

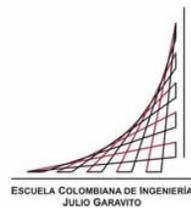
Maestría en Ingeniería Civil

Determinación de curvas de transferencia de carga con base en un ensayo de carga axial bidireccional con Celda Osterberg en un pilote de concreto pre excavado en la sabana de Bogotá.

José Jaime Sierra Molina

Ingeniero Civil

Bogotá, D.C., 16 de diciembre de 2019



Determinación de curvas de transferencia de carga con base en un ensayo de carga axial bidireccional con Celda Osterberg en un pilote de concreto pre excavado en la sabana de Bogotá.

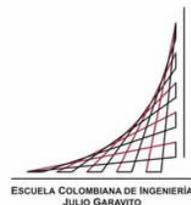
Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Geotecnia

Director

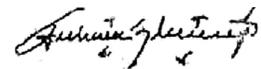
Fabián René Álvarez Sierra

Ingeniero Civil, M.Sc.

Bogotá, D.C., 16 de diciembre de 2019



La tesis de maestría titulada “Determinación de curvas de transferencia de carga con base en un ensayo de carga axial bidireccional con celda Osterberg en un pilote de concreto pre excavado en la sabana de Bogotá.”, presentada por José Jaime Sierra Molina, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.



Director de la tesis

Fabián René Álvarez Sierra

Jurado

Guillermo Pabón

Jurado

Catalina Lozada

Bogotá, D.C., 16 de diciembre de 2019

Dedicatoria

A mi señora, Nidia y mi hija, Daniela Sofía.

Agradecimientos

Al Ingeniero Fabián Álvarez por su generosidad compartiendo su experiencia y por ser un gran guía.

A la Financiera de Desarrollo Nacional (FDN), entidad gracias a la cual se ejecutaron las pruebas de carga a la cimentación del proyecto Primera Línea de Metro de Bogotá.

Resumen

Se analizaron los resultados de una de las pruebas de carga con Celda Osterberg ejecutadas para la optimización de las cimentaciones de la Primera Línea de Metro de Bogotá. El pilote analizado cuenta con dos niveles de celdas Osterberg, una longitud de 70 m y diámetro de 1,60 m embebido en suelos de origen aluvial de la Sabana de Bogotá. Se realizaron mediciones de la geometría interna de la excavación del pilote mediante SoniCaliper, se evaluó la calidad del pilote mediante ensayo Crosshole Sonic Logging. Se aplicaron dos etapas de carga para realizar el proceso de falla del tramo inferior, intermedio y superior, con base en las lecturas de la instrumentación: Strain Gages, LVWDT, Embedded Compression Telltales, Compression Telltales, fuerzas y desplazamientos en la celdas, fue posible construir curvas de transferencia de carga t-z para diferentes tramos del pilote y la curva q-w para la punta. Adicionalmente, se determinó una curva de adherencia α para los estratos cohesivos y la curva de coeficientes de transferencia de carga β para los de comportamiento granular.

Palabras Clave: prueba de carga, Celda Osterberg, curva t-z, curva q-w, adherencia α , transferencia β

Índice de Contenido

Capítulo I	32
CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.....	32
1.1 GEOLOGÍA.....	32
1.2 INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA Y ENSAYOS DE LABORATORIO	33
1.3 ANÁLISIS DE VARIABILIDAD Y SELECCIÓN DE PARÁMETROS	37
Capítulo II.....	50
INSTRUMENTACIÓN DEL PILOTE DE PRUEBA	50
2.1 Localización en profundidad y en sección de la instrumentación del pilote	50
2.2 Celda Osterberg	53
2.3 Transductores de desplazamiento de cuerda vibrante (LVWDT)	54
2.4 Galgas extensiométricas de cuerda vibrante (Strain gages VW).....	55
2.5 Extensómetro de barra de compresión (Compression Telltale)	56
Capítulo III.....	58
ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DEL PILOTE.....	58
3.1 Análisis del diámetro del pilote.....	59
3.1 Análisis verticalidad del pilote.....	69
3.2 Análisis de las propiedades del concreto	71
Capítulo IV.....	80
ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CARGA	80
3.1 Lecturas de los instrumentos.....	81
3.3 Fricción y punta unitaria con base en la prueba de carga	89
3.4 Reproducción de los resultados de las curvas carga - desplazamiento con base en las curvas t-z y q-w	99
3.5 Curva carga – asentamiento equivalente desde la cabeza del pilote.....	104
3.6 Retro cálculo para la determinación de alfa y beta obtenidos de la prueba de carga.....	106
3.7 Retro cálculo para la determinación de parámetros de asentamiento	112
Capítulo V.....	115
CONCLUSIONES	115
Bibliografía	121

Índice de figuras

Figura 1. Factor de adhesión alfa para pilotes pre-excavados, en función de la resistencia al corte no drenado S_u	16
Figura 2 Metodología empleada en la investigación.....	21
Figura 3 Datos típicos de una prueba de carga en un pilote instrumentado con un módulo de rigidez constante.....	26
Figura 4 Esquema de distribución de fuerzas en un tramo de pilote.....	27
Figura 5 Análisis de transferencia de carga para un pilote individual (Coyle y Reese, 1966).....	30
Figura 6. Planta Geológica – Sitio prueba de carga.	33
Figura 7. Perfil de granulometría, índice de plasticidad y contenido de humedad de la perforación PT-PLMB-PC-07.	38
Figura 8. Perfil de humedades y límites, índice de liquidez y peso unitario de la perforación PT-PLMB-PC-07. Fuente: Elaboración propia.....	39
Figura 9. Carta de Plasticidad de Casagrande para todos los materiales de la perforación PT-PLMB-PC-07. Fuente: Elaboración propia.	39
Figura 10. Posición del nivel de agua de perforación al final de la jornada.....	41
Figura 11. Posición del nivel de agua de perforación al inicio de la jornada.....	42
Figura 12. Perfil de resistencia al corte no drenado de la perforación PT-PLMB-PC-07.....	44
Figura 13. Perfil de valores de N_{60} de los materiales drenados en la perforación PT-PLMB-PC-07.	47
Figura 14. Perfil de módulo de elasticidad para la perforación PT-PLMB-PC-07	48
Figura 15. Localización en perfil de la instrumentación dentro del pilote.....	51
Figura 16. Instrumentación del pilote proyectada sobre la platina del montaje de la celda de carga.	52
Figura 17. Transductor de desplazamiento por hilo vibrátil LVWDT	55
Figura 18. Datos capturados con SoniCaliper en una sección a una profundidad de 68 pies.	60
Figura 19. Perfil de radios del pilote en profundidad a partir de las lecturas de SoniCaliper	61
Figura 20. Curva de vaciado de concreto a partir de las lecturas de SoniCaliper	62
Figura 21. Perfil de radios del pilote en profundidad a partir del registro de fundición de pilote ...	64
Figura 22. Curva de vaciado a partir del registro de fundición de pilote	65
Figura 23. Perfil de radios de análisis seleccionados en profundidad para el pilote de prueba	68
Figura 24. Perfil de verticalidad del eje del pilote	69
Figura 25. Modelo tridimensional de tres tramos del pilote de prueba.....	70
Figura 26. Rigidez tangencial del tramo de la celda inferior a la punta del pilote.....	75
Figura 27. Rigidez tangencial del tramo entre celdas	75
Figura 28. Rigidez tangencial del tramo entre la cabeza del pilote y la celda superior	76
Figura 29. Diagrama de cascada trayectoria 1 a 4.....	78
Figura 30. Movimiento de la cabeza del pilote para la segunda etapa de carga.....	81
Figura 31. Resultados de las lecturas de los Compression Telltales para la segunda etapa de carga.	82
Figura 32. Expansión de la Upper O. Cell para la segunda etapa de carga.....	83
Figura 33. Expansión de la Lower O. Cell para la primera etapa de carga.....	84

Figura 34. Resultados de las lecturas de los Compression Telltales para la primera etapa de carga.	85
Figura 35. Resultados de las lecturas de los Embedded Compression Telltales para la primera etapa de carga.	86
Figura 36. Resultados de las lecturas del nivel de Strain Gage 1 ante la primera etapa de carga....	87
Figura 37. Lecturas de deformación para los Strain Gages del tramo entre celda superior y la cabeza del pilote.	88
Figura 38. Lecturas de deformación para los Strain Gages del tramo superior del pilote.	89
Figura 39. Curva t-z del tramo entre el Strain Gage 6 y la cabeza del pilote.	90
Figura 40. Curva t-z del tramo entre el Strain Gage 5 y el Strain Gage 6.	91
Figura 41. Curva t-z del tramo entre el Strain Gage 4 y el Strain Gage 5.	92
Figura 42. Curva t-z del tramo entre el Upper O. Cell y el Strain Gage 4.	93
Figura 43. Curva t-z del tramo entre la Celda Superior y el Strain Gage 3.	94
Figura 44. Curva t-z del tramo entre el Strain Gage 3 y el Strain Gage 2.	95
Figura 45. Curva t-z del tramo entre el Strain Gage 2 y la Celda Inferior.	96
Figura 46. Distribución de cargas entre los componentes fuste y punta en el tramo inferior ante las cargas aplicadas por la celda.	97
Figura 47. Curva de capacidad unitaria por punta en función del desplazamiento en punta q-w....	98
Figura 48. Curva t-z del tramo entre la celda inferior y la punta del pilote.	99
Figura 49. Comportamiento carga - desplazamiento real y simulado del tramo U-OC a cabeza del pilote.	100
Figura 50. Verificación de la igualdad entre curvas carga – desplazamiento para un mismo desplazamiento.	101
Figura 51. Análisis tramo intermedio (U.OC – L.OC).	102
Figura 52. Comparación de cargas para desplazamiento tramo intermedio.	102
Figura 53. Análisis tramo inferior (L.OC – Punta).	103
Figura 54. Comparación de cargas para igual desplazamiento.	104
Figura 55. Carga – asentamiento equivalente desde la cabeza del pilote.	105
Figura 56. Factor de adhesión α en función de la resistencia al corte no drenado S_u .	108
Figura 57. Coeficiente de transferencia de cargas en relación con la profundidad.	109
Figura 58. Curvas t-z normalizadas para materiales predominantemente cohesivos.	111
Figura 59. Curvas t-z normalizadas – predominantes granulares.	112

Índice de tablas

Tabla 1. Factores de seguridad o de reducción con los respectivos ahorros máximos después de ejecutar pruebas de carga estáticas a compresión.	17
Tabla 2 Escala de clasificación de la señal CSL	23
Tabla 3 Criterios de evaluación del concreto en ensayos crosshole.....	24
Tabla 4. <i>Coordenadas de localización Cartesianas Bogotá de la perforación PT-PLMB-PC-07.</i> .	34
Tabla 5. <i>Cantidad de ensayos de campo de las perforaciones de la zona</i>	36
Tabla 6. <i>Cantidad de ensayos ejecutados</i>	37
Tabla 7. <i>Posición del nivel de agua de perforación de la PT-PLMB-PC-07</i>	41
Tabla 8. <i>Perfil estratigráfico de la perforación PT-PLMB-PC-07</i>	43
Tabla 9. <i>Análisis estadístico para la selección del parámetro de resistencia al corte no drenado</i> .	46
Tabla 10. <i>Parámetros geotécnicos de resistencia y deformación seleccionados para la perforación PT-PLMB-PC-07</i>	48
Tabla 11. <i>Hitos de construcción relevantes para los análisis presentados a continuación.</i>	59
Tabla 12. <i>Ensayos realizados en los lodos de estabilización y parámetros típicos según recomendaciones constructivas</i>	66
Tabla 13. <i>Distribución de diámetros para tres tramos de pilote</i>	68
Tabla 14. <i>Especificaciones para concreto de cimentaciones de acuerdo con la Norma Europea EN 1536 2010 y la norma ACI 336-1 2001.</i>	71
Tabla 15. <i>Resumen de resultados de ensayos a compresión del concreto y módulo de elasticidad.</i> 72	
Tabla 16. <i>Rigidez del concreto para tres tramos de pilote con base en una correlación con $f'c$</i>	73
Tabla 17. <i>Criterios para evaluación del concreto en ensayos CrossHole.</i>	77
Tabla 18. <i>Trayectorias con imperfecciones, defectos o anomalías.</i>	79
Tabla 19. <i>Resumen de los valores de f_s obtenidos de las curvas t-z y</i>	106
Tabla 20. <i>Cálculos realizados para los cálculos de alfa y beta.</i>	106
Tabla 21. <i>Parámetros para cálculo de asentamientos por medio de la metodología de Vesic (1977).</i>	113

Índice de fotografías

Fotografía 1. Caja de perforación indicando profundidades entre 0,00 y 4,00 m.....	35
Fotografía 2. Caja de perforación indicando profundidades entre 19,00 y 23,00 m.....	35
Fotografía 3. Caja de perforación indicando profundidades entre 34,00 y 37,50 m.....	35
Fotografía 4. Caja de perforación indicando profundidades entre 54,20 y 58,00 m.....	36
Fotografía 5. Caja de perforación indicando profundidades entre 70,10 y 73,00 m.....	36
Fotografía 6. Batería de Celdas Osterberg Soldadas a las platinas superior e inferior.....	54
Fotografía 7. Galga extensiométrica de cuerda vibrante.....	56
Fotografía 8. Extensómetro de barra de compresión (Compression Telltales).....	57

Introducción

Las pruebas de carga son una herramienta importante para contrastar la elaboración de diseños con base en metodologías teóricas o empíricas. Existen pruebas de carga de diferentes tipos, siendo una categoría las que aplican su carga de manera gradual en el tiempo y por lo tanto denominadas estáticas. Estas a su vez se subdividen en las que aplican su carga desde la cabeza del pilote mediante la construcción de un arreglo que permita aplicar la carga empleando como apoyo vigas metálicas adosadas a pilotes de reacción, o mediante la acumulación de bloques de carga sobre el elemento a probar. La forma de ejecutar este tipo de pruebas de carga estáticas va limitando su margen de aplicación a medida que los pilotes a ensayar son más robustos, es decir de mayor longitud y diámetro, requiriendo sistemas de reacción cada vez más complejos, costosos e inseguros para su ejecución. Es por ello, que la alternativa con un sistema de aplicación de cargas en profundidad, aplicada por tramos es sobresaliente y de gran valor para la geotecnia, habida cuenta que libera muchas de las restricciones mencionadas anteriormente por lo cual facilita el horizonte de aplicación de pruebas de carga y por ende el conocimiento que se puede adquirir en sistemas de cimentación profundas cada vez con mayor capacidad y precisión.

Para el caso de la sabana de Bogotá, el conocimiento mediante pruebas de carga en pilotes es relativamente incipiente y más aún cuando se trata de pruebas de carga bidireccionales con celdas Osterberg. Es por ello, que los análisis que se realicen con base en estas pruebas en nuestro medio ayudarán al desarrollo de proyectos de gran envergadura e impacto para el Distrito como lo es el proyecto Metro de Bogotá. Es por ello que el

estructurador y financiador del proyecto Primera Línea de Metro de Bogotá, Financiera de Desarrollo Nacional (FDN), decidió contratar los estudios de optimización de la cimentación de la cimentación del viaducto del Metro, mediante la ejecución de nueve pruebas de carga. La información producto del desarrollo de las pruebas de carga, es de carácter público y reposa en el cuarto de datos del proyecto Metro de Bogotá. Lo cual abre las puertas a la posibilidad de investigar con base en la información disponible para la ciudadanía.

El desarrollo de las pruebas de carga empleadas para la optimización de la cimentación del proyecto Metro, tienen como efecto secundario positivo la retroalimentación de la comunidad en general y particularmente a diseñadores y entes normativos, quienes podrán calibrar y optimizar los diseños y construcciones que se vienen desarrollando en la ciudad, con el resultado de beneficiar a la población en general, ya que por ejemplo, según datos del Censo Catastral de 2018, se presentó un incremento en el área construida de 7 millones de metros cuadrados en un año para uso residencial. Por esta razón, entendiéndose que un amplio porcentaje de esa área construida son edificaciones con cimentación profunda, se podrán mejorar tanto los beneficios económicos de conocer mejor el suelo, así como reducir las incertidumbres al respecto.

El presente documento se estructura de la siguiente forma:

Capítulo I: se presenta la selección de parámetros del suelo para los estratos cohesivos y granulares producto del procesamiento de la información de referencia.

Capítulo II: se presenta la instrumentación geotécnica empleada durante la prueba de carga.

Capítulo III: se presenta el procesamiento y evaluación de aspectos constructivos que afectan variables geométricas del pilote como lo es el diámetro y su verticalidad, así como aspectos del comportamiento del concreto en lo concerniente con la rigidez del pilote.

Capítulo IV: al inicio del capítulo se presentan resultados de la instrumentación y posteriormente su procesamiento para la obtención de curvas t-z y q-w, así como las curvas de adherencia α y de transferencia β .

Capítulo V: contiene las conclusiones de la investigación así como recomendaciones para la ejecución de futuras pruebas de carga u otras investigaciones relacionadas con este tipo de ensayos.

Planteamiento del problema

Por medio de las pruebas de carga bidireccionales es posible construir curvas de transferencia de cargas y a su vez conocer la capacidad última del pilote embebido en suelo para efectos de diseño. Las metodologías de cálculo para diseño de pilotes de concreto pre excavados en suelo de acuerdo con el CCP-14 se basan principalmente en los trabajos de O'Neill y Reese (1988), quienes establecieron una relación entre los parámetros de resistencia del suelo y la resistencia del pilote mediante factores de adhesión alfa y de transferencia de carga beta, para suelos de comportamiento cohesivo y granular respectivamente. Sin embargo, en Colombia también se encuentra como normativa la NSR-10, en la cual se encuentra la recomendación de emplear una expresión que genera valores de alfa diferentes a los del CCP-14, tal como se puede apreciar en la Figura 1. Con base en ello, la NSR-10 recomienda valores superiores de alfa para valores de S_u de suelos muy blandos, hasta suelos con S_u igual a 60 kPa, a partir de allí, la recomendación dada por el CCP-14 se vuelve mayor.

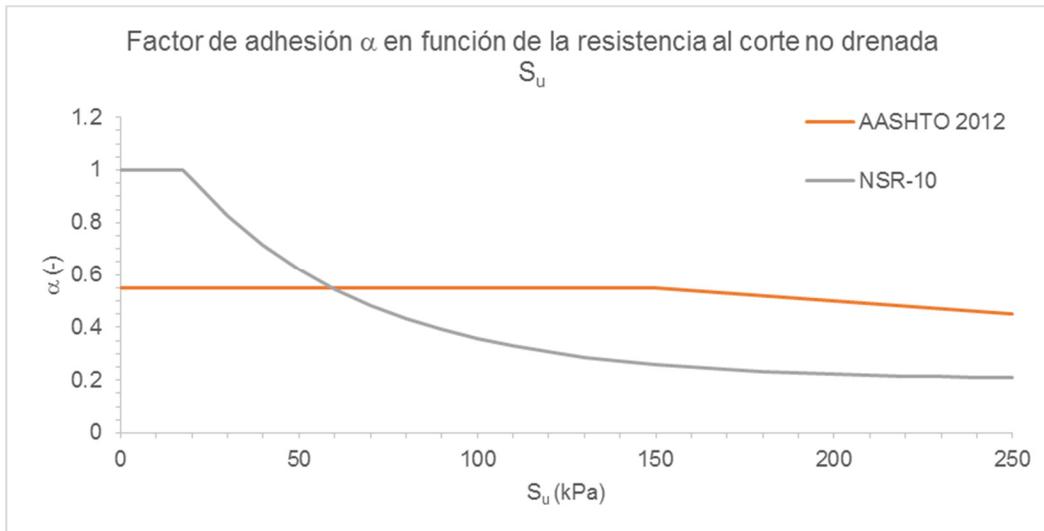


Figura 1. Factor de adhesión alfa para pilotes pre-excavados, en función de la resistencia al corte no drenado S_u

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, se desconocen las curvas de transferencia de cargas en fuste y punta para suelos de la sabana de Bogotá para pilotes de gran tamaño. Ante la ausencia de información directa, la recomendación es emplear las indicaciones dadas por el CCP-14 basado en los trabajos de O'Neill y Reese (1988), en el cual se construyeron curvas $t-z$ y $q-w$ para suelos de comportamiento cohesivo y granular.

A lo anterior, se adiciona que el comportamiento carga – asentamiento teórico del pilote puede distar del de un pilote construido debido a aspectos constructivos, los cuales son propios de cada región geográfica, por aspectos que involucran: equipos, materiales, encamisados, tiempos de ejecución, lodos de estabilización, perturbación de las paredes con los equipos de construcción y mano de obra, entre muchas otras variables. Por lo tanto, las calibraciones de parámetros empíricos no son extrapolables a otras regiones, con lo cual se

resalta una vez más la validez y pertinencia de la ejecución y procesamiento de pruebas de carga en los suelos nacionales.

Una forma de incentivar la iniciativa de ejecución de pruebas de carga en cimentación profunda para las entidades públicas o privadas es el ahorro altamente probable que se puede dar debido a la ejecución de las pruebas de carga. Las dos normatividades vigentes en Colombia que regulan el diseño y construcción de las cimentaciones profundas como lo son la NSR-10 y el CCP-14 reducen las exigencias en cuanto a Factor de Seguridad o Factor de Reducción de cargas ante el hecho de ejecutar una prueba de carga, tal como se puede apreciar en la Tabla 1, según la cual los ahorros pueden ser inicialmente de mínimo del orden de 20%.

Tabla 1. Factores de seguridad o de reducción con los respectivos ahorros máximos después de ejecutar pruebas de carga estáticas a compresión.

Norma	Suelo	Metodología	Factor de resistencia	Factor de seguridad	Ahorro máximo teórico
CCP 14	Fuste en arcilla	Método α (O'Neill y Reese, 1999)	0,45	-	36%
CCP 14	Punta en arcilla	Esfuerzo total (O'Neill y Reese, 1999)	0,40	-	43%
CCP 14	Fuste en arena	Método β (O'Neill y Reese, 1999)	0,55	-	21%
CCP 14	Punta en arena	(O'Neill y Reese, 1999)	0,50	-	29%
CCP 14	Prueba de carga estática a compresión	Todos los materiales	0,70	-	-
NSR-10	Fuste en arcilla	Método α	-	1,80	20%
NSR-10	Punta en arcilla	-	-	3,00	20%
NSR-10	Prueba de carga a compresión	Todos los materiales	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

El carácter práctico de los resultados y análisis de la prueba de carga propuesta es de interés general para el colectivo de ingenieros civiles conformado por: contratistas, diseñadores geotecnistas y estructurales, equipos técnicos de organismos Distritales como el IDU, investigadores nacionales e internacionales de la interacción suelo - estructura en suelos blandos, estudiantes de Especialización y Maestría, entre otros.

Objetivos

Objetivo general

Determinar las curvas de transferencia de carga para un pilote de concreto pre excavado con base en los resultados de un ensayo de carga axial bidireccional con celda Osterberg ejecutado en la sabana de Bogotá.

Objetivos específicos

- Considerar la modificación de la geometría del pilote por el proceso constructivo y que pueda influenciar el comportamiento de las curvas de transferencia de carga respecto al comportamiento esperado en diseño.
- Desarrollar las curvas de transferencia de carga para determinar la capacidad de carga última del pilote ensayado con base en los resultados de la prueba de carga con celda Osterberg.
- Con base en las curvas de transferencia de carga determinar para la prueba de carga del pilote, analizar los ajustes necesarios en la metodología de diseño para el cálculo de la capacidad portante última de pilotes en Bogotá.

Metodología

De las nueve pruebas de carga ejecutadas para el proyecto Primera Línea de Metro de Bogotá, se seleccionó la prueba 07, localizada en la Calle 42A Sur # Carrera 78 f en la localidad de Kennedy en la ciudad de Bogotá D.C. Del estudio de Estructuración técnica de la Primera Línea de Metro de Bogotá del Consorcio METROBOG (2018) se tomó la información de referencia, la cual fue procesada y luego analizada para lograr los objetivos planteados en la presente investigación.

La información tomada como referencia del estudio mencionado (Consorcio MetroBog, 2018) corresponde a: los resultados de la Investigación Geotécnica entendido como los resultados de ensayos de campo y laboratorio, así como referencia el perfil litológico de la zona elaborado a partir de exploraciones adicionales; el diseño de la prueba de carga, el cual consiste en la definición de la geometría del pilote, la posición de la instrumentación y celdas, así como el diseño estructural del pilote; los resultados del ensayo SoniCaliper, del cual se tomó la geometría de las secciones transversales dadas por los ajustes de regresión dadas por Gander y Strebel (1994); los resultados del ensayo Crosshole Sonic Logging y las zonas con posibles afectaciones; los resultados instrumentados de la prueba de carga, de la cual se tomaron las lecturas de los diferentes instrumentos (Strain gages, LVWDT, Embedded Compression Telltales, Compresión telltales, desplazamientos de la cabeza del pilote con los niveles topográficos y las lecturas de fuerzas de las celdas). En la **Figura 2** se presenta la metodología indicada.

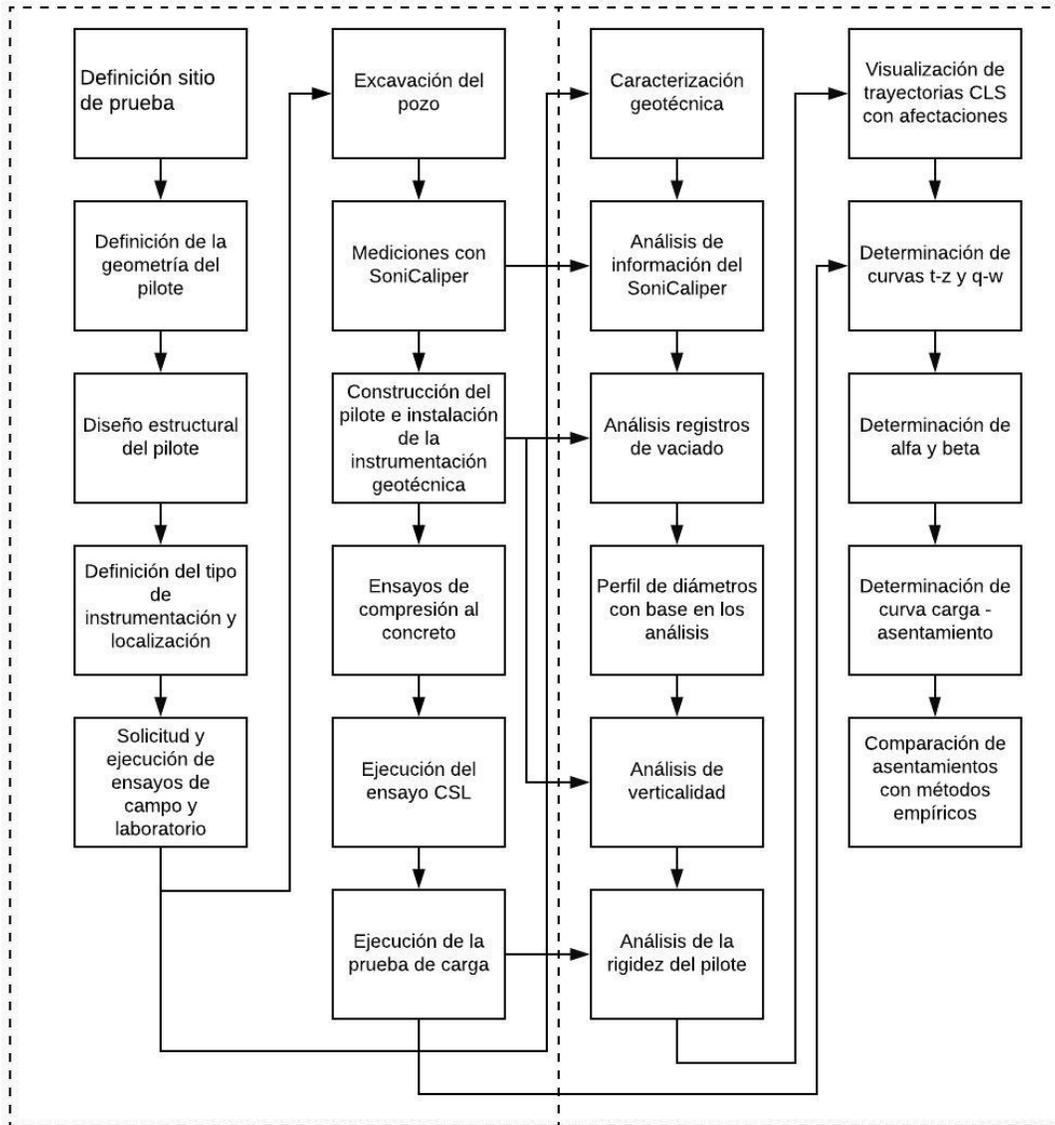


Figura 2 Metodología empleada en la investigación

Fuente: Elaboración propia

Marco Teórico

Determinación de la geometría de la excavación

La geometría de la excavación se determinó a través de mediciones con sonar gracias a la tecnología SoniCaliper desarrollada por Loadtest. Esta tecnología consiste en la captura de señales por sonar con un dispositivo que se introduce dentro de la excavación y va realizando un barrido de 360° con la captura de hasta 120 ecos cada 60 cm de profundidad. Se pueden realizar correcciones respecto a la posición del instrumento e inclinaciones por medio de sensores giroscópicos y magnéticos. Inicialmente, se realiza una calibración de la señal dentro de los lodos de perforación en la zona de la camisa metálica para aprovechar el diámetro conocido. Con las lecturas realizadas es posible determinar la forma de la superficie mediante regresión estadística con círculos y elipses con mínimos cuadrados de acuerdo con Gander y Strebel (1994), con lo cual se puede calcular la desviación respecto a la vertical, área de las secciones transversales y volumen de la excavación (Loadtest, 2018).

Adicionalmente, durante el vaciado del concreto se lleva un registro de los volúmenes vertidos por cada camión y la altura de concreto alcanzada. Esta medición se realiza mediante una cadena metálica la cual se introduce en el orificio de excavación y se baja hasta identificar la superficie de concreto.

Determinación de la calidad del pilote

Como parte de los criterios de aceptación del pilote construido se ejecutó el ensayo Crosshole Sonic Logging CSL, atendiendo las especificaciones de la ASTM D6760. Previo al ensayo, se dejaron embebidas seis tuberías metálicas, a través de las cuales, ocho días después de la fundición, se introdujeron dos sondas, una emisora y otra receptora, dentro de las tuberías saturadas con agua. Se realizaron mediciones de onda P con lo cual se determinó mediante un diagrama de cascada el tiempo de llegada de la primera onda FAT y la reducción de la energía RE.

Existen diferentes formas de categorizar los resultados obtenidos mediante los dos parámetros indicados FAT y RE, en algunos casos se reemplaza el parámetro FAT por su equivalente en velocidad de onda. En la Tabla 2 se presentó el criterio de clasificación de Likins et al. (2007).

Tabla 2 Escala de clasificación de la señal CSL

Categoría	FAT (%)	Reducción de Energía (db)
(G) Good	0 – 10	< 6
(Q) Questionable	10 – 20	< 9
(P/F) Poor/Flaw	21 – 30	9 – 12
(P/D) Poor/Defect	> 31	> 12

Fuente: modificado a partir de Defect Analysis for CSL Testing (Likins, Rausche, Webster y Klensey, 2007)

No obstante, los criterios de evaluación de la calidad del concreto empleados por el ejecutor del ensayo CSL consisten en una modificación a los planteados por Likins et al. (2007), de acuerdo con la Tabla 3.

Tabla 3 Criterios de evaluación del concreto en ensayos crosshole

Categoría	FAT (%)	Reducción de Energía (db)
Satisfactorio	0 – 20	< 9
Imperfección	21 – 30	9 – 12
Defecto	> 31	> 12
Anomalía significativa / posible discontinuidad	> 100	> 20

Fuente: Estructuración técnica de la Primera Línea de Metro de Bogotá, (Consortio METROBOG, 2018)

Determinación de la rigidez del pilote

La rigidez del pilote se calculó de dos formas, por una parte, mediante la estimación del módulo de elasticidad del pilote empleando una correlación con la resistencia a la compresión del concreto, dada por la expresión del comentario de la NSR-10 CR8.5.1, como se indica a continuación:

$$E_p = 3900 \cdot \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

Con las unidades del módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión en MPa.

Posteriormente, mediante el producto del módulo de elasticidad y el área de la sección transversal del pilote se calculó la rigidez del mismo.

Por otra parte, se emplearon los resultados medidos en los Strain Gages y se utilizó la metodología de la Rigidez Tangencial, Fellenius (1989). Esta metodología se basa en el desarrollo de las siguientes expresiones.

Por una parte, se tiene de la mecánica de sólidos la relación entre esfuerzos σ y deformaciones ε dada por:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2)$$

Para una condición de esfuerzos promedio σ sobre una superficie A, la ecuación anterior se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{P}{A} = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

Ahora, teniendo en cuenta que las deformaciones del concreto durante el proceso de carga son producidas por el equilibrio de fuerzas actuantes y resistentes, existe un momento en el cual el aporte por fricción del suelo supera su pico y continúa con una resistencia residual. Esto quiere decir que los incrementos de deformaciones posteriores a la falla se deben únicamente a los incrementos de las fuerzas externas aplicadas (presentado un comportamiento similar al de una columna), como se indica en la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta P}{\Delta \varepsilon} = A \cdot E \quad (4)$$

Por lo tanto, al realizar una gráfica del incremento de carga sobre el incremento de deformaciones en una prueba de carga, es posible conocer el valor de la rigidez del pilote con la tendencia que observa para las deformaciones mayores. La expresión anterior

también se expresa como una función lineal de las deformaciones, como se indica a continuación:

$$\frac{\Delta P}{\Delta \varepsilon} = a \cdot \varepsilon + b \quad (5)$$

No obstante, para los análisis desarrollados en el presente documento se calculó una rigidez independiente de las deformaciones, es decir constante.

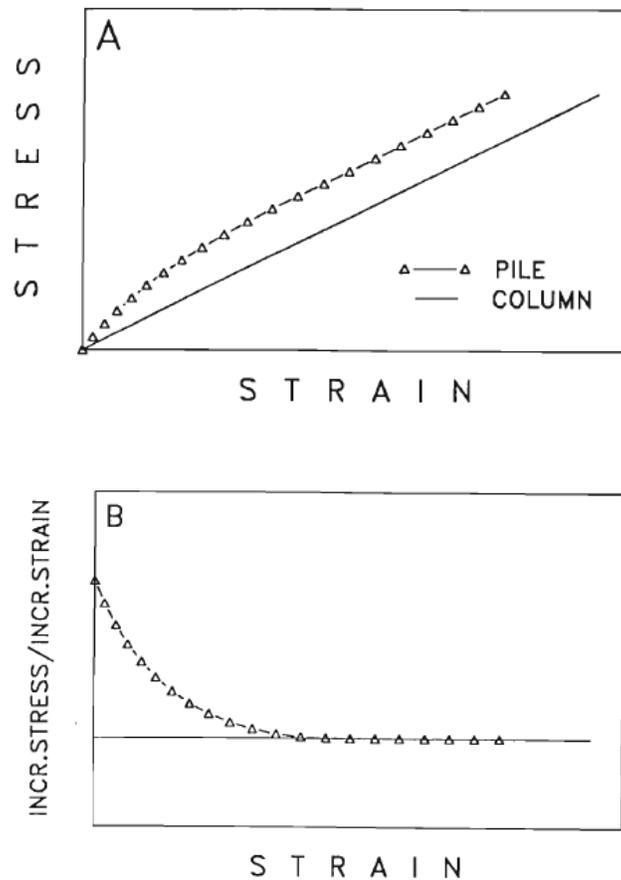


Figura 3 Datos típicos de una prueba de carga en un pilote instrumentado con un módulo de rigidez constante

Fuente: Tangent modulus of piles determined from strain data, (Fellenius, 1989).

En la Figura 4 se presenta una gráfica con base en las ecuaciones presentadas anteriormente.

Acortamiento elástico del pilote

A continuación se presenta el desarrollo de las ecuaciones empleadas para el cálculo del acortamiento elástico del pilote, para ello, se utilizó la Figura 4.

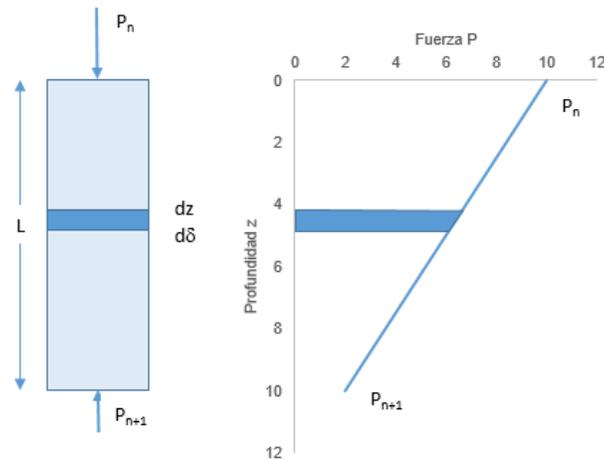


Figura 4 Esquema de distribución de fuerzas en un tramo de pilote

Fuente: Elaboración propia

Por una parte, el acortamiento elástico para una columna se calcula con base en las siguientes expresiones:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{P}{A} = E \cdot \frac{\delta}{L} \quad (7)$$

$$\delta = \frac{P \cdot L}{A \cdot E} \quad (8)$$

Sin embargo, para el caso de un pilote, teniendo en cuenta que se encuentra sometido a fuerzas actuando sobre su fuste, el acortamiento es diferente al de una columna. Con base en la Figura 4 se deduce que las fuerzas actuantes a cualquier profundidad para una fricción constante se calculan con base en la expresión:

$$P = P_n - \frac{P_n - P_{n+1}}{L} \cdot z \quad (9)$$

El acortamiento elástico para un elemento infinitesimal de un pilote, se expresa de manera similar que para una columna, como se indica a continuación:

$$d\delta = \frac{P}{A \cdot E} \cdot dz \quad (10)$$

Al utilizar las dos ecuaciones anteriores y expresándolas en una integral definida se obtiene:

$$\delta = \frac{1}{A \cdot E} \cdot \int_0^L \left(P_n - \frac{P_n - P_{n+1}}{L} \cdot z \right) dz \quad (11)$$

La solución de la integral anterior corresponde a la expresión:

$$\delta = \frac{L}{A \cdot E} \cdot \frac{P_n + P_{n+1}}{2} \quad (12)$$

Dicho de otra forma, el acortamiento elástico para un tramo de pilote de longitud L, sometido en sus extremos a dos fuerzas: P_n y P_{n+1} , y una fricción constante sobre su fuste, se puede calcular como el acortamiento elástico de una columna sometida al promedio de las fuerzas aplicadas en sus extremos.

Cálculo del asentamiento de un pilote.

De acuerdo con Geotechnical Engineering Office (2006) en el documento Foundation Design and Construction existen tres aproximaciones para el cálculo de asentamientos: métodos del continuo elástico; métodos numéricos; y método de transferencia de cargas.

Los métodos del continuo elástico están basados en las soluciones de Mindlin (1936), también llamado el método integral, basado en una carga puntual actuando en un espacio semi infinito. Poulos y Davis (1980) emplearon este método simplificando las condiciones de frontera y presentaron sus resultados en forma gráfica como un análisis paramétrico. Otra forma simplificada con una solución cerrada fue aportada por Randolph y Wroth (1978) para el caso de un suelo homogéneo. Para suelos estratificados Fleming et al. (1992) realizaron una adaptación de las expresiones de Randolph y Wroth (1978).

En cuanto a desarrollos con métodos numéricos Fleming et al. (1992) presentaron un método de predicción de carga – asentamiento utilizado funciones hiperbólicas para describir los comportamientos individuales del fuste y la punta. Butterfield y Bannerjee (1971) emplearon métodos de análisis rigurosos de elementos de contorno, Randolph (1980) y Jardine et al. (1986) emplearon métodos de elementos finitos.

Finalmente, Coyle y Reese (1966) desarrollaron un método de transferencia de cargas para pilotes en suelo. El pilote es idealizado mediante su discretización en varios elementos y el suelo es modelado mediante resortes elasto-plásticos. En la Figura 5 se presenta la discretización de un pilote y las cargas actuantes.

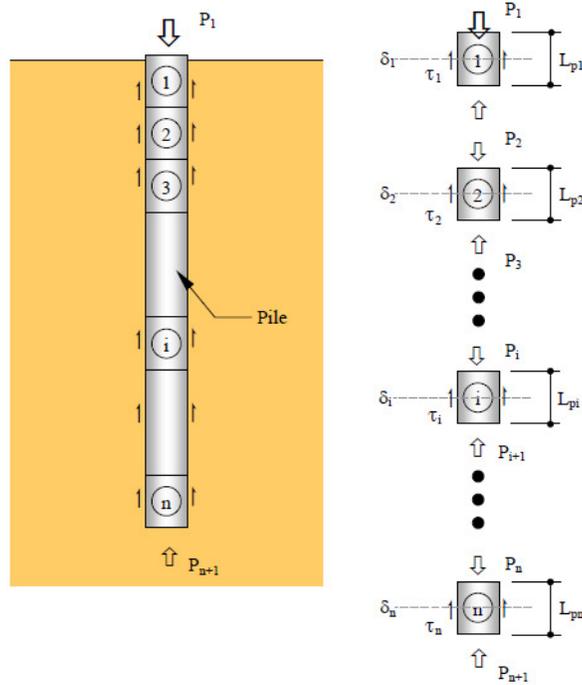


Figura 5 Análisis de transferencia de carga para un pilote individual (Coyle y Reese, 1966)

Fuente: Geotechnical Engineering Office (2006)

El procedimiento de cálculo de Coyle y Reese (1966) según Geotechnical Engineering Office (2006) es el siguiente:

1. Calcular la carga en la punta P_{n+1} para un movimiento en la base, δ_b , con base en una curva q-w.
2. Estimar el movimiento en el punto medio del elemento n, δ_n , para la primera iteración $\delta_n = \delta_b$.
3. A partir de δ_n se calcula el valor de τ_n con base en una curva t-z.
4. La carga P_n sobre el elemento n se puede calcular como la suma de la carga P_{n+1} más la carga por fricción desarrollada en el tramo de fuste del elemento n.

5. Para una distribución de fricción constante en el tramo de pilote, el acortamiento elástico en el tramo inferior del elemento se calcula así:

$$\delta_{elias} = \frac{0.5\{0.5(P_n + P_{n+1}) + P_{n+1}\} \cdot 0.5 \cdot L_{pn}}{A \cdot E}$$

6. Se calcula $\delta_n = \delta_b + \delta_{elias}$

7. Se compara el nuevo δ_n con el asumido en el paso 2. Se repiten las iteraciones hasta cumplir con la tolerancia deseada.

8. Se repiten los pasos indicados con el elemento superior, hasta encontrar la fuerza P_1 .

9. Los cálculos indicados se repiten para diferentes valores asumidos de δ_b y de esta forma se establece una curva completa de carga – asentamiento desde la cabeza del pilote.

Capítulo I

CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

En este capítulo se presentan aspectos geológicos generales del sitio de prueba, una breve descripción de la investigación geotécnica, resumen de resultados de ensayos de laboratorio y campo. Con base en esta información, se presentan los parámetros pertinentes seleccionados en el modelo conceptual requerido en la compresión de la prueba de carga.

1.1 GEOLOGÍA

El sitio de prueba se localizó sobre depósitos de la Formación Sabana (Qsa) en la zona de Aluvial 200, de acuerdo con el Estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C., Decreto 523 de 2010. Este depósito se encuentra conformado por arcillas limosas o arenas arcillosas o limos arenosos localmente con lentes de arenas limpias.

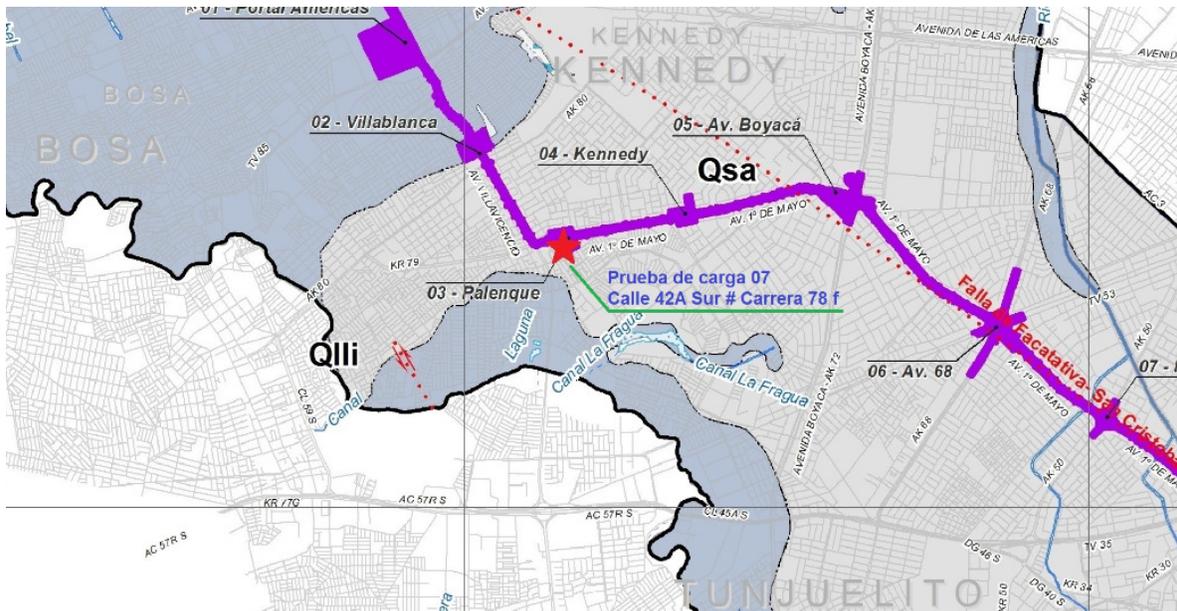


Figura 6. Planta Geológica – Sitio prueba de carga.

Fuente: Informe de Resultados Pruebas de Carga ETPLMB (Consortio METROBOG, 2019)

Para Carvajal et al. (2005) citado en el Informe de Geología de la Sabana de Bogotá (INGEOMINAS, 2005) “este depósito es resultado de un antiguo lago que dejó planicies y deltas lacustrinos, los cuales son extensos, de aspecto aterrazado y con morfología ondulada suavemente inclinada y limitada hacia los cauces por los escarpes de estos”.

Adicionalmente, Helmes y Van der Hammen (1995) citados por (INGEOMINAS, 2005) indican que el depósito de la Formación Sabana cuenta con por lo menos 320 m de profundidad con base en el pozo de Funza II.

1.2 INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Para la prueba de carga del estudio, el consorcio MetroBog ejecutó en octubre de 2018 la perforación PT-PLMB-PC-07 con el taladro Delta base 520 III, el cual permitió la

ejecución del ensayo SPT de forma automática con una eficiencia del 70%. Se realizó muestreo continuo con una recuperación predominantemente entre 70 y 100 %, aunque algunos tramos arenosos presentaron recuperación de hasta 24%. El diámetro de perforación empleado fue HQ. Se realizó medición del nivel de agua en la perforación al inicio y finalización de cada jornada de trabajo.

Se ejecutaron 23 ensayos de penetración estándar (*SPT*), 1 ensayo con veleta de campo (*VST*), se extrajeron 4 muestras en tubos Shelbys y se llevaron a cabo 19 ensayos con Dilatómetro de Marchetti (*DMT*) en los primeros 57 m.

En la Tabla 1 se indica la profundidad perforada y las coordenadas donde se ejecutó.

Tabla 4. *Coordenadas de localización Cartesianas Bogotá de la perforación PT-PLMB-PC-07.*

Norte	Este	Profundidad perforada (m)
102102	90816	73,00

Fuente: Elaboración propia con base en la información tomada del registro de perforación del Informe de Resultados Pruebas de Carga ETPLMB (Consortio METROBOG, 2019).

De la Fotografía 1 a la Fotografía 4 se muestran imágenes de algunas cajas de la perforación PT-PLMB-PC-07.



Fotografía 1. Caja de perforación indicando profundidades entre 0,00 y 4,00 m.

Fuente: Informe de Resultados Pruebas de Carga ETPLMB (Consortio METROBOG, 2019)



Fotografía 2. Caja de perforación indicando profundidades entre 19,00 y 23,00 m.

Fuente: Informe de Resultados Pruebas de Carga ETPLMB (Consortio METROBOG, 2019)



Fotografía 3. Caja de perforación indicando profundidades entre 34,00 y 37,50 m.

Fuente: Informe de Resultados Pruebas de Carga ETPLMB (Consortio METROBOG, 2019)



Fotografía 4. Caja de perforación indicando profundidades entre 54,20 y 58,00 m.

Fuente: Informe de Resultados Pruebas de Carga ETPLMB (Consortio METROBOG, 2019)



Fotografía 5. Caja de perforación indicando profundidades entre 70,10 y 73,00 m

Fuente: Informe de Resultados Pruebas de Carga ETPLMB (Consortio METROBOG, 2019)

Como información complementaria se utilizaron los resultados de ensayos de campo de perforaciones de la zona, cuyas cantidades se indican en la Tabla 2. Adicionalmente, se emplearon los resultados del ensayo CPTu PZSL1-8.

Tabla 5. Cantidad de ensayos de campo de las perforaciones de la zona

Perforación	Profundidad explorada (m)	SPT	VST
SL1-25	50,0	17	17
SL1-26	47,1	12	4
SL1-27	48,3	13	0
SL1-28	50,0	18	1
TOTAL	-	60	22

Fuente: Elaboración propia

Respecto al ensayo de laboratorio ejecutados, en la Tabla 3 se presentan por separado un resumen de las cantidades ejecutadas para la perforación del sitio PT-PLMB-PC-07 y las correspondientes a los sondeos de la zona.

Tabla 6. *Cantidad de ensayos ejecutados*

Perforación	w	LL	LP	G	A	F	γ	Cc	Gs	q_u
PT-PLMB-PC-07	24	24	24	35	35	35	36	2	2	3
Perforaciones de la zona	48	36	36	48	48	48	21	7	-	19

Fuente: Elaboración propia

Los símbolos de los ensayos indicados en la Tabla 3 corresponden respectivamente a los siguientes ensayos: humedad natural, límite líquido, límite plástico, contenido de gravas, contenido de arenas, contenido de finos, peso unitario, consolidación, gravedad específica y compresión inconfiada.

En el Anexo 2 Se presenta el registro de perforación y en el Anexo 3 se presenta el resumen de ensayos de laboratorio.

1.3 ANÁLISIS DE VARIABILIDAD Y SELECCIÓN DE PARÁMETROS

En primer lugar, se definió el perfil estratigráfico para la conformación de un modelo geológico – geotécnico, para ello, se tuvo en cuenta el sistema de clasificación de suelos USCS y su variación en profundidad. Se agruparon los suelos con igual comportamiento ante la aplicación de cargas, es decir en drenados y no drenados, teniendo cuenta el contenido de finos, el índice de plasticidad, el contenido de humeado y la posición del nivel

freático. En la Figura 7, se presentan los perfiles: granulométrico, de índice de plasticidad y de humedad

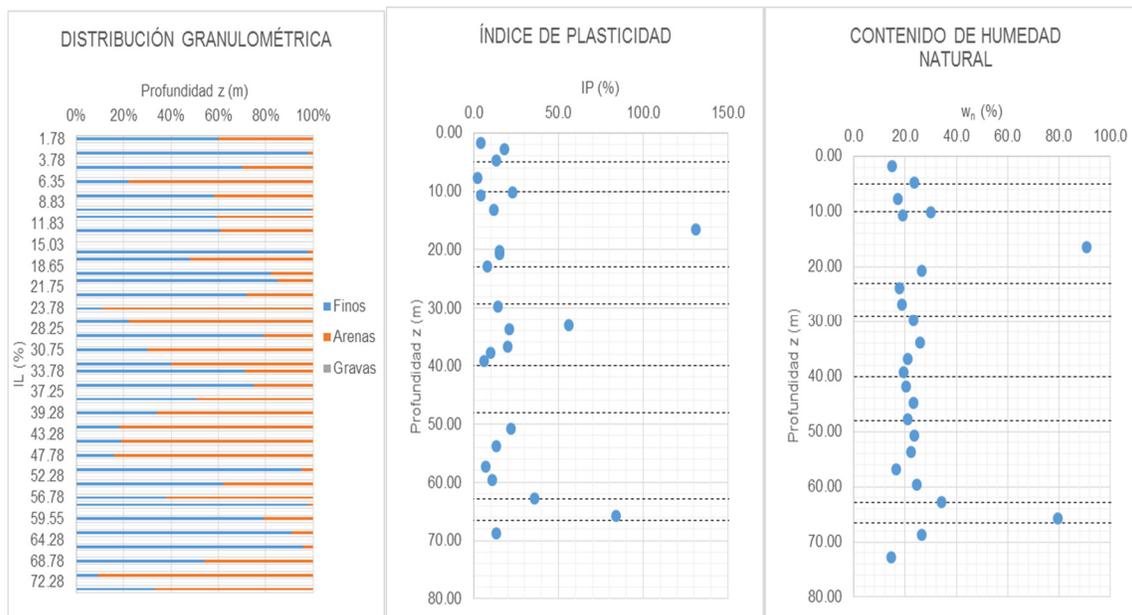


Figura 7. Perfil de granulometría, índice de plasticidad y contenido de humedad de la perforación PT-PLMB-PC-07.

Fuente: Elaboración propia.

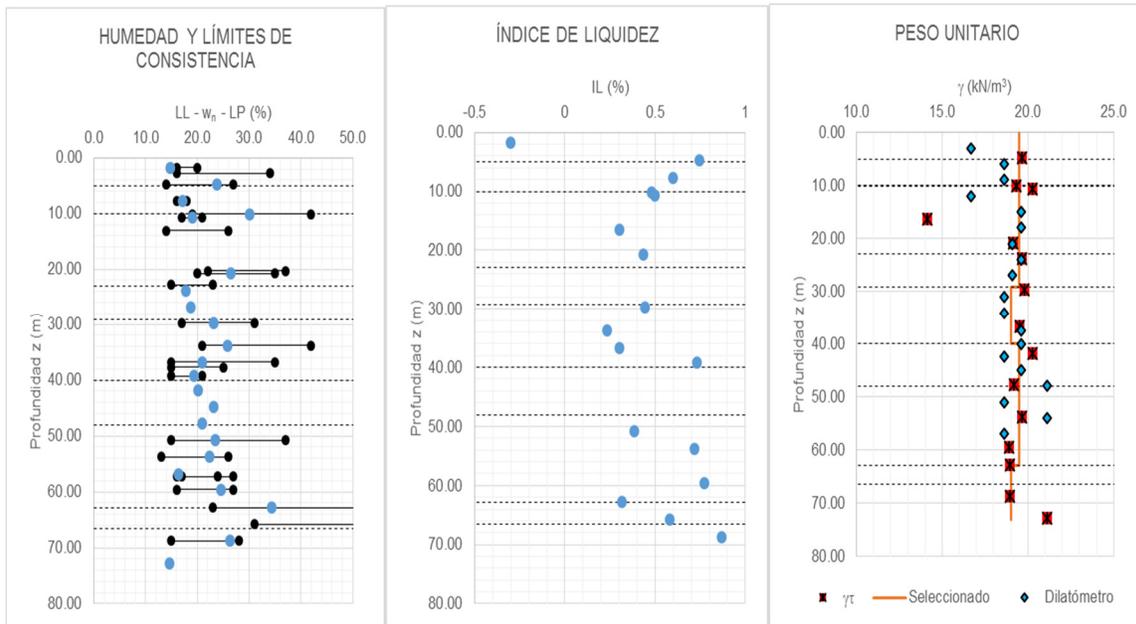


Figura 8. Perfil de humedades y límites, índice de liquidez y peso unitario de la perforación PT-PLMB-PC-07. **Fuente:** Elaboración propia

Respecto al comportamiento de los materiales finos con plasticidad se observó su distribución en la Carta de Plasticidad de Casagrande, ver **Figura 9**.

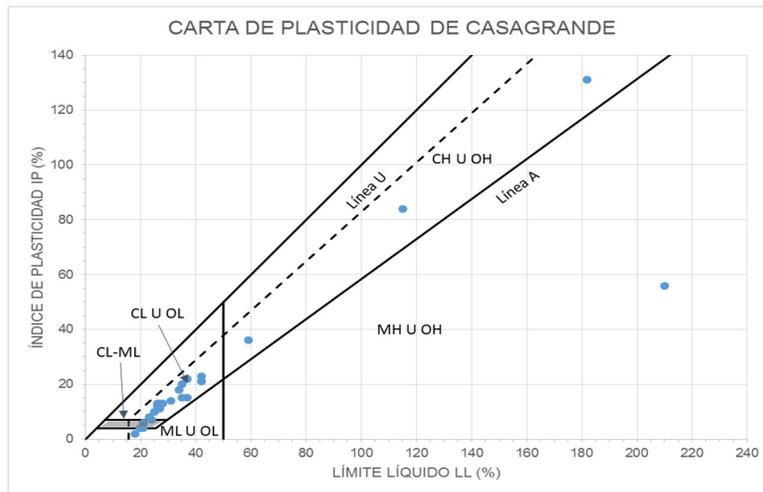


Figura 9. Carta de Plasticidad de Casagrande para todos los materiales de la perforación PT-PLMB-PC-07. **Fuente:** Elaboración propia.

La mayoría de los materiales cohesivos se clasificaron como arcillas de baja plasticidad CL, continúan materiales con doble clasificación de arcillas o limos de baja plasticidad CL-ML y muy pocos casos se clasificaron como arcillas o limos de alta plasticidad CH o MH. Los materiales dentro de este último grupo, con límites líquidos superiores a 100 y plasticidades superiores a 50, corresponden visualmente a turbas o materiales con alto contenido de materia orgánica, otra de las propiedades de estos materiales es su bajo peso unitario llegando a ser del orden de hasta 13 kN/m^3 y relativamente alto contenido de humedad. Sin embargo, las capas de suelos con estas características se presentaron en espesores delgados, en la mayoría de los casos inferiores a 1,0 m, por tal motivo no se generaron estratos de análisis particular para este tipo de materiales. Dicho esto, las diferencias entre materiales se separaron entre los estratos arenosos, los arcillosos y limosos saturados (por debajo del nivel freático (NF)), y los arcillosos y limosos desecados (por encima del NF).

Para determinar las zonas saturadas de las no saturadas se elaboró el análisis de la posición del nivel freático mediante la identificación de la variación de la posición del nivel de agua dentro de la perforación, como se presenta en la Tabla 4.

Tabla 7. Posición del nivel de agua de perforación de la PT-PLMB-PC-07

Fecha	Profundidad de excavación		Lectura de nivel freático	
	Al inicio de la jornada (m)	Al final de la jornada (m)	Al inicio de la jornada (m)	Al final de la jornada (m)
27/10/2018	0.0	8.0	-	0.00
29/10/2018	8.0	21.0	8.00	5.00
30/10/2018	21.0	30.0	1.00	0.00
31/10/2018	30.0	37.0	15.00	6.00
01/11/2018	37.0	45.0	10.00	7.00
02/11/2018	45.0	63.0	10.00	0.00
03/11/2018	63.0	68.5	0.00	-
04/11/2018	68.5	73.0	0.00	-

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 10** y **Figura 11**, se presenta la variación de la posición del nivel de agua al inicio y final de la jornada de perforación.

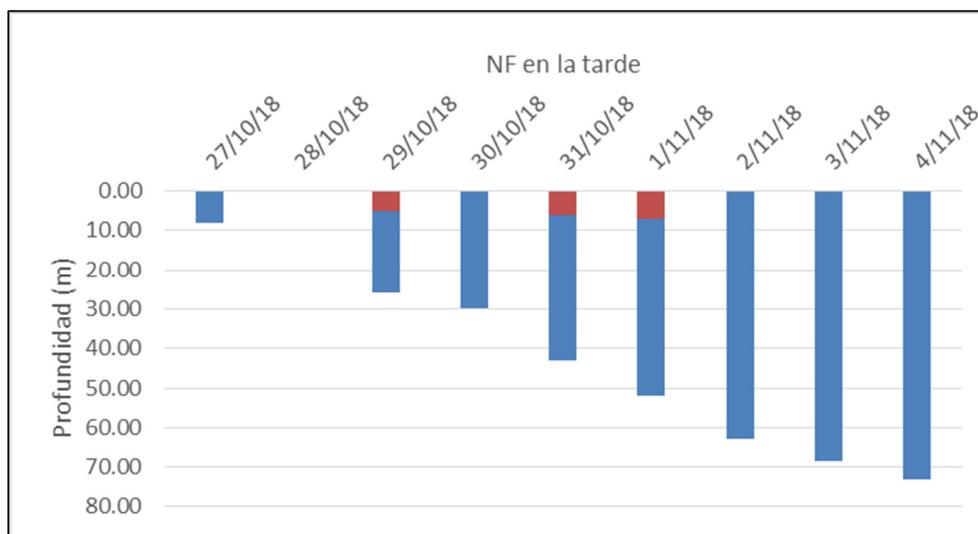


Figura 10. Posición del nivel de agua de perforación al final de la jornada

Fuente: Elaboración propia.

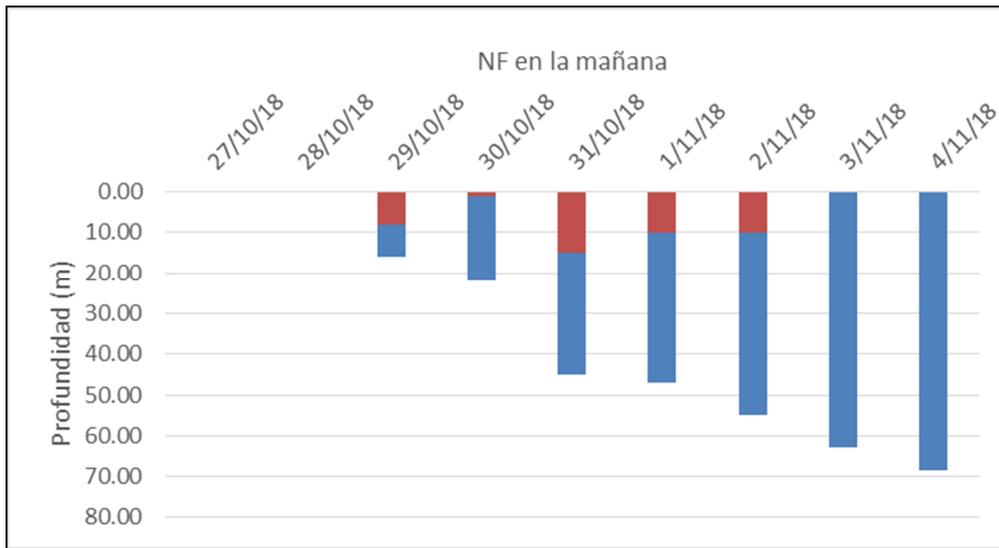


Figura 11. Posición del nivel de agua de perforación al inicio de la jornada.

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que la posición del nivel de agua al final de la jornada de perforación se encuentra afectada por la inyección constante de agua durante el día, su posición no indica directamente la posición del nivel freático. Sin embargo, las variaciones que ocurrieron en la lectura de la mañana del día siguiente indicaron la existencia de flujo hacia o desde la perforación. Con base en ello, se observa por ejemplo que en la tarde del 30-10 el nivel de agua se dejó hasta la superficie y a la mañana siguiente 31-10 el nivel había descendido hasta 15 m, siendo esta la condición con mayor abatimiento. Para análisis similares en los demás días, resulta que la moda estadística se encuentra en torno de 10 m. Por otra parte, si se observa la gráfica de índice de liquidez en la **Figura 8**, se observa que desde la superficie hasta los 10 m de profundidad existe una declinación para luego tener valores que aumentan gradualmente en profundidad.

Con base en lo indicado anteriormente, se definió un perfil estratigráfico como se presenta en la Tabla 6.

Tabla 8. *Perfil estratigráfico de la perforación PT-PLMB-PC-07*

Inicio (m)	Fin (m)	Descripción
0,00	5,00	Arcillas de baja plasticidad, arenosas, no saturadas, color café. Superficialmente se identifica estructura de pavimento y materiales de relleno antrópico.
5,00	10,00	Arenas limosas y limos de baja plasticidad de coloración café rojiza, no saturadas, medio densas.
10,00	23,00	Arcillas de baja plasticidad con algo de arenas, saturadas, coloración café medio, consistencia medio firme.
23,00	29,20	Arenas pobremente gradadas y limosas, sin plasticidad, saturadas, medio densas a densas.
29,20	40,00	Arcillas de baja plasticidad con algunas intercalaciones de arenas limosas y arenas arcillosas, se presenta un lente de turba de 32,5 a 33,5 m.
40,00	48,00	Arenas limosas, sin plasticidad, medio densas.
48,00	62,90	Arcillas de baja plasticidad con un lente arenoso, muy firme.
62,90	66,50	Arcillas de alta plasticidad con pocas arenas, con contenido de materia orgánica, coloración café oscuro.
66,50	70,00	Arcilla arenosa de baja plasticidad, café medio, muy firme.

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 12**, se presentan los perfiles de resistencia en profundidad para materiales de comportamiento cohesivo.

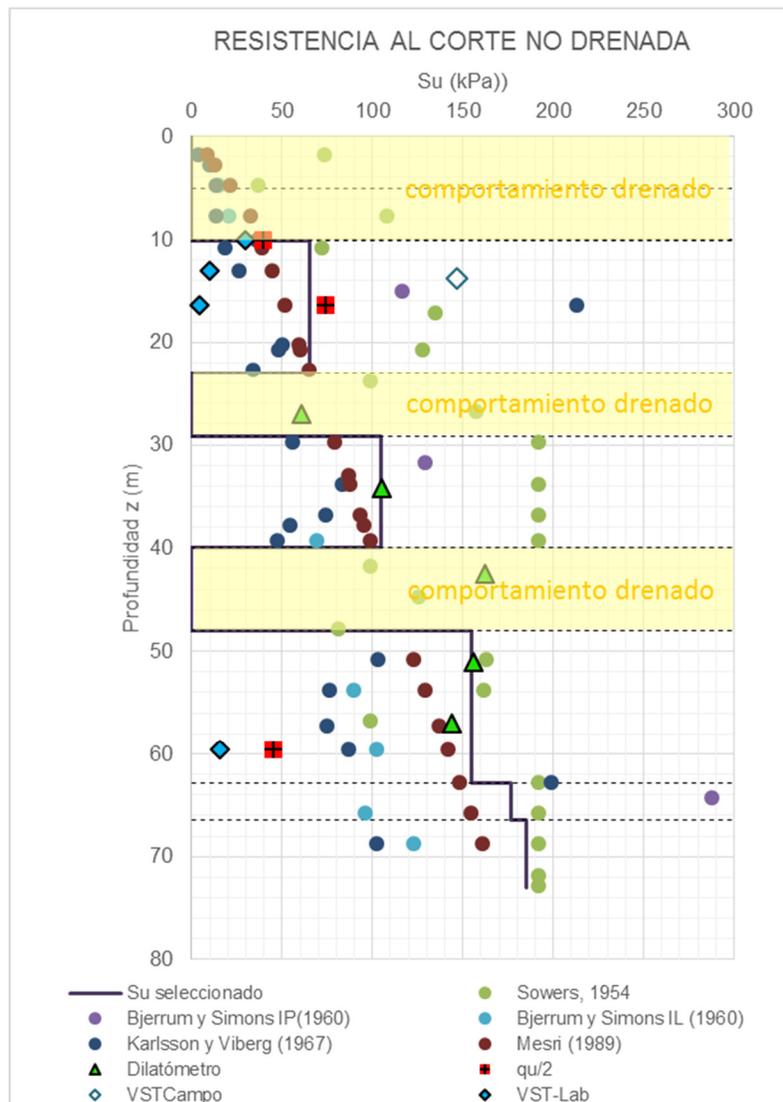


Figura 12. Perfil de resistencia al corte no drenada de la perforación PT-PLMB-PC-07

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 12**, se observan valores de “ S_u ” provenientes de diferentes fuentes de información, ensayos de laboratorio, ensayos de campo y correlaciones a partir de ensayos de campo y de clasificación. Para la selección del parámetro correspondiente al estrato se realizó una ponderación entre los parámetros obtenidos de forma directa y los obtenidos de forma indirecta (correlaciones). La forma de ponderar los parámetros se hizo con base en

los valores de las desviaciones estándar, de acuerdo con la metodología planteada por Loher (2017) indicada en la siguiente ecuación.

$$\bar{y} = \frac{\bar{y}_d \cdot \sigma_s^2 + \bar{y}_s \cdot \sigma_d^2}{\sigma_d^2 + \sigma_s^2} \quad (13)$$

Siendo:

\bar{y}	Parámetro de diseño
\bar{y}_d	Parámetro de diseño promedio de los valores de información directa
\bar{y}_s	Parámetro de diseño promedio de los valores de información indirecta
σ_d^2	Desviación estándar de los parámetros directos
σ_s^2	Desviación estándar de los parámetros indirectos

En todo caso, el método estadístico no sustituyó el criterio de selección final, en el que si bien, el criterio estadístico jugó un papel importante, también se tuvieron en cuenta criterios adicionales de comportamiento de materiales, como por ejemplo que los parámetros de resistencia deben corresponder a una condición normalmente o sobre consolidada, pero no sub consolidada. De esta forma, se eliminan sesgos debidos a ensayos sobre materiales alterados que puedan desplazar el criterio de selección de valores más aproximados a la realidad.

En la **Tabla 9**, se presentan los cálculos del análisis estadístico de la selección del parámetro de resistencia al corte no drenado. No obstante, en la columna final se encuentra el parámetro seleccionado para análisis en el que se tuvieron bajo consideración factores adicionales no ponderables directamente, como lo es el grado de validez de cada ensayo en cada caso.

Tabla 9. *Análisis estadístico para la selección del parámetro de resistencia al corte no drenado*

In.	Fin	S _u direct	σ directo	COV directo	COV modelo	S _u indirecto	σ indirect	COV indirecto	COV modelo	S _u estad	S _u selec
m	m	kPa	kPa	-	-	kPa	kPa	-	-	kPa	kPa
0	5										
5	10										
10	23	59	67	1.1	0.28	134	235	1.8	0.08	64	65
23	29.2										
29.2	40	105				183	176	1.0	0.04	105	105
40	48										
48	62.9	90	70	0.8	0.19	211	205	1.0	0.05	103	155
62.9	66.5										
66.5	73					227	121	0.5	0.11	227	177
						199	109	0.5	0.08	199	185

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de materiales de comportamiento drenado el parámetro de diseño seleccionado fue el de N₆₀. En la **Figura 13**, se presenta el perfil de variación en profundidad y el valor seleccionado.

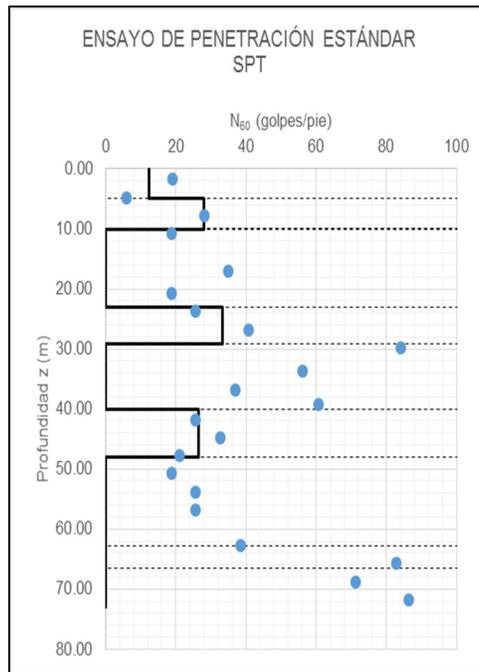


Figura 13. Perfil de valores de N_{60} de los materiales drenados en la perforación PT-PLMB-PC-07.

Fuente: Elaboración propia.

Dado que el valor de N_{60} se obtiene directamente a partir del ensayo de penetración estándar, no se tuvieron en cuenta correlaciones (como por ejemplo con el SPT). Por tal motivo, el valor seleccionado corresponde aproximadamente al valor promedio de los datos leídos en el estrato.

En cuanto a parámetros de deformación, se seleccionó el módulo de elasticidad. Se calculó por medio de correlaciones, en el caso de los materiales cohesivos con base en el S_u seleccionado, OCR (se asumió una condición ligeramente sobre consolidada) e índice de plasticidad IP del estrato. Para los materiales granulares, se tomaron las correlaciones de Bowles (1997) con base en N_{55} , adicionalmente, se calculó el OCR (con una correlación

basada en N_{60}) y se corrigió el módulo de elasticidad para suelo sobre consolidado. En la **Figura 14**, se presenta el perfil del módulo de elasticidad.

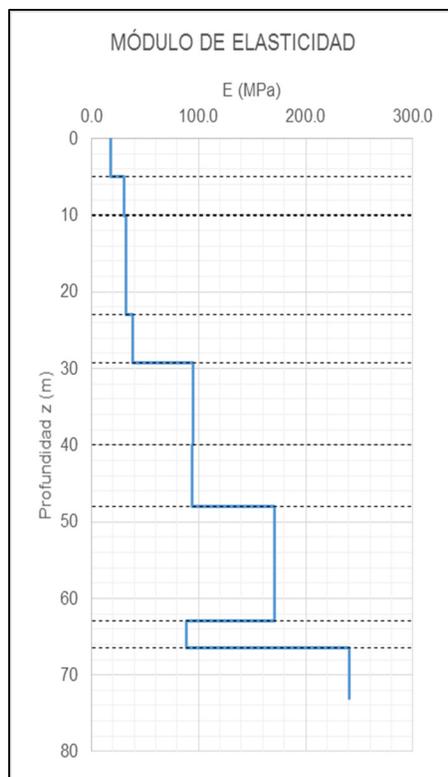


Figura 14. Perfil de módulo de elasticidad para la perforación PT-PLMB-PC-07

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en la **Tabla 10**, se presenta el resumen de parámetros seleccionados empleados en los análisis subsecuentes.

Tabla 10. *Parámetros geotécnicos de resistencia y deformación seleccionados para la perforación PT-PLMB-PC-07*

Inicio (m)	Fin (m)	Espesor (m)	γ (kN/m³)	S_u (kPa)	N_{60} (golpes/pie)	E_u (MPa)
0.00	5.00	5.00	19.5		12	17
5.00	10.14	5.14	19.5		28	30

Inicio	Fin	Espesor	γ	S_u	N_{60}	E_u
(m)	(m)	(m)	(kN/m³)	(kPa)	(golpes/pie)	(MPa)
10.14	23.00	12.86	19.5	65		33
23.00	29.17	6.17	19.5		33	38
29.17	40.00	10.83	19.0	105		95
40.00	48.00	8.00	19.5		26	94
48.00	62.93	14.93	19.5	155		171
62.93	66.48	3.55	19.0	177		89
66.48	73.00	6.52	19.0	185		241

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo II

INSTRUMENTACIÓN DEL PILOTE DE PRUEBA

En este capítulo se presenta la instrumentación empleada en la prueba, sus características y variables de medición.

2.1 Localización en profundidad y en sección de la instrumentación del pilote

En la **Figura 15**, se presenta la localización en perfil de las dos celdas de carga (O-Cell), los seis niveles de galgas extensiométricas de cuerda vibrante (Strain Gages VW), los transductores de desplazamiento de hilo vibrátil (LVWDT) entre las platinas de las celdas, y los extensómetros de barra de compresión embebidos (Embedded Compression Telltales ECT) en el tramo inferior del pilote, por último los dos extensómetros de barra de compresión (Compression Telltales) para cada platina superior de montaje de celda, los cuales sobresalen en la cabeza del pilote.

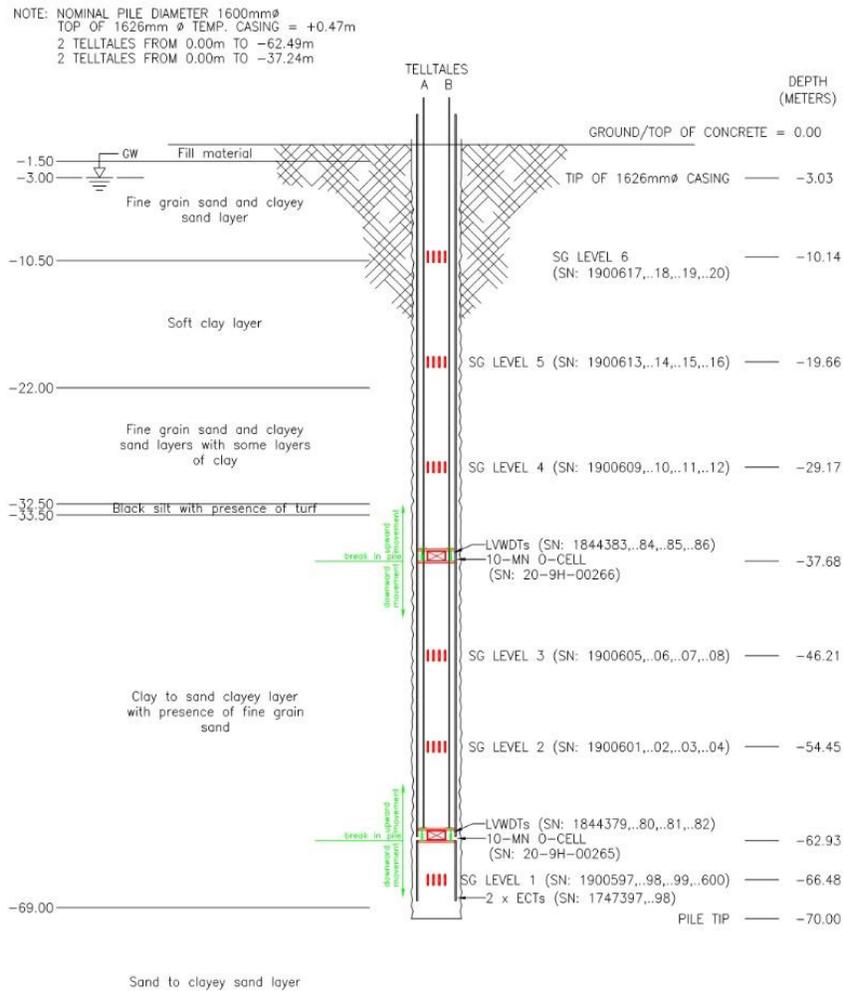


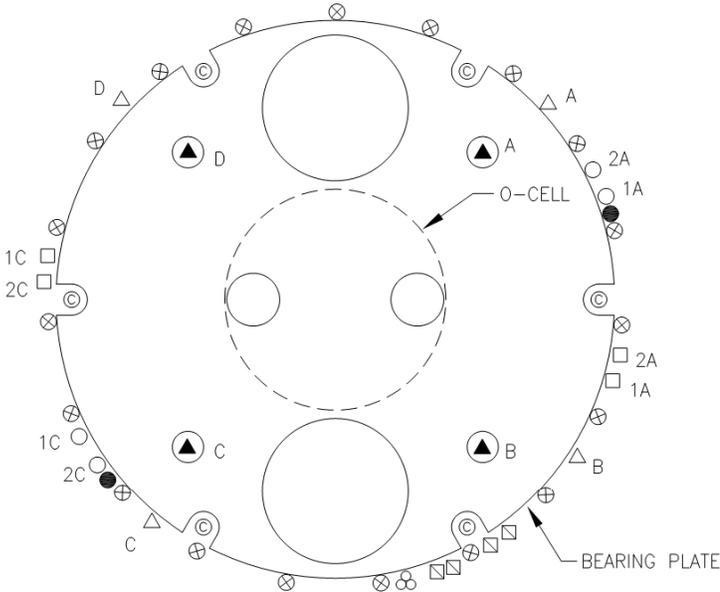
Figura 15. Localización en perfil de la instrumentación dentro del pilote.

Fuente: Informe de Resultados Pruebas de Carga ETPLMB (Consortio METROBOG, 2019).

De igual manera, en la **Figura 16**, se indica la localización de la instrumentación, esta vez en su proyección en sección transversal. Adicional a la instrumentación indicada anteriormente se indica la ubicación de las tuberías de ventilación, tuberías Crosshole CSL, mangueras hidráulicas, barras de refuerzo y cables.

Respecto a las tuberías de ventilación, se indica que tienen como función conectar la presión atmosférica con los puntos de ruptura del pilote a profundidad, con lo cual se evita

la generación de fuerzas de succión. Adicionalmente, en el caso de pilotes que continúan operando posterior a la prueba de carga, sirve para la inyección de lechada y así poder cerrar grietas.



- LEGEND:**
- △ STRAIN GAGE
 - ▲ LINEAR VIBRATING WIRE
 - DISPLACEMENT TRANSDUCER (LVWDT)
 - COMPRESSION TELLTALE
 - ⊗ VENT PIPE
 - ⊕ HYDRAULIC HOSES
 - ⊗ REBAR
 - ⊗ CABLE BUNDLE
 - EMBEDDED COMPRESSION TELLTALE (ECT)
 - ◎ CSL PIPE

Figura 16. Instrumentación del pilote proyectada sobre la platina del montaje de la celda de carga.

Fuente: Informe de Resultados Pruebas de Carga ETPLMB (Consortio METROBOG, 2019)

2.2 Celda Osterberg

La celda Osterberg es un gato hidráulico, cuya geometría externa es un cilindro. Su mecanismo de funcionamiento se encuentra patentado (número de patente US5576494A de Estados Unidos) y actualmente la ejecución de las pruebas de carga empleando este tipo de instrumento es llevado a cabo por Loadtest.

A medida que se acciona la celda mediante dos mangueras hidráulicas de alta resistencia con doble cubierta de acero trenzado (máxima presión operativa dinámica de 6500 psi; presión de rotura de 26000 psi), la celda comienza a cargar el pilote en dos direcciones, generando una discontinuidad transversal en el pilote (falla en la base de la celda) y movilizándolo el tramo superior hacia arriba (desarrollando la resistencia por fricción del fuste) y el tramo inferior hacia abajo (desarrollando la capacidad por punta del elemento y la resistencia por fuste, si corresponde). Cada celda incluye cordones de soldadura de fábrica en su parte inferior que juntan las paredes de la celda con una platina de base

Las celdas empleadas para la prueba de carga 07, tenían un diámetro de 0,54 m, un margen de desplazamiento máximo de 0,23 m y carga máxima alcanzable por la celda 20-9H-00265 de 12569 kN para un desplazamiento de 60 mm. La capacidad máxima para la celda 20-9H-00266 era de 12688 kN para un desplazamiento de 61 mm.

Las celdas se sueldan a dos platinas de acero, superior e inferior, de 5 cm de espesor, las cuales cuentan con las aberturas necesarias para el paso de la instrumentación, así como para el acceso de la tubería Tremie. En la Fotografía 6, se identifica una Celda Osterberg



Fotografía 6. Batería de Celdas Osterberg Soldadas a las platinas superior e inferior.

Fuente: III Curso de Exploración y Caracterización del Subsuelo & Diseño de Excavaciones - Pruebas de Carga con Celdas Osterberg – Parte I (2019).

2.3 Transductores de desplazamiento de cuerda vibrante (LVWDT)

Son instrumentos empleados para monitorear desplazamientos lineales en diferentes puntos del pilote. Para el caso del pilote de la prueba de carga se emplearon cuatro LVWDT entre las platinas superiores e inferiores para cada montaje de celdas, con lo cual fue posible medir la expansión o apertura de las celdas. Se localizaron dos transductores de desplazamiento embebidos cerca de la punta del pilote y conectados a extensómetros de barra de tubería de (1/2”) que se extienden hasta la platina inferior del montaje de la celda inferior, con ello, estos transductores miden la compresión del tramo entre la punta del pilote y el montaje de la celda inferior. Finalmente, la compresión del pilote de los tramos superiores a cada celda se midió por medio del desplazamiento relativo entre el nivel de la platina superior de cualquiera de las celdas y la cabeza del pilote (se emplearon 2 transductores en cada caso), con ello también fue posible determinar la posición de la platina superior de las celdas ante cada movimiento de expansión o cierre de las celdas.

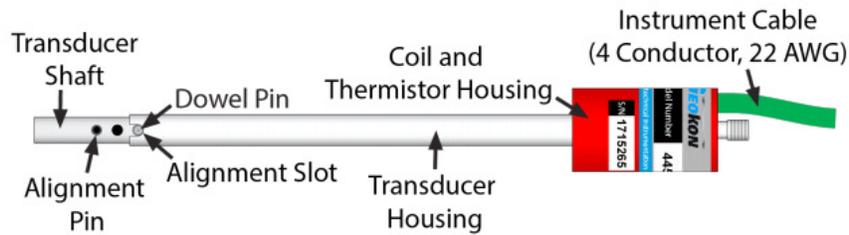


Figure 1 - Model 4450 Displacement Transducer

Figura 17. Transductor de desplazamiento por hilo vibrátil LVWDT

Fuente: Instruction Manual. Model 4450 vw displacement transducer (Geokon, 2019).

2.4 Galgas extensiométricas de cuerda vibrante (Strain gages VW)

Son deformímetros que vienen instalados en una barra corrugada #4 denominada “barra hermana” (“sister bar”) con lo cual facilitó su amarre al refuerzo del pilote. Se instalaron alrededor de 10 cm separadas de una de las barras longitudinales de refuerzo del pilote. Se instalaron seis niveles de Strain Gages, en cada nivel se dispusieron 4 galgas diametralmente opuestas. En la Fotografía 7, se observa el Strain Gage de barra hermana.



Fotografía 7. Galga extensiométrica de cuerda vibrante

Fuente: III Curso de Exploración y Caracterización del Subsuelo & Diseño de Excavaciones - Pruebas de Carga con Celdas Osterberg – Parte I (2019)

2.5 Extensómetro de barra de compresión (Compression Telltale)

Es un sistema conformado por una tubería de acero de $\frac{1}{2}$ “con diámetro interno de $\frac{1}{4}$ ” acoplada cada 6 m de longitud, tiene como función servir de camisa para una barra de acero maciza que se conecta en la cabeza del pilote a un transductor de desplazamiento de cuerda vibrante LVWDT. Se instalaron dos Compression Telltales conectados a las platinas superiores de cada celda. Adicionalmente, se instalaron dos extensómetros de barra de compresión embebidos en el tramo inferior que va desde la celda hasta la punta del pilote (Embedded Compression Telltales). En la Fotografía 13 se observa la instalación y momento previo a la conexión de los Compression telltales a su correspondiente LVWDT.



Fotografía 8. Extensómetro de barra de compresión (Compression Telltales).

Fuente: III Curso de Exploración y Caracterización del Subsuelo & Diseño de Excavaciones - Pruebas de Carga con Celdas Osterberg – Parte I (2019)

Capítulo III

ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DEL PILOTE

En este capítulo se presentan análisis de las desviaciones de aspectos geométricos y de propiedades del concreto respecto a las estimaciones planteadas durante el diseño de la prueba.

Se aclara que el diseño de la prueba hizo parte de los estudios presentados por el Consorcio MetroBog ante la Financiera de Desarrollo Nacional FDN en 2019, por lo tanto, el diseño de la prueba no fue parte de los objetivos y alcances del presente documento.

La geometría real del pilote presentó diferencias respecto a la teórica debido a la influencia de variables constructivas, tales como: la expansión del concreto dada por los empujes que realiza sobre las paredes de la excavación; y la verticalidad de la excavación aportada por el equipo de perforación.

Para la elaboración de dichos análisis se tuvieron en cuenta las mediciones realizadas mediante SoniCaliper y los registros de vaciado de concreto durante la construcción.

De otra parte, se analizó la resistencia a la compresión del concreto y el módulo de elasticidad correspondiente con base en los resultados de los ensayos de compresión. Adicionalmente, se tuvo en cuenta el ensayo de Crosshole con el cual se estimó la variación en la calidad y homogeneidad del concreto en profundidad.

En la **Tabla 11**, se presentan algunos hitos de construcción relevantes para los análisis presentados a continuación.

Tabla 11. *Hitos de construcción relevantes para los análisis presentados a continuación.*

Fecha	Actividad
18 – febrero – 2019	Inicio de excavación del pilote
22 – febrero – 2019	Finalización de la excavación y ensayo SoniCaliper
23 – febrero – 2019	Fundición del concreto
01 – marzo – 2019	Ensayos a compresión de las probetas de concreto
02 – marzo – 2019	Ensayo Crosshole
05 – marzo – 2019	Ejecución de prueba de carga con celdas Osterberg

Fuente: Datos tomados del estudio Informe de Resultados Pruebas de Carga ETPLMB (Consortio METROBOG, 2019).

3.1 Análisis del diámetro del pilote

El diámetro teórico del pilote se planteó igual a 1,60 m. No obstante, debido a aspectos constructivos y del sitio tales como las propiedades del lodo de perforación, la presencia de estratos no cohesivos, el tiempo de ejecución de los trabajos de excavación y de fundición del concreto, y las expansiones debido a los empujes del concreto ocasionaron una desviación del diámetro materializado respecto al diámetro teórico.

Análisis con SoniCaliper

Cómo parte de los trabajos previos a la fundición del concreto, se realizó el ensayo con sonar mediante la introducción de una sonda denominada SoniCaliper, con la cual es

posible realizar mediciones de las secciones transversales de la excavación cada 60 cm de profundidad. Las mediciones con la sonda son calibradas con un diámetro conocido. En este caso, el diámetro conocido corresponde a la zona donde se tenía una camisa metálica temporal. Dentro de la calibración correspondiente se tiene en cuenta la densidad del polímero y con base en ello se estima la velocidad de onda a través del medio, con lo cual posteriormente, al realizar las mediciones de tiempo de llegada de onda a las paredes se puede deducir la distancia correspondiente. Como la posición de la sonda no se desplaza durante la prueba, las mediciones con el sonar se realizan respecto a un punto fijo de referencia el cual en superficie corresponde al centro de la sección circular del pilote.

En la **Figura 18**, se presenta una de las secciones capturadas mediante las señales leídas por la sonda.

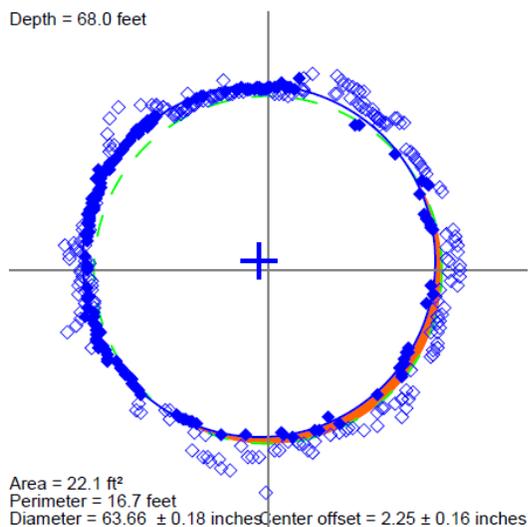


Figura 18. Datos capturados con SoniCaliper en una sección a una profundidad de 68 pies.

Fuente: Informe de Resultados Pruebas de Carga ETPLMB (Consortio METROBOG, 2019).

Algunos de los puntos leídos son descartados para incluirlos en los modelos de regresión empleados para estimar la forma y diámetro de la sección.

En la **Figura 19**, se presentan un perfil en profundidad de los radios del pilote a partir del procesamiento realizado por Loadtest del ensayo SoniCaliper, así como el radio teórico del diseño de la prueba. Adicionalmente, se establecieron como referencia las posiciones de las celdas de carga y la profundidad hasta la cual se introdujo la camisa metálica.

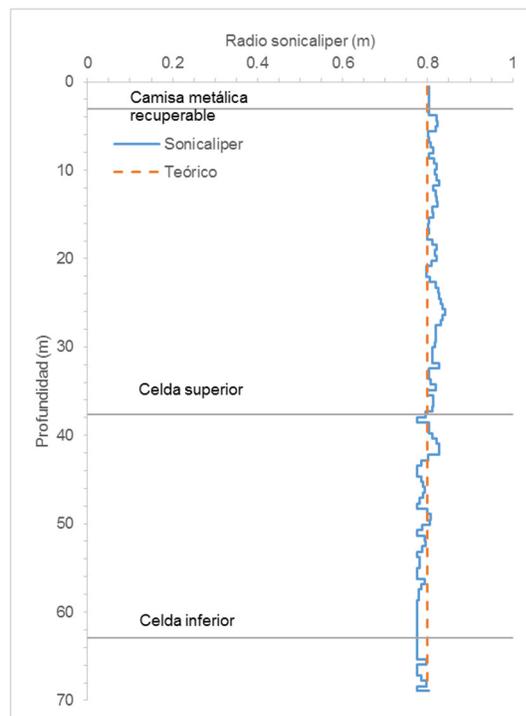


Figura 19. Perfil de radios del pilote en profundidad a partir de las lecturas de SoniCaliper

Fuente: Elaboración propia a partir de las lecturas de SoniCaliper presentadas en el Informe de Resultados Pruebas de Carga ETPLMB (Consortio METROBOG, 2019)

Con base en los diámetros leídos por el SoniCaliper se construyó la curva de vaciado de concreto en profundidad y se comparó con correspondiente al diámetro teórico.

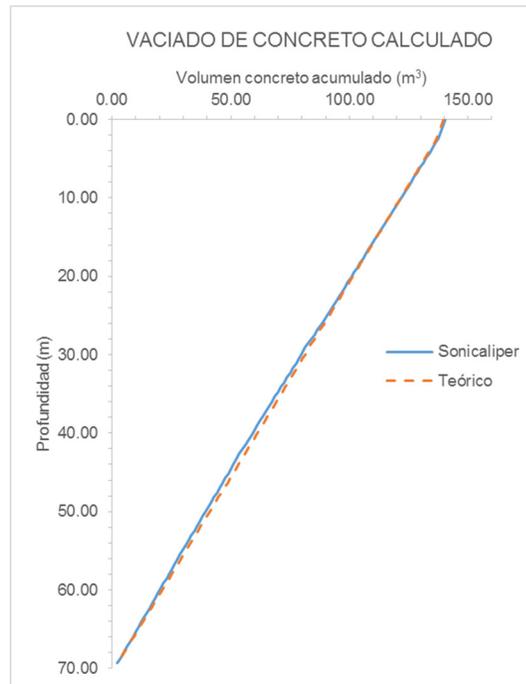


Figura 20. Curva de vaciado de concreto a partir de las lecturas de SoniCaliper

Fuente: elaboración propia a partir de las lecturas de SoniCaliper presentadas en el Informe de Resultados Pruebas de Carga ETPLMB (Consorcio METROBOG, 2019)

El volumen de concreto teórico acumulado hasta la superficie se calculó igual a $139,80 \text{ m}^3$, de otra parte, el volumen de concreto con base en las lecturas de SoniCaliper se proyectó igual a $140,42 \text{ m}^3$. Es decir, la diferencia porcentual entre los dos volúmenes es inferior a 1 %, lo cual indica un buen ajuste de acuerdo con el conocimiento empírico de los constructores cuyas estimaciones de expansiones del concreto pueden estar en el orden de 10%.

Análisis con registro de fundición del concreto

Durante las labores de fundición del concreto se llevan registros de los volúmenes vertidos en la excavación. El volumen de concreto se encuentra dimensionado por los equipos de transporte y mezclado del concreto (en adelante *mixer*).

Al momento de llegar al sitio, se hace un control del tiempo de llegada, la temperatura, el asentamiento con el ensayo del cono de Abrams siguiendo las especificaciones de la norma ASTM C 143 y se toman muestras en probetas para los posteriores ensayos de compresión del concreto.

Luego de cada vertimiento del contenido de concreto de una *mixer*, el cual es de 7 m³, se realiza la medición de la distancia restante entre el nivel alcanzado por el concreto y la superficie del terreno empleando una cadena metálica eslabonada. Esta forma de medición es de baja precisión, entre las razones que dificultan este tipo de medición se encuentra la incertidumbre en la detección del nivel del concreto sumergido en los lodos de excavación y ausencia de marcas de medición en la cadena. Una condición particular para el caso del pilote de prueba, consiste en que dado que primero se introdujo el refuerzo, al cual se encuentran instaladas las platinas y las baterías de celdas de carga, se presentan como una obstrucción para la medición con cadena. Por lo tanto, las mediciones de las elevaciones del

nivel de concreto presentan validez a partir del nivel de la celda superior hasta la cabeza del pilote.

En la **Figura 21**, se presenta la estimación de los diámetros en profundidad con base en las mediciones de volúmenes de concreto y alturas dadas en el registro de fundición.

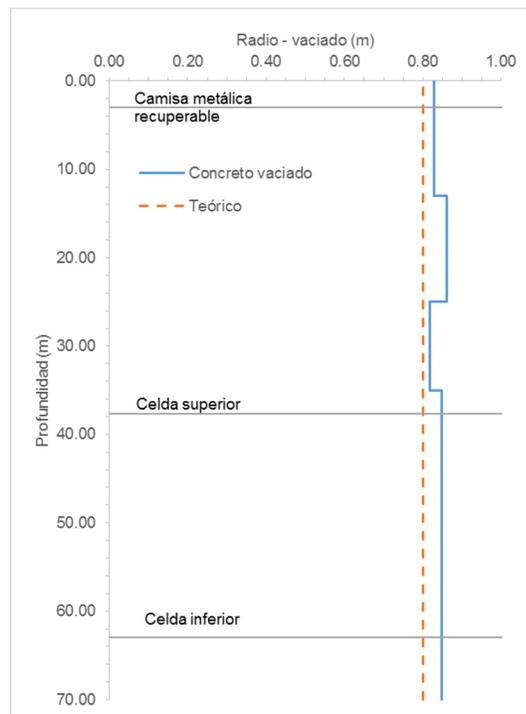


Figura 21. Perfil de radios del pilote en profundidad a partir del registro de fundición de pilote

Fuente: Elaboración propia a partir del registro de fundición del pilote presentado en el Informe de Resultados Pruebas de Carga ETPLMB (Consortio METROBOG, 2019)

A partir de los diámetros calculados fue posible construir la curva de vaciado del concreto, tal como se presenta en la **Figura 22**.

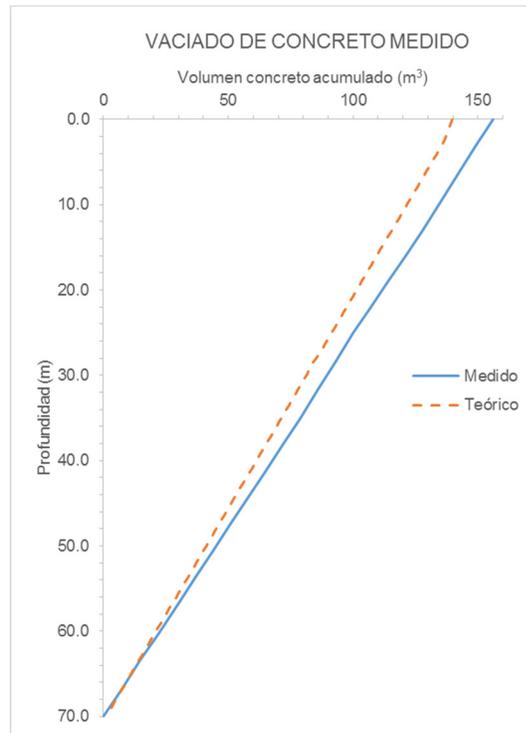


Figura 22. Curva de vaciado a partir del registro de fundición de pilote

Fuente: Elaboración propia a partir del registro de fundición del pilote presentado en el Informe de Resultados Pruebas de Carga ETPLMB (Consorcio METROBOG, 2019)

Como se puede apreciar de la **Figura 22**, el volumen total real del pilote fue de 156 m^3 , comparado con un volumen de $139,80 \text{ m}^3$ según la estimación teórica. Por lo tanto, la expansión real del concreto fue cercana al 12 %. Adicionalmente, el volumen medido durante la fundición del concreto fue superior al estimado por el ensayo SoniCaliper, por lo tanto, se presume que en el lapso de ejecución del ensayo de SoniCaliper y la fundición del pilote se produjo una ampliación de los diámetros. Este resultado se debió en parte, a que el tiempo de exposición de la excavación abierta fue mayor a un día, es superior al tiempo promedio para un pilote de producción. Como medida de control de flujos de agua en estratos arenosos que pudieran erodar o lavar el material, se introdujeron en la excavación

lodos de estabilización, cuyos parámetros, cómo se presentan en la **Tabla 12**, fueron controlados en diferentes fases del proceso constructivo.

Tabla 12. *Ensayos realizados en los lodos de estabilización y parámetros típicos según recomendaciones constructivas*

Ensayo	Lodo nuevo	Lodo trabajado	Antes de hormigonar
Viscosidad Marsh (s)	60 – 120	60 – 120	50 – 120
Densidad (g/cm ³)	1,00 – 1,05	< 1,08	< 1,06
pH	9 – 12	9 – 12	9 – 12
Contenido de Arena (%)	-	< 2%	< 1%

Fuente: Informe de Resultados Pruebas de Carga ETPLMB (Consortio METROBOG, 2019)

Selección de los diámetros de análisis

Finalmente, para la selección de los diámetros de análisis de la prueba de carga se tuvieron en cuenta las dos fuentes de información indicadas anteriormente, entendiendo las limitaciones de cada una. En la **Figura 23** se presenta el perfil de diámetros en profundidad seleccionado contrastado con los medidos con SoniCaliper y con el registro de fundición, adicionalmente, se incluyó en la gráfica el porcentaje de arenas de los ensayos granulométricos ejecutados en la perforación ejecutada en el sitio PT-PLMB-PC-07 para facilitar la comparación de los sitios donde se presentó mayor expansión del concreto y el contenido de arenas.

Los diámetros seleccionados corresponden a tres secciones, entre la cabeza del pilote y la primera celda, entre celdas, y entre la celda inferior y la punta del pilote. Se tuvo en

cuenta el principio de conservación de masa, es decir la masa de concreto fundida con una densidad de 24 kN/m^3 , tuvo un volumen igual a 156 m^3 proveniente del análisis del registro de fundida. Sin embargo, en el registro de fundida no se pudo establecer las variaciones de diámetro entre la punta del pilote y el primer nivel de celdas, el cual, por otra parte, si se pudo determinar mediante SoniCaliper.

En este último análisis (SoniCaliper), se determinó que el diámetro promedio entre el tramo de la celda inferior a la punta del pilote era el menor de todo el perfil, no obstante, se fijó un diámetro mínimo igual $1,60 \text{ m}$ teniendo en cuenta que las condiciones de expansión son más favorables que las de contracción o estrangulamiento del pilote y por tanto, como mínimo se tendría un diámetro muy cercano al teórico. La favorabilidad de la expansión yace en la condición de presiones ejercidas por el concreto hacia las paredes de la excavación, por otra parte, de haber existido un estrangulamiento debido a acumulación de materiales arenosos en el fondo a causa de erosión interna, habría sido identificado en los controles del lodo de estabilización.

En la **Tabla 13**, se presentan los diámetros correspondientes a los diferentes tramos de pilote.

Tabla 13. Distribución de diámetros para tres tramos de pilote

Profundidad		Longitud tramo	Diámetro	Volumen
Inicio	Fin			
m	m	m	m	m ³
0,00	37,68	37,68	1,68	83
37,68	62,93	25,25	1,72	59
62,93	70,00	7,07	1,60	19
			TOTAL	156

Fuente: Elaboración propia

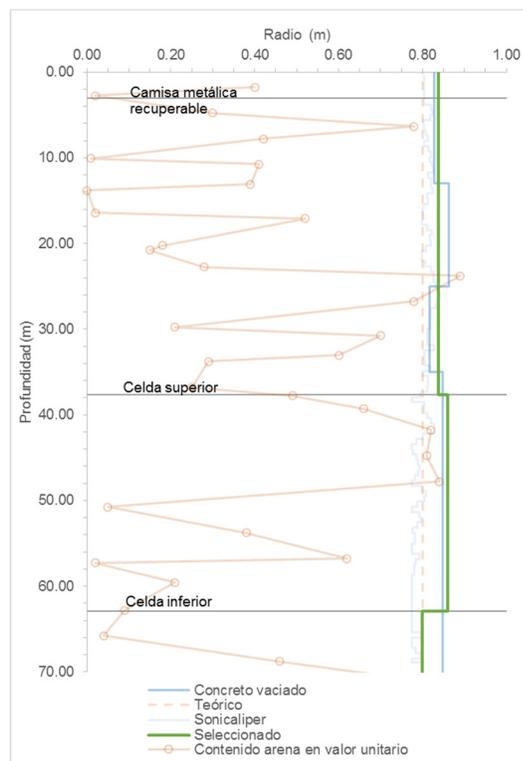


Figura 23. Perfil de radios de análisis seleccionados en profundidad para el pilote de prueba

Fuente: Elaboración propia

En el Anexo 7 se presentan los cálculos realizados para los análisis con SoniCaliper, con registro de fundición y el de selección de los diámetros.

3.1 Análisis verticalidad del pilote

Para el análisis de verticalidad se emplearon los datos de las lecturas con SoniCaliper, con el cual se establecieron las desviaciones del centro del pilote en profundidad, tal como se presenta en la **Figura 24**.

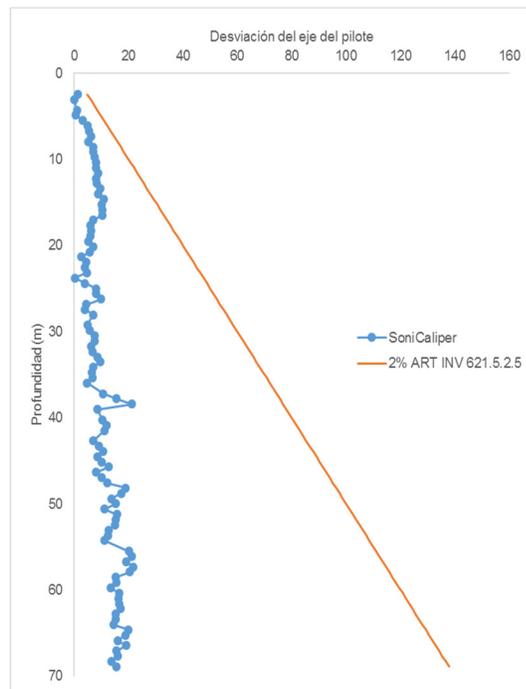


Figura 24. Perfil de verticalidad del eje del pilote

Fuente: Elaboración propia.

Según el artículo 621.5.2.5 en su inciso b) se indica que la tolerancia máxima de la desviación del pilote es de 2,0 cm cada 1,0 m, o dicho de otra forma de 2 %. De acuerdo con el código *General Specification for Civil Engineering Works* HKG (1992) para pilotes

construidos mar adentro se permite una desviación máxima de 1 en 25 o 4 % y para los pilotes construidos costa adentro 1 en 75 o 1,3%. Por tal motivo, de acuerdo con lo observado en la **Figura 24**, el pilote de la prueba de carga se encuentra dentro de los parámetros aceptables por las normatividades nacionales e internacionales.

Adicionalmente, se realizó un modelo tridimensional, a partir de la información del SoniCaliper con lo cual se pudo observar la forma del pilote y se presentó en la **Figura 25**. Las zonas en color verde corresponden a aquellas donde la superficie del pilote se encuentra dentro de la proyección del pilote teórico y en amarillo, las zonas donde el pilote construido sobresale respecto a lo proyectado teóricamente.

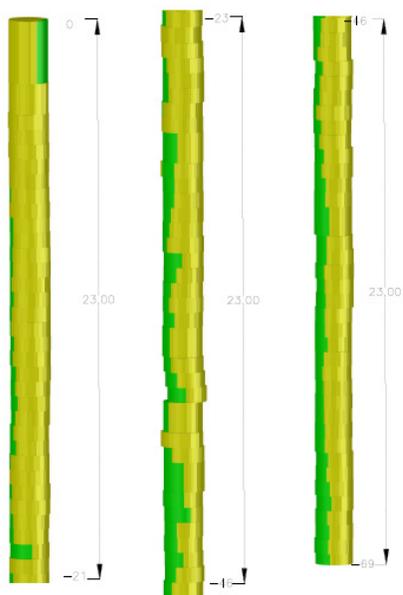


Figura 25. Modelo tridimensional de tres tramos del pilote de prueba

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Análisis de las propiedades del concreto

Como parte del diseño y especificaciones de la prueba, el concreto empleado en la construcción del pilote debía cumplir ciertos criterios de resistencia, fluidez, manejabilidad, permanencia y evitar la segregación en el proceso de vaciado. Para ello debía cumplir con las especificaciones indicadas en la **Tabla 14**.

Tabla 14. *Especificaciones para concreto de cimentaciones de acuerdo con la Norma Europea EN 1536 2010 y la norma ACI 336-1 2001.*

Descripción	Valor
Contenido de cemento para concreto sumergido	375 kg/m ³
Relación Agua/Cemento (A/C)	Tabla C.5.4.2.1-1 de CCP-14 Concreto tipo A – C
Contenido de finos	D < 0,125 mm (incluido cemento, cualquier adición y agregados) > 450 kg/m ³
Agregados	Inertes (no reactivos al álcali)
Temperatura máxima de la mezcla	< 32° C
Tasa de exudación	< 0,1 ml/min
Resistencia mínima a la compresión a 24h	1 MPa
Valor de filtración Bauer	< 20 ml

Fuente: Informe de Resultados Pruebas de Carga ETPLMB (Consortio METROBOG, 2019).

Para los análisis presentados posteriormente, uno de los insumos a tener en cuenta es la rigidez del pilote, para ello, se requiere el área de la sección y el módulo de elasticidad del concreto. Este último, se determinó a partir de una correlación planteada por la NSR-10 en el comentario CR8.5.1 con base en el resultado del ensayo a compresión del concreto f'_c , mediante la siguiente expresión.

$$E_p = 3900 \cdot \sqrt{f'_c}$$

Las unidades, tanto de f'_c como de E_p son MPa. Cabe mencionar, que dicha expresión es un valor aproximado e independiente del valor del peso unitario del concreto o del origen geológico de los agregados gruesos.

Durante el vaciado de concreto se extrajeron probetas para ser ensayadas por compresión cuyos resultados se presentan en la **Tabla 15**, así como los valores correspondientes de módulo de elasticidad calculados.

Tabla 15. *Resumen de resultados de ensayos a compresión del concreto y módulo de elasticidad.*

Muestra	Dimensión probeta cm	Fecha muestra	Asent. mm	Fecha rotura	Edad días	Resistencia Nominal Mpa	Resistencia ensayo Mpa	Ec Mpa NSR-10 (CR8.5.1)
01-G	10 x 20	22/02/19	229	01/03/19	7	27.4	51.5	27988
01-G	10 x 20	22/02/19	229	01/03/19	7	27.4	58.7	29880
02-G	10 x 20	22/02/19	229	01/03/19	7	27.4	54.5	28791
02-G	10 x 20	22/02/19	229	01/03/19	7	27.4	52.0	28123
03-G	10 x 20	22/02/19	229	01/03/19	7	27.4	44.2	25928
03-G	10 x 20	22/02/19	229	01/03/19	7	27.4	45.4	26278
Mínimo							44.2	25928
Promedio							51.1	27832
Máximo							58.7	29880
Desviación estándar							5.01	1370
Coefficiente de variación							0.10	0.05

Fuente: Elaboración propia a partir de información del Informe de Resultados Pruebas de Carga ETPLMB (Consortio METROBOG, 2019).

El valor mínimo de resistencia a la compresión f'_c indicado en el diseño de la prueba fue de 28 MPa a una edad de 7 días, el cual era el tiempo en el que se proyectó la ejecución de la prueba de carga. Como se puede observar de la **Tabla 15**, el valor promedio encontrado en el ensayo es muy superior al requerido con un valor de 51,1 MPa. Adicionalmente, el valor del coeficiente de variación también es bajo, lo cual indica un grado de confiabilidad favorable.

El valor del módulo de elasticidad promedio fue igual a 27832 MPa, con el cual, como se había indicado anteriormente, se calculó la rigidez del pilote en sus diferentes secciones, de acuerdo con lo presentado en la **Tabla 16**.

Tabla 16. Rigidez del concreto para tres tramos de pilote con base en una correlación con f'_c

Profundidad		Diámetro	Área	E_p	AE
Inicio	Fin				
m	m	m	m ²	MPa	MN
0.00	37.68	1.68	2.20	27832	61342
37.68	62.93	1.72	2.33	27832	64741
62.93	70.00	1.60	2.01	27832	55959

Fuente: Elaboración propia.

No obstante, los valores de rigidez fueron contrastados mediante el método de la rigidez tangencial expuesta en el documento *Tangent Modulus of Piles Determined from Strain Data* (Fellenius, 1989) y del documento *From Strain Measurements to Load in an Instrumented Pile* (Fellenius, 2001). Este método emplea los resultados de la prueba de carga, utilizando la relación entre un diferencial de carga y uno de deformaciones. La metodología indica que, al graficar los resultados, estos tienden aproximadamente de forma asintótica a la rigidez del pilote, es decir, a mayores deformaciones el suelo aporta cada vez menos rigidez y llevando este concepto al límite, cuando el suelo falla, el pilote termina trabajando como una columna y en ese momento la rigidez es aportada totalmente por el concreto. De la **Figura 26** a la **Figura 28** se presentan las gráficas empleadas en los análisis de rigidez tangencial, en la cual se incluyó como referencia el valor calculado a partir de la correlación de la NSR-10 y teniendo en cuenta la variación de diámetros por sección.

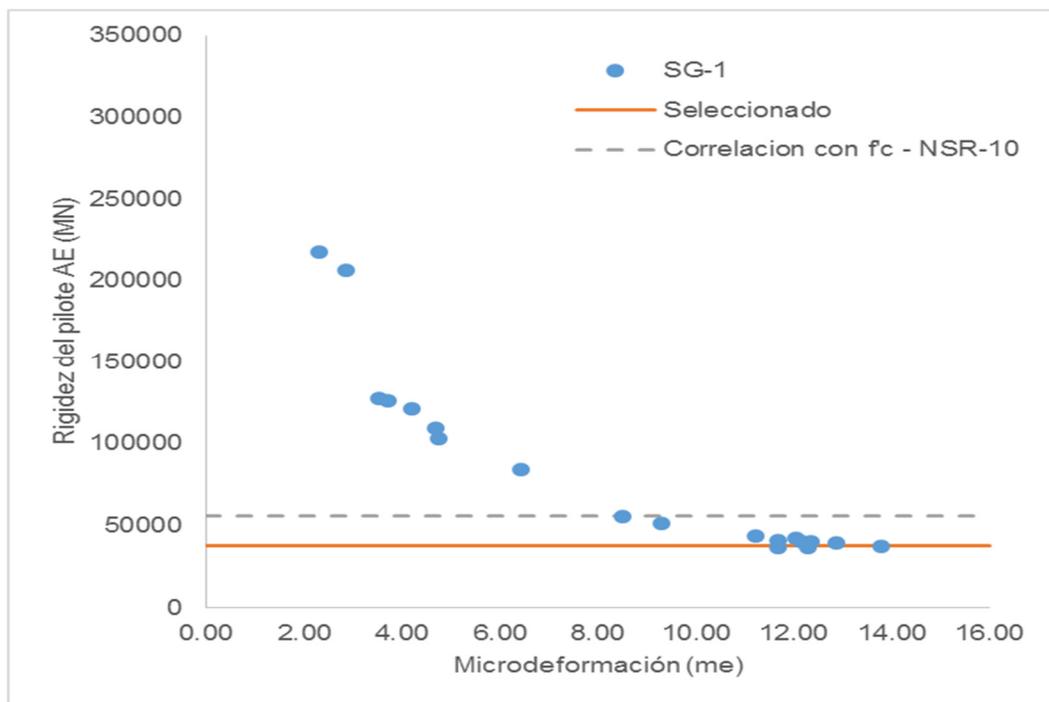


Figura 26. Rigidez tangencial del tramo de la celda inferior a la punta del pilote

Fuente: Elaboración propia

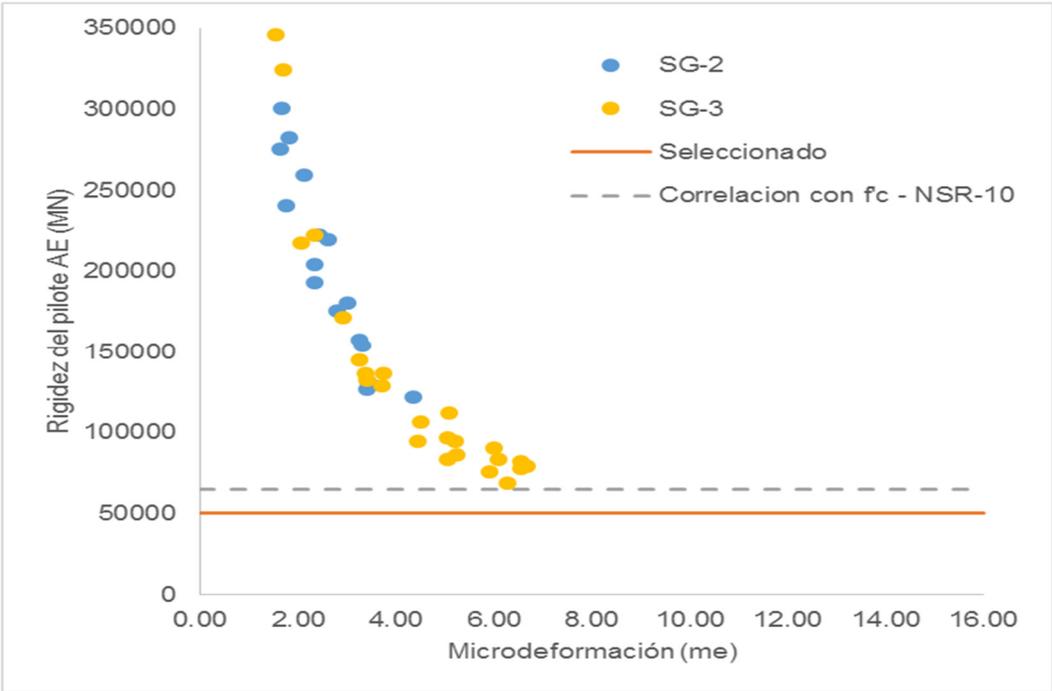


Figura 27. Rigidez tangencial del tramo entre celdas

Fuente: Elaboración propia

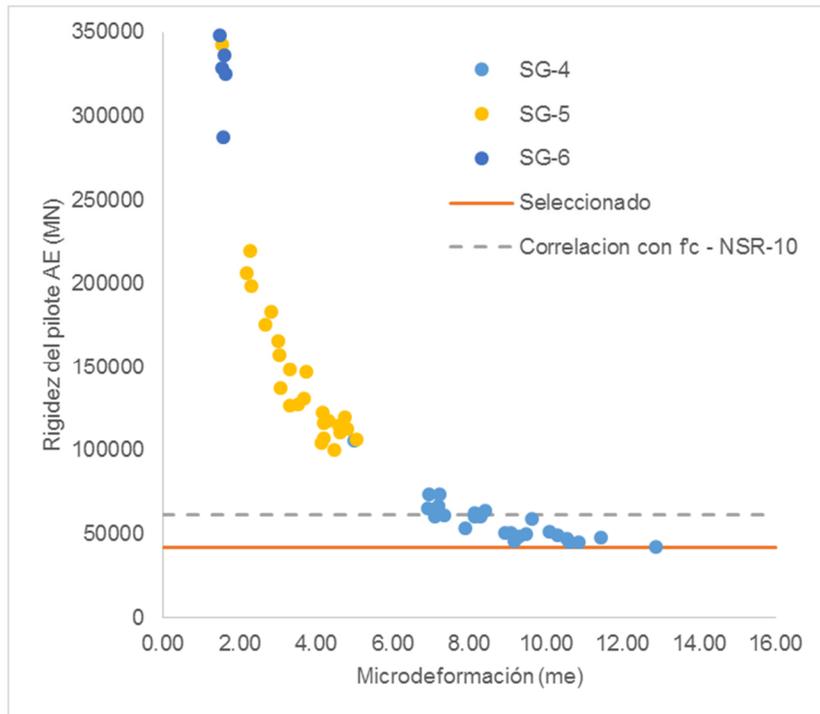


Figura 28. Rigidez tangencial del tramo entre la cabeza del pilote y la celda superior

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, los valores de rigidez seleccionado para los tramos: inferior, intermedio y superior fueron respectivamente: 38.000 MN, 50.000 MN y 42.000 MN.

Análisis de la calidad de pilote por medio del ensayo CSL

Cómo medida de verificación de la calidad y homogeneidad del concreto se realizó un ensayo Corrs Hole Sonic Logging (CSL). Para ello se dejaron embebidas seis tuberías metálicas a lo largo del pilote, amarradas al refuerzo longitudinal, con segmentos flexibles en las zonas de celdas para permitir el movimiento del pilote.

El ensayo Crosshole se llevó a cabo una semana después de fundido el pilote y consistió en el envío de señales sónicas de alta frecuencia de una tubería hacia las otras, haciendo lecturas a la misma profundidad y completando todas las combinaciones posibles de trayectorias, sin redundancia. Con las señales captadas se deducen dos variables, una es el tiempo de llegada de la primera onda FAT (*First Arival Time*) en milisegundos y la otra es la energía, con las cual se calcula la reducción de energía RE.

La **Tabla 17**, corresponde a los criterios de clasificación de la calidad del concreto contemplado por Jeoprobe.

Tabla 17. *Criterios para evaluación del concreto en ensayos CrossHole.*

Diagnóstico de la calidad del concreto	Tiempo de llegada (FAT)	Reducción de energía
Satisfactorio	FAT aumenta entre 0 y 20%	< 9 db
Imperfección	FAT aumenta entre 21 y 30%	Entre 9 y 12 db
Defecto	FAT aumenta por encima del 31%	Mayor a 12 db
Anomalía significativa/posible discontinuidad	FAT > 100 %	Mayor a 20 db

Fuente: Pile Dynamics Inc. – modificado por Jeoprobe

A continuación, se presenta la **Figura 29**, conocida como diagrama de cascada, en la que se muestra la variación de los FAT en profundidad y la RE.

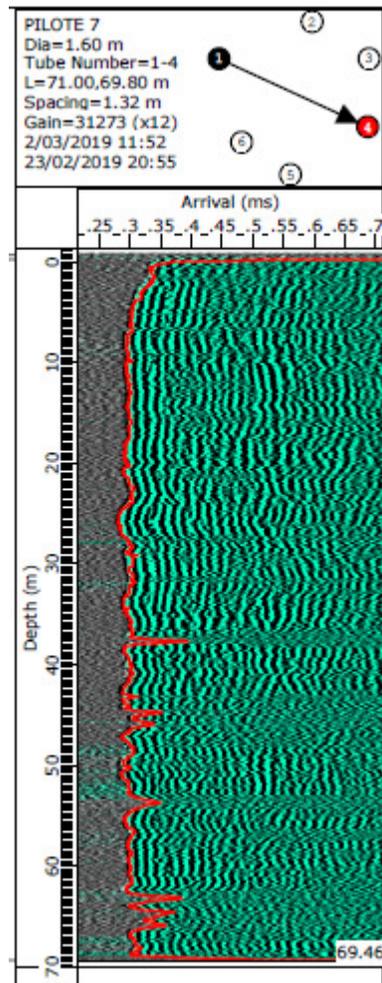


Figura 29. Diagrama de cascada trayectoria 1 a 4

Fuente: Informe de Resultados Pruebas de Carga ETPLMB (Consortio METROBOG, 2019).

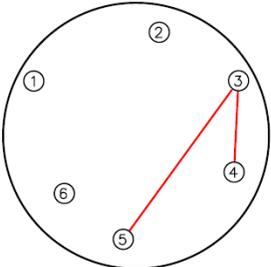
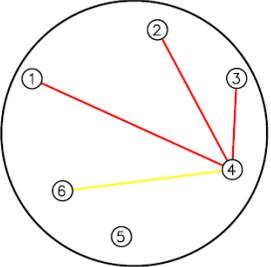
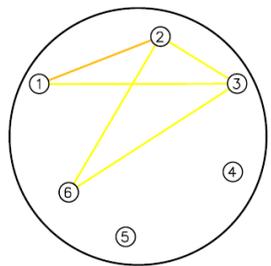
Como se puede apreciar de la **Figura 29**, hacia una profundidad de 37 m y una de 63 m se presenta un incremento en los tiempos de llegada de la onda, sin embargo, en estos casos, la discontinuidad corresponde con la posición de las celdas.

A partir de las conclusiones del informe del ensayo CSL elaborado por Jeoprobe, se tiene que hay imperfecciones, defecto y anomalías significativas en las combinaciones 1-2, 2-3, 3-4, 1-4, 3-6, 1-3, 2-4, 2-6, y 4-6 a partir de los 68,6 m hasta la profundidad ensayada

(69,5 m). Se halló también una anomalía significativa entre 42,1 m y 46,1 m de profundidad para las combinaciones 3-4 y 3-5.

En la **Tabla 18**, se presentan las trayectorias que muestran afectaciones en la calidad del concreto con base en los resultados de CSL.

Tabla 18. *Trayectorias con imperfecciones, defectos o anomalías.*

Esquema	Trayectorias implicadas	Profundidad (m)
	Anomalía 3 - 4 3 - 5	Anomalía 42,1 - 46,1 44,8 - 45,7
	Anomalía 1 - 4 2 - 4 3 - 4 Imperfección 4 - 6	Anomalía 69,0 - 69,5 69,0 - 69,6 69,2 - 69,6 Imperfección 68,6 - 69,5
	Imperfección 1 - 3 2 - 3 2 - 6 3 - 6 Defecto 1 - 2	Imperfección 69,3 - 70,1 69,4 - 70,2 69,6 - 70,1 69,4 - 70,1 Defecto 69,3 - 70,0

Fuente: modificado a partir del estudio Informe de Resultados Pruebas de Carga ETPLMB (Consortio METROBOG, 2019).

Capítulo IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CARGA

En este capítulo se presenta un resumen de los resultados de las lecturas de los instrumentos instalados en el pilote durante las diferentes etapas de carga. Posteriormente, se presenta un resumen del cálculo de las fricciones unitarias y la capacidad por punta. También, se presenta una metodología de transferencia de cargas con base en las curvas t-z y q-w con la cual se reprodujeron los resultados de la prueba de carga. Luego se planteó la construcción de la curva carga asentamiento con carga aplicada desde la cabeza del pilote. Se presenta un resumen de los análisis de retro cálculo para hallar los valores de alfa y beta según el tipo de material, así como las curvas normalizadas con el diámetro de fricción unitaria y punta unitaria de acuerdo con la metodología de O'Neill y Reese (1988). Se presenta la calibración de parámetros empíricos de la solución elástica del cálculo de asentamientos de Vesic (1977).

3.1 Lecturas de los instrumentos

A continuación, se presentan de forma gráfica los resultados de las lecturas de la instrumentación geotécnica embebidas en el pilote y externa como lo es el caso de la lectura topográfica de los niveles de la cabeza del pilote.

En la **Figura 30**, se presenta el movimiento de la cabeza del pilote de acuerdo para la etapa de carga 2, teniendo en cuenta que en esta etapa la influencia de las cargas es más notable. El instrumento empleado fue el nivel Leica con serial A-92244. Como se puede apreciar, en los incrementos de carga iniciales existen fluctuaciones en las medidas debido a la sensibilidad del instrumento y el medio ante las vibraciones de los equipos cercanos. El valor máximo de desplazamiento de la cabeza del pilote hacia arriba fue de 2,37 mm y ocurrió para el incremento de carga 2L-26.

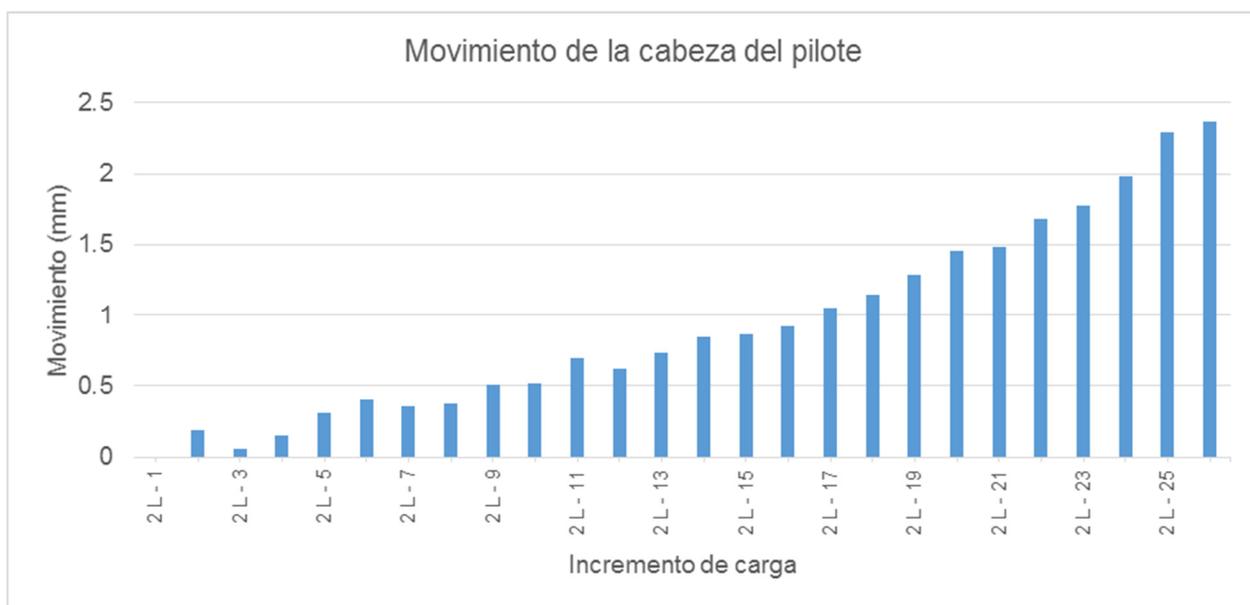


Figura 30. Movimiento de la cabeza del pilote para la segunda etapa de carga

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 31**, se presenta la compresión del concreto en el tramo superior a la celda superior para la etapa de carga 2. Se emplearon los instrumentos con serial: 2A-1314998 y 2B-1424659, a partir de los cuales se utilizó el valor promedio de sus lecturas. El valor de la compresión máxima fue de 2,75 mm para el incremento de carga 2L-26.

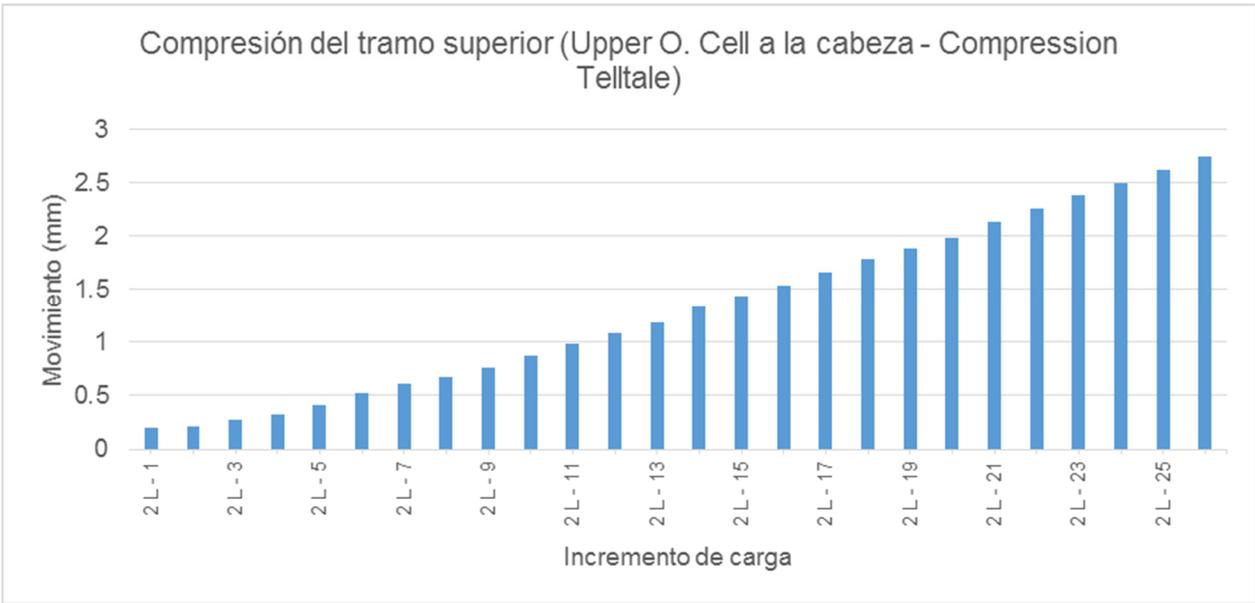


Figura 31. Resultados de las lecturas de los Compression Telltales para la segunda etapa de carga.

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 32**, se presenta el movimiento de expansión de la celda superior determinado a partir de las lecturas de cuatro LVDWT con seriales: 2A-1844383, 2B-1844384, 2C-1844385 y 2D-1844386. Se tomó el valor promedio para la elaboración de los análisis. La mayor expansión registrada fue de 13,23 mm, momento en el cual se llegó a la capacidad máxima de carga de la celda superior para la ejecución de la prueba.

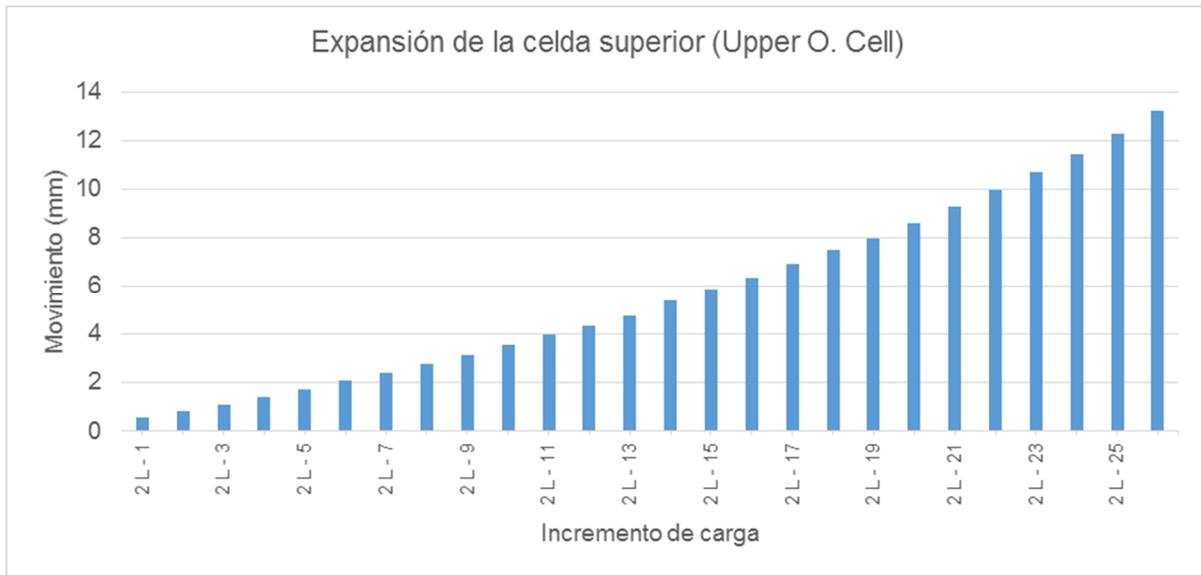


Figura 32. Expansión de la Upper O. Cell para la segunda etapa de carga

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 33**, se presenta el movimiento de expansión de la celda inferior, la cual únicamente se activó en la primera etapa de carga, determinado a partir de las lecturas de cuatro LVWDT con seriales: 1A-1844379, 1B-1844380, 1C-1844381 y 1D-1844382. Se tomó el valor promedio para la elaboración de los análisis. La mayor expansión registrada fue de 111,84 mm, este valor es elevado respecto a la expansión de la celda superior, sin embargo, es consecuente con la necesidad de desarrollar un mayor desplazamiento para conocer la capacidad por punta del pilote.

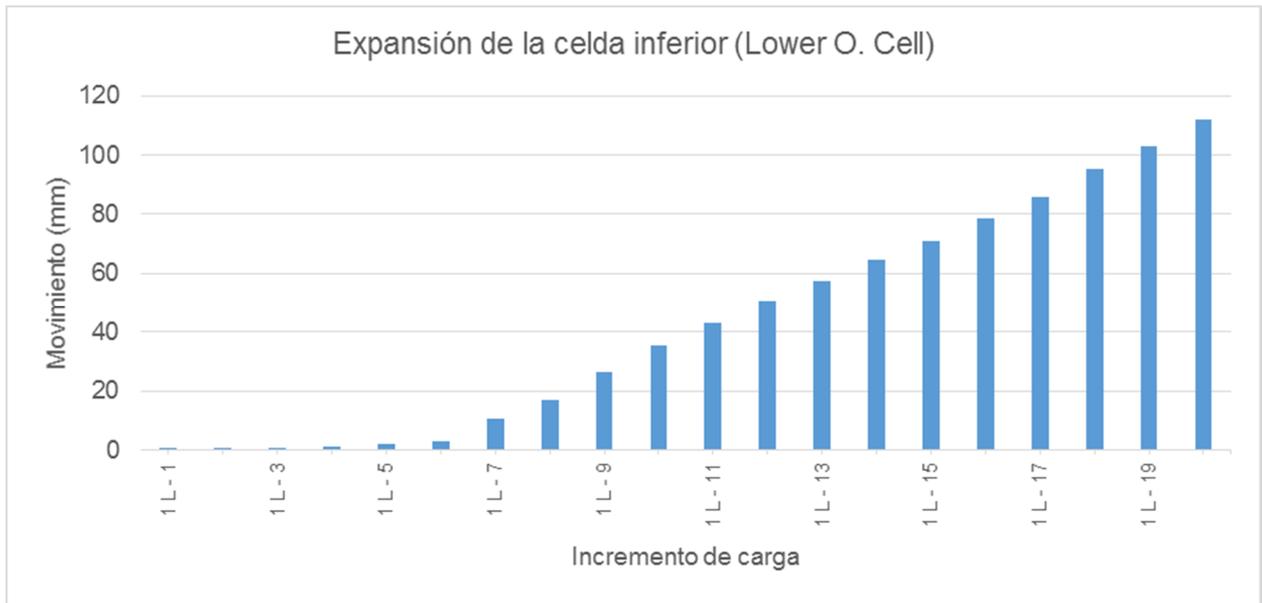


Figura 33. Expansión de la Lower O. Cell para la primera etapa de carga

Fuente: elaboración propia

En la **Figura 34**, se presenta la compresión del concreto de la celda inferior hasta la cabeza el pilote para la etapa de carga uno. Se emplearon los instrumentos con serial: 1A-1433327 y 1B-08-23842, a partir de los cuales se utilizó el valor promedio de sus lecturas. El valor de la compresión máxima fue de 1,04 mm para el incremento de carga 1L-20.

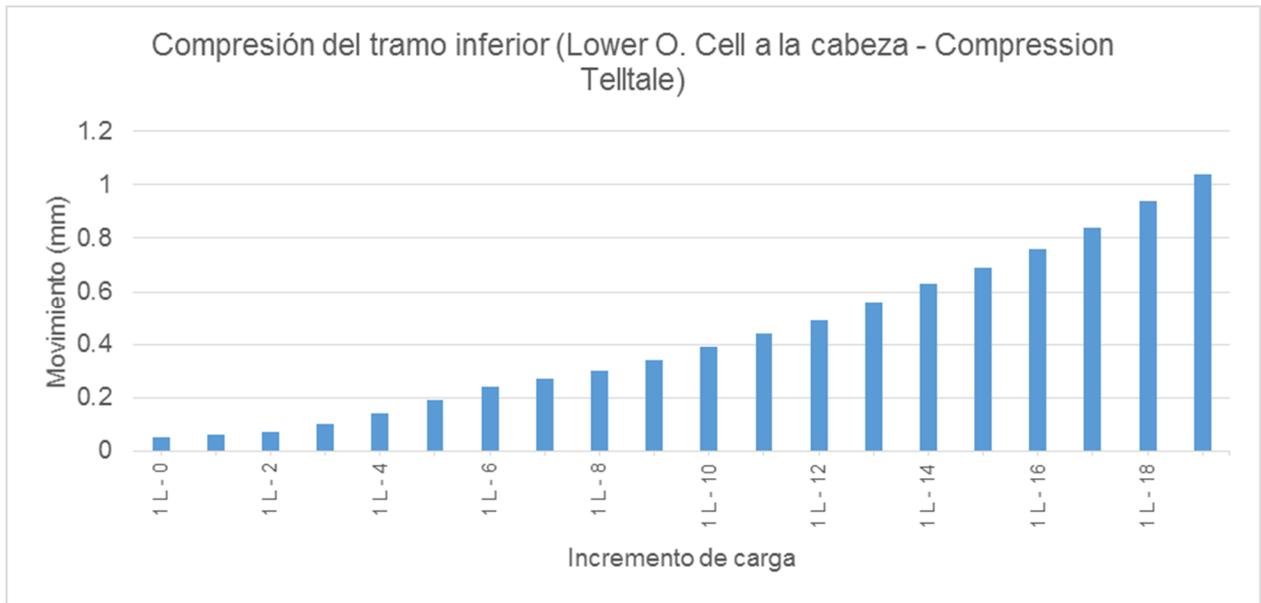


Figura 34. Resultados de las lecturas de los Compression Telltales para la primera etapa de carga.

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 35**, se presenta la compresión del concreto de la celda inferior hasta la punta del pilote para la etapa de carga uno. Se emplearon los instrumentos con serial: A-1747397y B-1747398, a partir de los cuales se utilizó el valor promedio de sus lecturas. El valor de la compresión máxima fue de 15,77 mm para el incremento de carga 1L-20, el cual es un valor muy alto en relación con las cargas aplicadas (carga máxima aplicada a nivel de celda: 9,72 MN), la longitud del tramo (7,07 m) y la rigidez de la sección en este tramo ($A.E= 38.000 \text{ MN}$). Mediante la teoría de acortamiento elástico, este acortamiento debió ser de máximo 1,8 mm. Debido a lo anterior no se tuvieron en cuenta las lecturas del ECT en las interpretaciones de la prueba.

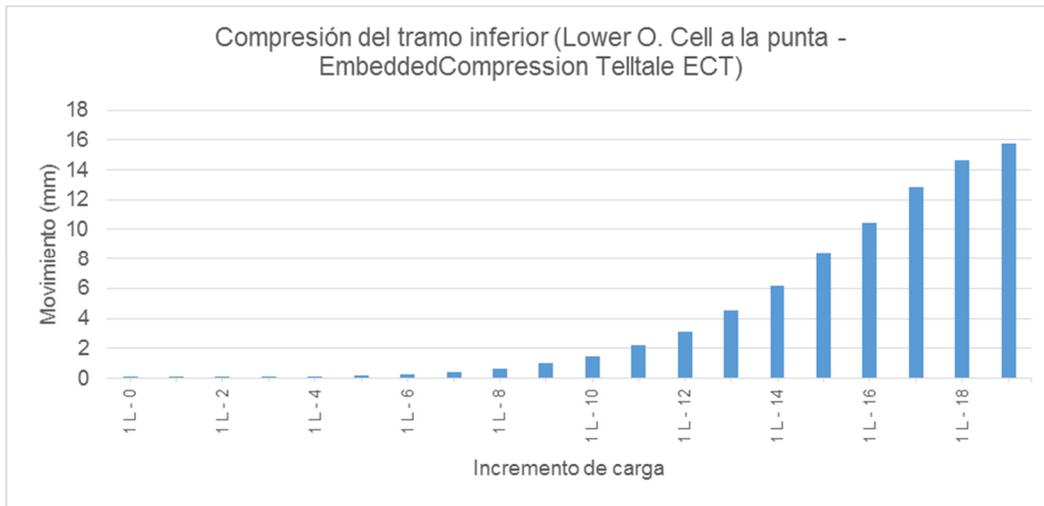


Figura 35. Resultados de las lecturas de los Embedded Compression Telltales para la primera etapa de carga.

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 36**, se presentan los resultados de las lecturas del Strain Gage 1 (SG-1), en relación con las cargas aplicadas a nivel de la celda inferior (Lower O. Cell L-OC), teniendo en cuenta que se encuentra localizado entre la celda inferior y la punta. Los instrumentos empleados para el promedio de deformaciones cuentan con los seriales: 1A-1900597, 1B-1900598, 1C-1900599 y 1D-1900600. Las lecturas de deformación del SG-1 no se utilizaron en la interpretación de la prueba teniendo en cuenta que para mantener el equilibrio de fuerzas en el tramo inferior con base en dichos resultados se presentan valores negativos de esfuerzos en la punta. La afectación en las lecturas a nivel del SG-1 (localizado a 66,48 m de profundidad) pueden deberse a afectaciones localizadas en el concreto en el tramo inferior de acuerdo con los resultados del ensayo CSL, según el cual a una profundidad entre 69 y 70 m se presentaron imperfecciones, defectos y anomalías en nueve de las 15 trayectorias medidas.

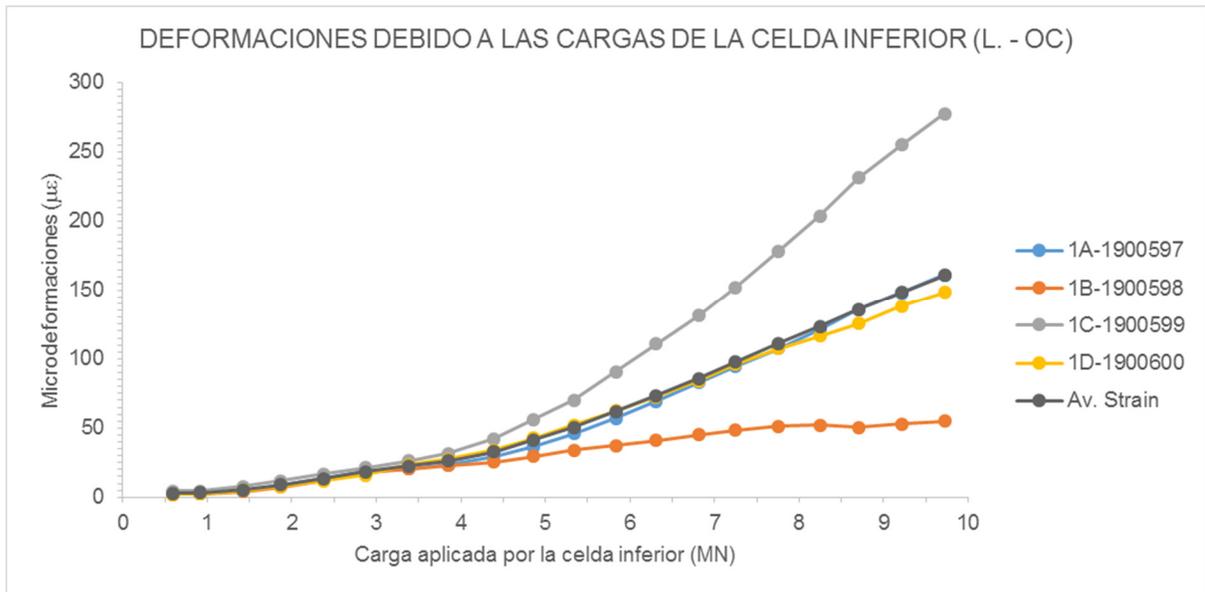


Figura 36. Resultados de las lecturas del nivel de Strain Gage 1 ante la primera etapa de carga

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 37**, se presentan los registros de las galgas de deformación con barras hermanas del tramo superior del pilote (entre la celda y la cabeza del pilote). El orden de deformación es coherente con la cercanía de los Strain Gages con la celda de carga.

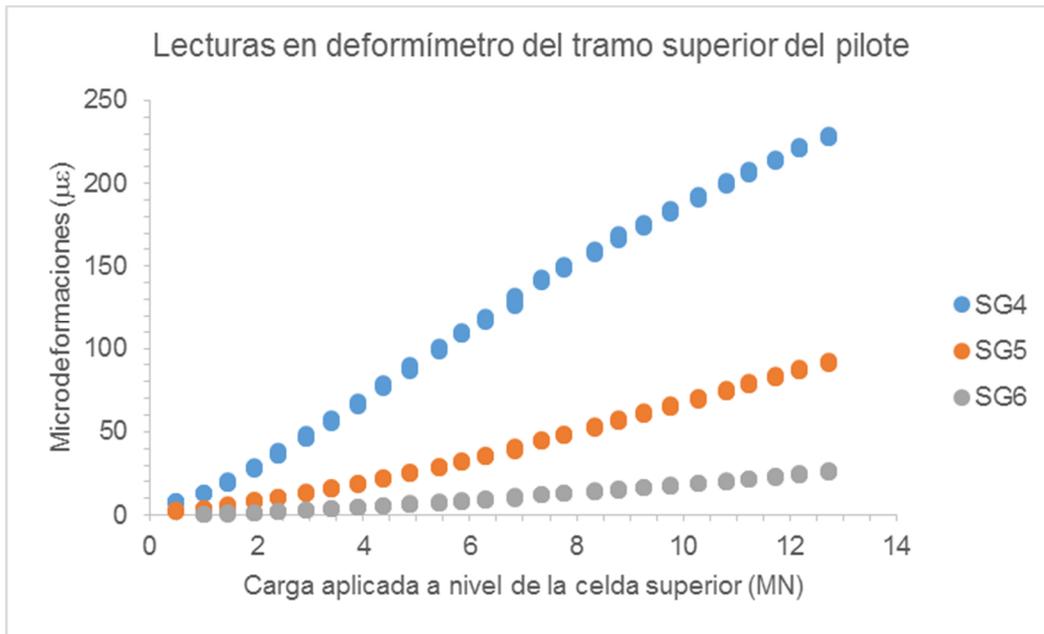


Figura 37. Lecturas de deformación para los Strain Gages del tramo entre celda superior y la cabeza del pilote.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 33, se presentan los registros de las galgas de deformación SG-2 y SG-3 del tramo intermedio (entre celdas). El grado de deformación de los Strain Gages es coherente con la distancia a la celda de carga.

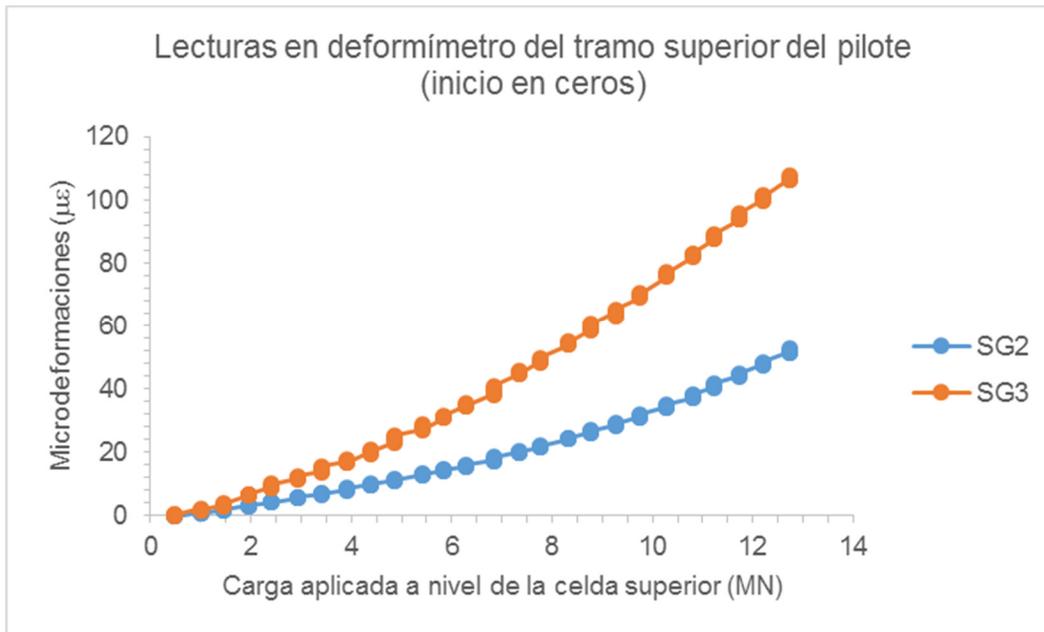


Figura 38 Lecturas de deformación para los Strain Gages del tramo superior del pilote.

Fuente: Elaboración propia

3.3 Fricción y punta unitaria con base en la prueba de carga

Para el cálculo de la fricción unitaria se tuvieron en cuenta las lecturas de los Strain Gages, cuyas deformaciones al multiplicarlas por la rigidez del tramo correspondiente dan como resultado la fuerza experimentada por el concreto a ese nivel. Con la diferencia de fuerzas entre dos Strain Gages adyacentes o una celda contigua se calculó la fricción unitaria como la fuerza disipada entre dichos tramos y el área de fuste que las define.

Adicionalmente, debido a la interacción suelo-estructura, las cargas aplicadas al pilote transfieren sus cargas al suelo generando a su vez deformaciones y desplazamientos.

Las curvas t-z fueron calculadas con base en fricciones unitarias entre tramos de strain gage o strain gage y celda, respecto al desplazamiento del punto medio del tramo en

mención. De ese modo, se calcularon las curvas t-z presentadas de la **Figura 39** a la **Figura 48**.

La curva t-z del tramo entre Strain Gage 6 y la cabeza del pilote presentó un buen ajuste mediante una función polinómica de grado 2. Las restricciones que se tuvieron en cuenta para su uso fueron limitar los desplazamientos del punto medio del tramo a un rango entre 0,00 mm y 2,34 mm. Las fricciones unitarias se restringieron entre 0,0 y 21 kPa.

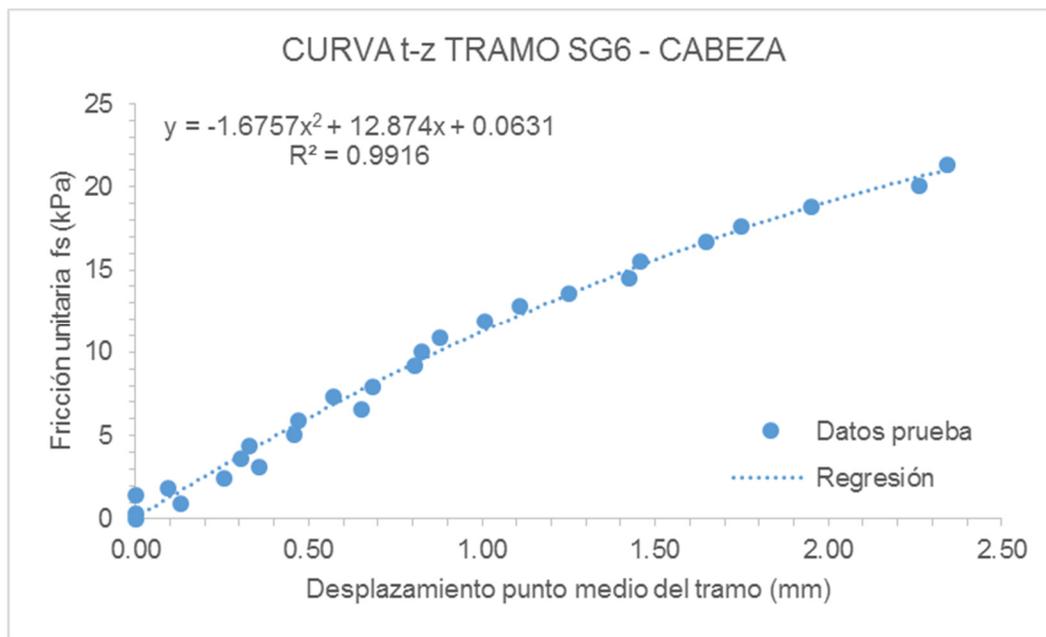


Figura 39. Curva t-z del tramo entre el Strain Gage 6 y la cabeza del pilote

Fuente: Elaboración propia

La curva t-z del tramo entre Strain Gage 5 y el Strain Gage 6 presentó un buen ajuste mediante una función polinómica de grado 2. Las restricciones que se tuvieron en cuenta para su uso fueron limitar los desplazamientos del punto medio del tramo a un rango entre 0,00 mm y 2,65 mm. Las fricciones unitarias se restringieron entre 0,0 y 54 kPa.

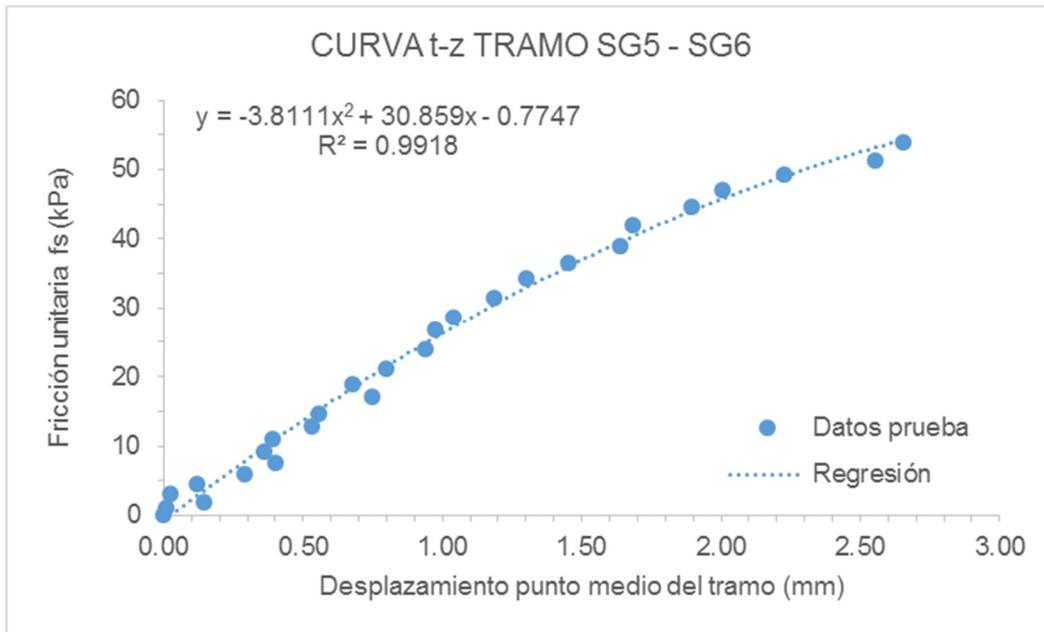


Figura 40. Curva t-z del tramo entre el Strain Gage 5 y el Strain Gage 6

Fuente: Elaboración propia

La curva t-z del tramo entre el Strain Gage 4 y el Strain Gage 5 presentó un buen ajuste mediante una función polinómica de grado 2. Las restricciones que se tuvieron en cuenta para su uso fueron limitar los desplazamientos del punto medio del tramo a un rango entre 0,00 mm y 3,61 mm. Las fricciones unitarias se restringieron entre 0,0 y 112 kPa.

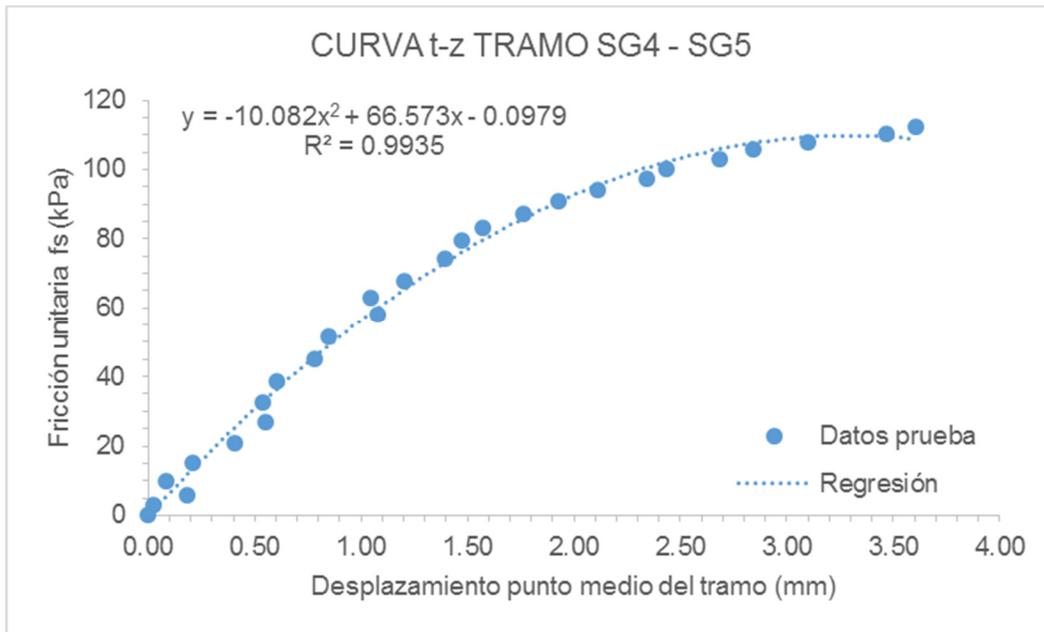


Figura 41. Curva t-z del tramo entre el Strain Gage 4 y el Strain Gage 5

Fuente: Elaboración propia

La curva t-z del tramo entre la celda de carga superior y el Strain Gage 5 presentó un buen ajuste mediante una función polinómica de grado 4. Las restricciones que se tuvieron en cuenta para su uso fueron limitar los desplazamientos del punto medio del tramo a un rango entre 0,00 mm y 5,57 mm. Las fricciones unitarias se restringieron entre 0,0 y 72 kPa. La forma atípica de esta curva t-z puede tener su origen en la presencia del lente de turba entre 32,5 m y 33,5 m conduciendo de esta forma a la combinación de dos curvas t-z, no obstante, para modelar de forma independiente los dos comportamientos se requerían mayores niveles de Strain Gages a estas profundidades, por lo menos dos adicionales, al inicio y final del estrato en cuestión.

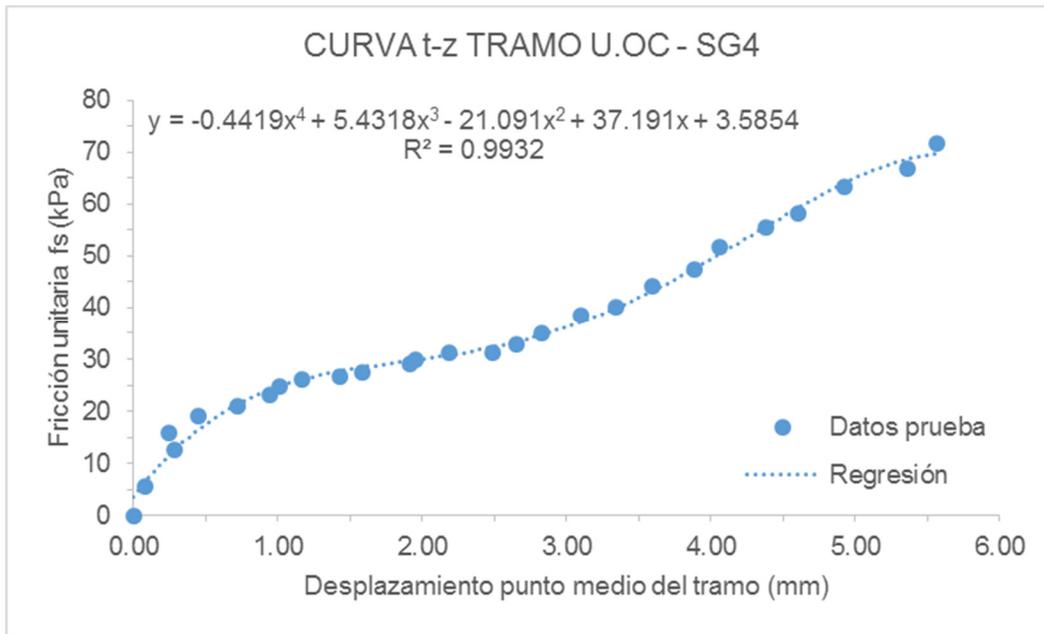


Figura 42. Curva t-z del tramo entre el Upper O. Cell y el Strain Gage 4

Fuente: Elaboración propia

La curva t-z del tramo entre la celda de carga superior y el Strain Gage 3 presentó un buen ajuste mediante una función polinómica de grado 2. Las restricciones que se tuvieron en cuenta para su uso fueron limitar los desplazamientos del punto medio del tramo a un rango entre 0,00 mm y 7,60 mm. Las fricciones unitarias se restringieron entre 0,0 y 157 kPa.

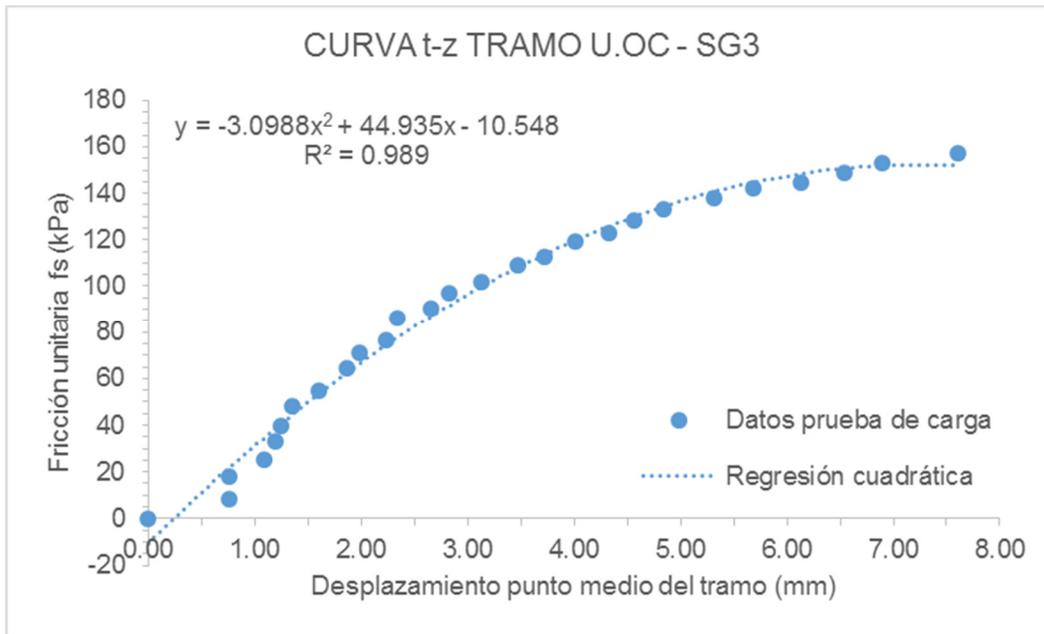


Figura 43. Curva t-z del tramo entre la Celda Superior y el Strain Gage 3

Fuente: Elaboración propia

La curva t-z del tramo entre el Strain Gage 3 y el Strain Gage 2 presentó un buen ajuste mediante una función lineal. Las restricciones que se tuvieron en cuenta para su uso fueron limitar los desplazamientos del punto medio del tramo a un rango entre 0,00 mm y 6,59 mm. Las fricciones unitarias se restringieron entre 0,0 y 63 kPa.

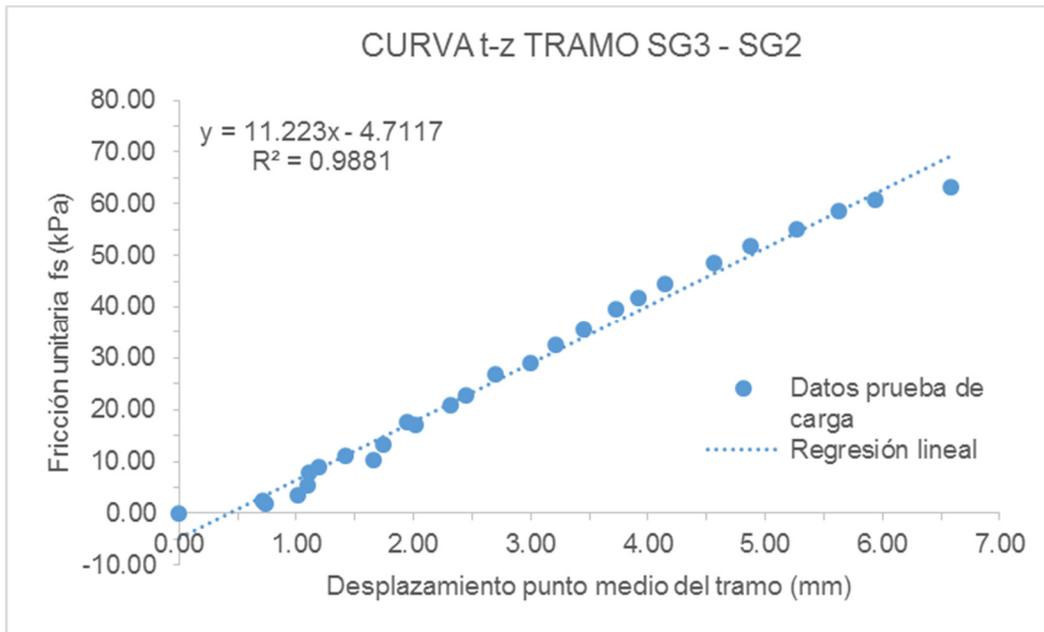


Figura 44. Curva t-z del tramo entre el Strain Gage 3 y el Strain Gage 2

Fuente: Elaboración propia

La curva t-z del tramo entre el Strain Gage 2 y la celda inferior presentó un buen ajuste mediante una función lineal. Las restricciones que se tuvieron en cuenta para su uso fueron limitar los desplazamientos del punto medio del tramo a un rango entre 0,00 mm y 6,14 mm. Las fricciones unitarias se restringieron entre 0,0 y 58 kPa.

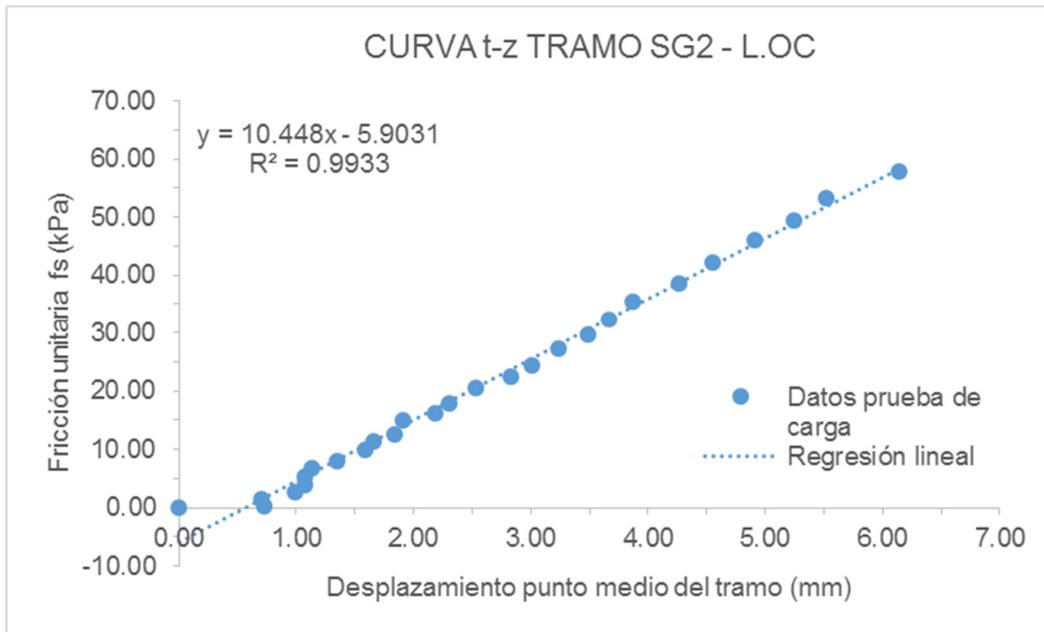


Figura 45. Curva t-z del tramo entre el Strain Gage 2 y la Celda Inferior
Fuente: Elaboración propia

Para el caso del tramo inferior, entre la celda inferior y la punta del pilote, dado que se descartó el uso del Strain Gage 1, se utilizó la información proveniente de la **Figura 46**, en la cual se observa un comportamiento bilineal, en el que la primera parte con mayor pendiente cuenta con un mayor aporte de capacidad por fuste y luego de fallar el principal aporte lo hace la punta del pilote. Con base en lo dicho, en la **Figura 46** se plantean los aportes de los componentes de punta y fuste para el tramo inferior.

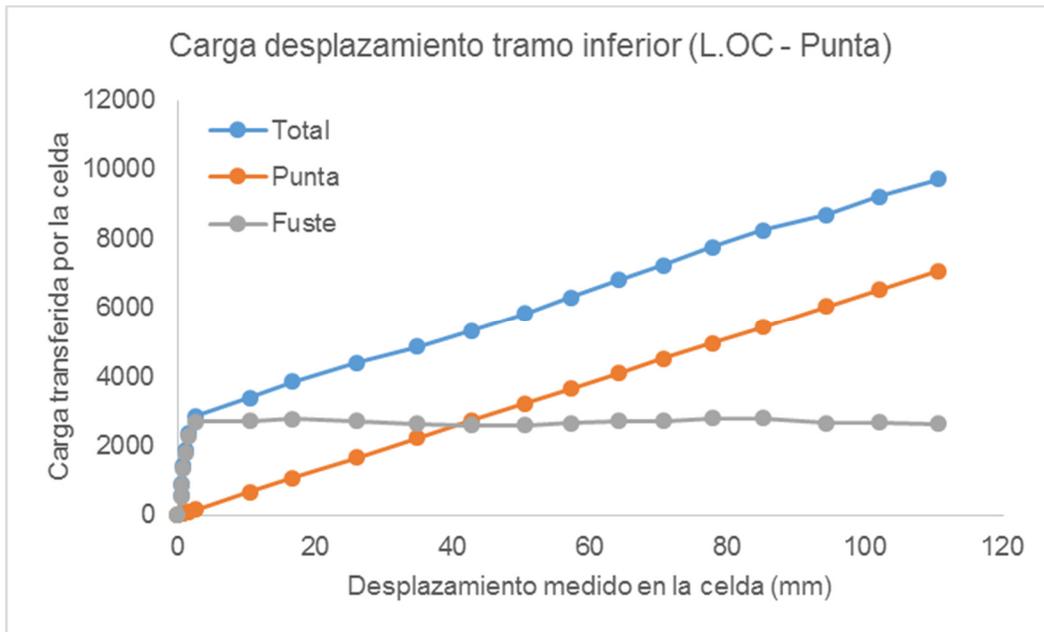


Figura 46. Distribución de cargas entre los componentes fuste y punta en el tramo inferior ante las cargas aplicadas por la celda.

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo del desplazamiento de la base del pilote, se calculó el acortamiento elástico del tramo y este se restó del desplazamiento de la celda. Con base en ello y la carga aplicada al área de punta se construyó la curva q-w, la cual ofreció un ajuste lineal perfecto como se observa en la **Figura 47**. El uso de la regresión estadística se restringió a valores de desplazamiento entre 0,00 y 109 mm, de otra parte, la capacidad unitaria se limitó de 0 a 3518 kPa.

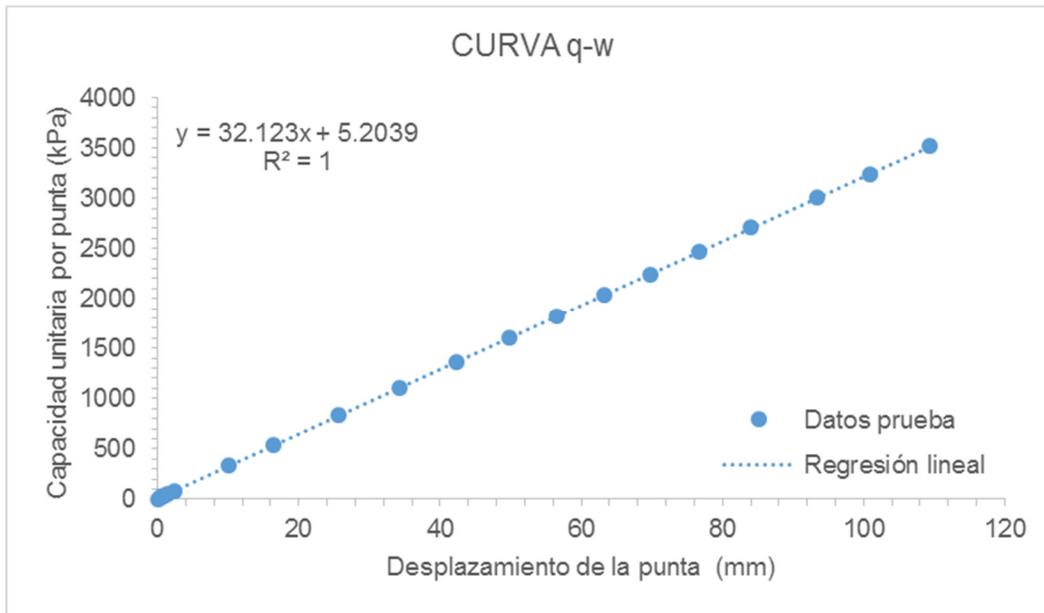


Figura 47. Curva de capacidad unitaria por punta en función del desplazamiento en punta q-w

Fuente: Elaboración propia

Con base en el desplazamiento de la celda y el acortamiento elástico del concreto, se calculó el desplazamiento del punto medio del tramo, con lo cual se relacionó la fricción desarrollada para cada desplazamiento y se construyó la curva de la **Figura 48**.

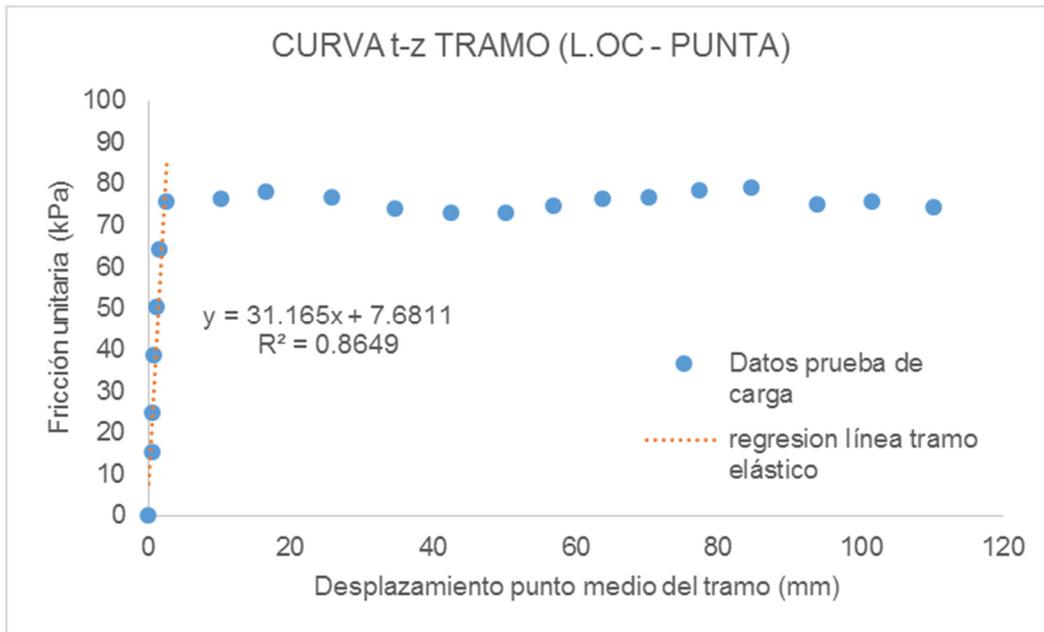


Figura 48. Curva t-z del tramo entre la celda inferior y la punta del pilote

Fuente: Elaboración propia

3.4 Reproducción de los resultados de las curvas carga - desplazamiento con base en las curvas t-z y q-w

Cada uno de los tres tramos de pilote cuenta con un conjunto de ecuaciones que describen el comportamiento carga – asentamiento o desplazamiento, así como restricciones en su uso. A continuación, se presentan gráficas en las que se contrastan los resultados obtenidos mediante la modelación analítica y los resultados reales de la prueba.

En la **Figura 49** y **Figura 50** se presentan las comparaciones para el tramo superior, es decir la etapa de carga 2, en su tramo superior. La curva denominada medidos o datos prueba es la representación gráfica de la información proveniente de la prueba

directamente. La curva azul de la **Figura 49** representa la simulación realizada con base en la metodología de transferencia de carga.

Como se puede apreciar en la **Figura 50**, existes algunos valores donde hay divergencias entre lo medido y lo proyectado, no obstante, para la mayoría de datos se presenta un buen ajuste.

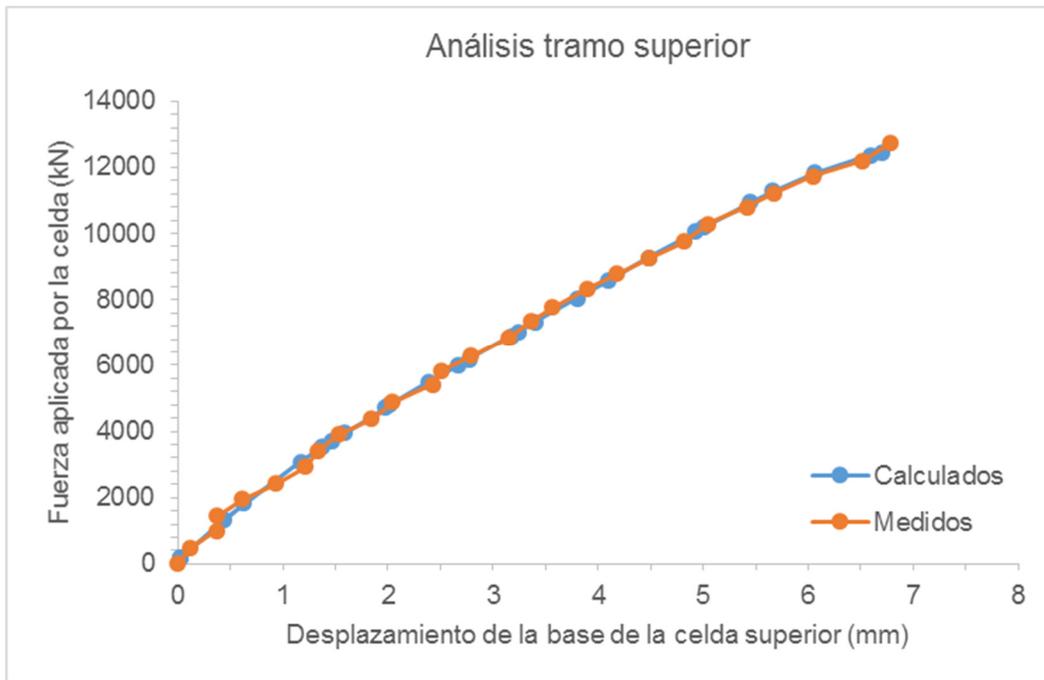


Figura 49. Comportamiento carga - desplazamiento real y simulado del tramo U-OC a cabeza del pilote

Fuente: Elaboración propia

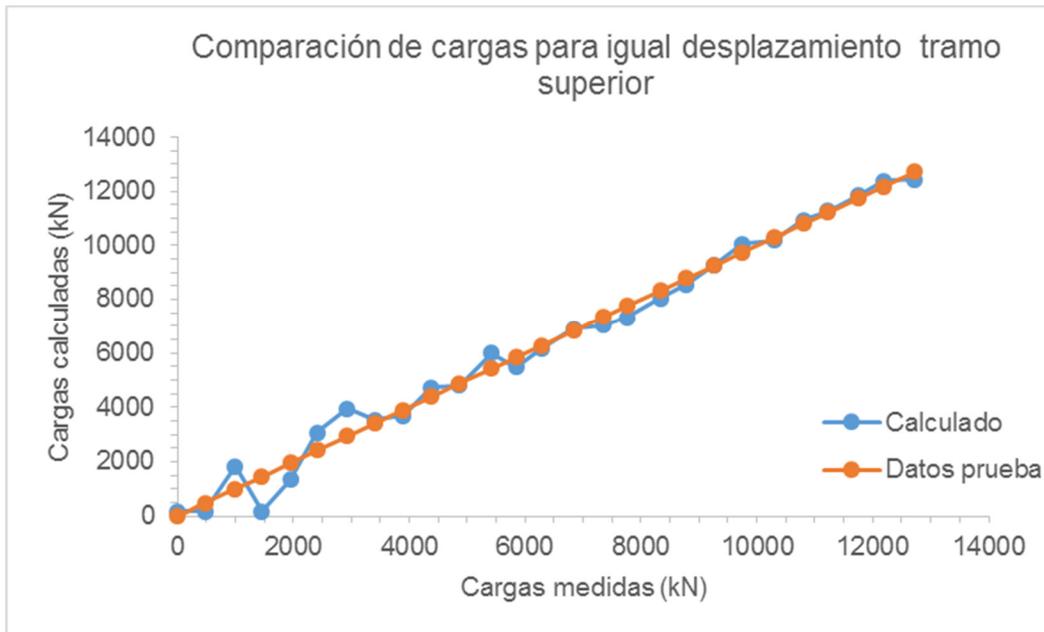


Figura 50. Verificación de la igualdad entre curvas carga – desplazamiento para un mismo desplazamiento

Fuente: Elaboración propia

La **Figura 51** presenta la curva carga – asentamiento de la etapa 2 en el tramo intermedio. La curva azul consiste en la simulación realizada mediante la utilización de la metodología de transferencia de cargas

En la **Figura 51**, se observa que las mayores divergencias entre lo medido y lo proyectado se encuentra en el rango de 0 a 3000 kN en el que la curva calculada resulta mayor que lo medido. Ese desfase inicial de las cargas puede originarse debido a que durante el proceso de carga de la etapa 1, hubo una movilización de los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos de la instrumentación en el tramo intermedio, aun cuando para el proceso de calibración de las curvas t-z se inicializaron en cero los Strain Gages. No obstante, las diferencias se hacen menos significativas a medida que se avanza en el proceso de carga.

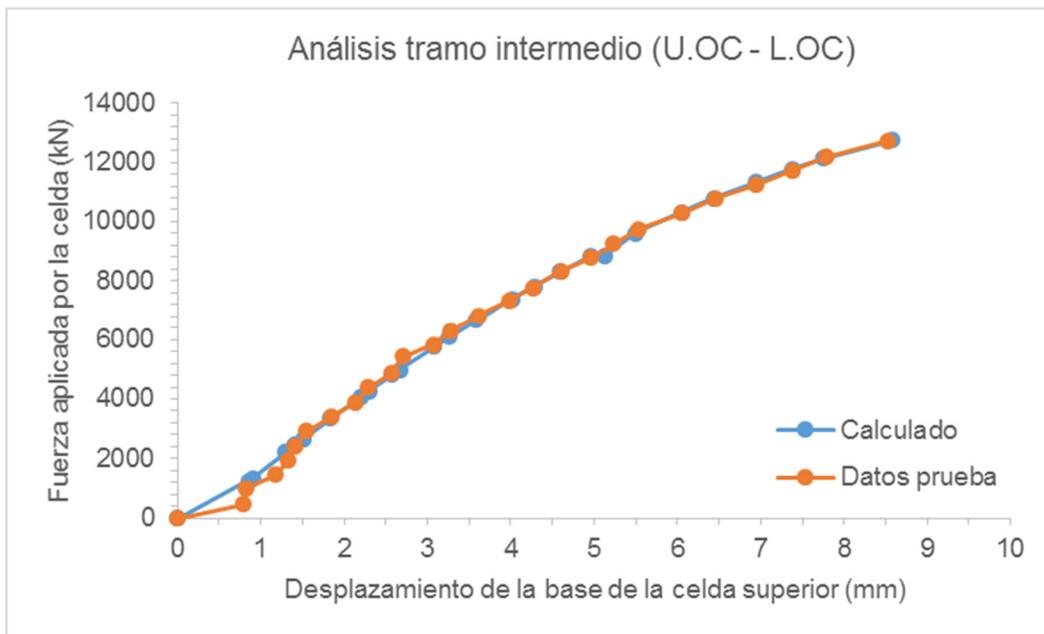


Figura 51. Análisis tramo intermedio (U.OC – L.OC)

Fuente: Elaboración propia

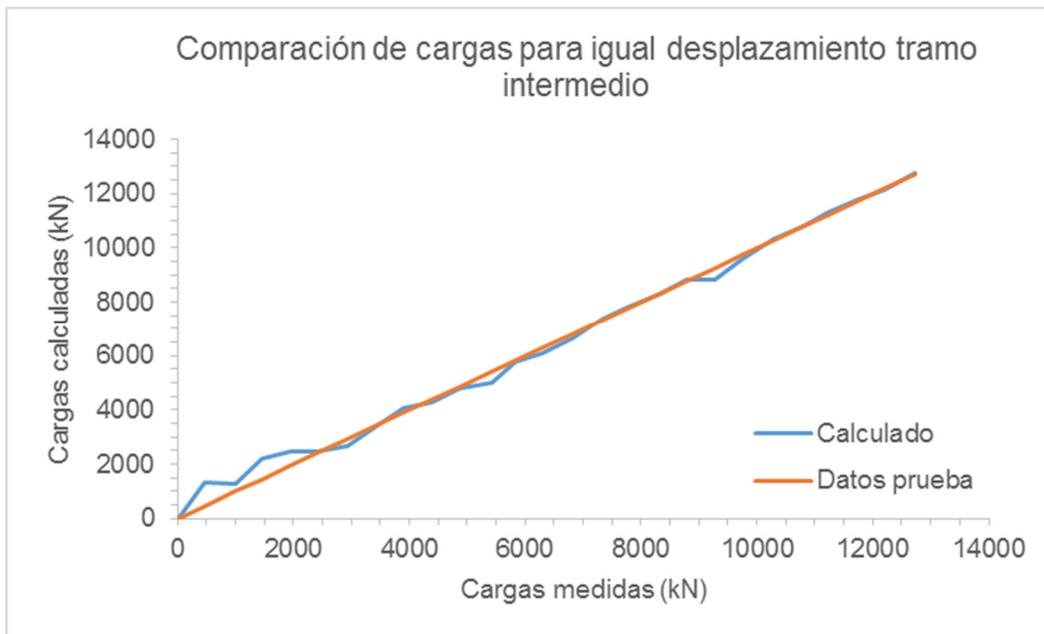


Figura 52. Comparación de cargas para desplazamiento tramo intermedio

Fuente: Elaboración propia

El ajuste entre las curvas carga – asentamiento medida y calculada presenta un buen ajuste, con ligeras desviaciones hacia cargas de hasta 3MN. Para cargas mayores las diferencias entre las dos curvas son en esencia nulas.

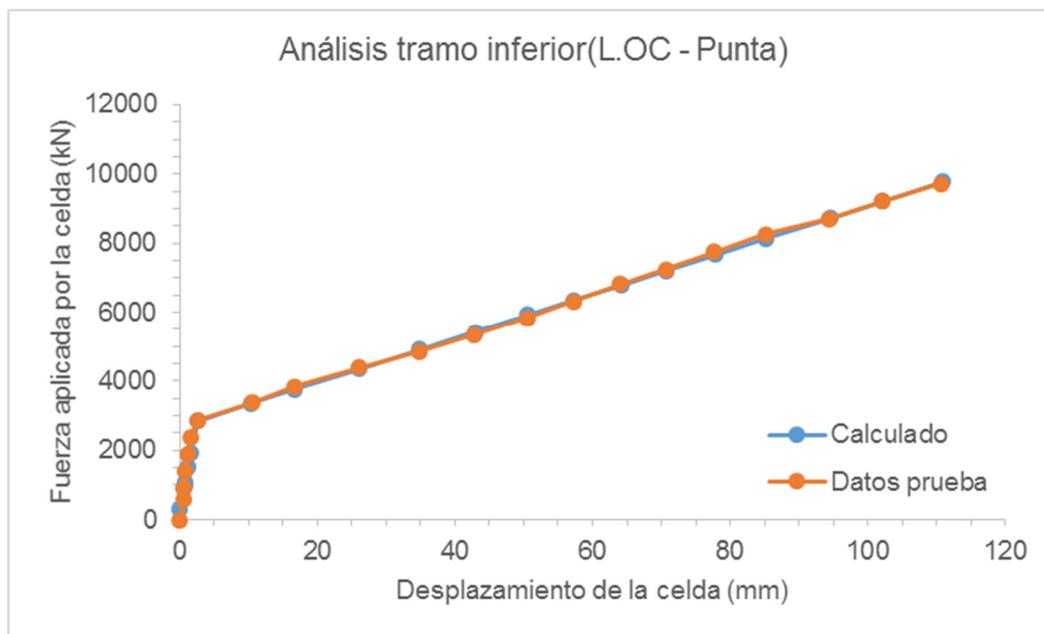


Figura 53. Análisis tramo inferior (L.OC – Punta)

Fuente: Elaboración propia

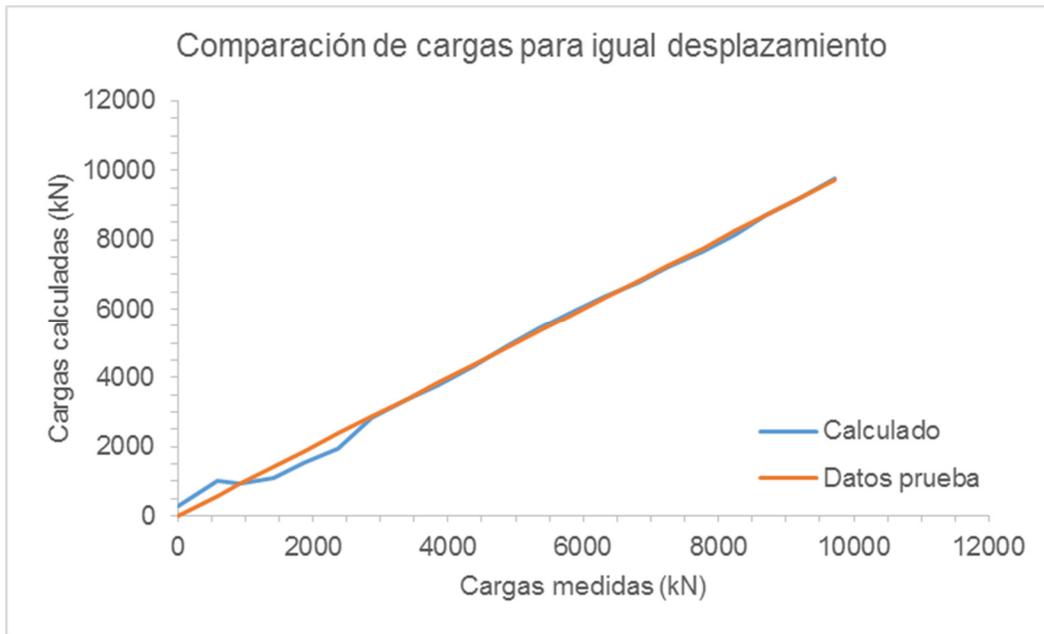


Figura 54. Comparación de cargas para igual desplazamiento.

Fuente: Elaboración propia

Tal como se mostró en las Figuras anteriores, la simulación de las etapas de carga por medio de las curvas t-z y q-w presenta un buen ajuste respecto a las curvas carga – desplazamientos provenientes de las mediciones. De esta forma se validó el funcionamiento de las curvas t-z, q-w y la metodología de cálculo de transferencia de carga.

3.5 Curva carga – asentamiento equivalente desde la cabeza del pilote

Habiendo cumplido el requisito de reproducir resultados contrastables con las curvas t-z y q-w, a continuación, se presenta la simulación de lo que sería el comportamiento carga – desplazamiento con cargas aplicadas en la cabeza del pilote.

En la **Figura 55** se presenta la curva con el comportamiento mencionado, en ella se incluyeron adicionalmente, la curva carga – desplazamiento en la punta, así como el

acortamiento elástico del pilote. En la curva azul, se diferencian tres zonas de comportamiento general, para los primeros asentamientos hay un predominio del aporte de la fricción o fuste, luego del proceso de falla de por fricción de cada uno de los estratos resta aún la capacidad por punta, la cual continúa desarrollándose hasta el límite donde se determinó en la prueba de carga, a partir de allí se asumió la falla completa del pilote o dicho de otra forma, la capacidad última del pilote.

En resumen, se tiene que la capacidad de todo el fuste se desarrolla hasta un asentamiento igual a 30,35 mm con una carga de 28109 kN, posteriormente continúa desarrollándose la capacidad por punta hasta un asentamiento medido en la cabeza de 146,29 mm, sin embargo, la punta se desplaza solo 110 mm (como fue determinado en la prueba de carga). La capacidad última alcanzada en el pilote es de 34870 kN.

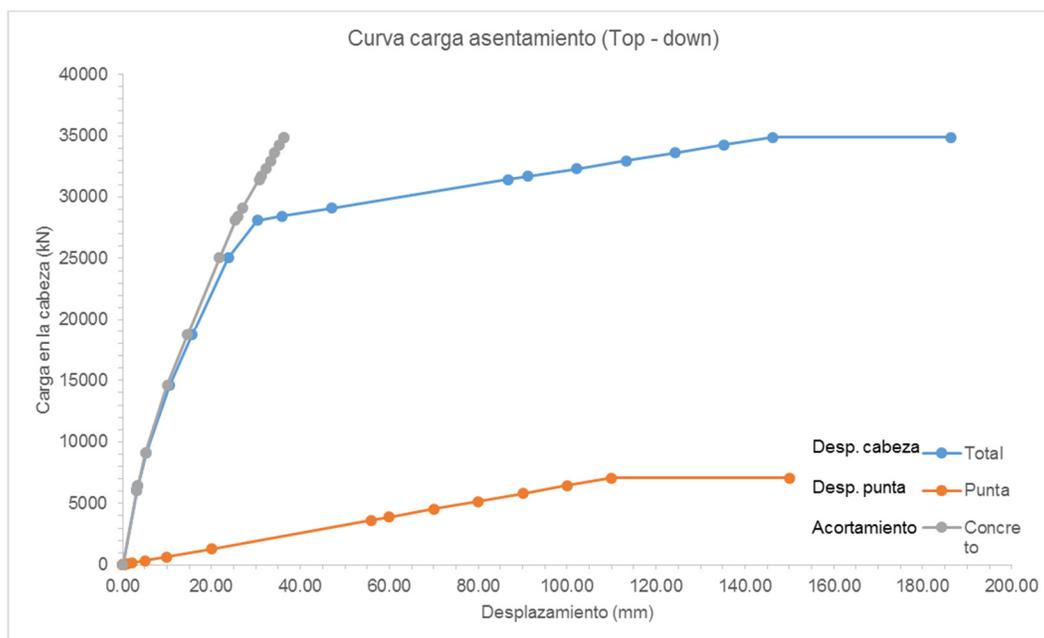


Figura 55. Carga – asentamiento equivalente desde la cabeza del pilote

Fuente: Elaboración propia

3.6 Retro cálculo para la determinación de alfa y beta obtenidos de la prueba de carga

Con base en el tipo de comportamiento definido en la caracterización geotécnica (cohesivo o granular) para los diferentes estratos y los tramos entre Strain Gages y celdas, se pudieron establecer ecuaciones con las que se obtuvieron los valores de alfa y beta con los cuales se relacionaron los parámetros de la caracterización con las fricciones unitarias medidas. En la **Tabla 19**, se presenta un resumen de los valores de f_s obtenidos de las curvas t-z y en la **Tabla 20** se presentan los cálculos realizados para los cálculos de alfa y beta.

Tabla 19. Resumen de los valores de f_s obtenidos de las curvas t-z y

ID	Elemento superior	Elemento Inferior	Inicio	Fin	Diámetro	AE	δ_{max}	f_{smax}
-	-	-	m	m	m	MN	mm	kPa
1	TOP	F6	0.00	10.14	1.68	42000	2.34	21
2	F6	F5	10.14	19.66	1.68	42000	2.65	54
3	F5	F4	19.66	29.17	1.68	42000	3.61	109
4	F4	UC	29.17	37.70	1.68	42000	5.57	70
5	UC	F3	37.70	45.94	1.72	50000	7.60	152
6	F3	F2	45.94	54.42	1.72	50000	6.59	63
7	F2	LC	54.42	57.97	1.72	50000	6.14	58
8	LC	F1	57.97	61.49	1.6	38000	2.51	76
9	F1	TIP	61.49	70.00	1.6	38000	2.51	76

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Cálculos realizados para los cálculos de alfa y beta.

Inicio	Fin	Espesor	Z_{prom}	S_u	N_{60}	σ'_{vm}	f_s	α	β
m	m	m	m	kPa	golpes/pie	kPa	kPa	-	-
0.00	5.00	5.0	2.50		12	49	21		0.43
5.00	10.14	5.1	7.57		28	148	21		0.14
10.14	19.66	9.5	14.90	65			54	1.05	

Inicio	Fin	Espesor	Z _{prom}	S _u	N ₆₀	σ' _{vm}	f _s	α	β
m	m	m	m	kPa	golpes/pie	kPa	kPa	-	-
19.66	23.00	3.3	21.33	65			109	1.05	
23.00	29.17	6.2	26.09		33	322	109		0.34
29.17	37.68	8.5	33.43	105			70	0.83	
37.68	40.00	2.3	38.84	105			152	0.83	
40.00	46.21	6.2	43.11		26	481	152		0.32
46.21	48.00	1.8	47.11		26	481	63		0.13
48.00	54.45	6.5	51.23	155			63	0.39	
54.45	62.93	8.5	58.69	155			58	0.39	
62.93	66.48	3.6	64.71	177			76	0.43	
66.48	70.00	3.5	68.24	185			76	0.41	

Fuente: Elaboración propia

En los casos donde se presentaron dos valores de fricción unitaria para un mismo estrato se calculó un parámetro alfa o beta único promedio. De otra parte, en los casos en donde para una misma zona entre Strain Gages o tramos con igual f_s pero atravesando diferentes estratos se realizaron los cálculos de tantos valores de alfa o beta según la cantidad de estratos.

En la **Figura 56**, se presenta la gráfica de los valores de alfa en función de S_u , se encuentran superpuestas la gráfica correspondiente a la recomendación de la NSR-10 y al CCP-14 (AASHTO, 2012). Como se puede apreciar se localizaron cinco puntos, cuyos valores de alfa se encuentran por encima de los recomendados por la NSR-10, no obstante, la comparación con los valores de AASHTO-2012, muestra que para valores menores a 140 kPa de resistencia al corte no drenada (aproximadamente) los valores de alfa de la prueba superaron la recomendación del código y se invierte esta relación para los puntos restantes,

es decir a partir de un S_u igual a 140 kPa los valores de la prueba fueron menores que la recomendación del CCP-14.

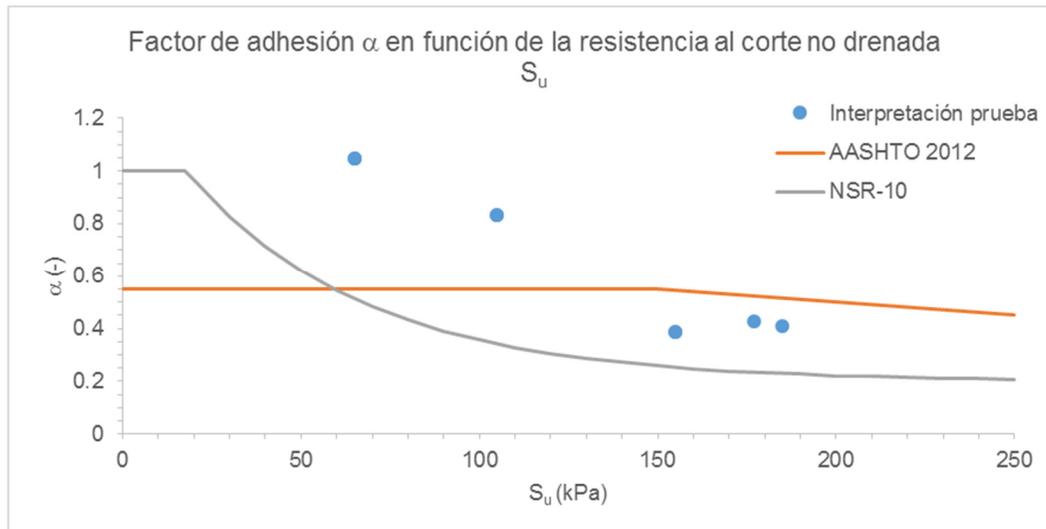


Figura 56. Factor de adhesión α en función de la resistencia al corte no drenado S_u .

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 57**, se presenta la gráfica con los valores del coeficiente de transferencia de cargas β variando en profundidad y se superpuso la recomendación de AASHTO-2012. Los valores de β interpretados por medio de la prueba se encuentran alrededor de una tendencia promedio de 0,27, el cual es similar al valor alcanzado por la ecuación de AASHTO-2012 a partir de 26 m, con un valor de b igual a 0,25. Sin embargo, para entre el terreno natural y 26 m AASHTO -2012 recomienda valores superiores a los interpretados a partir de la prueba de carga, llegando hasta ser inclusive de 1,2 en superficie. La diferencia entre la interpretación y el valor del código puede estar basada en el hecho que desde la superficie del terreno natural hasta aproximadamente 4 m de profundidad, la interfaz suelo

– estructura sufrió afectaciones por el proceso constructivo adicionales al resto del pilote, debido que se introdujo y extrajo la camisa metálica.

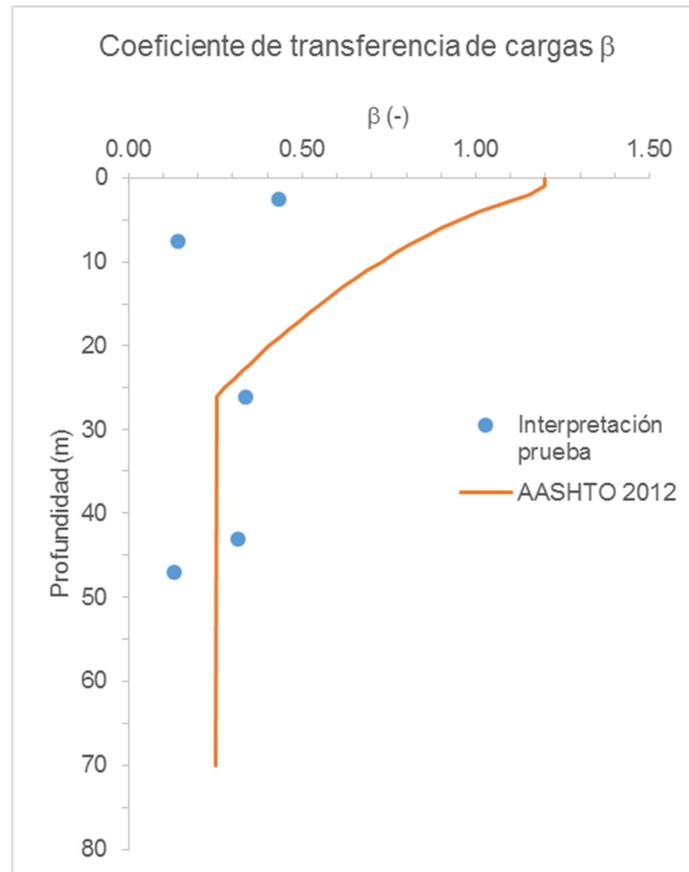


Figura 57. Coeficiente de transferencia de cargas en relación con la profundidad.

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al comportamiento por punta, para materiales cohesivos la capacidad unitaria q_p se calcula como N_c multiplicado por S_u , en donde el valor de N_c se hace igual a 9,0 para cimentaciones profundas. El valor de punta unitaria hallado por medio de los resultados de la prueba de carga fue igual a 3518 kPa al dividirse entre un valor de S_u en la punta de 185 kPa dan como resultado un valor de N_c igual a 19, para una relación de

asentamiento con el diámetro del 6,8 %. El valor elevado de N_c es probable que esté asociado a la presencia de un lente arenoso a 1,5 m por debajo de la punta del pilote. La metodología de O'Neill y Reese (1988) para el cálculo de la capacidad por punta en granulares se basa en el valor de N_{60} , el cual es multiplicado por un factor de 57 para las obtenciones de q_p en kPa. En este caso el valor de N_{60} para el estrato arenoso es de 86 golpes/pie, por lo tanto, como resultado de la relación entre el valor de q_p de la prueba y el valor de N_{60} , se obtiene un factor de 41. Se concluye, por tanto, que al analizar los factores de ajuste con base en un comportamiento cohesivo o granular, hay mayor similitud para un comportamiento granular en la punta.

Respecto al comportamiento normalizado de las curvas t-z y q-w, se realizó su comparación con los planteamientos de O'Neill y Reese (1988) de acuerdo con la **Figura 58** a la **Figura 59**.

En la **Figura 58** se presentan las gráficas de curvas t-z para materiales predominantemente cohesivos, no son exclusivamente cohesivos dado que los tramos entre Strain Gages no coinciden con la estratificación, por lo tanto, se agruparon aquellas curvas t-z con un comportamiento similar y con caracterización de materiales cohesivos. También se encuentran superpuestas las gráficas del estudio de O'Neill y Reese (1988) y como se puede apreciar existe una coincidencia entre los valores de la prueba y la propuesta de O'Neill y Reese (1988), en el caso de los resultados de la prueba de carga el valor de fricción unitaria máxima se alcanzó para un desplazamiento respecto al diámetro del pilote o seudo deformación en promedio igual a 0,38%, de otra parte, la pendiente de la relación

de fricciones con la de pseudo deformación se aproxima al rango inferior de los propuesto por O'Neill y Reese (1988).

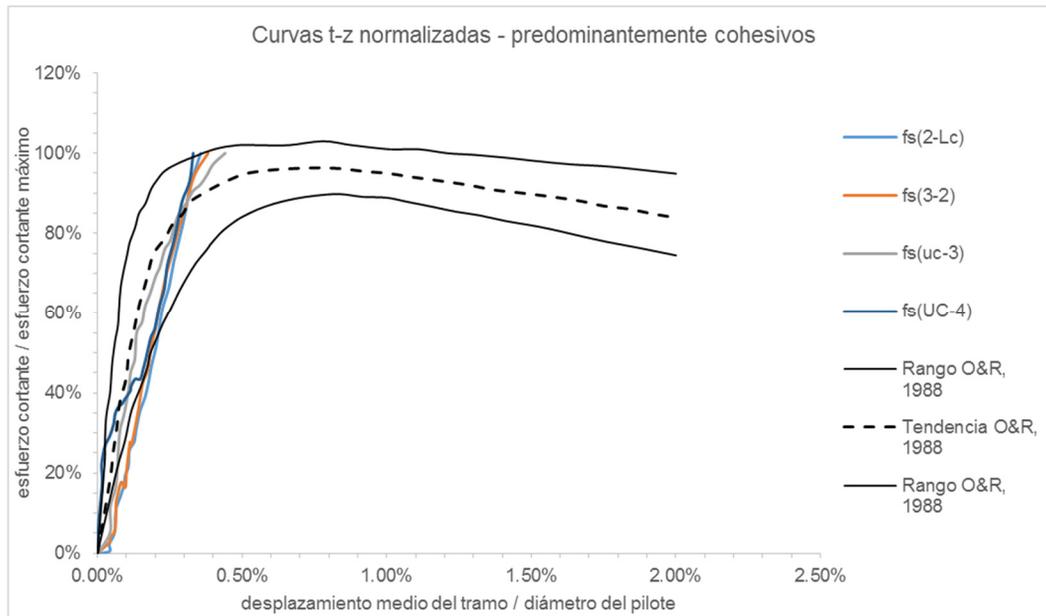


Figura 58. Curvas t-z normalizadas para materiales predominantemente cohesivos

Fuente: elaboración propia

En la **Figura 59**, se presentan las curvas t-z para los tramos con comportamiento predominantemente granular. Las gráficas superpuestas de O'Neill y Reese (1988) corresponden a materiales granulares con comportamiento de endurecimiento por deflexión. Como se puede apreciar en la Figura, los resultados provenientes de la prueba de carga se ajustan hacia el rango superior de las tres curvas dadas por O'Neill y Reese (1988). La pseudo deformación promedio a la cual se alcanzó la capacidad máxima de fricción unitaria fue igual a 0,17%.

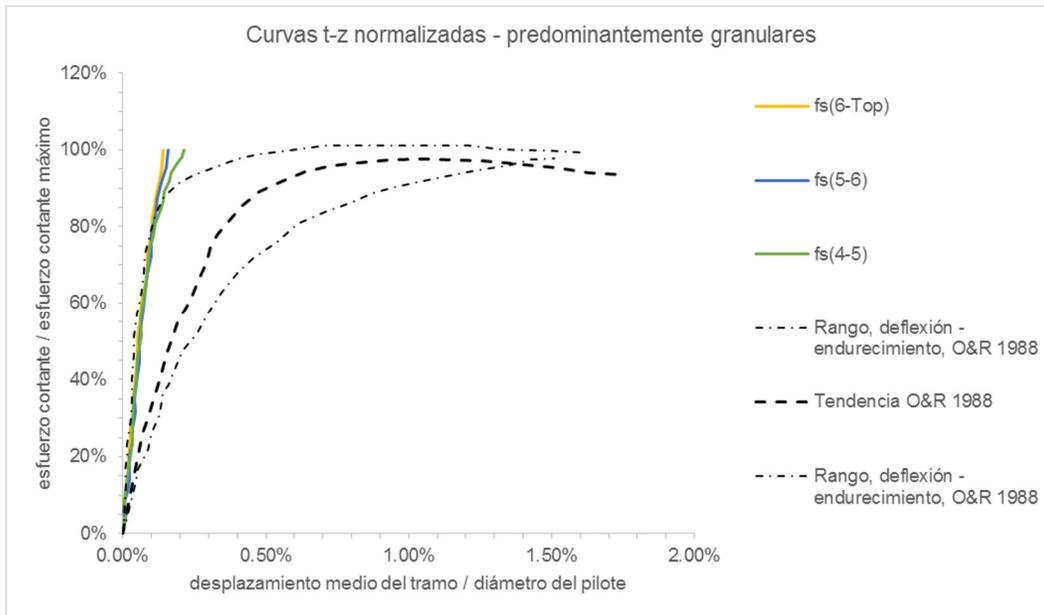


Figura 59. Curvas t-z normalizadas – predominantes granulares

Fuente: elaboración propia

3.7 Retro cálculo para la determinación de parámetros de asentamiento

En las ecuaciones para el cálculo de asentamientos dada por Vesic (1977) existen tres factores de influencia empíricos ζ , I_p e I_s , a continuación, se presentan despejados a partir de las ecuaciones originales de Vesic (1977).

$$\zeta = \frac{\left(\frac{S_1 \cdot A_p \cdot E_p}{L} - Q_p \right)}{Q_s} \quad (14)$$

$$I_p = \frac{S_2 \cdot E_s}{q_p \cdot D \cdot (1 - \mu_s^2)} \quad (15)$$

$$I_s = \frac{S_3 \cdot E_s}{\frac{Q_s}{\rho \cdot L} \cdot D \cdot (1 - \mu_s^2)} \quad (16)$$

Se aclara que, dado que la metodología de transferencia de carga empleada tiene como premisa el contacto permanente entre suelo y concreto en su rango elástico, es decir que no hay deslizamiento relativo, tanto el acortamiento elástico como el asentamiento por fuste resultan iguales bajo esta aproximación. Por tal motivo el asentamiento total se calcula como la suma del asentamiento por punta S_1 y otro de los dos asentamientos S_2 o S_3 .

En la **Tabla 21**, se presenta un resumen de los parámetros requeridos como insumos en las ecuaciones anteriores en el rango elástico, por lo tanto, se debe tener en cuenta que no son valores a la falla del pilote.

Tabla 21. Parámetros para cálculo de asentamientos por medio de la metodología de Vesic (1977).

Parámetro	Valor
S_1 , asentamiento elástico del pilote	25,35 mm
S_2 , asentamiento debido a la punta del pilote	5,00 mm
S_3 , asentamiento debido al fuste del pilote	25,35 mm
D, diámetro del pilote (se tomó el promedio ponderado)	1,68 m
L, longitud del pilote	70,0 m
ρ , perímetro del pilote	5,29 m
$A_p E_p$, rigidez del pilote (se tomó el promedio ponderado)	44.480 MN
Q_p , carga en la punta del pilote	333 kN
Q_s , carga por resistencia de fricción	27.775 kN
q_p , carga unitaria de punta	150 kPa
E_s , módulo de elasticidad del suelo en o bajo la punta	241 MPa
μ_s , relación de Poisson del suelo	0,4

Fuente: Elaboración propia.

El resultado de calcular las ecuaciones de Vesic (1977) dan como resultado un valor de ξ igual a 0,57, lo cual indica un punto intermedio entre una distribución uniforme (valor teórico igual a 0,50) y una creciente linealmente (valor teórico igual a 0,67) para la fricción unitaria.

El factor de influencia I_p resultó igual a 5,69, sin embargo, este valor elevado se presenta debido a que el valor de capacidad unitario empleado era el correspondiente a un asentamiento en punta de 5 mm, cuando se emplea el valor para la capacidad máxima alcanzada en la prueba, para el diámetro con promedio ponderado de 1,68 m, el valor de q_p es de 3191 kPa, con lo cual el valor de I_p es de 0,27, el cual es menor que el valor recomendado de 0,85.

Finalmente, el valor de I_s se calculó igual a 57,7 el cual resulta elevado con el valor propuesto por Vesic (1977), quien estableció una expresión a partir de la relación L/D , obteniendo en este caso un valor de I_s igual a 4,26.

Capítulo V

CONCLUSIONES

Con base en los resultados de las lecturas con SoniCaliper y las curvas de vaciado del concreto fue posible construir un perfil de distribución de los diámetros del pilote en profundidad, conservando en el nuevo modelo geométrico, el volumen alcanzado en la realidad.

A partir de los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión del concreto, se estableció mediante correlación el valor del módulo de elasticidad. Este último parámetro, en conjunto con el área de la sección calculada con base en los diámetros establecidos previamente, permitió calcular un valor de rigidez E.A. Sin embargo, mediante la aplicación de método de la Rigidez Tangencial de Fellenius (1989) con base en los registros de los Strain Gage se establecieron los valores de rigidez que se emplearon en los cálculos posteriores. Si bien los resultados entre las dos rigideces calculadas no eran muy diferentes, en todos los casos la rigidez calculada por medio de la correlación con los ensayos de f'_c siempre fueron mayores, en parte se debe a que los ensayos de resistencia a la compresión se realizaron sobre materiales extraídos antes de fundirlos en el pilote, mientras que el cálculo de la Rigidez Tangencial se hizo con base en el comportamiento in – situ de los materiales.

A partir de los registros de los Strain Gages y las rigideces establecidas en los tres tramos de pilote (superior, intermedio e inferior, definidos por las posiciones de los dos niveles de celdas) se pudieron calcular las fuerzas actuantes al nivel de los Strain Gage. Con dichas

fuerzas se pudo establecer por medio de equilibrio de fuerzas la presencia de una fuerza externa, en este caso aportada por el suelo mediante fricción. Con base en lo anterior, se construyeron curvas de transferencia de cargas t-z para cada uno de los tramos entre Strain Gage y en los tramos entre Strain Gage y celda o entre Strain Gage y puntal del pilote o cabeza del pilote.

Con base en la curva carga – desplazamiento se pudo deducir que porción de la curva era aportada por fuste y cual por punta. Se realizó de esta forma teniendo en cuenta que no se pudieron emplear las mediciones del primer nivel de Strain gage y del Embedded Compression Telltale, dado que sus resultados no eran coherentes. Se estima que dichas mediciones se alejaron del comportamiento esperado teniendo en cuenta las afectaciones presentes hacia el tramo inferior del pilote, identificadas mediante el ensayo CSL. Sin embargo, se pudo establecer la curva de capacidad por punta unitaria vs desplazamiento, habida cuenta que en la curva carga – desplazamiento de la celda se diferenciaban ininteligiblemente el comportamiento de punta con el de fuste, siendo el comportamiento de punta el que mostraba el desarrollo de capacidad inclusive a grandes desplazamientos, todos ellos desarrollándose a una tasa constante de incremento de capacidad de carga para un mismo incremento de desplazamiento.

Una forma de validar las curvas t-z y q-w fue mediante la reproducción de los comportamientos de las curvas originales de carga – desplazamiento para las dos etapas de carga en los tres tramos. Posteriormente, se emplearon las curvas t-z y q-w para estimar el comportamiento de la curva carga – asentamiento equivalente desde la cabeza del pilote. La curva final construida tiene tres zonas de asentamiento: una con predominio del

comportamiento por fuste en todo el pilote, cuya capacidad se va agotando a medida que van fallando por fricción los diferentes tramos; en la siguiente zona predomina la capacidad por punta, la cual continúa desarrollandose. Por otra parte, la capacidad por fuste continúa actuando, sin embargo, ya no hay incremento en su capacidad a mayor desplazamiento; la última zona es la falla generalizada tanto de fuste como de punta.

Se construyeron curvas de transferencia de cargas normalizadas con el diámetro y con la capacidad máxima alcanzada. De esta manera, se pudieron comparar con las curvas propuestas por O'Neill y Reese (1989), según las cuales de forma general hubo coincidencia en los comportamientos identificados como granulares y cohesivos. Se resalta el hecho que las pseudo-deformaciones alcanzadas fueron bajas en las curvas t-z, la razón de fondo puede estar en que para la etapa de carga 2 no se alcanzaron a fallar todos los estratos.

Se construyeron las curvas de alfa y beta, con lo cual se concluye que para el caso de alfa se requieren un mayor número de ensayos puesto que a pesar que se observó una tendencia lineal decreciente de alfa respecto a S_u , su comportamiento no coincide con las recomendaciones de la NSR-10 o del CCP-14 con lo cual, para establecer una curva de alfa con mayor certeza se requiere un mayor número de pruebas de carga. En cuanto a la metodología beta, los valores calculados se agruparon alrededor de una tendencia central en 0,27 a cualquier profundidad, sin presentar sesgos aparentes, el valor determinado es similar al valor de 0,25 planteado por el CCP-14 para profundidades superiores a los 26 m. Faltaría el análisis de pruebas de carga adicionales con materiales granulares en superficie

para comprobar que se mantiene un valor constante y no una variación como la proponen O'Neill y Reese (1989).

Recomendaciones

Promover la ejecución de pruebas de carga en pilotes en las diferentes zonas dadas por el estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá.

Promover la ejecución de pruebas de carga bidireccionales en pilotes con la finalidad de respaldar la implementación de metodologías de diseño basadas en confiabilidad para la obtención de factores de reducción.

Con el propósito de discretizar y modelar de una mejor forma la interacción suelo-estructura para el pilote de prueba se recomienda la instalación de un mayor número de niveles de Strain Gage, su cantidad debería ser similar al número de estratos.

Estimar las propiedades del concreto in-situ mediante la inclusión de termocúplas con las cuales se puede obtener un registro histórico de la variación de temperatura dentro del pilote. Con base en ello se pueden construir curvas de curado y envejecimiento con lo cual se pueden estimar parámetros de resistencia y deformación del concreto. Para realizar estas aproximaciones es necesario llevar un control de la variación de la temperatura para muestras testigo, a las cuales se les ejecutan ensayos de resistencia y deformación para diferentes edades del concreto.

Se recomienda continuar con la ejecución de ensayos con SoniCaliper o con equipos similares para conocer la geometría de la excavación antes de la fundición.

El ensayo CSL es necesario para la evaluación de la calidad del concreto In-Situ, sin embargo, en aquellos sitios con una evaluación preliminar con defectos o anomalías significativas, se deberían ejecutar pruebas adicionales, preferiblemente directas, como lo es la extracción de núcleos de concreto para realizar una verificación visual de los materiales y poder ejecutar ensayos a compresión. O en caso que las afectaciones sean superficiales, realizar excavaciones alrededor del pilote para realizar una observación directa.

Se recomienda realizar investigaciones del comportamiento carga – asentamiento del pilote con carga sostenida en el tiempo para estudiar procesos como Creep y consolidación.

Para la prueba de carga del estudio cada nivel de Strain Gage contaba con cuatro de estos instrumentos dispuestos de forma diametralmente opuesta. Sería de interés profundizar en la variación de las acciones internas (fuerzas axiales, cortantes, momentos flexionantes) del pilote con base en las mediciones de los Strain Gage.

Para el análisis de futuras pruebas de carga bidireccionales sería de interés profundizar en el comportamiento del pilote durante la descarga en cada etapa de carga y su equivalencia para el pilote cargado desde la cabeza.

La calibración de modelos numéricos con base en los resultados de pruebas de carga puede facilitar el estudio de escenarios difíciles de realizar mediante modelación física como lo es

el comportamiento de un grupo de pilotos para diferentes arreglos y geometrías, así como para diferentes perfiles de suelo.

Realizar pruebas de carga a escala reducida con lo cual se pueden modelar procesos de carga para escenarios en el que existen estratos con presencia de gases, tal como se ha identificado en algunos estudios dentro de Bogotá D.C.

Bibliografía

- Amini, A., Fellenius, B. H., Sabbagh, M., Naesgaard, E., & Buehler, M. (2008). Pile Loading Test at Golden Ears Bridge.
- ASTM. (s.f.). *Standar Test Methods for Deep Foundations Under Bi-Directional Static Axial Compressive Load*.
- Brown, D. A., & Shi, L. (2001). Load Testing of Deep Foundations Using Osterberg Cell (O-CELL) Test Method.
- Dai, G., & Gong, W. (2011). Application of bi-directional static loading test to deep foundations.
- Eslami, A., & Fellenius, B. H. (1997). Pile capacity by direct CPT and CPTu methods applied to 102 case histories. *34*.
- Fellenius, B. H. (1990). Static or Dynamic Test - Which to trust? *8(4)*.
- Fellenius, B. H. (2001). Discussion of "Side Resistance in Piles and Drilled Shafts" by Michael W. O'Neill. *128(5)*.
- Fellenius, B. H. (2002). Determining the True Distributions of Load in Instrumented Piles. *2*.
- Fellenius, B. H. (2007). Bored Piles and Bi-Directional Load Test.
- Fellenius, B. H. (2013). Suggested t - z and q - z functions for load - movement response.
- Fellenius, B. H. (2018). *Bases para el Diseo de Fundaciones*. PileBuck International.
- Fellenius, B. H. (2018). Discussion of "Development of Axial Pile Load Transfer Curves Based on Instrumented Load Tests" by Cécilia Bohn, Alexandre Lopes dos Santos, and Roger Frank.
- Fellenius, B. H., & Altaee, A. A. (1995). Critical depth: how it came into being and why it does not exist.
- Fellenius, B. H., & Ochoa, M. (2009). Testing and Dsign of a Piled Foundation Project A Case History.
- Fellenius, B. H., Altaee, A., Kulesza, R., & Hayes, J. (1999). O-Cell Testing and FE Analysis of 28 Dep Barrette in Manila, Phillipines. *125(7)*.
- FOPAE. (2010). *Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sismo resistente de edificaciones*. Bogotá, D.C.

- Gabrielaitis, L., Papinigis, V., & Zarzojus, G. (2013). Estimation of Settlements of Bored Piles Foundations.
- Lee, J.-S., & Park, Y.-H. (2007). Equivalent pile load-head settlement curve using a bi-directional pile load test. *Computer and Geotechnics* 35, 124 - 133.
- LOADTEST. (2006). *Report on Drilled Shaft Load Testing (Osterberg Method)*.
- Loehr, J. E., Lutenecker, A., Rosenblad, B., & Boeckmann, A. (2017). *Geotechnical Site Characterization*. Washington, D.C.: Geotechnical Engineering Circular No. 5.
- Niazy, F. S., & Mayne, P. W. (2014). Axial pile response of bidirectional O-cell loading from modified analytical elastic and downhole shear wave velocity.
- Osterberg, J. O. (1998). The Osterberg load test method for bored and driven piles - the first ten years.
- Rodríguez, J. A., & Velandia, E. (2009). Optimización de cimentación en suelos blandos de Bogotá.
- Salem, H., & Fellenius, B. H. (2017). Bidirectional pile testing: what to expect.
- Sarmiento, C., & León, D. (2016). *Caracterización geomecánica estática y dinámica a partir de exploración directa, indirecta y ensayos en el sitio de experimentación geotécnica en la escuela colombiana de ingeniería (SEGECI) (Tesis de Maestría)*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Seo, H., Moghaddam, R. B., & Lawson, W. D. (2016). Assessment of methods for construction of an equivalent top loading curve from O-cell test data.
- Stuedlein, A. W., & Qiang, L. (2018). *Effects of High Strength Steel Bars and Steel Casing on the Response of Drilled Shafts*. Salem: Oregon Department of Transportation.