$  (Ecuación 7), que está definido para esfuerzos cortantes y deformaciones angulares.

$$E = \frac{\sigma_{ii}}{\varepsilon_{ii}}; x, y, z \quad i = x, y, z \quad \text{Ecuación 6}$$

$$G = \frac{\tau_{ij}}{\gamma_i}; i, j = x, y, z \quad i \neq j \quad \text{Ecuación 7}$$

## 2.2 Propagación de ondas P en el concreto

Los métodos sísmicos y ultrasónicos son las formas más antiguas de ensayos no destructivos, a través de los que es posible detectar irregularidades (oquedades y fracturas) e inconsistencias en el concreto. De acuerdo con (Whitehurst, 1967) a través de numerosos datos experimentales y de la correlación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de propagación de la onda P ( $V_p$ ) en el concreto, se estableció una clasificación para el uso de la  $V_p$  como un indicador de calidad (Tabla 1)

Tabla 1. Calidad de un concreto con densidad de 2400 kg/m<sup>3</sup> en función de la velocidad de onda P (Whiterhurst,1967)

Velocidad de onda P ( $V_p$ ) (m/s)	Calidad del concreto
Mayor a 4,575	Excelente
3,660 – 4,575	Bueno
3,050 – 3,660	Regular
2,135 – 3,050	Pobre
Menor a 2,135	Muy Pobre

Las ondas de compresión viajan más rápido en un medio infinito que en una estructura cilíndrica larga. Esto ocurre porque los desplazamientos laterales son posibles debido al efecto de contorno cilíndrico, mientras que en un medio infinito no existen límites que generen desplazamientos laterales.

Para una relación de Poisson típica del concreto (0.2 a 0.3), la velocidad de compresión  $V_p$  en una estructura larga y delgada es de aproximadamente 5 a 15% menor que la velocidad de la onda de compresión en un medio infinito. De forma general, la  $V_p$  para un concreto de buena calidad es 4,000 m/s, aunque los valores típicos oscilan entre 3,600 y 4,400 m/s, dependiendo de la edad, condición y composición del concreto. Para concretos de mala calidad (con irregularidades) la velocidad se reduce a 2,000 –3,000 m/s, de manera que las heterogeneidades se hacen evidentes (Finno, Gassman, & Osborn, 1997).

La propagación de ondas en el concreto asume que la reflexión y la refracción del frente de onda ocurren en una interfaz plana entre dos medios diferentes. Este análisis es aplicable para inconsistencias dentro del concreto. La sensibilidad de los métodos sísmicos para detectar dichas inconsistencias e irregularidades (grietas y oquedades) depende de la frecuencia de la onda propagada (longitud de onda).

Como regla general, para que una inconsistencia o irregularidad sea detectada, su tamaño debe ser igual o mayor a la longitud de la onda propagada. La velocidad de la onda ( $V$ ), la frecuencia ( $f$ ) y longitud de onda ( $\lambda$ ), se encuentran relacionadas mediante la Ecuación 8:

$$V = f\lambda$$

Ecuación 8

### 2.3 Métodos de Impacto de Baja Deformación

La prueba de integridad de baja deformación tuvo el inicio de su desarrollo e investigación a partir del año 1929 con el ruso Solokov, donde sugirió el uso cuantitativo de las ondas ultrasónicas para determinar la ubicación de elementos metálicos. Posteriormente, después de la Segunda Guerra Mundial, Firestone de la Universidad de Michigan en Estados Unidos e, independientemente, Sproule en Inglaterra, sugirieron el uso de detectores de ecos por pulsos ultrasónicos de baja deformación para detectar fallas en materiales homogéneos.

Las pruebas de integridad en pilas de baja deformación es un procedimiento común de prueba no destructiva para el control de calidad y garantía de calidad en las construcciones de cimentaciones profundas. En este apartado se mencionan brevemente los fundamentos teóricos de las dos pruebas de integridad de baja deformación más utilizadas en México para estudiar la continuidad y calidad de los elementos de cimentación.

#### 2.3.1 Prueba de Integridad de Impacto de Baja Deformación (*Low Strain Impact Integrity Testing*)

La prueba de integridad (PIT) en elementos de cimentación es un método de prueba de integridad no destructiva para pilas o pilotes de cimentación. Se les denomina de "bajo impacto" debido a que se requiere el impacto de sólo un pequeño martillo de mano. La evaluación de los registros PIT se lleva a cabo de acuerdo con el procedimiento Pulso-eco (o eco sónico, un análisis en el dominio del tiempo) o el procedimiento de respuesta transitoria (análisis en el dominio de la frecuencia).

Esta prueba está estandarizada por la normativa ASTM-D5882 para Prueba de Integridad mediante Impactos de Baja Deformación en Cimentaciones Profundas (*Pile Dynamics*, 2011).

La prueba se sustenta en el principio teórico de la propagación de ondas longitudinales de baja deformación que generan efectos de dilatación y compresión en el medio que se propaga. La velocidad de propagación de la onda es directamente proporcional al módulo de elasticidad e inversamente proporcional a la densidad del material como se presenta en la Ecuación 9. Esto se debe a que el módulo de elasticidad es proporcional a la fuerza restauradora y la densidad a la fuerza del sistema (Valinho, 2006).

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{Ecuación 9}$$

donde:

$c$  es la velocidad de propagación de la onda en el concreto

$E$  es el módulo de elasticidad

$\rho$  es la densidad del material de la pila

Conforme se propaga, la onda sufre reflexiones en su trayecto, que pueden ser provocadas por variaciones en las características del material, por la presencia de fricción o resistencia de punta, o aun, por el cambio de material en la punta de la pila.

La “impedancia” de un pilote se define como la relación del módulo dinámico de elasticidad  $E$  del material de la pila multiplicado por el área de la sección transversal  $A$  dividido por la velocidad de propagación de las ondas en el concreto  $c$ , como se muestra en la Ecuación 10:

$$Z = \frac{EA}{c} \quad \text{Ecuación 10}$$

donde:

$Z$  es la impedancia

$A$  es el área de sección de la pila

$c$  es la velocidad de propagación de la onda en el concreto

La Figura 3 muestra la propagación de la onda durante el tiempo ' $dt$ ' a medida que la onda recorre la distancia ' $dL$ ' dada por la Ecuación 11.



Figura 3. Propagación de la onda a través de una pila o pilote  
(Modificado de Beim J, 2020)

$$dL = c dt$$

Ecuación 11

Para el concreto, la velocidad de onda  $c$  varía conforme sus características, pero los valores usuales de velocidad para bajo impacto están entre 3600 m/s y 4500 m/s, pudiendo considerarse que 4000 m/s es un valor promedio para un concreto de buena calidad.

Durante la ejecución del ensaye se generan dos tipos de velocidades. La velocidad de propagación de onda en el concreto  $c$  que tiene un valor fijo y la velocidad de partícula  $v$  que varía con el tiempo. Como se puede observar en la Figura 4 la partícula viaja una distancia  $\delta$  durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$ .

La velocidad y el desplazamiento de la partícula se expresa mediante las ecuaciones 12 y 13, respectivamente:

$$v = \delta / \Delta t$$

Ecuación 12

$$\delta = \varepsilon \Delta L$$

Ecuación 13

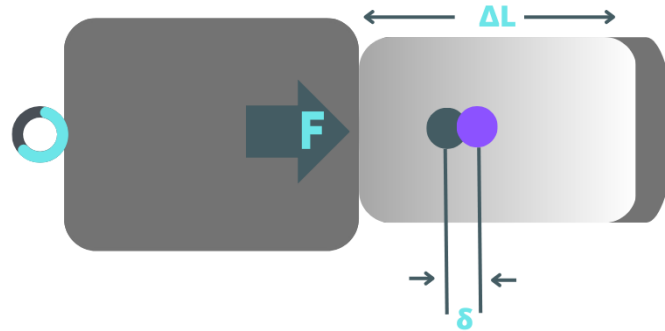


Figura 4. Velocidad de partícula (Modificado de Beim J, 2020)

Entonces se tiene que la velocidad de partícula se puede expresar de la siguiente manera:

$$v = \varepsilon \Delta L / \Delta t$$

Ecuación 14

Y de la velocidad de onda se obtiene la Ecuación 15, expresada de la siguiente forma:

$$\Delta L = c \Delta t \rightarrow v = \varepsilon c$$

Ecuación 15

donde:

$v$  es velocidad de la partícula

$\delta$  es desplazamiento de la partícula

$\varepsilon$  es deformación unitaria

$c$  es velocidad de onda

Entonces la deformación unitaria es la velocidad de partícula entre la velocidad de onda del concreto y queda expresada mediante la Ecuación 16 y para una onda descendente la velocidad de partícula y la fuerza son proporcionales y dependen directamente de la impedancia como se observa en la Ecuación 17.

$$\varepsilon = v_d/c \quad \text{Ecuación 16}$$

$$F_d = v_d \left( \frac{EA}{c} \right) \quad \text{Ecuación 17}$$

donde:

$v_d$  es la velocidad de partícula para la onda descendente

$F_d$  es la fuerza aplicada para la onda descendente

Cualquier variación de impedancia a lo largo de la pila provoca reflexiones de la onda. Estas reflexiones, al alcanzar el punto donde está instalado el sensor, provoca una variación brusca de la velocidad de desplazamiento de la partícula en dicho punto.

#### 2.3.1.1 Métodos de análisis

Los métodos de análisis más utilizados para la interpretación de las Prueba de Integridad mediante impactos de bajo deformación son los siguientes:

- Método de eco de pulso (*Pulse Echo Method*, PEM): Se administra un ligero impacto a la superficie de la pila, generalmente usando un martillo manual especial y, como resultado, una onda acústica del impacto se propaga hacia abajo a través de la pila. Las variaciones en la forma y la calidad del material de la pila producen reflejos de la onda, que se observan a medida que regresan a la superficie. Las vibraciones de la superficie se registran hasta que se hayan observado todas las reflexiones primarias. Luego, las reflexiones se interpretan teniendo en cuenta su naturaleza y los tiempos de observación para evaluar la integridad del pilote. Las vibraciones producidas se miden por medio del acelerómetro portátil que esta fijo en la superficie de la pila.
- Método de respuesta transitoria (*Transient Response Method*, TMR): El evento de impacto domina la señal de velocidad y puede enmascarar los primeros reflejos, lo cual es una de las razones por las que TRM a veces se considera ventajoso. TRM requiere la medición de la fuerza superior del pilote que, para un impacto de martillo

ligero, sólo está presente durante el tiempo del pulso de impacto de velocidad. El comportamiento relativo de la fuerza frente a la velocidad permite una evaluación de la parte superior del pilote. Para permitir mediciones de fuerza, PIT-QFV (equipo de medición) proporcionan un segundo canal de entrada de digitalización. Entonces también se requiere un martillo instrumentado (Figura 5). Los martillos instrumentados miden la desaceleración durante el impacto del martillo ligero. La desaceleración del martillo, multiplicada por la masa del martillo, da un registro de la fuerza aplicada  $F$ .



Figura 5. Martillo instrumentado del equipo PIT-QFV

### 2.3.2 Cross Hole Ultrasónico (*Cross-Hole Sonic Logging, CSL*)

La técnica de Cross Hole Ultrasónico (CSL) en la actualidad es una herramienta complementaria del ensayo tradicional de integridad (PIT).

Los procedimientos de CSL están estandarizados por la norma ASTM- 6760, método de la prueba de integridad de cimentaciones profundas de concreto mediante prueba ultrasónica de orificios cruzados.

EL método CSL se basa en registrar el tiempo que tarda un pulso de ultrasonido de compresión en propagarse entre dos conductos colocados cerca del fuste de la pila, desde el emisor al receptor, los cuales se desplazan simultáneamente a lo largo de todo el

elemento. Una versión más sofisticada de este método permite obtener imágenes tomográficas de distintas secciones del fuste de la pila (Hollema, 2003).

En el método de interpretación de los arribos de pulsos de ultrasonido, el tiempo,  $t$  medido es función de la distancia entre el emisor y el receptor y de las características del medio atravesado y se calcula con la Ecuación 18.

$$t = \frac{d}{V_c} \quad \text{Ecuación 18}$$

donde:

$d$  distancia entre emisor y receptor

$V_c$  velocidad de propagación del medio atravesado

La velocidad de propagación de la onda de compresión en un medio semi-infinito puede escribirse con la Ecuación 19 (Richard, 1970):

$$V_c^2 = \frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)} \quad \text{Ecuación 19}$$

donde:

$E$  módulo de elasticidad

$\mu$  módulo de Poisson

$\rho$  densidad

Una variación de los tiempos de arribo de los pulsos registrados durante el ensayo, se traduce en variaciones de la velocidad de propagación del material que es función de su densidad y módulo de elasticidad. Por lo tanto, en caso de existir defectos en el camino de las ondas tales como inclusiones en el suelo, oquedades u otros, que produzcan una variación en la velocidad de propagación, se traducirá entonces en un aumento del tiempo de recorrido de la onda. Acumulando distintas señales recibidas, en la medida que aumenta la profundidad, se obtiene una imagen del ensayo en donde se manifiesta la variación del tiempo a distintas profundidades.

## CAPÍTULO 3. PRUEBAS DE INTEGRIDAD

En este apartado se describirá de manera detallada la instrumentación empleada, la metodología aplicada en campo, procesamiento de los datos obtenidos mediante las pruebas PIT y CSL, criterios de clasificación, así como las limitaciones de las pruebas y recomendaciones generales para una mejor ejecución.

### 3.1 Prueba de Integridad de Impacto de Baja Deformación (*Low Strain Impact Integrity Testing*, PIT)

#### 3.1.1 Equipo e instrumentación

El sistema de prueba de integridad en pilas (PIT) consiste en un acelerómetro, un martillo de mano y un sistema de adquisición de datos de campo capaz tanto de convertir la señal analógica a su forma digital como de procesar los datos digitales. El sistema también es capaz de medir la fuerza ejercida por un martillo instrumentado que permite relacionar la fuerza con la velocidad para estudiar el elemento de cimentación en la parte superior. En la Figura 6 se presenta el equipo de PIT-Q diseñado por la empresa *Pile Dynamics, Inc.*



Figura 6. Equipo e instrumentación para la ejecución de la Prueba de Integridad (PIT)

### 3.1.2 Ejecución de la prueba

Para la realización de la prueba PIT se aplican impactos en la cabeza de la pila con martillos de diferentes masas, generando una onda que se propaga a través del fuste hasta la punta y retorna nuevamente hasta la cabeza de esta. La vibración causada por la onda es captada a través de un acelerómetro previamente colocado en la parte superior de la pila y conducida a un acondicionador, posteriormente es transformada en pulsos eléctricos a una señal digital por medio de una consola (Figura 7)

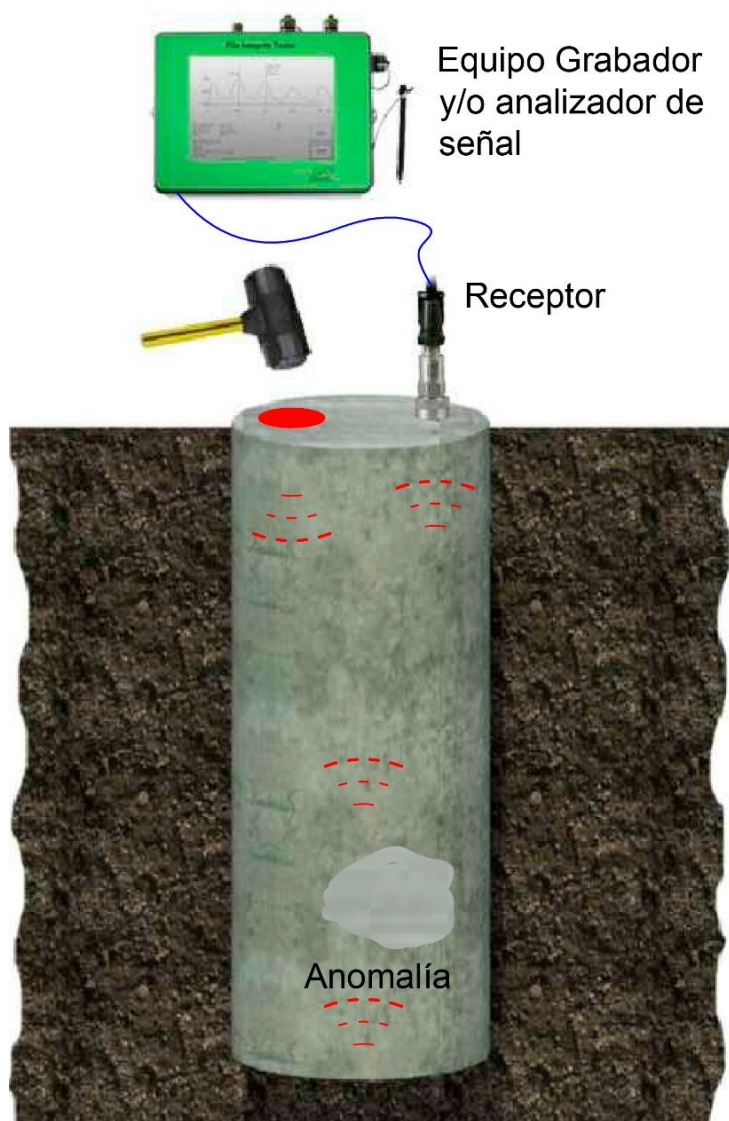


Figura 7. Esquema de la ejecución de la Prueba de Integridad (PIT)

El equipo empleado deberá permitir la conexión de un dispositivo de detección de movimiento capaz de medir la aceleración, la velocidad o desplazamiento debido al impacto superior de la pila con un martillo de mano.

Las variaciones en las características, como cambio de la sección transversal de la pila, discontinuidad, porosidad o mezcla de suelo con el concreto, produce cambios en la impedancia, generando una reflexión temprana de la onda, la que es analizada para predecir la ubicación y tipo de patología de la pila (Figura 8)

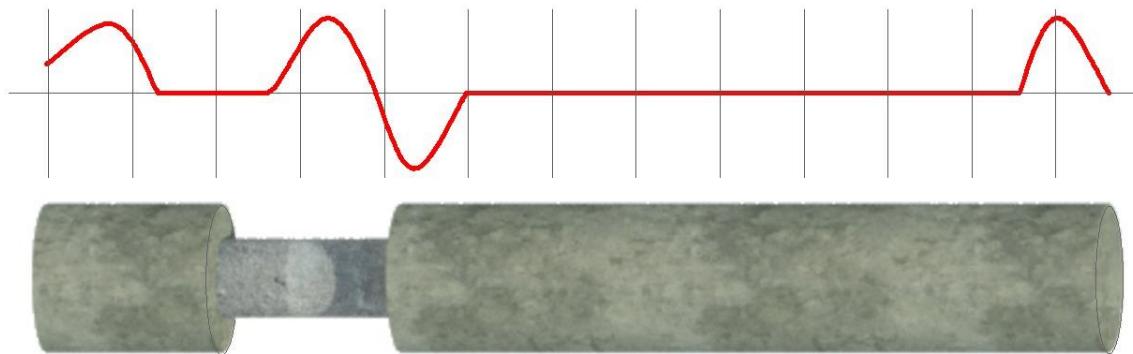


Figura 8. Reflejo del pulso debido a una disminución de la sección transversal en el fuste (modificado de Gaviria A, 2008)

Para la ejecución de la prueba PIT se debe tener descubierta la cabeza del elemento de cimentación por lo menos 1.0 m, o hasta tener concreto sano. Adicionalmente se recomienda cortar el armado en la mínima longitud posible.

La preparación de la pila consiste simplemente en pulir por lo menos en tres puntos la superficie de la cabeza como se observa en la Figura 9. El preparado de la cabeza del elemento es clave para la obtención de buenas señales, que son fundamentales para la interpretación.

La prueba inicia con la colocación del sensor al centro del elemento y se fija con un gel comercial para asegurar un contacto directo con la cabeza de la pila. El

acelerómetro se conecta a la consola en el canal de velocidad para su análisis en el dominio del tiempo, por lo que el método que define esta prueba es el PEM.

Una vez instalado el equipo se procede a dar un ligero golpe en la cabeza de la pila con martillos de diferentes pesos (Figura 9).



Figura 9. Equipo empleado y ejecución del ensayo (SDS, 2020)

El registro de aceleración creado por el impacto se integra y el registro de velocidad resultante se muestra en la pantalla de la consola del equipo.

Debido a que el impacto domina la señal de velocidad y no es posible ver con claridad los primeros metros de la pila, se requiere medir la fuerza en la parte superior del elemento (TRM). Para ello en el segundo canal (Fuerza) se conecta el martillo instrumentado, dando ligeros golpes sobre la cabeza del pilote, el acelerómetro se mantiene conectado al canal de velocidad como se presenta en la Figura 10.

La aplicación del método TRM, permite ver un posible daño que presente la pila en los primero 4.0 m, a partir de la cabeza.



Figura 10. Equipo empleado y ejecución del ensayo TMR (SDS,2020)

Para la obtención de los registros para ambos métodos (PEM, TMR) se dan hasta cinco golpes, que luego son compilados para obtener un promedio de las señales. El procedimiento descrito anteriormente se recomienda repetir en varios puntos y moviendo el acelerómetro por la cabeza de la pila.

### 3.1.3 Tamaños y tipos de martillo

La utilización de los distintos martillos dependerá de la señal que se desea obtener y del tipo de elemento a ensayar. El equipo PDI dispone de dos martillos de 450 g y 2.7 kg como se presentó en la Figura 6.

Cuando se golpea la cabeza de la pila el ancho del pulso ( $\lambda/2$ ) que se genera estará en función del peso del martillo, entre más pesado sea el martillo más ancho será el pulso inicial. En la Figura 11 se presenta dos señales comparando el ancho del pulso con ambos martillos.

Es importante tener en cuenta que el ancho de pulso inicial afecta la evaluación de la pila. Con pulsos anchos, el reflejo del defecto se superpone al pulso original, haciéndolo más ancho. Por lo tanto, es difícil que un martillo más pesado detecte defectos cerca de la cabeza, por lo que se recomienda un martillo más liviano.

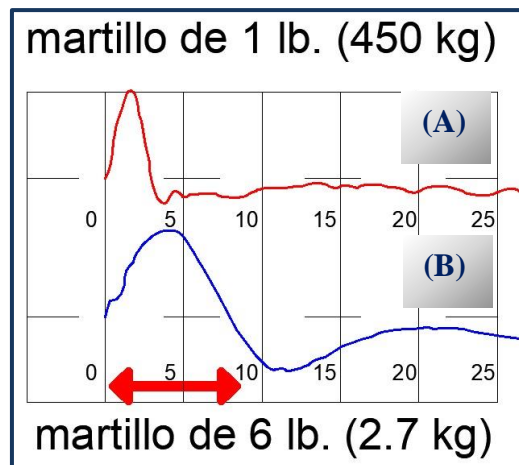


Figura 11. Comparativa del registro obtenido de una pila con martillos de (a) 450 g y (b) 2.7 kg

Se destaca que la mayoría de las veces un martillo más pesado facilita la inspección de pilas o pilotes más largos.

Como se mencionó es difícil ver el estado de la pila en la parte superior por lo que PDI desarrolló un martillo instrumentado (PIT-FV) que relaciona la velocidad y la fuerza mediante la Ecuación 20:

$$V = \frac{F}{Z} \quad \text{Ecuación 20}$$

donde:

$V$  es la velocidad del concreto

$F$  es la fuerza

$Z$  es la impedancia

Cuando se tiene una reducción de impedancia la velocidad sube y la fuerza baja, lo que indica un defecto cerca de la cabeza de la pila. Si ambas curvas tienen el mismo comportamiento, indica que la cabeza de la pila no presenta defectos.

Ambos casos se muestran en la Figura 12, donde la línea negra continua indica la velocidad y la línea azul discontinua representa la fuerza, indicando en la Figura 12A que el elemento ensayado presenta un defecto en la cabeza. La Figura 12B donde las curvas Fuerza-Velocidad coinciden, indican que el elemento no presenta ningún defecto en los primeros metros.

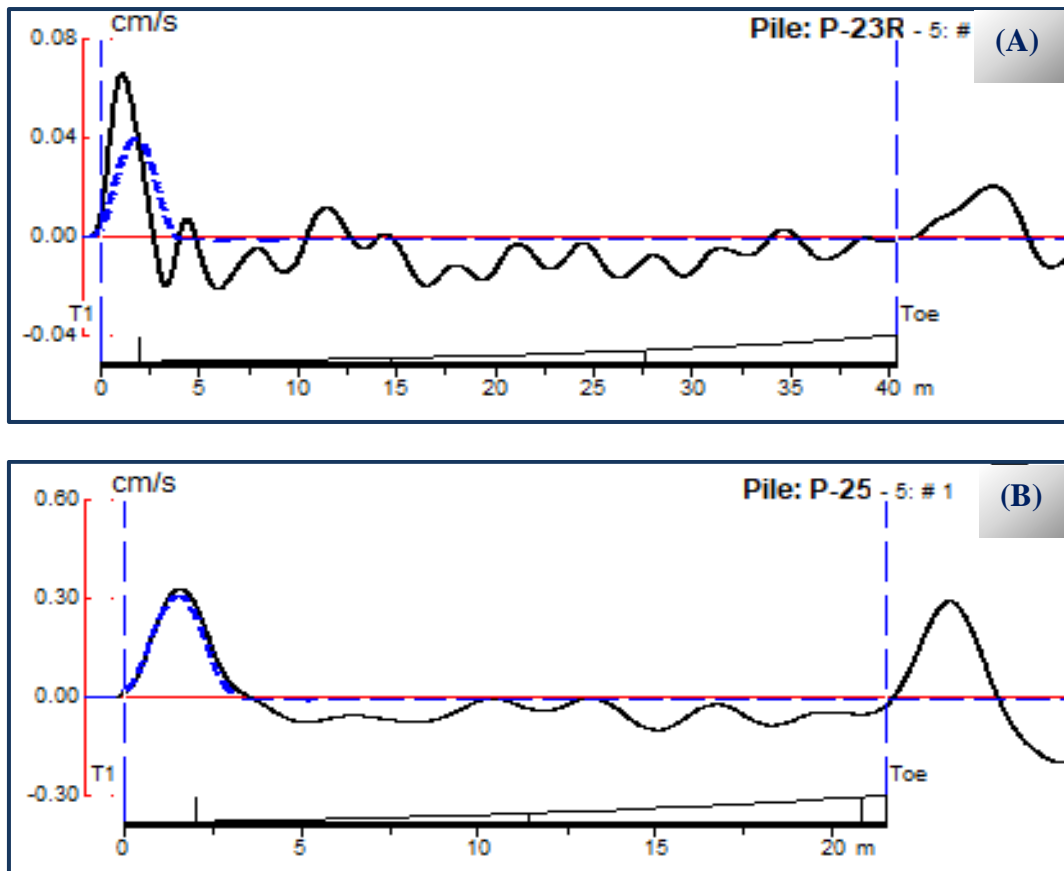


Figura 12. Registros obtenidos del ensaye FV con el martillo instrumentado

### 3.1.4 Procesamiento

Para el mejor aprovechamiento de la información obtenida en campo, se aplican varios filtros que facilita la interpretación sin alterar la información original y relevante de la pila. Para el procesamiento de los registros capturados en campo se utiliza el software PIT-W en su versión 2019 de la empresa Pile Dynamics, Inc (PDI). A continuación, se describen los más aplicados:

#### 3.1.4.1 Amplificación

Normalmente para el procesamiento de la información se aplica la función de amplificación exponencial. Esta amplificación muestra con mayor detalle las reflexiones que son disminuidas por la resistencia al suelo, amortiguamiento propio del material de la pila y cambios de impedancia.

De manera general las reflexiones relativamente claras son atribuidas a cambios de impedancia, mientras que cambios de reflexiones pequeños son usualmente causados por la resistencia del suelo. Si los efectos de la resistencia del suelo son conocidos de otras pruebas en pilas de referencia, se puede identificar pilas inusuales (Likins, 2002).

Una señal obtenida en campo sin filtros de una pila se muestra en la Figura 13, en donde la interpretación se hace difícil debido a que la resistencia del suelo y pila han amortiguado enormemente las señales de reflexión.

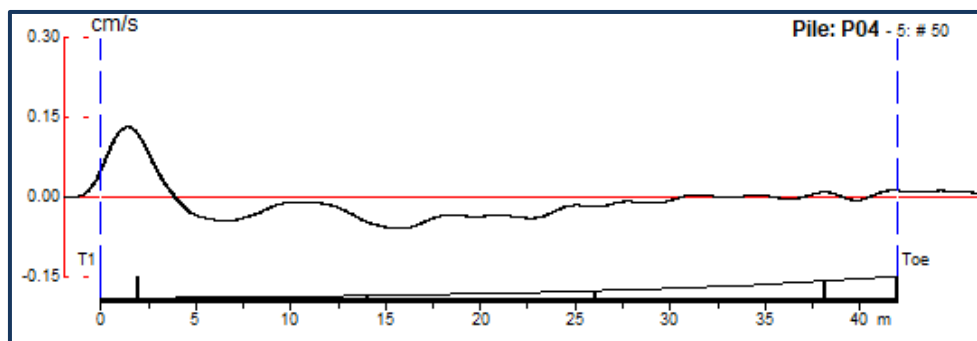


Figura 13. Señal obtenida en campo con amplificación mínima y sin filtrado (Sísmica de Suelos , 2020)

El método estándar para compensar los efectos de amortiguamiento del suelo es el de aplicar una función de amplificación que comience un poco después del pulso de entrada con un valor unitario y se incremente exponencialmente con algún factor hasta la punta de la pila. En la Figura 14 se presenta gráficamente cómo se ve la señal presentada de la Figura 13 con la función de amplificación.

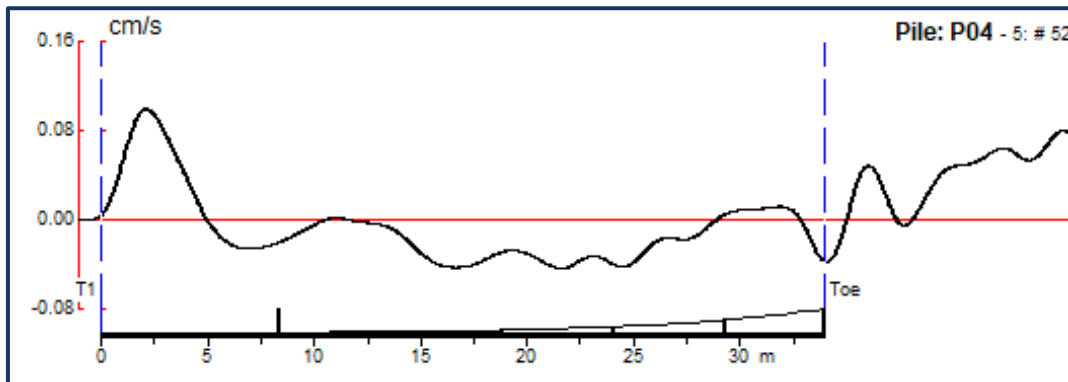


Figura 14. Señal con amplificación (Sísmica de Suelos , 2020)

#### 3.1.4.2 Filtro Paso Alto (HI)

Los efectos del suelo se pueden remover por medio de un proceso de filtrado, debido a que son eventos de baja frecuencia (Likins, 2002).

En general, se debe tener cuidado para no aplicar HI con una frecuencia de filtrado muy grande que pueda eliminar las frecuencias de interés, ya que los componentes de frecuencia más importantes son aquellos que muestran el pulso de entrada y los cambios de reflexiones debidos a cambios en las propiedades de las pilas.

El HI se puede usar para enderezar la curva y hacer que la señal dada en la reflexión por punta sea más fácil de identificar. Otro factor importante a mencionar es que se deben mantener los cambios relativos, es decir si hay reflexión negativa (aumento de la impedancia) al 10% de la amplitud del pulso inicial, esta relación debe mantenerse después de aplicar el HI.

Por último, se recomienda ver la señal sin el filtro, y aplicar la mínima intensidad del filtro, es decir, entrar con el valor más alto posible para lograr el efecto deseado.

#### 3.1.4.3 Filtro Paso bajo (LO)

El filtro LO permite el paso de las altas frecuencias, lo que ayuda a remover los efectos de las varillas.

Es importante ver la señal sin el filtro, y aplicar la mínima intensidad del filtro, entrando con el valor más bajo posible de manera de conseguir el efecto deseado.

#### 3.1.4.4 Otros recursos

- Magnificación exponencial (MA): Multiplica la señal por 1 hasta MD, generalmente es el 20% de la longitud del elemento.
- Filtro Wavelet (WL): Realiza el promedio de la señal con un pulso correspondiente a una media senoide. Cuanto más ancho sea el pulso, mayor el efecto del filtro. No se debe usar junto con LO.
- Pivot (PV): Es un tipo de filtro paso alto en el que el punto de impacto es mantenido fijo y toda la señal es girada hacia arriba ( $PV > 0$ ) y hacia abajo ( $PV < 0$ ). No se recomienda usar con HI.

En la Figura 15 se presenta una señal original y la misma señal con todos los filtros aplicados.

#### 3.1.4.5 Efectos de la fricción en la atenuación de la energía

Debido a que el pilote está incrustado en el suelo, la onda enviada pierde energía debido a la fricción en el fuste del elemento.

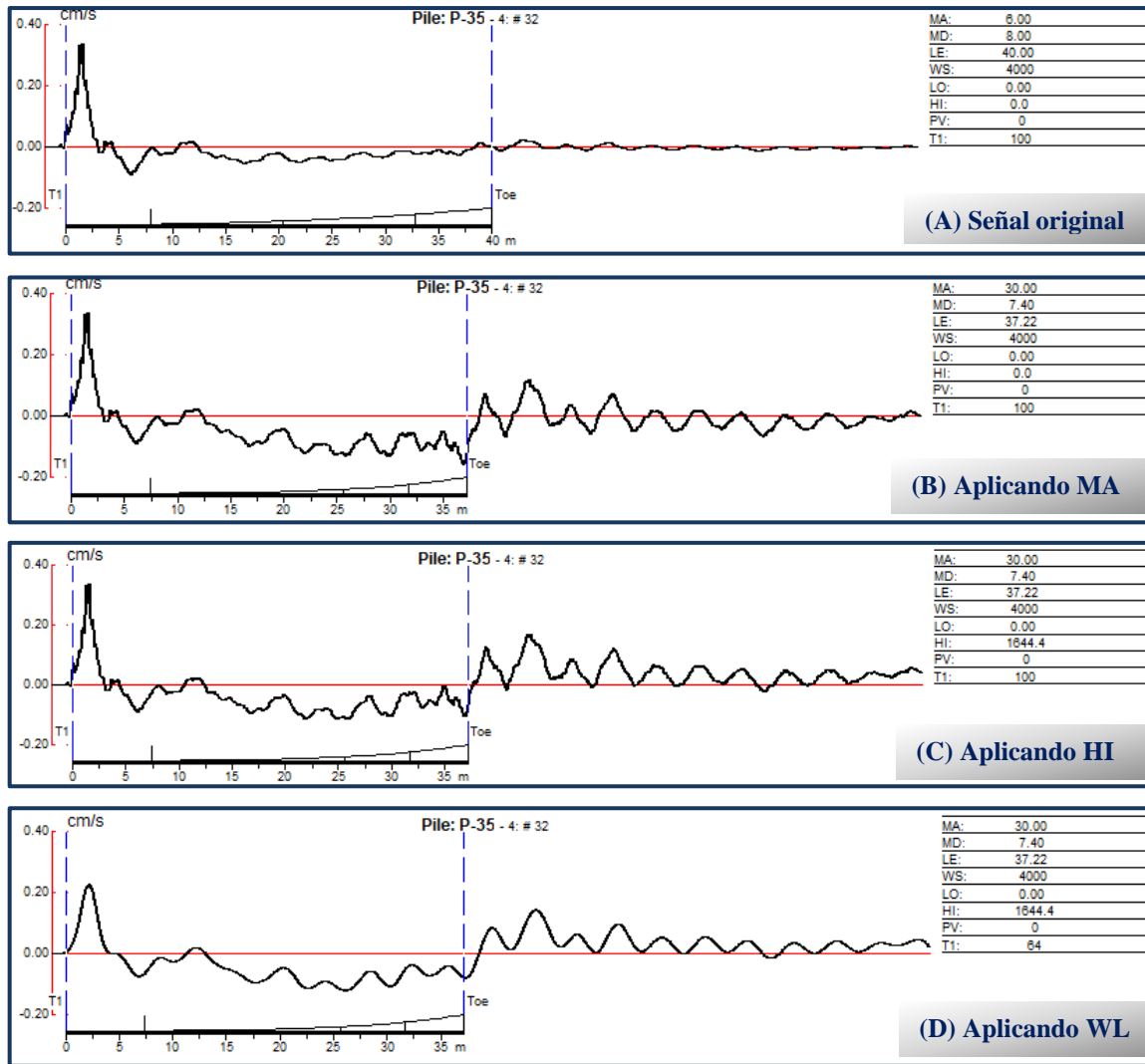


Figura 15. Procesado de la señal, (A) Señal original, (B) Señal con MA=30 y MD=7.4, (C) Aplicando HI, (D) Aplicando WL

Para entender el efecto de la fricción a lo largo de toda la pila, consideremos el caso de una onda de fuerza axial de compresión  $P_1$  que viaja hacia abajo en un elemento de pila  $\Delta x$  sujeto a una fuerza de fricción  $F$  que actúa en dirección opuesta como se presenta en la Figura 16.

La fuerza de fricción  $F$  da lugar a un par de ondas, cada una con una magnitud de fuerza  $F/2$ : un componente compresivo que viajará de regreso a la cabeza de la pila y un componente de tensión que viajará hacia abajo y reducirá la fuerza axial de compresión  $F/2$ . El resultado de este efecto es la atenuación de la onda a medida que avanza.

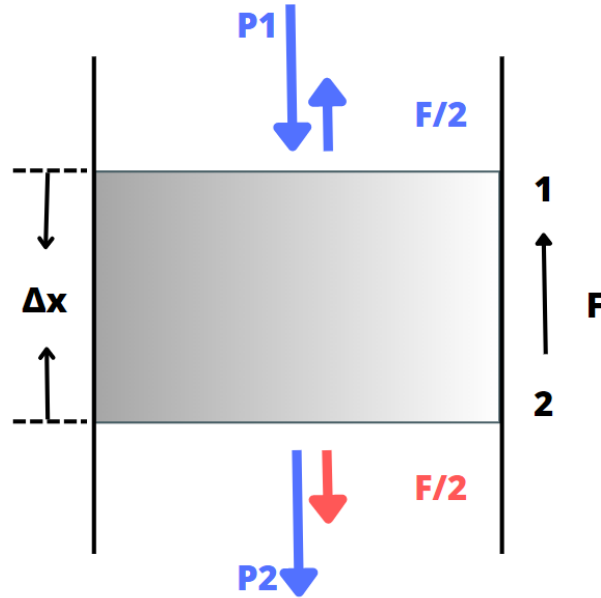


Figura 16. Influencia de la fricción en el fuste de la pila con una onda descendente (Modificado de Amir, 2023)

Por lo expresado se hace necesario la amplificación exponencial para compensar la atenuación y mejorar los registros obtenidos. El Ingeniero de campo debe entender este concepto para aplicar la cantidad de amplificación adecuada para el ensaye.

En suelos homogéneos, la atenuación total de la reflexión de punta de la pila viene dada por la Ecuación 21 (Paquet, 1992):

$$A = e^{\frac{4L}{D} \frac{\rho_s}{\rho_c} \frac{V_s}{V_c}}$$

Ecuación 21

donde:

L Longitud de la pila

D Diámetro de la pila

$\rho_s$  Densidad del suelo

$\rho_c$  Densidad de la pila

$V_s$  Velocidad de onda de corte del suelo

$V_c$  Velocidad de onda en la pila

Para pilas de concreto en suelo se tiene comúnmente los siguientes valores:

$$\rho_s = 18 \text{ kN}; \quad \rho_c = 24 \text{ kN}; \quad V_c = 4,000 \text{ m/s}$$

De lo anterior se tiene la Ecuación 22:

$$A = e^{\frac{L V_s}{D^{1.333}}} \quad \text{Ecuación 22}$$

La atenuación  $A$  es igual a la cantidad de amplificación exponencial necesaria para mejorar la reflexión por punta del elemento de cimentación y llevarla al tamaño aparente del golpe del martillo.

Para un sitio dado, el valor de  $V_s$  no siempre se conoce. Sin embargo, se puede estimar a partir del valor de resistencia SPT  $N$  (Fatehnia, 2015), como se muestra en la Ecuación 23:

$$V_s \left( \frac{m}{s} \right) = 77.1 * N^{0.355} \quad \text{Ecuación 23}$$

Las ecuaciones 22 y 23 se combinaron para obtener las amplificaciones necesarias para las pilas de varias relaciones de esbeltez, construidas en suelos de diferentes rigideces como se muestra en la Figura 17.

### 3.1.5 Análisis en el dominio del tiempo

Debido a que el objetivo final de la prueba de integridad de pilas es la determinación de la longitud y localización de defectos importantes, se debe tomar en consideración la experiencia y la teoría física en la que se basa la prueba.

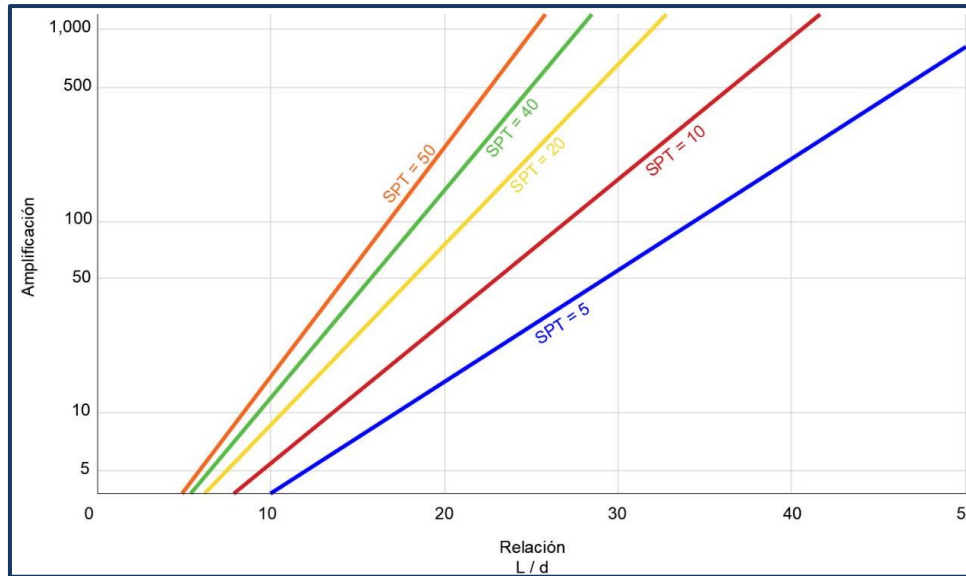


Figura 17. Esbeltez vs. Atenuación en suelos de diferentes rigideces  
(Modificado de Amir, 2023)

La empresa PDI en su página web (<https://www.pile.com>) da indicaciones para la interpretación de la prueba PIT. En el documento se menciona que inicialmente para identificar la localización de un cambio de la sección transversal o reflexión de la punta, la velocidad de la onda de concreto se debe establecer.

Likins (2002) hace referencia que usualmente se toma un valor de velocidad de onda en el concreto de 3,960 m/s, pero que existe incertidumbre de alrededor del 10% para un mismo proveedor de concreto. Sin embargo, para poder establecer una comparativa se toma un mismo valor de velocidad para las diferentes pilas evaluadas en el sitio. PDI recomienda hacer un ajuste en el valor de la velocidad de onda de concreto en el momento que se identifique la reflexión en la punta.

Del análisis de la señal registrada por el equipo se puede identificar un pico positivo inicial correspondiente al pulso de entrada debido al impacto del martillo. Al cabo de un tiempo, la velocidad regresa a tomar un valor de cero. Cuando se tiene una pila perfecta se tendrá un pulso inicial positivo seguido de un lapso de tiempo con la velocidad igual a cero hasta alcanzar la reflexión en la punta donde se registraría un pulso similar al de la entrada que puede ser positivo o negativo en algunos casos. Positivo cuando la pila

se encuentra en el suelo relativamente blando y negativo cuando la punta del pilote se encuentra apoyado por una roca o estrato de alta rigidez.

Las reflexiones pueden ser causadas por cambios en la sección transversal de la pila o densidad del material. Una región con reducción de impedancia muestra una reflexión positiva (igual al pulso de entrada) mientras que un aumento de impedancia genera una reflexión negativa del pulso. Estos casos se analizaron en las simulaciones realizadas mediante el programa PIT-S de la empresa PDP y se presentan en la Figura 18 y Figura 19.

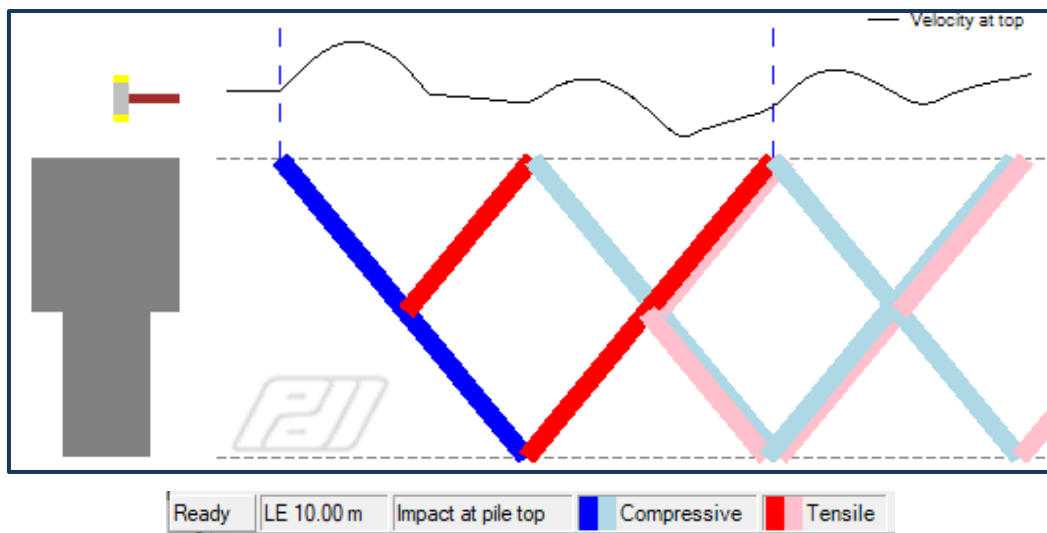


Figura 18. Simulación esquemática del efecto de reducción de impedancia en la señal (PIT-S, PDP)

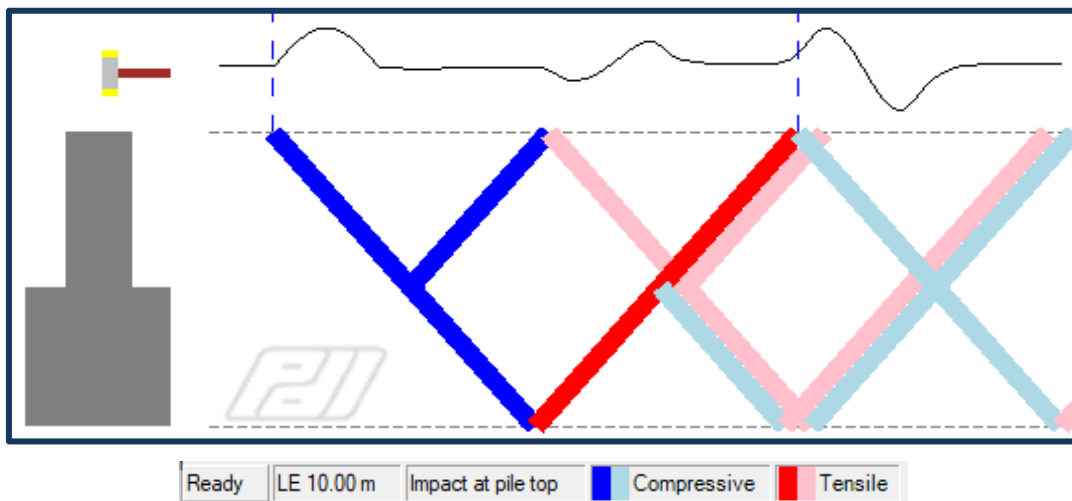


Figura 19. Simulación esquemática del efecto de aumento de impedancia en la señal (PIT-S, PDP)

En el caso donde se encuentra en la pila una reducción local se tendría por tanto una reflexión positiva seguida de una reflexión negativa (Figura 20). Por el contrario, en el caso de un aumento local se tendría una reflexión negativa inicialmente seguida de una reflexión positiva (Figura 21)

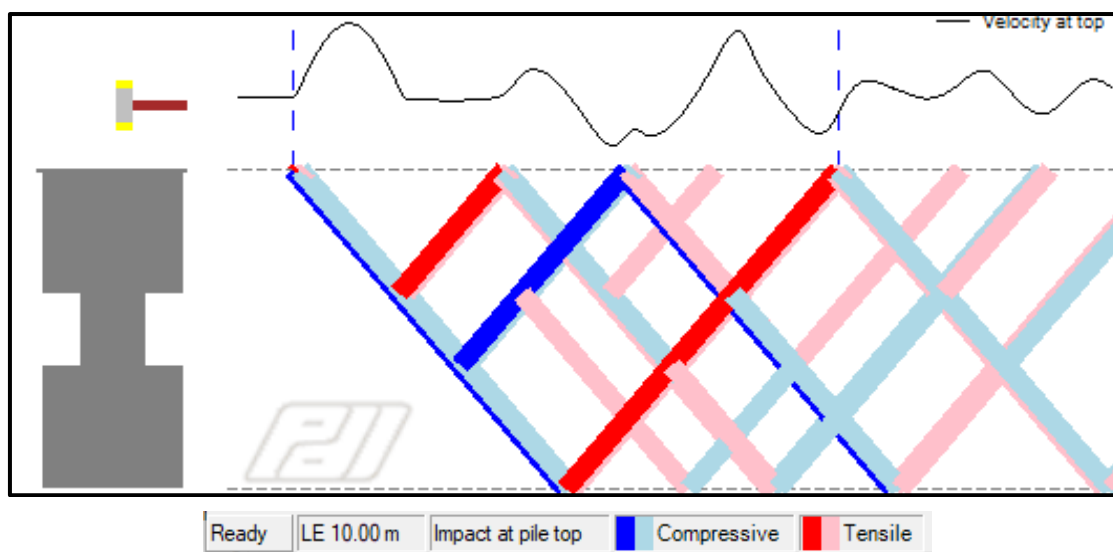


Figura 20. Simulación esquemática del efecto de reducción local en el pilote (PIT-S, PDP)

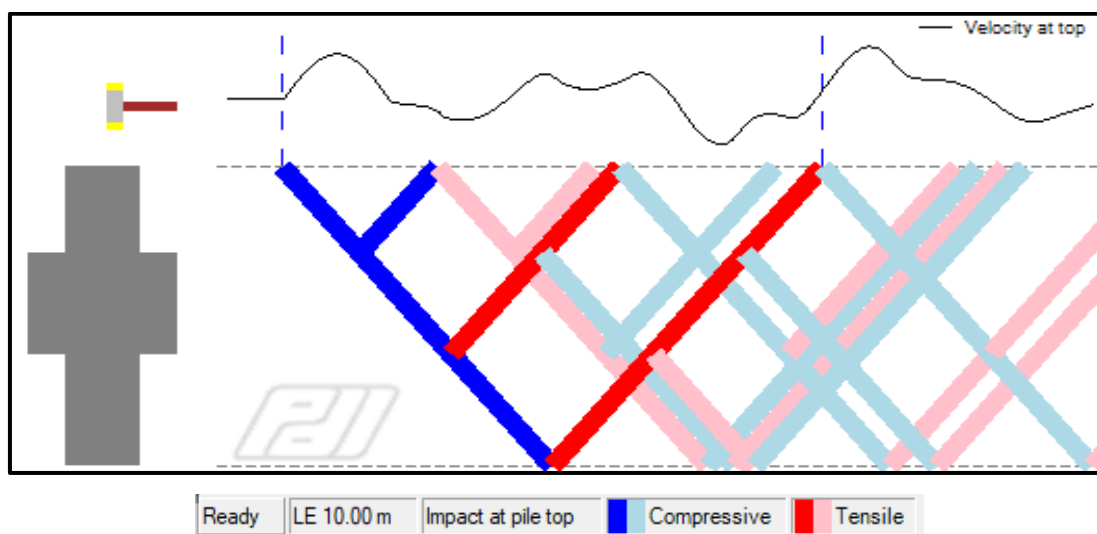


Figura 21. Simulación esquemática del efecto de ampliación local en el pilote (PIT-S, PDP)

Las reflexiones deben ser interpretadas para determinar si los cambios de impedancia asociados a ellas son considerados de importancia para la integridad de la pila.

La magnitud de la reflexión se relaciona directamente con el cambio de la impedancia (Bungenstab & Beim, 2015).

Los cambios de impedancia se evalúan a través de una línea base, considerando el efecto de resistencia del suelo. La magnitud del daño solo se puede estimar para pilas con clara reflexión de punta. En este caso, la reflexión de la punta debe ajustarse para que tenga la misma amplitud que el pulso inicial, por lo que se puede aplicar el método Beta  $\beta$  que es la tasa de cambio de impedancias de  $z_2$  a  $z_1$ , como se expresa en la Ecuación 24.

$$\beta = \frac{z_2}{z_1} = \left( \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right) \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde:

$\alpha$  es la amplitud del daño dividida por el doble de la amplitud del pulso inicial

Es importante destacar que el método Beta solo permite una estimación muy robusta del daño de la pila.

### 3.1.6 Análisis en el dominio de la frecuencia o de respuesta transitoria

El análisis en el dominio de la frecuencia se basa en la serie de Fourier, donde se establece una función periódica pero no senoidal. Partiendo que en el dominio del tiempo se tiene una función periódica se puede obtener una función periódica en el dominio de la frecuencia, como se presenta en la Figura 22.

La señal periódica se repite cada  $2L/c$ , entonces la frecuencia fundamental sería la inversa  $c/2L$ . Como se presenta en la Figura 22B la frecuencia o la amplitud de la frecuencia es periódica, entonces para una frecuencia de 147.3 Hz y una velocidad de 4300 m/s tenemos una longitud del pilote de 14.6 m.

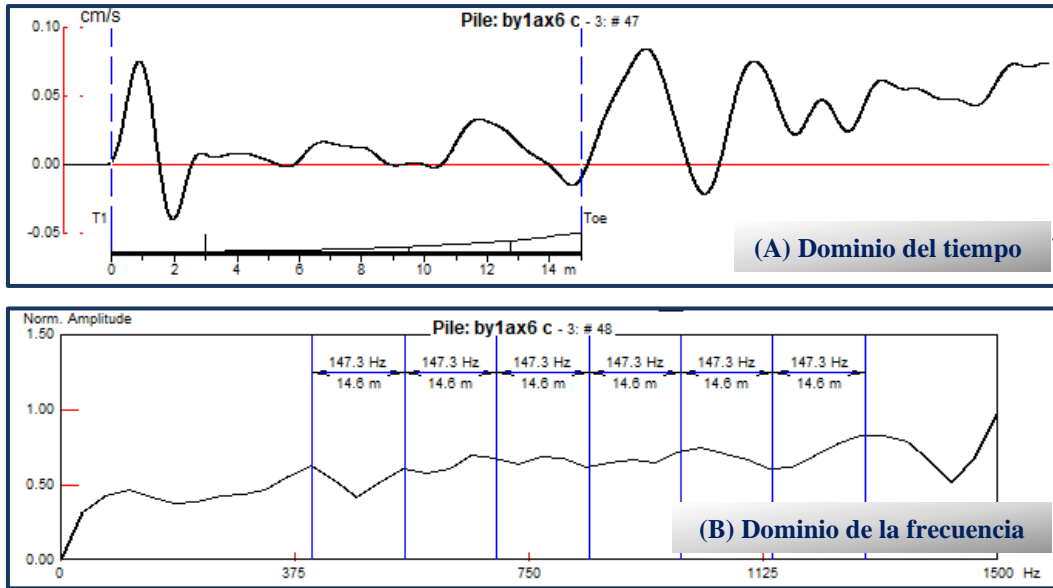


Figura 22. (A) Función periódica en el dominio del tiempo, (B) Espectro obtenido en el dominio de la frecuencia

Cuando se tiene un defecto en la pila o pilote, la distancia y la frecuencia que se tiene entre señales serán distintas como se muestra en la Figura 23.

Para el análisis de frecuencia usando los picos, se tiene que la diferencia de frecuencias entre picos del espectro de velocidad puede ser usada para determinar la longitud del pilote o la ubicación del defecto usando la Ecuación 25.

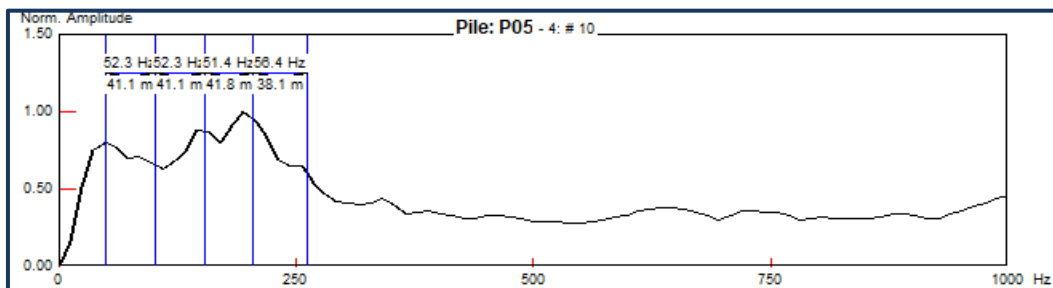


Figura 23. Análisis en frecuencia en una pila con defecto

$$x = \frac{c}{2 \cdot \Delta f}$$

Ecuación 25

donde:

$x$  es la longitud del pilote o la longitud del defecto

$c$  es la velocidad de la onda

$\Delta f$  es la diferencia en la frecuencia

Las reglas básicas para el uso de este método al determinar la integridad de la pila son:

1.  $\Delta f_1 \approx \Delta f_2 \approx \dots \approx \Delta f_n \approx \Delta f_0$  se determina que la pila esta sin defecto
2. Mayoría de  $\Delta f \approx \Delta f_0$ , excepto diversas  $\Delta f > \Delta f_0$  se tiene pequeños defectos en la pila
3. Todas  $\Delta f > \Delta f_0$  indica que el pilote o defectos son severos

### 3.1.7 Criterios de clasificación

Para cuantificar la variación en la impedancia, Rausche & Goble en 1979 implementaron el Método  $\beta$ , para determinar el cambio relativo de la impedancia de la pila usando las reflexiones registradas mediante la prueba y de esta manera obtener el porcentaje de reducción de impedancia, que es directamente proporcional a la variación de la sección transversal del elemento.

Para el cálculo del valor  $\beta$  es necesario determinar el valor de  $\alpha$ , el que se define por la Ecuación 26.

$$\alpha = \frac{V_{daño}}{V_{impacto}} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde  $\alpha$  es la relación entre la velocidad registrada en la prueba para la reflexión de daño identificado ( $V_{daño}$ ) y la velocidad de onda registrada por la prueba para el pulso de entrada ( $V_{impacto}$ ). El porcentaje de daño  $\beta$  es calculado con la Ecuación 27.

$$\beta = \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \quad \text{Ecuación 27}$$

Según el valor del parámetro  $\beta$ , se estima el daño de la sección transversal del pilote mediante la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de la integridad estructural de la pila en factores Beta calculados (Rausche & Goble, 1979)

<b>Beta (<math>\beta</math>)</b>	<b>Condición de la Pila</b>
1.0	Pila uniforme
0.8 -1.0	Daños leves
0.6 a 0.8	Daño
< 0.6	Discontinuidad

El Método Beta presenta dos grandes limitaciones en la estimación del daño en el pilote o pila. No tiene en cuenta los efectos de la resistencia del suelo y, además, sólo son detectables los cambios en la sección transversal con longitudes mayores a la longitud del pulso, lo cual restringe la técnica al no predecir daños severos debidos a pequeños cambios de impedancia.

Si la calidad de los datos no es lo suficientemente buena, los registros se interpretan de forma parcial o incierta, por lo que el uso de la Tabla 2 puede resultar difícil o poco representativo. En 1992, Rausche propuso una clasificación general para evaluar pilas en función de la calidad de los datos obtenidos (Tabla 3).

### 3.1.8 Limitaciones de la prueba

Cuando las ondas se reflejan en elementos profundos y delgados que son 30 o 40 veces su diámetro, es posible que las reflexiones de las ondas sean demasiado débiles para ser detectadas en la parte superior de la pila.

Dado que no se producen reflexiones de ondas con amplitud y frecuencia alta, es posible que no se detecten los cambios graduales en la impedancia de la pila. Los elementos de cimentación colados en sitio con secciones transversales muy variables, especialmente en suelos estratificados, son difíciles de analizar y conducen a una menor confianza de los resultados. Los daños graves en los elementos de cimentación, las grietas

en toda la sección o los empalmes mecánicos impiden la propagación de las ondas y, por tanto, ocultan las deficiencias en la parte inferior del elemento de cimentación.

Tabla 3. Clasificación recomendada de registro de prueba de baja deformación para pilas de concreto (Rausche & Goble, 1992)

Clase	Nombre de la Clase	Comentario
AA	Pila sana, punta identificada	Se puede identificar claramente la reflexión por punta de la pila, correspondiente a la longitud notificada de proyecto y una velocidad de onda dentro del rango aceptable. Los registros de esta categoría pueden indicar variaciones normalmente aceptadas de tamaño o calidad del material.
AB	No se indica ningún defecto importante	Los registros no indican reflejos de reducciones significativas de la longitud de la pila o la calidad del material, ni una respuesta clara en la reflexión por punta. Los registros en esta categoría no dan indicios de una anomalía significativa; sin embargo, tampoco arrojan evidencia positiva de que la pila presente integridad y continuidad en toda su longitud.
ABx	No se indica ningún defecto importante a una profundidad de x (m)	Debido a las limitaciones del método, la interpretación del registro para la longitud completa no es posible. Ejemplo con las pilas muy esbeltas y aquellas con alta resistencia del suelo y protuberancias importantes.
PFx	Indicación de un probable defecto a una profundidad aproximada de x (m)	Indicación de un probable defecto en una profundidad aproximada. Los registros muestran una fuerte reflexión correspondiente a una mayor reducción del tamaño o de la calidad del material.
PDx	Indicación de un probable defecto a una profundidad aproximada de x (m))	Los registros muestran un fuerte reflejo correspondiente a una importante reducción del tamaño o de la calidad del material. La reflexión por punta no es clara.
IVx	Registro no concluyente por vibraciones	Los datos no son concluyentes debido a vibraciones generadas por maquinaria de construcción o exceso de carga sobre el cabezal de concreto de la pila. La repetición de la prueba es aconsejable bajo ciertas circunstancias.
IR	Registro no concluyente	Mala calidad del pilote/baja resistencia del concreto; Se recomienda volver a realizar la prueba después de esperar mayor fraguado de la pila/limpiar la parte superior de la pila. Los cambios de impedancia generan señales que impiden ver la reflexión por punta de la pila.

El ensayo de los pilotes o pilas bajo estructuras existentes añade dificultad a la realización de la prueba, debido a que la cabeza del elemento no está disponible para la instrumentación o el impacto, y la interpretación de los datos es complicada debido a que las ondas viajan a través de la estructura y se refleja en ella.

### 3.2 Cross Hole Ultrasonico (*Cross-Hole Sonic Logging, CSL*)

Con el CSL se mide el tiempo que tarda la onda para llegar desde el emisor hasta el receptor y simultáneamente se mide la energía o la intensidad de la señal en el receptor. El transmisor es un auto parlante que va generando un sonido con una frecuencia muy alta y el receptor es básicamente un micrófono que capta el sonido.

A continuación, se describe de manera detallada el equipo e instrumentación utilizado para la ejecución del CSL.

#### 3.2.1 Equipo e Instrumentación

Uno de los equipos empleados para la prueba de CSL, es el fabricado por la empresa *Pile Dynamics, Inc.*, que contiene los siguientes elementos:

- Un sistema de adquisición de datos de CSL basado en computadora para la visualización de señales durante la adquisición de éstos, con un convertidor A/D mínimo de 12 bits con una frecuencia de muestreo de al menos 500,000 Hz, y registro de todas las señales de pulso para un análisis completo e inspección individual.
- Transmisores ultrasónicos y sondas receptoras capaces de producir registros con un mínimo frecuencia de 40,000 Hz con buena amplitud de señal y energía a través de concreto de buena calidad. Las sondas deberán tener menos de 1.1 pulg de diámetro y descenderán libremente a través de toda la profundidad de los tubos de acceso correctamente instalados de un diámetro típico de 1.5 a 2.0 pulg en los pozos perforados.
- Dos sensores de profundidad para determinar de forma independiente las profundidades de la sonda del transmisor y del receptor.
- Disparo de la base de tiempo del sistema de registro con el pulso ultrasónico transmitido.

En la Figura 24 se presenta todo el equipo empleado para la prueba de CSL.

Durante el colado del elemento de cimentación se debe prever de la instalación de tubos, amarrados al armado de la pila que permitan la ejecución de la prueba. Se deben proporcionar tubos de acero o tuberías de PVC de cédula 40 u 80 de diámetro interior nominal de 38 mm (1.5 pulg) o 50 mm (2.0 pulg) de peso estándar para acceder a la sonda en cada pozo perforado (se prefiere tubos de acero galvanizado para evitar la pérdida de contacto entre el concreto y el tubo).



Figura 24. Equipo e instrumentación para la prueba de Cross Hole Ultrasónico (CSL)

### 3.2.2 Preparación de los tubos de acceso para la ejecución de la prueba

Los tubos deberán ser impermeables y libres de corrosión con las caras externas limpias para asegurar una buena unión entre el concreto y ellos y serán instalados por el contratista de tal manera que las sondas CSL pasen a través de toda la longitud del tubo sin atascarse.

La norma ASTM-6760-08 dispone de diferentes configuraciones para la cantidad de tubos de acceso según el diámetro de la pila. Requiere un tubo por cada 0.25 a 0.30 m del diámetro de la pila, con un mínimo de tres tubos de acceso, espaciados igualmente alrededor de la circunferencia que conforma la parte interna de la armadura de la pila. En la Figura 25 se muestran las configuraciones de tubos de acceso.

Es importante tomar en consideración que al realizar el CSL, el tubo debe estar lleno de agua, debido a que las ondas ultrasónicas no viajan bien por el aire, pero viajan de manera más eficiente a través del agua y el concreto.

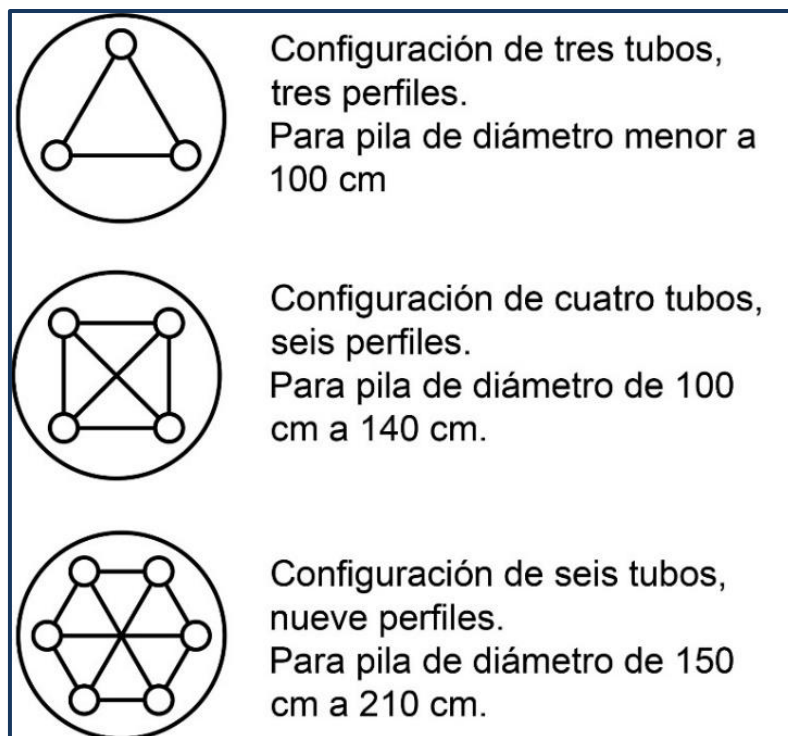


Figura 25. Disposición de los tubos de acceso para llevar a cabo el ensayo de integridad de pilas con el método Cross Hole Ultrasónico según la norma ASTM-6760-08

La configuración de los tubos de acceso da lugar a una cantidad posible de perfiles de tiempos obtenidos para un ensayo, de manera que sea posible contar con la mayor información a la hora de determinar la integridad de la pila. En la Tabla 4 se presenta el número de combinaciones necesarias para definir la geometría dependiendo de la cantidad de tubos instalados.

Tabla 4. Número de combinaciones en función del número de tubos  
(Pile Dynamics, 2011)

Número de Tubos	Cantidad de barridos	Mediciones necesarias para definir la geometría
4	6	5
5	10	7
6	15	9
7	21	11
8	28	13
9	36	15
10	45	17

### 3.2.3 Ejecución de la prueba

El ensayo CSL consiste básicamente en medir el tiempo que tarda una onda ultrasónica esférica en propagarse desde un emisor a un receptor a través de la pila. Las sondas se mueven simultáneamente a lo largo de la pila a través de dos tubos de auscultación, los cuales están sujetos a la armadura de la pila y quedan colados permanentemente dentro de la pila (Figura 26). El tiempo medido es función de la distancia entre el emisor y el receptor, así como de las características del medio atravesado. El equipo de medición consta básicamente de una sonda emisora y una receptora, una consola y un set de poleas equipadas con un sensor de profundidad, con los que se registra la posición de las sondas mientras se desplazan simultáneamente a través de la pila o pilote.

A medida que las sondas van ascendiendo por los tubos de auscultación, los que deben estar llenos con agua al momento del ensayo, se emite un pulso ultrasónico (p. ej. > 20,000 Hz), normalmente cada 5 cm y se registra continuamente el tiempo de llegada de la primera onda (*First Arrival Time*, FAT) y la energía relativa entre sondas. A la medición y registro de datos entre dos tubos se le conoce como perfil de cascada. El número de perfiles medidos es función del número de combinaciones entre tubos de auscultación (Figura 25 y Tabla 4).

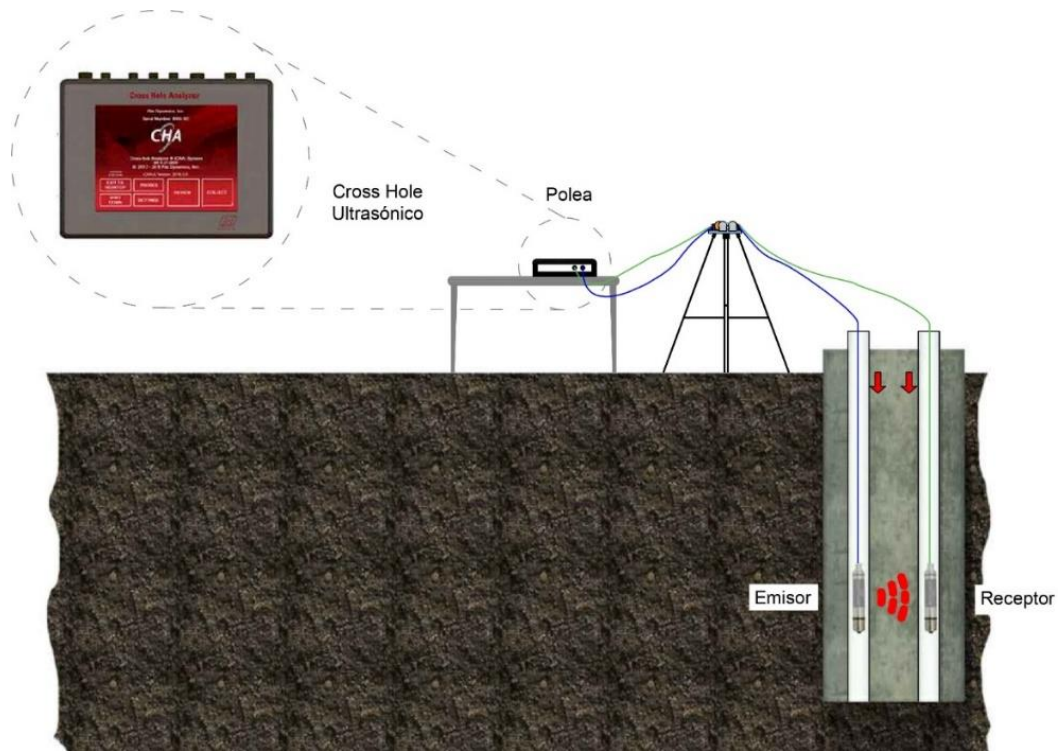


Figura 26. Imagen ilustrativa de la técnica para determinar la integridad en pilas con el método Cross Hole Ultrasonico

### 3.2.4 Procesamiento

El análisis de los perfiles registrados permite la detección de anomalías presentes en la pila, las que se manifiestan mediante un incremento en el tiempo de llegada de la primera onda (FAT) y/o una reducción de la energía relativa (intensidad de señal). La velocidad de onda del concreto puede ser estimada dividiendo la distancia entre los tubos de auscultación del perfil evaluado entre el tiempo de llegada de la primera onda (FAT). Esta velocidad de onda debe entenderse como una velocidad de onda aparente, debido a que los tubos de auscultación pueden desviarse de su posición original al momento de instalar el armado o durante el proceso del colado de la pila, lo que genera que los tubos no sean completamente paralelos a lo largo de todo el elemento.

La velocidad de onda aparente puede usarse como un apoyo al momento de evaluar la calidad del concreto, debido a que la velocidad de onda está directamente relacionada

con la resistencia a la compresión del concreto. El intervalo de la velocidad de onda en concreto sano se encuentra entre los 3,600 a 4,500 m/s. Sin embargo, la evaluación de integridad debe basarse en el tiempo de llegada de la primera onda (FAT), entre sensores, ya que junto con la intensidad de la señal (convertida en energía relativa), son los principales parámetros que se miden en el ensayo (Figura 27)

Como se ilustra en la Figura 27, la señal emitida y la señal recibida se sobreponen para generar el diagrama de cascadas con un código de colores donde el máximo es verde y el mínimo es blanco (Figura 28)



Figura 27. Ilustración del tiempo de tránsito entre la señal emitida y la señal recibida (Modificada de Pile Dynamisc, 2011)

Existen tres herramientas principales que se utilizan para procesar los datos obtenidos en campo con el fin de obtener un registro más claro y confiable. Estas se enumeran a continuación:

#### 3.2.4.1 *Edge Finder*

Esta es una herramienta de procesamiento de señales basada en la intensidad de los pixeles que permite encontrar los tiempos de llegada y ajustar los bordes de la curva para seguir mejor la señal registrada. Se le asignan dos valores especificados por Pile Dynamics, Inc (PDI) para el equipo. Esto permite que *Sigma* varíe entre 0.3 y 0.6 y el *Threshold* entre 15 y 30, ambos son parámetros que permiten el mejor ajuste de la curva al registro de

casacada. En la Figura 29 se presenta un registro de CSL obtenido en campo antes y después de utilizar la herramienta *Edge Finder*.

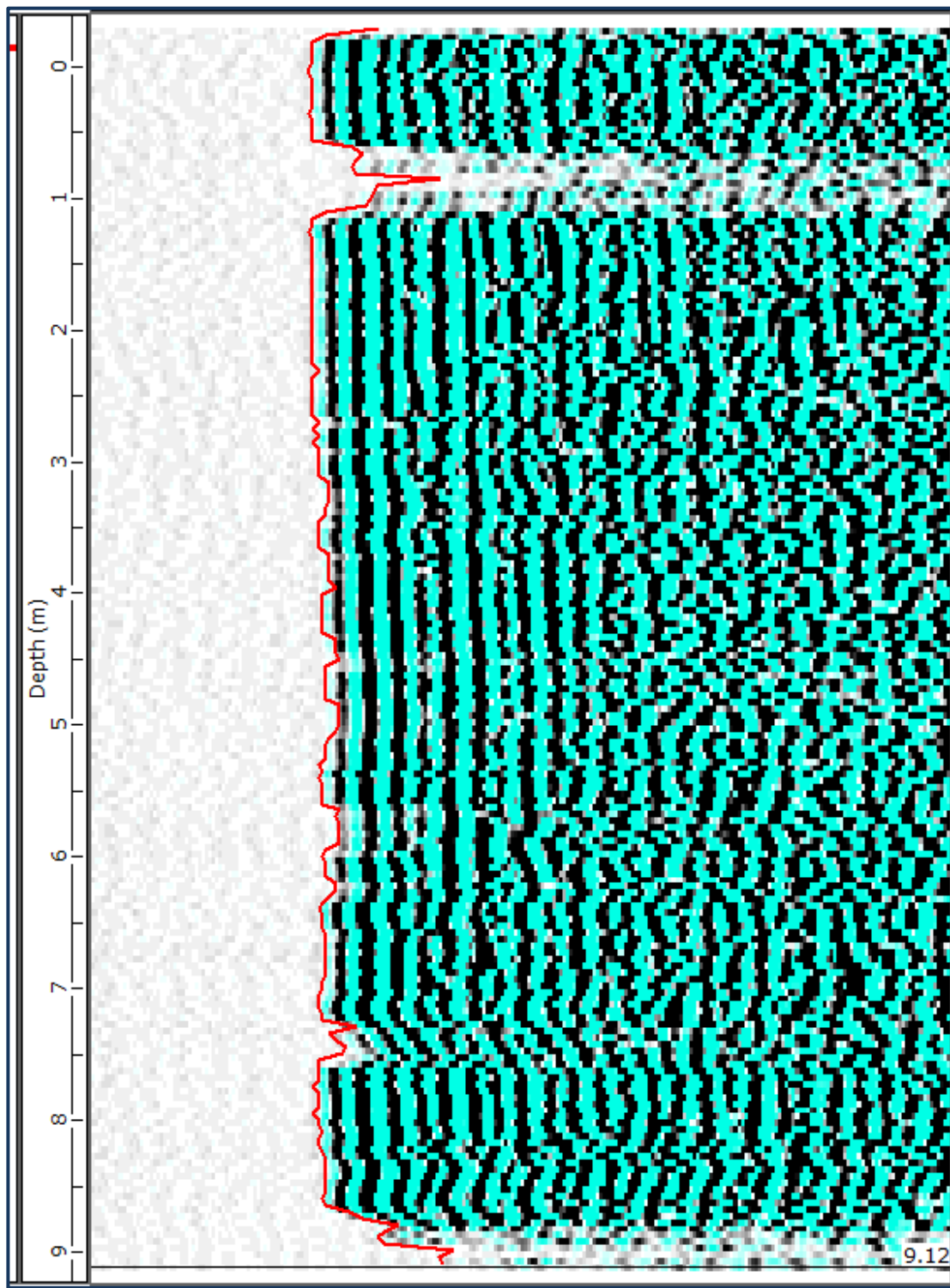


Figura 28. Registro de cascada

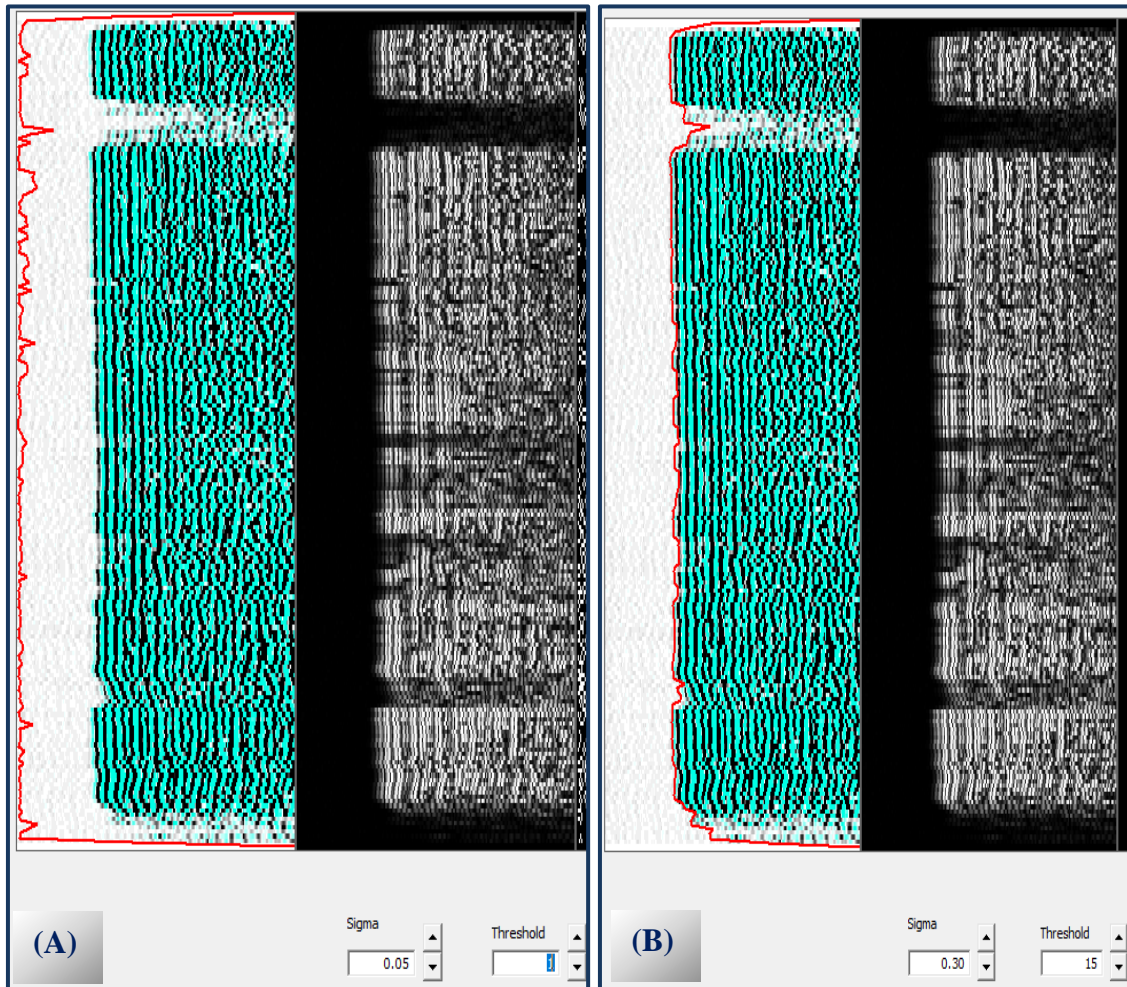


Figura 29. (A) Registro de cascada sin valores de ajustes . (B) Registro de cascada con *Sigma* de 0.30 y *Threshold* de 15

#### 3.2.4.2 *Trim Top*

Es una herramienta que permite filtrar los datos medidos por encima del elemento de cimentación como se presenta en la Figura 30 .Esto ayuda a descartar velocidades de propagación fuera de rango que afecten el análisis con tomografía. En la Figura 31 se presenta el registro de cascada antes y después de aplicar el *Trim Top*.

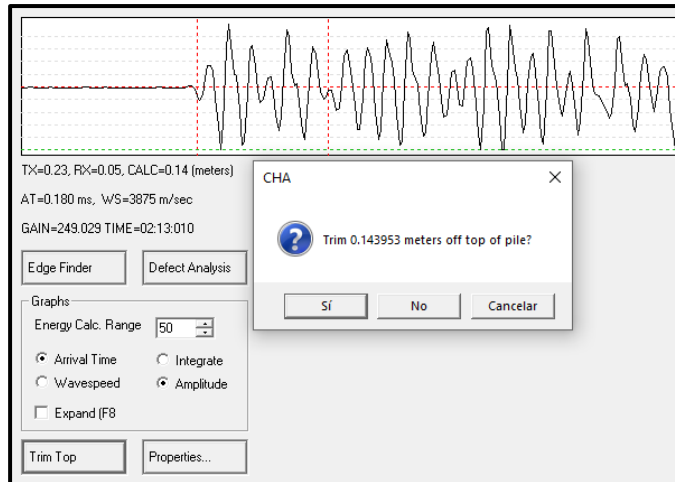


Figura 30. Aplicación de *Trim Top* a la señal obtenida por encima de la pila

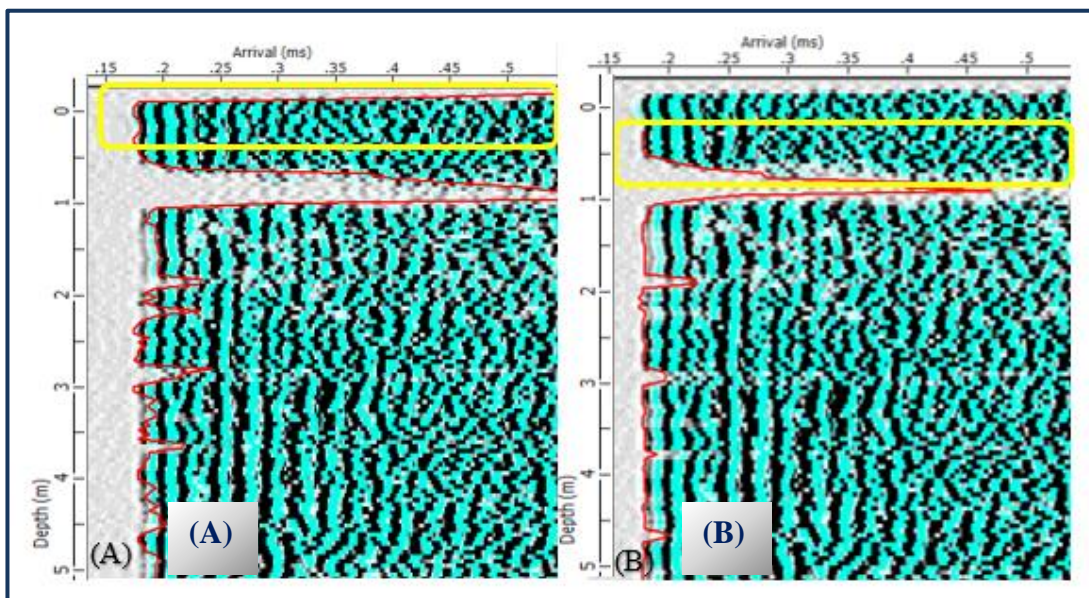


Figura 31. (A) Se presenta el registro de cascada con señales por encima del cero. (B) se presenta el registro de cascada con la aplicación del *Trim Top* eliminando las señales por encima de la pila

### 3.2.4.3 *Defect Analysis*

El *Defect Analysis* permite localizar automáticamente los defectos locales por debajo de los 60 cm. Esta herramienta muestra las curvas del tiempo de llegada de la onda en porcentaje y la curva de disminución de energía medida en decibeles como se presenta en la Figura 32.

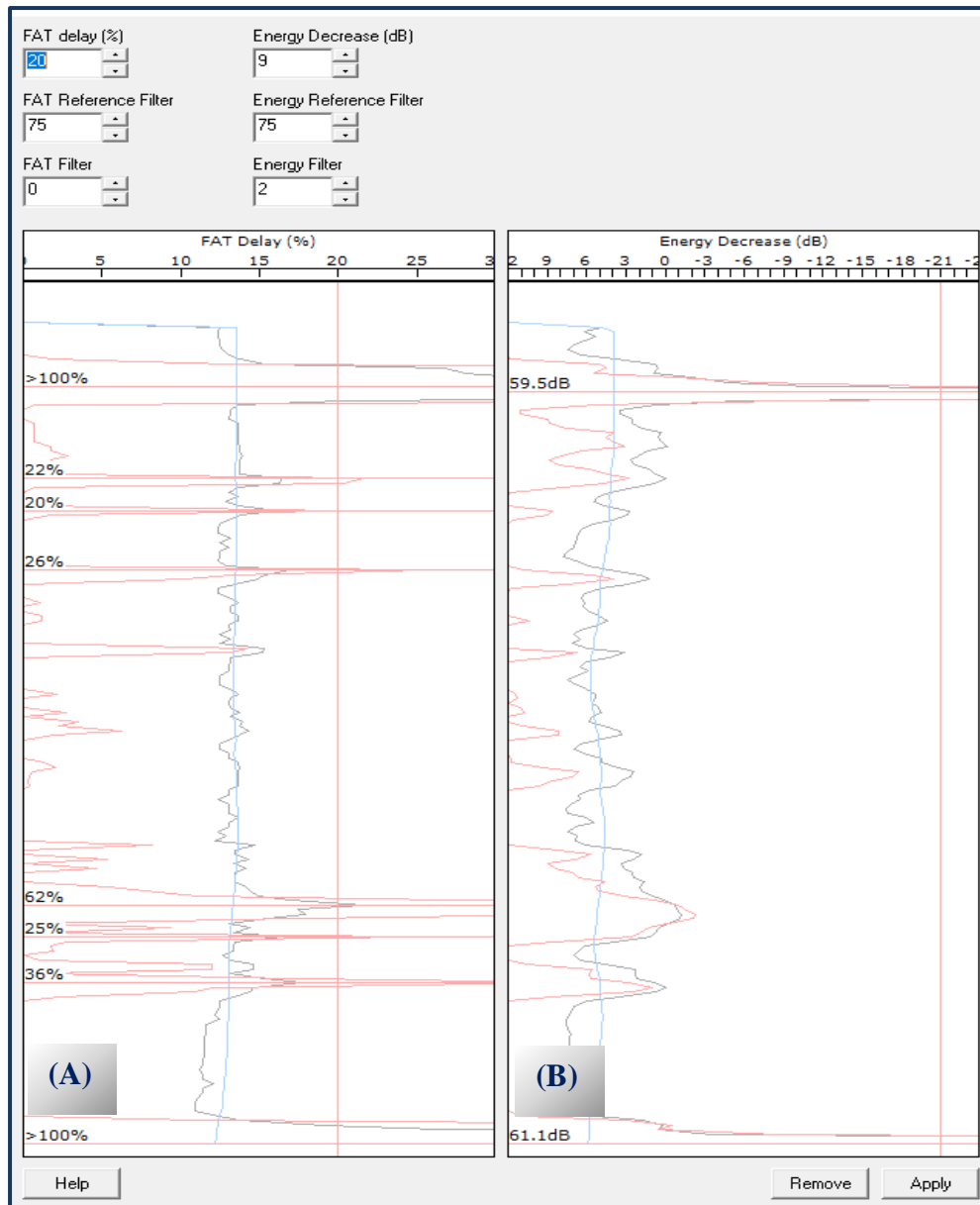


Figura 32. (A) Curva del tiempo de llegada de la onda en % (B) Curva de disminución de energía en dB

Algunos parámetros dentro del *Defect Analysis* pueden ser modificados. Sin embargo, PDP recomienda mantener los parámetros de referencias asignados por el programa.

Para el filtro *FAT filter* se recomienda usar un valor máximo de 2 y para el *Energy filter* un valor máximo de 3 debido a que esta curva suele contener componentes de alta frecuencia.

### 3.2.5 Identificación de los defectos y criterios de clasificación

Por lo general, un incremento significativo en el tiempo de llegada de la onda acompañado de una significativa reducción de la energía relativa, indican la presencia de una anomalía, mientras que si sólo se observa una reducción de energía sin incremento en el tiempo de llegada indicaría la presencia de concreto de menor calidad, mas no necesariamente un defecto en la pila. Esto se ilustra claramente en la Figura 33, donde se puede observar una señal que indica una pila de buena calidad (Figura 33A) y una señal donde se observa retraso en el tiempo de llegada y reducción en la intensidad de la energía lo que indica una pila con defecto (Figura 33B).

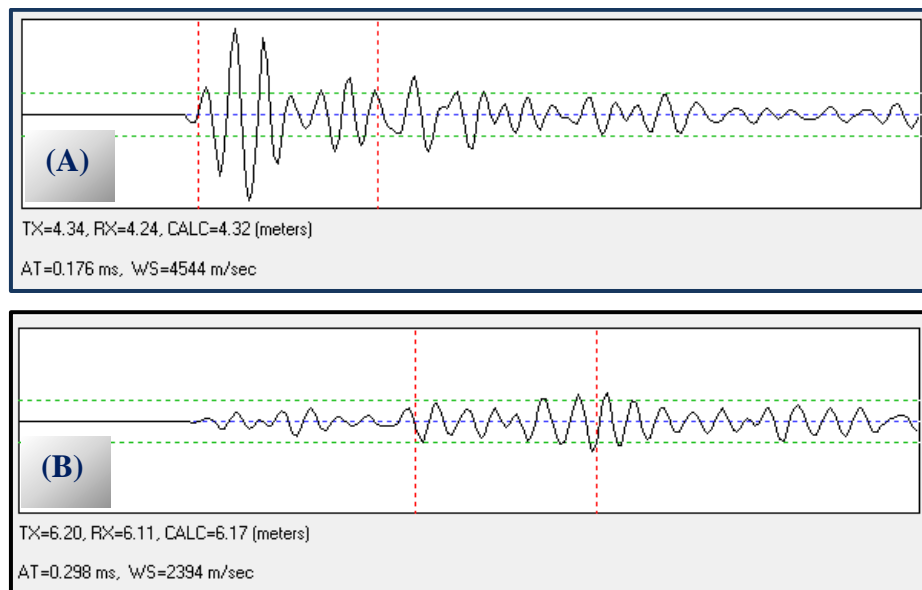


Figura 33. (A) Señal obtenida para una pila en buen estado (B) Señal obtenida para una pila con defecto

En la actualidad cuantificar el daño que presenta un elemento de cimentación mediante CSL no es una tarea sencilla. Los códigos chino y francés establecen los defectos en las pilas mediante la disminución de la amplitud, obteniendo la cantidad de decibeles a través de la siguiente expresión (Ecuación 26):

$$20 \log_{10} \frac{V_1}{V_2} = dB \quad \text{Ecuación 28}$$

$V_1$  y  $V_2$  velocidad de la onda en el concreto

Para el código chino si se obtiene >6 dB se tiene un defecto en amplitud. Para el código francés se marcará un defecto en la amplitud cuando se obtenga >14 dB.

*Pile Dynamics, Inc.*, utiliza la disminución de la energía para obtener los defectos. La cantidad de decibeles se obtiene mediante la Ecuación 29.

$$10 \log_{10} \frac{E_1}{E_2} = dB \quad \text{Ecuación 29}$$

$E_1$  y  $E_2$  Disminución de la energía

Partiendo de la Ecuación 29 *Pile Dynamics, Inc.*, estableció una guía de clasificación para la revisión de los elementos de cimentación como se presenta en la Tabla 5. Es importante mencionar que estos criterios han sido publicados en distintos congresos y revistas, pero no es una normativa.

Tabla 5. Guía de clasificación de Pile Dynamisc

<b>Categoría</b>	<b>Aumento del FAT</b>	<b>Y/O</b>	<b>Reducción de Energía</b>	<b>Clasificación</b>
G	0 a 10 %	Y	< 6 dB	Bueno/Satisfactorio
Q	11 a 20 %	Y	< 9 dB	Cuestionable
P/F	21 a 30 %	O	9 a 12 dB	Falla
P/A	FAT > 31 %	O	>12 dB	Defecto

En función de lo presentado en la Tabla 5, PDI recomienda lo siguiente:

- Tomar en cuenta fallas si afectan más del 50% de los perfiles
- Tomar en cuenta defectos si afectan más de dos perfiles
- Fallas o defectos en toda la sección necesitan reparo/sustitución

No existen criterios universales o estándar para evaluar los resultados de las pruebas de CSL. La norma ASTM- 6760 evita la interpretación de las pruebas y deja la aceptación de los elementos de cimentación al criterio del Ingeniero.

Por este motivo en el 2019 el *Deep Foundations Institute (DFI)* formó un comité con varios ingenieros de gran experiencia para establecer criterios que permitan una clasificación más fiable de los elementos de cimentación, publicando un documento titulado “ *Terminology and Evaluation Criteria of Crosshole Sonic Logging (CSL) as applied to Deep Foundations*”, sugiriendo los siguientes criterios de clasificación:

- Clase A: Resultados aceptables de la prueba de CSL “Sin defecto”
- Clase B: Resultados de la prueba de CSL condicionalmente aceptable “Con defecto”
- Clase C: Resultados altamente anormales de la prueba de CSL “Con defectos críticos”

Cada clase se define en función de la Figura 34, donde se relaciona la reducción de la energía con el primer tiempo de llegada de la onda, a continuación se describe cada una:

- **Clase A:** Aplicable para cualquier sección del perfil. Donde el aumento del FAT es inferior al 15 % del valor promedio del FAT y las reducciones en la energía relativa son inferiores a 9 dB del valor promedio.
- **Clase B:** Para cualquier sección del perfil, el FAT está entre 15 y 30 % y las reducciones de la energía relativa son inferiores a 12 dB o el FAT es inferior al 15% y la reducción de la energía es mayor a 9 dB.

Una vez que se interpretan datos anormales del CSL en la pila, se necesita una evaluación para determinar la importancia de los resultados en relación con el trabajo por carga que tendrá el elemento de cimentación dentro del proyecto.

Al evaluar los resultados de la Clase B, se debe tener en cuenta el número de perfiles de CSL afectados a una profundidad determinada. El Ingeniero encargado de la ejecución de la prueba debe informar del número de anomalías de Clase B y sus respectivas ubicaciones. **Estas observaciones no deben interpretarse como una única evaluación global de la pila como Clase B.**

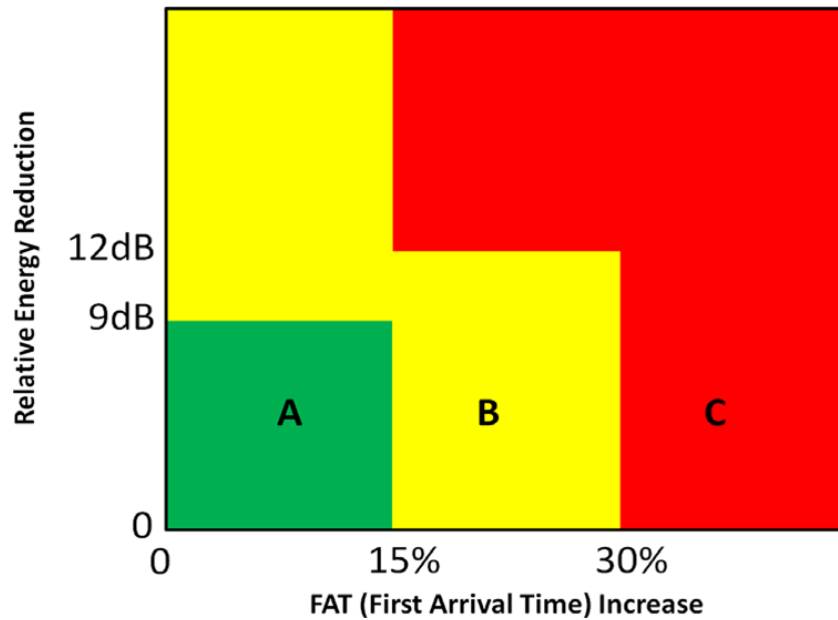


Figura 34. Representación gráfica de los criterios propuestos de calificación de CSL  
(DEEP FOUNDATIONS INSTITUTE, 2019)

- **Clase C:** Los aumentos del FAT son superiores al 30 % o el FAT es superior al 15% y las reducciones en la energía relativa son mayores a 12 dB. Al igual que la Clase B una vez localizados los datos anormales del CSL, se debe evaluar la importancia del elemento dentro del proyecto y el Ingeniero especialista deberá reportar la cantidad de perfiles afectados con la profundidad de la anomalía.

Los resultados de Clase C generalmente necesitan de más evaluaciones, el Ingeniero Especialista debe valorar con el Estructurista el estado de la pila donde generalmente se requerirá la perforación del elemento para obtención de núcleos y posteriormente de inyecciones para el mejoramiento.

### 3.2.6 Tomografía

Aunque los datos de CSL se pueden evaluar para cada configuración de combinación de tuberías, el mejor criterio de ingeniería se obtiene al revisar todas las configuraciones disponibles en combinación. Si el defecto tiene la misma profundidad en todas las secciones, está claro que el defecto se extiende por toda la sección y se requiere una acción correctiva.

No obstante, algunas pruebas de CSL revelan defectos en algunos perfiles, pero no en todos, lo que hace necesario determinar la extensión lateral y la localización del defecto.

Debido a que la resistencia del concreto está relacionada con la velocidad de onda del concreto, la determinación de la velocidad de onda en cada punto del pozo puede ayudar a evaluar la aceptabilidad de este. La gravedad de un defecto local, definido por la velocidad de la onda del concreto, puede evaluarse tanto por su magnitud como por su extensión lateral con mayor facilidad mediante tomografía.

Los datos de los tiempos de llegada de todos los perfiles, la localización de cada sonda para cada registro de señal y la geometría del tubo puede introducirse en un único análisis tridimensional.

PDI-TOMO cuenta con una herramienta de imágenes de tomografía 3D (*Tomographi Software*) que complementa la prueba CSL. Con la tomografía se analiza las velocidades de onda, obtenidas de los datos del tiempo de llegada de los escaneos de todos los tubos, esto permite obtener un mapa de velocidad de las ondas en toda la pila.

Dado que la resistencia del concreto está relacionada con la velocidad de la onda, este análisis es útil en los casos en que el análisis con CSL revelan un defecto, pero no da una idea precisa de su alcance.

Para obtener resultados concluyentes de la tomografía se requiere la instalación de tubos cada 30 cm del diámetro de la pila. Adicionalmente se deben probar todos los caminos de viaje de la onda (perímetro, mayores y menores diagonales).

Si se detecta un defecto en campo, se debe probar todas las combinaciones posibles y se deben ejecutar barridos con las sondas desplazadas hasta 30 cm, esto ayuda a tener más información para la generación de la tomografía.

En la Figura 35 se presentan resultados de una pila ensayada donde se detectaron defectos en distintas profundidades y se realizó el análisis con tomografía para ver la extensión lateral del defecto.

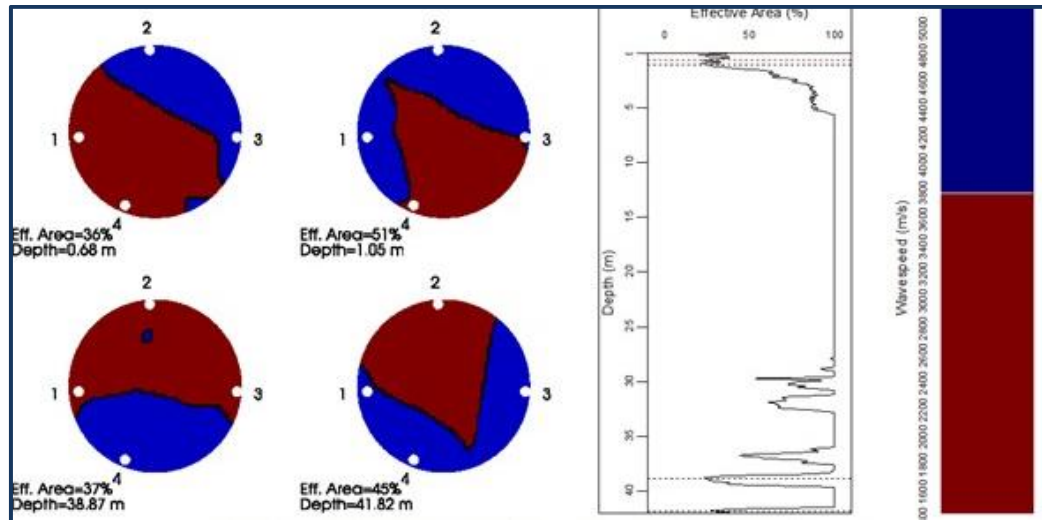


Figura 35. Tomografía ejecutada para una pila con defectos

### 3.2.7 Limitaciones

Una de las principales limitaciones de la prueba CSL, es que los tubos de auscultación deben colocarse previo al colado de la pila. Adicionalmente, se debe garantizar el contacto entre el tubo y el concreto para obtener una buena interpretación de los registros de cascadas obtenidos. La integridad y continuidad del elemento sólo se puede evaluar entre los tubos de auscultación y cuando los resultados son complicados o no concluyentes, la evaluación requiere de mucha experiencia y criterio profesional.

## CAPÍTULO 4. CASOS PRÁCTICOS

En este capítulo se presenta la aplicación de las pruebas PIT y CSL dentro del Valle de México. Para la ejecución de las pruebas en campo se seleccionaron cuatro obras distribuidas en las tres zonas geotécnicas donde actualmente se proyecta la construcción de edificios habitacionales y de uso educacional, con distintas profundidades de desplante y todas con soluciones de cimentaciones con pilas hasta la capa resistente.

Las Normas Técnica Complementarias para Diseño y Construcciones de Cimentaciones (NTC-DCC, 2017) establecen la investigación del suelo dependiendo de la zona geotécnica en la que se pretende construir. La Ciudad de México se divide en tres zonas con las siguientes características generales:

- Zona I: Lomas, formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos.
- Zona II: Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros.
- Zona III: Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresible, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son en general medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales, con espesores superiores a 50 m.

Debidos a la variación que se presenta en la secuencia estratigráfica en todo el Valle de México se plantea la necesidad de conocer el comportamiento de las

cimentaciones profundas en las zonas geotécnicas, para observar los niveles de afectación que se tiene en los registros obtenidos con las pruebas de integridad.

En la Figura 36 se presenta el mapa de zonificación geotécnica de las NTC-DCC, 2017, con la ubicación de las obras donde se tienen los casos de estudio.

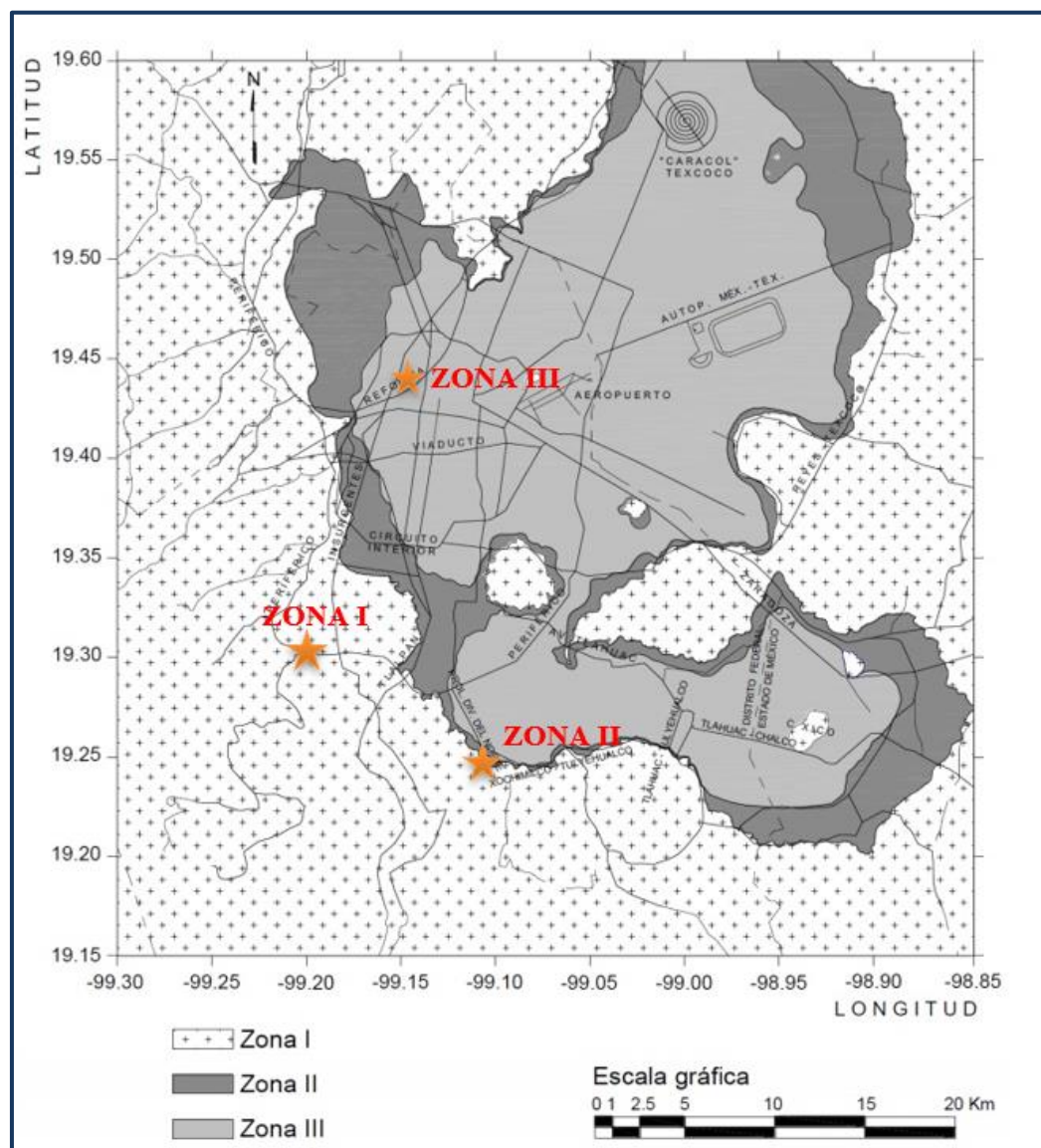


Figura 36. Ubicación de los casos de estudio dentro del mapa de zonificación geotécnica del Valle de México (NTC-DCC, 2017)

Adicionalmente el proceso constructivo de las pilas afecta de manera directa a la calidad y continuidad de los elementos. Contar con el equipo adecuado para la zona a perforar, garantizar la verticalidad de la pila, tener un control de la mezcla para la formación del lodo bentónico, vigilar el proceso del armado de la pila y principalmente el colado, ayudará de manera eficiente a la calidad con la que quedará la pila.

Por este motivo, contar con la información de campo del colado de los elementos ayuda a interpretar con mayor certeza las pruebas de integridad.

Los factores mencionados anteriormente intervienen de manera directa en los registros obtenidos en campo y en su interpretación. Por tal motivo se estudiará de manera detallada la influencia de estos en los ensayos PIT y CSL.

A continuación, se presentan los casos de estudios distribuidos dentro la zonificación geotécnica del Valle de México.

#### 4.1 Casos de estudio en zona geotécnica I (Lomas)

La zona geotécnica de Lomas de la Ciudad de México se caracteriza por presentar una gran complejidad en sus condiciones geológicas y geotécnicas. La construcción de edificaciones con cimentaciones profundas en esta zona no es común, ya que se enfrentan a diversos retos debido a las características del suelo. Sin embargo, en algunos casos se han construido pilas para sostener estructuras, principalmente debido a la presencia de oquedades y rellenos no controlados que pueden provocar asentamientos diferenciales.

Por lo tanto, la construcción de cimentaciones profundas en la zona de Lomas de la Ciudad de México requiere de un análisis detallado de las condiciones del subsuelo y un diseño estructural adecuado para garantizar la seguridad y estabilidad de las edificaciones.

La cantidad y tipo de pruebas de integridad en esta zona son limitadas. En este apartado se presentarán las pruebas de integridad de impacto de baja deformación y Cross

Hole Ultrasonico de mayor relevancia en una obra ubicadas en la Alcaldía Miguel Hidalgo de la Ciudad de México.

El proyecto consiste en la construcción de una estructura de 17 niveles. El sistema de cimentación está compuesto por diez pilas de diámetro y profundidad variable. Durante la construcción de la cimentación el equipo de Sísmica de Suelos realizó la supervisión del proceso constructivo de los elementos.

Para evaluar la calidad y continuidad de los elementos de cimentación se realizaron PIT en diez pilas. Para la ejecución de las pruebas se generaron pequeñas perturbaciones mediante impactos de martillos asentados junto al sensor. Las vibraciones producidas por las pequeñas perturbaciones viajan a través del concreto en dirección vertical y son registradas en el punto de medición donde se encuentra el acelerógrafo. En la Figura 37 se presenta algunas imágenes durante los trabajos ejecutados en campo.



Figura 37. Equipo y ejecución de la prueba de integridad en pilas

De las diez pruebas de integridad ejecutadas se describirán dos pilas que fueron clasificadas como cuestionables y que se ensayaron adicionalmente con CSL.

#### 4.1.1 Pila 8-A

La pila 8-A tiene un diámetro de 100 cm y una longitud efectiva de 21.5 m, siendo el volumen real de colado de 18.5 m<sup>3</sup>. Fue construida en una estratigrafía compuesta en los primeros cuatro metros por un relleno limo arenoso, seguido de una capa de arena gruesa poco limosa con gravas de 8.0 m de espesor y una resistencia a la penetración estándar de 30 a más de 50 golpes. Posteriormente, se encuentra una capa de limo de color café con más de 50 golpes en SPT.

La pila fue sometida a la prueba PIT, donde se detectó una anomalía a los 13.0 m de profundidad en el análisis del dominio del tiempo. En el análisis en el dominio de la frecuencia para una velocidad de 3,400 m/s y una amplitud de 129.3 Hz se obtuvo una longitud del elemento de 13.1 m. Los registros obtenidos en ambos análisis se presentan en la Figura 38.

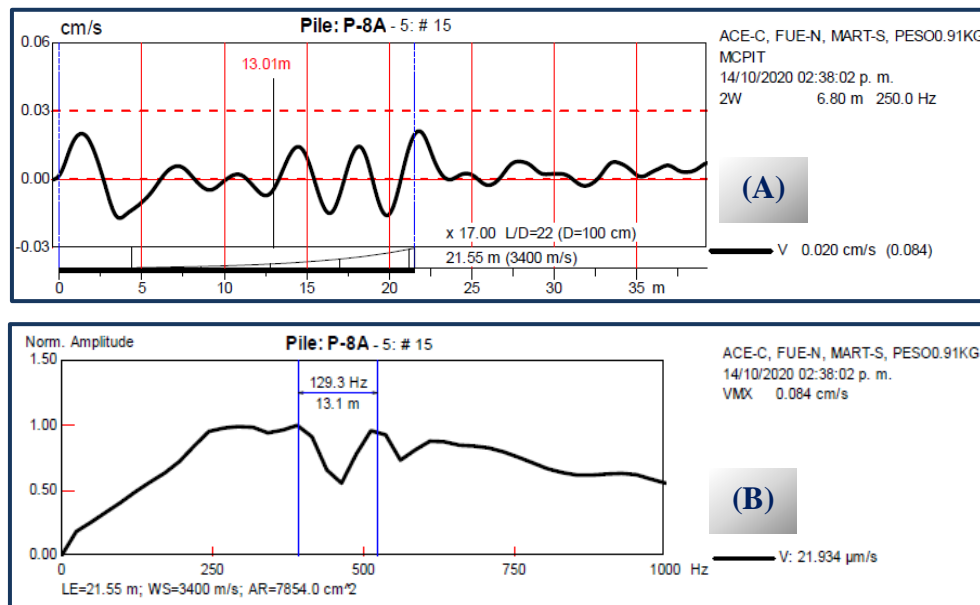


Figura 38. (A) Análisis en el dominio del tiempo (B) Análisis en el dominio de la frecuencia obtenidos para la pila 8A

El registro obtenido en el análisis en el dominio del tiempo muestra un ensanchamiento cerca de la cabeza de la pila y posteriormente a los 5.0 m se da la recuperación del diámetro nominal. La integridad del elemento sólo se puede visualizar hasta los 13.0 m de profundidad donde se da un pulso positivo de la misma amplitud del pulso inicial.

Por los registros obtenidos y aplicando la clasificación de Rausche & Goble, 1979, se puede clasificar como *PDx* donde el registro muestra un fuerte reflejo correspondiente a una importante reducción en la sección de la pila o una disminución en la calidad del concreto.

La supervisión de la obra indicó varias deficiencias en el proceso constructivo de esta pila. En el reporte emitido señala la introducción del acero con mucha antelación, por lo que no se pudo verificar la profundidad de desplante y no se determinó revenimiento de la última olla de concreto. Adicionalmente, cerca de los 5.0 m hasta los 14.0 m de profundidad el perfil estratigráfico reporta un estrato de arena con grava, lo que facilita la contaminación del concreto por caídos. El poco control de los procesos constructivos y la falta de medidas preventivas como el encamisado para zonas con estratos muy arenosos intervienen en la construcción de elementos de cimentación que no cumplen con los parámetros de diseño. En la Figura 39 se presenta el perfil estratigráfico, el análisis en el dominio de tiempo, el volumen teórico y volumen real de la pila 8-A.

Adicionalmente, en la Figura 40 se presenta un modelo teórico 2D de la pila, partiendo del cambio de impedancia a lo largo de la sección transversal del elemento. Como se puede observar la reflexión positiva que se da a los 13.0 m de profundidad tiene una amplitud importante casi igual al pulso inicial, debido a esto sólo es posible modelar el elemento hasta esa profundidad, posterior a ese defecto es difícil concluir el estado y la integridad del elemento.

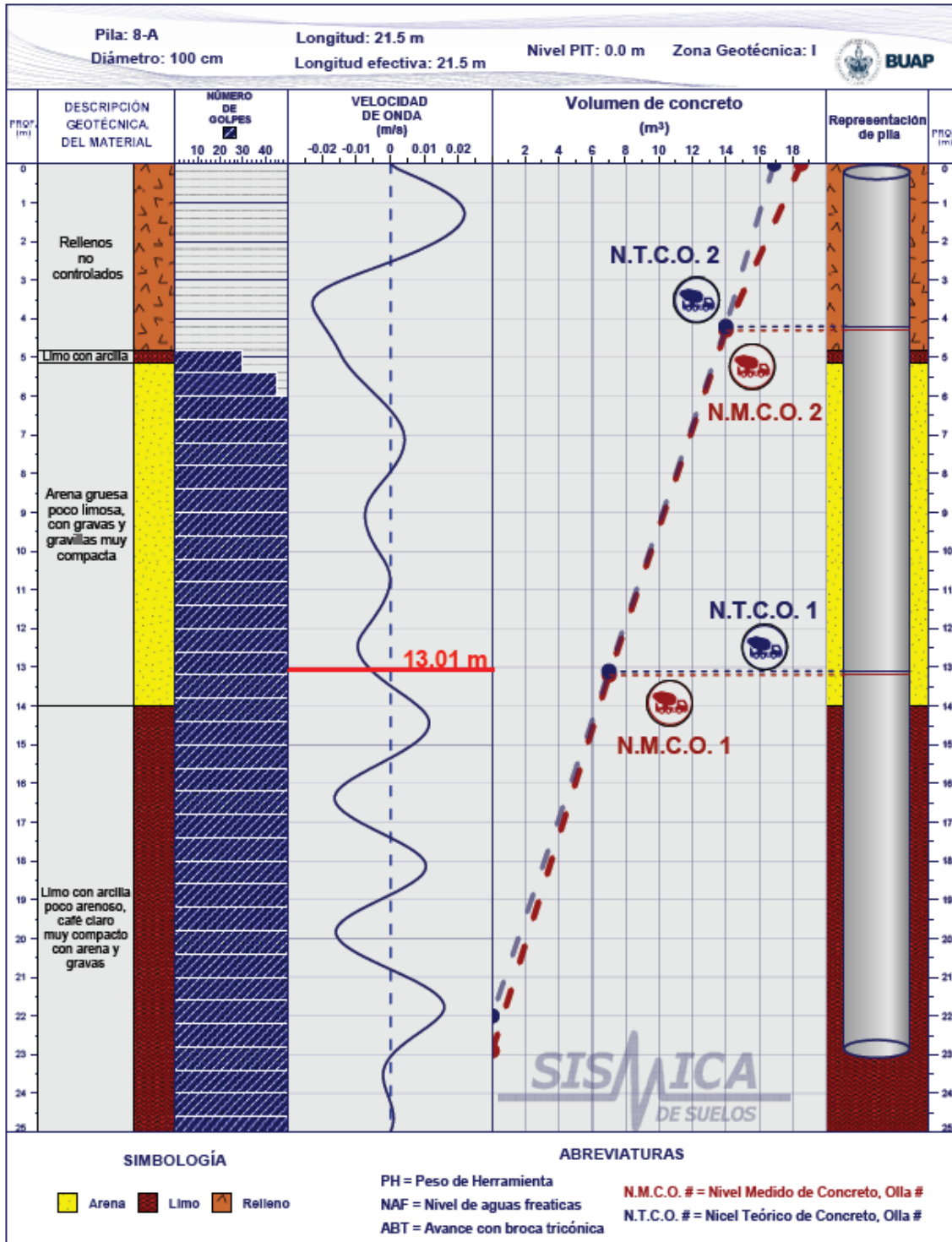


Figura 39. Perfil estratigráfico, análisis en el dominio del tiempo y relación entre el volumen teórico y real de la pila 8-A

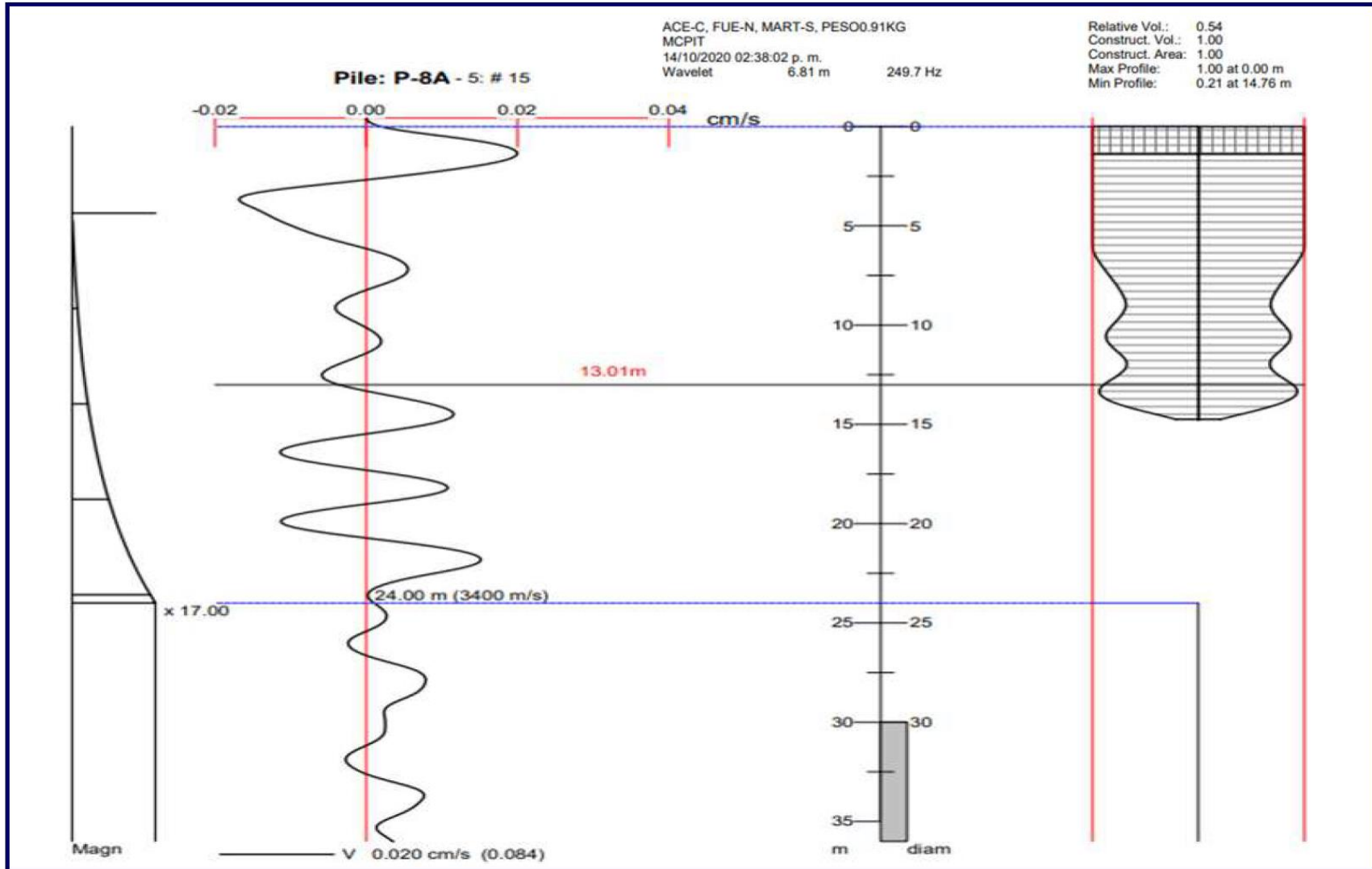


Figura 40. Modelo teórico de la pila 8A

Para verificar la anomalía detectada en la prueba PIT se procedió a la ejecución de un Cross Hole Ultrasónico. La prueba consiste en introducir en uno de los tubos la sonda emisora que transmite una señal de alta frecuencia y que viaja a través del concreto hasta ser detectada por la sonda receptora ubicada en otro de los tubos. El barrido se realizó desde la punta hasta la cabeza de la pila con un intervalo de muestreo continuo de 5 cm. Este procedimiento se repitió para obtener los cinco perfiles restantes de la pila. En las imágenes de la Figura 41 se presenta el equipo y algunas actividades ejecutadas durante la prueba.



Figura 41. Equipo y ejecución del Cross Hole Ultrasónico

Los resultados obtenidos de la prueba CSL se presentan en las Figuras 42 a 44, donde se muestran los seis perfiles obtenidos con el perfil de la velocidad de onda, la atenuación en la energía y el diagrama de cascada del pulso ultrasónico.

Se destaca que la velocidad promedio registrada mediante el CSL para la pila 8A fue de 3,456 m/s indicando un concreto de calidad media.

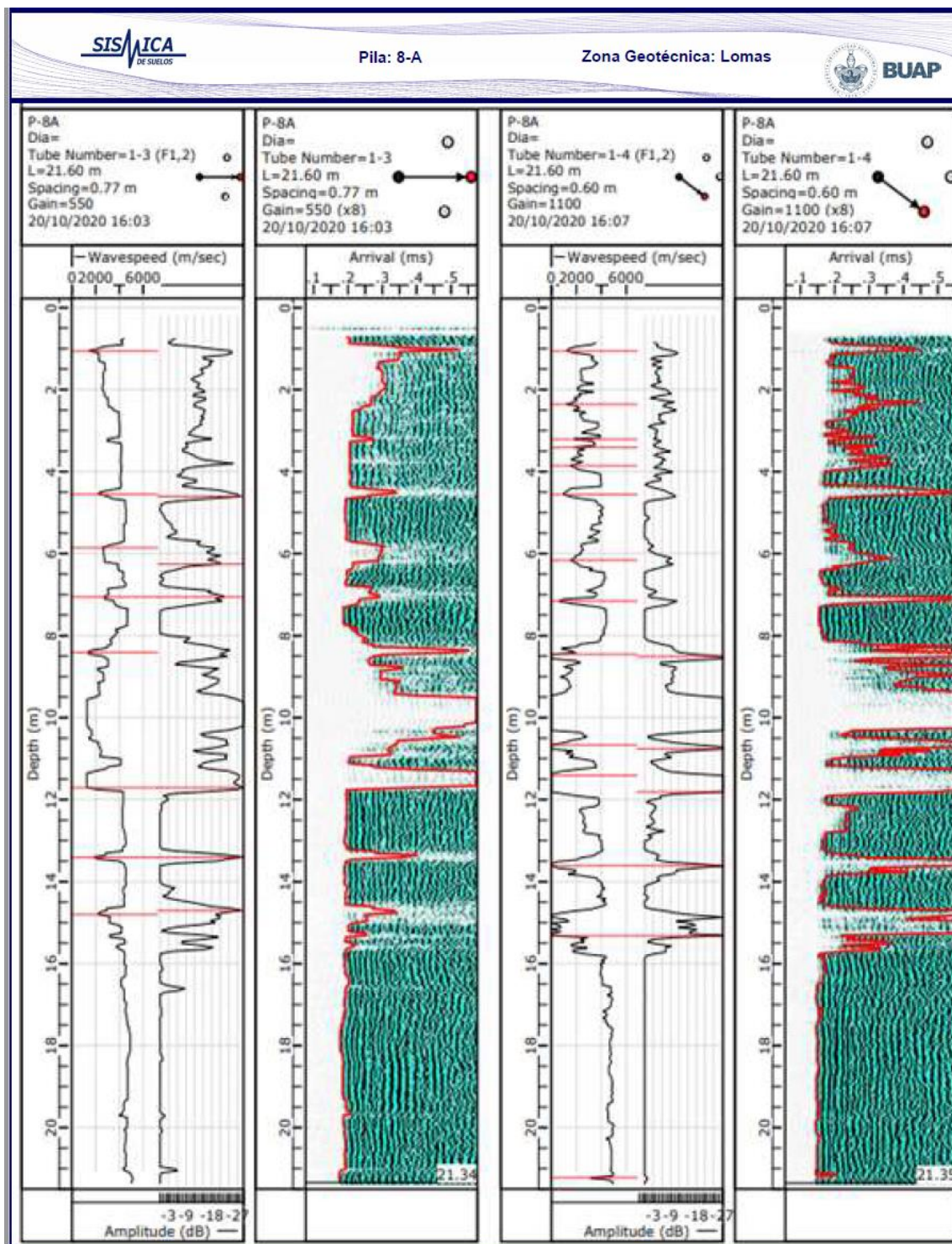


Figura 42. Perfiles 1-3 y 1-4 obtenidos del CSL para la pila 8-A

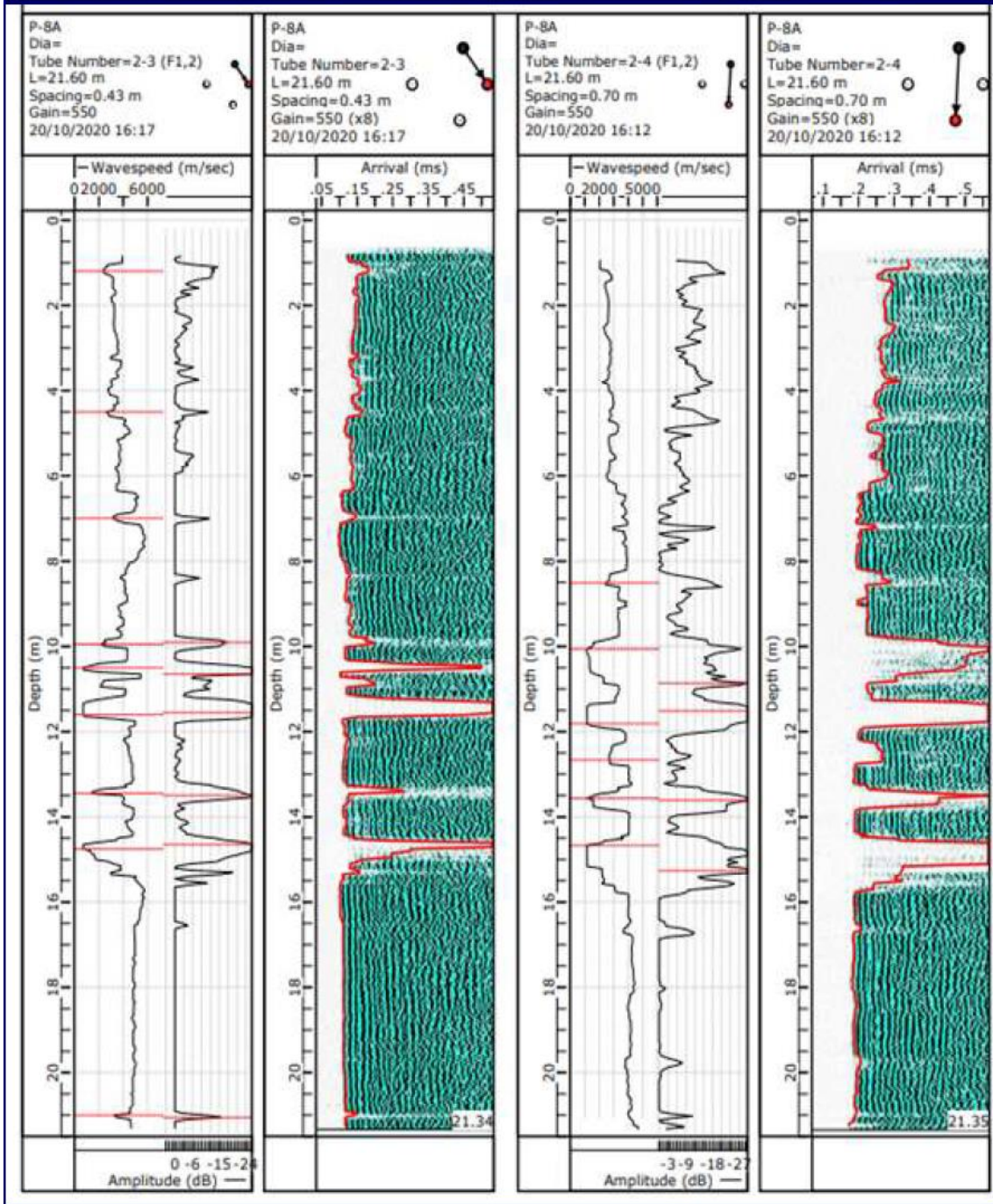


Figura 43. Perfiles 2-3 y 2-4 obtenidos del CSL para la pila 8-A

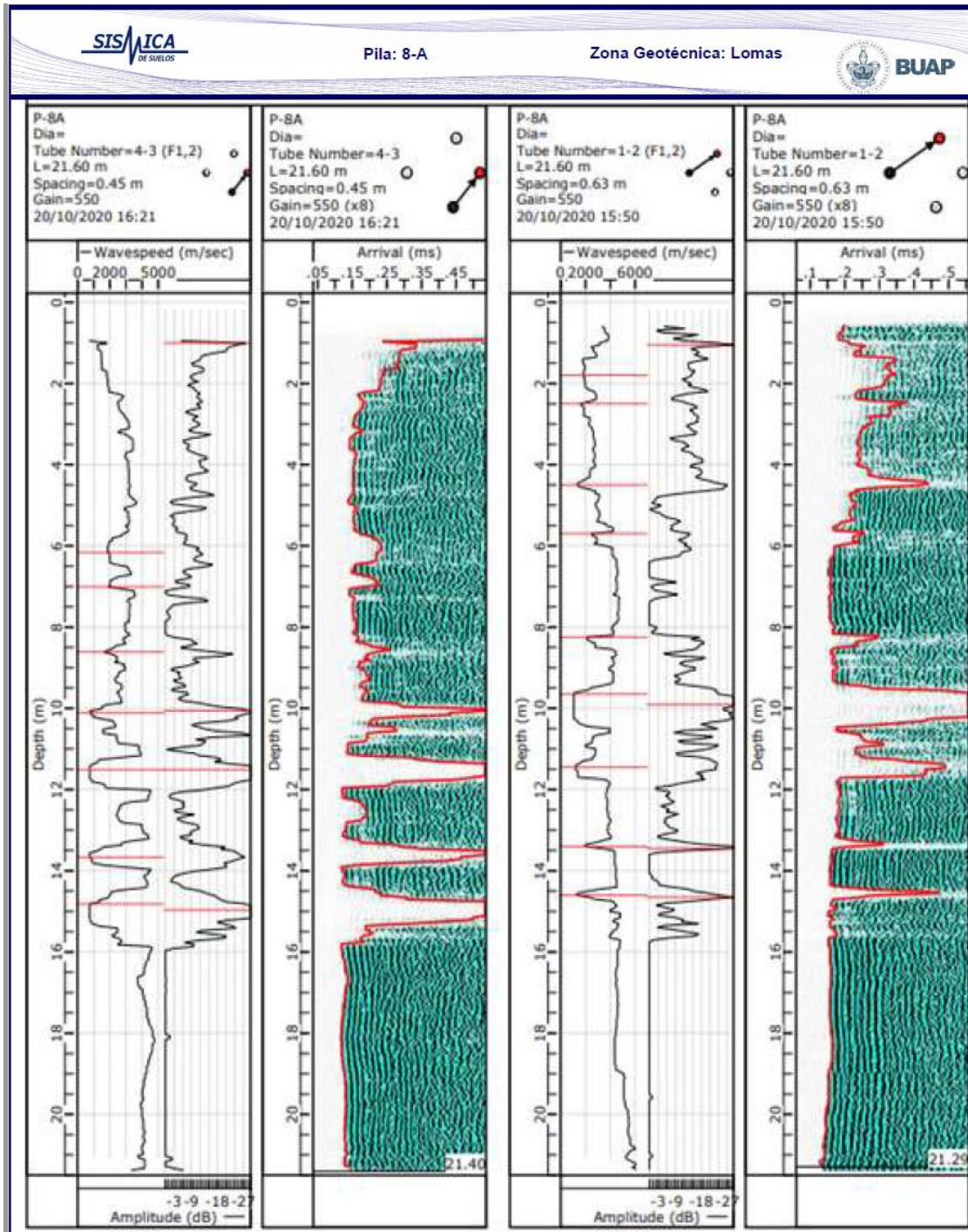


Figura 44. Perfiles 4-3 y 4-4 obtenidos del CSL para la pila 8-A

La Tabla 6 muestra los resultados de las anomalías detectadas, incluyendo el número de perfil, el inicio y fin, el pico de la anomalía, la atenuación de la energía medida en decibeles y el aumento en el FAT.

Tabla 6. Anomalías detectadas con el CSL en la pila 8-A

Perfil	Inicio (m)	Fin (m)	Pico de defecto (m)	Atenuación de la energía (Db)	FAT
4-3	0.96	1.46	1.01	9.0dB	
1-2	1	1.45	1.05	9.1dB	34%
1-3	0.95	2.4	1.05		97%
1-4	0.96	1.11	1.06		85%
2-3	1.05	1.6	1.2		27%
1-4	2.11	2.51	2.36		84%
1-2	2.45	3.05	2.5		47%
1-4	3.21	3.21	3.21		32%
1-4	3.41	3.41	3.41		32%
1-4	3.51	3.96	3.86		60%
2-3	4.35	4.6	4.5		23%
1-2	4.1	4.7	4.5		88%
1-4	4.41	4.66	4.56		>100%
1-3	4.31	4.66	4.61	10.1dB	67%
1-2	5.7	5.95	5.7		27%
4-3	5.71	6.46	6.16		47%
1-4	5.76	6.31	6.16		72%
1-3	5.66	6.46	6.25	9.7dB	49%
2-3	6.9	7.1	7		22%
4-3	6.76	7.06	7.01		37%
1-3	6.86	7.21	7.05	9.7dB	28%
1-4	7.11	7.26	7.16		>100%
1-2	8.25	8.55	8.25		76%
1-3	8.25	8.55	8.4		>100%
2-4	8.26	8.56	8.51		29%
1-4	8.16	10.31	8.51	44.5dB	>100%
4-3	8.46	8.86	8.61		49%
1-2	8.7	10.5	9.9	10.1dB	>100%
2-3	9.8	10.1	9.9	9.0dB	52%
4-3	9.56	10.87	10.06	11.7dB	>100%
2-3	10.35	11	10.65	14.9dB	>100%
1-4	10.51	10.97	10.77	40.8dB	>100%
2-4	9.81	10.86	10.86	10.2dB	>100%
1-2	10.65	11.7	11.45		>100%
2-4	11.11	12.01	11.51	14.0dB	>100%
4-3	11.17	12.02	11.52	14.3dB	>100%
2-3	11.2	11.75	11.55	15.3dB	>100%
1-3	8.75	10.35	11.7	12.2dB	>100%
1-4	11.27	11.92	11.82	42.8dB	>100%
2-4	12.31	12.76	12.66		23%
1-3	13.25	13.55	13.4	14.0dB	84%
1-2	13.25	13.45	13.45	12.7dB	70%
2-3	13.25	13.75	13.5	12.4dB	>100%
2-4	13.32	13.82	13.62	11.4dB	>100%
1-4	13.42	13.87	13.62	44.2dB	>100%
4-3	13.32	13.92	13.67		>100%
2-3	14.05	15.15	14.65	14.1dB	>100%
1-2	14.4	15.7	14.65	14.1dB	>100%
1-3	14.45	15.1	14.7	14.5dB	73%
4-3	14.32	15.87	14.97	16.3dB	>100%
2-4	14.42	15.82	15.27	16.5dB	>100%

Los resultados de la prueba de CSL realizada en la pila 8-A (Tabla 7), indican que se han detectado aumentos en el tiempo de llegada de la onda a varias profundidades de los perfiles obtenidos. La primera zona donde se logró identificar una anomalía se ubica desde los 8.7 hasta los 10.8 m, donde se encontró una pérdida de señal de 9 a 48.8 dB en los perfiles 1-4. Además, la mayoría de los perfiles presentan un tiempo de llegada (FAT) mayor al 100%, exceptuando el perfil 2-3 que tiene un FAT de 52%. Dado el espesor afectado con pérdida de señal, es posible que esta anomalía se deba a la pérdida de contacto entre el tubo y el concreto. Además, desde los 13.2 hasta los 13.8 m se tiene de nuevo un defecto que se visualiza en los seis perfiles, con atenuación de la energía que varía de 11.4 a 44.2 dB y un FAT entre 70 y 100%. El mismo comportamiento descrito se observa entre los 14.0 y 15.8 m de profundidad, donde se registran decibeles mayores a 14 dB y una atenuación de la energía mayor al 100%. Esto sugiere que la misma anomalía se extiende a lo largo de esta sección de la pila. En la Figura 45, se presenta una comparativa entre los diagramas de cascada de los seis perfiles obtenidos, donde se identifican en recuadros de colores las zonas con anomalías.

En conclusión, los resultados de la prueba de Cross Hole Ultrasónico en la pila 8-A indican la presencia de múltiples anomalías en diferentes profundidades, lo que puede indicar una falta de continuidad o un problema de calidad en el concreto en esas secciones de la pila. Con lo descrito anteriormente y utilizando los criterios de clasificación de *Pile Dynamics, Inc* el elemento de cimentación se puede clasificar como P/A con defecto. Si se utiliza los criterios propuestos por *Deep Foundations Institute (DFI)* la pila sería clase C una pila con defectos críticos.

En los resultados obtenidos en el Cross Hole Ultrasónico para la prueba realizada en la pila 8-A, se identificaron varias anomalías en diferentes profundidades y en múltiples perfiles. Sin embargo, es importante destacar que sólo una de estas anomalías fue detectada tanto en el CSL como en la PIT, lo que indica que es una anomalía de mayor importancia y puede requerir una atención especial en términos de inspección y reparación.

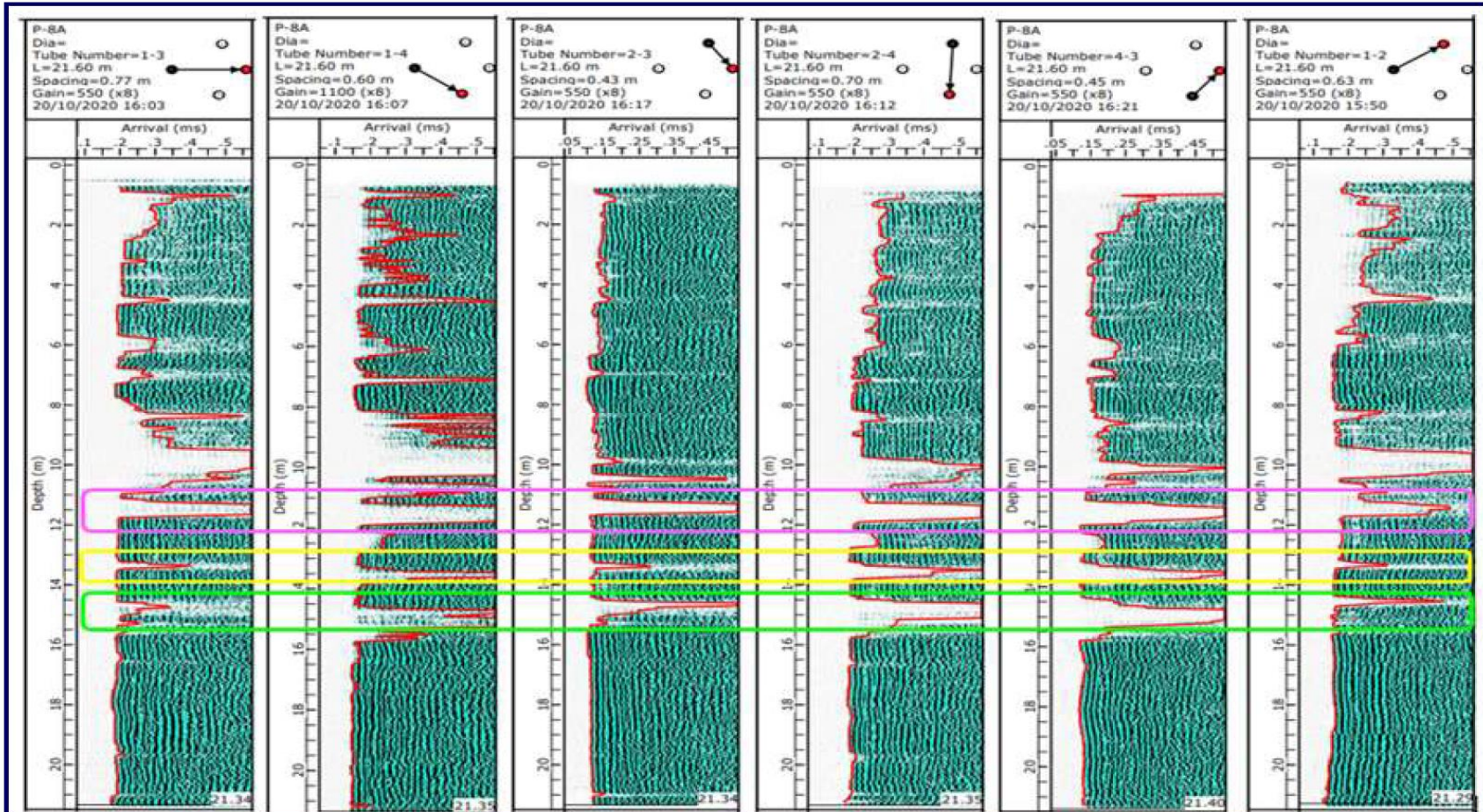


Figura 45. Registros de cascadas obtenidos de los perfiles de la prueba de CSL para la pila 8-A, los recuadros de colores enmarcan las zonas donde se tienen los defectos y fallas de mayor importancia en la pila

También se observó que las anomalías detectadas antes de los 13.0 m no fueron identificadas en la prueba de Integridad de Pila (PIT). Esto podría deberse a que la técnica utilizada en la PIT, que se basa en la medición de la impedancia de la pila, no es tan sensible a defectos en la zona superior de la pila como lo es la técnica de CSL, que se enfoca en la propagación de ondas ultrasónicas en el concreto de la pila. Se destaca que cada técnica tiene sus limitaciones y fortalezas y se deben utilizar en conjunto para obtener una evaluación más completa de la integridad de la pila.

La tomografía obtenida a través del Cross Hole Ultrasónico (CSL) permitió analizar cuatro secciones importantes de la pila a las profundidades 10.7, 11.3, 13.4 y 14.73 m, partiendo de una velocidad mínima de análisis de 3,200 m/s. En las cuatro secciones analizadas no se tiene un área efectiva, lo que indica la presencia de defectos críticos en la pila. Sin embargo, a partir de los 16.0 m de profundidad se tiene un área efectiva del 100%, como se muestra en el gráfico que relaciona el área efectiva y la profundidad (Figura 46). Además, se obtuvieron imágenes en 3D y 2D que permiten visualizar de manera clara y precisa la distribución de las anomalías y los defectos en la pila. Estas imágenes permiten identificar la forma, tamaño y ubicación de las anomalías, lo que facilita la interpretación de los resultados del CSL como se presenta en la Figura 46.

#### 4.1.1 Pila P-9A

La pila P-9A presenta una longitud de proyecto de 21.5 m y un diámetro de 110 cm. Durante su proceso constructivo, la supervisión indicó que no se realizó un seguimiento topográfico durante las maniobras del izaje y colado. Asimismo, se menciona que el acero se introdujo con anticipación, lo que imposibilitó registrar su longitud total y penetración en el terreno. En cuanto al reporte de campo del colado, se utilizó un total de tres ollas para un volumen final de concreto de 18.0 m<sup>3</sup> y una altura final de concreto de 21.0 m.

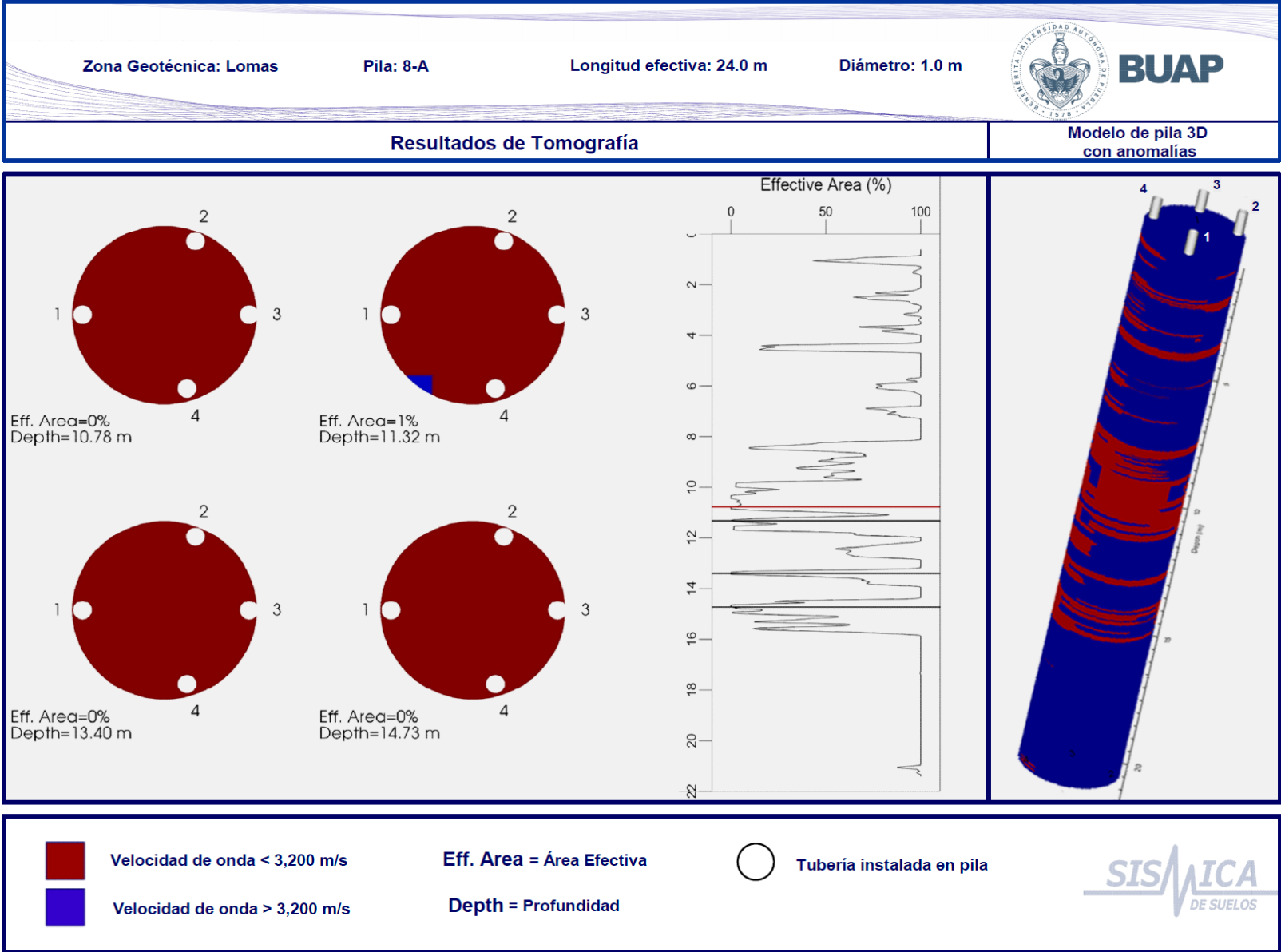


Figura 46. Tomografía 2D y 3D de la pila 8-A

Es importante destacar que la falta de seguimiento topográfico durante la construcción de la pila puede generar algunas incertidumbres en cuanto a su integridad estructural y, por tanto, es fundamental realizar pruebas no destructivas para evaluar el estado del elemento.

Durante el mes de octubre del año 2021 se llevó a cabo la prueba de integridad en la pila. Los resultados de los análisis realizados en el dominio del tiempo indicaron la presencia de una anomalía a los 13.3 m de profundidad asociada una posible reducción del diámetro nominal y una reflexión positiva posterior que sugiere la finalización del elemento de cimentación a los 21.0 m. Además, se realizaron análisis en el dominio de la frecuencia y se encontró que para una velocidad de 3,700 m/s, la amplitud es de 141.3 Hz, lo que se asocia con una longitud del elemento de 13.1 m. Los registros obtenidos del análisis en tiempo y frecuencia se presentan en la Figura 47.

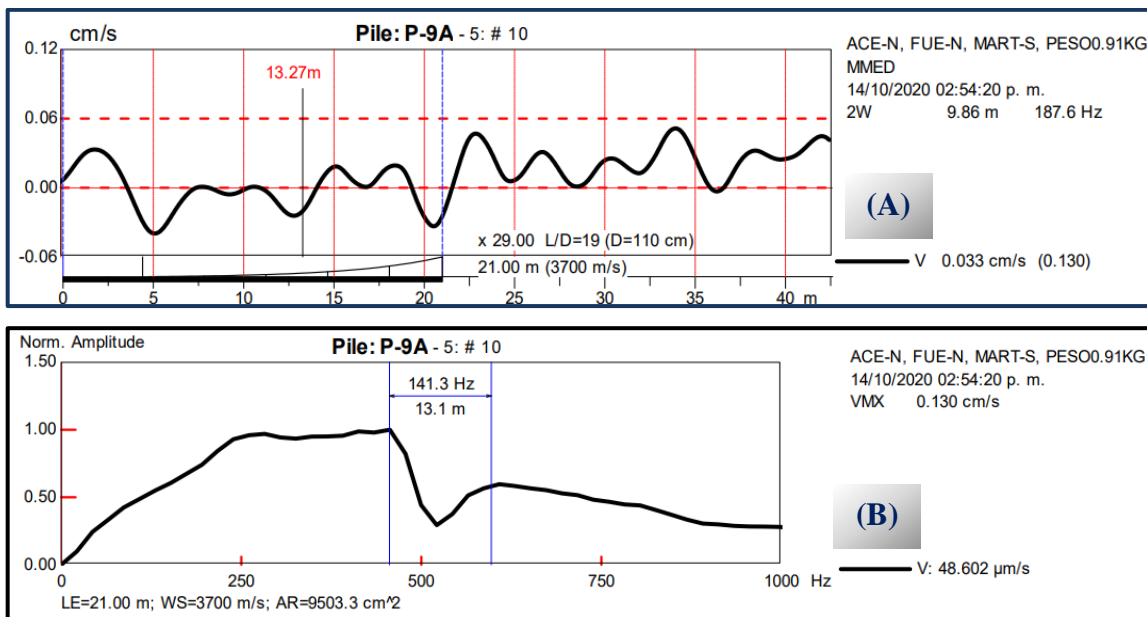


Figura 47. (A) Análisis en el dominio del tiempo (B) Análisis en el dominio de la frecuencia obtenidos para la pila P-9A

La profundidad de la anomalía detectada en el análisis del tiempo en la pila P-9A coincide con la anomalía detectada en la pila 8-A. El estudio de mecánica de suelos reporta entre los 5.0 m y 14.0 m un estrato de arena con gravas muy compacta; sin embargo, si no

se tiene los controles necesarios durante la perforación y la introducción del armado pueden ocurrir caídos que contaminen el concreto y bajen la calidad de este. En la Figura 48 se presenta el perfil estratigráfico, relacionado con el registro en el dominio del tiempo obtenido de la pila y los volúmenes de concreto empleado.

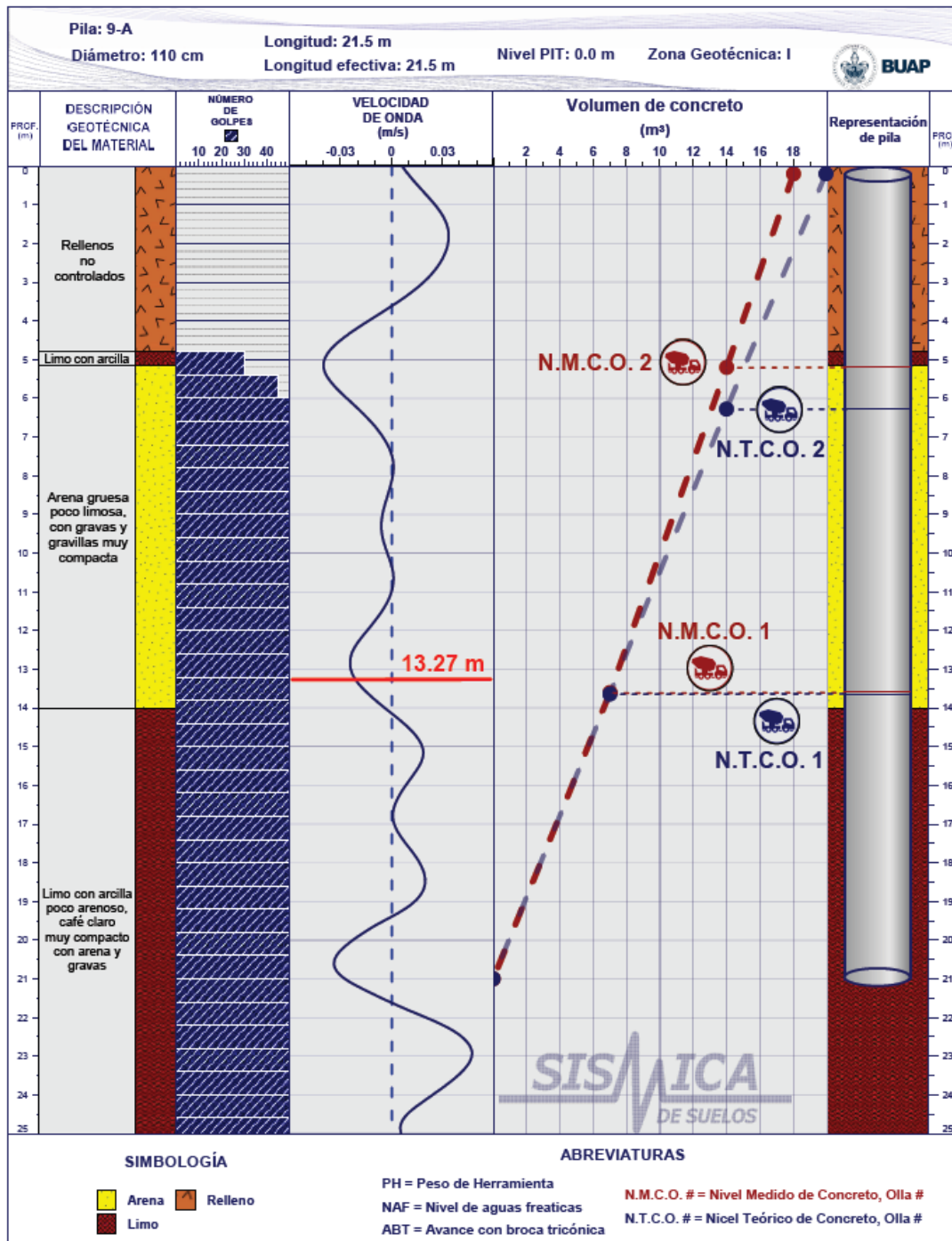


Figura 48. Perfil estratigráfico, análisis en el dominio del tiempo y relación entre el volumen teórico y real de la pila P-9A

Para verificar las anomalías reportadas de la PIT se ejecutó la prueba de CSL donde se siguió el arreglo y distribución de los tubos establecidos en la norma ASTM para la ejecución de esta. En total se obtuvieron seis perfiles, los cuales fueron denominados como 1-3, 1-4, 2-3, 2-4, 4-3 y 1-2. Cada perfil se obtuvo a través de la medición de la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas entre dos tubos instalados en la pila. Los registros de cascada obtenidos durante la prueba llegaron hasta la profundidad de 21.3 m, permitiendo verificar la integridad de la pila y comparar los resultados con los defectos previamente identificados mediante la prueba PIT. Los perfiles obtenidos se presentan las Figuras 49, 50 y 51.

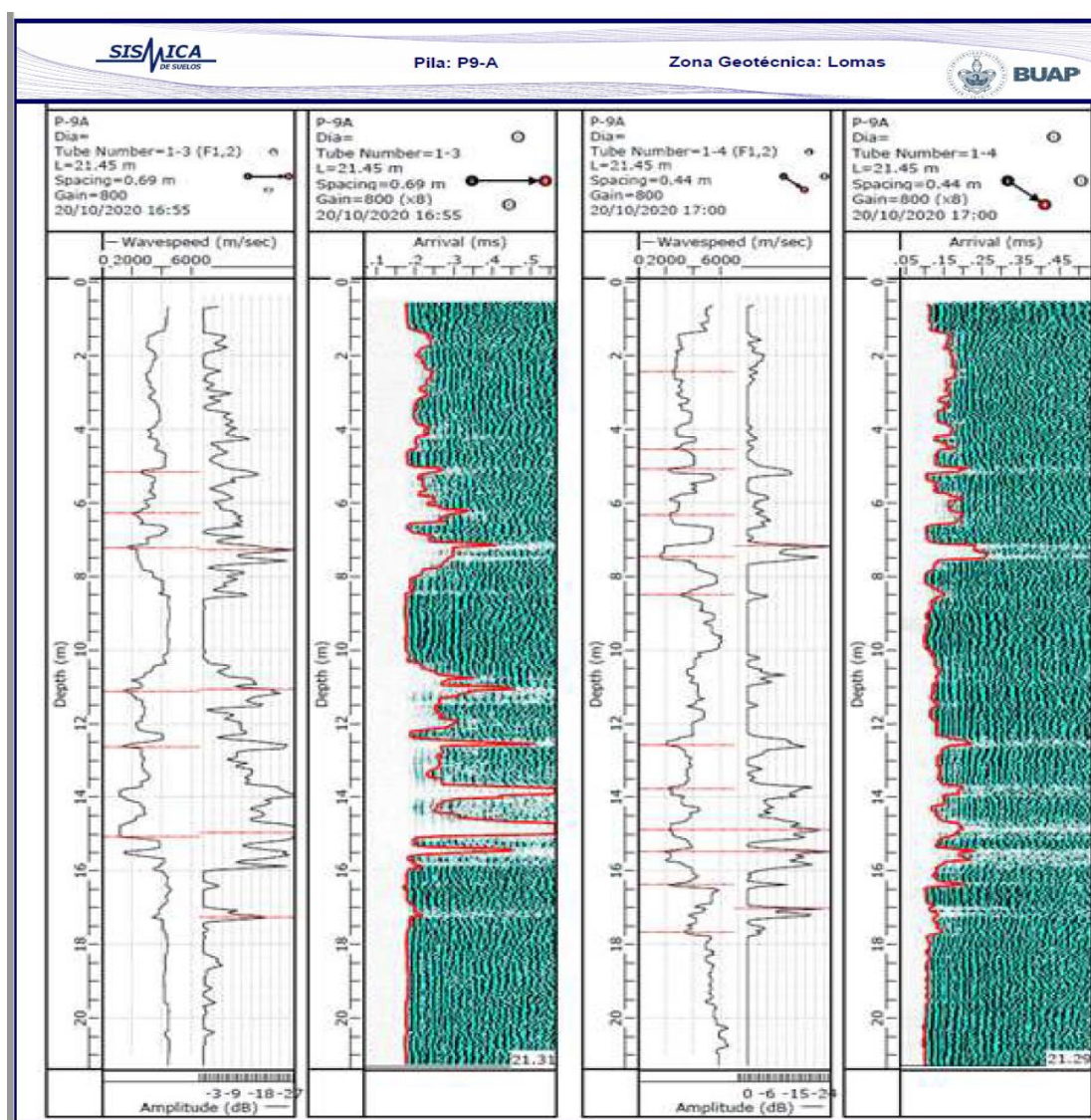


Figura 49. Perfiles 1-3 y 1-4 obtenidos del CSL para la pila P-9A

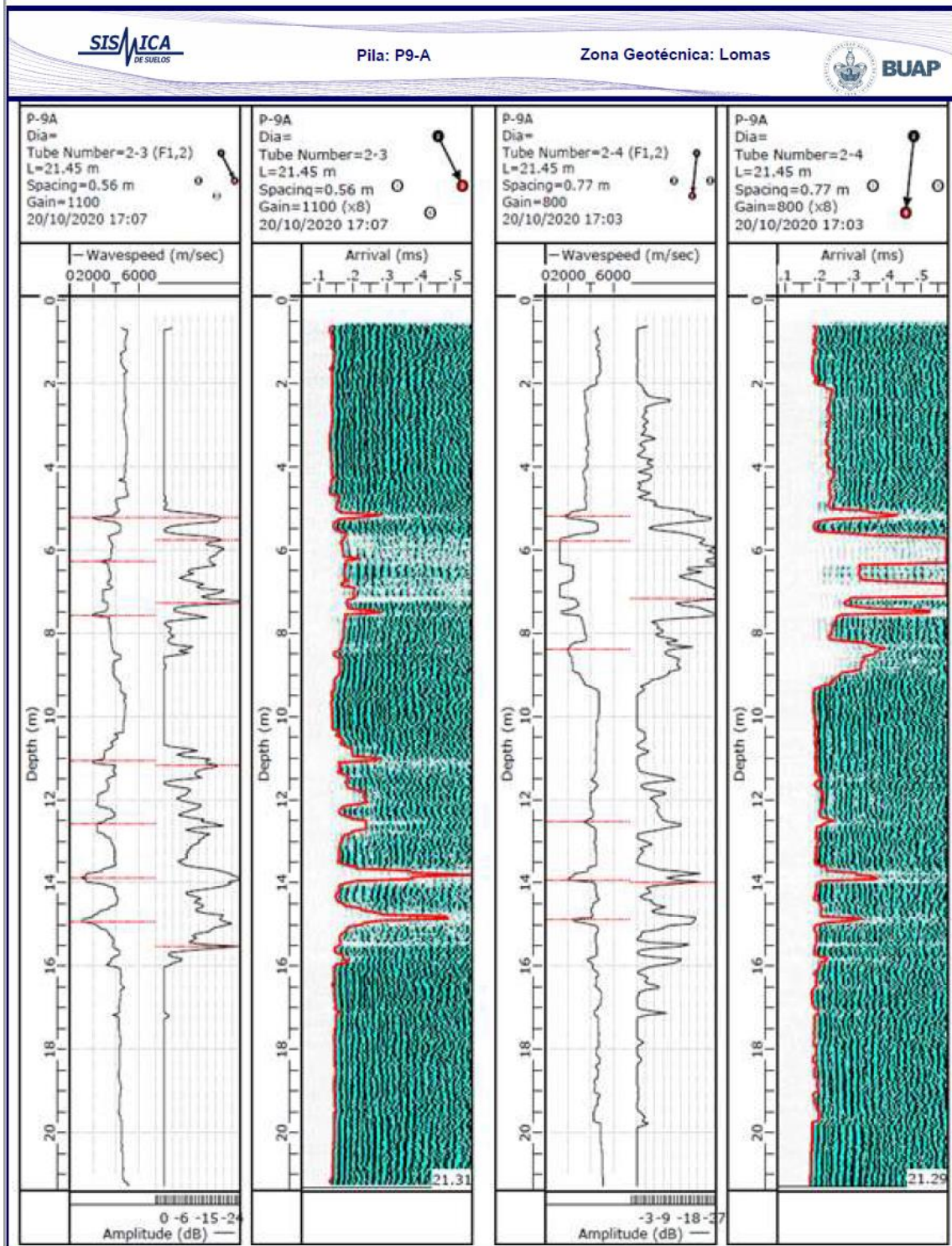


Figura 50. Perfiles 2-3 y 2-4 obtenidos del CSL para la pila P-9A

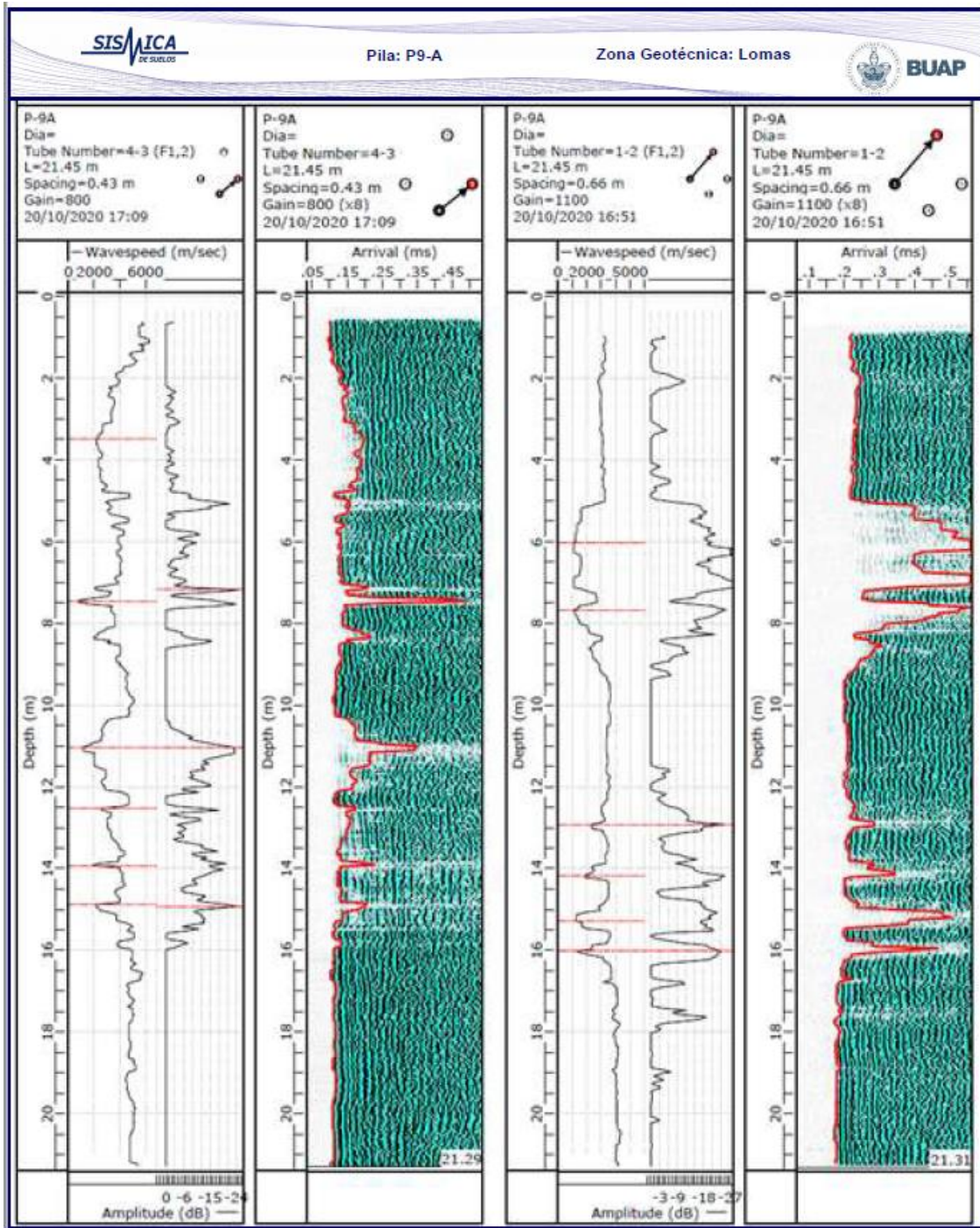


Figura 51. Perfiles 2-3 y 2-4 obtenidos del CSL para la pila P-9A

Los resultados obtenidos de los perfiles de la prueba de CSL en la pila P-9A se presentan numéricamente en la Tabla 7, que contiene información detallada sobre el inicio, fin y pico de los defectos encontrados, así como la atenuación de la energía y el tiempo de llegada de la onda (FAT). La información contenida en esta tabla es

fundamental para la interpretación de los resultados de la prueba de integridad, ya que proporciona una descripción detallada de la ubicación y el tipo de defectos presentes en la pila.

Tabla 7. Anomalías detectadas con el CSL en la pila P- 9A

Perfil	Inicio (m)	Fin (m)	Pico de defecto (m)	Atenuación de la energía (Db)	FAT
1-4	1.43	3.13	2.43		22%
4-3	3.13	4.78	3.48		30%
1-4	4.43	4.53	4.53		23%
1-4	5.08	5.18	5.08		47%
1-3	5.13	5.28	5.17		25%
2-4	4.08	5.28	5.18		86%
2-3	4.78	5.42	5.23	10.5dB	85%
2-3	5.63	6.47	5.78	9.5dB	34%
1-2	5.17	7.17	6.03		64%
1-3	5.92	6.58	6.28		50%
1-4	5.78	6.58	6.33		48%
1-4	7.08	7.63	7.18	13.5dB	>100%
4-3	6.88	7.58	7.18	12.1dB	>100%
2-4	5.63	7.58	7.18	11.0dB	>100%
2-3	6.78	7.38	7.28	14.7dB	68%
1-3	6.97	8.02	7.28	14.7dB	87%
1-2	7.58	8.12	7.67		68%
2-4	8.23	9.23	8.38		51%
1-4	8.28	8.93	8.48		37%
4-3	10.33	12.08	11.03	10.6dB	>100%
1-3	10.42	11.52	11.07	9.7dB	>100%
2-3	10.62	11.12	11.17	9.5dB	62%
4-3	12.53	13.33	12.53		28%
2-4	12.43	12.63	12.53		22%
2-3	12.57	12.87	12.57		24%
1-4	12.38	12.88	12.58		58%
1-3	12.52	13.17	12.62		>100%
1-2	12.37	13.17	12.92	11.1dB	32%
1-4	13.68	13.93	13.78		38%
2-3	13.67	14.02	13.87		>100%
4-3	13.88	13.93	13.93		70%
2-4	13.63	13.98	13.98	9.1dB	82%
1-2	13.92	14.22	14.17		47%
1-4	14.43	15.18	14.88	9.4dB	41%
2-4	14.58	14.98	14.88		63%
4-3	13.38	15.53	14.93	11.0dB	61%
1-3	13.57	14.22	14.97	14.0dB	>100%
1-2	14.92	15.47	15.27	>100%	
1-4	15.43	15.88	15.48	10.6dB	67%
2-3	14.32	15.97	15.52	14.4dB	>100%
1-2	15.82	16.27	16.02	9.1dB	>100%
1-4	16.28	16.43	16.38		58%
1-4	16.98	17.83	17.03	12.4dB	23%
1-3	17.02	17.37	17.27	9.2dB	

La guía de clasificación de *Pile Dynamic* relaciona el porcentaje de aumento del tiempo de llegada de una onda y la reducción de la energía para clasificar la pila en cuatro categorías. Para los perfiles 2.4 y 1-2 se observa una anomalía entre los 5.5 y 7.0 m con un retraso en el tiempo y una pérdida de energía, lo que puede atribuirse a la pérdida de contacto del tubo 2 con el concreto. En cuanto a la anomalía detectada en los seis perfiles entre los 6.8 y 8.1 m, se presenta una reducción de la energía con valores de atenuación que varían desde los 11 dB hasta los 14.7 dB y un valor de FAT que va desde el 68% hasta más del 100%, indicando un defecto en esa sección de la pila.

Para los perfiles 1-3, 2-3 y 4-3 se presenta una falla en el elemento entre los 10.33 y 12.08 m de profundidad. Esta falla se manifiesta mediante una reducción significativa en la energía registrada con valores de atenuación que varían entre 9.5 y 10.6 dB, lo que indica que existe una discontinuidad o pérdida de sección en el elemento de la pila en esa zona. Además, el FAT registrado en esta zona supera el 62%, lo que indica que la velocidad de propagación de la onda se ha visto significativamente afectada por la falla en el elemento.

La última anomalía detectada en la pila, entre los 14.5 y 15.97 m, con atenuación de la energía entre 9.1 y 10.6 dB y FAT mayor al 58%, sugiere una posible falla en el elemento, lo que podría indicar la presencia de una fisura o una sección debilitada en la pila. Es importante considerar que, aunque la atenuación de la energía no es tan significativa como en otras anomalías, el FAT elevado indica que existe una disminución en la velocidad de propagación de la onda en ese punto, lo que podría sugerir un cambio en las propiedades mecánicas del material, como una disminución en la rigidez o una reducción en el diámetro efectivo de la pila.

En la Figura 52 se presenta una comparativa entre los seis registros de cascadas obtenidos del CSL en la pila P-9A, en estos se puede observar rectángulos de colores que resaltan las secciones más afectadas de la pila. Para obtener secciones internas de la pila en las zonas más afectadas y representar la distribución espacial de las velocidades de onda en la pila y la ubicación y dimensiones de las anomalías detectadas se realizó un análisis de tomografía 2D y 3D.

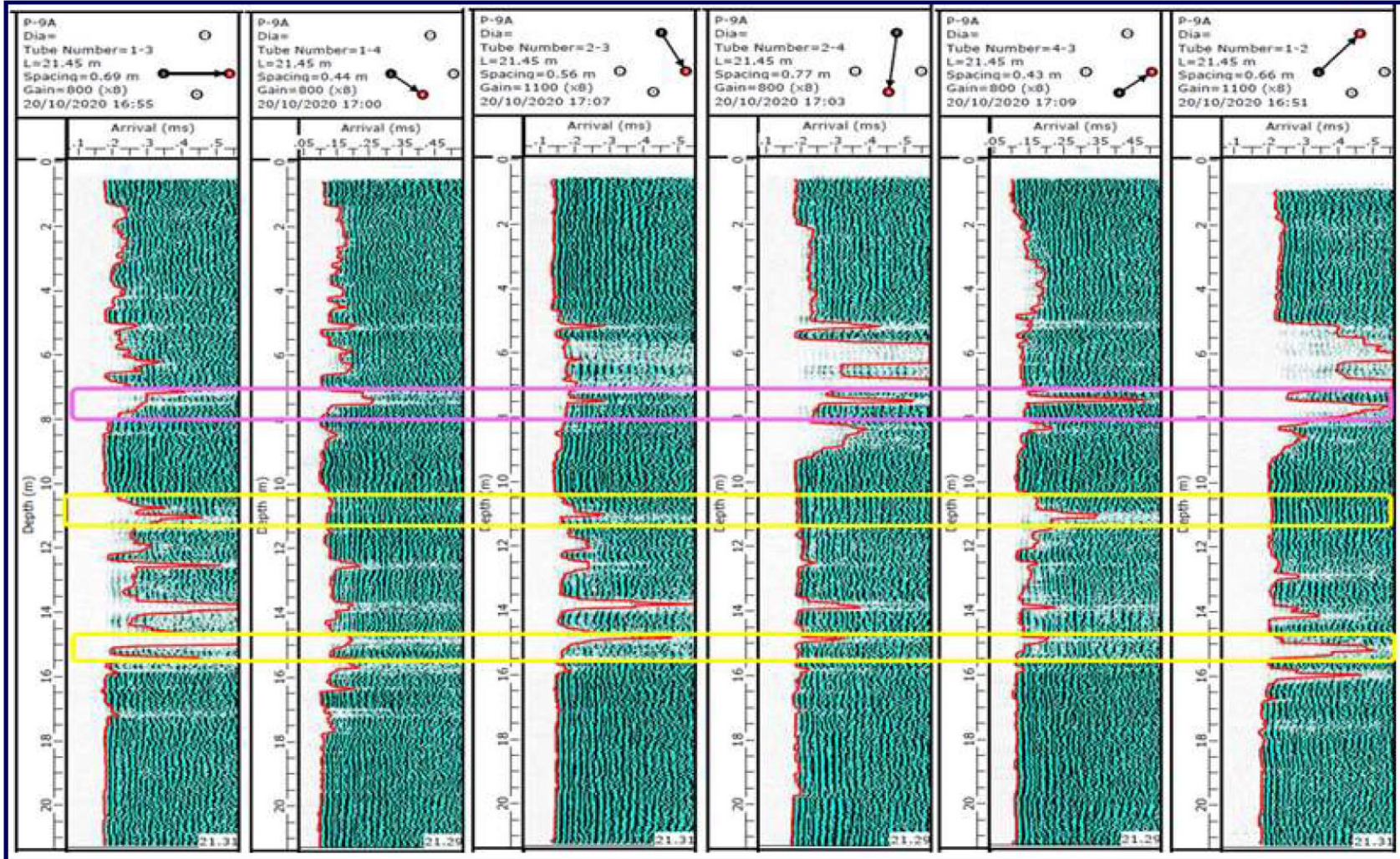


Figura 52. Comparativa de los registros de cascada obtenidos del CSL de la pila P-9A

La tomografía obtenida para la pila P-9A permitió analizar las profundidades más críticas donde se detectaron las anomalías más significativas. Las profundidades analizadas fueron de 7.0 m, 13.93 m, 14.97 m y 15.90 m. En el análisis de la tomografía se utilizó el concepto de área efectiva, que es el porcentaje del área de la sección transversal con velocidad de onda mayor que la velocidad de onda efectiva de 3,556 m/s. Se observó que para todas las profundidades el área efectiva es de 0% lo que indica la presencia de defectos en el concreto. Estos resultados son consistentes con las anomalías detectadas en la prueba de CSL, lo que refuerza la importancia de combinar diferentes técnicas de evaluación para obtener una evaluación más completa y precisa del estado de la pila. En la Figura 53 se presenta gráficamente la tomografía en 2D y 3D analizada para el elemento.

De los resultados obtenidos del PIT y CSL para ambas pilas estudiadas se destaca que varias de las anomalías detectadas en los primeros metros por CSL no se observaron en los registros del PIT. Esta discrepancia puede atribuirse al hecho de que los tubos instalados perdieron contacto con el concreto, lo que resultó en un retraso en el tiempo de llegada y una disminución de la energía en los registros de cascada obtenidos. La anomalía identificada cerca de los 13.0 m de profundidad en la prueba de PIT también se detectó en el CSL. A través del análisis tomográfico, se determinó que entre los 13.0 y 13.8 m, la sección transversal de la pila estaba afectada en toda su área. A partir de los 14.0 m de profundidad, ambas pilas presentaron afectaciones significativas según los registros obtenidos del CSL. Sin embargo, debido a una reflexión positiva significativa a los 13.0 m en la prueba de PIT, no fue posible estudiar la integridad del elemento posterior a esa profundidad, lo que impidió identificar esta anomalía.

#### 4.2 Casos de estudio en zona geotécnica II (Transición)

Durante los años de 2019 a 2021, Sísmica de Suelos ejecutó los estudios para determinar la integridad y calidad de las pilas de cimentación de tres edificios proyectados al sur de la ciudad de México.

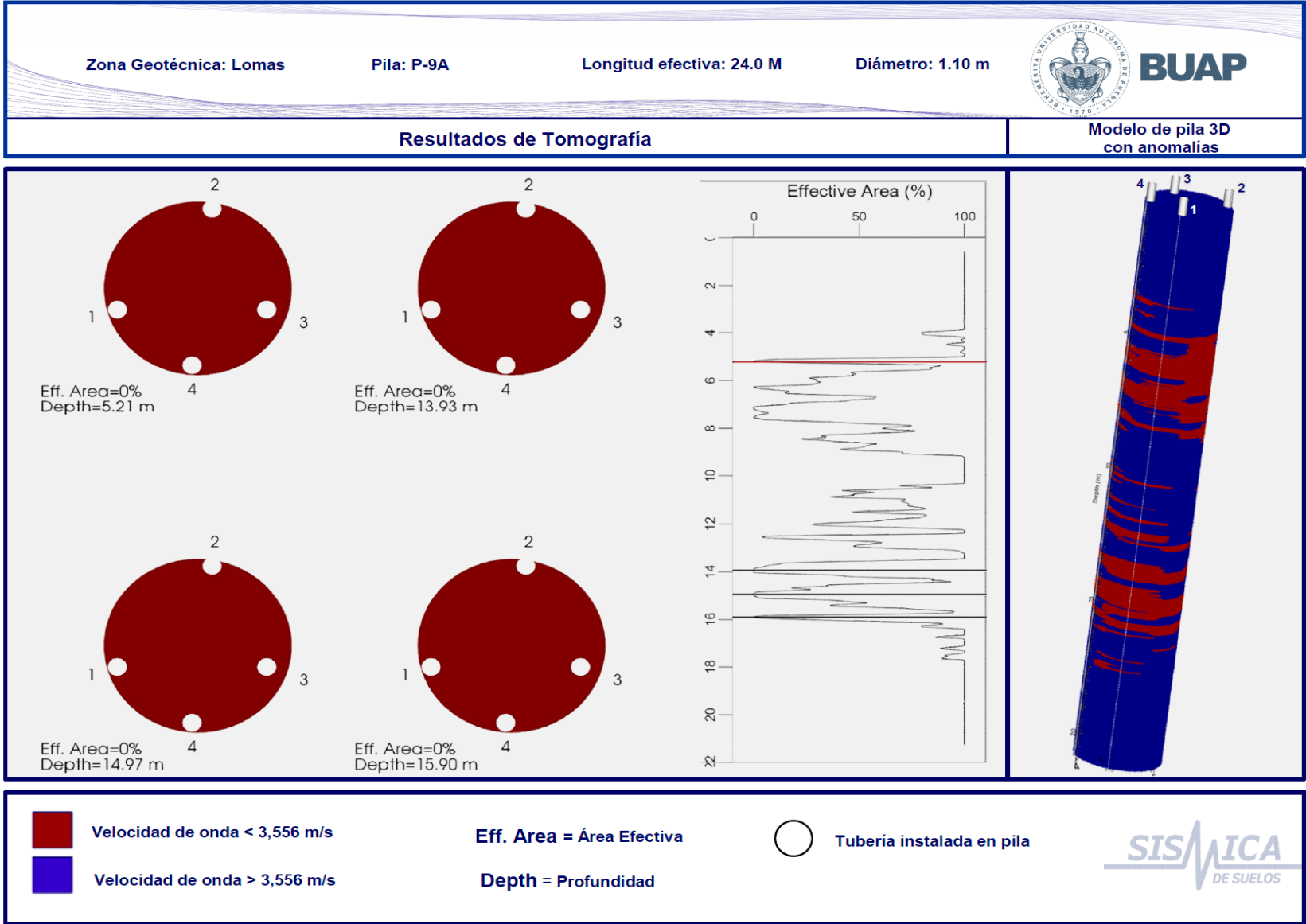


Figura 53. Tomografía 2D y 3D para la pila P-9A

El desarrollo del estudio contempló la ejecución de 24 pruebas PIT para el edificio A, 128 pruebas PIT para el edificio B y 101 pruebas PIT para el edificio C. Después de la ejecución de los ensayos en el edificio B, 27 de los elementos de cimentación presentaron anomalías a profundidades variables lo que conllevó a la perforación para la extracción de núcleo para determinar la dimensión de la zona afectada. Se destaca que la perforación de los elementos de cimentación conlleva a incrementos de costos y atrasos significativos

Por lo expuesto, se propuso la instalación de tubos de PVC cedula 40 en el armado de todas las pilas del edificio C. Esto con la finalidad de que, si las pilas ensayadas presentan alguna anomalía detectada por PIT, se pueda ensayar con CSL para determinar las dimensiones de las anomalías.

Se destaca que, a diferencia de la perforación y extracción de núcleos de la pila que lleva tiempos promedios de dos días, el ensaye CSL se ejecuta en un par de horas, lo que se traduce en disminución de costos y tiempos de ejecución.

Diez de las pilas del edificio C ensayadas con PIT presentaron anomalías importantes, por este motivo y para cuantificar el nivel de afectación se procedió a la ejecución de ensayos de CSL. Esto permite establecer un comparativa del comportamiento de la pila ensayada con ambos métodos.

En este apartado se presentan cinco pilas ensayadas con distintos métodos para entender de una manera más integral los procedimientos y análisis que se deben ejecutar antes de rechazar un elemento de cimentación.

#### 4.2.1 Pila 9-A

La pila 9-A de 100 cm de diámetro y 40.0 m de longitud fue colada el 27 de marzo de 2019 con un volumen teórico de 31.57 m<sup>3</sup> y un volumen real vaciado de 32.5 m<sup>3</sup>. El reporte de control de calidad para cimentaciones profundas proporcionada por el constructor indica la utilización de cinco ollas de concreto con revenimientos entre 18 y 20 cm. El tiempo de

llegada entre la olla 1 y 2 fue de 11 minutos, entre la 2 y 3 de 8 minutos, entre la 3 y 4 de 10 minutos y entre la 4 y 5 de 35 minutos. El reporte suministrado de la pila no indica ningún problema constructivo durante las actividades de colado.

Para verificar la continuidad del elemento de cimentación el día 08 de julio de 2019 se ejecutó un PIT. La señal procesada obtenida en el dominio del tiempo (PEM) se muestra en la Figura 54A, donde claramente se puede observar en el registro un pulso positivo cercano a los 6.0 m indicando una posible reducción en el diámetro nominal de la pila o una contaminación del concreto, posterior a ese defecto no es posible identificar el estado de la pila hasta su profundidad final.

El análisis realizado en el dominio de la frecuencia para una velocidad de propagación de onda en el concreto de 4,000 m/s presenta una frecuencia de 179.4 Hz, asociada a una longitud del elemento de 11.1 m como se presenta en la Figura 54B.

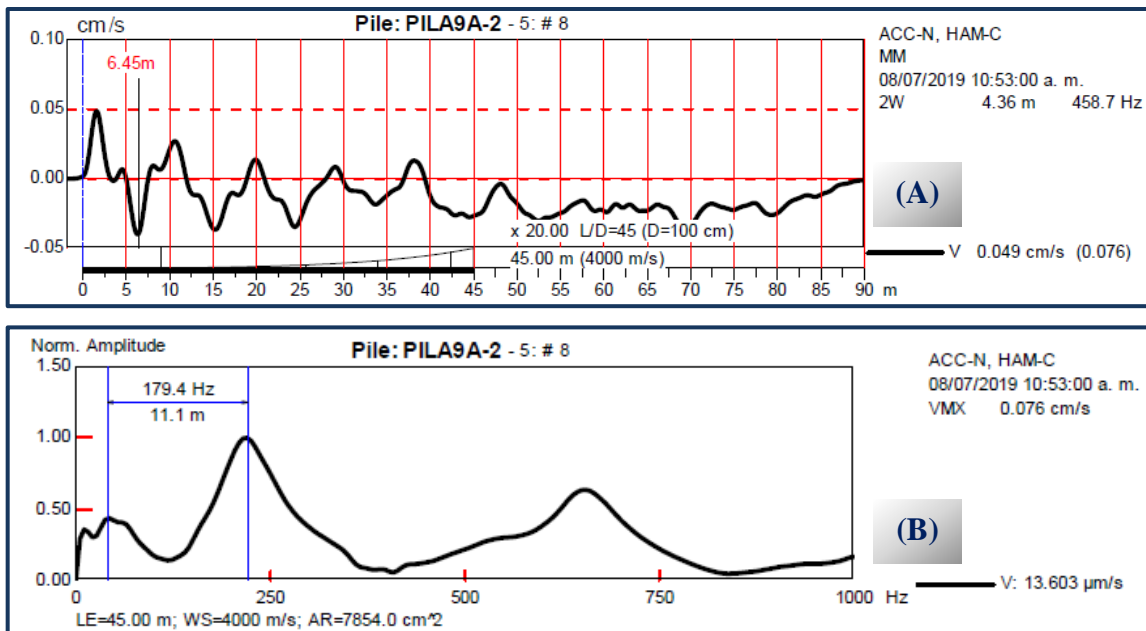


Figura 54. (A) Análisis en el dominio del tiempo (B) Análisis en el dominio de la frecuencia obtenidos para la pila 9-A

Para verificar la anomalía detectada y debido a que la pila no tenía tubos para la ejecución de la prueba de CSL, se procedió a ejecutar nuevamente un ensaye PIT el día 27 de julio, obteniéndose resultados muy similares.

En el análisis en el dominio del tiempo se detectó una anomalía cerca de los 6.0 m y se obtuvo una frecuencia 170.6 Hz, asociada a una longitud del elemento de 11.7 m. Ambos registros se presentan en la 55.

Con base en los resultados de ambas pruebas PIT, la pila se clasificó como **PDX** con base en los criterios de clasificación establecidos por Rausche & Goble (1979) y descritos en el capítulo anterior.

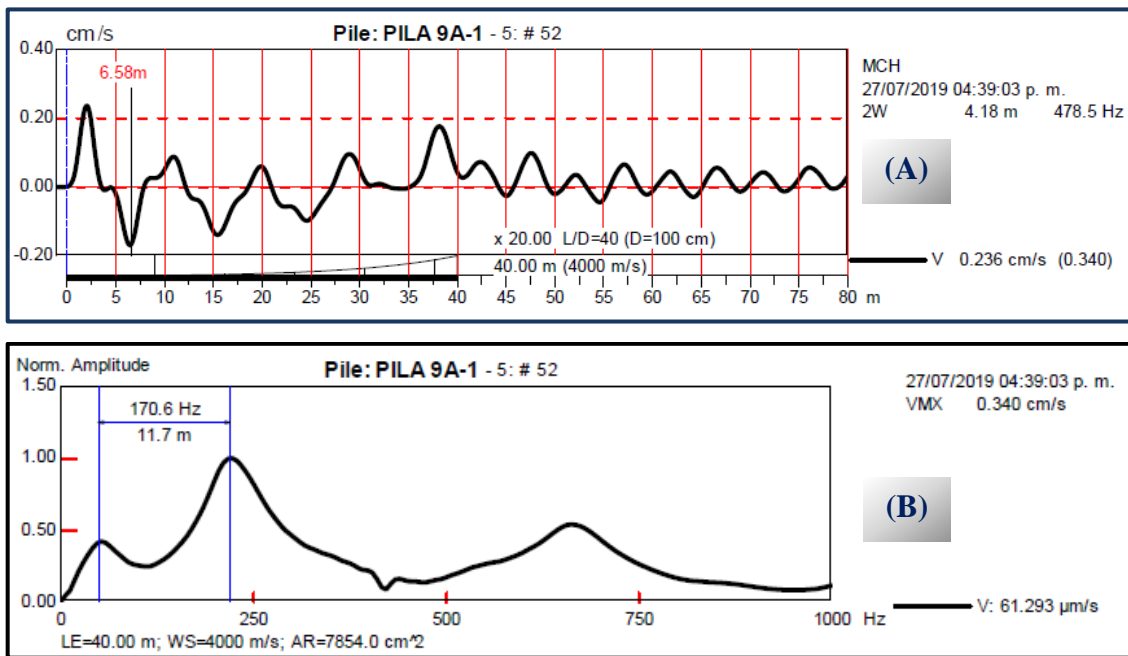


Figura 55. (A) Análisis en el dominio del tiempo (B) Análisis en el dominio de la frecuencia obtenidos para la pila 9-A

De los resultados obtenidos, luego de la evaluación por el ingeniero especialista, el constructor y el estructurista se recomendó la perforación de la pila para la obtención de núcleos, con la finalidad de comprobar la anomalía detectada por PIT y el nivel de afectación del elemento.

La perforación de la pila se ejecutó hasta los 12.5 m de profundidad, realizando el avance con Barril NQ y obteniéndose núcleos en toda la profundidad explorada. Los núcleos recuperados de las profundidades de 8.4 a 9.0 m y de 11.0 a 12.5 m, muestran claramente una degradación del concreto como se presenta en la Figura 56.

Con la obtención de los núcleos se comprobó la anomalía detectada con la prueba de integridad. El área de Ingeniería recomendó la inyección de la pila a los 12.5 m, 6.0 m y a nivel de cabeza de la pila, en total se inyectaron 225 l de mezcla de grout con cemento.

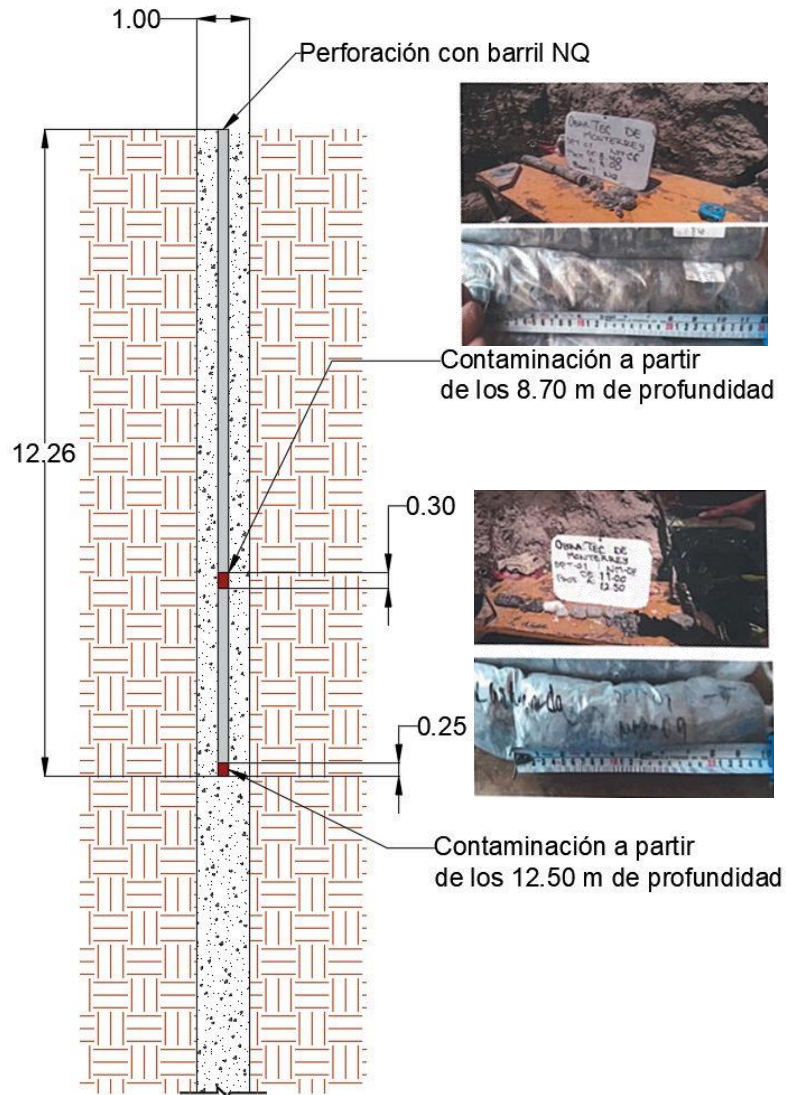


Figura 56. Núcleos recuperados de la Pila 9-A

Posteriormente a los siete días de la inyección de la pila se procedió a la ejecución de la prueba PIT para verificar el estado actual de la pila. Los registros obtenidos en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia se presenta en la Figura 57.

Los análisis realizados siguen evidenciando un cambio de impedancia a los 6.73 m, dando una reflexión positiva que indica una anomalía de magnitud importante en el elemento, la reflexión por punta no se identifica. En el dominio de la frecuencia para un valor de 196.6 Hz y una velocidad de onda en el concreto de 4,000 m/s se tiene una longitud del elemento de 10.2 m.

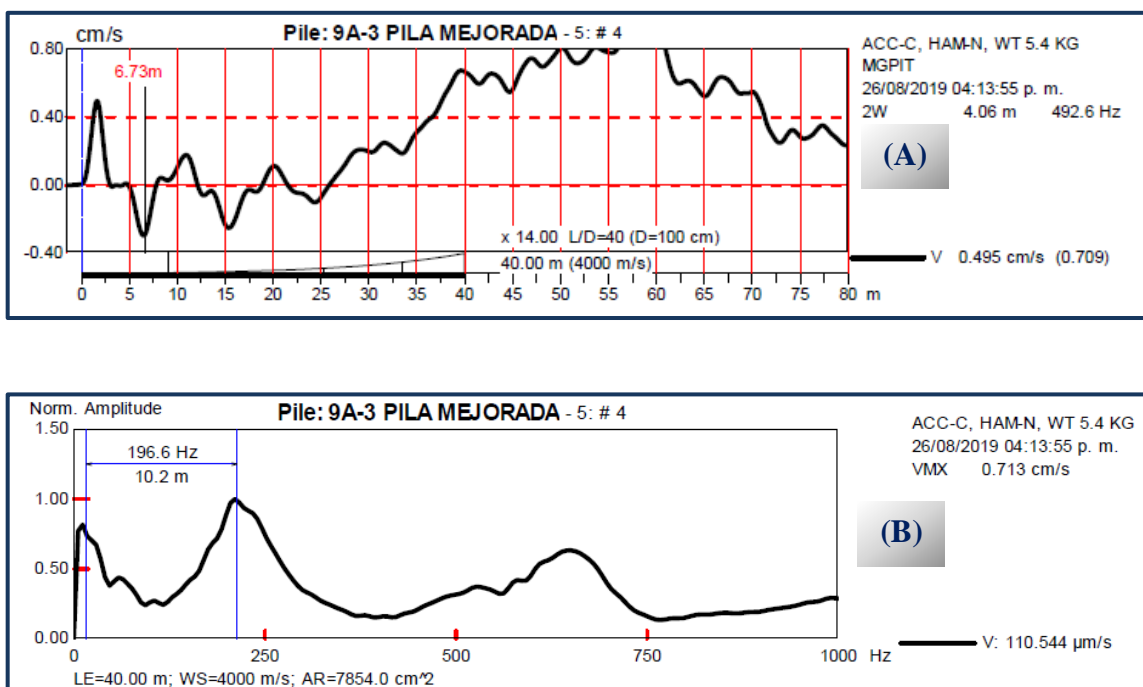


Figura 57. (A) Análisis en el dominio del tiempo (B) Análisis en el dominio de la frecuencia obtenidos para la pila 9-A después de inyectada

Utilizando el programa PitW de *Pile Dynamisc* se generó un modelo de impedancia teórico de la pila 9-A, donde se puede visualizar el registro en el dominio del tiempo y la geometría del elemento hasta la profundidad donde se detectó la anomalía, como se presenta en la Figura 58.

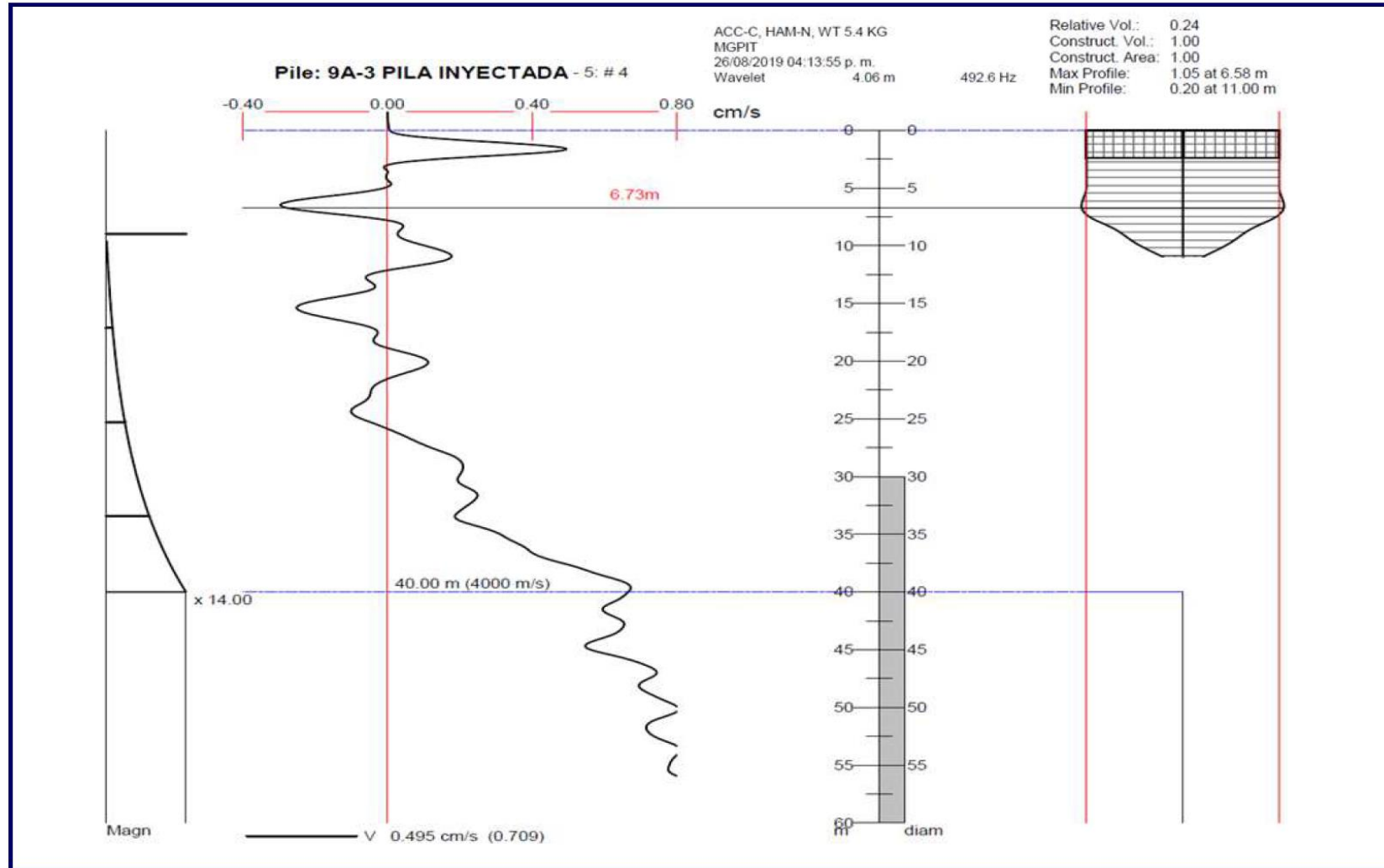


Figura 58. Modelo de impedancia de la pila 9-A

#### 4.2.2 Pila 13-D

La perforación para la pila 13-D se ejecutó el día 22 de mayo de 2019, el proceso del colado del elemento inició 15:10 h del día 23 de mayo, con un diámetro de 100 cm y una profundidad de proyecto de 42.0 m, lo que se traduce en un volumen teórico de 31.0 m<sup>3</sup>.

En total se descargaron cuatro ollas cada una de 8.0 m<sup>3</sup> para un total de 32.0 m<sup>3</sup> de volumen de concreto real utilizado para la pila y un revenimiento de 19 cm. El mayor tiempo transcurrió entre la llegada de la olla 3 y 4 con una demora de 30 minutos.

El día 27 de julio de 2019, casi dos meses después de colada la pila se ejecutó la Prueba de Integridad, el resultado obtenido en el análisis de tiempo y frecuencia del 2019 se presenta en la Figura 59.

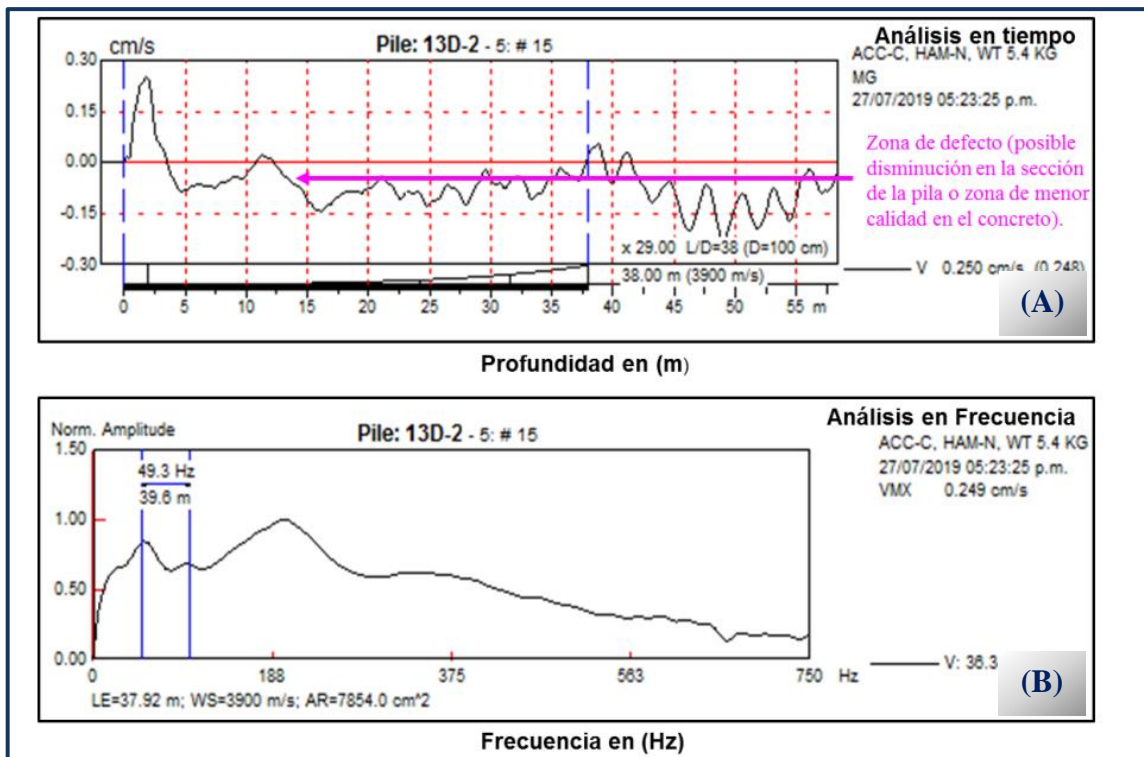


Figura 59. Análisis en el dominio en tiempo y en frecuencia para la pila 13-D realizado en el 2019

En la Figura 60 para la pila 13 -D en el análisis en el dominio del tiempo se reporta una anomalía o reflexión positiva a los 10.0 m asociada a una posible contaminación del concreto. Se destaca que esta posible anomalía o cambio de impedancia no fue detectada en el dominio de la frecuencia, obteniéndose una longitud del elemento de 39.6 m.

Debido a la posible anomalía detectada la pila fue clasificada como cuestionable y se recomendó repetir la prueba obteniéndose los mismos resultados. Por ello lo que se procedió a la perforación de la pila para extraer núcleos y confirmar el tamaño de la anomalía.

Para efectos de esta investigación las señales obtenidas de las pilas se reinterpretaron. Los registros obtenidos para los análisis en el dominio del tiempo y frecuencia se presentan en la Figura 60.

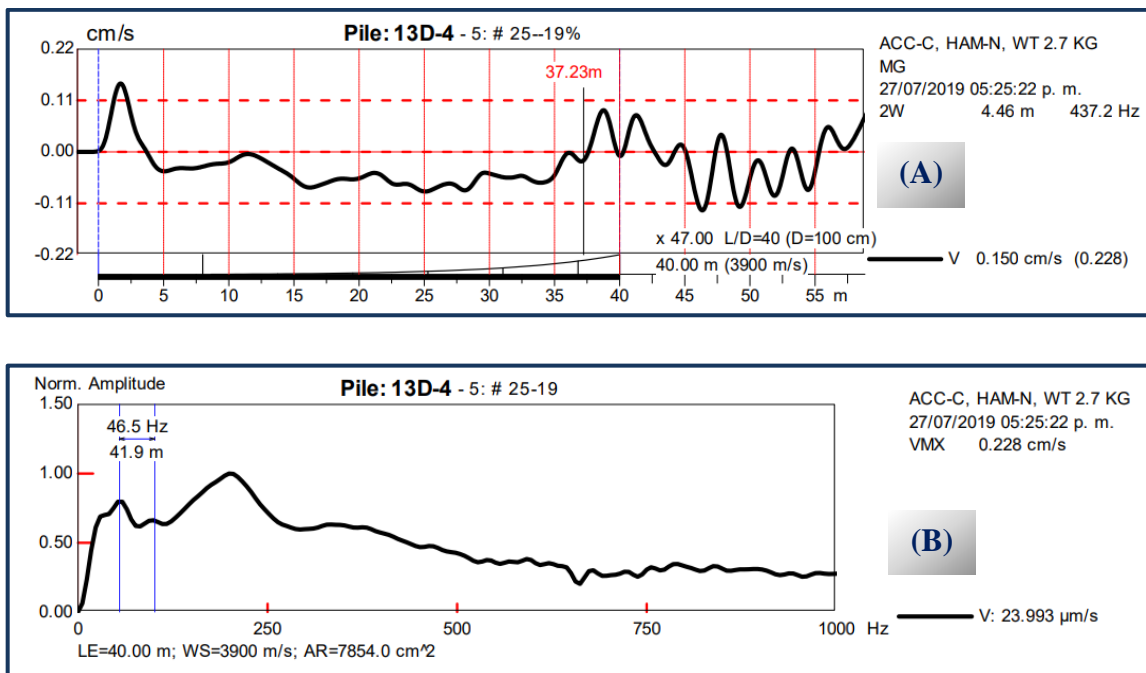


Figura 60. Análisis en el dominio en tiempo y en frecuencia para la pila 13-D realizado en el 2023

El primer punto destacado en la comparativa entre los dos procesamientos es el filtrado de la señal. El registro en el dominio del tiempo obtenido en 2019 muestra frecuencias muy altas, lo que dificulta la visualización clara de la señal. En relación a la

anomalía identificada a una profundidad de 10.0 m, que se sospecha podría estar relacionada con una posible contaminación del concreto, se considera más probable que esté asociada a una recuperación del diámetro nominal de la pila y un cambio en la impedancia, sin afectar la capacidad de carga del elemento.

Cerca de la punta de la pila se observa una reflexión positiva, posiblemente relacionada con la mencionada contaminación del concreto. Es importante destacar que, aunque ambas interpretaciones se realizaron considerando una velocidad del concreto de 3,900 m/s, la anomalía detectada cerca de la punta no fue reportada en 2019.

El informe de mecánica de suelos describe una estratigrafía dominada por arcillas de color gris que varían en consistencia de blanda a muy compacta a medida que se profundiza en el suelo. Sin embargo, es importante destacar que se encuentran intercalados algunos lentes de arenas entre las capas de arcilla (Figura 61).

En el caso específico de la pila 13-D, se informa un cambio de impedancia alrededor de los 37.0 metros de profundidad. Según el perfil estratigráfico de la zona, en esa área se identifica una capa de arcilla con un alto contenido de arena, seguida por un lente de arena, por lo que es muy probable que el cambio de impedancia detectado a esta profundidad este asociado a la contaminación del concreto.

Esta relación se puede observar de manera gráfica en la Figura 61, donde se muestra el perfil estratigráfico junto con el registro obtenido del análisis en el dominio del tiempo.

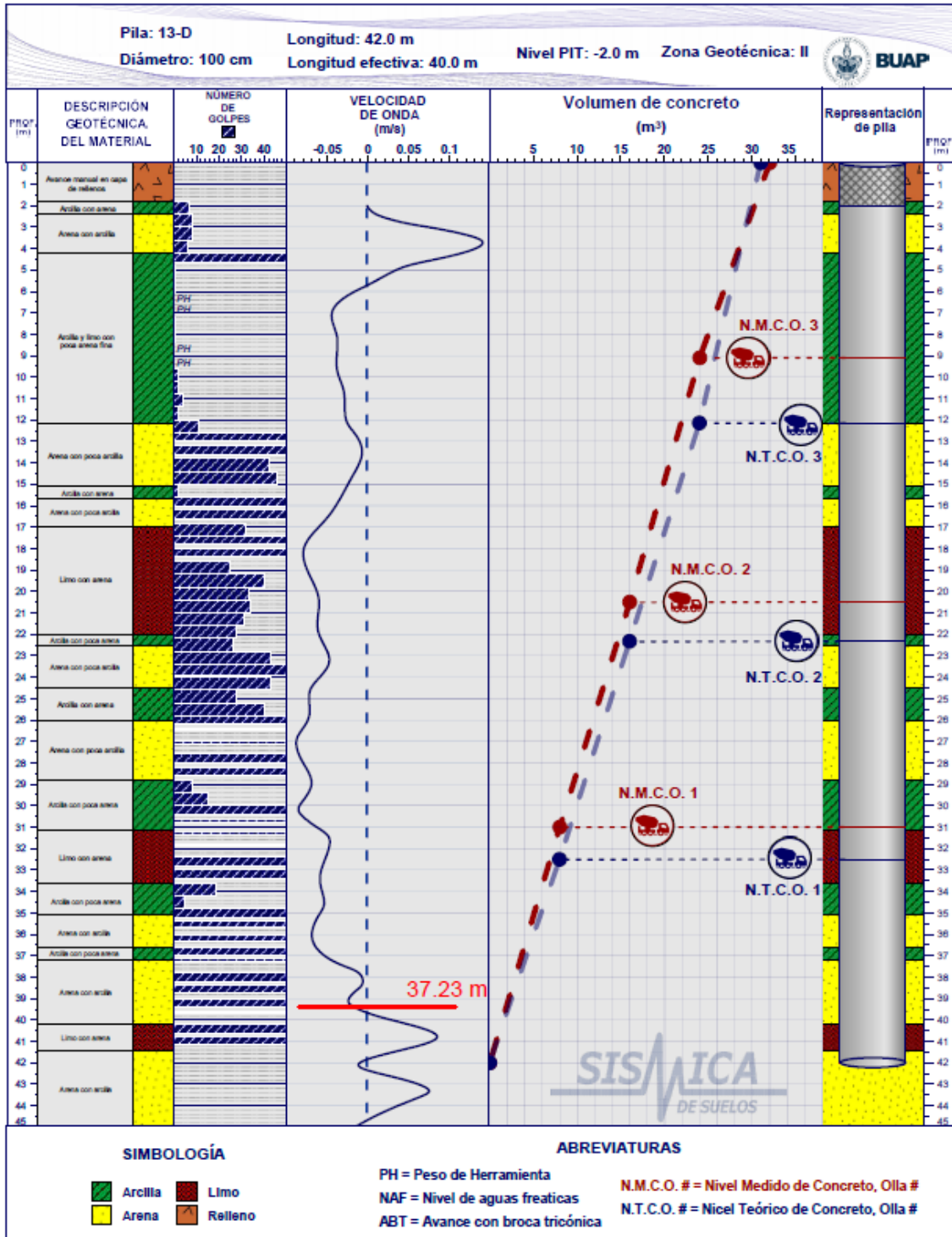


Figura 61. Perfil estratigráfico y registro en el análisis del dominio del tiempo de la pila 13-D

El 9 de septiembre de 2019, con el objetivo de verificar las anomalías detectadas en la pila 13-D se inició con los trabajos de barrenación con Barril NQ que permitiera la recuperación de núcleo. Los trabajos de barrenación se suspendieron al encontrarse con el

acero de refuerzo, debido aparentemente a la desviación de la perforación, lo que implicó la perforación de tres barrenos, como se muestra en el esquema de la Figura 62, la profundidad máxima de perforación fue hasta los 7.4 m y el objetivo era perforar hasta los 12.0 m para comprobar la anomalía detectada cerca a los 10.0 m de profundidad.

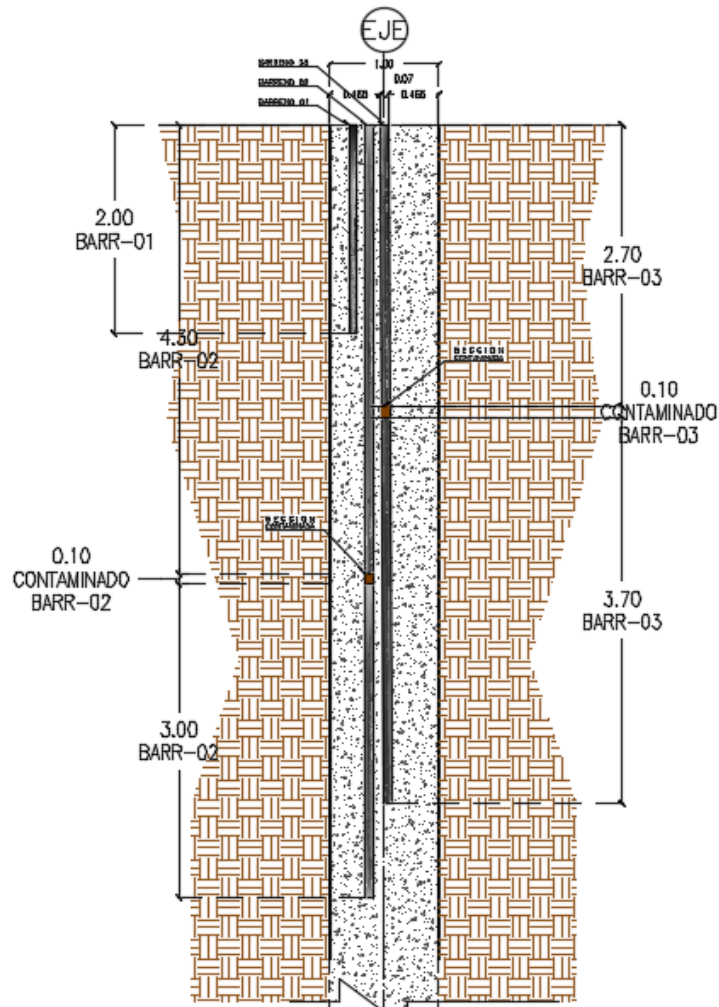


Figura 62. Esquema de la pila donde se puede observar las tres barrenaciones

De los núcleos obtenidos se detectó pequeñas zonas de concreto contaminado cerca de la cabeza de pila. La anomalía detectada por PIT no pudo ser corroborada debido a que la profundidad máxima de exploración alcanzada en la perforación fue de 7.4 m. En la Figura 63 se muestra algunas imágenes de los núcleos recuperados.

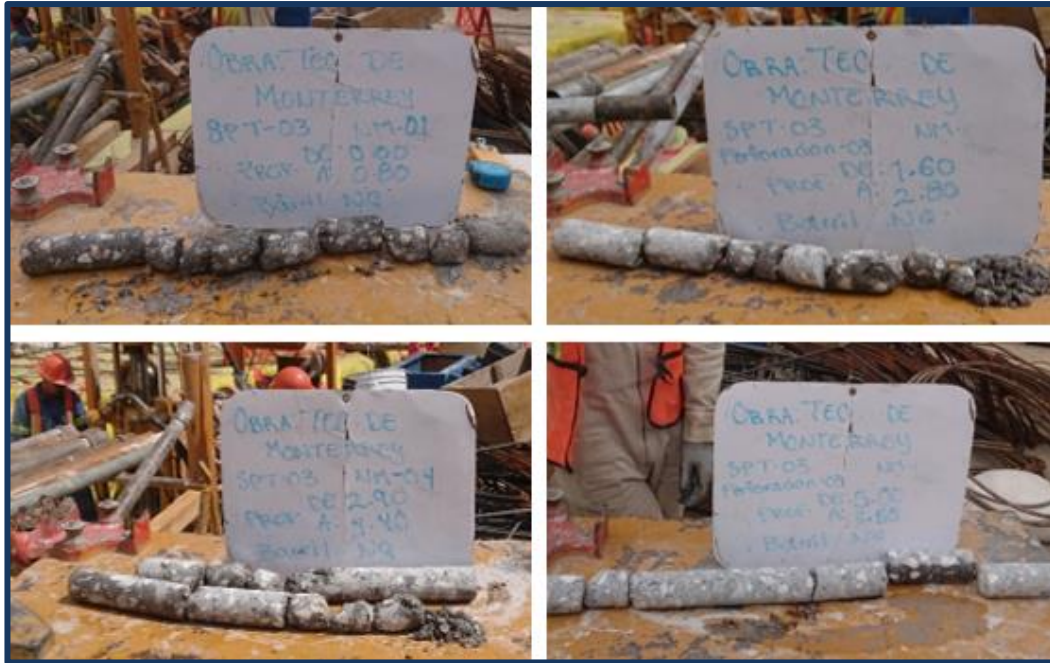


Figura 63. Núcleos recuperados de la pila 13-D

La recomendación para la pila 13-D fue rechazarla; sin embargo, con los resultados obtenidos de la reinterpretación de esta pila se puede calificar como **PDx** (Rausche & Goble, 1979), lo que implica una pila sin variaciones significativas en su geometría hasta los 37.2 m, posteriormente a esta profundidad existen pulsos positivos muy marcados que dificultan ver la punta de la pila, este tipo de anomalía se asocia a una reducción en la sección de la pila o mala calidad del concreto.

El ingeniero especialista puede considerar una longitud del elemento efectiva de 37.0 m y evaluar su capacidad de carga para determinar la aceptación o rechazo de este elemento.

En la Figura 64 se presenta un modelo de impedancia teórico de la pila utilizando el programa PitW de *Pile Dynamisc*.

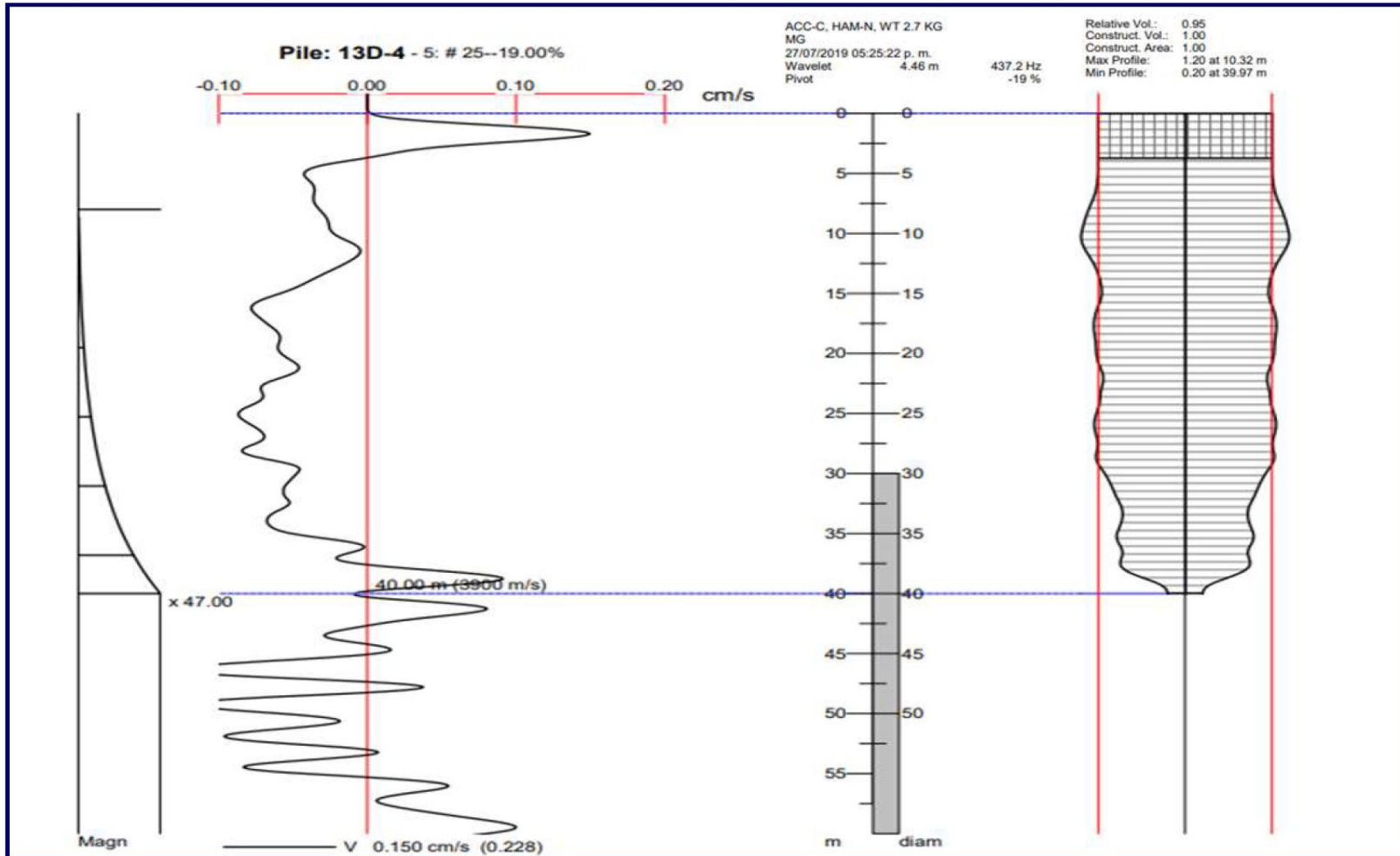


Figura 64. Modelo de impedancia de la pila 13-D

### 4.2.3 Pila 13-B Sur

La pila 13-B Sur con un diámetro de 100 cm y una longitud efectiva de 40.0 m fue colada el día 4 de abril de 2019. El control de colado realizado para este elemento indica la utilización de seis ollas de concreto con un volumen total de 35 m<sup>3</sup>. El proceso del colado de esta pila llevo un poco más de dos horas iniciando a las 16:31 h y terminando a las 18:53 h. El registro de la pila no reporta ningún problema operacional o técnico durante los trabajos.

Para verificar la integridad del elemento de cimentación el día 03 de agosto de 2019 se ejecutó la prueba de integridad de baja deformación. El registro obtenido en el dominio del tiempo analizado en ese momento reporta una posible anomalía por contaminación de la pila a los 10.80 m, aproximadamente, por lo que esta pila fue clasificada como Cuestionable. Se destaca que el reporte emitido para esta pila indica una longitud efectiva del elemento de 37.8 m. En la Figura 65 se presentan los registros obtenidos en el dominio en tiempo y en frecuencia.

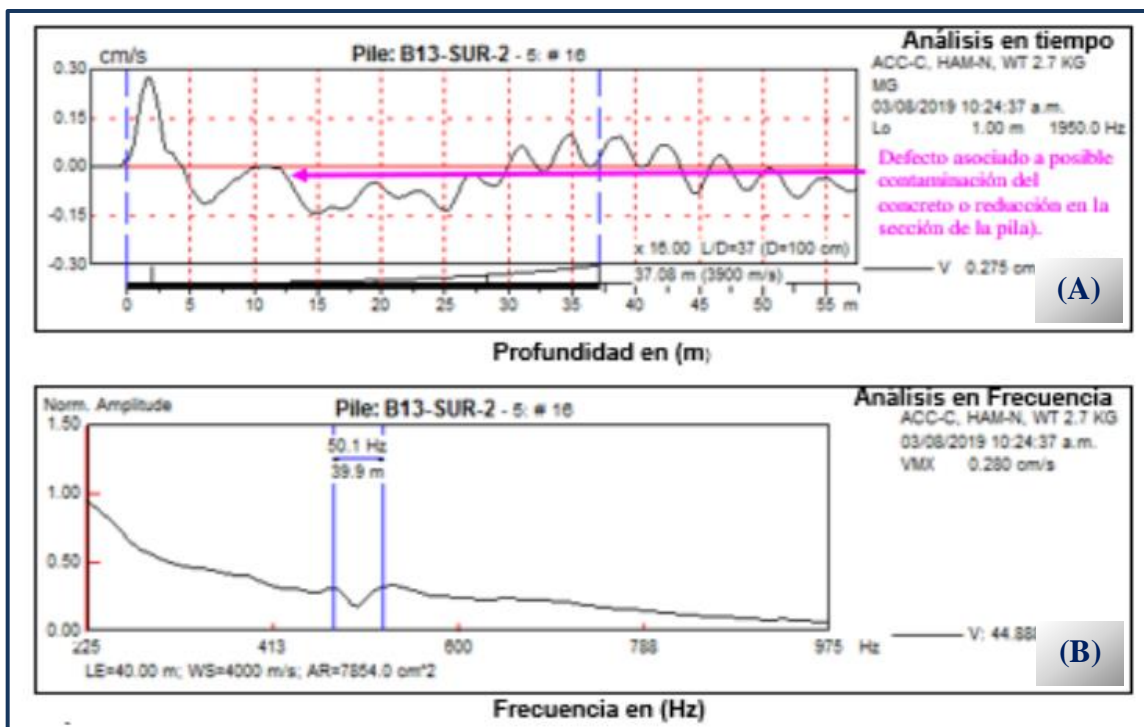


Figura 65. Análisis en el dominio en tiempo y en frecuencia para la pila 13-B Sur realizado en el 2019

Con el objetivo de verificar los análisis realizados en el 2019, se reinterpretó los datos obtenidos en campo. De los registros obtenidos en el dominio del tiempo se observa que la pila presenta un pulso positivo que indica la presencia de una anomalía as los 31.9 m asociada a una posible disminución de la sección o contaminación del concreto, la integridad de la pila no es clara posterior a esta anomalía.

En el dominio de la frecuencia para una velocidad del concreto de 4,200 m/s se observa una amplitud de 64.4 Hz asociado a una longitud de 30.7 m. Ambas longitudes obtenidas de los dos análisis indica una longitud promedio del elemento de 31.3 m, en la Figura 66 se presenta los registros para ambos análisis.

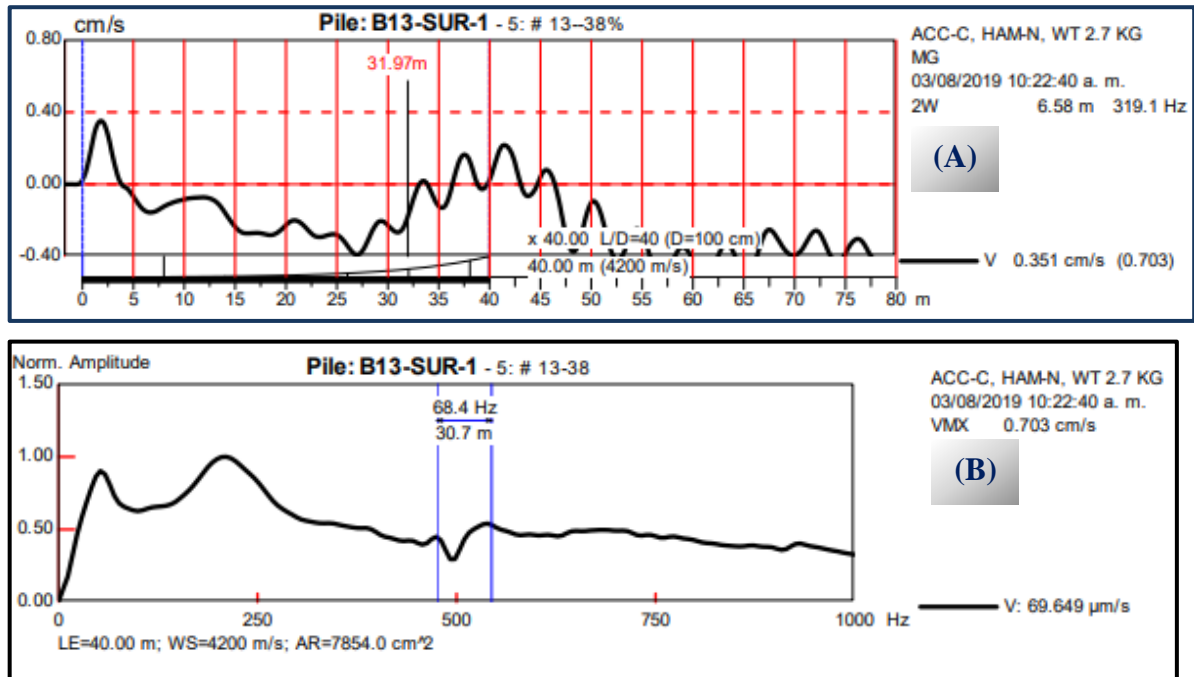


Figura 66. Análisis en el dominio en tiempo y en frecuencia para la pila 13-B Sur realizado en el 2023

Como se puede observar los registros procesados y filtrados en el 2019 y 2023 tienen un comportamiento similar pero la interpretación de la señal es distinta. La anomalía reportada a los 10.8 m en el registro de 2019, posiblemente se debe a un ensanchamiento del elemento cerca de la cabeza y, posteriormente, el pulso positivo observado es indicativo de la recuperación del diámetro nominal de la pila.

Adicionalmente, en ambos registros se observa cerca de la punta de pila un pulso positivo asociado posiblemente a una reducción en la sección de la pila o cambio en las propiedades del concreto. Es importante destacar que el registro en el análisis del tiempo muestra un crecimiento de la curva del lado negativo, posterior a los 22.0 m esto se debe a la resistencia del suelo. El estudio de mecánica de suelos realizado reporta a esa profundidad suelos muy competentes. Aunque en el procesamiento de la señal se aplican filtros para eliminar el efecto de la fricción del suelo, en algunas ocasiones este efecto es difícil de filtrar lo que impide la visualización de la punta del elemento por la atenuación de la energía. En la Figura 67 se presenta la correlación de la estratigrafía con el registro obtenido del análisis en el dominio del tiempo.

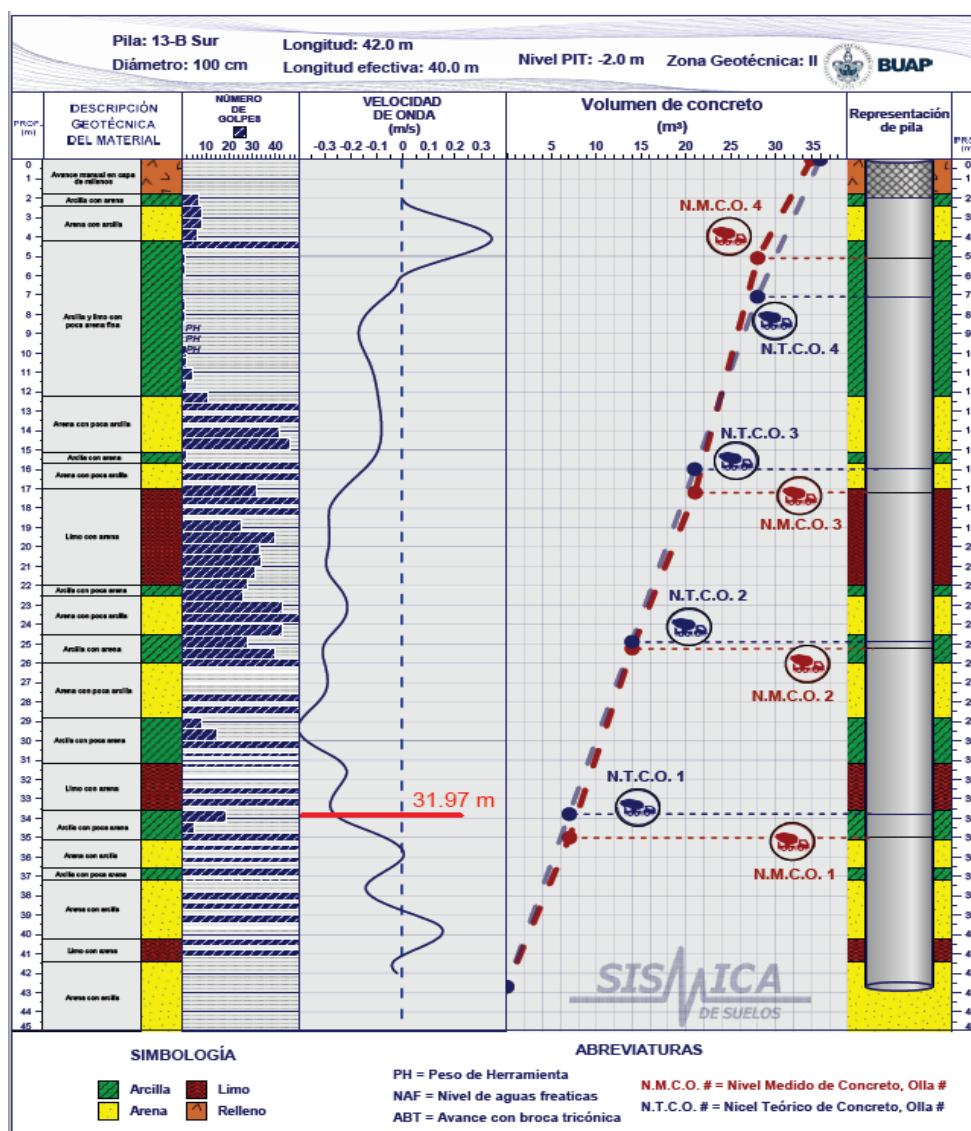


Figura 67. Perfil estratigráfico y registro en el análisis del dominio del tiempo de la pila 13-B Sur

Para verificar el estado del elemento se procedió a la perforación de la pila con barril NQ para la obtención de núcleos que permitiera evaluar la calidad del concreto. La pila fue perforada el día 14 de septiembre de 2019 hasta una profundidad de 14.0 m. De los núcleos obtenidos se comprobó pequeñas secciones de concreto contaminado a distintas profundidades como se presenta en la Figura 68.

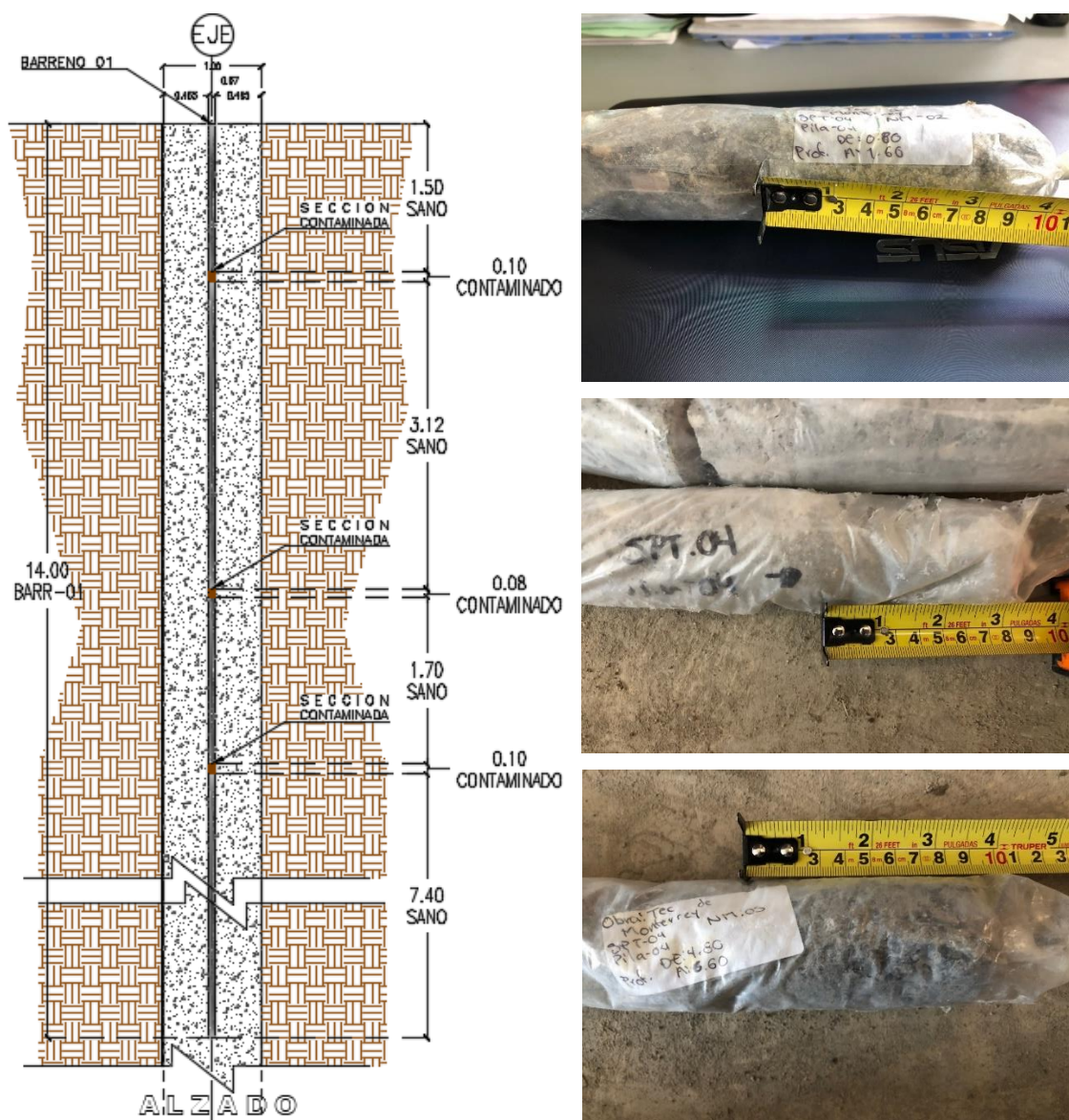


Figura 68. Esquema de la perforación y núcleos obtenidos de la pila 13-B Sur

Posterior a la perforación de la pila el área de ingeniería decidió la inyección de esta con una mezcla de cemento y grout. El volumen total calculado para la inyección fue

de 431.9 l y el volumen inyectado en sección fue de 185.0 l, con un porcentaje de volumen inyectado de 42.9%.

Aproximadamente dos meses después de la inyección de la pila se procedió a la ejecución de la prueba de integridad obteniéndose resultados similares de los registros analizados antes de la inyección. Es importante destacar que la pila fue inyectada antes de los 14.0 m, por lo que la posible reducción en la punta del elemento no fue atendida. En la Figura 69 se presenta el análisis en el dominio del tiempo posterior a la inyección de la pila.

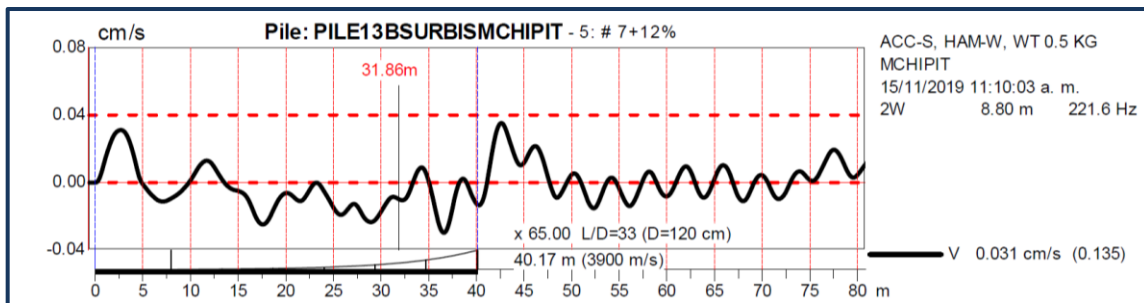


Figura 69. Análisis en el dominio en tiempo para la pila 13B Sur después de mejorada la pila

Del análisis realizado se ve nuevamente una anomalía de pulso negativo asociada al ensanchamiento del elemento cerca de la cabeza y posteriormente un pulso positivo asociado a la recuperación del diámetro nominal y otro pulso positivo a los 31.86 m asociado a una reducción o contaminación del concreto. Por todo lo expuesto esta pila es clasificada como **PDx**. En la Figura 70 se presenta un modelo de impedancia donde se muestra la geometría del elemento.

Las pilas 9A, 13D y 13 B Sur pertenecen al edificio B, debido a los costos y tiempos que implica la perforación de las pilas para la verificación de las anomalías, se recomendó la instalación de tubos en el armado de los elementos para la ejecución de pruebas de Cross Hole Ultrasónico (CSL) para el edificio C.

Uno de los elementos ensayados con PIT y CSL en el edificio C se describe a continuación.

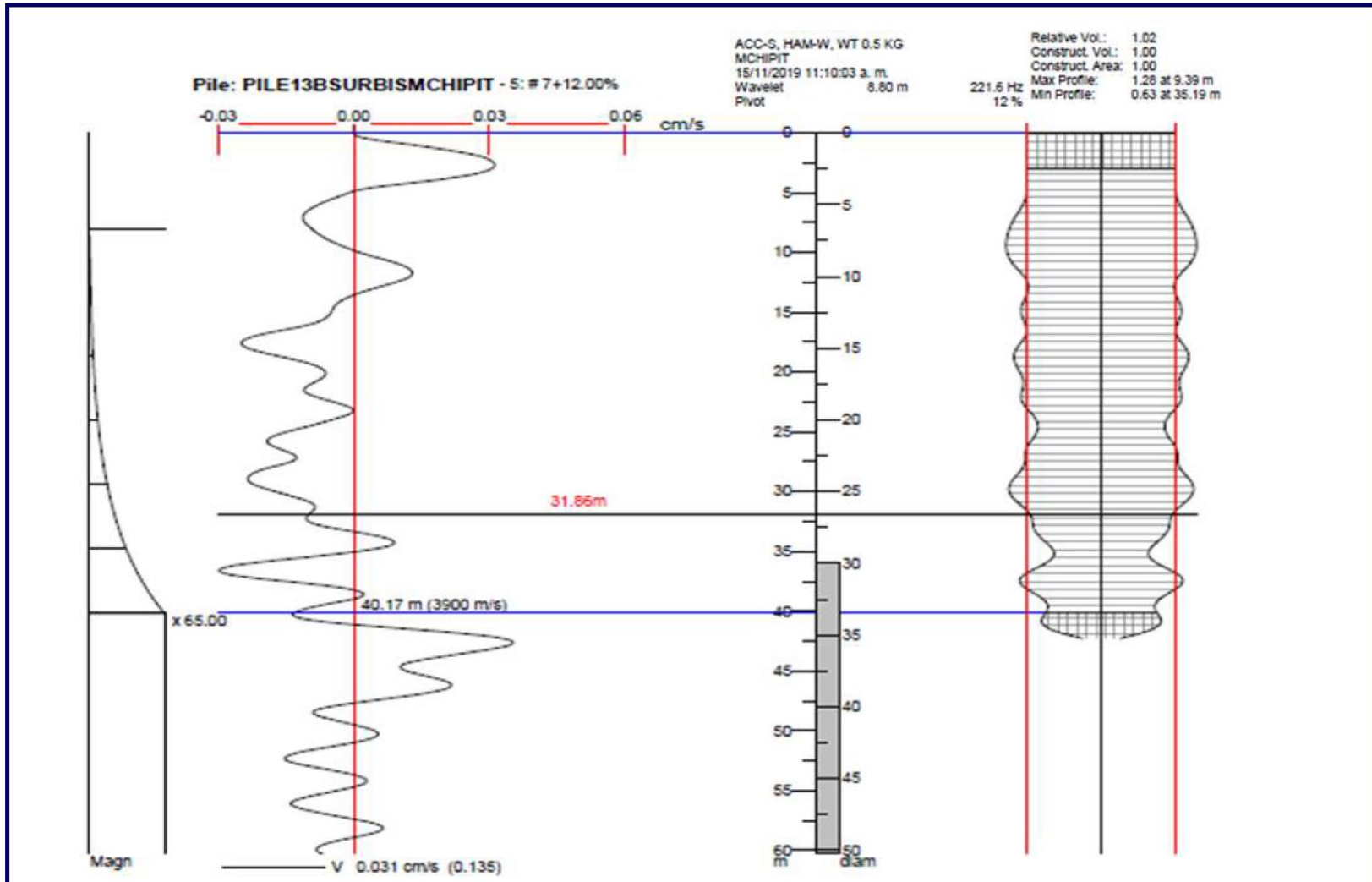


Figura 70. Modelo de impedancia de la pila 13-B Sur

#### 4.2.4 Pila P-13

La pila P-13 con una longitud efectiva de 40.0 m y diámetro de 120 cm fue colada el 01 de abril del año 2020. El reporte de campo indica que el colado inicio a las 16:38 h y terminó a las 19:32 h, utilizándose ocho ollas de concreto con un volumen real de 49.50 m<sup>3</sup>. El tiempo promedio entre ollas fue de aproximadamente de 15 minutos.

El 03 de julio de 2020 se ejecuta el ensayo PIT en este elemento detectándose una anomalía a los 8.9 m de profundidad asociada a posible contaminación del concreto. Los análisis obtenidos para dominio del tiempo (A) y frecuencia (B) se presentan en la Figura 71.

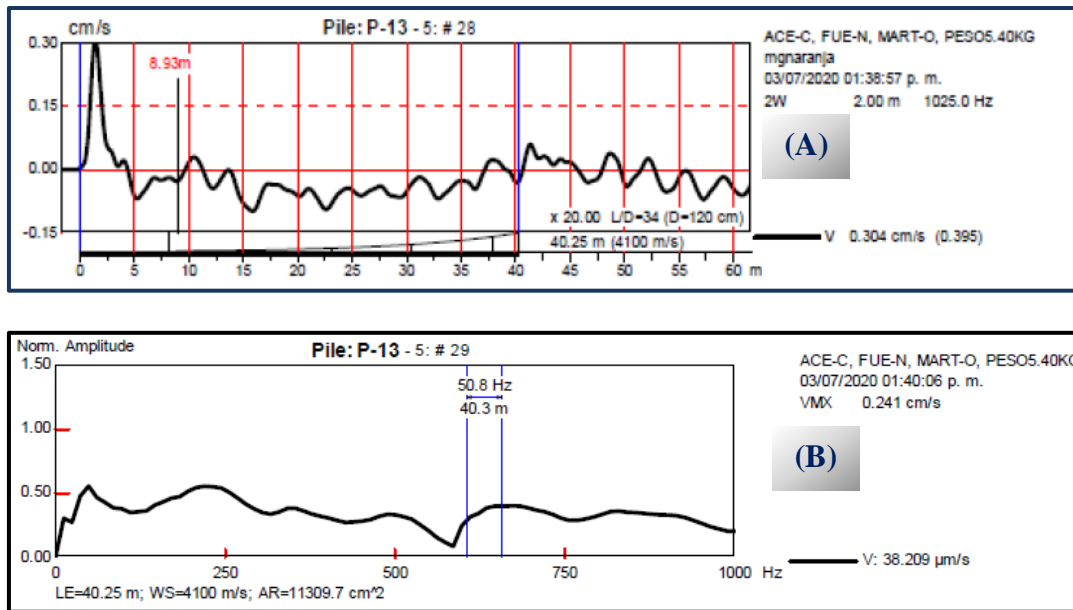


Figura 71. Análisis en el dominio en tiempo y en frecuencia para la pila P-13

El análisis en el dominio de la frecuencia muestra que para una velocidad de 4,100 m/s se tiene una amplitud de 50.8 Hz, asociada a una longitud del elemento de 40.3 m. Adicionalmente para verificar la integridad de la pila en los primeros metros se ejecutó la prueba Fuerza-Velocidad, obteniéndose que ambos registros presentan la misma aceleración por lo que el elemento se encuentra en buen estado los primeros 4.0 m aproximadamente como se puede observar en la Figura 72.

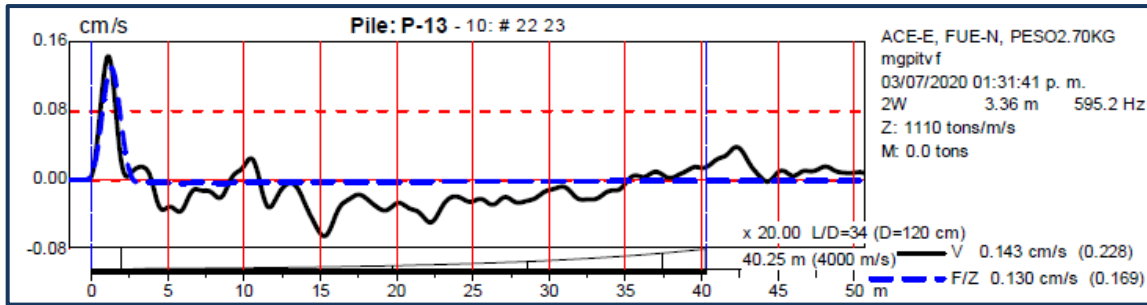


Figura 72. Registro de Fuerza-Velocidad para la pila P-13

Para verificar la anomalía reportada en el ensaye PIT, el día 10 de julio se ejecutó la prueba de CSL. Para ello, durante el colado de la pila se dejaron instalados cuatro tubos de PVC hidráulico cedula 40 perimetrales que permitan el acceso de la sonda emisora y de la sonda receptora, los que posteriormente fueron llenados con agua para lograr el correcto acoplamiento mecánico entre los tubos y el concreto.

Con este arreglo se obtuvieron seis perfiles ultrasónicos de la pila: perfil 1-2, 1-3, 1-4, 2-3, 2-4 y 4-3. Antes de iniciar con las mediciones se verificó que todos los tubos estuvieran libres de interferencia para comprobar que las sondas podían descender hasta los 40.0 m de profundidad. Posteriormente se midió lo más cerca de la cabeza de la pila la separación entre los tubos para después alimentar el programa CHA de *Pile Dynamics, Inc.*

Debido a que la pila tenía más de tres meses de colada, se procedió a la inundación de la pila con agua por 72 horas antes de la prueba, buscando un adecuado contacto entre los tubos y el concreto.

Los resultados obtenidos de la prueba CSL se presentan en las Figuras 73 a 75, donde se muestran los perfiles de velocidad de onda, la energía y el diagrama de cascada de pulso ultrasónico.

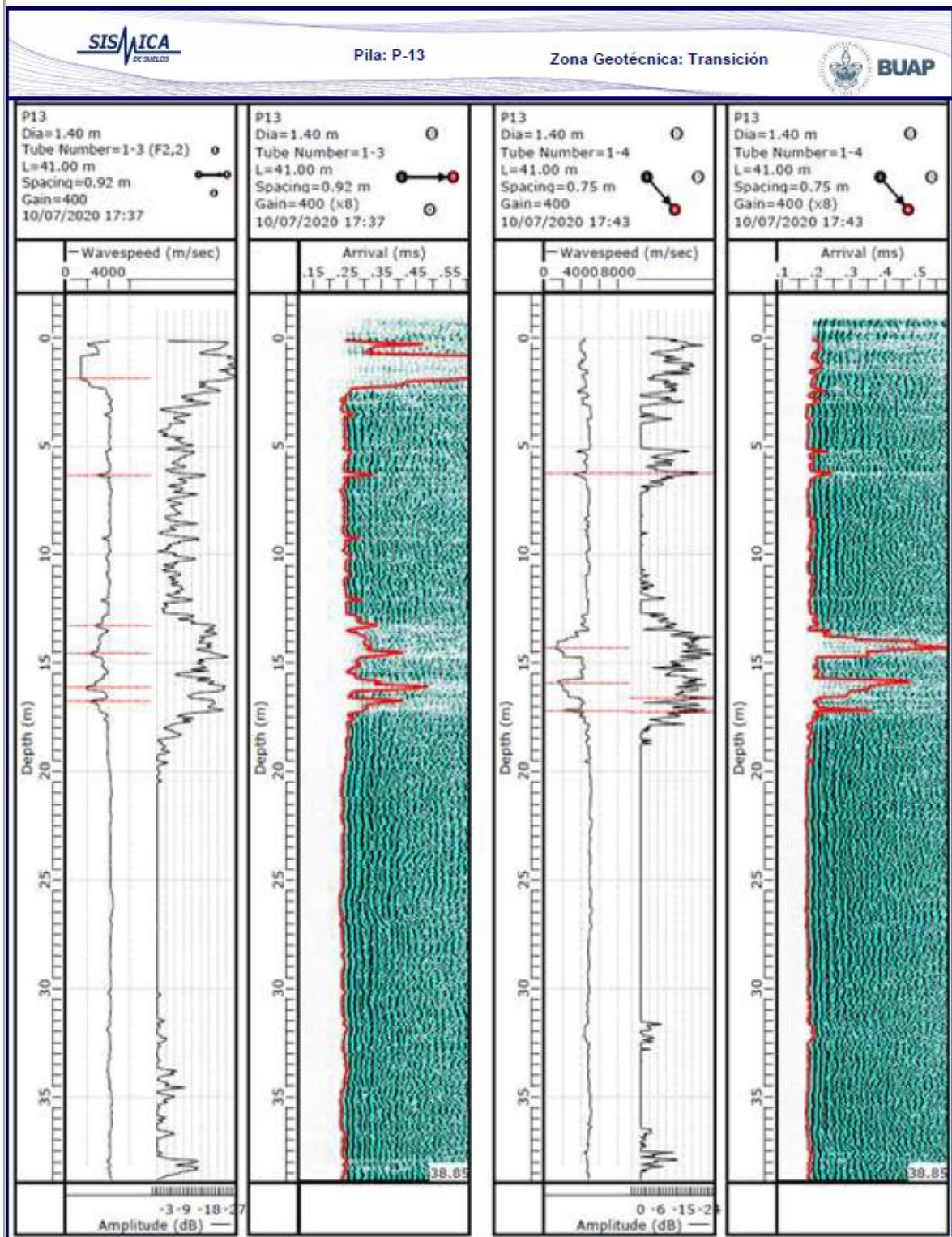


Figura 73. Perfiles 1-3 y 1-4 obtenidos de la prueba de CSL para la pila P-13

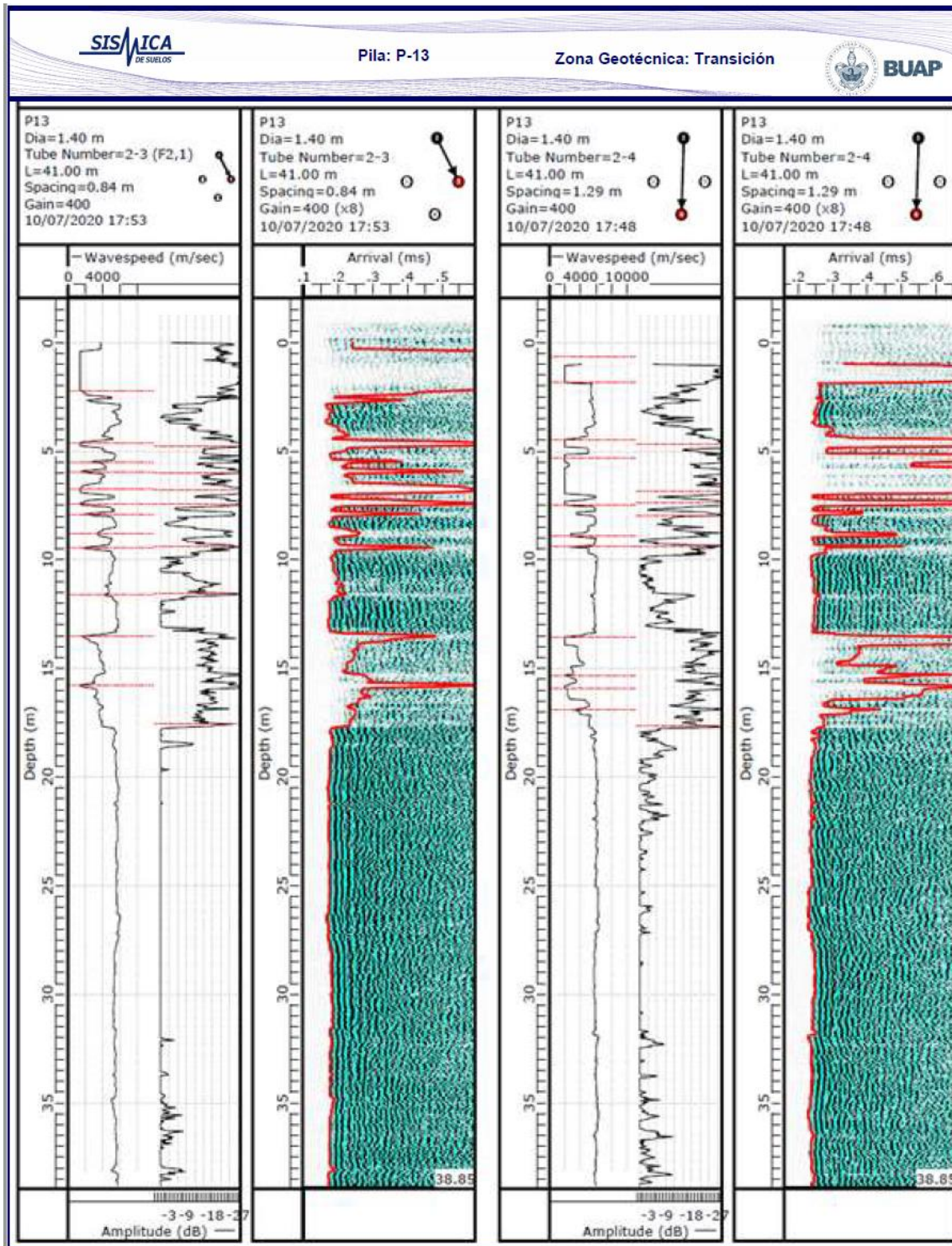


Figura 74. Perfiles 2-3 y 2-4 obtenidos de la prueba de CSL para la pila P-13

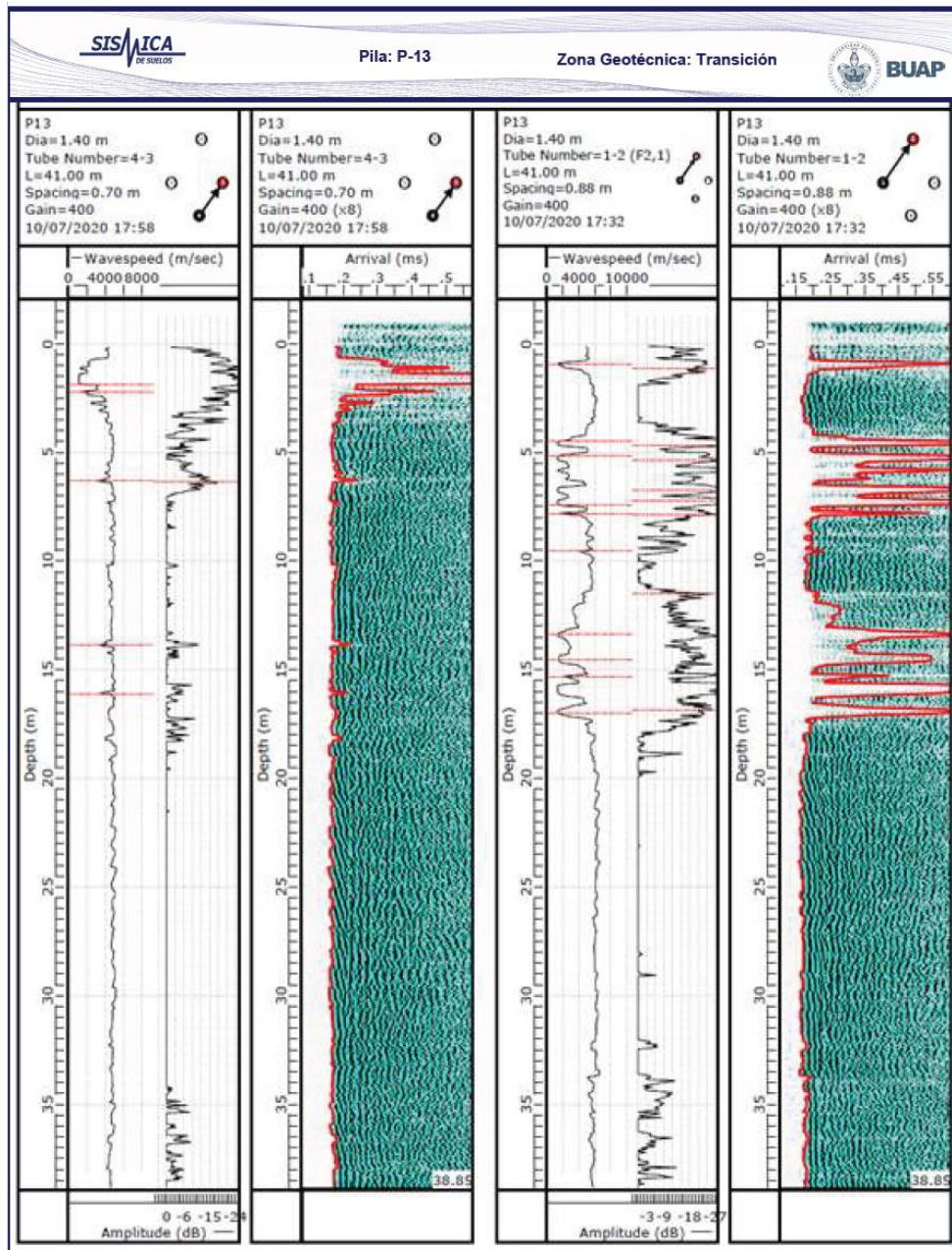


Figura 75. Perfiles 4-3 y 1-2 obtenidos de la prueba de CSL para la pila P-13

En la Tabla 6 se presenta los resultados con las anomalías detectadas. En ella se puede visualizar el número del perfil, el inicio y final de la anomalía, el pico de la anomalía, la atenuación de la energía medida en decibeles y el aumento en el FAT. Adicionalmente en la Figura 76 se presentan los seis perfiles de cascada obtenidos para visualizar las zonas con mayor afectación.

Tabla 8. Anomalías detectadas con el CSL en la pila P-13

Perfil	Inicio (m)	Fin (m)	Pico de defecto (m)	Atenuación de la energía (Db)	FAT
2-4	0.17	0.82	0.67		30%
1-2	0.11	1.87	1.17	10.1dB	>100%
2-4	1.06	1.87	1.81		55%
4-3	0.77	1.87	1.87		>100%
1-3	0.87	2.21	1.92		49%
2-3	0.42	2.42	2.21		43%
4-3	2.17	2.37	2.21		81%
1-2	3.67	4.82	4.67	14.5dB	>100%
2-4	3.87	4.87	4.67	10.0dB	71%
2-3	4.46	4.92	4.77	9.6dB	>100%
1-2	5.02	5.52	5.37	11.5dB	>100%
2-3	5.46	5.57	5.52		66%
2-3	5.82	6.06	6.02	9.2dB	>100%
1-4	5.21	6.81	6.27	9.4dB	35%
4-3	5.46	6.52	6.37	9.8dB	44%
1-3	6.27	6.42	6.37		33%
1-2	6.52	6.92	6.77	10.7dB	
2-3	6.27	6.96	6.81	11.1dB	>100%
2-4	5.17	6.96	6.87	9.8dB	45%
1-2	6.56	7.46	7.21	10.5dB	>100%
2-4	7.21	7.57	7.37	10.0dB	55%
2-3	7.17	7.57	7.42	9.6dB	>100%
1-2	7.67	8.21	7.87	9.7dB	>100%
2-3	7.87	7.96	7.92		87%
2-4	7.82	8.02	7.96	10.6dB	
2-3	8.62	8.96	8.82		30%
2-4	8.71	8.96	8.92		81%
2-3	9.17	9.67	9.42	9.8dB	>100%
2-4	9.32	9.82	9.42	10.0dB	92%
1-2	9.52	9.67	9.57		21%
1-2	11.32	12.07	11.52	9.2dB	
2-3	10.62	11.82	11.57	12.8dB	21%
1-3	12.87	13.42	13.27		24%
1-2	13.17	13.87	13.37		99%
2-3	13.37	15.02	13.52		>100%
2-4	13.52	14.32	13.57		>100%
4-3	13.71	13.92	13.87		130%
1-4	13.57	14.71	14.32		>100%
1-2	14.07	14.71	14.57		79%
1-3	13.67	14.82	14.57		46%
1-2	15.27	15.41	15.32		45%
2-4	14.91	15.46	15.32		66%
2-4	15.62	16.41	15.91		73%
4-3	16.02	16.21	16.12		24%
1-3	15.82	16.27	16.12		64%
1-4	15.77	16.57	16.62		83%
1-3	16.71	17.27	16.77		
1-2	15.62	17.32	16.87	9.1dB	>100%
1-4	16.87	17.82	17.27	9.2dB	52%
2-3	15.27	16.66	17.57	10.4dB	>100%
2-4	16.82	17.71	17.67	10.6dB	27%

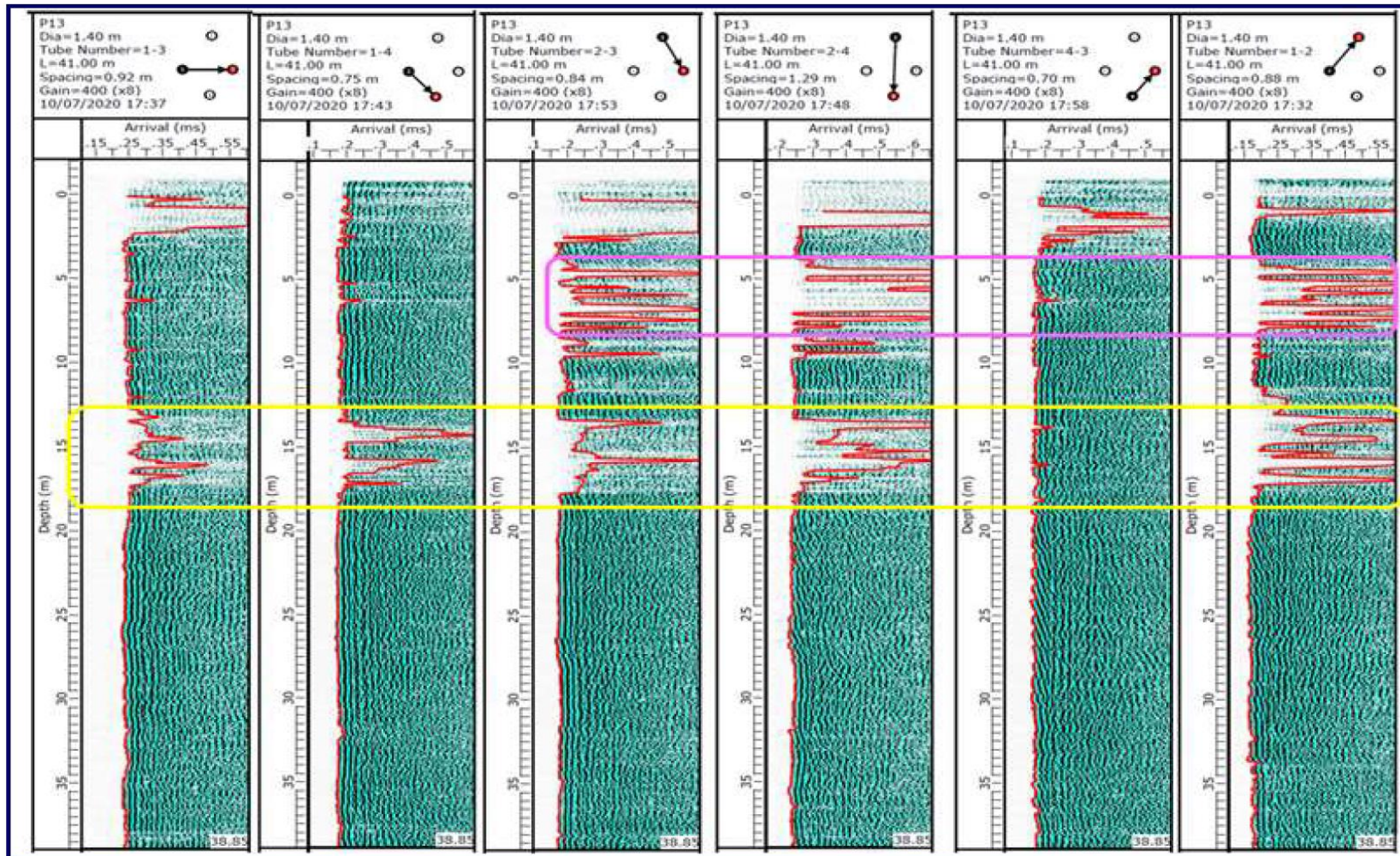


Figura 76. Registros de cascadas obtenidos de los perfiles de la prueba de CSL para la pila P-13, los recuadros rosa y amarillo enmarcan las zonas donde se tienen los defectos y fallas de mayor importancia en la pila

La interpretación de los registros obtenidos de la prueba de Cross Hole Ultrasónico ha revelado la presencia de dos zonas con fallas y defectos muy marcados. La primera de estas zonas se extiende desde los 4.46 m hasta aproximadamente los 8.62 m de profundidad, y se puede observar claramente en los perfiles 2-3, 2-4 y 1-2 (Figura 76). En esta zona, se han detectado valores de reducción de energía entre 9 a 12 dB, lo que sugiere la presencia de materiales menos densos o de discontinuidades estructurales importantes. Además, se ha observado un aumento en el FAT mayor al 21% en la mayoría de los casos, lo que indica que la zona puede ser más susceptible a fallas.

La segunda zona se observa desde los 13.0 m hasta los 17.7 m. Las anomalías detectadas se ven en cinco de los seis perfiles, excepto en el perfil 4-3. En esta zona, se han detectado valores de reducción de energía mayores a 9 dB y el FAT en la mayoría de los casos es mayor al 31%. Por debajo de los 17.0 m, la pila se observa sin anomalías, manteniendo una velocidad de onda promedio de 4,000 m/s, lo que indica un concreto de buena calidad.

Aplicando los criterios de clasificación recomendados por PDI indicados en la Tabla 5, donde se presenta que cuando los valores de reducción de energía son mayores a 9 dB, la pila debe ser clasificada como Cuestionable. Y si los valores de reducción de energía son mayores a 12 dB, la pila debe ser clasificada con "Defecto". Dado que los valores de reducción de energía en las zonas con anomalías están entre 9 y 12 dB, lo correcto sería clasificar preliminarmente la pila como con "Falla".

Según la guía de clasificación de *DEEP FOUNDATIONS INSTITUTE*, 2019, si los resultados de las pruebas indican una buena integridad, la pila se clasificaría como "Sin defectos". Si se detectan defectos, la pila se clasificaría como "Con defectos", y si los defectos son críticos, la pila se clasificaría como "Con defectos críticos". En este caso, dado que se detectaron anomalías en dos zonas específicas de la pila durante el ensayo de Cross Hole Ultrasónico, la clasificación preliminar sería "Con defectos".

Para cuantificar el daño detectado se realizó una tomografía en 3D utilizando el programa PDI-TOMO. El procesamiento de los datos inicia utilizando los datos brutos de la prueba para generar gráficos de la velocidad de onda del sonido en el interior de la pila en función de la profundidad para luego generar una imagen tridimensional de la sección transversal de la pila.

La interpretación de la tomografía obtenida a partir de la prueba de Cross Hole Ultrasónico para la pila P-13 revela la presencia de cuatro secciones en las que se detectaron defectos en el elemento de cimentación. En la primera sección, ubicada a 1.12 m de profundidad, se observó una velocidad por debajo de los 3700 m/s y un área efectiva de 0 %, lo que podría indicar la presencia de un defecto a esa profundidad. Sin embargo, debido al tiempo de colado de la pila, también es posible que este defecto sea el resultado de la pérdida de contacto entre el tubo y el concreto.

Posteriormente, se detectó un daño que afecta prácticamente toda la sección de la pila a una profundidad de 13.86 m, y nuevamente a los 16.0 m de profundidad se tiene el mismo comportamiento con un área efectiva del 0%. En la sección ubicada a 16.97 m de profundidad, se encontró una afectación del 71% del área de la pila. Por debajo de esta profundidad, la tomografía no mostró ningún defecto. En la Figura 77 se presenta gráficamente los resultados obtenidos de la tomografía, en ella se pueden visualizar las secciones analizadas y el modelo 3D para la pila.

Se destaca que la presencia de estos defectos puede indicar la necesidad de realizar una evaluación adicional de la integridad de la pila y tomar medidas para corregir cualquier problema antes de continuar con la construcción. Por este motivo se ejecutó una prueba adicional para complementar los resultados obtenidos de las pruebas de integridad de baja deformación y Cross Hole Ultrasónico. Otro de los métodos que contribuye a evaluar la calidad del concreto es el ensayo de *Down Hole (DH)* que también es una prueba de baja deformación que convencionalmente se realiza en depósitos de suelos. Con el DH se obtiene la propagación de las ondas P y S.

Zona Geotécnica: Transición

Pila: 13

Longitud efectiva: 40.0 m

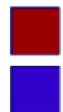
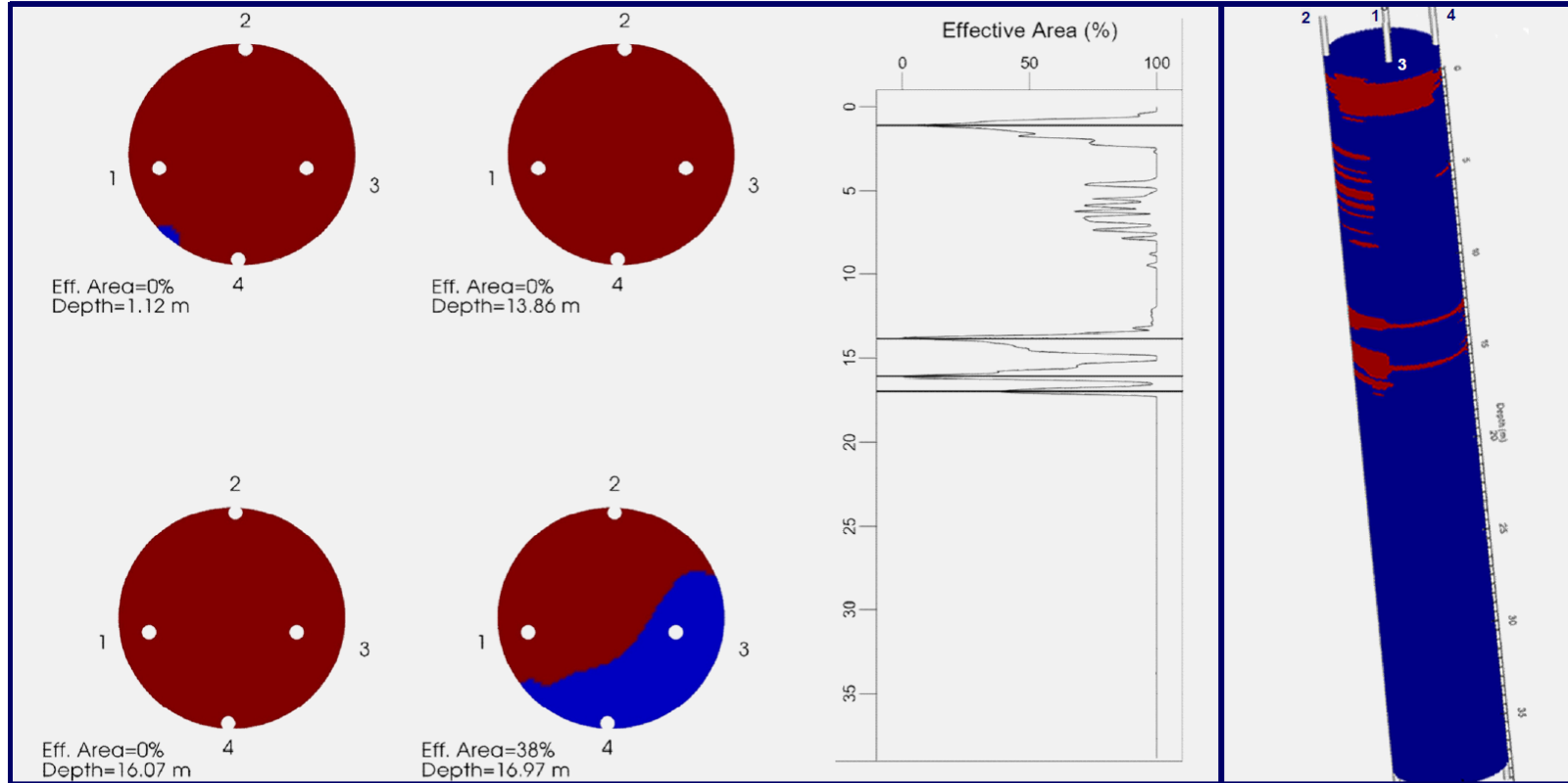
Diámetro: 1.2 m



**BUAP**

**Resultados de Tomografía**

**Modelo de pila 3D con anomalías**



Velocidad de onda < 3,500 m/s

Velocidad de onda > 3,500 m/s

Eff. Area = Área Efectiva

Depth = Profundidad



Tubería instalada en pila



Figura 77. Análisis con tomografía y modelo 3D para la pila P13

Para la realización del DH en la pila P-13, se aprovecharon algunos de los tubos instalados para la prueba CSL, para introducir el geófono de pozo. La fuente de excitación se generó desde la cabeza de la pila, mediante el impacto de un marro de forma vertical

Durante la prueba, el geófono registra el movimiento inducido y envía la señal a un sismógrafo donde es amplificada y digitalizada para posteriormente ser almacenada en una computadora portátil. Durante la ejecución del ensaye, el geófono y el sismógrafo son activados simultáneamente al momento de inducirse la excitación. Esta condición permite obtener las señales de dónde se determina el arribo de las ondas, particularmente interesa el arribo de la onda P que viaja a través del concreto.

Con base en los registros capturados en campo se hizo un análisis para establecer los arribos de la onda P y calcular la velocidad con que se propaga en el concreto de la pila. El ensaye de DH se ejecutó a cada 50 cm hasta los 20.0 m de profundidad, cubriendo la zona de mayor riesgo detectada por PIT y por CSL.

Los resultados obtenidos del DH se presenta en la Figura 78, donde se puede visualizar la profundidad de exploración, la velocidad calculada y la calidad asociada que presenta el concreto.

La velocidad promedio obtenida es de 4,136.6 m/s, lo que corresponde a un concreto de calidad buena. Sin embargo, entre los 7.5 m y hasta los 8.5 m de profundidad, la velocidad disminuye a 3,554.0 m/s en promedio, calificando al concreto en esta zona como de calidad regular (Figura 78). Se destaca que esta disminución de velocidad coincide con la anomalía detectada en los ensayes PIT y CSL ejecutados.

Adicionalmente también se observa una reducción en la velocidad de propagación de onda P en la pila P-13 entre los 15.0 y 15.5 m de profundidad, como fue también identificado con los ensayes PIT y CSL. Sin embargo, las velocidades reducidas se aproximan a los 4,000.0 m/s, asociándose con un concreto de buena calidad según Whiterhurst, 1967 que establece la calidad del concreto según la velocidad de onda P. Por

tanto, esta anomalía se considera sin riesgo para el correcto trabajo estructural y geotécnico del elemento.

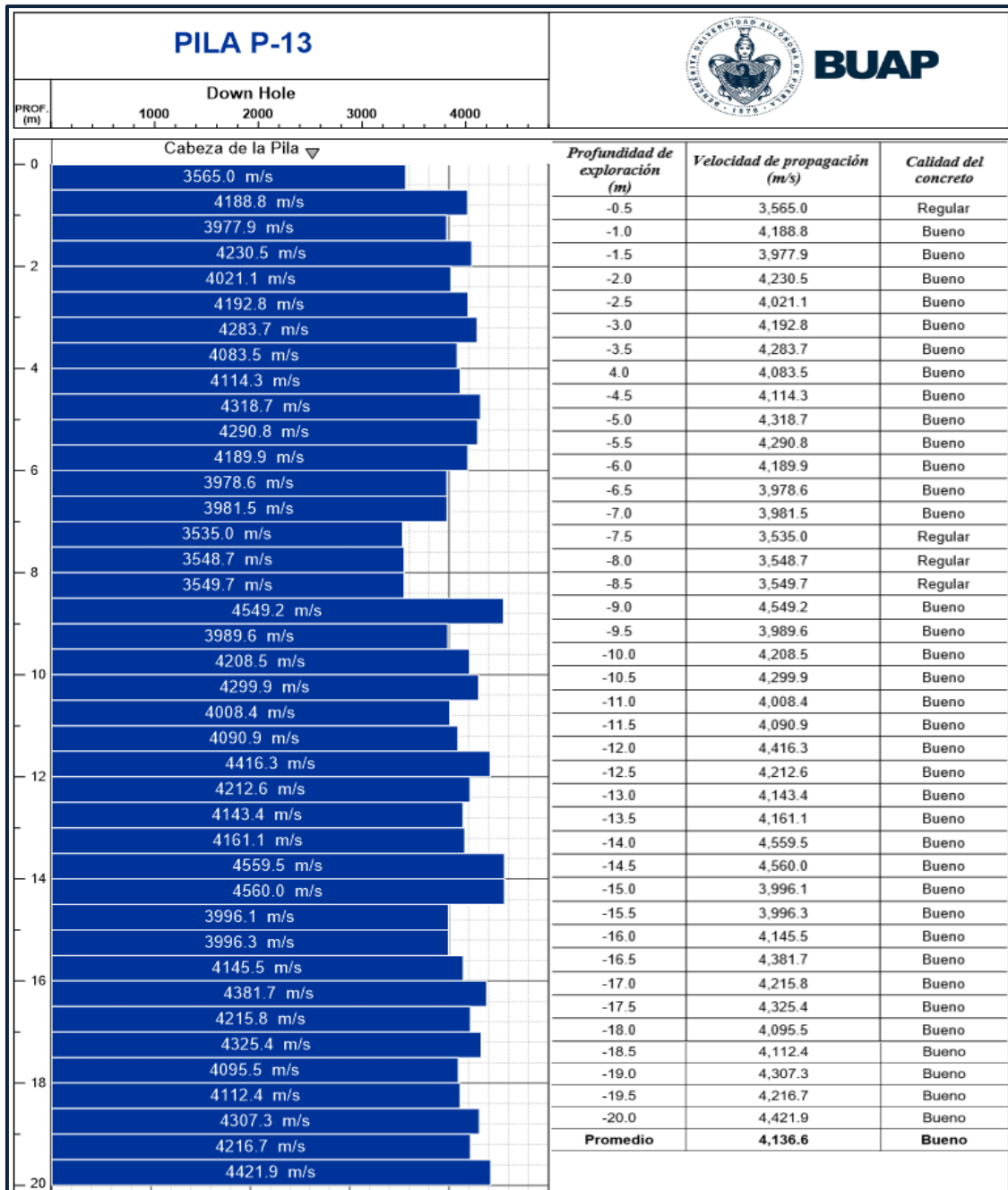


Figura 78. Velocidades de onda obtenida del Down Hole P-13

Con los resultados obtenidos de las pruebas de PIT, CSL y DH la pila fue rechazada y se recomendó la perforación de la pila para la extracción de núcleos y posterior ensayo para determinar la resistencia a la compresión ( $f'c$ ).

Los ensayos de compresión realizadas a los núcleos extraídos en los primeros 10.0 m perforados reportó, en la mayoría de las pruebas una resistencia  $f'c$  mayor a la del proyecto. Sin embargo, en un solo núcleo, el espécimen de dimensiones aproximadas 4.5x8.0 m reportó una resistencia a la compresión igual a 184 kg/cm<sup>2</sup>, bastante menor que lo especificado en proyecto igual a  $f'c= 300$  kg/cm<sup>2</sup>.

Después de que el área de estructuras analizase las condiciones de trabajo de la pila P.-13, posterior a todas las pruebas analizadas, determinó que, aún en condiciones muy adversas en las que el concreto tenga una resistencia igual al 50% de la resistencia de proyecto, la pila podría resistir la carga axial de diseño ( $P_u= 1,104$  t) con una reducción muy importante en la resistencia a flexión, pero con una capacidad aceptable.

Después de varias pruebas de integridad, ensayos de laboratorio y análisis minuciosos del especialista en las pruebas de integridad, el área de geotecnia y el estructurista la Pila P-13 fue Aceptada.

#### 4.3 Casos de estudio en la zona geotécnica III (Lago)

La Zona III, conocida como la zona de lago del Valle de México, se caracteriza por presentar una compleja estratigrafía debido a su origen lacustre. En esta región, los procesos constructivos de las cimentaciones profundas revisten una importancia crucial debido a los desafíos geotécnicos que se presentan.

Las series arcillosas superiores e inferiores, constituyen una parte significativa de la estratigrafía de la región. Debido a la naturaleza de estos suelos, la profundidad a la que se debe desplantar las pilas adquiere una importancia crucial en los procesos constructivos. La presencia de los estratos arcillosos implica la necesidad de alcanzar una profundidad adecuada para garantizar la estabilidad y el correcto funcionamiento de las cimentaciones profundas.

Ante este escenario, resulta fundamental llevar a cabo pruebas de integridad en las pilas para verificar su condición y asegurar que cumplan con los requisitos de diseño y seguridad.

A continuación, se describen algunos casos de pilas donde se detectaron anomalías mediante pruebas de integridad en dos obras.

#### 4.3.1 Obra A

Se proyecta la construcción de una edificación con dos torres: la primera torre con nueve niveles superiores y la segunda con ocho niveles, y dos sótanos. En cuanto a la estratigrafía de la zona, se ha identificado que hasta los 4.2 m de profundidad existe una capa superficial compuesta por arcilla limosa. Posteriormente desde los 4.2 m hasta los 29.4 m, se encuentra la serie arcillosa superior, seguida por una capa dura compuesta por arena limosa que se extiende hasta los 33.1 m.

Para garantizar una adecuada cimentación, se propuso la construcción de 18 pilas con 0.8 y 1.2 m de diámetro, desplantadas a 21.5 m de profundidad. Sin embargo, durante los procesos constructivos de las primeras pilas, se detectaron irregularidades mediante pruebas de integridad, lo que llevó a su rechazo y posterior sustitución de tres pilas. Con el objetivo de evitar errores similares, se llevó a cabo una supervisión rigurosa por parte de especialistas en geotecnia durante la perforación y el colado de las nuevas pilas.

Posteriormente se ejecutaron pruebas de integridad en todos los elementos, donde todas fueron aceptadas, a excepción de dos pilas que se describen a continuación.

##### 4.3.1.1 Pila P-27

La pila P-27 con un diámetro de 120 cm fue descabezada hasta los -8.7 m de profundidad. Nivel donde se realizó la prueba de integridad de la pila. Esta prueba permitió evaluar la calidad y la integridad del elemento estructural, brindando información crucial sobre su

comportamiento y resistencia. En las imágenes de la Figura 79 se presenta el equipo y algunas de las actividades realizadas durante la PIT.



Figura 79. Trabajos de campo durante la ejecución de la prueba de integridad en la Pila P-27

El volumen teórico de concreto estimado para la construcción fue de  $12.0 \text{ m}^3$ . Sin embargo, al realizar las mediciones correspondientes, se determinó que el volumen real utilizado fue de  $14.0 \text{ m}^3$ . Los reportes de colados de la pila indica la utilización de dos ollas con tiempo entre vaciado de 15 minutos máximos, sin contratiempos.

Con base en los registros capturados en campo se hizo un análisis para establecer los arribos de la onda y calcular la longitud continua del elemento. Se estudió también la configuración de la señal para identificar las crestas y valles relacionados con la configuración geométrica de la sección del elemento.

Cada registro fue analizado en el dominio del tiempo y de la frecuencia, con el interés de establecer con la mayor certidumbre posible la longitud continua de las pilas de prueba como se presenta en la Figura 80.

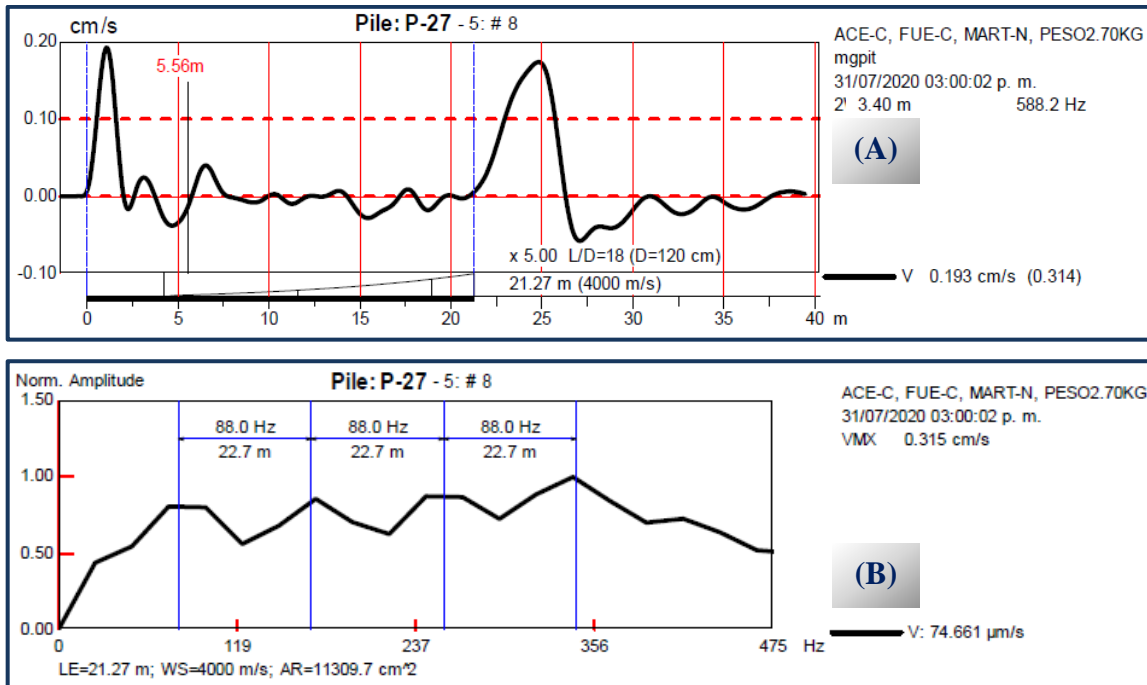


Figura 80. Análisis en el dominio en tiempo (A) y en frecuencia (B) para la pila P-27

El análisis realizado en el dominio del tiempo reveló resultados significativos para la pila. A una longitud de 21.24 m, se observó una clara reflexión por punta, indicando la continuidad del elemento hasta la profundidad de proyecto. Además, a una profundidad de 5.56 m, se identificó una reflexión positiva, sugiriendo la posible contaminación del concreto en esa zona específica. Por otro lado, al examinar el dominio de la frecuencia, se encontró una amplitud de 22.7 Hz y una velocidad de 4,000.0 m/s, lo que sugiere una longitud estimada de 22.7 m.

Adicionalmente, para evaluar los primeros metros del elemento se ejecutó el ensaye de velocidad-fuerza. El registro obtenido se presenta en la Figura 81, donde se puede observar que el registro de fuerza está por debajo del registro velocidad indicando problemas en la cabeza de la pila.

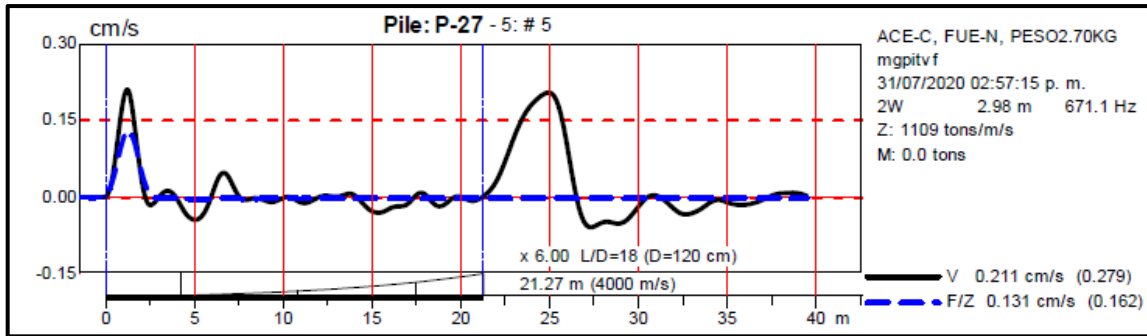


Figura 81. Registro de Fuerza-Velocidad para la pila P-27

El análisis de la integridad de la pila se realizó considerando diversas variables, como las pruebas de integridad utilizando el Método de Eco de Pulso en el análisis de tiempo, la estratigrafía del sitio y los registros de los procesos de colado del elemento. Una anomalía destacada se encuentra a una profundidad de 5.56 m, la cual fue correlacionada con la estratigrafía previamente mencionada. Según esta estratigrafía, se esperaba encontrar una capa de arcilla con alto contenido de arena seguida por un lente de arena en esa misma profundidad. Esta anomalía se relaciona con una reflexión positiva, que sugiere la presencia de contaminación en el concreto. Además, se tomaron en cuenta los volúmenes de concreto real y colado, donde se observa una diferencia entre ambos, con un volumen colado superior al teórico. Por todo esto la pila se clasifica según Rausche, (1992) como **PFx**.

El comportamiento más representativo en el dominio del tiempo, la estratigrafía del lugar y el volumen de concreto de la pila P-27 se presenta en la Figura 82.

Con el objetivo de obtener más información sobre la anomalía detectada en la pila, se llevó a cabo un ensayo sísmico de Down-Hole (DH). Este ensayo consistió en perforar la pila en su centro sin recuperación de núcleos, alcanzando una profundidad de 10.0 m. La fuente de excitación se generó desde la cabeza de la pila mediante el impacto de un marro en forma vertical.

El ensayo se realizó de manera secuencial cada 50 cm, cubriendo así la zona de mayor riesgo identificada durante la prueba de integridad en el análisis de tiempo (PIT).

El ensayo sísmico de DH proporcionó información valiosa sobre la calidad del concreto y permitió una evaluación más detallada de la pila.

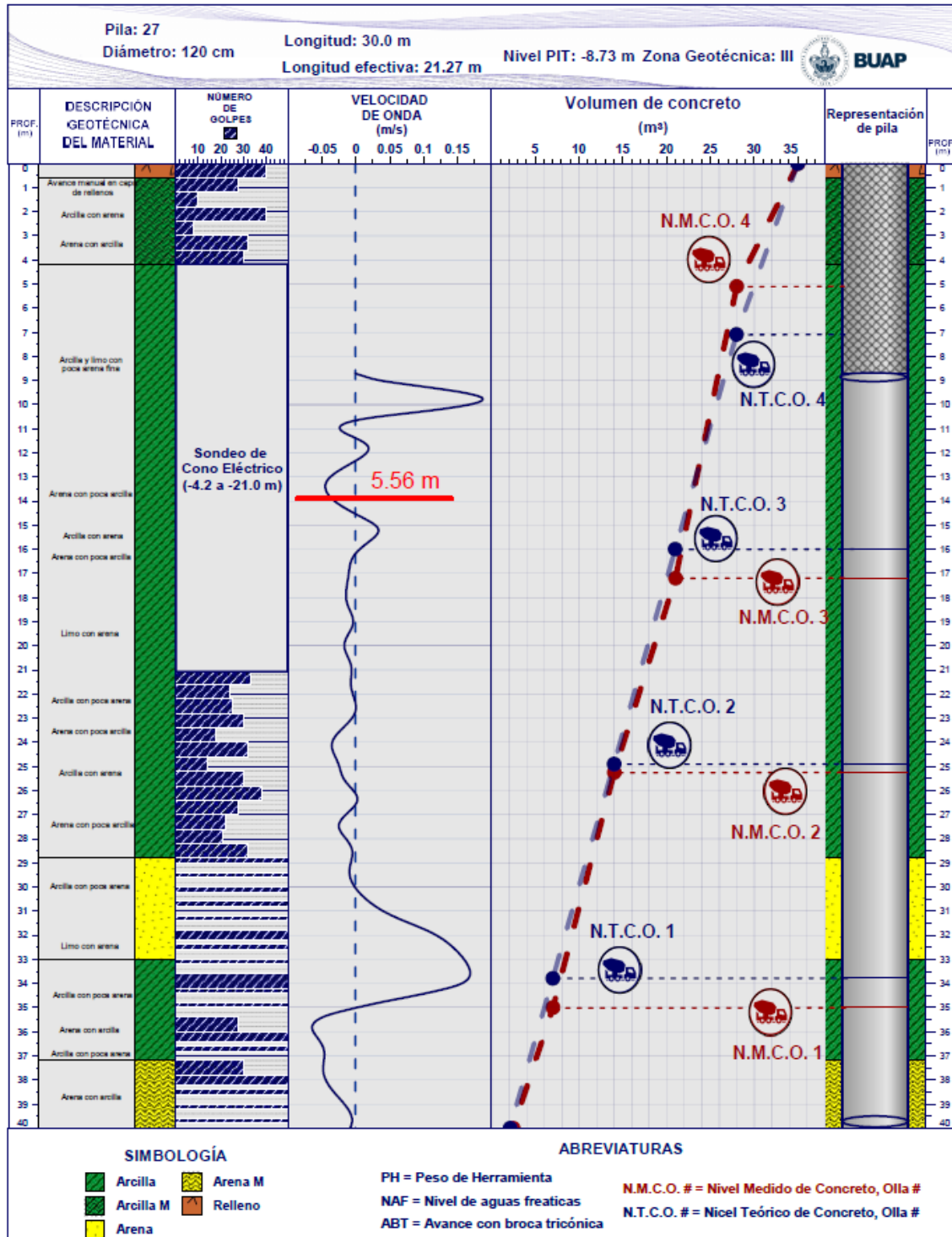


Figura 82. Perfil estratigráfico y registro en el análisis del dominio del tiempo de la pila P-27

Con base en los registros capturados en campo se hizo un análisis para establecer los arribos de la onda P y calcular la velocidad con que se propaga en el concreto de la pila. La velocidad de propagación es dependiente de las propiedades elásticas del medio, de tal manera que, conociendo la velocidad de onda se puede relacionar con los parámetros de calidad del material.

Los resultados obtenidos del ensayo de Down Hole se presenta en la Figura 83 donde se detallan la profundidad de exploración, la velocidad calculada y la calidad del concreto asociado, así como una comparativa entre los resultados obtenidos del ensayo PIT y el DH. Es importante destacar que en esta figura se ha tomado como nivel cero el correspondiente a la cabeza de la pila durante el ensayo.

A partir de los resultados presentados, se pueden realizar las siguientes observaciones y recomendaciones:

- En los primeros 10.0 m de longitud de la pila P-27, se registró una velocidad promedio de propagación de onda de 3,639 m/s, lo que indica un concreto de calidad regular.
- Entre las profundidades de 5.5 m y 6.5 m, la velocidad promedio disminuye a 3,406 m/s, lo cual califica al concreto en esta zona como de calidad regular (Figura 83). Esta disminución de velocidad coincide con la anomalía detectada en el ensayo PIT.
- A una profundidad de 4.5 m se identificó una velocidad de propagación de onda de 3,220 m/s, asociada a un concreto de calidad regular. Además, se observó la mayor reducción en la velocidad de propagación de onda en la cabeza del elemento, con 2,864 m/s, lo que corresponde a un concreto de calidad deficiente.
- Con base en los resultados obtenidos de los ensayos realizados en la pila P-27 mediante las pruebas PIT y DH, se constata consistentemente la presencia de una deficiencia en la calidad del concreto del elemento. Por lo tanto, se considera que la pila P-27 ha sido Rechazada.

- Se recomendó presentar los resultados obtenidos a los departamentos de Estructuras y Mecánica de Suelos para evaluar si, a pesar de las deficiencias encontradas en el concreto de la pila P-27, es capaz de desempeñar adecuadamente su función estructural y geotécnica para la cual fue diseñada en el proyecto de cimentación de la estructura.

El registro obtenido en tiempo de la pila P-27 permite construir el modelo de impedancia, el cual revela información valiosa sobre la variación de la onda a lo largo de la profundidad de la pila como se muestra en la Figura 84. En este modelo, se observa una reducción significativa en la sección transversal alrededor de los 5.56 m. Esta reducción en la sección transversal se puede interpretar como la presencia de contaminación en el medio, posiblemente debido a la calidad deficiente del concreto. El análisis detallado de esta anomalía en el modelo de impedancia proporciona una idea gráfica de la geometría del elemento.

Después de la evaluación de los departamentos de Estructuras y Mecánica de Suelos, se consideró que la anomalía detectada no presentaba una afectación importante para el trabajo de carga de la pila por lo que la pila fue Aceptada.

#### 4.3.1.2 Pila P-5

La pila P-5, con un diámetro de 80 cm y una longitud efectiva de 22.2 m, ha sido sometida a la prueba de impacto de baja deformación para evaluar su integridad. La prueba PIT se llevó a cabo en el nivel de cabeza de la pila, que se encuentra a una profundidad de -7.8 m. El volumen teórico de la pila se estimó en 11.0 m<sup>3</sup>, mientras que el volumen real alcanzó los 14.0 m<sup>3</sup>.

Al analizar el registro obtenido en el dominio de tiempo (Figura 85A), se observa una reflexión clara por punta, lo que indica una buena transferencia de energía en la parte inferior de la pila. Sin embargo, a partir de los 15.07 m, se detecta una reflexión positiva. Esta anomalía sugiere una posible contaminación en esa zona.

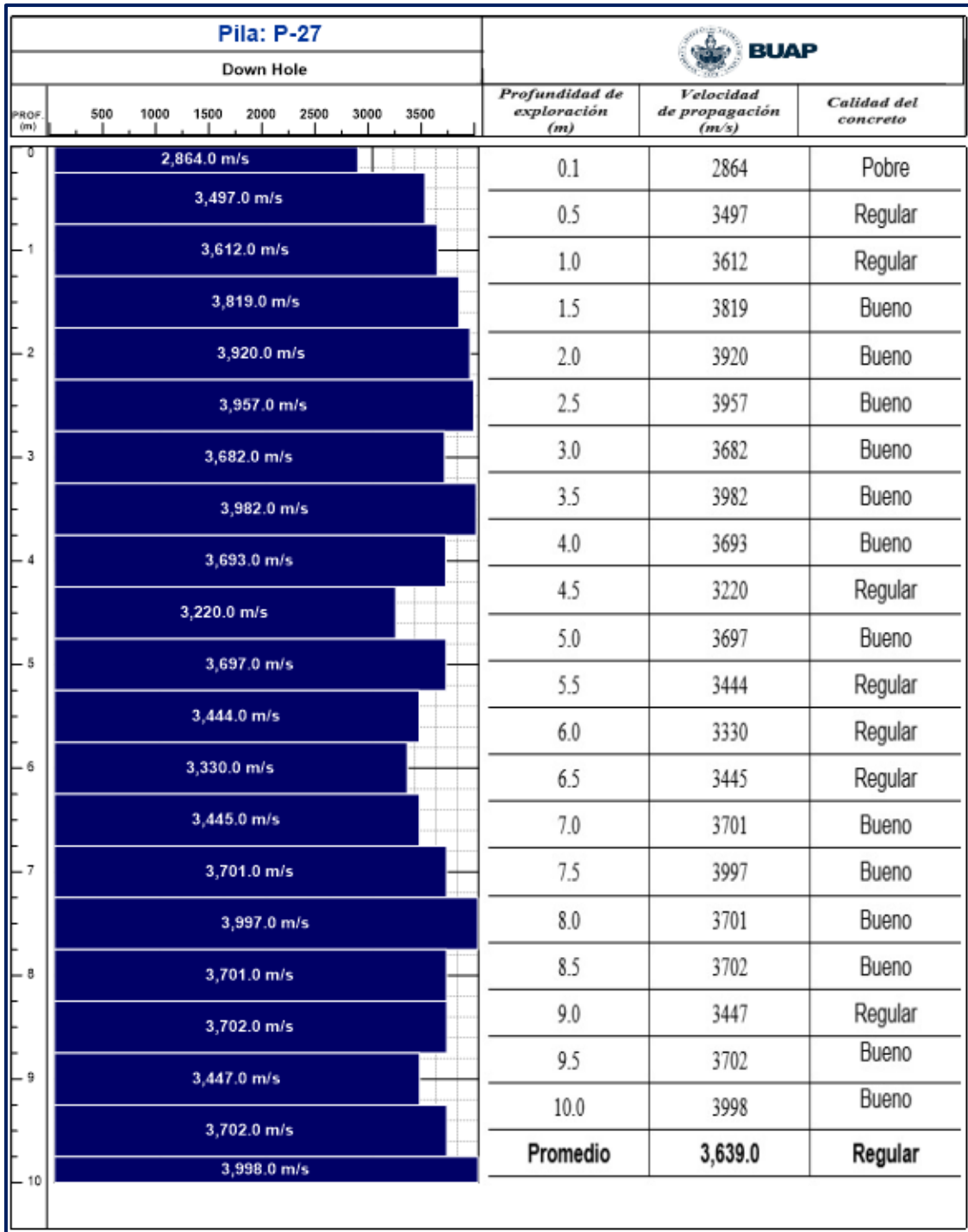


Figura 83. Resultados del ensaye PIT y Down Hole en la pila P-27

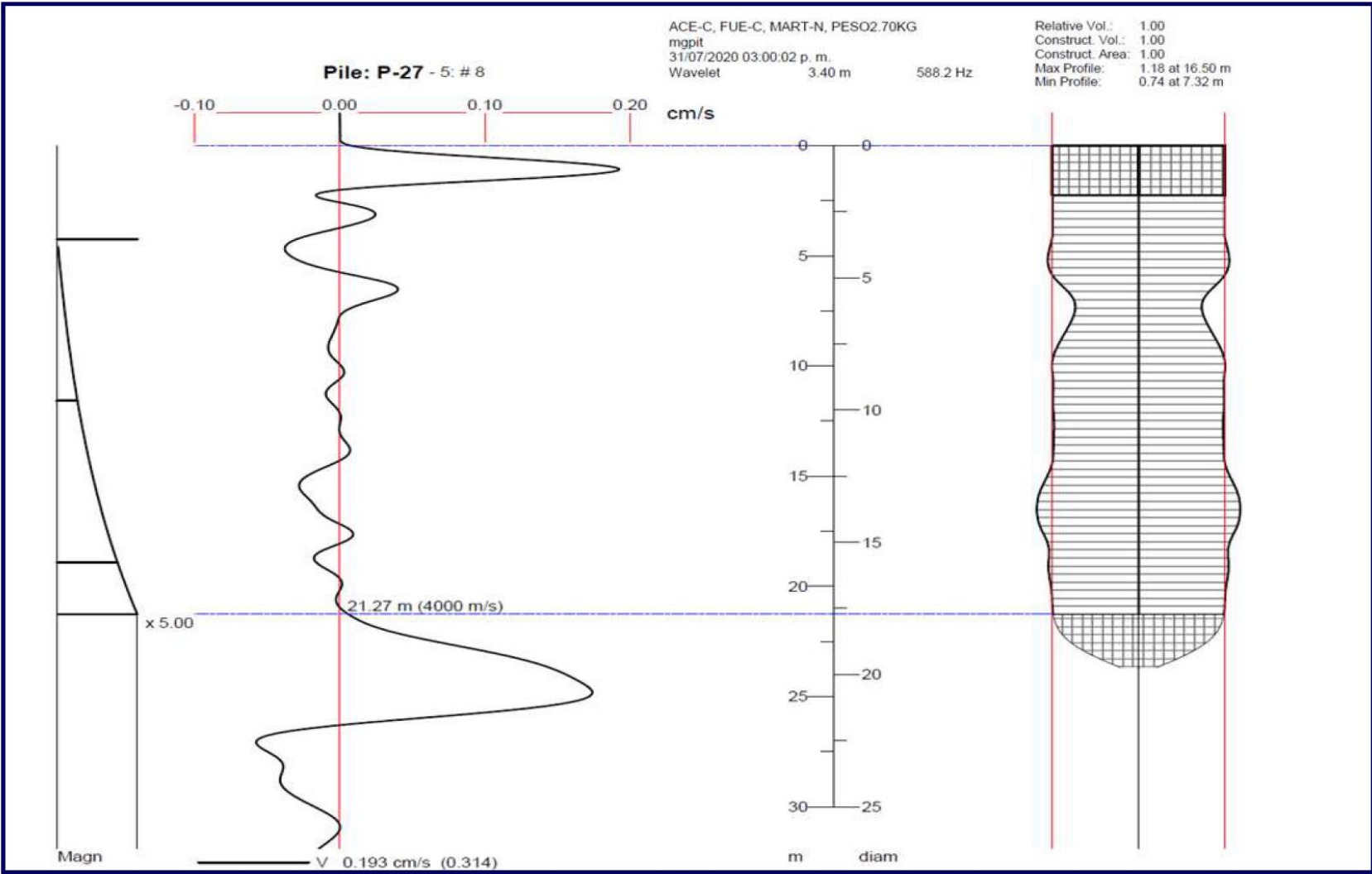


Figura 84. Modelo de impedancia de la pila P-27

Con base en estos parámetros y la interpretación de los resultados, se clasifica a la pila P-5 como cuestionable debido a que presentar deficiencias en su integridad estructural. Se destaca que el registro obtenido en el análisis en el dominio de la frecuencia (Figura 85B) muestra que para una velocidad de 3,520.0 m/s si tiene una amplitud en la frecuencia de 77.5 m. asociada a una longitud de 22.7 m, reportando la longitud efectiva del diseño de la pila.

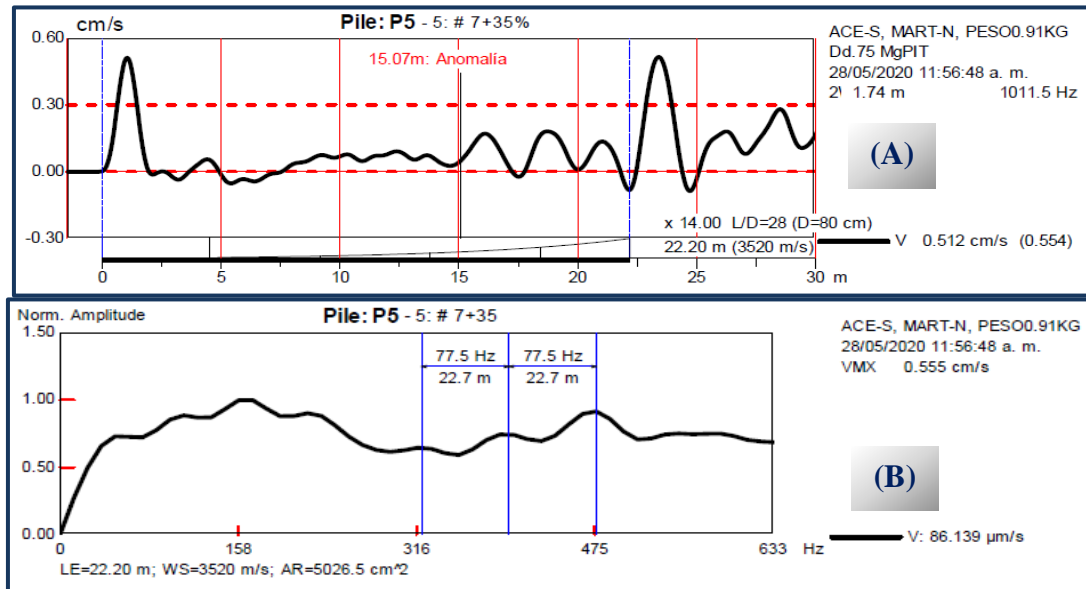


Figura 85. Análisis en el dominio en tiempo (A) y en frecuencia (B) para la pila P-5

Para interpretar de manera teórica la anomalía detectada cerca de la punta de la pila se realizó en análisis de impedancia. En este análisis se puede visualizar el cambio de geometría después de los 15.07 m. Como se mencionó la velocidad obtenida es de 3,520.0 m/s que indica un concreto de calidad regular. Este modelo se representa en la Figura 86.

Después de una evaluación exhaustiva de los especialistas de mecánica de suelos y estructuras se concluye que la pila P-5 puede trabajar para la carga que fue diseñada por lo que el elemento fue Aceptado.

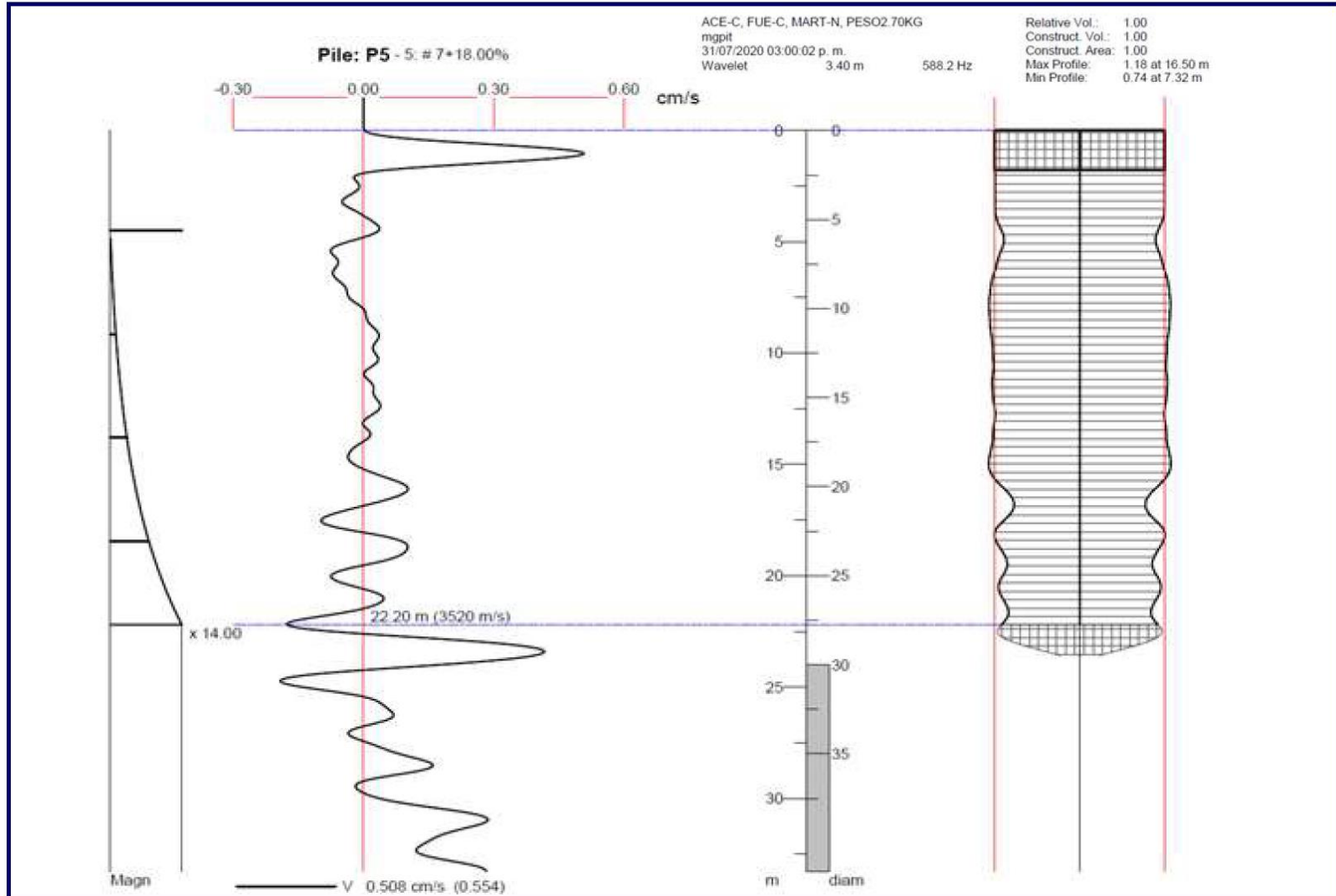


Figura 86. Modelo de impedancia de la pila P-5

#### 4.3.2 Obra B

El proyecto consiste en la construcción de un edificio de uso habitacional compuesto por un nivel de sótano, planta baja y 20 niveles superiores. La cimentación del edificio estará resuelta con 34 pilas de concreto, desplantadas a 46.5 m de profundidad, con diámetros que varían entre 100 a 160 cm.

Por la relación diámetro-longitud de las pilas y lo complejo de las excavaciones en la zona por el espacio y los equipos utilizados para la perforación y colado de las pilas el área de proyectos decidió ejecutar pruebas de Cross Hole Ultrasónico. Para ello, desde la construcción de las pilas se previó la instalación de tubos de PVC perimetrales que permitieran el acceso del emisor y del receptor del equipo. Posterior al colado, los tubos fueron llenados con agua para lograr el correcto acoplamiento mecánico entre las sondas (emisora y receptora) y las interfaces con el concreto. La cantidad de tubos se estableció atendiendo las recomendaciones de la norma ASTM D6760-08.

Como se ha expuesto la prueba consiste en introducir en unos de los tubos la sonda emisora que trasmite una señal de alta frecuencia que viaja a través del concreto y es detectada por la sonda receptora ubicada en el otro tubo.

El barrido se realiza desde la punta de la pila hasta el inicio de esta con un intervalo de muestreo continuo de 5 cm. Este procedimiento se repite en los pares de tubos en todas las combinaciones posibles de la pila. En las imágenes de la Figura 87 se presenta el equipo empleado y algunas de las actividades realizadas durante la ejecución.

A continuación, se expone un ejemplo de un caso en el que se detectó un defecto específico en una pila utilizando el método de CSL. En el momento en que se llevó a cabo esta investigación, la construcción de los elementos de cimentación aún estaba en proceso, por lo tanto, no se habían realizado pruebas de integridad en todos los elementos.



Figura 87. Equipo y ejecución de la prueba de CSL

#### 4.3.2.1 Pila 1-A

El 17 de febrero de 2023 se coló la pila 1-A, que tiene un diámetro de 140 cm. Durante el proceso de construcción, se perforó a una longitud de 45.10 m y se utilizó un volumen de concreto equivalente a nueve ollas con un total de 72.0 m<sup>3</sup>. Adicionalmente se han registrado incidentes de caídos debido a un relleno mal compactado durante el colado de la pila. Estos contratiempos plantean la necesidad de analizar a fondo la integridad estructural y la capacidad de carga de la pila 1-A, considerando los posibles efectos de esta irregularidad en su desempeño y estabilidad.

Por esta razón y cumpliendo con las Normas Técnica Complementarias para Diseño y Construcciones de Cimentaciones (NTC-DCC, 2017), que establece el número de pilas a ensayar dependiendo de la zona geotécnica y el tipo de edificación, el día 27 de febrero se ejecutó la prueba de integridad de CSL reportándose los siguientes resultados:

Por el diámetro de la pila se instalaron en el armado cuatro tubos de los que se obtuvieron seis perfiles. El laboratorio encargado de la ejecución de la prueba agrupa las anomalías obtenidas de cada perfil a partir de la profundidad, obteniéndose los datos que se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Anomalías encontradas en la pila 1-A (valores promedios)

Sección	Perfil	Inicio (m)	Fin (m)	Espesor (m)	Pico de la anomalía (m)	Atenuación de la energía (Db)	FAT (%)
1	2-4;4-3	1.40	1.75	0.35	1.48	6.75	N/A
2	4-3;1-3 1-2	1.97	2.77	0.80	2.40	4.40	N/A
3	1-3	3.65	4.13	0.48	3.85	3.30	N/A
4	1-4; 2-4	8.90	10.12	1.22	9.13	5.70	N/A
5	1-3;4-3; 1-2;2-4;	30.35	30.74	0.38	0.38	9.60	13%
6	1-4;1-3; 2-4	30.85	31.20	0.35	31.08	7.90	9%
7	2-4;2-3; 1-3	32.11	33.26	1.15	33.10	5.20	27%
8	2-3; 1-3; 2-4;1-2; 1-4;4-3	36.71	39.00	2.29	37.68	6.40	14%
9	1-4;1-3; 4-3;2-4; 1-2	39.31	40.62	1.31	40.16	6.90	17%
10	1-2;2-3; 1-3;4-3; 1-4;2-4	42.21	43.00	0.79	42.89	12.00	17%

De la información presentada en la Tabla 9 se destaca que las secciones 1, 2, 3 y 4 presentan anomalías “menores” debido a los bajos valores obtenidos de atenuación de energía y sin retraso del FAT, a excepción de las secciones 5 y 6, que registran retraso del primer arribo del 13 y 9% correspondientemente, sin embargo, estos valores se encuentran dentro del intervalo para considerar estas anomalías “menores”. Adicionalmente el laboratorio reporta que la sección siete registra un posible defecto en tres de los perfiles obtenidos; con un bajo valor en la atenuación de energía, pero un porcentaje alto de retraso del FAT de hasta 27%. Las secciones ocho y nueve también registran anomalías “menores” con valores bajos de atenuación de energía y el porcentaje de retraso del FAT queda por debajo del 20%. Por último, al fondo de pila se identifica la sección 10 donde se considera un posible defecto en la estructura registrado en los seis perfiles obtenidos,

con un espesor promedio de  $\pm 0.79$  m y un alto valor de atenuación de energía y retraso del FAT de hasta 34%.

Debido a lo anterior el laboratorio de calidad clasificó la pila como **P/D** y se recomendó que este elemento estructural sea analizado por el especialista en cimentaciones tomando como base los resultados de la prueba realizada. Los registros obtenidos de esta prueba se presentan en el Anexo A.

Posteriormente, la empresa Sísmica de Suelos, llevó a cabo nuevamente la prueba de Crosshole Sonic Logging (CSL) en la pila mencionada. Esta medida se implementó con el objetivo de confirmar la información obtenida por el laboratorio de calidad.

La Tabla 10 muestra los resultados de las anomalías detectadas, incluyendo el número de perfil, el inicio y fin, el pico de la anomalía, la atenuación de la energía medida en decibeles y el aumento en el FAT.

Tabla 10. Anomalías detectadas con el CSL en la pila 1-A

Perfil	Inicio (m)	Fin (m)	Pico de defecto (m)	Atenuación de la energía (Db)	FAT
1-4	0.11	0.76	0.16	18.7dB	
1-2	0.06	1.01	0.21	17.6dB	
1-3	0.21	1.91	0.26	16.1dB	
4-3	0.91	2.21	0.96	10.1dB	
1-4	27.66	28.05	27.8		
2-3	28.76	29.11	29.01	18.7dB	>100%
1-3	29.55	30.51	29.66	9.2dB	41%
2-4	29.51	29.86	29.71	12.2dB	>100%
1-2	29.51	30.01	29.8	14.5dB	45%
4-3	29.86	30.71	29.96	11.4dB	44%
1-4	31.61	33.2	32.01	10.1dB	>100%
2-4	30.91	33.66	32.01	9.1dB	>100%
4-3	31.26	32.76	32.36		28%
1-4	34.66	37.01	36.05	13.0dB	>100%
2-4	35.16	37.01	36.61	9.4dB	>100%
1-3	36.76	37.36	36.95		29%
1-4	38.16	38.76	38.41		>100%
1-3	37.86	39.71	39.05	12.8dB	97%
2-4	38.36	39.76	39.16	10.5dB	>100%
1-4	40.86	41.96	41.91		27%
1-2	41.41	42.01	42.01		39%

Los resultados obtenidos de la prueba CSL en la pila 1-A se presentan en las Figuras 88 a 90. En ellas se indican para cada sección ejecutada, los perfiles de la velocidad de onda, la energía y el diagrama de cascada del pulso ultrasónico.

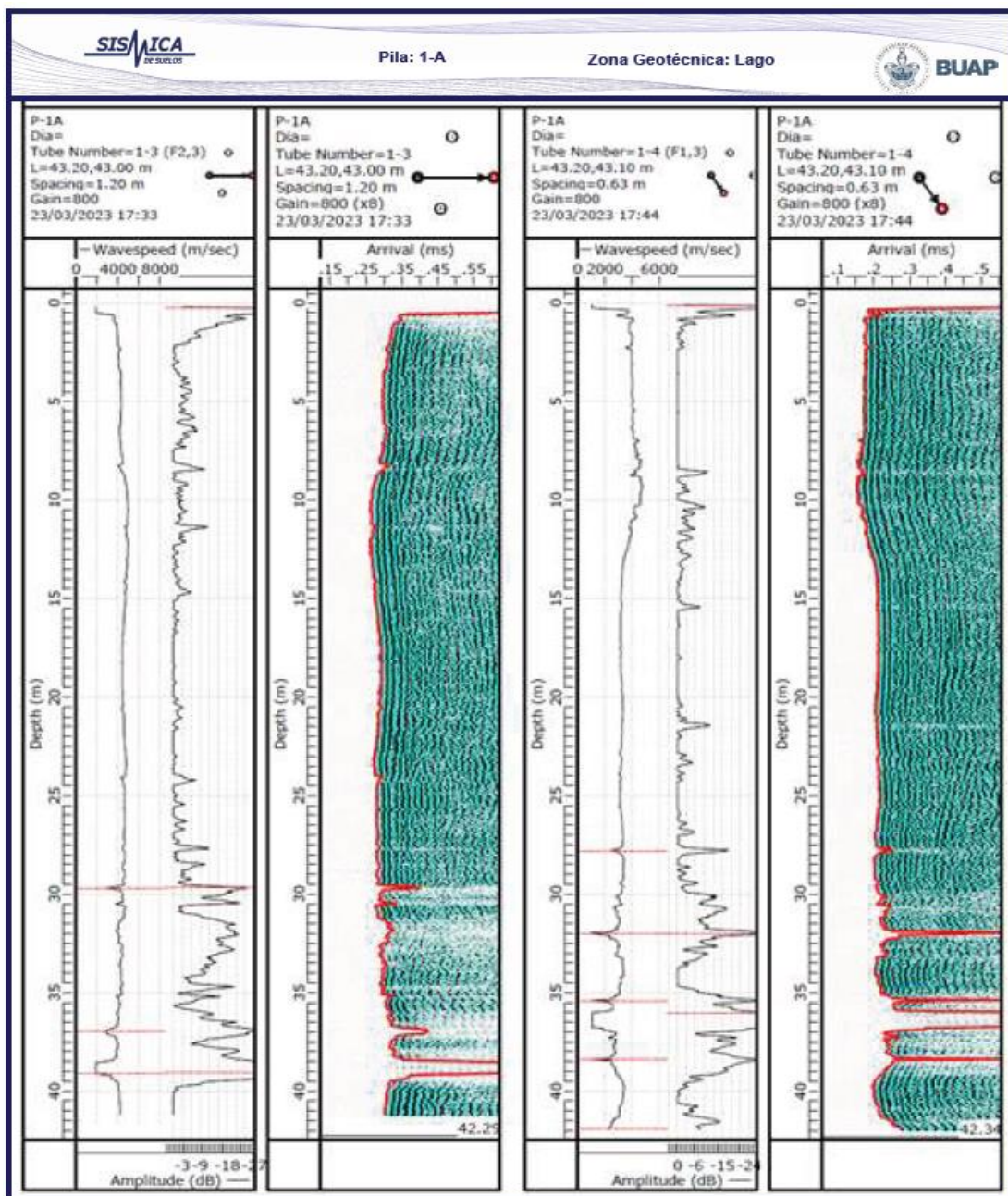


Figura 88. Perfiles 1-3 y 1-4 obtenidos del CSL para la pila 1-A

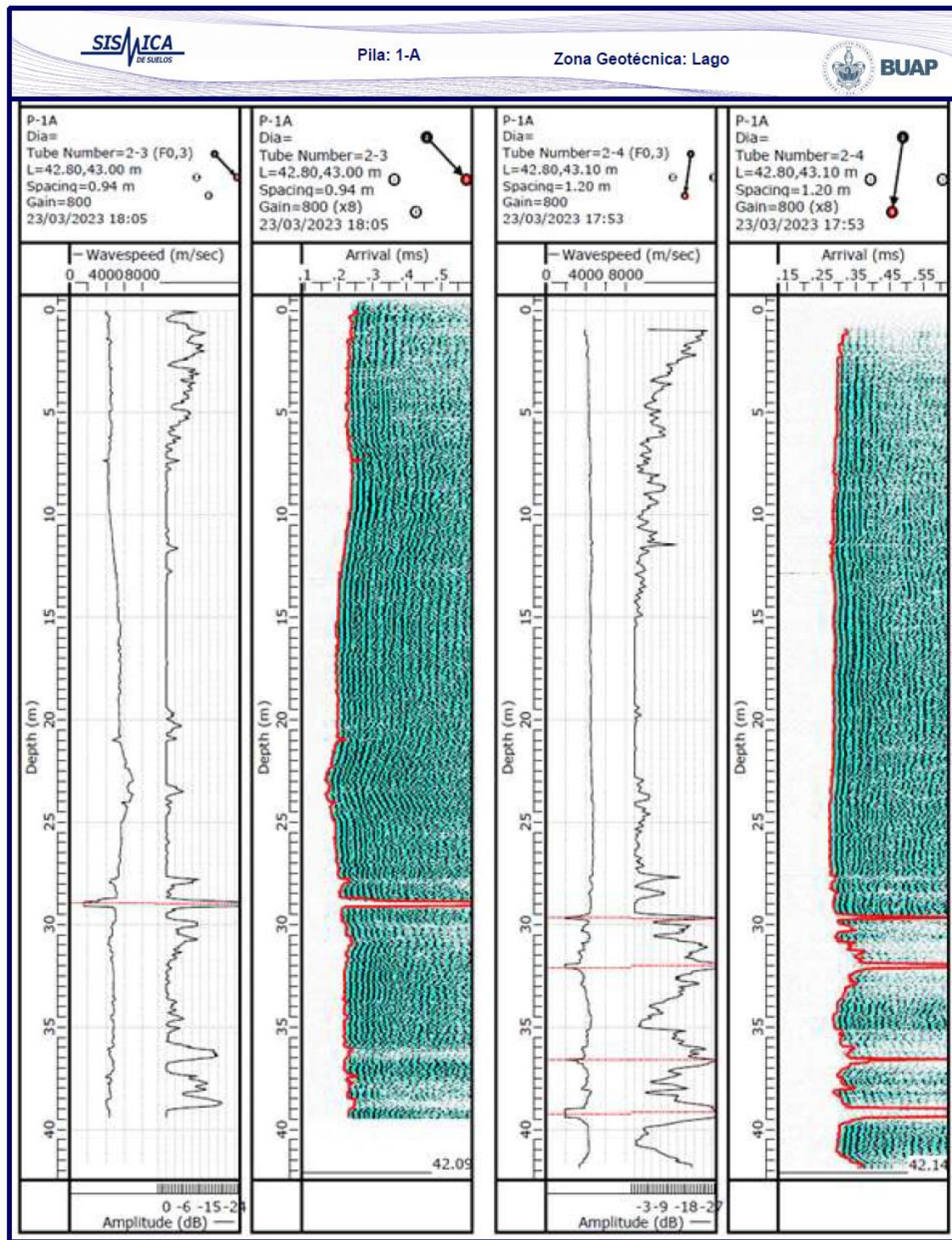


Figura 89. Perfiles 2-3 y 2-4 obtenidos del CSL para la pila 1-A

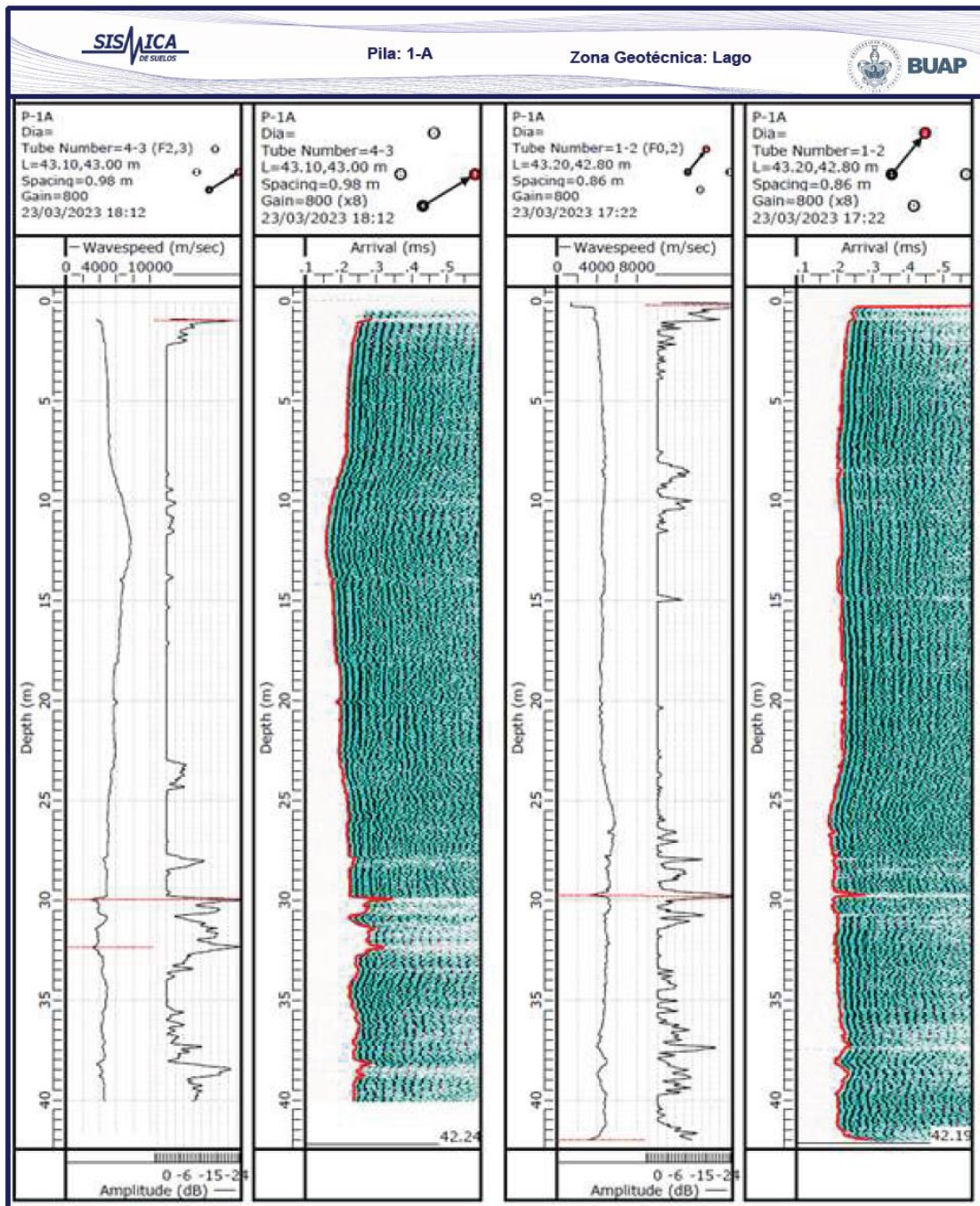


Figura 90. Perfiles 4-3 y 1-2 obtenidos del CSL para la pila 1-A

Durante el análisis mediante el CSL en la pila 1-A, se identificaron importantes anomalías, principalmente por debajo de los 29.0 m de profundidad. En los seis perfiles analizados, se observaron dos zonas de particular importancia. La primera zona abarca desde los 29.0 m hasta los 33.6 m, presentando una atenuación de la energía registrada que varía entre 9.2 y 10.1 decibeles (dB), junto con un retraso en el tiempo de llegada

(FAT) que oscila entre el 41% y el 100%. La siguiente sección transversal afectada se encuentra entre los 36.9 y 39.0 m, con una atenuación de energía que varía entre 9.4 y 24 dB, y un retraso en el FAT que va desde el 27% hasta más del 100%. Estas anomalías indican posibles irregularidades en la calidad y la integridad del concreto en estas profundidades específicas de la pila. En la Figura 91 se muestra los registros de cascada de los seis perfiles donde se puede visualizar las secciones transversales más afectadas.

Según los criterios establecidos por la Guía de Clasificación de *Pile Dynamics*, la pila 1-A se clasificaría como "P/A". Esta clasificación se basa en las anomalías detectadas en el análisis CSL, indicando irregularidades en la calidad y la integridad del concreto en profundidades específica. Para los criterios establecidos por el *Deep Foundations Institute* (DFI) en 2019, la pila 1-A se clasificaría como "Clase C ". Esto se debe a las anomalías identificadas en el análisis CSL, que indican una pila con defectos críticos. Ambas clasificaciones indican la presencia de problemas en la pila que requieren una atención y evaluación detalladas.

Después de obtener los resultados del análisis CSL, se procedió a realizar un análisis adicional utilizando la tomografía PDI-TOMO. Este análisis reveló la presencia de cuatro secciones transversales afectadas en la pila. Para el análisis tomográfico se consideró una velocidad mínima de concreto de buena calidad de 3,700.0 m/s.

La primera sección transversal analizada fue a una profundidad de 29.65 m, donde se detectó que el defecto solo afectaba al 8% de la sección. La siguiente profundidad analizada fue a los 36.9 m, donde se observó que el 21% del área efectiva de la pila presentaba afectaciones. La sección transversal más afectada se ubica a los 38.87 m, donde se encontró que el 49% de la sección presenta velocidades inferiores a los 3,700.0 m/s.

Se destaca que el análisis en la profundidad cercana a la punta de la pila, a los 41.8 m, no pudo ser concluyente debido a que la sonda no alcanzó la profundidad final en todos los tubos. En la Figura 92 se presenta el análisis 2D y 3D obtenido de la tomografía de la pila 1-A.

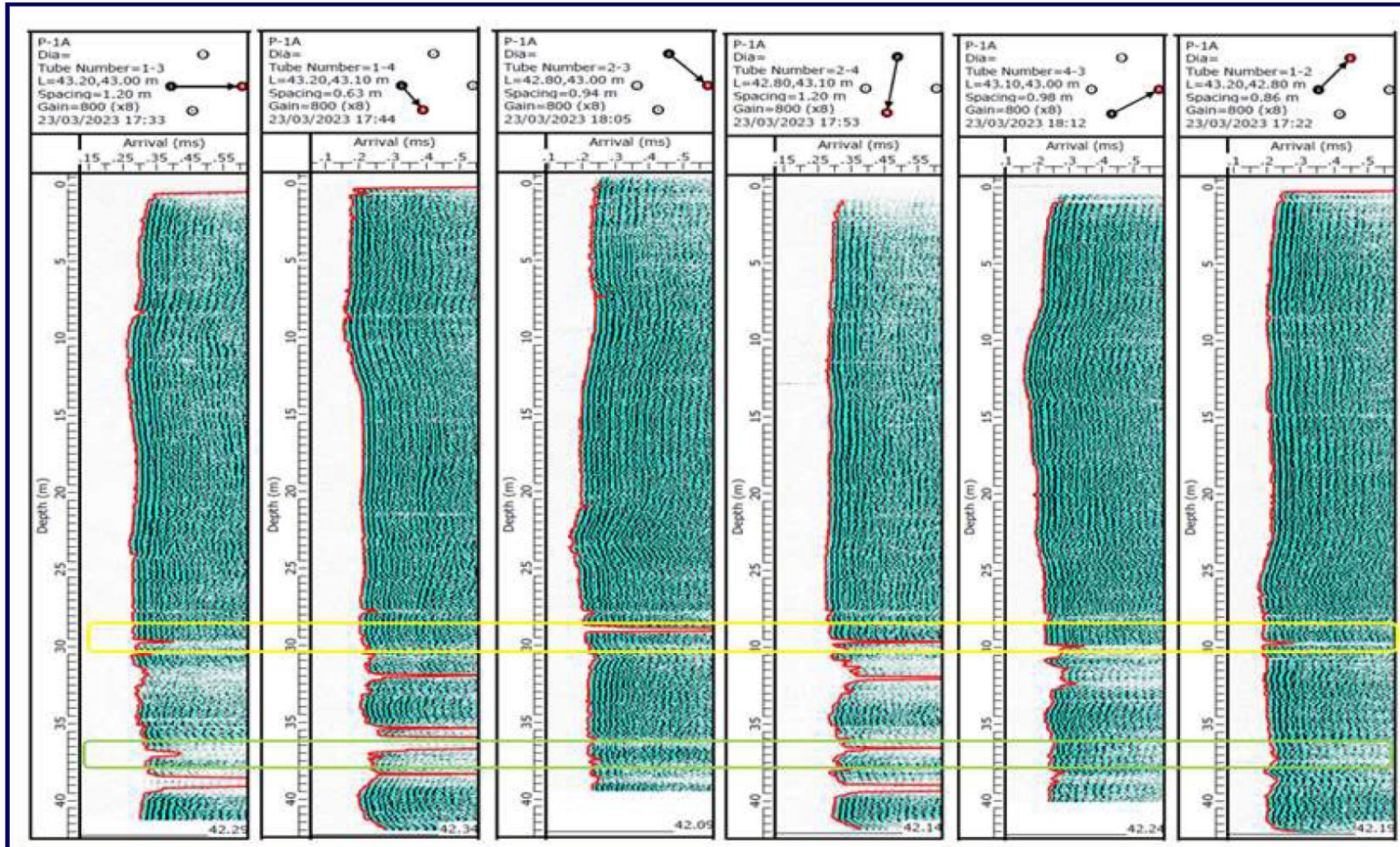


Figura 91. Registros de cascada obtenidos de los seis perfiles de la prueba de CSL de la pila 1-A. en recuadros de color amarillo y verde se enmarca las dos zonas transversales con mayor afectación

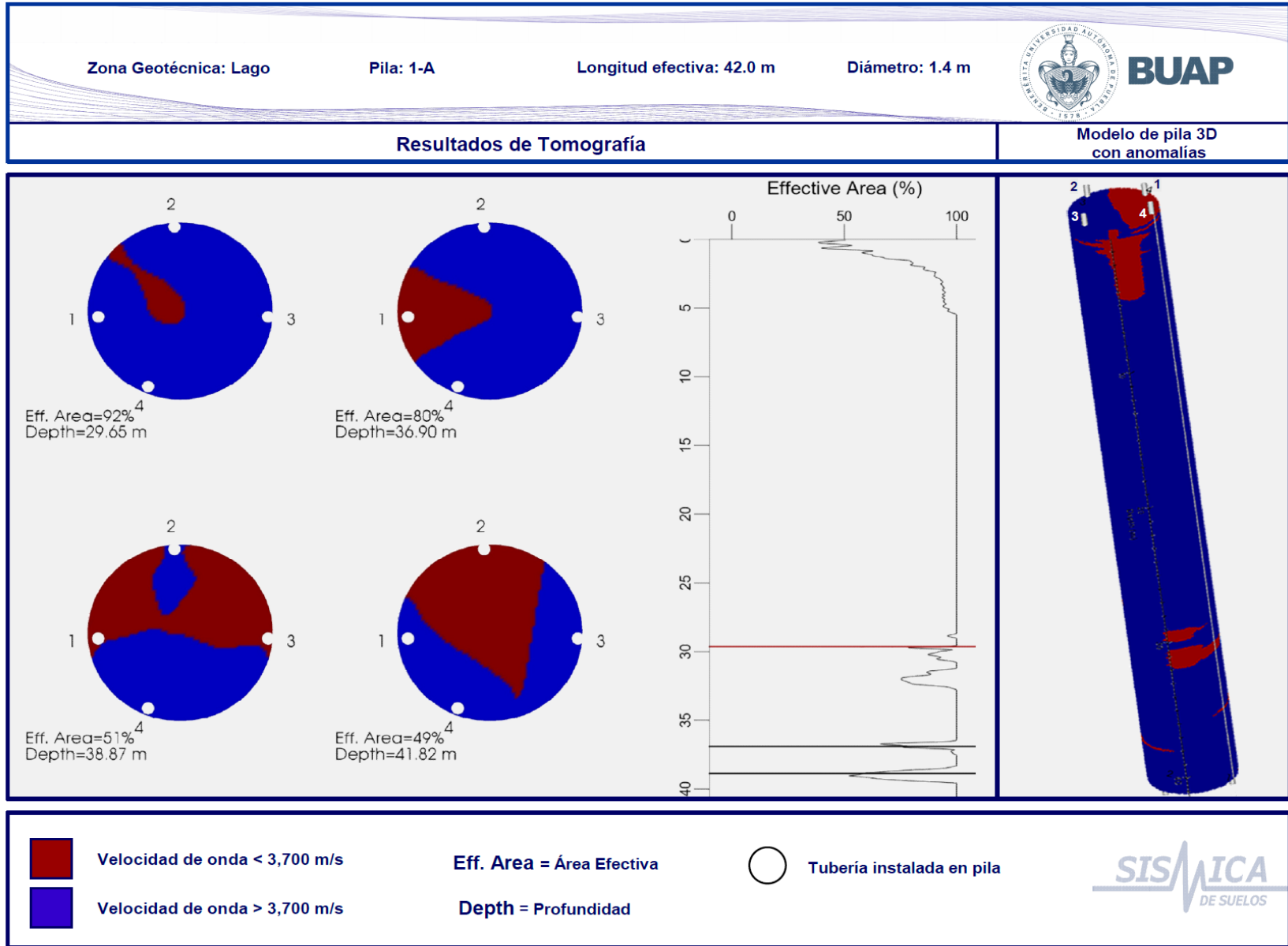


Figura 92. Análisis con tomografía y modelo 3D para la pila 1-A

## CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 5.1 Influencia de las características geotécnicas de la zona en los resultados obtenidos

Los resultados obtenidos de las pruebas de Impacto de Baja Deformación utilizadas para evaluar la integridad de las pilas son extremadamente sensibles a la influencia de la estratigrafía. En suelos altamente resistentes, la energía se disipa, lo que dificulta la obtención de registros claros que muestren una reflexión por punta. Aunque existen técnicas de filtrado para mitigar este efecto, no siempre es factible obtener registros de alta calidad.

Adicionalmente, en el caso de pilas ubicadas en suelos muy resistentes o rocas, es posible observar una reflexión por punta negativa en contraste con suelos más blandos que presentan una reflexión por punta positiva. Sin embargo, cuando no hay un cambio significativo en la impedancia entre la pila y el suelo o la roca en la que se encuentra, la onda simplemente atraviesa sin que se pueda identificar una reflexión por punta.

En cuanto a los registros de cascadas obtenidos mediante el método Cross Hole Ultrasónico, la estratigrafía tiene una influencia limitada. Esto se debe a que la onda ultrasónica viaja a través de los tubos y el concreto, sin interactuar directamente con el suelo circundante.

En relación a los procesos constructivos, es de suma importancia tomar precauciones en áreas con suelos estratificados, como ocurre en gran parte de la zona de Transición del Valle de México. En estas áreas, se encontraron anomalías cerca de lentes arenosos en las pilas analizadas, lo que requirió de la implementación de encamisado para evitar la contaminación del concreto. Sin embargo, para grandes profundidades este procedimiento resulta costoso, por lo tanto, es necesario llevar a cabo un estricto control del lodo de perforación para estabilizar las paredes del pozo y prevenir posibles afectaciones a la calidad del concreto.

## 5.2 Influencia de los procesos constructivos de las pilas en los resultados obtenidos

Los procesos constructivos desempeñan un papel fundamental en la integridad de las pilas. Durante la ejecución de las pilas, se llevan a cabo una serie de actividades que incluyen la perforación, el colado del concreto, el vibrado y otros procedimientos relacionados. Cada uno de estos procesos tiene el potencial de afectar la calidad y la integridad de las pilas. Además, factores como la selección de materiales adecuados, la planificación correcta, el control de calidad y la supervisión constante son elementos esenciales para asegurar la integridad estructural y geotécnica de las pilas. En este contexto, es fundamental comprender cómo los procesos constructivos influyen en la integridad de las pilas y tomar las medidas necesarias para mitigar los posibles impactos negativos.

De lo observado en las distintas obras donde se realizaron las pruebas de integridad se desprenden los siguientes comentarios y recomendaciones para el proceso constructivo:

- Limpieza general:

Es recomendable conformar plataformas de trabajo para el habilitado del acero de refuerzo y evitar que el armado contaminado con lodo u otros materiales sea colocado dentro de la perforación. La presencia de acero sin limpieza previa puede alterar las propiedades del concreto, generar interferencias durante las pruebas de integridad y reducir la adherencia entre el concreto y el acero, afectando la transferencia de esfuerzos.

- Calidad del concreto:

Para garantizar la calidad del concreto empleado en el colado de las pilas, se sugiere determinar el correcto revenimiento para asegurar una trabajabilidad adecuada y evitar la formación de oquedades. Además, se debe seguir la normativa correspondiente en cuanto al muestreo de concreto y la conformación de cilindros para ensayos de compresión. Es importante evitar la limpieza de las unidades que suministran el concreto cerca de la perforación o en zonas donde el agua pueda afectar las propiedades del concreto ya

colocado. Asimismo, se debe verificar que los sellos de garantía de las ollas de concreto lleguen sin alteraciones a la obra.

- Registros de campo:

Se recomienda realizar registros detallados de las condiciones durante la perforación, habilitado, equipamiento y colado de cada pila. Estos registros deben incluir datos como la fecha, hora de inicio y término de los trabajos, los volúmenes teóricos y reales del concreto de la pila, las propiedades del fluido estabilizador, la instalación del acero de refuerzo, el nivel de concreto dentro de la perforación y el tiempo de llegada de cada olla. Además, se debe registrar cualquier anomalía o variación durante la perforación o el colado, así como la distribución y longitud de la tubería tremie utilizada.

- Observaciones generales:

Es fundamental verificar la verticalidad y alineamiento de la perforación, manteniendo tolerancias específicas. Además, se debe asegurar un correcto control de calidad del fluido estabilizador de la perforación y contar con un protocolo de acción en caso de pérdidas inesperadas del fluido.

El tener un control de todos los procedimientos mencionados, contribuyen a la construcción de cimentaciones profundas con la calidad adecuada.

### 5.3 Discusión de los resultados

En el capítulo cuatro se presentaron los casos más relevantes de las tres zonas geotécnicas, donde se llevaron a cabo diversas pruebas y análisis para determinar la aceptación o rechazo de las pilas. Sin embargo, para la presente investigación se seleccionaron los datos de pruebas de integridad ejecutadas en 345 pilas distribuidas en las tres zonas geotécnicas del Valle de México, siendo la zona geotécnica de Transición la que contó con el mayor porcentaje de pilas ensayadas.

Se destaca que aproximadamente el 90% de todas las pilas fueron sometidas a pruebas de integridad de impacto de baja deformación (PIT) y el 10% restante fueron ensayadas con pruebas de Cross Hole Ultrasónico (CSL).

La Figura 93 muestra el estado de las pilas analizadas, revelando que el 81,0% de las pilas ensayadas en las tres zonas geotécnicas fueron consideradas como Aceptadas. Un 17,0% de las pilas presentaron ciertas anomalías significativas detectadas durante la evaluación de integridad, lo que las clasificó como Cuestionables. Solamente un 2,0 % de las pilas fueron Rechazadas después de un minucioso análisis realizado por el departamento de proyectos y expertos en estructuras y geotecnia.

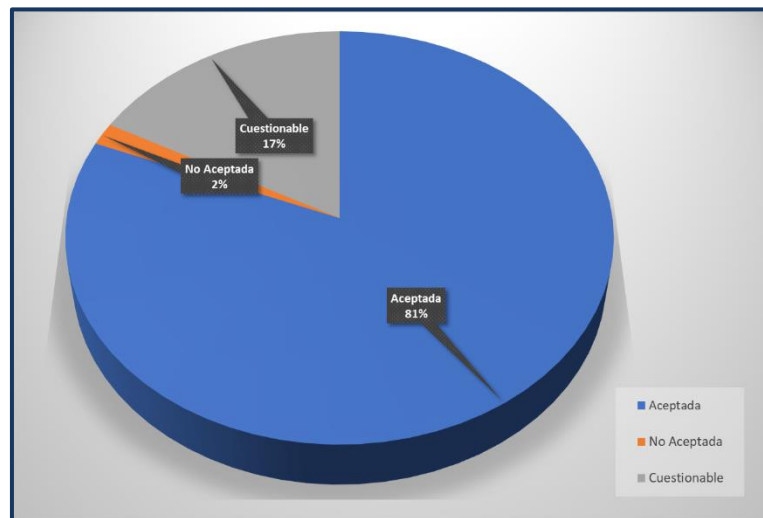


Figura 93. Estado de las pilas ensayadas en las tres zonas geotécnicas del Valle de México.

### 5.3.1 Zona de Lomas

En la zona de lomas, se realizaron pruebas de integridad en un total de 15 pilas utilizando el método de Prueba de Integridad de Impacto de Baja Deformación (PIT). Además, nueve de estas pilas se ensayaron con Cross Hole Ultrasónico (CSL).

Los resultados obtenidos revelan que 11 de las pilas fueron Aceptadas luego de someterse a diversas pruebas de integridad, lo que representa el 73% de las pilas

ensayadas. Se encontró que el 29% de las pilas presentaban alguna discontinuidad, pero se logró identificar la reflexión en la punta y mantenían la longitud de diseño requerida. Únicamente una pila fue *Rechazada* debido a que no cumplía con la longitud de diseño, lo que constituía una anomalía significativa que afectaba la capacidad estructural del elemento.

En la mayoría de los casos, después de una evaluación exhaustiva por parte del área de estructuras, se recomendaba la construcción de dos elementos por cada pila rechazada. En la Figura 94 se presenta un gráfico donde se indica el estado de las pilas ensayadas.

En cuanto a las pruebas de integridad al comparar ambos métodos, se encontraron similitudes en la detección de anomalías puntuales en el interior de las pilas, lo que indica su capacidad para identificar problemas localizados. Sin embargo, también se observaron diferencias en cuanto a la profundidad y extensión de las anomalías detectadas, donde el CSL proporcionó información más detallada sobre la presencia de defectos a lo largo del elemento de cimentación. Estas diferencias resaltan la importancia de utilizar múltiples pruebas de integridad para obtener una evaluación integral y precisa de las pilas.

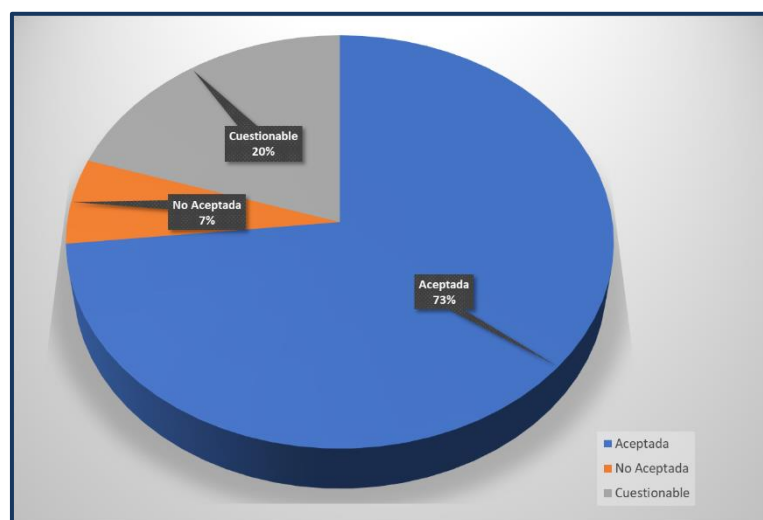


Figura 94. Estado de las pilas ensayadas en la zona geotécnica de Lomas

Se destaca que la estratigrafía de la zona de Lomas es de suelos muy competente, sin embargo, algunos estratos presentan arenas con gravas que, si no se tiene el manejo adecuado durante la introducción del armado, puede afectar la integridad de la pila.

### 5.3.2 Zona de Transición

Para la Zona de Transición donde se tiene el mayor número de pruebas ejecutada e interpretadas se obtuvo que de las 290 pilas ensayadas, 234 pilas fueron Aceptadas, 47 fueron Cuestionadas y solo nueve fueron Rechazadas, como se presenta en la Figura 94.

25 de las pilas fueron ensayadas con CSL y perforadas para obtener núcleos y verificar su estado. Adicionalmente, algunos de los elementos se ensayaron con Down Hole. Se destaca que la Zona II presenta una secuencia estratigráfica con intercalación de varios lentes de limos y arenas. Varias de las pilas ensayadas presentaron anomalías asociadas a posible contaminación del concreto cercano a los 10.0 m de profundidad, donde el perfil estratigráfico de la zona reportaba un lente de arenas.

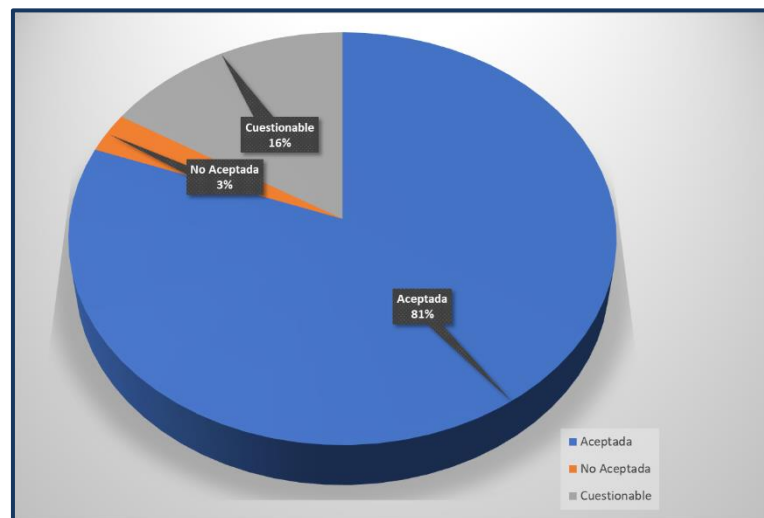


Figura 95. Estado de las pilas ensayadas en la zona geotécnica de Transición

El análisis de las 25 pilas ensayadas con las pruebas de CSL y PIT en la zona de Transición reveló que las anomalías detectadas por PIT también fueron detectadas por CSL. Sin embargo, se observó que varias de las anomalías identificadas por CSL no eran

visibles en las pruebas de PIT. Se destaca que, algunas de las pilas con un diámetro de 100 cm y longitud de 40 m, no arrojaron resultados concluyentes con las pruebas de PIT debido a la relación de esbeltez de las pilas, lo que dificultaba la visualización de la reflexión en la punta.

### 5.3.3 Zona de Lago

En la zona de Lago, se realizaron pruebas de integridad en 41 pilas. De estas, el 85% (equivalente a 35 pilas) fueron Aprobadas después de los ensayos. Se encontraron cuatro pilas que presentaron anomalías intermedias, pero se pudo detectar la reflexión por punta en ellas por lo que fueron pilas Cuestionables. Sin embargo, dos pilas fueron Rechazadas debido a la presencia de anomalías importantes donde no se pudo visualizar la reflexión por punta de la pila. En la Figura 96 se presenta el gráfico con el estado de las pilas en la zona de Lago. En tres de las pilas cuestionables se ejecutaron pruebas de integridad adicionales del tipo DH para verificar las anomalías detectadas por PIT. Solo uno de los elementos fue ensayado con CSL, debido a que era el único que contaba con las instalaciones de los tubos para la ejecución de la prueba.

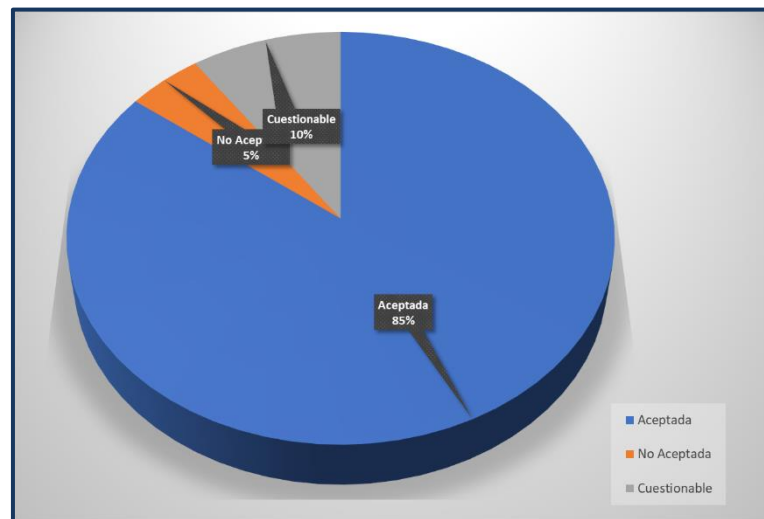


Figura 96. Estado de las pilas ensayadas en la zona Geotécnica de Lago

La zona de Lago, presenta un desafío significativo debido a la necesidad de construir pilas a profundidades superiores a los 40.0 m para alcanzar el estrato resistente.

Esto implica un mayor grado de dificultad en el control de la perforación y en los procesos constructivos de las pilas, lo que requiere una mayor atención y cuidado.

#### 5.3.4 Observaciones en los resultados obtenidos

De los resultados obtenidos se tiene que es indispensable la aplicación de varios métodos de integridad para llegar a conclusiones certeras sobre el estado de la pila. Cada método tiene sus ventajas y deficiencias, y establecer la utilización de uno u otro dependerá de las condiciones del proyecto. Sin embargo, se destaca que estableciendo una comparativa entre ensayos PIT y CSL, se encontró que varias anomalías detectadas por el método de CSL pueden no ser visibles por PIT y estas diferencias se pueden atribuir a los siguientes factores:

- El CSL se sustenta en la propagación de ondas ultrasónicas a lo largo de la pila y puede detectar cambios en la velocidad de propagación. Por otro lado, la PIT se centra en el cambio de impedancia. Por lo tanto, las pruebas de PIT pueden no captar algunas discontinuidades o variaciones a lo largo de la longitud de la pila que sí son detectadas por el CSL.
- El PIT se enfoca en detectar grandes anomalías, esto no permite que se pueda verificar el estado de la pila posterior a la anomalía detectada, mientras que el CSL proporciona información a lo largo de la longitud de la pila. Esto significa que el CSL puede captar anomalías que se extienden más allá del punto de medición de la PIT, lo que resulta en una mayor detección de irregularidades.
- Las diferencias en la configuración de los equipos y las técnicas de medición utilizadas en el CSL y la PIT también pueden influir en la detección de anomalías. Los parámetros de calibración, la sensibilidad del equipo y la interpretación de los resultados pueden variar entre los dos métodos, lo que puede conducir a discrepancias en la detección de anomalías.

En resumen, las diferencias entre el CSL y la PIT en términos de principio de detección, sensibilidad, cobertura de la zona de influencia y limitaciones técnicas pueden

dar lugar a la detección de anomalías por parte del CSL que no son visibles en las pruebas de PIT.

Las pruebas PIT muestran daños mayores y las CSL presentan de manera detallada las anomalías encontradas a lo largo de toda la pila. Por lo tanto, es importante utilizar múltiples métodos de evaluación para obtener una mejor valoración exhaustiva de la integridad de las pilas.

#### 5.4 Criterios para la mejor interpretación y calidad de las pruebas de integridad

##### 5.4.1 Pruebas de integridad de impacto de baja deformación

Para garantizar una mejor calidad e interpretación de las pruebas de integridad de impacto de baja deformación (PIT), se recomienda seguir las medidas que se mencionan a continuación:

- Preparación previa: Antes de la ejecución de la prueba, es necesario llevar a cabo trabajos en campo, como la remoción de concreto contaminado en la superficie de la pila y el pulido de dicha superficie. Se recomienda cortar la varilla en la longitud mínima permitida por el proyecto para obtener señales más limpias.
- Ejecución de la prueba: Se recomienda que la primera medición se realice con el acelerómetro en el centro de la cabeza de la pila y a una distancia no mayor a 30 cm aplicar el golpe con el martillo y, posteriormente, mover el acelerómetro y seguir el mismo procedimiento en varios puntos de la cabeza de la pila.
- Control de obra: Un control de obra adecuado es fundamental para la interpretación de los resultados de la PIT. Es necesario contar con registros de campo de cada pila colada, que describan detalladamente todos los procesos de armado y colado del elemento.
- Estudios de mecánica de suelos: Es importante contar con los estudios previos de mecánica de suelos para comprender el comportamiento geológico y geotécnico de la zona. La interacción entre el suelo y la estructura (pila) puede afectar las señales obtenidas en la PIT.

- **Procesado y filtrado de la señal:** El procesado y filtrado de la señal de la PIT es fundamental para una mejor interpretación de los resultados. Se deben aplicar técnicas de limpieza de la señal para eliminar los efectos del suelo y las varillas. Además, se debe utilizar una amplificación adecuada, dependiendo de la resistencia del suelo para visualizar correctamente la reflexión por punta. Sin embargo, se debe tener precaución de no aplicar valores excesivos de filtros que puedan ocultar la señal objetivo.
- **Análisis en el dominio del tiempo y de la frecuencia:** Realizar análisis en ambos dominios permite verificar las anomalías detectadas en la PIT. El análisis en el dominio del tiempo proporciona información sobre la secuencia de eventos, mientras que el análisis en el dominio de la frecuencia ayuda a identificar características particulares de la señal.
- **Prueba velocidad-fuerza:** El método velocidad-fuerza se utiliza para analizar los primeros metros de la pila. Esta técnica considera la relación entre la velocidad de impacto y la fuerza de respuesta, lo que brinda información valiosa sobre la calidad e integridad de la pila en su zona superior.

En resumen, la adecuada interpretación de las pruebas de integridad de impacto de baja deformación (PIT) se ve favorecida por el correcto procesado y filtrado de la señal, la limpieza de los efectos de suelo, la amplificación adecuada, el análisis en el dominio del tiempo y la frecuencia, y el uso del método velocidad-fuerza. Finalmente, es recomendable contar con la asesoría y evaluación de especialistas en el área, como ingenieros estructurales y geotécnicos, para garantizar una adecuada interpretación de los resultados de las pruebas de integridad de impacto de baja deformación (PIT). Su experiencia y conocimientos permitirán obtener conclusiones confiables sobre la calidad e integridad de las pilas analizadas.

#### 5.4.2 Cross Hole Ultrasónico (CSL)

Como se ha mencionado la prueba CSL se sustenta en la medición de la velocidad de las ondas en el concreto entre de los tubos instalados en el interior de la pila. Su ejecución en

campo e interpretación es bastante sencilla; sin embargo, se deben tomar en cuenta los siguientes criterios para su evaluación y análisis:

- **Instalación y distribución de los tubos:** La cantidad y posición de los tubos instalados en la pila determina la cantidad de secciones que se analizarán. Es fundamental colocar el número adecuado de tubos para cubrir la mayor parte de la sección transversal de la pila. Para ello se recomienda atender lo establecido en la norma ASTM-6760-08
- **Inundación de los tubos:** Los tubos deben mantenerse llenos de agua limpia durante todo el proceso de la prueba para garantizar un buen contacto entre el concreto y las paredes del tubo. Adicionalmente, esto ayuda a obtener mejores señales debido a que las ondas ultrasónicas viajan de manera más eficiente a través del agua y el concreto.
- **Medición de la separación de los tubos:** Durante la ejecución de la prueba, es indispensable medir la separación entre los tubos lo más cerca posible de la cabeza de la pila, especialmente cuando se utilizan tubos de PVC. El CSL se basa en la determinación de la velocidad, y si la distancia entre los tubos medida no es correcta, los resultados obtenidos pueden no ser erróneos.
- **Procesamiento de los registros de cascada:** El procesamiento de los registros de cascada es relativamente sencillo, pero se debe garantizar la eliminación de señales que se encuentren por encima de la cabeza de la pila. Esto se realiza para evitar valores de velocidad que puedan interferir en la interpretación de los datos.
- **Detección de defectos en campo:** En caso de identificar un defecto durante la prueba, se deben probar diferentes combinaciones y realizar barridos con las sondas desplazadas hasta 30 cm para obtener más información detallada sobre el defecto.
- **Tomografía:** La construcción de una tomografía ayuda a determinar la dimensión y extensión lateral de los defectos detectados. Para obtener buenos resultados, la pila debe tener como mínimo cuatro tubos instalados.
- **Evaluación de la integridad:** La evaluación de la integridad de la pila se realiza principalmente entre los tubos de auscultación. En casos complicados, se requiere experiencia y conocimiento profesional para interpretar y evaluar adecuadamente los resultados.

## 5.5 Recomendaciones

### 5.5.1 Recomendaciones para la Prueba de Integridad de Impacto de Baja Deformación

La velocidad de la superficie superior de la pila es, en la mayoría de los casos, el dato más importante recopilado durante una prueba de integridad del elemento de cimentación. Requiere un ligero impacto de martillo y el registro de la aceleración. Para obtener un registro preciso del movimiento de la superficie superior de la pila, la ubicación donde se mide la aceleración debe ser un concreto no contaminado de la pila. La contaminación del concreto y una superficie muy rugosa, se encuentran entre las condiciones que proporcionan registros deficientes que son difíciles o, en la mayoría de los casos, imposibles de interpretar con claridad. Para la ejecución de la prueba se debe considerar que el concreto ya ha alcanzado la resistencia de proyecto.

Para pulsos de impacto adecuados, la superficie tiene que estar limpia y pulida. Por lo tanto, descabezar la pila para tener varias ubicaciones buenas de impacto y posición del acelerómetro, es la mejor garantía para obtener resultados adecuados. El acelerómetro debe adherirse a la superficie superior de la pila con una capa delgada de una masa adherente. Dependiendo de la temperatura de la pila y el contenido de humedad, es posible que se deban probar diferentes materiales. En ninguna circunstancia una capa gruesa de material de unión debe separar el sensor del material de la pila. De hecho, presionar el acelerómetro lo suficiente como para sentir que toca el concreto hace que se obtengan los mejores registros.

Idealmente, el impacto del martillo hará que todo el diámetro de la pila lograra un movimiento axial uniforme. Sin embargo, sólo una pequeña área de la parte superior de la pila está sujeta al impacto, lo que provoca una deformación no plana de las secciones transversales de la pila debajo de la parte superior de esta. Por lo tanto, las pruebas en el lado Oeste de la parte superior de la pila no revelarán lo que está sucediendo en el lado Este dentro de uno o dos diámetros de la pila por debajo de su cabeza y, para pilas más grandes, se recomienda enfáticamente impactarla en varios lugares. Idealmente, el

impacto y la prueba se realizan en los terceros puntos de la superficie superior de la pila. Se destaca que la peor ubicación para la PIT es en el borde de la pila.

#### 5.5.2 Recomendaciones para el Cross Hole Ultrasonico

- En México debido a las limitaciones en el presupuesto, se acostumbra a instalar tubos de PVC de cédula 40. Por ello es necesario la ejecución de la prueba en un plazo de diez días máximos después de colada la pila. Esto disminuye las señales anómalas captadas en los registros por pérdida de contacto del tubo con el concreto (debonding).
- Se destaca que, para tubos de acero, el debonding no ocurre por debajo de los 3.0 m de profundidad, por lo que se recomienda la instalación de estos ademes para la ejecución de CSL.
- Si se observan datos CSL erráticos en la parte superior de la pila (posiblemente por debonding), se recomienda inundar el elemento con agua para restaurar la conectividad. Repetir la prueba después de sumergir la pila durante al menos 30 minutos permite que el agua penetre en la interfaz tubería-concreto y puede mejorar los resultados de CSL.
- Para pilas que fueron clasificadas con alguna falla, se deben evaluar el número de perfiles afectados, la profundidad y la extensión vertical de las zonas afectadas y la gravedad de estas.
- Una velocidad de onda promedio baja, está relacionada con una baja resistencia del concreto. La velocidad de onda debe evaluarse preferiblemente a partir de los perfiles diagonales principales. Los perfiles perimetrales con espaciamiento de tubos más cortos son más sensibles a los errores relacionados con la alineación del tubo y la trayectoria a través del agua dentro del ducto.
- La empresa encargada del ensaye debe solicitar a la contratista encargada de la construcción de la pila, los registros de campo de cada uno de los elementos.
- Se debe considerar tomografía cuando pueda ayudar a definir la extensión de la zona afectada con la mayor precisión posible.

- Si el concreto es demasiado joven, o se usaron retardadores en la mezcla, volver a realizar la prueba después de un período de espera suficiente podría mejorar los resultados de la prueba.
- Se recomienda para pilas con posibles fallas, realizar otras pruebas que tengan capacidades complementarias. Dependiendo de la extensión horizontal y la ubicación vertical de la zona afectada, el uso de métodos de prueba alternativos o investigaciones, como las pruebas de integridad de impacto de baja deformación puede proporcionar información adicional para la evaluación de la cimentación.
- Para elementos probados donde se clasifique con defectos, se recomienda la perforación de la pila y muestreo de núcleos de concreto que puedan ayudar a definir mejor la extensión y la naturaleza de la zona afectada. Si se realiza la extracción de muestras, la selección del diámetro del núcleo debe considerar el tamaño del agregado, el propósito de la prueba y las posibles opciones de remediación.
- De las muestras obtenidas de las zonas afectadas se recomienda la realización de pruebas de resistencia a la compresión. Se deben comparar los resultados de las pruebas con la resistencia mínima de diseño especificada, así como la resistencia de las muestras de una zona sin anomalías.
- Finalmente, se debe contratar a un especialista en pruebas de CSL para llevar a cabo una prueba específica siguiendo los procedimientos establecidos en ASTM-D6760 y proporcionar un informe detallado de los resultados. Se destaca que los especialistas en pruebas de CSL suelen recibir poca información sobre los registros de instalación o los parámetros de diseño de la cimentación. Por lo tanto, no pueden determinar por sí solos la aceptabilidad de la pila. Es necesario que el equipo de especialistas revise los datos de CSL y los registros de construcción para evaluar el probable efecto en la capacidad de carga de la pila y tomar una decisión sobre su aceptabilidad.

## 5.6 Guía práctica para los ensayos PIT y CSL

En este apartado se presentarán de manera esquemática las etapas y pasos que se deben seguir para la preparación ejecución, interpretación y criterios generales para la clasificación de una pila evaluada mediante PIT y CSL.



**BUAP**



# GUÍA PRÁCTICA PIT

**1**

**PREPARACIÓN  
Y EJECUCIÓN DE LA  
PRUEBA**

**2**

**PROCESAMIENTO Y  
ANÁLISIS**

**3**

**CRITERIOS DE  
CLASIFICACIÓN**

\*Los datos contenidos en esta tabla son recomendaciones del autor  
\*Las herramientas aplicadas para el filtrado dependerá del fabricante de los equipos

<b>Preparación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Descabezar la pila por lo menos 1.0 m .</li> <li>-Pulir la cabeza de la pila mínimo en tres puntos.</li> <li>-Indispensable un punto pulido al centro de la cabeza.</li> </ul>
<b>Ejecución</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Ubicar el acelerómetro en el punto pulido al centro y golpear en los puntos adicionales</li> <li>-Realizar hasta cinco golpes a una separación no mayor a 30 cm, para luego compilar y tener un promedio de la señal.</li> <li>-Utilizar distintos martillos, para pilas más largas se recomiendan utilizar martillos mas pesados.</li> <li>-Para verificar la integridad del la pila los primeros metros utilizar el martillo instrumentado Fuerza-Velocidad</li> </ul>
<b>Filtrado</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Filtro Paso Alto (HI): Elimina los efectos del suelo</li> <li>-Filtro Paso Bajo (LO): Elimina los efectos de la varilla</li> <li>-Magnificación exponencial: Permite ver la reflexión por punta, multiplica la señal hasta el MD, que es generalmente es el 20% de la longitud de la pila</li> </ul>
<b>Análisis en el dominio del tiempo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Establecer la velocidad de onda para el proyecto ensayando por lo menos cinco pilas</li> <li>-Las velocidades en concreto de buena calidad va de 3,700 a 4,200 m/s, este valor puede variar en aproximadamente el 10 % para pilas del mismo proyecto.</li> <li>-Identificar el pulso de entrada generado por el martillo.</li> <li>-Las pilas sin defectos tendrán un pulso inicial positivo seguido de un lapso de velocidad donde la curva se acerca a cero, hasta alcanzar la velocidad por punta donde se registra un pulso similar a la entrada que normalmente será positivo para suelos blandos.</li> <li>-Para suelos más resistentes o rocas la reflexión por punta puede ser negativa o en algunos casos no puede ser detectada.</li> <li>-Una pila con reducción en su diámetro nominal o cambio de impedancia por contaminación mostrará un pulso positivo parecido al pulso de entrada, lo que indica que la integridad de la pila esta comprometida.</li> <li>-Una pila con ensanchamiento o con efectos de resistencia del suelo mostrará un pulso negativo, condiciones que generalmente no afectan la integridad y continuidad de la pila.</li> </ul>
<b>Aceptada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se identifica la reflexión por punta.</li> <li>-La longitud determinada corresponde a la longitud reportada del proyecto.</li> <li>-La velocidad de onda del concreto esta dentro de los rangos aceptables.</li> <li>-Los registros de campo de la pila no notifican problemas durante la perforación y el colado del elemento.</li> </ul>
<b>Cuestionable</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se identifica la reflexión por punta, pero presenta pulsos positivos intermedios asociados a la reducción del diámetro nominal del elemento o a la contaminación del concreto.</li> <li>-Se presentan reflexiones positivas muy parecidas al pulso inicial en los primeros metros de la pila que no permiten analizar la integridad de la pila posterior a dicha reflexión.</li> <li>-Se presentan reflexiones positivas cerca de la punta del elemento que no permiten verificar la longitud final</li> <li>-Se obtienen registros velocidad fuerza donde se indica que la cabeza de la pila esta contaminada</li> <li>-Los registros de campo reportan problemas constructivos o atraso en las llegadas de las ollas durante el colado de la pila</li> </ul>
<b>Rechazada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Si una de las condiciones cuestionables fue verificada por más de dos método directos o indirectos para evaluar la integridad y los especialistas en geotecnia y estructuras determinan que la pila con la anomalía presentada no tendrá la capacidad de carga para la que fue diseñada, la pila será desechada y se deberá evaluar la sustitución por dos elementos adicionales</li> </ul>

Figura 97. Guía práctica para la Prueba de Integridad de Impacto de Baja Deformación (PIT)



BUAP



# GUÍA PRÁCTICA CSL

1

## PREPARACIÓN Y EJECUCIÓN DE LA PRUEBA

2

## PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS

3

## CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN (DEEP FOUNDATIONS INSTITUTE, DFI, 2019)

\*Los datos contenidos en esta tabla son recomendaciones del autor  
\*Las herramientas aplicadas para el filtrado dependerá del fabricante de los equipos

### Preparación

- Durante el colado de la pila dejara instalados tubos de 2" de diámetro preferentemente galvanizado o de PVC de cédula 40.
- El número de tubos a instalar dependerá del diámetro de la pila y se establecerá con base a la norma ASTM-6760-08.
- Se recomienda instalar un mínimo de tres tubos.
- Los tubos deben permanecer llenos de agua limpia.
- La cantidad de barridos obtenidos dependerá del número de tubos instalados.

### Ejecución

- Para alimentar el programa e iniciar la prueba se requiere de la medición de la separación entre tubos, se recomienda medir lo más cercano a la cabeza de la pila.
- Se debe verificar que todos los tubos estén libres de acceso en toda su longitud. Se introduce en unos de los tubos la sonda receptora y en otro de los tubos la sonda emisora.
- Las sondas se mueven simultáneamente a través de los dos tubos de auscultación a lo largo de la pila, donde se emite un pulso ultrasónico, normalmente cada 5 cm y se registra continuamente el tiempo de llegada de la primera onda y la energía relativa entre las sonda.

### Filtrado

- Edge Finder*: Herramienta de procesamiento de señales basada en la intensidad de los pixeles que permite encontrar los tiempos de llegada y ajustar los bordes de la curva para seguir mejor la señal registrada.
- Trim Top*: Es una herramienta que permite filtrar los datos medidos por encima del elemento de cimentación, ayuda a descartar velocidades de propagación fuera del rango.
- Defect Analysis*: Localiza automáticamente los defectos. Esta herramienta muestra las curvas del tiempo de llegada de la onda en porcentaje y la curva de disminución de energía medida en decibeles.

### Análisis

- Por lo general, un incremento significativo en el tiempo de llegada de la onda acompañado de una significativa reducción de la energía relativa, indican la presencia de una anomalía, mientras que si sólo se observa una reducción de energía sin incremento en el tiempo de llegada indicaría la presencia de concreto de menor calidad, mas no necesariamente un defecto en la pila.
- Para verificar la gravedad del defecto local y evaluar su magnitud y extensión lateral se recomienda hacer un análisis con tomografía.

### Clase A

- Resultados aceptables de la prueba de CSL "Sin defecto".
- Aplicable para cualquier sección del perfil.
- Aumento del primer tiempo de llegada (FAT) de la onda inferior al 15% del valor promedio y reducciones en la energía relativa inferior a 9 dB del valor promedio.

### Clase B

- Resultados de la prueba de CSL condicionalmente aceptable "Con defecto"
- Para cualquier perfil, el FAT está entre 15 y 30% de valor promedio, reducciones de la energía relativa son inferiores a 12 dB o el FAT es inferior al 15% y la reducción de la energía es mayor a 9 dB.
- Una vez que se interpretan datos anormales del CSL en la pila, se necesita una evaluación para determinar la importancia de los resultados en relación con el trabajo bajo carga que tendrá el elemento de cimentación dentro del proyecto.
- Al evaluar los resultados de la Clase B, se debe tener en cuenta el número de perfiles de CSL afectados a una profundidad determinada.

### Clase C

- Resultados altamente anormales de la prueba de CSL "Con defectos críticos".
- Los aumentos del FAT son superiores al 30% o el FAT es superior al 15% y las reducciones en la energía relativa son mayores a 12 dB.
- Al igual que la Clase B una vez localizados los datos anormales del CSL, se debe evaluar la importancia del elemento dentro del proyecto y el ingeniero especialista deberá reportar la cantidad de perfiles afectados con la profundidad de la anomalía.
- Los resultados de esta clase generalmente necesita de más evaluaciones .

Figura 98. Guía práctica para el Cross Hole Ultrasónico (CSL)

## CONCLUSIONES

Con base a los resultados y análisis obtenidos de la comparación entre diferentes métodos de pruebas de integridad en pilas de cimentación en la Ciudad de México, se desprende las siguientes conclusiones y recomendaciones

- En esta investigación se estudiaron Pruebas de Integridad de Impacto de Baja Deformación (PIT) y Cross Hole Ultrasónico (CSL) en pilas de cimentación en distintas obras distribuidas en las tres zonas geotécnicas del Valle de México.
- Se analizaron y se presentaron con detalle nueve casos de pilas en las tres zonas geotécnicas. Estos casos fueron de gran relevancia para entender los procedimientos, evaluación y análisis que se deben ejecutar antes de rechazar un elemento de cimentación.
- Adicionalmente, para esta investigación se utilizaron los datos de pruebas de integridad ejecutadas en 345 pilas construidas en el Valle de México, siendo la zona geotécnica de Transición la que contó con el mayor porcentaje de pilas ensayadas.
- Se destaca que, aproximadamente el 90% de todas las pilas fueron sometidas a Pruebas de integridad de impacto de baja deformación(Pit) y el 10% restante fueron ensayadas adicionalmente con prueba de CSL
- Las pruebas de integridad (PIT) se sustenta en el principio teórico de la propagación de las ondas longitudinales de baja deformación que generan efectos de dilatación y compresión en el medio.
- La PIT consiste en aplicar impactos en la cabeza de la pila con martillos de diferentes masas, generando una onda que se propaga a través del cuerpo del elemento hasta retornar nuevamente hasta la cabeza.

- El método de CSL se sustenta en registrar el tiempo que tarda un pulso ultrasónico de compresión en propagarse entre dos tubos instalados previos al colado de la pila. Ambas sondas (emisora y receptora) se desplazan simultáneamente a lo largo de todo el elemento para estudiar la integridad y continuidad de la pila.

### **Aspectos Relevantes de las PIT**

- La velocidad de propagación es directamente proporcional al módulo de elasticidad e inversamente proporcional a la densidad del material, por lo que variaciones en la configuración geométrica del elemento la reflexión de la onda en su trayecto.
- Las variaciones en las características, como cambio de la sección transversal de la pila, discontinuidad, porosidad o mezcla de suelo con el concreto, produce cambios en la impedancia, generando una reflexión temprana de la onda, la que es analizada para predecir la integridad y continuidad del elemento.
- La velocidad de onda se debe establecer para identificar la localización de un cambio en la sección transversal o reflexión de la punta.
- Una reducción de impedancia en la pila muestra una reflexión positiva similar al pulso de entrada, mientras que un aumento de impedancia genera una reflexión negativa del pulso.
- Los cambios de impedancia se evalúan a través de una línea base, considerando el efecto de resistencia del suelo. La magnitud del daño solo se puede estimar para pilas con clara reflexión de punta.
- Otro análisis que permite evaluar la integridad y continuidad de la pila es el análisis en el dominio de la frecuencia donde se tiene que la diferencia de frecuencias entre picos del espectro de velocidad puede ser usada para determinar la ubicación del defecto o longitud del elemento.
- El martillo instrumentado permite evaluar la integridad en los primeros metros de la pila. Para ello se requiere medir la fuerza en la parte superior del elemento esto debido a que el impacto domina la señal de velocidad.

- Los elementos de cimentación colados en sitio con secciones transversales muy variables, especialmente en suelos estratificados, son difíciles de analizar y conducen a una menor confianza de los resultados.

### **Aspectos Relevantes del CSL**

- Una variación de los tiempos de arribo de los pulsos ultrasónicos registrados durante el ensayo, se traduce en variaciones de la velocidad de propagación del material que es función de su densidad y módulo de elasticidad.
- Si existen defectos en el camino de las ondas, como inclusiones en el suelo, oquedades u otros, que produzcan una variación en la propagación, se traducirá en aumento en el tiempo de recorrido de la onda.
- La presencia de una anomalía evaluada por CSL se ve reflejada en el aumento significativo en el tiempo de llegada de la onda (FAT) y una reducción significativa de la energía relativa.
- Si solo se observa una reducción de la energía relativa y no se da incremento en el tiempo de llegada de la onda, se interpreta como un concreto de menor calidad mas no necesariamente un defecto en la pila.
- La tomografía permite analizar la magnitud y la extensión lateral de los defectos reportados en los ensayos de CSL.
- Para obtener resultados concluyentes de la tomografía se requiere la instalación de tubos a cada 30 cm del diámetro de la pila.
- Una velocidad de onda promedio baja está relacionada con una baja resistencia del concreto.
- La integridad y continuidad del elemento mediante CSL sólo se puede evaluar entre los tubos de auscultación.

### **Recomendaciones para la PIT**

- Para le ejecución de la PIT se recomienda descabezar la pila por lo menos 1.0 m de profundidad o hasta encontrar concreto sano.

- Se recomienda la ejecución de la PIT posterior a los diez días de colada la pila o hasta que el concreto alcance su resistencia de diseño.
- Se aconseja cortar el armado de la pila en la menor longitud que el proyecto permita, esto ayuda a eliminar señales de altas frecuencias que puedan afectar los registros obtenidos.
- Se recomienda que la primera posición donde se ubique el acelerómetro sea al centro de la pila, con la superficie previamente pulida. Para mejores resultados lo ideal es dar el golpe a 30 cm máximo de separación del acelerómetro.
- Para detectar defectos cerca de la cabeza se recomienda utilizar el martillo instrumentados o martillos livianos, mientras que martillos más pesados facilita detectar defectos cerca de la punta de la pila .
- Filtrar las señales obtenidas en campo facilita la interpretación de los registros. Por lo que se recomienda aplicar filtros que ayuden a eliminar la resistencia del suelo y los efectos de la varilla
- Utilizar una magnificación adecuada ayuda a la visualización de la reflexión por punta en la pila.

### **Recomendaciones para CSL**

- Para la ejecución del CSL, se recomienda tener los tubos llenos de agua, debido a que las ondas ultrasónicas viajan de manera más eficiente a través del agua y el concreto. Adicionalmente, ayuda a que las paredes del tubo se mantengan en contacto con el concreto.
- Para pilas con tubos de PVC, se recomienda la ejecución de la prueba en un plazo no mayor a diez días para evitar el debondingn (separación entre el tubo y el concreto).
- Se recomienda medir la separación de los tubos lo más cerca posible a la cabeza de la pila, esto garantiza obtener la distancia correcta entre tubos que influye directamente en la obtención de la velocidad de la onda ultrasónica.

- Antes de iniciar la prueba se recomienda verificar que los tubos estén libres de obstáculos y que estén instalados hasta la profundidad de proyecto.
  - Si durante la ejecución del CSL se observan datos erráticos en la parte superior de la pila, probablemente sea por debonding por lo que se recomienda inundar la pila con agua durante al menos 30 minutos y, posteriormente, repetir la prueba.
  - La velocidad de onda debe evaluarse preferiblemente a partir de los perfiles diagonales principales. Los perfiles perimetrales con espaciamiento de tubos más cortos son más sensibles a los errores.
  - Para pilas que fueron clasificadas con alguna falla, se deben evaluar el número de perfiles afectados, la profundidad y la extensión vertical de las zonas afectadas y la gravedad de estas.
- Las pruebas de integridad, tanto PIT como el CSL, son herramientas efectivas para evaluar la calidad y la integridad de los elementos de cimentación. Sin embargo, la interpretación adecuada de los resultados de estas pruebas requiere considerar diversos factores geotécnicos y constructivos, así como la experiencia de especialistas en estructuras y geotecnia.
- De la comparativa de aplicar ambos métodos se encontraron similitudes en la detección de anomalías puntuales en el interior de las pilas, lo que indica su capacidad para identificar problemas localizados. Sin embargo, también se observaron diferencias en cuanto a la profundidad y extensión de las anomalías detectadas, donde la CSL proporcionó información más detallada sobre la presencia de defectos a lo largo del elemento de cimentación. Estas diferencias resaltan la importancia de utilizar múltiples pruebas de integridad para obtener una evaluación integral y precisa de las pilas.
  - Es importante destacar que el PIT se enfoca en detectar grandes anomalías, esto no permite que se pueda verificar el estado de la pila posterior a alguna anomalía detectada; mientras que el CSL proporciona información a lo largo de la longitud de la pila y detecta pequeños defectos.

- La calidad de las pilas está estrechamente relacionada con los procedimientos constructivos empleados. Las actividades realizadas durante la construcción, como la perforación y el colado del concreto, desempeñan un papel crucial en la integridad de las pilas.
- El perfil estratigráfico del Valle de México plantea desafíos para la construcción de elementos de cimentaciones profundas. Es de vital importancia tomar en cuenta de manera minuciosa las características del suelo de cada zona geotécnica al momento de diseñar y construir pilas.
- Con las pruebas ejecutadas de PIT y CSL se establecieron criterios para ayudar a ejecutar, analizar y clasificar las pilas, tomando en consideración todos los factores que influyen en la integridad del concreto en los elementos cimentación profundos.
- En esta investigación se presenta una guía práctica con recomendaciones que ayuden a tener un mayor control de las etapas de las pruebas de integridad PIT y CSL.
- La decisión de rechazar una pila se basará en la confirmación de la falla o defecto a través de la realización de diversas pruebas directas (como perforaciones) o indirectas (como PIT, CSL, DH), así como en la evaluación de expertos en estructuras y geotecnia. Estos especialistas determinarán si el problema afectará la capacidad de carga para que la pila fue diseñada.
- El rechazo de una pila generalmente requiere la construcción de dos pilas adicionales. El especialista recomendará su diámetro y longitud, dependiendo de las características del proyecto.
- La selección de la prueba de integridad en pilas dependerá de la ubicación del proyecto, de la longitud y diámetro del elemento, de las condiciones geológicas-geotécnicas y del presupuesto asignado para la obra. Normalmente una pila debe ser ensayada por varios métodos.

- En la actualidad las normativas internacionales no establecen claramente una clasificación para aceptar o rechazar un elemento de cimentación. La norma ASTM para Prueba de Integridad de Impacto de Baja Deformación y Cross Hole Ultrasónico solo establecen criterios y el estado final de la pila dependerá de la evaluación integral de todos los involucrados.
- En México no existe una regulación establecida para los ensayos de integridad. Por ello, esta investigación busca ser el primer paso hacia la contribución en futuros proyectos que involucren pruebas en un mayor número de pilas, con el objetivo de establecer criterios más precisos para la evaluación de las cimentaciones profundas.
- Los resultados de esta investigación contribuyen a entender de manera más detallada las pruebas de integridad PIT y CSL, proporcionando elementos que facilitarán la elección del método, la interpretación y el análisis de los resultados, así como comprender todos los requisitos necesarios para evaluar el estado del elemento de cimentación.

## REFERENCIAS

- ASTM 6760-02. (2008). Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep. ASTM International.
- Alfa Geotech. (13 de Noviembre 2022). *ALFA GEOTECH CO., LTD.* Obtenido de [fageotech.com/wordpress/wp-content/uploads/2018/06/Brochure-Crosshole-Sonic-Logging-Test-bb.pdf](https://fageotech.com/wordpress/wp-content/uploads/2018/06/Brochure-Crosshole-Sonic-Logging-Test-bb.pdf)
- Amir, D. J. (2020). *The role of amplification in low-strain.* Obtenido de <https://es.piletest.com/>
- Amir, J. (2012). *Pruebas de Integridad de pilotes: Historia, Situación Actual y Agenda futura.* Obtenido de <http://www.piletest.com>
- Amir, J. M. (2002). Single-Tube Ultrasonic Testing of Pile Integrity. *I*, págs. 836-850. Orlando: ASCE Deep Foundation Congress.
- Amir, J. M. (06 de Marzo de 2023). *Piletest Technical Notes.* Obtenido de <https://es.piletest.com/>
- ASTM D5882. (2013). Standard Test Method for low-strain impact integrity testing of deep foundations. *Construction Vol. 4:09.* Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D7949. (2014). *Standard Test Methods for Thermal Integrity Profiling of Concrete Deep Foundations, Construction Vol. 4:09.* Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.
- Bungenstab, F. C., & Beim, J. W. (2015). Continuous Flight Auger (CFA) Piles – A Review of the Execution Process and Integrity Evaluation by Low Strain Test. *From Fundamentals to Applications in Geotechnics*, 414-421.
- DAS, B. (2001). *Principios de Ingeniería de Cimentaciones.* Michigan: Universidad de Michigan.
- DEEP FOUNDATIONS INSTITUTE. (Octubre de 2019). *Terminology and Evaluation Criteria of Crosshole Sonic Logging (CSL) as applied to Deep Foundations.*
- Figuroa, C. (1974). Tratado de geofísica aplicada. LipoPrint.

- García, S., Romero, J., & Aguilar, A. (2016). Interpretación automática de integridad en pilas. *XXVIII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*. Mérida, Yucatán: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica.
- Geffen, S. A. (1971). Effect of construction procedure on load-carrying behavior of single piles and piers. *Fourth Asian Regional Conference*. Bangkok, Thailand: IV A.R.C.
- Groundspeak, I. (01 de Junio de 2022). *GEOCACHING*. Obtenido de <https://www.geocaching.com/>
- HOLLEMA, D. a. (2003). Crosshole Sonic Logging and Velocity Tomography. *International Symposium Non-Destructive Testing in* (págs. ISBN 3-931381-49-8). Berlin, Germany.: PROCEEDINGS BB 85-CD.
- HUSSEIN, M. H. (05 de Junio de 2005). *A Brief History of the Application of Stress-Wave Theory to Piles*. Obtenido de <http://www.ascelibrary.org>
- J.M. Amir F.ASCE, E. A. (2023). *Capabilities and Limitations of Cross Hole Ultrasonic Testing of Piles*. Obtenido de <https://es.piletest.com/>
- Jessica, R. T. (2016). *Pruebas de Integridad en pila mediante Sísmica de Reflexión*. Puebla, Pue. : Benemerita Universidad de Puebla.
- LIKINS, G. (21 de agosto de 2022). *Alternate Verification Methods for Augercast Piles*. Obtenido de <http://ww.pile.com>
- Lopez, D. I. (06 de Junio de 2022). *Slideshare*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/>
- Matthew L. Becker, P. (s.f.).
- NTC-DCC. (2017). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones*. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.
- Pile Dynamisc, I. (10 de enero de 2023). *Especificaciones para las Pruebas de Integridad en Pilotes por el método de impacto de baja tensión*. Obtenido de <https://www.pile.com>
- Piscsalko, G. (2023). *Pile Dynamics, Inc*. Obtenido de <https://www.pile.com>
- Rangel Núñez, J. L., Paniagua Zavala, W. I., & Ibarra Razo, E. (2005). Evaluación de la Integridad Estructural en cimentaciones profundas mediante pruebas de pulso combinado. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*. Ciudad de México.
- Rausche, F., & Goble, G. G. (1979). Determination of Pile Damage by Top Measurements. *American Society for Testing and Materials*, 500-506.

- RICHARD et al. (1970). *Vibration of Soils and Foundations*. Prentice-Hall,.
- Rinaldi, C. (06 de Junio de 2020). *Ensayo para pilotes cross hole sonic logging; descripción y automatización de la detección del tiempo de arribo*. Obtenido de <https://www.researchgate.net>
- Ryber, A., & Becke, M. L. (s.f.). Comparing conflicting conclusions from different integrity. *GRL Engineers*.
- Sanglerat, G. (1972). *The Penetrometer and Soil Exploration* . (pág. 357). Amsterdam, Netherlands: Elsevier Publishing Co.
- Sísmica de Suelos . (2020). *Ejecución de Pruebas de Integridad en pilas del TEC*. Ciudad de México: SDS.
- Sísmica de Suelos. (2020). *Pruebas de Integridad en obras de la Ciudad de México*. Ciudad de México.
- Valinho, R. C. (2006). Avaliação da Integridade de estacas cravadas assentes em argila mole de cidade de Campos Goytacazes. *Memória de II Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos*, (págs. 6-12). Nova Friburgo.
- Webster, K., Rausch, F., & Webster, S. (2010). Pile and shaft integrity test results, classification, acceptance and/or rejection. *GRL Engineers, Inc*.
- Webster, K., Rausche, F., & Webster S. (2011). Pile and Shaft Integrity Test Results, Classification, Acceptance and/or Rejection. *Compendium of Papers of the Transp. Research Board, 90th Annual Meeting*.
- Whitehurst, E. A. (1967). Evaluation of concrete Propierties from Sonic Test. *American Concrete* , 94.
- Whitehurst, E. A. (1967). Evaluation or concrete Propierties from Sonic Test. *American Concrete Intitute Monograph*, 94.

## **ANEXOS**

### A. Pruebas de integridad ejecutadas

Número	Pila	Longitud en Tiempo (m)	Longitud en Frecuencia (m)	Longitud promedio (m)	Condición	Zona
1	5A	32.8	32.8	32.8	Aceptada	zona 1
2	5D	32.9	31.3	32.1	Aceptada	zona 1
3	6A	30.2	30.4	30.3	Aceptada	zona 1
4	6D	30.5	30.6	30.6	Aceptada	zona 1
5	7D	21.4	21.5	21.5	Cuestionable	zona 1
6	8A	21.6	21.7	21.7	Cuestionable	zona 1
7	8D	21.6	21.5	21.6	Aceptada	zona 1
8	9D	18.7	18.2	18.5	Cuestionable	zona 1
9	P1-7	5.88	6.2	6.04	Rechazada	zona 1
10	P1-4	6.2	6.3	6.25	Aceptada	zona 1
11	P1-5	6.37	6.4	6.39	Aceptada	zona 1
12	P2-1	6	6.2	6.1	Aceptada	zona 1
13	P2-D	6	6.6	6.3	Aceptada	zona 1
14	P2-C	6	6.3	6.15	Aceptada	zona 1
15	P3-B	5.91	5.9	5.91	Aceptada	zona 1
16	A1	32.9	33	32.9	Aceptada	zona 2
17	A3	31.4	32.9	32.1	Aceptada	zona 2
18	A4	32.6	33.2	32.9	Aceptada	zona 2
19	A5	31.7	33.2	32.4	Aceptada	zona 2
20	B3	32.1	33.2	32.6	Aceptada	zona 2
21	B4	32.5	33.3	32.9	Aceptada	zona 2
22	B6	32.9	33	32.9	Aceptada	zona 2
23	C5	32.1	33.2	32.6	Aceptada	zona 2
24	C6	31.5	33.8	32.6	Aceptada	zona 2
25	D5	32.3	33.3	32.8	Aceptada	zona 2
26	D6	32.2	33	32.6	Aceptada	zona 2
27	A1	37.6	41.9	39.8	Aceptada	zona 2
28	A2	41.9	39.9	40.9	Aceptada	zona 2
29	A3	40.5	40.2	40.3	Aceptada	zona 2
30	B2	41.2	40.5	40.8	Aceptada	zona 2
31	B3	40.9	41.4	41.2	Aceptada	zona 2
32	C2	41.2	40.7	40.9	Aceptada	zona 2
33	C3	41.4	41	41.2	Aceptada	zona 2
34	D1	39.9	40.6	40.3	Aceptada	zona 2
35	F5	31.8	32.9	32.4	Aceptada	zona 2
36	F6	32.9	32	32.4	Aceptada	zona 2
37	A6 SUR	31.2	31	31.1	Aceptada	zona 2
38	F'5'	40.5	40.1	40.3	Aceptada	zona 2
39	A1	40.5	40	40.3	Aceptada	zona 2
40	A2	39	40.6	39.8	Aceptada	zona 2

Número	Pila	Longitud en Tiempo (m)	Longitud en Frecuencia (m)	Longitud promedio (m)	Condición	Zona
41	A3	38.8	40.6	39.7	Aceptada	zona 2
42	B2	39.6	39.1	39.4	Aceptada	zona 2
43	B3	38.4	40	39.2	Aceptada	zona 2
44	C2	40.1	40.6	40.4	Aceptada	zona 2
45	C3	40.9	41.4	41.5	Aceptada	zona 2
46	D1	41	41.2	41.1	Aceptada	zona 2
47	5 A-7	42.1	41.2	41.6	Aceptada	zona 2
48	6 A-7	41.5	40.3	40.9	Aceptada	zona 2
49	A4	42.6	40.3	41.4	Aceptada	zona 2
50	A5	42.1	40.8	41.5	Aceptada	zona 2
51	A6	40.9	41.4	41.1	Aceptada	zona 2
52	B5	41.2	41.1	41.2	Aceptada	zona 2
53	B6	42.6	40.4	41.5	Aceptada	zona 2
54	C4	41.9	40.4	41.1	Aceptada	zona 2
55	C4'	42	40.2	41	Aceptada	zona 2
56	C5	39.2	39.5	39.4	Aceptada	zona 2
57	C5'	41.9	41.1	41.5	Aceptada	zona 2
58	4 A-7	42.4	41.1	41.8	Aceptada	zona 2
59	A-7	40.9	41.2	41.1	Aceptada	zona 2
60	B4	41	40.7	40.9	Aceptada	zona 2
61	B7	42.2	41.3	41.8	Aceptada	zona 2
62	C6	40.9	41.3	41.1	Aceptada	zona 2
63	C6'	42.1	40.3	41.2	Aceptada	zona 2
64	C7	40.5	40.5	40.5	Aceptada	zona 2
65	D2	42.4	41.1	41.8*	Aceptada	zona 2
66	D3	39.6	40.6	40.1*	Aceptada	zona 2
67	D4	41.1	41.2	41.2	Aceptada	zona 2
68	D5	40.5	42	41.3	Aceptada	zona 2
69	D6	39.2	40.9	40.1	Aceptada	zona 2
70	C1	31.4	32.4	31.9	Aceptada	zona 2
71	C2	31.2	32.6	31.9	Aceptada	zona 2
72	C3	31.5	30.9	31.2	Aceptada	zona 2
73	D2 Oriente	29.2	30.3	29.8	Aceptada	zona 2
74	B5 Norte	32.7	31.9	32.3	Aceptada	zona 2
75	B5 Sur	32.9	32.8	32.9	Aceptada	zona 2
76	D2 Poniente	31.7	33.6	32.7	Aceptada	zona 2
77	5'F' Norte	38.3	38.8	38.5	Aceptada	zona 2
78	5'F' Sur	39.3	38.6	38.9	Aceptada	zona 2
79	D-7	40.5	41.5	41	Aceptada	zona 2
80	A-8	38.8	39.9	39.4	Aceptada	zona 2

<b>Número</b>	<b>Pila</b>	<b>Longitud en Tiempo (m)</b>	<b>Longitud en Frecuencia (m)</b>	<b>Longitud promedio (m)</b>	<b>Condición</b>	<b>Zona</b>
81	B-8	39.8	40.6	40.2	Aceptada	zona 2
82	C-8	40.6	41.5	41.1	Aceptada	zona 2
83	D-8	39.2	42.1	40.7	Aceptada	zona 2
84	C-9	42.6	42.3	42.5	Aceptada	zona 2
85	D-9	43	42.5	42.8	Aceptada	zona 2
86	A7-9.1	39.9	40.2	40.1	Aceptada	zona 2
87	B-9	41.7	42.6	42.2	Aceptada	zona 2
88	A7-10.9	40.2	39.8	40	Aceptada	zona 2
89	B-11	40	41.5	40.8	Aceptada	zona 2
90	B-12 Oeste	41.4	41.3	41.4	Aceptada	zona 2
91	B-12 Este	39.7	40.5	40.1	Aceptada	zona 2
92	C-11	40.9	41.8	41.3	Aceptada	zona 2
93	D-12	41.3	39.7	40.5	Aceptada	zona 2
94	C-12	40	42	41	Aceptada	zona 2
95	D3-9.1	40	40.6	40.3	Cuestionable	zona 2
96	A-9	7.4	7.9	7.7	No Aceptada	zona 2
97	D3-10.9	40	40	40	Cuestionable	zona 2
98	E-11	40.9	40.1	40.5	Aceptada	zona 2
99	D-11	36.5	37.4	36.9	Aceptada	zona 2
100	E-12	37.5	38.8	38.2	Cuestionable	zona 2
101	E-13	38.7	39.9	39.3	Cuestionable	zona 2
102	D-13 sur	38	39.6	38.8	Cuestionable	zona 2
103	D-13 norte	39.4	40.6	40	Aceptada	zona 2
104	C-13	37.4	38.6	38	Aceptada	zona 2
105	B-13 Sur	38.1	39.2	38.7	Cuestionable	zona 2
106	B-13 Norte	39.2	40.4	39.8	Aceptada	zona 2
107	B-14	40	41.3	40.6	Cuestionable	zona 2
108	C-14 NE	38.5	40.9	39.7	Aceptada	zona 2
109	C-14 SW	35.3	37.6	36.4	Cuestionable	zona 2
110	D.3-14	38.3	39.6	39	Cuestionable	zona 2
111	D-14	37.8	39.9	38.5	Aceptada	zona 2
112	B.7-15	40.6	38.7	39.6	Cuestionable	zona 2
113	C-15 NE	35.5	38.7	37.1	Cuestionable	zona 2
114	C-15 SW	35	36	36.1	Cuestionable	zona 2
115	B.7-14 W	40.9	40.9	40.9	Aceptada	zona 2
116	D.3-15	39.4	40.8	40.1	Aceptada	zona 2
117	B.7-16	33.3	32.8	33.7	Cuestionable	zona 2
118	C-16	41.2	40.7	40.9	Aceptada	zona 2
119	D.3-16	33.1	33.4	33.3	Cuestionable	zona 2
120	D-16	41.6	39	40.3	Cuestionable	zona 2

<b>Número</b>	<b>Pila</b>	<b>Longitud en Tiempo (m)</b>	<b>Longitud en Frecuencia (m)</b>	<b>Longitud promedio (m)</b>	<b>Condición</b>	<b>Zona</b>
121	C-17	39.1	40.1	39.6	Aceptada	zona 2
122	D-17	38.7	40.9	39.8	Aceptada	zona 2
123	C-18	40.5	41.2	40.7	Aceptada	zona 2
124	B-17	35.8	35.5	35.7	Cuestionable	zona 2
125	B-18 E	36.8	35.8	36.3	Cuestionable	zona 2
126	B-18 W	41.6	41.1	41.3	Cuestionable	zona 2
127	B-19 E	40	41.1	40.5	Aceptada	zona 2
128	B-19 W	28.7	24.4	26.5	No Aceptada	zona 2
129	D-15	36.4	37.3	36.8	Cuestionable	zona 2
130	D-18	11.7	11.4	11.5	No Aceptada	zona 2
131	D-19	40.2	39.1	39.6	Cuestionable	zona 2
132	E-16	41.2	41.2	41.2	Aceptada	zona 2
133	E-17	40.7	40.4	40.6	Aceptada	zona 2
134	E-18	40.4	40	40.2	Aceptada	zona 2
135	E-19 E	39.2	38	38.9	Aceptada	zona 2
136	E-19 W	39.7	39	39.3	Aceptada	zona 2
137	B.7-14 E	38.4	39.7	39	Aceptada	zona 2
138	E-14 N	38	38.8	38.6	Cuestionable	zona 2
139	E-14 S	39.5	39.6	39.5	Cuestionable	zona 2
140	B-15	41.7	40.4	40.9	Aceptada	zona 2
141	E-15 N	37.4	40.1	38.7	Aceptada	zona 2
142	E-15 S	40.9	37.2	39	Cuestionable	zona 2
143	B-16	40.9	39.1	39.8	Aceptada	zona 2
144	C-19	40.8	42.9	41.9	Cuestionable	zona 2
145	2	32.4	33.5	33	Aceptada	zona 2
146	3	31.7	33.1	32.4	Aceptada	zona 2
147	6	31.7	34.2	32.9	Aceptada	zona 2
148	7	33.5	35.1	34.3	Aceptada	zona 2
149	E7	40.8	41.9	41	Aceptada	zona 2
150	8	32.1	34.2	33.1	Aceptada	zona 2
151	9	34.5	34.7	34.6	Aceptada	zona 2
152	10	36.6	35.9	36	Aceptada	zona 2
153	5A	31.4	31.6	31.5	Aceptada	zona 2
154	6A	31.4	31.9	31.7	Aceptada	zona 2
155	13	31	32.6	31.8	Cuestionable	zona 2
156	14	31.1	32.6	31.8	Aceptada	zona 2
157	15	31.8	32	31.9	Aceptada	zona 2
158	16	31	32.6	31.8	Aceptada	zona 2
159	3A	31	33.4	32	Aceptada	zona 2
160	1	29.4	32.2	30.8	Aceptada	zona 2

<b>Número</b>	<b>Pila</b>	<b>Longitud en Tiempo (m)</b>	<b>Longitud en Frecuencia (m)</b>	<b>Longitud promedio (m)</b>	<b>Condición</b>	<b>Zona</b>
161	1-E	38.5	37.8	38.1	Cuestionable	zona 2
162	3-E	38	39.3	38.7	Cuestionable	zona 2
163	5-E	38.5	38.5	38.5	Cuestionable	zona 2
164	15-A	40.2	40.6	40.4	Aceptada	zona 2
165	17-A	39.7	38.2	38.9	Cuestionable	zona 2
166	19-A	35.1	35.2	35.1	Cuestionable	zona 2
167	11 /16-E´	32	31.9	32	Cuestionable	zona 2
168	55/E-10´	32.3	32.7	32.5	Aceptada	zona 2
169	90/E-14´	32.3	32.7	32.5	Aceptada	zona 2
170	49/E-9	40.5	40.2	40.3	Aceptada	zona 2
171	54/E-10	31.2	31.3	31.2	Aceptada	zona 2
172	59/A-11	39.1	36.8	37.9	Cuestionable	zona 2
173	72/A-13	38.8	37.4	37.8	Cuestionable	zona 2
174	9A NORTE	38.6	39.4	39	Aceptada	zona 2
175	9A SUR	38	39.4	38.7	Aceptada	zona 2
176	74	40.2	40.9	40.5	Cuestionable	zona 2
177	77	39.8	40.3	40	Cuestionable	zona 2
178	58	39.5	39.5	39.5	Aceptada	zona 2
179	83	41.8	41.2	41.5	Aceptada	zona 2
180	14 C/83	41.8	41.2	41.5	Aceptada	zona 2
181	70 Norte	42.7	42.8	42.7	Aceptada	zona 2
182	70 sur	42.3	39.8	41.04	Aceptada	zona 2
183	86 norte	39.5	39.9	39.7	Aceptada,	zona 2
184	86 sur	41.7	41	41.3	Aceptada	zona 2
185	102 norte	42.4	42.8	42.6	Aceptada	zona 2
186	102 sur	41.9	42.6	42.3	Aceptada	zona 2
187	105 norte	42.2	40.2	41.2	Aceptada,	zona 2
188	124 norte	42.1	42.3	42.2	Aceptada	zona 2
189	124 sur	41.7	40	40.8	Aceptada,	zona 2
190	105 sur	40.4	40.8	40.6	Cuestionable	zona 2
191	118 oriente	40.5	40.3	40.4	Aceptada	zona 2
192	118 poniente	40.6	40.2	40.4	Aceptada	zona 2
193	125 norte	39.2	39.3	39.2	Aceptada,	zona 2
194	125 sur	39.9	40.4	40.2	Aceptada	zona 2
195	5	40.5	41	40.8	Cuestionable	zona 2
196	11	-	-	-	Cuestionable	zona 2
197	72	40	39.4	39.7	Aceptada	zona 2
198	73	39.9	41.5	40.7	Aceptada	zona 2
199	74	40	39	39.5	Aceptada	zona 2
200	10	40	39.7	39.8	Aceptada	zona 2

<b>Número</b>	<b>Pila</b>	<b>Longitud en Tiempo (m)</b>	<b>Longitud en Frecuencia (m)</b>	<b>Longitud promedio (m)</b>	<b>Condición</b>	<b>Zona</b>
201	32	40	41	40.5	Aceptada	zona 2
202	36	40	40.1	40	Cuestionable	zona 2
203	80	30	32.7	31.4	Aceptada	zona 2
204	88	30	30.8	30.4	Aceptada	zona 2
205	90	30	30.1	30.1	Aceptada	zona 2
206	4	40	40.5	40.3	Aceptada	zona 2
207	7	40	39.4	39.7	Aceptada	zona 2
208	10	40	39.7	39.8	Aceptada	zona 2
209	32	40	41	40.5	Aceptada	zona 2
210	36	40	40.1	40	Cuestionable	zona 2
211	80	30	32.7	31.4	Aceptada	zona 2
212	88	30	30.8	30.4	Aceptada	zona 2
213	90	30	30.1	30.1	Aceptada	zona 2
214	29	40.5	40.1	40.3	Aceptada	zona 2
215	33	41	39.4	40.2	Aceptada	zona 2
216	76	40.5	40.2	40.4	Cuestionable	zona 2
217	77	36.6	36.6	36.6	Cuestionable	zona 2
218	37	40.1	40.6	40.4	Aceptada	zona 2
219	71	40.4	40.3	40.4	Aceptada	zona 2
220	94	40.8	40.9	40.9	Aceptada	zona 2
221	97	30.4	30.1	30.3	Aceptada	zona 2
222	100	30.8	31.2	31	Aceptada	zona 2
223	101	30.9	31.1	31	Cuestionable	zona 2
224	2	40	40.5	40.3	Aceptada	zona 2
225	3	40.4	40.3	40.3	Aceptada	zona 2
226	8	40.9	41.1	41	Cuestionable	zona 2
227	9	40.8	39.2	40	Cuestionable	zona 2
228	12	40.5	40.7	40.6	Cuestionable	zona 2
229	13	40.2	40.3	40.3	Cuestionable	zona 2
230	8	40.4	40.1	40.3	Cuestionable	zona 2
231	9	40.2	40.2	40.2	Aceptada	zona 2
232	14	40.3	41.1	40.7	Aceptada	zona 2
233	82	29.6	29	29.3	Cuestionable	zona 2
234	83	29.7	29.7	29.7	Aceptada	zona 2
235	42	39.9	39.7	39.8	Aceptada	zona 2
236	63	39.9	39.8	39.9	Aceptada	zona 2
237	67	39.6	39.6	39.6	Aceptada	zona 2
238	99	30.1	30.1	30.1	Aceptada	zona 2
239	101	31	31	31	Aceptada	zona 2
240	15	40.3	40.2	40.3	Aceptada	zona 2

<b>Número</b>	<b>Pila</b>	<b>Longitud en Tiempo (m)</b>	<b>Longitud en Frecuencia (m)</b>	<b>Longitud promedio (m)</b>	<b>Condición</b>	<b>Zona</b>
241	16	40.4	40.3	40.4	Aceptada	zona 2
242	17	40.3	40.6	40.5	Aceptada	zona 2
243	18	40.1	40	40.1	Aceptada	zona 2
244	84	30.4	30.6	30.5	Aceptada	zona 2
245	19	40.3	40.6	40.5	Aceptada	zona 2
246	21	41.3	40.8	41	Aceptada	zona 2
247	22	40.6	41.3	40.9	Cuestionable	zona 2
248	23	40.5	40.7	40.6	Cuestionable	zona 2
249	68	39.4	39.4	39.4	Aceptada	zona 2
250	20	40.3	40.2	40.3	Aceptada	zona 2
251	28	40.4	40.3	40.4	Aceptada	zona 2
252	23	39.8	39.6	39.7	Aceptada	zona 2
253	24	39.9	39.6	39.8	Aceptada	zona 2
254	25	40	40.6	40.3	Aceptada	zona 2
255	26	40.1	40	40.1	Aceptada	zona 2
256	27	40.5	40.5	40.5	Aceptada	zona 2
257	31	40.4	40.2	40.3	Aceptada	zona 2
258	34	40.2	40.2	40.2	Aceptada	zona 2
259	30	40.2	40.3	40.3	Aceptada	zona 2
260	35	40.1	39.9	40	Cuestionable	zona 2
261	39	40.2	40.2	40.2	Aceptada	zona 2
262	40	40	40.2	40.1	Aceptada	zona 2
263	45	41.9	42	42	Aceptada	zona 2
264	46	39.8	40.3	40.1	Aceptada	zona 2
265	47	40	40.8	40.4	Aceptada	zona 2
266	50	39.8	39.8	39.8	Aceptada	zona 2
267	52	40.2	40	40.1	Aceptada	zona 2
268	60	39.8	39.7	39.8	Aceptada	zona 2
269	46	39.8	40.3	40.1	Aceptada	zona 2
270	47	40	40.8	40.4	Aceptada	zona 2
271	50	39.8	39.8	39.8	Aceptada	zona 2
272	52	40.2	40	40.1	Aceptada	zona 2
273	60	39.8	39.7	39.8	Aceptada	zona 2
274	44	40	40.1	40.1	Aceptada	zona 2
275	57	39.9	40.1	40	Aceptada	zona 2
276	61	40.2	40	40.1	Aceptada	zona 2
277	64	40.1	40.2	40.2	Aceptada	zona 2
278	65	39.7	39.8	39.8	Aceptada	zona 2
279	41	40.1	40	40.1	Aceptada	zona 2
280	48	40.1	41.2	40.7	Aceptada	zona 2

<b>Número</b>	<b>Pila</b>	<b>Longitud en Tiempo (m)</b>	<b>Longitud en Frecuencia (m)</b>	<b>Longitud promedio (m)</b>	<b>Condición</b>	<b>Zona</b>
281	53	40.1	40.1	40.1	Aceptada	zona 2
282	58	40.1	40	40.1	Aceptada	zona 2
283	69	40.2	40.2	40.2	Cuestionable	zona 2
284	49	39.7	40	39.9	Aceptada	zona 2
285	54	40.1	40.2	40.2	Aceptada	zona 2
286	55	40.1	40	40.1	Aceptada	zona 2
287	59	40.1	40	40.1	Aceptada	zona 2
288	62	39.9	40.1	40	Aceptada	zona 2
289	66	40.1	40.2	40.2	Aceptada	zona 2
290	70	40.1	40.1	40.1	Aceptada	zona 2
291	92	30.4	30.8	30.6	Aceptada	zona 2
292	93	30.3	30	30.2	Aceptada	zona 2
293	98	29.9	29.6	29.8	Aceptada	zona 2
294	86	29.5	29.5	29.5	Aceptada	zona 2
295	87	29.3	29.1	29.2	Aceptada	zona 2
296	89	29.3	29.2	29.3	Aceptada	zona 2
297	91	29.5	29.2	29.4	Aceptada	zona 2
298	95	29.6	29.7	29.7	Aceptada	zona 2
299	96	30.4	30.6	30.5	Aceptada	zona 2
300	86	29.5	29.5	29.5	Aceptada	zona 2
301	87	29.3	29.1	29.2	Aceptada	zona 2
302	89	29.3	29.2	29.3	Aceptada	zona 2
303	91	29.5	29.2	29.4	Aceptada	zona 2
304	95	29.6	29.7	29.7	Aceptada	zona 2
305	96	30.4	30.6	30.5	Aceptada	zona 2
306	12	7.8	8.1	7.9	No aceptada	ZONA 3
307	13	26.3	26.8	26.5	Aceptada	ZONA 3
308	15	17.3	17.1	17.1	No aceptada	ZONA 3
309	16	25.8	25.9	25.9	Aceptada	ZONA 3
310	17	22.7	22.6	22.7	Aceptada	ZONA 3
311	11	22.2	24.1	23.1	Aceptada	ZONA 3
312	19	23.6	23.9	23.7	Aceptada	ZONA 3
313	32	24.2	24.6	24.4	Aceptada	ZONA 3
314	33	24.9	23.9	24.4	Aceptada	ZONA 3
315	9	24.3	24	24.2	Aceptada	ZONA 3
316	10	28.6	26.4	27.5	Aceptada	ZONA 3
317	20	24.9	24.6	24.8	Aceptada	ZONA 3
318	42	24.3	23.6	23.9	Aceptada	ZONA 3
319	44	23.6	24.6	24.1	Aceptada	ZONA 3
320	45	24.4	23	23.7	Aceptada	ZONA 3

<b>Número</b>	<b>Pila</b>	<b>Longitud en Tiempo (m)</b>	<b>Longitud en Frecuencia (m)</b>	<b>Longitud promedio (m)</b>	<b>Condición</b>	<b>Zona</b>
321	46	24.7	23.5	24.1	Aceptada	ZONA 3
322	47	24.9	23.4	24.2	Aceptada	ZONA 3
323	48	25	25	25	Aceptada	ZONA 3
324	49	25.8	26.2	26	Aceptada	ZONA 3
325	43	24	23.7	23.9	Aceptada	ZONA 3
326	8	26.4	26.5	26.5	Aceptada	ZONA 3
327	28	24.5	26.7	25.6	Aceptada	ZONA 3
328	29	22.2	22.1	22.2	Aceptada	ZONA 3
329	41	20.8	20.8	20.8	Aceptada	ZONA 3
330	28	24.5	26.7	25.6	Aceptada	ZONA 3
331	29	22.2	22.1	22.2	Aceptada	ZONA 3
332	41	20.8	20.8	20.8	Aceptada	ZONA 3
333	4	23.8	23.6	23.7	Aceptada	ZONA 3
334	5	22.2	22.4	22.3	Aceptada	ZONA 3
335	6	23.8	24.1	24	Aceptada	ZONA 3
336	31	22.4	23.5	23	Aceptada	ZONA 3
337	1	24.2	24.7	24.5	Cuestionable	ZONA 3
338	2	24.3	25	24.7	Aceptada	ZONA 3
339	22	24.5	24.6	25.6	Aceptada	ZONA 3
340	25	21.5	22.8	22.2	Aceptada	ZONA 3
341	26	23.4	23.8	23.6	Aceptada	ZONA 3
342	27	21.3	21.4	21.4	Cuestionable	ZONA 3
343	23	23.8	24.6	24.2	Cuestionable	ZONA 3
344	24	22.7	22.6	22.5	Aceptada	ZONA 3
345	27	16.4	16.8	16.6	Aceptada	ZONA 3