

**INFORME FINAL
PROYECTO HC-1619.3**

**ESTUDIO GEOTÉCNICO-ESTRUCTURAL DEL COMPORTAMIENTO
DE LOS APOYOS MARGINALES DE LOS PUENTES PIGUA I, II Y III
EN VILLAHERMOSA, TABASCO.**

**Informe final
Agosto 2016**

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Coordinación de Hidráulica

Subcoordinación de Obras y Equipos
Hidráulicos

Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Dirección General de Carreteras

Participantes:

Javier Avilés López
José Alfredo González Verdugo
Ricardo Andrés Álvarez Bretón
María Joselina Clemencia Espinoza Ayala
Amparo Rosario Pérez Salazar
Juan Antonio López Orozco

| | |
|--|----|
| 1. Objetivo | 3 |
| 2. Antecedentes..... | 3 |
| 3. Caracterización granulométrica en el tramo en estudio..... | 4 |
| 4. Exploración Geotécnica | 14 |
| 5. Exploración geofísica..... | 24 |
| 5.1. Sondeos Eléctricos Verticales | 24 |
| 5.2. Prospección sísmica | 29 |
| 5.3. Tomografía geoelectrica..... | 33 |
| 5.4. Sísmica con la técnica DOWN-HOLE..... | 38 |
| 6. Definición del modelo Geotécnico..... | 43 |
| 6.1. Fisiografía | 43 |
| 6.2. Geología | 45 |
| 6.3. Síntesis de los estudios realizados..... | 49 |
| 7. Determinación de las condiciones actuales del sistema de apoyo existente y de las solicitudes requeridas para el proyecto de estabilización | 55 |
| 7.1. Análisis de bajada de cargas..... | 56 |
| 7.2. Análisis de capacidad de carga..... | 62 |
| 8. Instrumentación electrónica para monitoreo de seguridad estructural..... | 67 |
| 8.1. Análisis preliminar | 67 |
| 8.2. Determinación de la estrategia de monitoreo | 69 |
| 8.3. Desarrollo de la red de sensores..... | 73 |
| 8.4. Instalación y operación del sistema de monitoreo | 73 |
| 8.4.1. Instalación del transmisor automático de datos (TDA) | 74 |
| 8.4.2. Instalación de inclinómetro | 77 |
| 8.4.3. Instalación de extensómetro..... | 78 |
| 8.4.4. Instalación de inclinómetros..... | 79 |
| 8.4.5. Actualizaciones de la estación climatológica mixta | 81 |
| 8.5. Presentación de datos..... | 82 |
| 8.6. Conclusiones..... | 90 |

| | |
|--|-----|
| 9. Análisis y propuestas conceptuales de solución | 91 |
| 10. Referencias..... | 95 |
| Anexo A. Reportes de las pruebas de laboratorio para la caracterización sedimentológica de los sedimentos en el cauce..... | 96 |
| Distribución granulométrica..... | 97 |
| Densidad de sólidos | 143 |



1. Objetivo

Se realizarán los estudios y análisis en materia de ingeniería geotécnica – estructural para definir de manera conceptual la solución a la problemática de los deslizamientos en la margen derecha de los puentes, los cuales muestran signos de inestabilidad y ponen en riesgo su operación y la seguridad de los usuarios.

2. Antecedentes

El flujo vehicular en la carretera federal 180 que une la Ciudad de Villahermosa con Ciudad del Carmen es cada vez es más intenso, es por esto que la Secretaría de Comunicaciones y Transportes decidió construir un puente carretero (La Pigua III) adicional a los primeros dos puentes en el cruce con el río Carrizal (La Pigua I y II).

Los puentes La Pigua I, II y III se localizan en una zona susceptible a la erosión en las márgenes del río Carrizal, por lo que en eventos extraordinarios se teme una erosión considerable.

Después de la puesta en marcha del puente La Pigua III, se observaron algunos desplazamientos verticales y horizontales en los apoyos del puente, principalmente en el cabezal de la margen derecha se han manifestado considerables desplazamientos, motivo por el cual la SCT decidió hacer una revisión del proyecto ejecutivo, del proyecto constructivo y de las anomalías medidas en el sitio de interés.

Por otro lado en el 2008 derivado del estudio y proyecto para la protección marginal del río Carrizal a la altura de la colonia José María Pino Suárez (Tierra Colorada, 2ª Etapa), aguas arriba del puente La Pigua I y II, se propuso el recubrimiento de la margen derecha por medio de un enrocamiento, así como una pantalla de pilotes y micropilotes para proteger por la margen derecha el cono de derrame de los puentes La Pigua I y II. A mediados del mes de noviembre de 2012, se presentó un desplazamiento de la pantallas de pilotes y micropilotes, que provocó un desplome de los pilotes de 1.20 m y de los micropilotes de 0.91 m respecto a la vertical. El asentamiento generó que el cono de derrame del puente La Pigua II existente se fracturará y asentará 1.25 m, con fuga del material del terraplén de la vialidad superior del mismo puente. En el diagnóstico realizado en el 2013 sobre la misma problemática, se menciona que sobre el apoyo en la margen derecha del puente La Pigua III, en esa fecha en proceso de construcción, se comienza a tener un “impacto negativo”, que recomienda “debe atenderse a la brevedad posible, porque el apoyo es un elemento primario en nivel de importancia para el paso superior vehicular”.

En la visita realizada en septiembre del año 2015 a solicitud de la SCT, especialistas del IMTA detectaron indicios que el apoyo de margen derecha del puente La Pigua III, ya en plena operación, ha mostrado signos de inestabilidad, desplazándose y/o cabeceando hacia el cauce, situación que fue confirmada por personal técnico de la SCT, quienes incluso han monitoreado los desplazamientos.

3. Caracterización granulométrica en el tramo en estudio

Con la finalidad de determinar las características de los materiales depositados en el cauce del río Carrizal en la zona donde se ubica el sistema de puentes La Pigua, se realizó una campaña de exploración sedimentológica consistente en seis estaciones de muestreo, las cuales se orientaron transversalmente al río.

De las seis estaciones de muestreo, tres (M1 a M3) se ubicaron aguas arriba de los puentes la Pigua y las tres restantes (M4 a M6) se ubicaron aguas abajo, distribuyéndose de la siguiente forma:



Figura 3.1. Estaciones de muestreo.

Cada estación de muestreo se conformó en total por tres muestras alteradas obtenidas del fondo del cauce, estas muestras se distribuyeron en cada margen y la restante al centro del cauce. En la figura 5.2 se muestran las muestras tomadas por sección y su nomenclatura (MD= margen derecha, C= centro y MI= margen izquierda).



Figura 3.2. Puntos de muestreo.

Para el muestreo se utilizó el equipo siguiente:

- Lancha tipo ZODIAC, Marca: AVON BS MA 16 Modelo: ROVER R3-80, Potencia: 20 H.P. Capacidad máxima: 6 personas o 450 kg, impulsada por motor de gasolina fuera de borda marca Evinrude, modelo Fisherman con potencia de 5.5 HP o por motor eléctrico fuera de borda marca MotorGuide PowerPlus Modelo T 30 de 12 Volts y 7 velocidades, 5 de avance y 2 de reversa alimentado por una batería de ciclo profundo o gel de alto rendimiento marca Optima Batteries Johnson Controls y una batería marina de arranque marca Duralast.



Figura 3.3. Lancha para muestreo en el cauce.

- Draga tipo Ekman, bolsas de plástico, etiquetas y plumones indelebles.



Figura 3.4. Draga tipo Ekman utilizada.

El muestreo del material del fondo del cauce se realizó con draga tipo Ekman con el siguiente procedimiento:

1. Inicialmente se prepara la draga en la superficie de la lancha abriendo las mandíbulas y colocando los seguros del sistema de cierre automático.



2. Se baja la draga, cuidando la verticalidad, hasta tocar con el fondo del embalse.



3. Una vez ya en el fondo, se tensa ligeramente el cable de sostenimiento de la draga y se lanza el mensajero con fuerza para activar el sistema de cierre automático.
4. Antes de proceder al levantamiento de la draga es recomendable dar un par de jalones al cable para asegurar la activación del cierre automático.

5. Se iza la draga de manera lenta con la finalidad de no perder muestra del sedimento en el levantamiento.
6. Ya con la draga en la superficie de la lancha, se revisa que haya sido tomada la muestra del sedimento en cantidad suficiente, lo cual depende del buen funcionamiento del sistema de cierre automático. En ocasiones se requieren varios lances para completar la cantidad necesaria de sedimento.



7. Si la draga trae la cantidad suficiente de muestra, entonces se elimina el exceso de agua y se procede a coleccionar el sedimento en bolsas de plástico adecuadas. Finalmente se etiqueta e identifica la muestra para fines de laboratorio.



8. Todas las muestras tomadas, fueron georeferenciadas y correctamente empaquetadas, identificadas y protegidas para su traslado al laboratorio para su caracterización sedimentológica.



La caracterización sedimentológica consistió en realizar la separación de las distintas fracciones que forman la muestra de sedimento, utilizando para tal fin una serie de mallas normalizadas, cada una con una abertura definida.

La caracterización se realizó de acuerdo con lo indicado en la norma *ASTM D422. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*, conocida en español como caracterización granulométrica. La caracterización genera como resultados una curva granulométrica que muestra en las abscisas el tamaño de la abertura de la malla correspondiente y en el eje de las ordenadas el porcentaje en peso que pasa dicha abertura. A partir de esa gráfica se determinaron los diámetros característicos (D_{10} , D_{30} , D_{50} y D_{60}).



**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO
(VÍA SECA)**

Sitio: Rio Carrizal
Ubicación: Villahermosa, Tabasco. Pozo: - Id. de Lab.: CPTEaA
Muestra: M3 Centro UTM X: 509601 Profundidad: - m
UTM Y: 1992541 Fecha: 25/05/2016

| MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | | OBSERVACIONES |
|----------------|----------------|-----------------|--------------------|-----------------------------------|---------------|--|
| | | | | MUESTRA < No. 4 | MUESTRA TOTAL | |
| | | | | 100.00 | | Análisis efectuado con la muestra total de 2000.00 g Humedad testigo Grava, w = - % Tierra, w = - % |
| No. 4 | 4.75 | 7.40 | 0.37 | 99.63 | | |
| Sumas = | | 7.4 | 0.37 | -----> % MATERIAL MENOR QUE No. 4 | | |
| | | | | -----> % DE GRAVA | | |
| | | | | 100.00 | 99.63 | |
| 10 | 2.000 | 5.20 | 0.26 | 99.74 | 99.37 | |
| 20 | 0.850 | 10.00 | 0.50 | 99.24 | 98.87 | |
| 40 | 0.425 | 133.30 | 6.69 | 92.55 | 92.20 | Análisis efectuado con muestra de 1992.50 g del material menor que la malla No. 4. |
| 60 | 0.250 | 1515.20 | 76.05 | 16.50 | 16.44 | |
| 100 | 0.150 | 183.80 | 9.22 | 7.28 | 7.25 | |
| 200 | 0.075 | 139.00 | 6.98 | 0.30 | 0.30 | % MAT. FINO MENOR QUE 200 |
| Sumas | | 1986.50 | 99.70 | | | |
| Charola | | 6.00 | 0.30 | | | CHAROLA No. 1 |
| Suma = | | | 100.00 | | | |

Observaciones: _____
Operador: J. Manuel Lopez Calculó: J. F. Montiel Fecha: 25/05/2016

Figura 3.5. Reporte de la prueba para la caracterización granulométrica.



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal Id. de Lab.: CPTEaA
 Ubicación: Villahermosa, Tabasco. Pozo: - Profundidad: - m
 Muestra: M3 Centro UTM X: 509601 Fecha: 25/05/2016
 UTM Y: 1992541

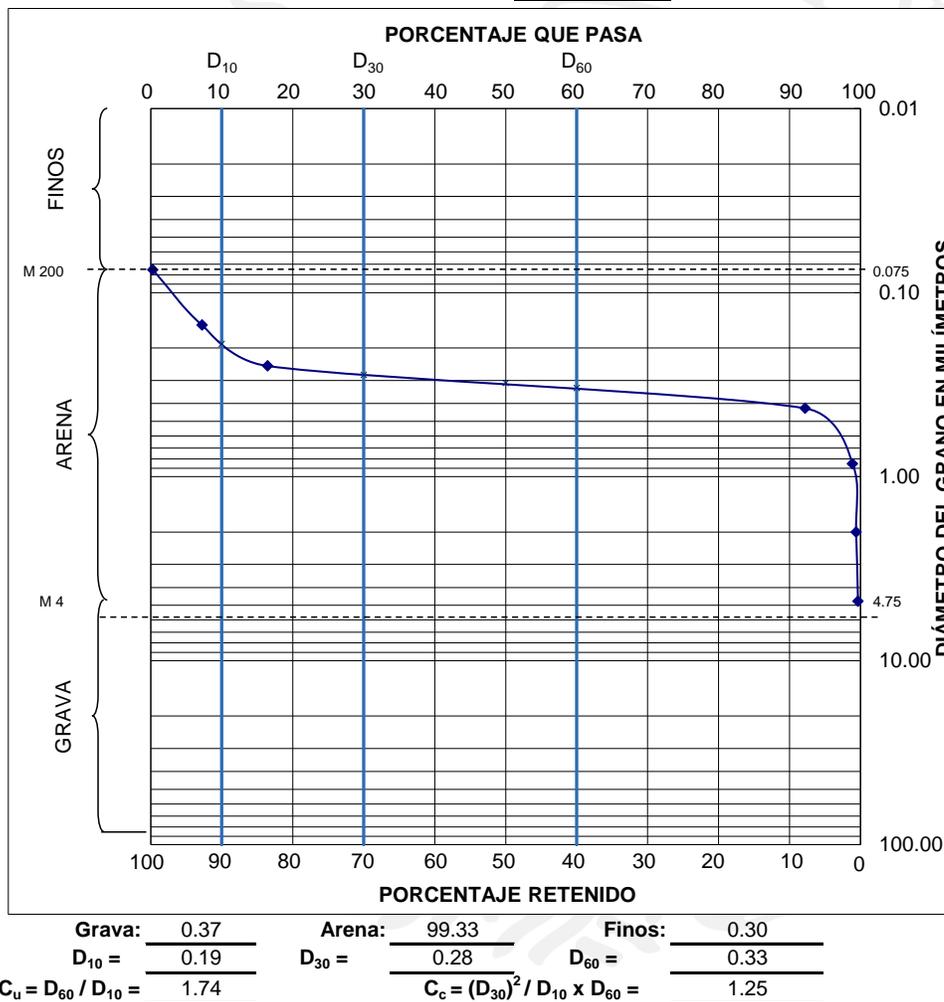


Figura 3.6. Gráfica granulométrica.

La caracterización sedimentológica se complementó con la determinación de la densidad de sólidos de acuerdo con la norma *ASTM D584. Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*, para materiales finos y arenas.



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

DENSIDAD DE SÓLIDOS

Sitio: Rio Carrizal Id de lab.: MDaa0.5KM
 Ubicación: Villahermosa, Tabasco. Pozo: _____ Profundidad: _____ m
 Muestra: M5 M. Derecho UTM X: 510165 Fecha: 25/05/2016
 UTM Y: 1992321

| | Material < que la malla N°4 | | | Mat > que la malla N°4 | |
|---|-----------------------------|--------|--|---------------------------------------|---|
| Prueba N° | 1 | 2 | | Peso grava húmeda (g) | - |
| Matraz N° | A | B | | Peso grava seca (g) | - |
| W _{mws} (g) | 838.69 | 810.24 | | Peso agua absorbida (g) | - |
| Temperatura | 24.30 | 24.30 | | Volumen desalojado (cm ³) | - |
| W _{mw} (g) | 657.30 | 677.94 | | % de absorción | - |
| W _{ms} (g) | 447.21 | 390.60 | | Volumen real de sólidos | - |
| W _m (g) | 157.21 | 178.60 | | Densidad de masa, S _m | - |
| W _s =W _{ms} -W _m (g) | 290.00 | 212.00 | | Densidad de sólidos, S _s | - |
| W _s +W _{mw} -W _{mws} (g) | 108.61 | 79.70 | | | |
| S _s | 2.67 | 2.66 | | | |
| Promedio S _s | 2.67 | | | | |

W_m = Peso del matraz antes de agregar los sólidos.

W_{ms} = Peso del matraz después de agregar los sólidos.

W_{mws} = Peso del matraz + agua+ muestra a t°.

W_{mw} = Peso del matraz + agua a t°(de la curva de calibración).

W_s = Peso del suelo seco.

$$S_s = \text{Densidad de sólidos} = \frac{W_s}{W_s + W_{mw} - W_{mws}}$$

Observaciones: _____

Operador: JOSE MANUEL LÓPEZ Cálculo: J. F. MONTIEL Fecha: 25/05/2016

Figura 3.7. Reporte de la prueba para la obtención de la densidad de sólidos.

A continuación se presenta una tabla con el resumen de los resultados obtenidos de la caracterización sedimentológica de los materiales muestreados en el cauce del río Carrizal en la zona del sistema de puentes La Pigua. Los reportes con los detalles de las pruebas se presentan en el anexo A.

Tabla 3.1. Resumen de resultados de la caracterización sedimentológica.

| Sección | Muestra | Ss | G (%) | S (%) | F (%) | D ₁₀ (mm) | D ₃₀ (mm) | D ₅₀ (mm) | D ₆₀ (mm) | Cu | Cc | Clasificación S.U.C.S. |
|---------|---------|------|-------|-------|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------|------|------------------------|
| M1 | M1 MD | 2.67 | 0.77 | 40.36 | 58.87 | 0.03 | 0.04 | 0.062 | 0.08 | 3.12 | 0.74 | ML |
| | M1 C | 2.68 | 0.00 | 99.77 | 0.23 | 0.16 | 0.26 | 0.305 | 0.33 | 2.13 | 1.32 | SP |
| | M1 MI | 2.66 | 0.00 | 34.77 | 65.23 | 0.03 | 0.04 | 0.054 | 0.07 | 2.32 | 0.75 | ML |
| M2 | M2 MD | 2.68 | 0.54 | 36.05 | 63.42 | 0.02 | 0.04 | 0.054 | 0.07 | 3.09 | 0.82 | ML |
| | M2 C | 2.68 | 0.33 | 99.56 | 0.11 | 0.27 | 0.35 | 0.43 | 0.49 | 1.81 | 0.90 | SP |
| | M2 MI | 2.68 | 0.00 | 34.01 | 65.99 | 0.02 | 0.03 | 0.052 | 0.78 | 2.58 | 0.78 | ML |
| M3 | M3 MD | 2.68 | 0.00 | 37.24 | 62.76 | 0.03 | 0.04 | 0.057 | 0.07 | 2.52 | 0.87 | ML |
| | M3 C | 2.67 | 0.37 | 99.33 | 0.30 | 0.19 | 0.28 | 0.31 | 0.33 | 1.74 | 1.25 | SP |
| | M3 MI | 2.67 | 0.00 | 36.82 | 63.18 | 0.03 | 0.04 | 0.059 | 0.07 | 2.19 | 0.83 | ML |
| M4 | M4 MD | 2.68 | 0.31 | 38.80 | 60.90 | 0.02 | 0.04 | 0.058 | 0.70 | 3.13 | 0.83 | ML |
| | M4 C | 2.67 | 0.00 | 98.80 | 0.20 | 0.23 | 0.29 | 0.315 | 0.33 | 1.43 | 1.07 | SP |
| | M4 MI | 2.67 | 0.00 | 33.09 | 66.92 | 0.03 | 0.04 | 0.051 | 0.06 | 2.31 | 0.83 | ML |
| M5 | M5 MD | 2.67 | 0.00 | 34.36 | 64.00 | 0.03 | 0.03 | 0.050 | 0.06 | 2.40 | 0.77 | ML |
| | M5 C | 2.67 | 0.00 | 99.50 | 0.50 | 0.10 | 0.18 | 0.26 | 0.29 | 2.85 | 1.07 | SP |
| | M5 MI | 2.66 | 0.00 | 30.28 | 69.72 | 0.02 | 0.03 | 0.044 | 0.06 | 2.75 | 0.82 | ML |
| M6 | M6 MD | 2.67 | 0.00 | 35.08 | 64.92 | 0.03 | 0.04 | 0.051 | 0.06 | 2.48 | 0.79 | ML |
| | M6 C | 2.68 | 0.00 | 99.78 | 0.22 | 0.19 | 0.28 | 0.32 | 0.34 | 1.79 | 1.17 | SP |
| | M6 MI | 2.67 | 0.00 | 99.79 | 0.21 | 0.14 | 0.24 | 0.29 | 0.32 | 2.37 | 1.33 | SP |

Los diámetros en color rojo fueron extrapolados de las curvas correspondientes.

Nomenclatura

- MD** Margen derecha
- C** Centro
- MI** Margen izquierda
- Ss** Densidad de sólidos
- G** Gravas
- S** Arena
- F** Finos
- D_n** Diámetro representativo cuyo *n* en porcentaje es igual o menor a ese diámetro.
- Cu** Coeficiente de uniformidad
- Cc** Coeficiente de curvatura
- S.U.C.S.** Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

4. Exploración Geotécnica

Para determinar la estratigrafía y consistencia de los materiales que conforman el subsuelo en la zona de los estribos de los puentes Pigua I, II y III, se realizó en la margen derecha por parte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), un sondeo SPT (prueba de penetración estándar) con recuperación continua de muestras a 75 m de profundidad. En esta actividad el personal del IMTA realizó los trabajos de supervisión durante la ejecución de dicho sondeo, estando presente durante el proceso de ejecución.

El sondeo se ubicó lo más cercanamente posible a los apoyos o pilas del puente La Pigua III en margen derecha, que son los que se encuentran con problemas de inestabilidad, con el fin de cubrir la zona donde está cimentado dicho puente. En la figura 12.1 se muestra el punto exacto del sondeo mismo que fue referenciado topográficamente con el banco de nivel establecido para fines de este proyecto ubicado en margen izquierda en esa misma zona, con el fin de que tuviera concordancia con el resto de las mediciones que se realizaron. Las coordenadas UTM de este sondeo son $X=509613$, $Y=1992475$ y $Z=4.70$ msnm.



Figura 4.1. Ubicación del sondeo de penetración estándar SPT-1.

El sondeo se realizó a 75 m de profundidad con la técnica conocida como SPT con recuperación continua de muestras. Durante el proceso se determinó el número de golpes N a lo largo de todo el sondeo y el nivel de aguas freáticas. La ejecución se realizó con base en la norma *ASTM D1586 Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils*.



Figura 4.2. Sondeo de penetración estándar SPT-1.



Figura 4.3. Sondeo de penetración estándar SPT-1.

Las muestras recuperadas se identificaron en campo y fueron debidamente etiquetadas y empacadas para su transporte al laboratorio de mecánica de suelos para su caracterización por parte de la SCT, quienes proporcionarían los resultados al IMTA.



Figura 4.4. Aspecto de una muestra obtenida del SPT-1.



Figura 4.5. Conchas de moluscos en una muestra obtenida del SPT-1.



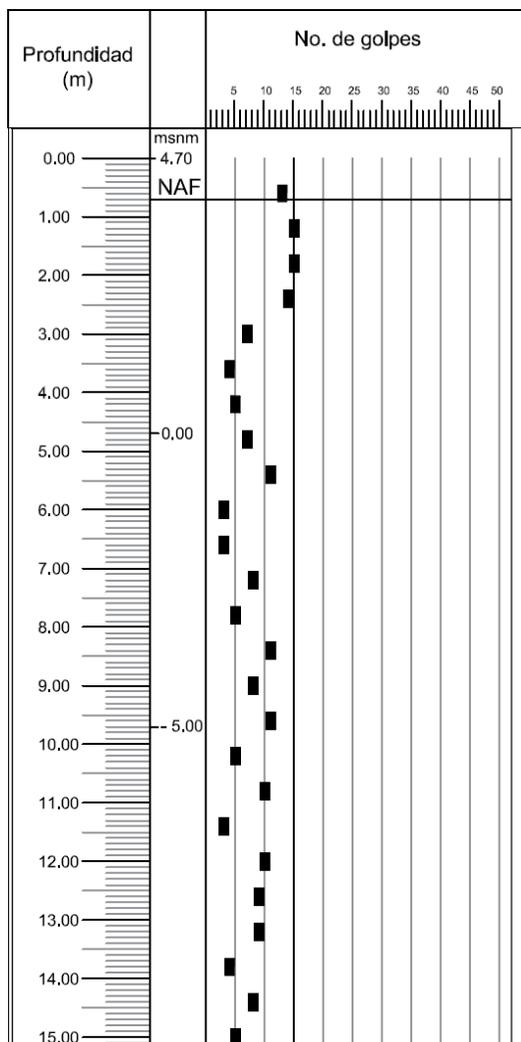
Figura 4.6. Consistencia muy blanda de una muestra obtenida del SPT-1.



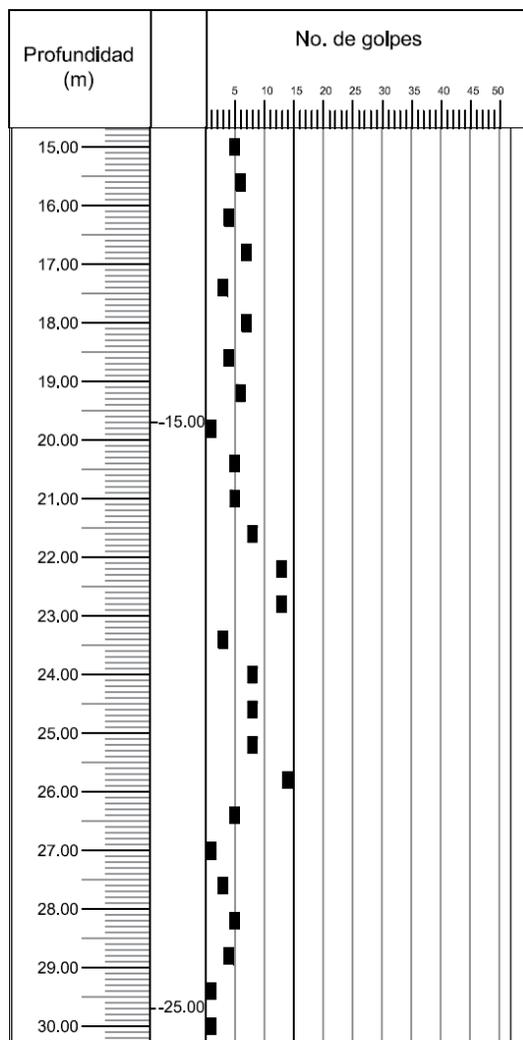
Figura 4.7. Aspecto de las muestras del SPT-1, debidamente empaquetadas e identificadas.

A continuación se muestran los registros obtenidos del sondeo, cada uno de ellos muestra un tramo de 15 m donde se muestran los resultados del número de golpes SPT.

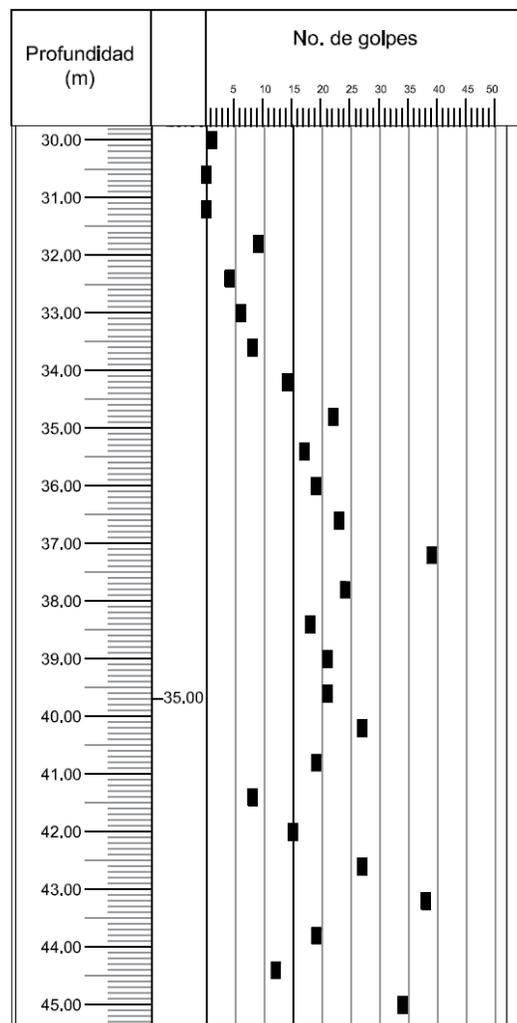
| | | | |
|--|-------------------------|------------------|-------------------------|
| Obra: "REVISIÓN HIDROLÓGICA - HIDRÁULICA DEL RÍO CARRIZAL A LA ALTURA DE SU CRUCE CON EL PUENTE LA FIGUA, PARA IDENTIFICAR PROBLEMAS DERIVADOS DE SU FUNCIONAMIENTO Y ESTABILIZACIÓN DEL APOYO EN LA MARGEN DERECHA" | | | |
| Lugar: | Villahermosa, Tabasco. | Sondeo No: | SPT - 01 |
| Coordenadas: | UTM 509613 E, 1992475 N | Fecha: | 02/06/2016 - 13/06/2016 |
| Elevación: | 4.70 msnm | N.A.F.: | 0.70 msnm |
| Hoja de registro de : | | 0.00 m a 15.00 m | |



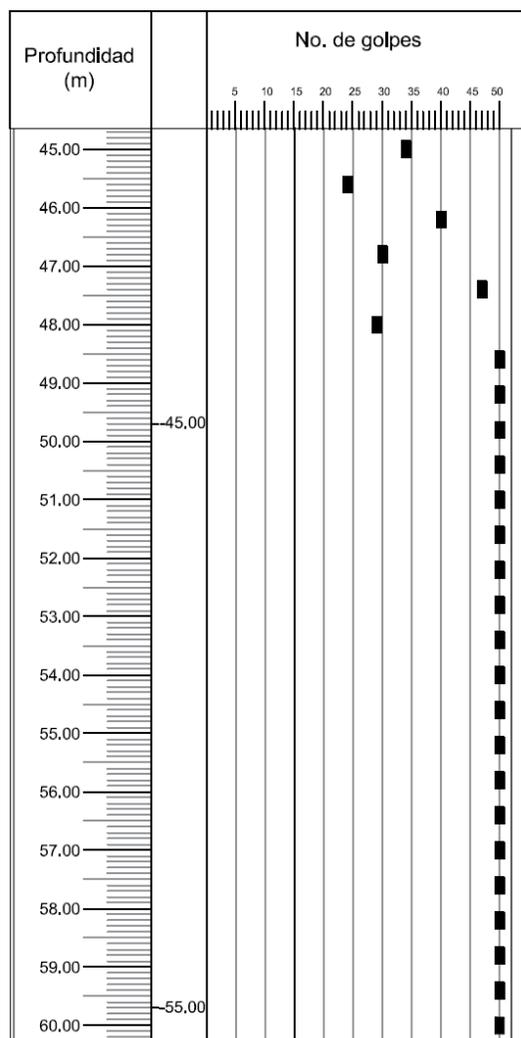
| | | | |
|--|-------------------------|-------------------|-------------------------|
| Obra: "REVISIÓN HIDROLÓGICA - HIDRÁULICA DEL RÍO CARRIZAL A LA ALTURA DE SU CRUCE CON EL PUENTE LA FIGUA, PARA IDENTIFICAR PROBLEMAS DERIVADOS DE SU FUNCIONAMIENTO Y ESTABILIZACIÓN DEL APOYO EN LA MARGEN DERECHA" | | | |
| Lugar: | Villahermosa, Tabasco. | Sondeo No: | SPT - 01 |
| Coordenadas: | UTM 509613 E, 1992475 N | Fecha: | 02/06/2016 - 13/06/2016 |
| Elevación: | 4.70 msnm | N.A.F.: | 0.70 msnm |
| Hoja de registro de : | | 15.00 m a 30.00 m | |



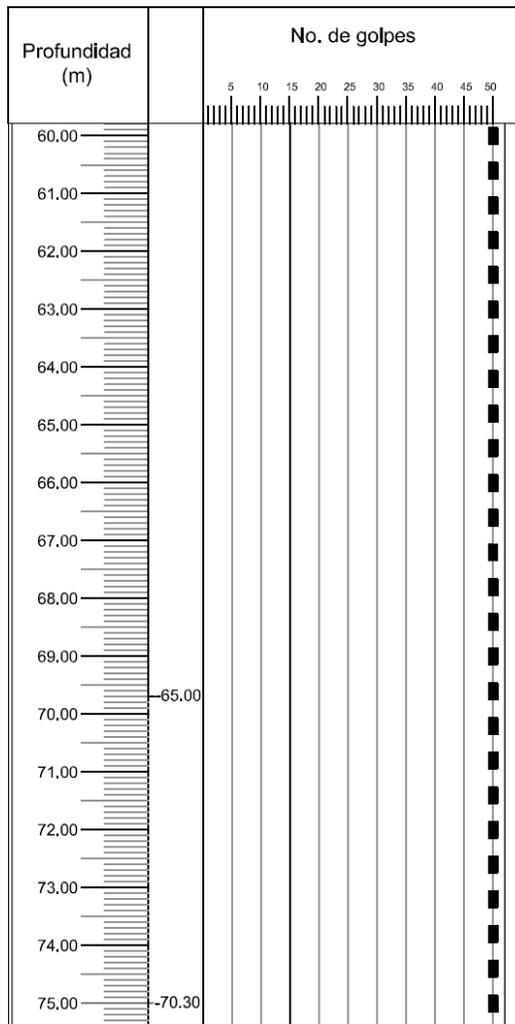
| | | | | |
|--|-------------------------|------------|------------------------|---|
| Obra: "REVISIÓN HIDROLÓGICA - HIDRÁULICA DEL RÍO CARRIZAL A LA ALTURA DE SU CRUCE CON EL PUENTE LA FIGUA, PARA IDENTIFICAR PROBLEMAS DERIVADOS DE SU FUNCIONAMIENTO Y ESTABILIZACIÓN DEL APOYO EN LA MARGEN DERECHA" | | | | |
| Lugar: | Villahermosa, Tabasco. | Sondeo No: | SPT - 01 | Fecha: 02/06/2016 - 13/06/2016 |
| Coordenadas: | UTM 509613 E, 1992475 N | | Profundidad explorada: | 75.00 m |
| Elevación: | 4.70 msnm | N.A.F: | 0.70 msnm | Hoja de registro de : 30,00 m a 45,00 m |



| | | | |
|--|-------------------------|------------|-------------------------|
| Obra: "REVISIÓN HIDROLÓGICA - HIDRÁULICA DEL RÍO CARRIZAL A LA ALTURA DE SU CRUCE CON EL PUEBLO LA FIGUA, PARA IDENTIFICAR PROBLEMAS DERIVADOS DE SU FUNCIONAMIENTO Y ESTABILIZACIÓN DEL APOYO EN LA MARGEN DERECHA" | | | |
| Lugar: | Villahermosa, Tabasco. | Sondeo No: | SPT - 01 |
| Coordenadas: | UTM 509613 E, 1992475 N | Fecha: | 02/06/2016 - 13/06/2016 |
| Elevación: | 4.70 msnm | N.A.F.: | 0.70 msnm |
| Hoja de registro de : | | 45.00 m | a 60.00 m |



| | | | |
|--|-------------------------|------------------------|---|
| Obra: "REVISIÓN HIDROLÓGICA - HIDRÁULICA DEL RÍO CARRIZAL A LA ALTURA DE SU CRUCE CON EL PUENTE LA FIGUA, PARA IDENTIFICAR PROBLEMAS DERIVADOS DE SU FUNCIONAMIENTO Y ESTABILIZACIÓN DEL APOYO EN LA MARGEN DERECHA" | | | |
| Lugar: | Villahermosa, Tabasco. | Sondeo No: | SPT - 01 Fecha: 02/06/2016 - 13/06/2016 |
| Coordenadas: | UTM 509613 E, 1992475 N | Profundidad explorada: | 75.00 m |
| Elevación: | 4.70 msnm | N.A.F: | 0.70 msnm Hoja de registro de : 60.00 m a 75.00 m |



El sondeo se dejó adomado con tubería de PVC cédula 40 para evitar que se cierre y debidamente tapado, ya que este pozo sería utilizado para introducir los sensores para los estudios geofísicos para determinar la profundidad de desplante de los pilotes.



Figura 4.8. Sondeo adomado con PVC cédula 40.

La información obtenida de este sondeo se correlacionará con la obtenida de la geofísica (eléctrica y sísmica) para definir el modelo geotécnico del sitio.

5. Exploración geofísica

El objetivo principal del estudio fue el de elaborar secciones geológico-geofísico del subsuelo sobre la base de la determinación de la resistividad real bajo cada uno de los Sondeos Eléctricos Verticales y la velocidad de las ondas sísmicas P y S obtenidos mediante la técnica MASW (Multi Analisis Spectral Wave) en líneas paralelas al cauce del río Carrizal en la zona de los apoyos del sistema de puentes La Pigua.

En tales secciones se estableció la equivalencia de los parámetros (velocidad y resistividad) con los materiales y/o formaciones geológicas del subsuelo a fin de caracterizar su compacidad o dureza y, de esa manera, evaluar la resistencia de los materiales donde se apuntalaron los estribos de los puentes citados.

A continuación se describe el detalle de las técnicas utilizadas y los resultados obtenidos.

5.1. Sondeos Eléctricos Verticales

La prospección eléctrica estudia las magnitudes electromagnéticas conocidas como la permeabilidad magnética μ , la constante dieléctrica o permitividad φ y la resistividad ρ . Estableciendo la distribución de ésta última en las diversas capas del subsuelo, puede configurarse un modelo muy aproximado del mismo.

Para medir las variaciones de la resistividad con respecto a la profundidad, el método de sondeos eléctricos es el más utilizado y para ello se emplean diversos dispositivos compuestos por 4 electrodos distribuidos en arreglos espaciales cuyos nombres provienen de sus inventores; los más conocidos son el dispositivo Schlumberger y el dispositivo Wenner.

Para configurar la estratigrafía existente en el sistema de puentes La Pigua, en la zona de los apoyos en ambas márgenes, se realizaron tres sondeos eléctricos verticales (SEV) en cada una de las márgenes, usando el arreglo Schlumberger en cada uno de ellos; con aberturas electródicas lo suficientemente extensas para alcanzar una penetración real de 60 m.

El arreglo Schlumberger consiste básicamente en plantar sobre el terreno, 4 electrodos dispuestos linealmente. Un par de ellos (AB), constituyen el dispositivo de emisión de corriente mientras que el otro par (MN) se conoce como de recepción de potencial. El primer par de electrodos se ubica en los extremos y suficientemente alejados de los electrodos de potencial, localizados en la región central del arreglo, tal que guarden una simetría con el centro. Es importante mencionar que la distancia entre los electrodos AB debe ser mayor o igual a 5 veces la distancia entre los electrodos MN. La figura siguiente muestra gráficamente el dispositivo.

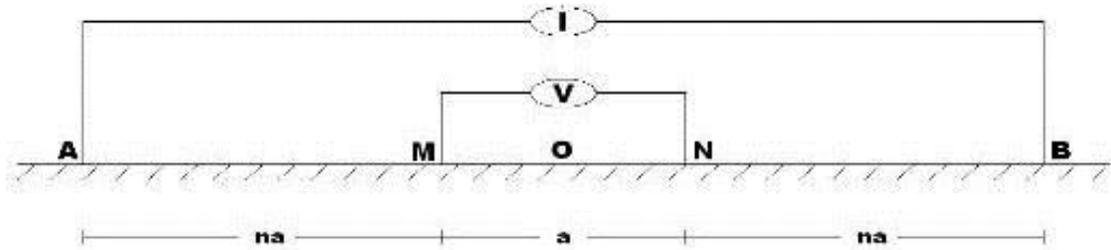


Figura 5.1. Arreglo Schlumberger.

La ubicación de cada uno de los sondeos se realizó bajo cada uno de los puentes, en las proximidades a los apoyos o estribos en ambas márgenes, para que con la información obtenida fuera posible elaborar el perfil estratigráfico que se ligó a la topografía del proyecto con apoyo del banco de nivel utilizado para el proyecto. En la tabla 2.3 se muestran las coordenadas de los sondeos.

Tabla 5.1. Coordenadas de los sondeos.

| Sondeo | UTM X | UTM Y |
|--------|---------------|----------------|
| SEV-1 | 509720.00 m E | 1992577.00 m N |
| SEV-2 | 509704.00 m E | 1992583.00 m N |
| SEV-3 | 509683.00 m E | 1992586.00 m N |
| SEV-4 | 509664.00 m E | 1992474.00 m N |
| SEV-5 | 509651.00 m E | 1992480.00 m N |
| SEV-6 | 509629.00 m E | 1992480.00 m N |



Figura 5.2. Ubicación de los SEV.

En el proceso de interpretación de cada sondeo se utilizó el programa de cómputo SEWIN el cual ejecuta el denominado proceso inverso de resistividad, es decir, a partir de una curva de resistividad aparente (curva de campo), calcula el modelo de resistividad y profundidad reales bajo cada SEV.

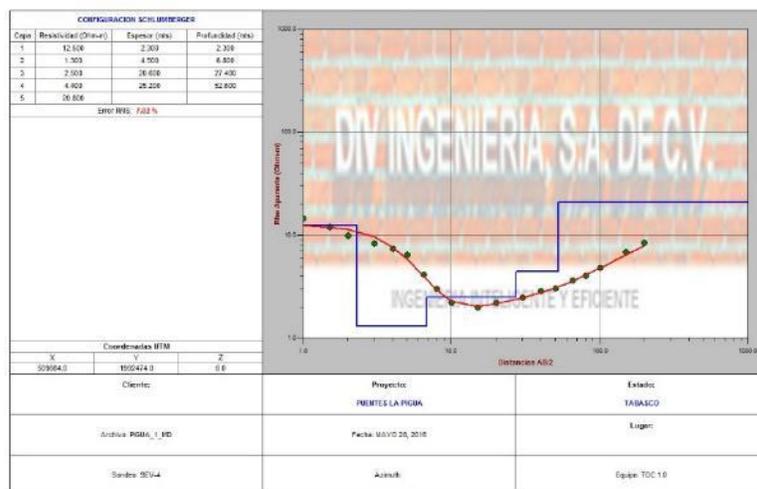


Figura 5.3. Curva de campo del SEV-4.

En el modelado por capas o unidimensional se propone un cierto número de capas que depende de las inflexiones de la curva, sus pendientes y los tiempos a los que ocurren las inflexiones. Se aprovechó la facilidad del programa SEWIN que permite la evaluación en un proceso conocido como interpretación interactiva. Este proceso posibilita que el intérprete modifique los parámetros del modelo y presenta el cálculo de las curvas teóricas de las modificaciones realizadas, esta característica hace que el ajuste del modelo sea rápido. Una vez que se ha obtenido un ajuste aceptable, el modelo generado se somete a una regresión automática para obtener, por inversión, el mejor ajuste bajo el criterio del error cuadrático medio mínimo. A continuación se presentan los perfiles obtenidos con la metodología anteriormente expuesta a partir de los resultados de los sondeos eléctricos verticales realizados.

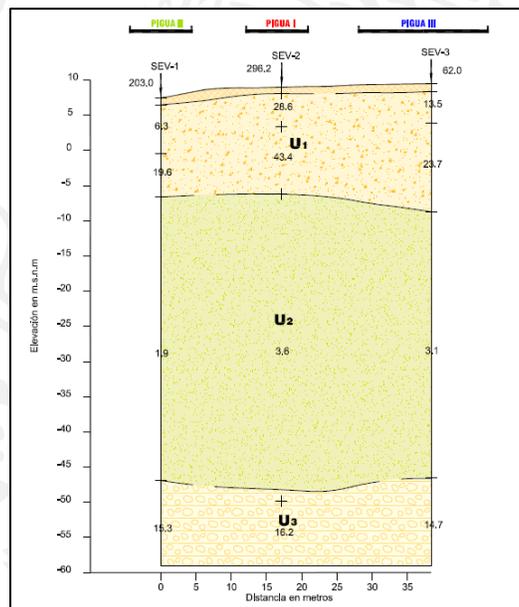


Figura 5.4. Perfil geoelectrico de margen izquierda.

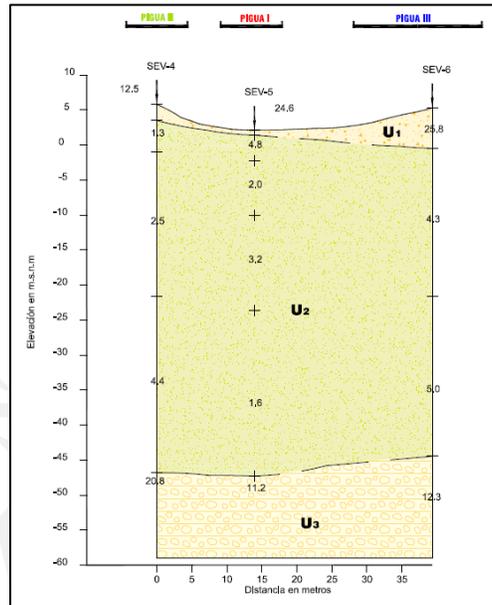


Figura 5.5. Perfil geoelectrico de margen derecha.

De acuerdo con los resultados, las resistividades medidas identifican de manera clara tres unidades estratigráficas. La unidad U_1 corresponde al estrato más superficial que, de acuerdo a la geología regional revisada, corresponde a depósitos aluviales areno-arcillosos de edad reciente, acumulados por acción fluvial. La unidad U_2 forma el estrato intermedio y corresponde a depósitos palustres integrados por suelos negros con abundante materia orgánica; contiene también limos y arcillas mezclados con materia vegetal en estado de descomposición. Cabe mencionar que sobre la unidad U_1 , se detectó una costra de suelo compactado, que es más evidente en el perfil geoelectrico de margen izquierda, con un espesor de entre 2 y 3 m, producto de la circulación de vehículos y personas en esa zona; en el perfil de margen derecha, la costra es tan delgada que es imperceptible para la escala utilizada.

La información obtenida se correlacionará con la de la prospección sísmica y el sondeo directo en margen derecha para definir el modelo geotécnico.

5.2. Prospección sísmica

La prospección sísmica en ambas márgenes, en la zona donde se desplanta el sistema de puentes La Pigua se realizaron con la técnica de ondas superficiales conocida como MASW (*Multi Analysis Spectral Wave*), de manera idéntica a la utilizada para la determinación del espesor del aluvión, que se describió en el capítulo 2.8. La única diferencia consistió en que ahora los 24 geófonos se instalaron sobre el terreno abarcando todo el ancho de los tres puentes, tal como se muestra en la figura siguiente.



Figura 5.6. Ubicación de geófonos en ambas márgenes.

Tabla 5.2. Coordenadas de los geófonos en margen derecha.

| GEÓFONO | UTM X | UTM Y |
|---------|---------------|----------------|
| G1 | 509700.00 m E | 1992452.00 m N |
| G5 | 509683.00 m E | 1992462.00 m N |
| G10 | 509667.00 m E | 1992481.00 m N |
| G15 | 509649.00 m E | 1992487.00 m N |
| G20 | 509625.00 m E | 1992493.00 m N |
| G24 | 509606.00 m E | 1992484.00 m N |

Tabla 5.3. Coordenadas de los geófonos en margen izquierda.

| GEÓFONO | UTM X | UTM Y |
|---------|---------------|----------------|
| G1 | 509767.00 m E | 1992571.00 m N |
| G5 | 509750.00 m E | 1992574.00 m N |
| G10 | 509729.00 m E | 1992575.00 m N |
| G15 | 509707.00 m E | 1992582.00 m N |
| G20 | 509687.00 m E | 1992578.00 m N |
| G24 | 509663.00 m E | 1992578.00 m N |

En este estudio la onda se generó a partir de impactos mecánicos en la superficie con un marro de 10 kg de peso sobre una placa de acero. Los impactos se fueron intercalando entre los geófonos para generar una serie de registros sísmicos que posteriormente fueron analizados mediante una correlación cruzada con la que se construyó el perfil de velocidades de ondas en dos dimensiones.



Figura 5.7. Instalación del tendido de geófonos en margen izquierda.

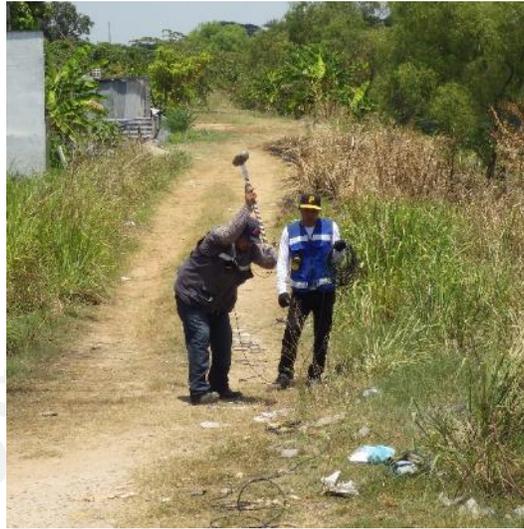


Figura 5.8. Generación de la onda sísmica mediante impactos superficiales.

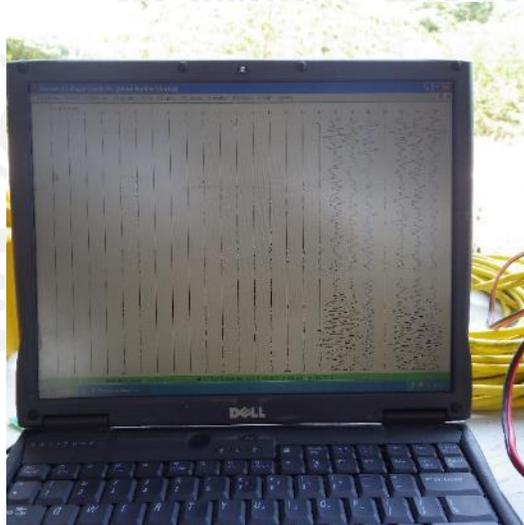


Figura 5.9. Registro de las señales sísmicas que llegan a los geófonos.

A continuación se muestran los perfiles de velocidades de ondas de corte o S, que se determinaron a partir de los resultados obtenidos con esta técnica.

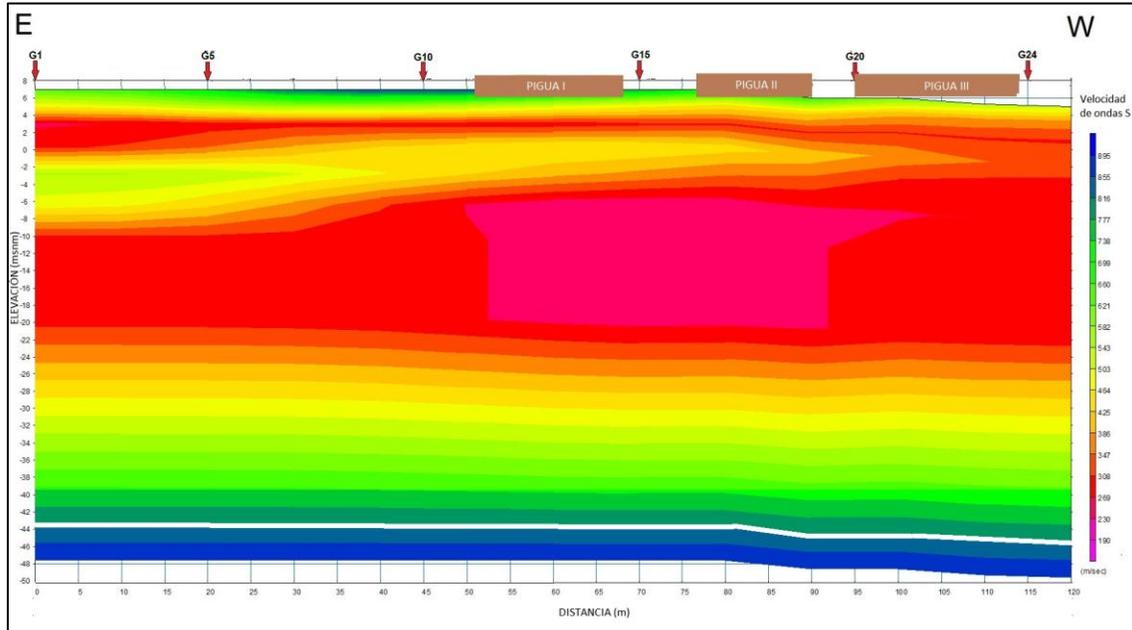


Figura 5.10. Perfil geosísmico de margen izquierda.

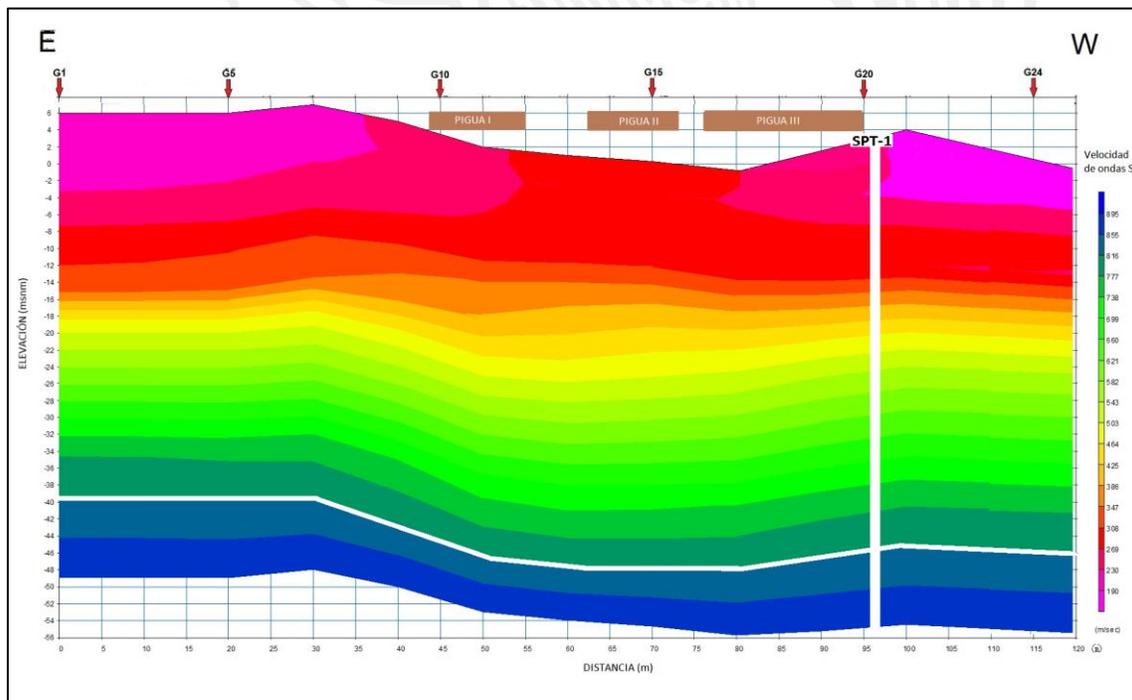


Figura 5.11. Perfil geosísmico de margen derecha.

En los perfiles anteriores se incluyeron para una mejor referencia la ubicación de los geófonos y la posición aproximada de los tres puentes. En el perfil geosísmico de margen derecha se incluyó también la ubicación aproximada del sondeo geotécnico SPT-1.

De acuerdo con dichos perfiles, en la margen izquierda se aprecia una delgada costra superficial de material duro, con velocidades superiores a 800 m/s que se correlaciona muy bien con lo encontrado con los sondeos eléctricos verticales, esta costra corresponde a una capa muy compactada por el tránsito de los vehículos y personas que se genera en dicha margen. Bajo esta costra se aprecia una capa con velocidades entre 500 y 700 m/s con un espesor promedio de 14 m que corresponde a la unidad estratigráfica U1 reportada en los sondeos eléctricos verticales.

En la margen izquierda, el material que puede considerarse firme, con velocidades de onda S mayores a 800 m/s, se detectó aproximadamente al nivel - 45 msnm, marcado con una línea blanca en la parte baja del perfil. En la margen derecha, el nivel al que se encuentra el suelo firme varía con la topografía, desde el nivel - 40 al nivel - 45 msnm, pero en la zona bajo el puente La Pigua III el suelo firme se detecta a aproximadamente al nivel - 45 msnm, lo cual corresponde muy bien con lo reportado por los sondes eléctricos verticales y por el sondeo geotécnico SPT-1.

5.3. Tomografía geoeléctrica

Como parte del estudio y con la finalidad de profundizar en la margen derecha, donde se ubica el problema de inestabilidad de los apoyos, para determinar la secuencia estratigráfica por abajo de los 60 m explorados con la sísmica de refracción, se decidió realizar un estudio combinando las dos modalidades de Sondeo Eléctrico Vertical y Perfilaje Geoeléctrico, empleando para ello el dispositivo dipolar denominado Dipolo-Dipolo. El primer método consiste en investigar a profundidad, en un punto fijo en la superficie del terreno, la distribución de la resistividad, mientras que en el segundo, la profundidad permanece constante y la investigación se va asociando a puntos en una línea a la misma profundidad, la mezcla de ambos proporciona un perfil en dos dimensiones de la resistividad denominado Imagen de Resistividad o Tomografía Geoeléctrica.

La técnica consiste en inyectar mediante una fuente, una corriente eléctrica al terreno (I) y medir a nivel del terreno la perturbación que se produce en el campo eléctrico del subsuelo (ΔV), debida al flujo de corriente.

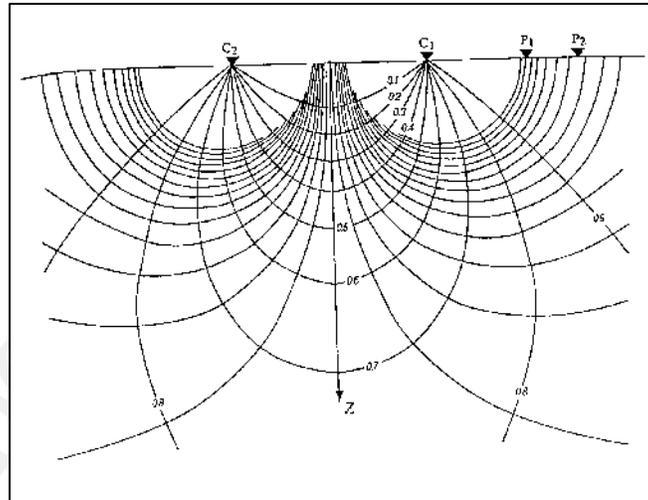


Figura 5.12. Líneas de corriente y potencial (C1 y C2 dipolo de corriente).

La distorsión, en forma y magnitud del campo eléctrico, es función de las propiedades físicas de los materiales y estructuras que lo conforman, por lo que la interpretación matemática rigurosa, la experiencia y su correlación con la información geológica permiten definir modelos de ellos por debajo del nivel del terreno.

Si el terreno fuese homogéneo e isotrópico, la resistividad se podría determinar mediante la ley de Ohm:

$$\rho = \Delta V / I * K \dots\dots\dots$$

En donde K se denomina constante geométrica y depende del arreglo o distribución de los electrodos de emisión y recepción.

En la realidad no existe un terreno homogéneo ni isotrópico por lo que el parámetro experimental que se mide, llamado resistividad aparente (ρ_a), depende de la posición y los espesores de los elementos bajo el terreno, sus resistividades y del dispositivo eléctrico con que se realice la medición. En la figura siguiente se puede ver la forma del arreglo Dipolo-Dipolo empleado en este trabajo.

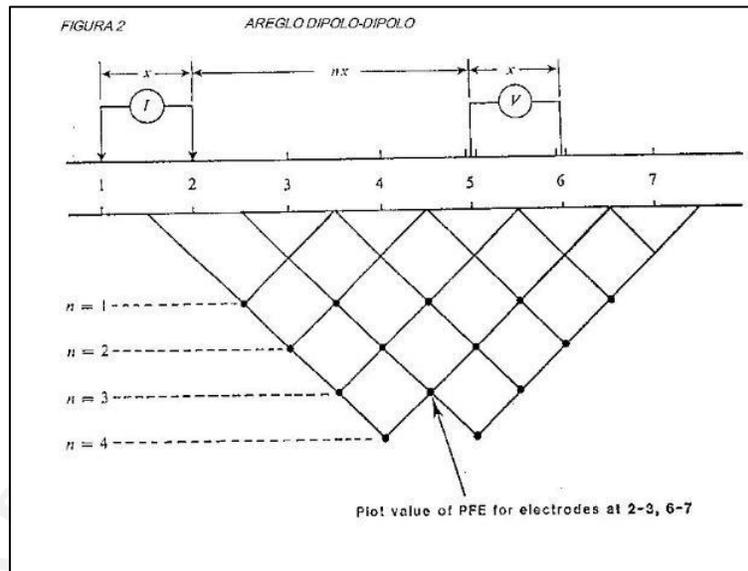


Figura 5.13. Arreglo dipolo-dipolo

En donde la ρ_a viene dada por medio de:

$$\rho_a = K \cdot \Delta V / I$$

$$K = \pi(n+1)(n+2)X$$

Donde X es el tamaño del dipolo y n es el factor que separa X veces los dipolos de emisión y medición. Como puede observarse en la misma figura, la obtención de datos consiste en ir separando, con distancias múltiplos de X , los dipolos de corriente y voltaje y asignar el valor de la resistividad aparente al punto medio entre los centros de los dipolos y a una profundidad igual a un medio de la misma distancia. Si se alejan simultáneamente los dipolos uno del otro, el centro del arreglo permanece constante y el punto de atribución va profundizando a razón de $1/2$ de la separación de sus centros (SEV), por otro lado si se mueven ambos dipolos hacia el mismo sentido y conservando su separación, el centro del arreglo se va desplazando y la profundidad de investigación permanece constante (Calicata). En el caso de este estudio se empleó una combinación de ambos procedimientos dando como resultado una imagen completa de dos dimensiones.

El equipo que se usó para el levantamiento de estos datos fue un SUPERSTING R8 IP marca ADVANCED GEOSCIENCES, las lecturas se hicieron en el dominio del tiempo, empleando una onda cuadrada de 2 segundos, utilizando 56 electrodos que se

distribuyeron sobre la margen derecha en una longitud de aproximadamente 500 m, dejando en la parte media a los puentes.



Figura 5.14. Equipo utilizado para la tomografía geoelectrica.

En la figura siguiente se muestra la ubicación de los 56 electrodos sobre la margen derecha en la zona de los puentes,



Figura 5.15. Ubicación de los electrodos para la tomografía geoelectrica.

Tabla 5.4. Coordenadas de los electrodos en margen derecha.

| GEÓFONO | UTM X | UTM Y |
|---------|---------------|----------------|
| E1 | 509872.00 m E | 1992408.00 m N |
| E10 | 509783.00 m E | 1992425.00 m N |
| E20 | 509696.00 m E | 1992446.00 m N |
| E30 | 509604.00 m E | 1992453.00 m N |
| E40 | 509543.00 m E | 1992417.00 m N |
| E50 | 509446.00 m E | 1992409.00 m N |
| E56 | 509397.00 m E | 1992427.00 m N |

A continuación se presenta el perfil obtenido con esta técnica. En él se han superpuesto las zonas donde se ubican los puentes para una mejor referencia de la situación del subsuelo en la parte de interés.

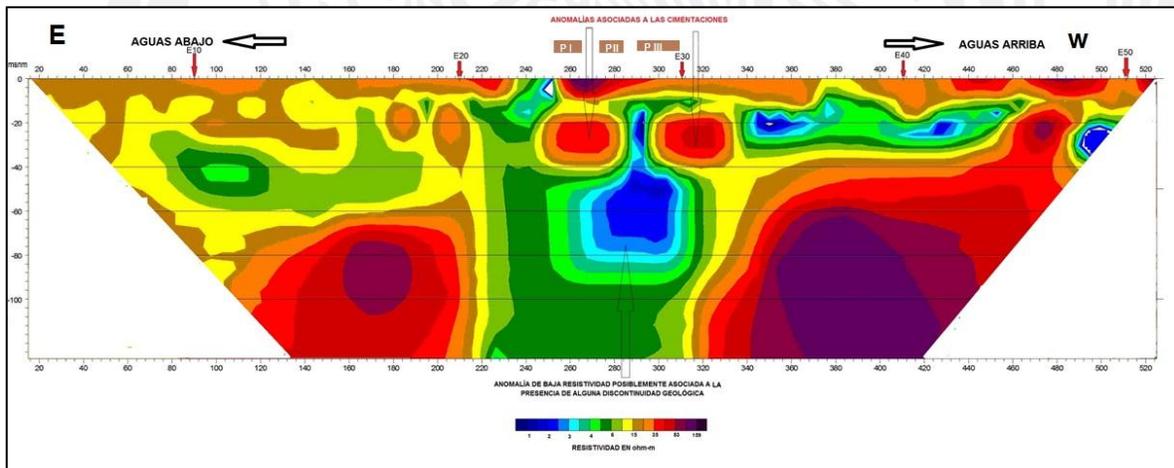


Figura 5.16. Perfil de tomografía geoelectrica en margen derecha.

En el perfil de tomografía geoelectrica se aprecia que la profundidad de exploración supera los 100 m de profundidad. De acuerdo con los resultados se aprecia precisamente bajo los puentes un par de bulbos con resistividades mayores a 35 ohm-m, que se

asocian con las cimentaciones del sistema de puentes a una profundidad estimada de entre 35 y 40 m.

Hay que destacar que el contacto entre la unidad de baja resistividad y que se identifica por los colores que van de los azules a los verdes tiene una inclinación hacia el este, en dirección aguas abajo y que existe una franja de un ancho de aproximadamente 100 m, entre los 220 y 320 m en el eje de las abscisas, en la que la resistividad alcanza valores mínimos, por debajo de los 5 ohm-m, estos valores son propios de materiales arcillosos y con alto contenido de agua. Lo anterior sugiere la presencia de una discontinuidad geológica con un mecanismo que muestra el bloque caído hacia el este, el desnivel entre el bloque del lado oeste y el del lado este es de al menos 20 m.

5.4. Sísmica con la técnica DOWN-HOLE

Dentro de los alcances del proyecto se encuentra el determinar de manera aproximada la profundidad de desplante de los pilotes para, en conjunción con los resultados de la geofísica anteriormente presentada, se pudiera definir el modelo geotécnico que mostrara los materiales sobre los que se desplantaron dichos puentes.

Para cumplir con el objetivo planteado se utilizó una variante de la técnica de refracción sísmica denominada DOWN-HOLE. Esta técnica se utiliza para conocer detalladamente la forma como se propagan las ondas de corte en el suelo o en donde el perfil de suelos presenta cambios de rigidez abruptos entre diferentes capas de suelo. Esta técnica provee un método directo de medición de propagación de ondas de corte en el suelo, dado que permite identificar los tiempos de llegada de las ondas de corte producidas por una fuente en superficie. Esta técnica es excepcionalmente precisa para determinar los valores de la velocidad de onda de corte en profundidad y se realiza de acuerdo con lo especificado en la norma ASTM D-7400.

El procedimiento para realizar esta prueba, de manera general, es el siguiente:

1. Se realiza una perforación hasta la profundidad de exploración deseada y se adema con una tubería de PVC de por lo menos 2 pulgadas de diámetro interno.
2. Se realizan dos golpes en los extremos de una viga colocada en la superficie del terreno y se registra la llegada de las ondas de corte a la profundidad deseada por medio de un sensor o geófono y se repite este procedimiento a distintas profundidades hasta alcanzar la profundidad final de la perforación.
3. Con el sensor se registran las señales a las profundidades correspondientes mediante un sismógrafo y a partir de los registros se toman las lecturas de los

tiempos de arribo con los que se construyen las gráficas de tiempo contra distancia, llamadas dromocrónicas.

- Finalmente se construye la estructura de la velocidad de onda de corte contra la profundidad.

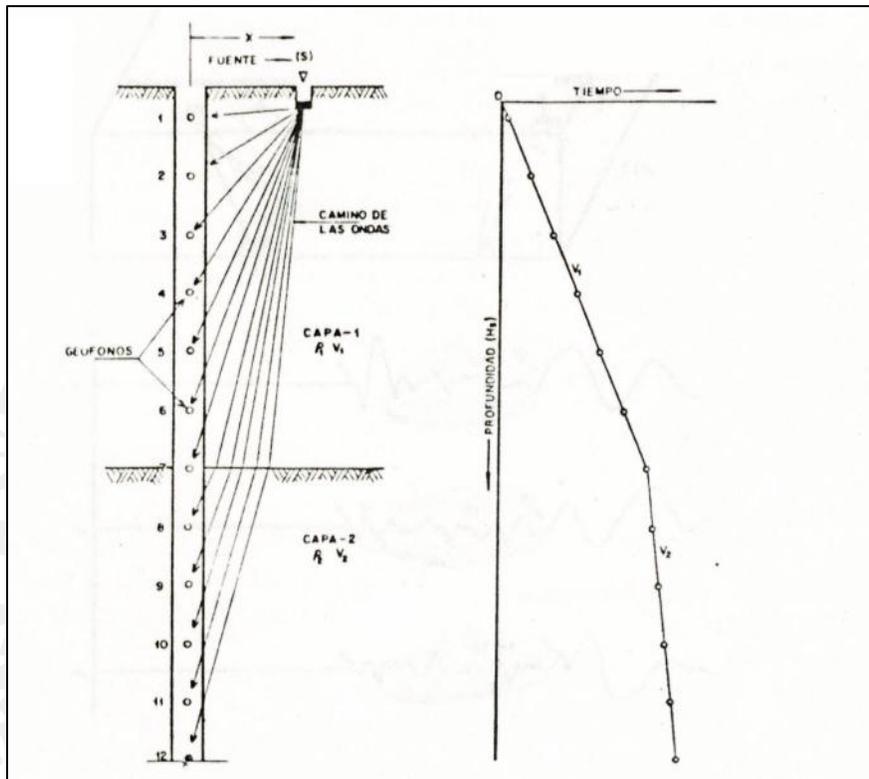


Figura 5.17. Prospección sísmica con la técnica DOWN-HOLE.

Para el caso de la determinación de la profundidad de desplante del pilote se utilizó un sensor o geófono de medición en las tres componentes (triaxial), que se introdujo en el pozo dejado por el sondeo geotécnico SPT-1 de 75 m de profundidad, mismo que fue debidamente ademado con PVC para habilitarlo como pozo de observación.

El geófono se introdujo a distintas profundidades con variaciones de 5 m y en cada posición del geófono se produjo un tren de ondas al golpear el pilote más cercano al pozo con una masa de 10 kg de peso. Con la ayuda del sismógrafo se midieron los tiempos de arribo de las ondas al geófono y se construyó una gráfica profundidad vs tiempo. En esta gráfica se determinó el contraste de rigideces entre el pilote y el suelo a partir de la determinación de las pendientes de los puntos medidos. El cambio en la pendiente define el punto donde termina el pilote, que corresponde a su profundidad de desplante.



Figura 5.18. Pozo de observación en las cercanías al puente La Pigua III.



Figura 5.19. Introducción del geófono en el pozo de observación.



Figura 5.20. Configuración para la prospección sísmica DOWN-HOLE.

En la gráfica que se presenta a continuación, se muestran los resultados obtenidos de la prueba.

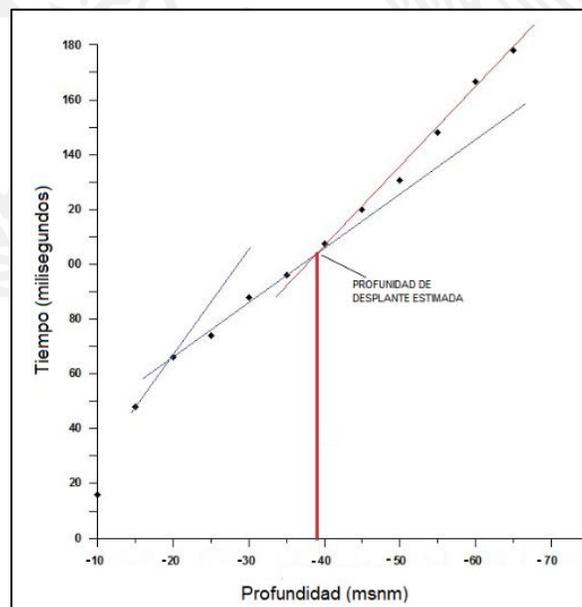


Figura 5.21. Resultados de la prospección sísmica DOWN-HOLE.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se aprecia que el tramo de menor pendiente y que asociamos con el efecto debido a la presencia de la pila se detecta hasta el nivel – 38 msnm, aproximadamente, y a partir de ahí aumenta la pendiente, lo que muestra la disminución en la velocidad de tránsito de las ondas sísmicas. Es este nivel al que se supone se desplantaron los pilotes, lo cual corresponde bastante bien con lo mostrado en el perfil de tomografía geoelectrónica.

Toda la información generada en este capítulo se correlacionará con la obtenida del sondeo directo SPT-1 para definir el modelo geotécnico del sitio en estudio.



6. Definición del modelo Geotécnico

La elaboración del modelo geotécnico del sitio en estudio comprende el análisis de la información existente, desde los aspectos relacionados con la Geología y Fisiografía, que cubren grandes extensiones, hasta las particularidades del sitio halladas con los estudios realizados en este proyecto. A continuación se presenta cada uno de los distintos aspectos considerados:

6.1. Fisiografía

La siguiente información está basada en la “Monografía Geológica-Minera del Estado de Tabasco” publicada por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) en el año 2013. Se han tomado pequeños extractos del documento a fin de contextualizar sobre el área donde se realizaron los trabajos aquí presentados.

La mayor parte del territorio estatal está comprendido dentro de la provincia fisiográfica denominada Llanura Costera del Golfo Sur y solo una pequeña porción al sur de la entidad, pertenece a la provincia Sierra de Chiapas y Guatemala.

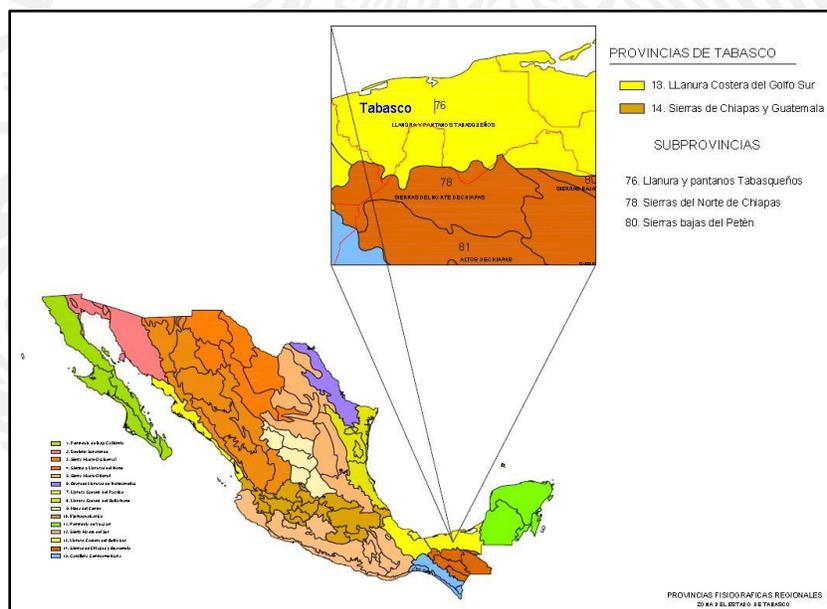


Figura 6.1. Provincias y subprovincias fisiográficas del estado de Tabasco.

A continuación se describe cada una de ellas.

Provincia Llanura Costera del Golfo Sur

Esta provincia incluye parte de los estados de Campeche, Veracruz, Chiapas y Tabasco, bordea la porción sur del Golfo de México y se extiende desde el paralelo 19° 33' en el estado de Veracruz hasta el límite con la Península de Yucatán aproximadamente en el meridiano 90° 46'.

En general es un territorio plano conformado por rocas de origen sedimentario cuya génesis está relacionada con la evolución regresiva del Océano Atlántico y en particular del Golfo de México desde el Paleógeno. Actualmente continúa la acumulación de grandes volúmenes de material detrítico hacia la cuenca oceánica, provenientes del continente.

La provincia se desarrolló por grandes corrientes de agua sobre una zona de plataforma continental en ascenso que dio lugar a una importante concentración y saturación de material aluvial. La carga sedimentaria ha sido transportada y depositada por corrientes fluviales que han dejado abandonados antiguos lechos formando nuevos cauces hacia el Golfo de México. Los ríos más caudalosos del país, Papaloapan, Coatzacoalcos, Grijalva y Usumacinta surcan esta provincia fisiográfica.

Subprovincia Llanuras y Pantanos Tabasqueños

Esta subprovincia cubre parte de los municipios de Huimanguillo, Macuspana, Tacotalpa, Teapa y Tenosique; la totalidad de los municipios de Balancán, Cárdenas, Centla, Centro, Comalcalco, Cunduacán, Emiliano Zapata, Jalapa, Jalpa, Jonuta, Nacajuca y Paraíso.

Los ríos Grijalva y Usumacinta tienen su origen en territorio guatemalteco y las cuencas bajas de estas corrientes se unen en la porción central de la subprovincia Llanuras y Pantanos Tabasqueños. Ambos ríos se unen al sur de la ciudad de Frontera, en un lugar llamado Tres Brazos y a partir de ahí tienen salida común hacia el Golfo de México.

Geomorfológicamente predominan llanuras y lomeríos bajos, con altura máxima de 240 metros, como el cerro El Tortuguero localizado en el municipio de Macuspana.

Provincia Sierras de Chiapas y Guatemala

Esta provincia geomorfológica se extiende desde México hacia la República de Guatemala. En México comprende parte del estado de Chiapas y una pequeña parte del sur de Tabasco. Limita al norte con la Provincia Llanura Costera del Golfo Sur; al sur con la Cordillera Centroamericana; al oriente con la república de Guatemala y al poniente tanto con la Provincia Llanura Costera del Golfo Sur como con la Cordillera centroamericana.

En su paisaje predominan valles, cañones y sierras constituidas por rocas sedimentarias plegadas de edad mesozoica. Son sierras relativamente bajas con cumbres de 1,000 a 2,000 metros sobre el nivel del mar. Esta provincia se divide en varias subprovincias, entre las que destacan la Sierra del Norte de Chiapas y las Sierras Bajas del Petén, que se localizan en una porción de apenas 5.84% del territorio del estado de Tabasco.

Subprovincia Sierras del Norte de Chiapas

Esta subprovincia ocupa tres zonas del estado de Tabasco que localizan en el extremo sur, en parte de los municipios Macuspana, Tacotalpa, Teapa y Huimanguillo. Colinda al norte con la subprovincia Llanuras y Pantanos Tabasqueños y se internan por el sur, este y oeste en territorio chiapaneco y veracruzano. Las mayores elevaciones dentro de esas

áreas son los cerros La Pava y La Ventana, que tienen una altitud de 860 y 560 m respectivamente; y las sierras Madrigal, Tapijulapa y Puana, con 540, 500 y 340 m. La diversidad litológica, así como lo accidentado del terreno les da a estas sierras el carácter de complejas.

La circulación de agua meteórica produce un efecto de disolución de rocas calcáreas en la zona, esta característica desarrolla un paisaje cárstico principalmente en los municipios de Tacotalpa y Teapa donde existen grandes áreas con dolinas, mogotes, poljes y cerros bajos de carst tropical. Un ejemplo de este efecto de disolución es la Gruta de Coconá en Teapa, que es un elemento importante del sistema de cavernas, grutas y red hidrológica subterránea, además de un atractivo turístico.

Subprovincia Sierras Bajas del Petén

Esta subprovincia está constituida en su mayor parte, por sierras compuestas de rocas carbonatadas plegadas y falladas. Cruza casi todo el territorio guatemalteco y se interna en el noreste de Chiapas y sureste del estado de Tabasco, donde ocupa solamente el 2% de la superficie de la entidad en el municipio de Tenosique. Limita al norte con la subprovincia Llanuras y Pantanos Tabasqueños, al occidente con el estado de Chiapas y al sur con la República de Guatemala.

La topografía característica en esta zona es de pliegues orientados noroeste-sureste que integran el sistema de sierra plegada, al cual se asocian dolinas como resultado de las condiciones de carst tropical que predominan. Dichas condiciones también han dado lugar a la formación de mogotes. Otras topofomas dentro del área son valle de laderas tendidas y cañón.

6.2. Geología

De manera similar a la descripción fisiográfica, la exposición de los siguientes párrafos está basada en las cartas geológica-mineras E15-5 Frontera y E15-8 Villahermosa y en la Monografía Geológica-Minera del Estado de Tabasco editada por Servicio Geológico Mexicano (SGM) en el año 2013. Un extracto acoplado de las dos cartas se muestra en la figura siguiente; la descripción de las formaciones geológicas (de la más antigua a la más reciente) que se muestran en la figura, se ha abreviado.

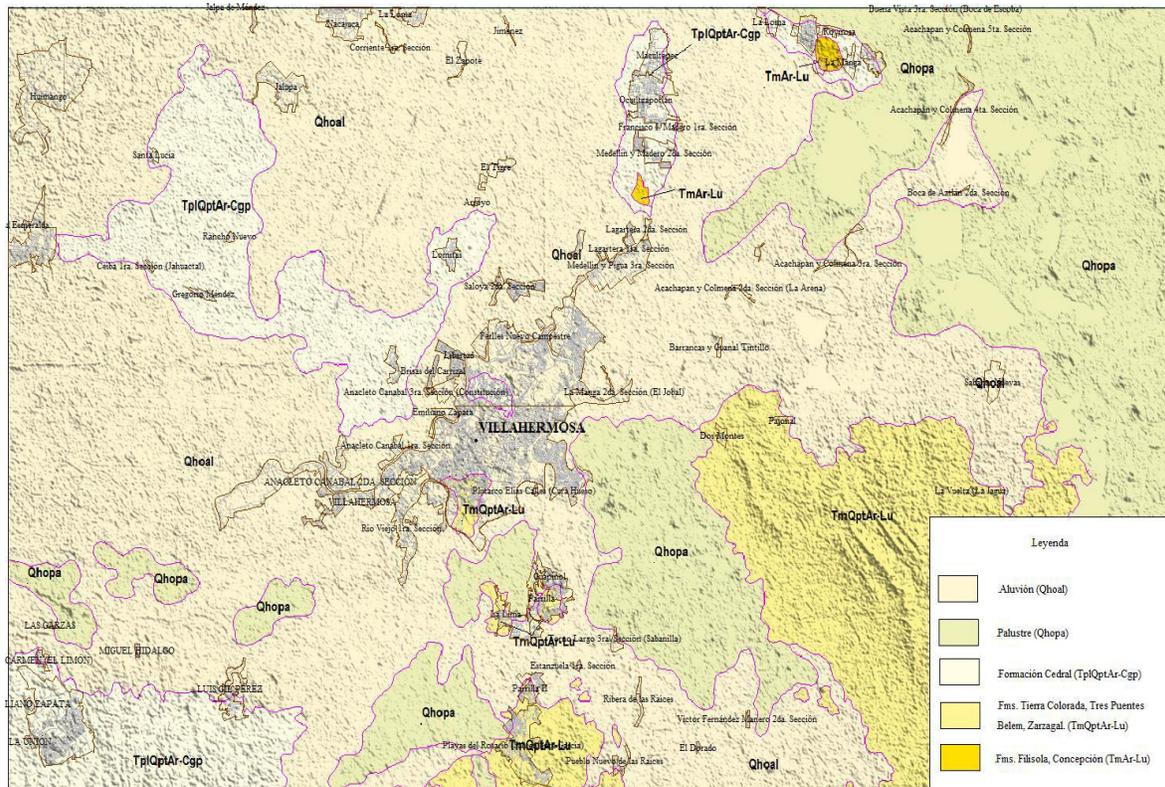


Figura 6.2. Mapa geológico de la zona centro del estado de Tabasco. (Fuente: SGM, INEGI).

Formación Filisola (TmAr-Lu)

Consiste de arenisca arcillosa con intercalaciones de lutita, es frecuente encontrar intercalados horizontes de tobas riolíticas. La arenisca es de color marrón a verde con variaciones a gris verdoso, textura clástica de grano de fino a medio, constituida de granos de cuarzo y feldespato de tamaño fino, bien redondeados. Se presenta en estratos de 25 a 45 cm de espesor. La lutita es de color crema en superficie fresca y de color naranja al intemperismo, en estratos delgados, mientras que la toba riolítica es de color naranja, textura piroclástica, estructura pseudoestratificada, constituida por cristales de cuarzo y feldespato. Por su posición estratigráfica se estima, para esta unidad, una edad de Mioceno superior. Se formó en un ambiente, de nerítico medio a nerítico externo, en facies de plataforma, y en condiciones regresivas; en ocasiones en ambientes costeros lagunares.

Formaciones Amate, Encajonado, Zargazal y Belem. (Tm Qpt Ar-Lu)

Estas unidades se agruparon debido a lo reducido de sus afloramientos por lo que no son carto-grafiables a escalas regionales. La descripción de estas unidades se hará por separado mencionando el sitio donde se observó cada una de ellas. Afloran predominantemente al suroriente de Villahermosa y al norte de Tenosique.

Formación Amate

Esta formación está dividida en dos miembros Amate inferior y Amate superior, aflora en Chiquigauo, cerca de la ciudad de Villahermosa. El Miembro Amate inferior consiste de una alternancia de arenisca y lutita. La arenisca es de color gris claro al fresco y amarillo al intemperismo. Muestra textura clástica de grano fino, estratificada en capas desde 0.50 a 1 m de espesor, contiene gran cantidad de mica blanca con nódulos de arenisca del tamaño desde 2 a 15 cm de diámetro, conteniendo restos de planta y trazas de lignito.

La lutita es de color gris oscuro con tonos marrón, estructura nodular de carácter masivo; contiene abundante microfauna y conchas de ostrácodos. Presenta vetillas de yeso. Ocasionalmente afloran intercalados algunos lentes de caliza de color gris claro al fresco y color marrón al intemperismo, en capas de 0.50 a 2.0 m de espesor.

El Miembro Amate superior está formado por una alternancia de arenisca y lutita. La arenisca poco consolidada es de color gris al fresco con tonos amarillo, rosa y rojo en superficie, textura clástica de grano medio desde 0.25 a 0.5 mm de diámetro, sus constituyentes son cuarzo, feldespato y plagioclasa, está estratificada en capas de 20 a 40 cm de espesor. Contiene nódulos de arenisca y de carbonato de calcio, "mud clast". La lutita es de color gris verdoso al fresco con tonos amarillos en superficie de intemperismo, textura clástica, en estratos delgados de 1 a 2 cm de espesor, contiene nódulos calcáreos de 3 a 18 cm de diámetro.

El espesor observado en campo es de 30 m, aunque en cortes de barrenos se han reportado hasta 300 m. Se considera de edad Mioceno por su posición estratigráfica.

Formación Encajonado

Está constituida por arenisca micácea semiconsolidada con intercalaciones de arenisca compacta, con lentes de gravas finas compuestas por clastos de cuarzo, intercalado se encuentran lutita arenosa y niveles de arcillas. Aflora en la ranchería San Cristóbal al oriente de la ciudad de Villahermosa donde la arenisca se presenta poco consolidada, de color naranja, textura clástica de grano mediano a grueso con cuarzo, mica y feldespato. Su estratificación es en estratos gruesos y contiene nódulos de la misma arenisca con un diámetro de 8 cm aproximadamente. Se intercala con lutita de color crema y amarillo verdoso, de textura clástica y estructura laminar.

El espesor observado en campo es de 20 m aproximadamente, aunque podría llegar a un espesor de 300 m. En este trabajo se estima una edad por su posición estratigráfica del Mioceno superior. Las características de los sedimentos, indican que se depositó en un ambiente de transición.

Formación Zargazal

Esta unidad está constituida por capas de arcillas que alternan con capas delgadas de arena arcillosa con cuerpos lenticulares de arenisca que ocasionalmente contiene lignito. Esta unidad aflora en la localidad de San Cristóbal al oriente de la ciudad de Villahermosa, donde consiste de arenisca de color blanco y amarillo de textura clástica de grano fino a medio formado por clastos de cuarzo y feldespato, presenta nódulos de

arenisca de color marrón debido a la presencia de minerales ferrosos, con una estructura masiva. Está intercalada con lutita de color gris y marrón con tonos verdes de textura clástica y estructura laminar; ocasionalmente se presentan lentes de caliza y coquinas de 5 a 20 cm de espesor.

Se depositó en un ambiente de transición y se estima una edad de Mioceno superior para esta formación. El espesor calculado en San Cristóbal es de 100 m.

Formación Belem

Esta formación está constituida por arenisca con intercalaciones de limolita arenosa, en ocasiones presentan niveles de arcillas carbonosas. En la cercanía de Macuspana se observa como arenisca de color rojizo con algunos tonos blancos y de color anaranjado con tonos verdes, de textura clástica en la que el tamaño de grano es grueso perteneciente predominantemente, a cuarzo, feldespato y fragmentos de roca volcánica en una matriz arcillosa.

Ocasionalmente se presentan algunos fragmentos de cuarzo de 3 cm de diámetro y la arenisca desarrolla estratificación cruzada; se intercalada con limolita de color gris con textura clástica muy plástica, donde se puede apreciar materia carbonosa.

Los afloramientos de esta unidad están muy cubiertos por suelo y vegetación y se estima que tienen un espesor aproximado de 50 metros.

Cubierta generalizada

Formación Cedral (Tpl Qpt Ar-Cqp)

La Formación Cedral está constituida por una alternancia de arenisca con delgadas capas de lutita, toba riolítica, arenisca conglomerática y arenisca cuarcífera. En la base se presentan generalmente clastos gruesos de cuarzo y rocas ígneas. Esta unidad se encuentra distribuida en la zona suroeste del estado de Tabasco, en una franja NW-SE, desde Villa Chontalpa hasta La Venta y al oriente de Cunduacán y norte y noreste de Villahermosa.

Los espesores observados en campo son de aproximadamente de 50 m. Se encuentra sobreyaciendo discordantemente a las formaciones Filisola y Concepción y está cubierta en discordancia por brecha andesítica y arenas y limos. Se le asigna una edad por su posición estratigráfica de Plioceno-Pleistoceno. El ambiente de depósito corresponde a zonas de transición de depósitos marinos, en un franco periodo regresivo (Miranda C. E., 1982).

Formación Tierra Colorada (Qpt Cqp-ar)

Esta unidad está constituida por arcillas y arenas con intercalaciones de grava fina de color gris claro compuesta principalmente de cuarzo. Aflora en una franja NW-SE en el occidente de la entidad tabasqueña entre las comunidades Tierra Colorada Segunda Sección y Tierra Nueva Cuarta Sección.

En Tierra Colorada afloran arenas de grano medio de color amarillo y naranja constituida en un 80% de minerales de cuarzo y 20% de feldespato, presenta una estructura masiva

poco compacta, contiene abundante microfauna de gasterópodos y pelecípodos muy intemperizados y fracturados, la morfología que presenta es de pequeños lomeríos.

El espesor reportado para la secuencia estratigráfica del Mioceno al Pleistoceno en la cuenca de Macuspana es de 2530 m, (López, 1960). Sobreyace concordantemente a la Formación Macuspana. Por posición estratigráfica se le asigna una edad del Pleistoceno. Las condiciones indican que el ambiente en que se depositó esta formación corresponde a zonas de transición.

Depósitos continentales cuaternarios

Para este periodo, se tiene la presencia de depósitos recientes, ampliamente distribuidos en todo el estado, el espesor y la abundancia de los mismos se incrementa de sur a norte, es decir, desde los flancos de las sierras hasta la zona litoral y deltaica.

Depósitos Palustres (Qho pa)

Esta unidad está distribuida principalmente en la porción centro-norte y oriental del estado formando amplios valles cubiertos por abundante vegetación, en algunas partes se observan arena suelta de cuarzo y algunos fragmentos negros finos, que presenta un color pardo al intemperismo.

La zona más importante en Tabasco, con este tipo de depósitos es la región de los Pantanos de Centla, donde se presentan suelos negros con abundante materia orgánica en estado de descomposición y con ayuda de una lupa se puede observar contenidos de arena (granos de cuarzo) blanca y cristalina.

En este tipo de ambiente se desarrollan pastizales y palmeras por lo que generalmente los depósitos son difíciles de observar. En la región de Frontera consiste de depósitos arcillosos de color negro con alto contenido de materia orgánica. Los depósitos arcillosos consisten de limos y arcillas mezclado con materia vegetal en estado de descomposición donde se tiene un drenaje deficiente la cual permite el crecimiento de plantas de mediana altura, así como lirios y manglares.

Depósitos Aluviales (Qho al)

Se encuentra ampliamente distribuidos en la porción norte-centro de la entidad tabasqueña. Se ha considerado como depósitos aluviales a los sedimentos acumulados por acción fluvial, en ríos y arroyos, dentro de estos se consideró a suelos residuales que son aprovechados como suelos agrícolas, presenta abundante vegetación. La mayoría de los afloramientos son depósitos areno-arcillosos.

6.3. Síntesis de los estudios realizados

Con la finalidad de obtener información para la conformación del modelo geotécnico del sitio en donde se desplanta el sistema de puentes La Pigua, se elaboraron una serie de estudios para determinar de manera directa e indirecta la estratigrafía preponderante, así como la presencia del agua freática y los parámetros geotécnicos para el análisis y diseño

de la propuesta conceptual de rehabilitación. Los estudios realizados se muestran en la figura siguiente y fueron los que a continuación se mencionan:

- Un sondeo de penetración estándar con recuperación de material a 75 m de profundidad, SPT-1 (círculo grande blanco).
- Seis sondeos eléctricos verticales (SEV), tres en cada margen, bajos los puentes (círculos pequeños verdes).
- Dos tendidos sísmicos con la técnica MASW, uno en cada margen (flechas rojas).
- Una tomografía eléctrica en la margen derecha (flechas amarillas).
- Una sísmica de refracción con la técnica DOWN-HOLE en el SPT-1.

Cada uno de estos estudios y sus resultados fueron detallados en capítulos anteriores, por lo que en este capítulo solo se hará la integración e interpretación de todos ellos para definir el modelo geotécnico.

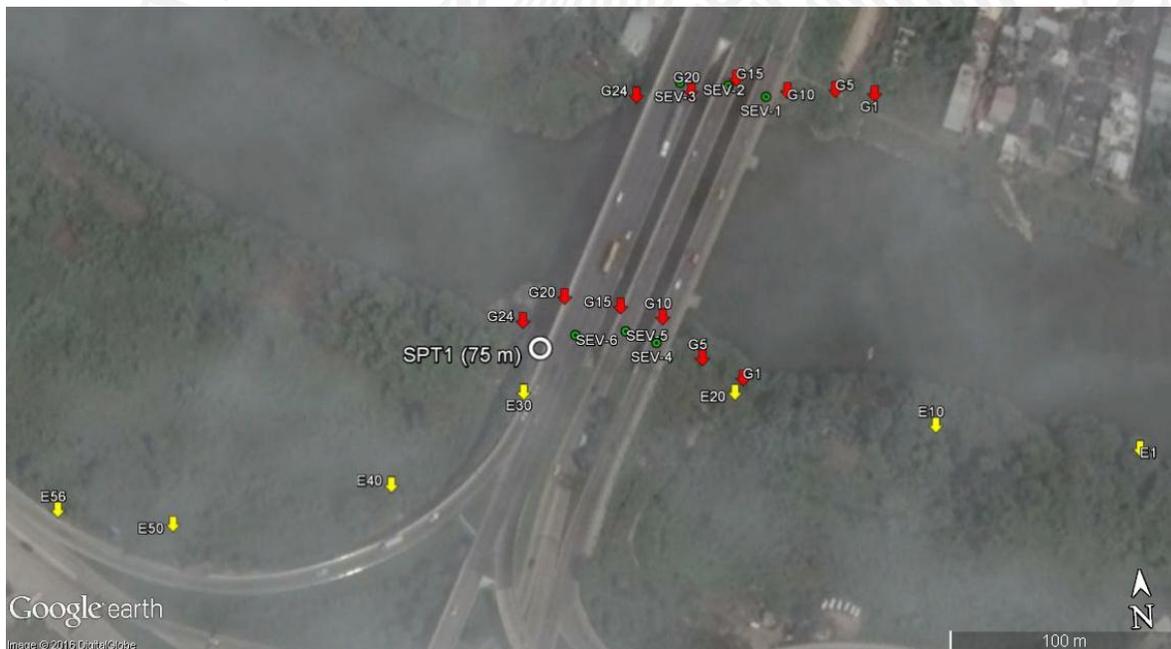


Figura 6.3. Ubicación de los estudios realizados en la zona de desplante de los puentes La Pigua.

En la conformación del modelo geotécnico se tomó la información puntual obtenida del sondeo directo SPT-1, ubicado en margen derecha, como base para la interpretación de los estudios geofísicos, debido a que este sondeo permite la recuperación continua del material, con lo que es posible conformar una columna estratigráfica de materiales que se pueden caracterizar en laboratorio para determinar su contenido de agua, granulometría, límites de consistencia, densidad de sólidos y su clasificación de acuerdo al Sistema

Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Al correlacionar la información del sondeo SPT con los resultados de la geofísica, mediante técnicas de correlación es posible generalizar la información para determinar el modelo geotécnico de la zona estudiada.

Un punto importante para lograr una correlación adecuada se relaciona con el hecho de que todos los perfiles deben estar referenciados con un banco de nivel único que permita establecer una buena interpolación, sobre todo considerando que en la zona puede haber una diferencia de niveles de hasta 5 m en las márgenes del río, entre los puentes.

Asimismo debe considerarse que los métodos geofísicos son métodos indirectos basados en las respuestas que tienen los distintos materiales que forman el subsuelo a señales físicas como la corriente eléctrica y las ondas sísmicas. Dichas respuestas pueden servir para interpretar, previa calibración con algún método directo, los perfiles obtenidos que cubren toda la zona de los puentes. Al basarse en las distintas respuestas de los materiales a las señales físicas o excitaciones inducidas al subsuelo, es necesario que dichas respuestas sean lo suficientemente contrastantes para poder inferir un cambio en la estratigrafía, por ejemplo entre un suelo arcilloso y una roca firme cuyas respuestas son lo suficientemente distintas para poder identificarlas. Estas limitantes de los métodos deben considerarse en la interpretación de los resultados.

Para el caso de estudio, la falta de un contraste lo suficientemente evidente, obliga a la combinación de técnicas y a la experiencia del geofísico, geólogo y geotecnista para la interpretación de la estratigrafía, que pueden tener un rango de unos cuantos metros de diferencia respecto a la estratigrafía realmente existente en el sitio, por lo que es necesario tomar los resultados con el suficiente criterio como para entender el ambiente geológico-geotécnico del sitio desde el punto de vista más cualitativo que cuantitativo.

De acuerdo con lo anterior, a continuación se presenta el resumen de los resultados más relevantes e importantes para fines de cumplir con los objetivos de este proyecto, relacionado con la inestabilidad del apoyo de margen derecha del puente La Pigua III.

Tabla 6.1. Resumen de resultados con las distintas técnicas de exploración.

| MÉTODO | TÉCNICA | NIVEL DEL ESTRATO FIRME BAJO LA FIGUA III (msnm) | | DESPLANTE DE LA CIMENTACIÓN EN DE LA FIGUA III EN MD (msnm) | OBSERVACIONES |
|-----------|------------------------|--|--------|---|---|
| | | MD | MI | | |
| DIRECTO | SPT | -43.30 | - | - | El nivel corresponde a la profundidad a la que se tuvieron 50 golpes de manera consistente hasta el fin del sondeo. |
| INDIRECTO | SEV | -44.45 | -46.45 | - | El perfil se obtuvo de interpolar los resultados puntuales de los SEV. El estrato firme se determinó en el contraste de la U2 y U3. |
| | MASW | -45.6 | -45.80 | - | La técnica define de manera automática el perfil. El estrato firme se definió a una velocidad de ondas S mayor a 850 m/s, con el resultado del SPT-1. |
| | TOMOGRFÍA GEOELÉCTRICA | -44.00 | - | -37.00 | La técnica define de manera automática el perfil. El estrato firme se definió a resistividades mayores a 12 ohm-m, de acuerdo con lo determinado con los SEV. |
| | DOWN-HOLE | - | - | -39.00 | Esta técnica se realizó únicamente para definir la profundidad de desplante del pilote del puente La Figua III. |

Para fines del modelo geotécnico se decidió dividir el material existente sobre el terreno firme en dos estratos, con base en el número de golpes medidos en el sondeo SPT-1. El primero corresponde al estrato más superficial que va desde el nivel natural del terreno (NNT = 4.70 msnm) hasta la cota – 29.5 msnm, con espesor igual a 34.20 m, con un material con número de golpes iguales o menores a 15. El segundo va desde este último nivel hasta la cota – 43.30 msnm, que es donde se localiza el estrato duro, donde se empezaron a medir 50 golpes o más de manera consistente hasta el fin de sondeo (-70.30 msnm). En este segundo estrato, de 13.8 m de espesor, los números de golpes son mayores a 15 golpes pero sin llegar a los 50 golpes, a excepción de dos puntos donde se midieron 7 y 13 golpes.

Con base en la información recopilada, a continuación se presenta el modelo geotécnico generalizado propuesto para el sitio de estudio, con los parámetros que se recomiendan para fines del análisis geotécnico. Cabe mencionar que para los dos estratos que sobreyacen al terreno considerado duro ($N \Rightarrow 50$ golpes), debido a la gran alternancia en los números de golpes, se seleccionaron los valores máximos (Nmax), mínimos (Nmin) y medios (Nmed) para caracterizar cada uno de ellos.

Tabla 6.2. Modelo geotécnico propuesto.

| DE (msnm) | A (msnm) | ESTRATO | Nmax | Nmin | Nmed | DESCRIPCIÓN |
|--------------|-------------|---------|------|------|------|--|
| 4.70 | -29.50 | BLANDO | 15 | PH | 8 | Depósitos fluviales, intercalaciones entre arcillas, limos y arenas finas con materia orgánica, color café, verde olivo y negro, de consistencia muy floja a media, con 15 golpes o menos. |
| -29.50 | -43.30 | MEDIO | 47 | 15 | 27 | Depósitos fluviales, intercalaciones de arena fina y limos, color verde olivo, con presencia de micas, de consistencia media a densa, con 15 a 47 golpes. |
| -43.30 | -70.30 | DURO | >50 | >50 | >50 | Depósitos fluviales, intercalaciones de arenas y limos, color verde olivo, de consistencia muy densa, con 50 golpes o más. |

En la siguiente tabla se muestran los valores del ángulo de fricción interna (ϕ) y peso volumétrico (γ) recomendados para el análisis geotécnico. Debido a las características de los materiales hallados, su consistencia y contenido de agua, se recomienda no considerar la cohesión para fines del análisis.

Tabla 6.3. Parámetros del modelo geotécnico.

| DE (msnm) | A (msnm) | ESTRATO | ϕ_{max} (°) | ϕ_{min} (°) | ϕ_{med} (°) | γ_{max} (t/m ³) | γ_{min} (t/m ³) | γ_{med} (t/m ³) |
|--------------|-------------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 4.70 | -29.50 | BLANDO | 32 | 27 | 29 | 1.5 | 1.3 | 1.4 |
| -29.50 | -43.30 | MEDIO | 43 | 29 | 36 | 1.8 | 1.3 | 1.55 |
| -43.30 | -70.30 | DURO | 45 | 45 | 45 | 1.8 | 1.8 | 1.6 |

En las siguientes figuras se muestra el modelo geotécnico propuesto, al que se le adicionó la sección topográfica del cauce medido bajo los puentes y el puente La Pigua III, cuyas características geométricas y estructurales se obtuvieron de los planos AS BUILT, proporcionados por la SCT. Los niveles de desplante también fueron tomados de dichos planos y cabe comentar que el desplante de los pilotes del apoyo en margen derecha corresponde muy bien a los determinados en este proyecto por los métodos indirectos, razón por la que se presume que los niveles de desplante del resto de los pilotes en los apoyos del cauce y margen izquierda son correctos.

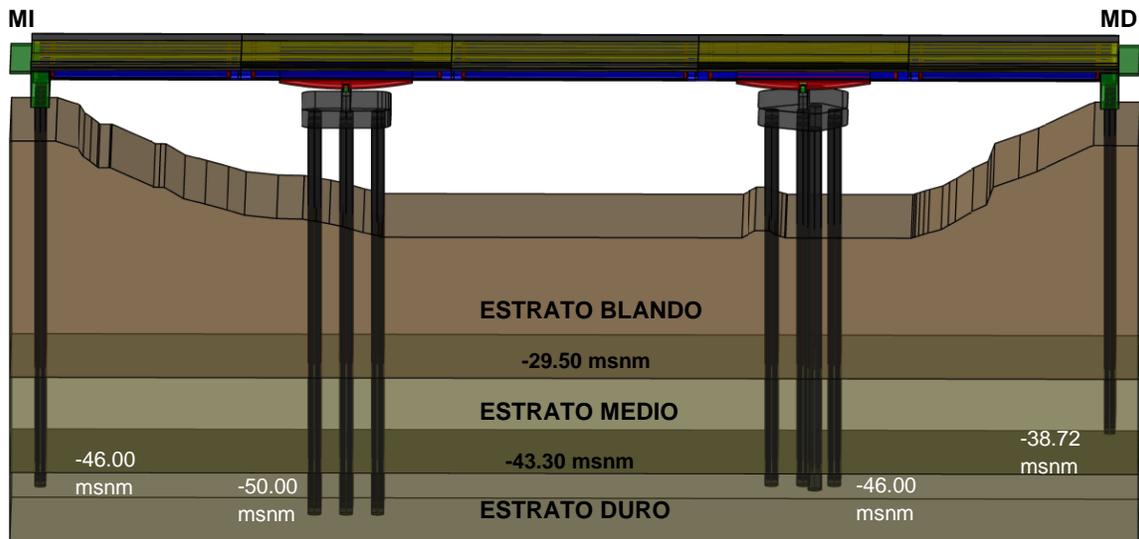


Figura 6.4. Modelo geotécnico propuesto para la zona de desplante de los puentes La Pigua.

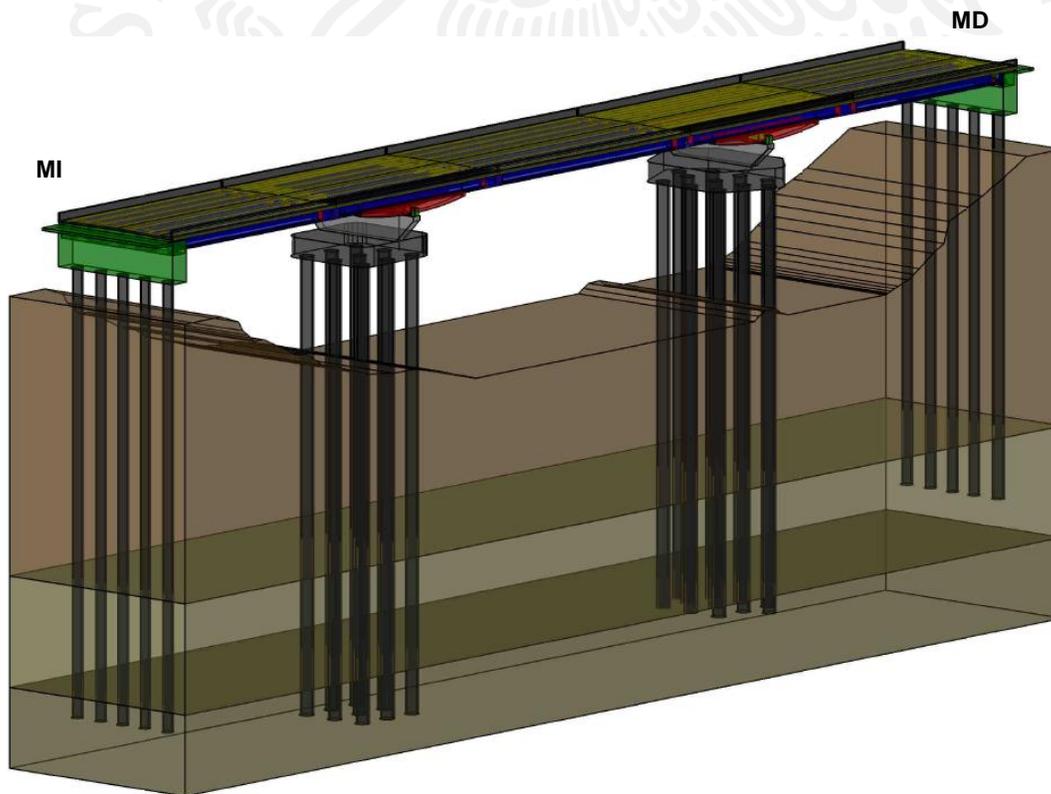


Figura 6.5. Modelo geotécnico en 3D propuesto bajo el puente La Pigua III.

7. Determinación de las condiciones actuales del sistema de apoyo existente y de las solicitaciones requeridas para el proyecto de estabilización

Para el análisis de las condiciones actuales del sistema de apoyo y de las solicitaciones que actualmente actúan sobre el puente La Pigua III, se tomó la información presente en los planos AS BUILT, proporcionados por la SCT.

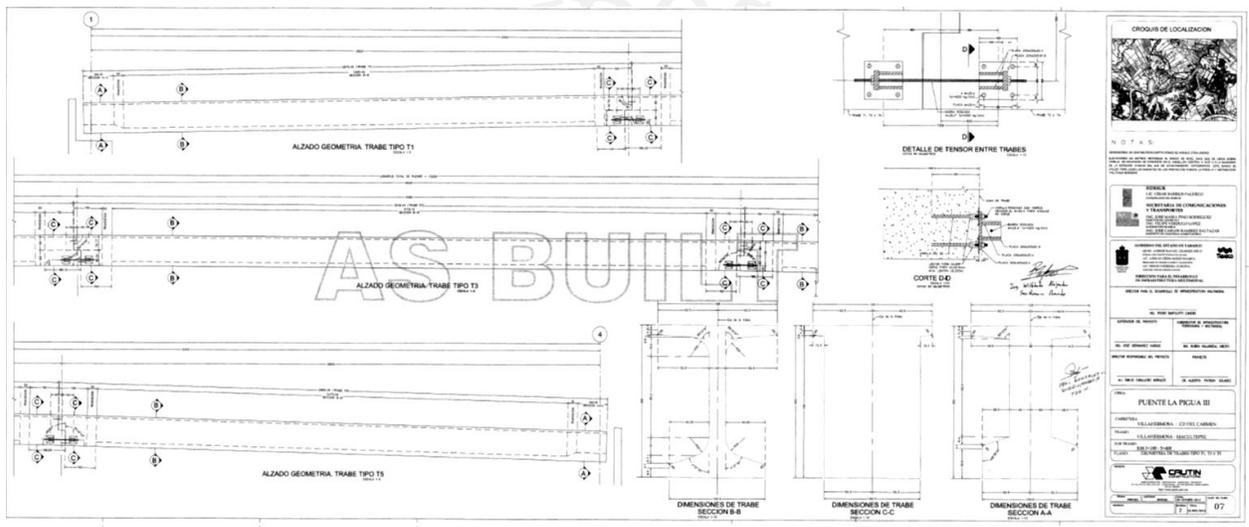


Figura 7.1. Plano AS BUILT del puente La Pigua III.

Para este fin, fueron digitalizados dichos planos en Autocad y se formó un modelo a detalle del puente en tres dimensiones, con el que se determinaron los volúmenes correspondientes a cada elemento estructural.

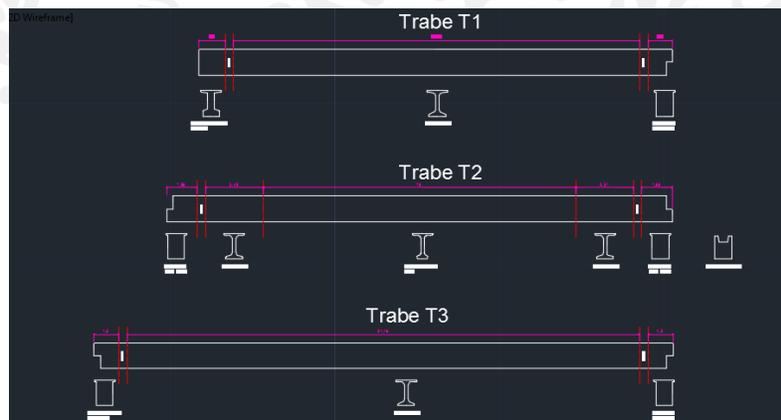


Figura 7.2. Elementos digitalizados del puente La Pigua III.

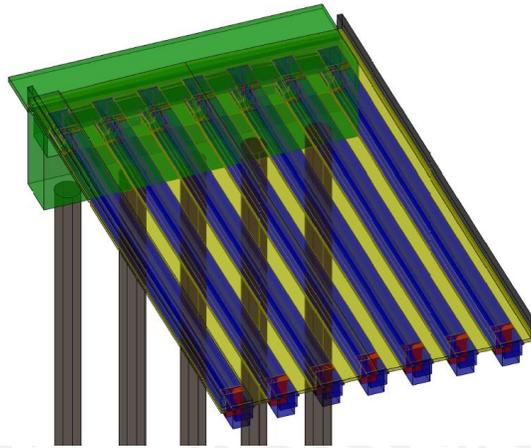


Figura 7.3. Aspecto en 3D del apoyo de margen izquierda del puente La Pigua III.

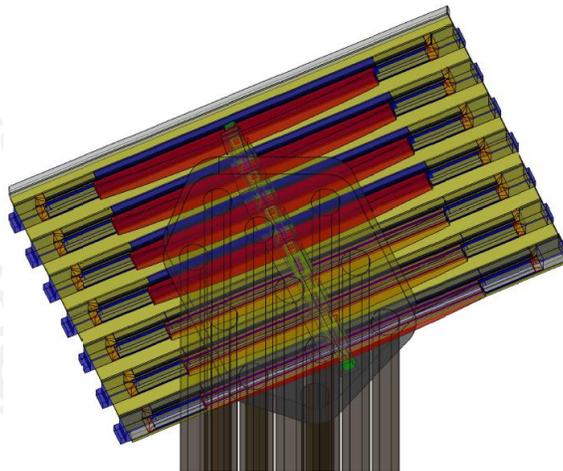


Figura 7.4. Aspecto en 3D del apoyo del eje 3 en el cauce del puente La Pigua III.

A continuación se presenta el análisis de baja de cargas del puente La Pigua III.

7.1. Análisis de bajada de cargas

Para este análisis se dividió el puente en tres grandes elementos:

- Calzada (losa, traveses, etc.)
- Apoyos (zapatas, muros, etc.)
- Cimentación

Todos los elementos se consideraron de concreto reforzado con un peso volumétrico de 2.5 t/m^3 .

Calzada

La calzada está formada por la losa, traveses con distintas secciones y elementos de conexión y complementarios:

| Losa | Área (m ²) | Longitud (m) | Volumen | Unidad | Peso volumétrico | Unidad | Peso (t) |
|--|------------------------|--------------|---------|----------------|------------------|------------------|----------------|
| Losa de 20cm de espesor | 3.71 | 152.00 | 564.22 | m ³ | 2.50 | t/m ³ | 1410.56 |
| Banqueta 20cm de espesor | 0.37 | 152.00 | 56.24 | m ³ | 2.50 | t/m ³ | 140.60 |
| Guarnición 30cm de grosor (ambos extremos) | 0.30 | 152.00 | 91.20 | m ³ | 2.50 | t/m ³ | 228.00 |
| Total | | | | | | | 1779.16 |

| Trabe 1 | Área | Unidad | Longitud (m) | Volumen (m ³) | Peso volumétrico (t/m ³) | Peso (t) | |
|-----------------------------|------|----------------|--------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------|--|
| Tramo de apoyo en caballete | 1.02 | m ² | 1.60 | 1.63 | 2.50 | 4.08 | |
| Tramo central | 0.63 | m ² | 24.70 | 15.65 | 2.50 | 39.12 | |
| Tramo junta entre traveses | 1.63 | m ² | 1.50 | 2.45 | 2.50 | 6.12 | |
| Transición | | | 1.00 | 1.14 | 2.50 | 2.85 | |
| N° Traveses | | | | | 7 | | |
| Suma | | | | | | 52.17 | |
| Total | | | | | | 365.21 | |

| Trabe 2 | Área | Unidad | Longitud (m) | Volumen (m ³) | Peso volumétrico (t/m ³) | Peso (t) | |
|----------------------------|------|----------------|--------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------|--|
| Tramo en Haunch block | 0.57 | m ² | 19.00 | 10.86 | 2.50 | 27.15 | |
| Tramo central | 0.63 | m ² | 7.00 | 4.44 | 2.50 | 11.09 | |
| Tramo junta entre traveses | 1.63 | m ² | 3.76 | 6.13 | 2.50 | 15.33 | |
| Transición | | | 1.00 | 1.14 | 2.50 | 2.85 | |
| N° Traveses | | | | | 7.00 | | |
| Suma | | | | | | 56.43 | |
| Total | | | | | | 394.98 | |

| Trabe 3 | Área | Unidad | Longitud (m) | Volumen (m ³) | Peso volumétrico (t/m ³) | Peso (t) | |
|----------------------------|------|----------------|--------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------|--|
| Tramo central | 0.63 | m ² | 31.18 | 19.76 | 2.50 | 49.39 | |
| Tramo junta entre traveses | 1.63 | m ² | 3.00 | 4.89 | 2.50 | 12.23 | |
| Transición | | | 1.00 | 1.14 | 2.50 | 2.85 | |
| N° Traveses | | | | | 7.00 | | |
| Suma | | | | | | 64.48 | |
| Total | | | | | | 451.34 | |

| Trabe 4 | Área | Unidad | Longitud (m) | Volumen (m ³) | Peso volumétrico (t/m ³) | Peso (t) | |
|----------------------------|------|----------------|--------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------|--|
| Tramo en Haunch block | 0.57 | m ² | 19.00 | 10.86 | 2.50 | 27.15 | |
| Tramo central | 0.63 | m ² | 7.00 | 4.44 | 2.50 | 11.09 | |
| Tramo junta entre traveses | 1.63 | m ² | 3.76 | 6.13 | 2.50 | 15.33 | |
| Transición | | | 1.00 | 1.14 | 2.50 | 2.85 | |
| N° Traveses | | | | | 7.00 | | |
| Suma | | | | | | 56.43 | |
| Total | | | | | | 394.98 | |

| Trabe 5 | Área | Unidad | Longitud (m) | Volumen (m ³) | Peso volumétrico (t/m ³) | Peso (t) | |
|-----------------------------|------|----------------|--------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------|--|
| Tramo de apoyo en caballete | 1.02 | m ² | 1.60 | 1.63 | 2.50 | 4.08 | |
| Tramo central | 0.63 | m ² | 24.70 | 15.65 | 2.50 | 39.12 | |
| Tramo junta entre traveses | 1.63 | m ² | 1.50 | 2.45 | 2.50 | 6.12 | |
| Transición | | | 1.00 | 1.14 | 2.50 | 2.85 | |
| N° Traveses | | | | | 7.00 | | |
| Suma | | | | | | 52.17 | |
| Total | | | | | | 365.21 | |

Apoyos

Los apoyos están formados por zapatas, muros, haunch block, apoyos y elementos de conexión y complementarios:

| Apoyo del Eje 1 | Volumen (m ³) | Peso volumétrico (t/m ³) | Peso (t) |
|------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------|
| Caballote | 180.48 | 2.50 | 451.21 |
| Alero | 16.70 | 2.50 | 41.76 |
| Bancos de apoyo | 0.63 | 2.50 | 1.59 |
| Tope interior | 1.28 | 2.50 | 3.19 |
| Diafragmas de extremos 6pzas | 0.82 | 2.50 | 2.05 |
| Neopreno | 0.04 | 1.45 | 0.05 |
| Total | | | 499.85 |

| Apoyo del Eje 2 | Volumen (m ³) | Peso volumétrico (t/m ³) | Peso (t) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------------|----------------|
| Tope lateral | 0.70 | 2.50 | 1.75 |
| Tope interior | 1.10 | 2.50 | 2.75 |
| Bancos de apoyo | 0.79 | 2.50 | 1.96 |
| Apoyo Tetron GG 5000-500-50 | | | 1.61 |
| Diafragma de concreto 6pzas | 11.05 | 2.50 | 27.64 |
| Haunch Block 7pzas | 128.46 | 2.50 | 321.15 |
| Muro | 64.24 | 2.50 | 160.60 |
| Zapata | 485.43 | 2.50 | 1213.57 |
| Total | | | 1731.04 |

| Apoyo del Eje 3 | Volumen (m ³) | Peso volumétrico (t/m ³) | Peso (t) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------------|----------------|
| Tope lateral | 0.70 | 2.50 | 1.75 |
| Tope interior | 1.10 | 2.50 | 2.75 |
| Bancos de apoyo | 0.78 | 2.50 | 1.96 |
| Apoyo Tetron GG 5000-500-50 | | | 1.61 |
| Diafragma de concreto 6pzas | 11.05 | 2.50 | 27.64 |
| Haunch Block 7pzas | 128.46 | 2.50 | 321.15 |
| Muro | 57.95 | 2.50 | 144.86 |
| Zapata | 404.64 | 2.50 | 1011.60 |
| Total | | | 1513.32 |

| Apoyo del Eje 4 | Volumen (m ³) | Peso volumétrico (t/m ³) | Peso (t) |
|------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------|
| Caballote | 177.79 | 2.50 | 444.46 |
| Alero | 16.70 | 2.50 | 41.76 |
| Bancos de apoyo | 0.73 | 2.50 | 1.81 |
| Tope interior | 1.28 | 2.50 | 3.19 |
| Diafragmas de extremos 6pzas | 0.82 | 2.50 | 2.05 |
| Neopreno | 0.04 | 1.45 | 0.05 |
| Total | | | 493.33 |

Cimentación

La cimentación está formada por pilotes, que están parcialmente sumergidos los centrales a partir del nivel del cauce y los de los extremos bajo el nivel del agua freática, por lo cual para fines del análisis se consideró el peso volumétrico sumergido.

| EJE | Díametro (m) | Área (m ²) | Longitud (m) | Volumen (m ³) | Peso volumétrico (t/m ³) | Peso por sección (t) | Peso por eje (t) |
|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|---------------------------|--------------------------------------|----------------------|------------------|
| Eje 1 | | | | | | | 5 PILOTES |
| Seco | 1.50 | 1.77 | 5.19 | 9.17 | 2.50 | 22.93 | 783.95 |
| Bajo el NAF | 1.50 | 1.77 | 50.50 | 89.24 | 1.50 | 133.86 | |
| Eje 2 | | | | | | | 9 PILOTES |
| Seco | 1.80 | 2.54 | 2.25 | 5.73 | 2.50 | 14.31 | 2001.09 |
| Bajo el nivel del cauce | 1.80 | 2.54 | 54.50 | 138.69 | 1.50 | 208.03 | |
| Eje 3 | | | | | | | 11 PILOTES |
| Seco | 1.80 | 2.54 | 2.25 | 5.73 | 2.50 | 14.31 | 2277.82 |
| Bajo el nivel del cauce | 1.80 | 2.54 | 50.50 | 128.51 | 1.50 | 192.76 | |
| Eje 4 | | | | | | | 5 PILOTES |
| Seco | 1.50 | 1.77 | 4.53 | 8.00 | 2.50 | 19.99 | 672.78 |
| Bajo el NAF | 1.50 | 1.77 | 43.22 | 76.38 | 1.50 | 114.56 | |

Cargas vivas

La carga viva depende directamente del tránsito vehicular, para este proyecto se tomó en cuenta la situación más desfavorable aplicando para su diseño del puente el peso de los camiones T3-S2-R4, T3-S3 y HS-20.

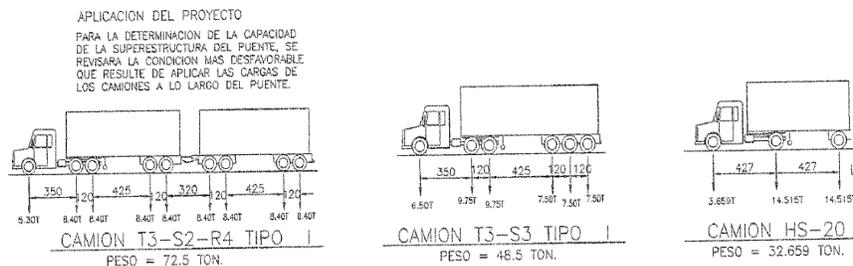


Figura 7.5. Cargas equivalentes consideradas para el cálculo de las cargas vivas.

De acuerdo a la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) para distribución de carga de los camiones T3-S2-R4 y T3-S3 propuso una serie de fórmulas que se aplican de acuerdo a la longitud del claro:

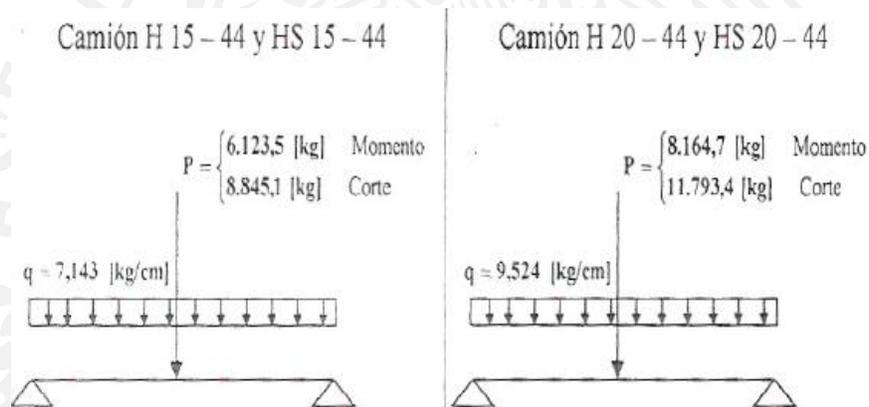
$$w = 0, \text{ si } L \leq 30 \text{ m} \quad (1)$$

$$w = (L - 30) / 6 \text{ kN/m} = (L - 30) / 60 \text{ t/m}, \text{ si } 30 \text{ m} = L = 90 \text{ m} \quad (2)$$

$$w = 10 \text{ kN/m} = 1 \text{ t/m}, \text{ si } L > 90 \text{ m} \quad (3)$$

Para los camiones HS-20 la AASHTO propuso la siguiente distribución de carga.

Carga de Faja (AASHTO Standard). La carga de faja consiste en una carga uniforme por metro lineal de vía de tránsito, combinada con una carga concentrada (o dos cargas concentradas en el caso de tramos continuos) colocada sobre la viga, en posición tal que provoque los máximos esfuerzos.



Entonces de acuerdo a las fórmulas para los camiones T3-S2-R4 y T3-S3 y como los claros son mayores a 30 m pero menores a 90 m se utilizará la segunda fórmula y de acuerdo a las longitudes de los claros entre ejes, se obtienen las siguientes cargas distribuidas:

- De eje 1 a eje 2 y de eje 3 a 4 ($L = 43.4 \text{ m}$) = 0.2233 t/m
- De eje 2 a eje 3 ($L = 65.2 \text{ m}$) = 0.5866 t/m

Para los camiones HS-20, AASHTO estableció una carga distribuida de 0.952 t/m.

Para fines de este análisis, de manera conservadora se tomará la situación más crítica, por lo tanto, se tomará en cuenta la carga distribuida que propone la ASSHTO.

| CLARO | Longitud del claro (m) | Carril | Ancho del carril (m) | Carga distribuida (t/m) | Peso total (t) |
|-----------|------------------------|--------|----------------------|-------------------------|-----------------|
| | 43.4 | 1 | 3.715 | 0.9520 | 41.3168 |
| EJE 1 A 2 | 43.4 | 2 | 3.715 | 0.9520 | 41.3168 |
| EJE 3 A 4 | 43.4 | 3 | 4.44 | 0.9520 | 41.3168 |
| | 43.4 | 4 | 4.44 | 0.9520 | 41.3168 |
| | | | | Suma | 165.2672 |
| | 65.2 | 1 | 3.715 | 0.9520 | 62.0704 |
| EJE 2 A 3 | 65.2 | 2 | 3.715 | 0.9520 | 62.0704 |
| | 65.2 | 3 | 4.44 | 0.9520 | 62.0704 |
| | 65.2 | 4 | 4.44 | 0.9520 | 62.0704 |
| | | | | Suma | 248.2816 |

Distribución de las cargas

La distribución de las cargas de la calzada se realizó con el principio de las áreas tributarias, para lo cual fue necesario dividirla en 6 zonas tal como se muestra a continuación:

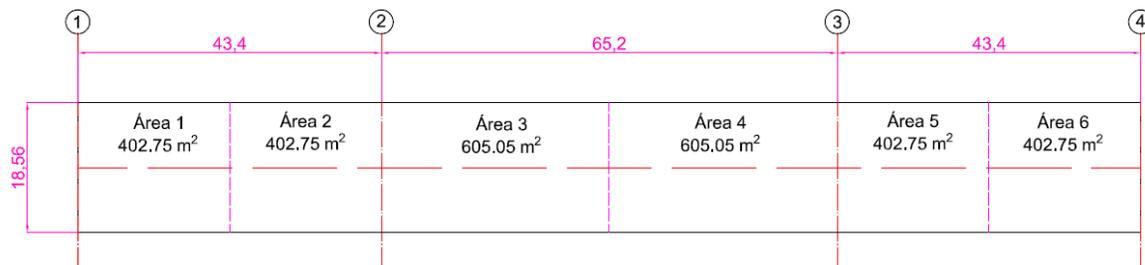


Figura 7.6. Áreas tributarias de la calzada del puente La Pigua III.

Del mismo modo las cargas vivas se transfirieron a cada uno de los ejes distribuyendo las cargas en cada claro.

Mientras que las cargas de los apoyos y cimentación se transmiten en su totalidad a su respectivo eje.

De acuerdo con lo anterior, las cargas que bajan a cada eje son las siguientes:

| ELEMENTO | CALZADA (t) | APOYOS (t) | CIMENTACIÓN (t) | CARGA VIVA (t) | CARGA TOTAL (t) |
|----------|-------------|------------|-----------------|----------------|-----------------|
| EJE 1 | 535.03 | 499.85 | 783.95 | 82.63 | 1901.46 |
| EJE 2 | 1340.41 | 1513.32 | 2277.82 | 206.77 | 5338.33 |
| EJE 3 | 1340.41 | 1731.04 | 2001.09 | 206.77 | 5279.31 |
| EJE 4 | 535.03 | 493.33 | 672.78 | 82.63 | 1783.77 |

Distribuyendo las cargas a los pilotes de cada eje se tiene que la carga en cada pilote es:

| ELEMENTO | CARGA TOTAL (t) | PILOTES POR EJE | CARGA POR PILOTE (t) |
|----------|-----------------|-----------------|----------------------|
| EJE 1 | 1901.46 | 5 | 380.29 |
| EJE 2 | 5338.33 | 9 | 593.15 |
| EJE 3 | 5279.31 | 11 | 479.94 |
| EJE 4 | 1783.77 | 5 | 356.75 |

Estos valores son los que actualmente se transfieren a los pilotes del puente La Pigua III y que deberán considerarse para el cálculo del factor de seguridad. Cabe comentar que estos valores no han sido afectados por sus factores de carga correspondientes.

7.2. Análisis de capacidad de carga

El análisis de capacidad de carga se hará únicamente por punta y se realizará con la fórmula general de Terzaghi, con las modificaciones hechas por Hansen (1970).

La expresión general de capacidad de carga última por punta es:

$$q_{Rp} = c N'_{cp} s_c + \sigma'_v N'_{qp} s_q + 0.5 \gamma_2 D N'_{\gamma p} s_\gamma \quad \text{Ec. 1}$$

Donde

- q_{Rp} Capacidad de carga última del pilote.
- c Cohesión del suelo de soporte.
- γ_1 Peso volumétrico del suelo suprayacente a la profundidad de desplante de la cimentación.
- γ_2 Peso volumétrico del suelo subyacente a la profundidad de desplante de la cimentación.
- D Diámetro del pilote.
- σ'_v Esfuerzo vertical efectivo al nivel de la punta del pilote.
- N'_{cp} , N'_{qp} y $N'_{\gamma p}$ Coeficientes de capacidad de carga.
- s_c , s_q y s_γ Factores de forma.

Para fines de este análisis y debido a las características del terreno de cimentación, se considera que el valor de la cohesión es nulo, por lo que el primer término de la ec. 1 desaparece para tomar la siguiente forma:

$$q_{Rp} = \sigma'_v N'_{qp} s_q + 0.5 \gamma_2 D N'_{\gamma p} s_\gamma \quad \text{Ec. 2}$$

Los coeficientes de capacidad de carga se calculan con las ecuaciones siguientes (Hansen, 1970):

$$N'_{qp} = \tan^2 (45^\circ + \phi/2) e^{\gamma \tan \phi} \quad \text{Ec. 3}$$

$$N'_{\gamma p} = 1.5 (N_{qp} - 1) \tan \phi \quad \text{Ec. 4}$$

Los factores de forma se determinan con las siguientes ecuaciones (Hansen, 1970):

$$s_q = 1 + (D/L) \sin \phi \quad \text{Ec. 5}$$

$$s_\gamma = 1 - 0.40 (D/L) \geq 0.6 \quad \text{Ec. 6}$$

Donde L es la longitud del pilote.

Finalmente, la resistencia admisible del pilote por punta, P_{Rp} , se obtiene con la ecuación siguiente:

$$P_{Rp} = q_{Rp} F_R A_p \quad \text{Ec. 7}$$

Donde A_p es el área transversal del pilote y F_R el factor de resistencia con un valor de 0.35.

Para fines del análisis de capacidad de carga, los parámetros del suelo se tomaron del modelo geotécnico y la geometría de los pilotes y la profundidad de desplante, de los planos AS BUILT proporcionados por la SCT.

Se calculó la capacidad de carga y resistencia admisible por punta de los pilotes de cada eje considerando sus distintas dimensiones y profundidades de desplante, mismas que se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 7.1. Parámetros para el análisis de capacidad de carga.

| EJE | Diámetro (m) | Nivel de desplante (msnm) | Estrato de apoyo | φ del estrato de apoyo (°) | | | γ del estrato de apoyo (t/m ³) | | |
|-----|-----------------|---------------------------------|------------------------|----------------------------------|-----|-----|--|-----|------|
| | | | | Max | Min | Med | Max | Min | Med |
| 1 | 1.50 | - 46.00 | DURO | 45 | 45 | 45 | 2.0 | 2.0 | 2.0 |
| 2 | 1.80 | - 50.00 | DURO | 45 | 45 | 45 | 2.0 | 2.0 | 2.0 |
| 3 | 1.80 | - 46.00 | DURO | 45 | 45 | 45 | 2.0 | 2.0 | 2.0 |
| 4 | 1.50 | - 38.72 | MEDIO | 43 | 32 | 38 | 1.8 | 1.5 | 1.65 |

A continuación se presentan las tablas con los resultados obtenidos para cada eje, considerando los valores máximos, mínimos y promedio de los parámetros utilizados. En dichas tablas se evalúa la variación del diámetro del pilote desde 1.5 hasta 2.0 m; además se compararon los resultados obtenidos con la carga que actúa sobre cada pilote, obtenida en el subcapítulo anterior, afectada por un factor de carga igual a 2. Las celdas iluminadas de verde corresponden a los diámetros de los pilotes que son capaces de soportar la carga, las celdas de rojo indican los que no y la celda de amarillo corresponde al diámetro real del pilote analizado.

EJE 1 ($q_{\text{diseño}} = 760.58 \text{ t}$)

| Profundidad de desplante (m) | Dimensiones de la cimentación | | VALORES MÁXIMOS | | VALORES MÍNIMOS | | VALORES PROMEDIO | |
|---------------------------------|-------------------------------|----------------|--|---|--|---|--|---|
| | Diámetro (D) | Área (A_p) | Capacidad de carga resistente por punta (q_{Rp}) | Carga resistente admisible por punta (P_{Rp}) | Capacidad de carga resistente por punta (q_{Rp}) | Carga resistente admisible por punta (P_{Rp}) | Capacidad de carga resistente por punta (q_{Rp}) | Carga resistente admisible por punta (P_{Rp}) |
| | (m) | (m^2) | (t/m^2) | (t) | (t/m^2) | (t) | (t/m^2) | (t) |
| 50.70 | 1.50 | 1.7671 | 4946.14 | 3059.19 | 3434.24 | 2124.08 | 3818.41 | 2361.69 |
| | 1.60 | 2.0106 | 4962.48 | 3492.18 | 3448.52 | 2426.78 | 3833.22 | 2697.50 |
| | 1.70 | 2.2698 | 4978.82 | 3955.32 | 3462.79 | 2750.94 | 3848.01 | 3056.98 |
| | 1.80 | 2.5447 | 4995.13 | 4448.87 | 3477.04 | 3096.80 | 3862.79 | 3440.36 |
| | 1.90 | 2.8353 | 5011.43 | 4973.10 | 3491.28 | 3464.57 | 3877.55 | 3847.89 |
| | 2.00 | 3.1416 | 5027.72 | 5528.27 | 3505.50 | 3854.49 | 3892.29 | 4279.80 |

EJE 2 ($q_{\text{diseño}} = 1186.30 \text{ t}$)

| Profundidad de desplante (m) | Dimensiones de la cimentación | | VALORES MÁXIMOS | | VALORES MÍNIMOS | | VALORES PROMEDIO | |
|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---|--|---|--|---|--|
| | Diámetro (D) (m) | Área (A_p) (m^2) | Capacidad de carga resistente por punta (q_{Rp}) (t/m^2) | Carga resistente admisible por punta (P_{Rp}) (t) | Capacidad de carga resistente por punta (q_{Rp}) (t/m^2) | Carga resistente admisible por punta (P_{Rp}) (t) | Capacidad de carga resistente por punta (q_{Rp}) (t/m^2) | Carga resistente admisible por punta (P_{Rp}) (t) |
| | | | | | | | | |
| 43.90 | 1.50 | 1.7671 | 5610.31 | 3469.98 | 4810.52 | 2975.31 | 5559.20 | 3438.37 |
| | 1.60 | 2.0106 | 5628.66 | 3960.98 | 4827.61 | 3397.27 | 5577.47 | 3924.96 |
| | 1.70 | 2.2698 | 5646.98 | 4486.13 | 4844.68 | 3848.76 | 5595.71 | 4445.40 |
| | 1.80 | 2.5447 | 5665.29 | 5045.75 | 4861.73 | 4330.06 | 5613.94 | 5000.01 |
| | 1.90 | 2.8353 | 5683.59 | 5640.11 | 4878.77 | 4841.45 | 5632.16 | 5589.07 |
| | 2.00 | 3.1416 | 5701.86 | 6269.52 | 4895.78 | 5383.19 | 5650.35 | 6212.88 |

EJE 3 ($q_{\text{diseño}} = 959.88 \text{ t}$)

| Profundidad de desplante (m) | Dimensiones de la cimentación | | VALORES MÁXIMOS | | VALORES MÍNIMOS | | VALORES PROMEDIO | |
|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---|--|---|--|---|--|
| | Diámetro (D) (m) | Área (A_p) (m^2) | Capacidad de carga resistente por punta (q_{Rp}) (t/m^2) | Carga resistente admisible por punta (P_{Rp}) (t) | Capacidad de carga resistente por punta (q_{Rp}) (t/m^2) | Carga resistente admisible por punta (P_{Rp}) (t) | Capacidad de carga resistente por punta (q_{Rp}) (t/m^2) | Carga resistente admisible por punta (P_{Rp}) (t) |
| | | | | | | | | |
| 38.50 | 1.50 | 1.7671 | 5170.75 | 3198.11 | 4465.33 | 2761.81 | 5216.48 | 3226.40 |
| | 1.60 | 2.0106 | 5189.44 | 3651.90 | 4482.76 | 3154.59 | 5235.26 | 3684.14 |
| | 1.70 | 2.2698 | 5208.11 | 4137.48 | 4500.17 | 3575.07 | 5254.01 | 4173.95 |
| | 1.80 | 2.5447 | 5226.77 | 4655.18 | 4517.56 | 4023.53 | 5272.75 | 4696.13 |
| | 1.90 | 2.8353 | 5245.40 | 5205.27 | 4534.93 | 4500.24 | 5291.46 | 5250.98 |
| | 2.00 | 3.1416 | 5264.01 | 5788.08 | 4552.28 | 5005.50 | 5310.15 | 5838.82 |

EJE 4 ($q_{\text{diseño}} = 713.50 \text{ t}$)

| Profundidad de desplante (m) | Dimensiones de la cimentación | | VALORES MÁXIMOS | | VALORES MÍNIMOS | | VALORES PROMEDIO | |
|---------------------------------|-------------------------------|----------------|--|---|--|---|--|---|
| | Diámetro (D) | Área (A_p) | Capacidad de carga resistente por punta (q_{Rp}) | Carga resistente admisible por punta (P_{Rp}) | Capacidad de carga resistente por punta (q_{Rp}) | Carga resistente admisible por punta (P_{Rp}) | Capacidad de carga resistente por punta (q_{Rp}) | Carga resistente admisible por punta (P_{Rp}) |
| | (m) | (m^2) | (t/m^2) | (t) | (t/m^2) | (t) | (t/m^2) | (t) |
| 43.42 | 1.50 | 1.7671 | 2967.08 | 1835.14 | 455.34 | 281.63 | 1210.04 | 748.41 |
| | 1.60 | 2.0106 | 2976.84 | 2094.85 | 456.53 | 321.27 | 1213.46 | 853.93 |
| | 1.70 | 2.2698 | 2986.58 | 2372.63 | 457.72 | 363.63 | 1216.87 | 966.72 |
| | 1.80 | 2.5447 | 2996.32 | 2668.65 | 458.91 | 408.72 | 1220.28 | 1086.83 |
| | 1.90 | 2.8353 | 3006.05 | 2983.05 | 460.10 | 456.58 | 1223.69 | 1214.32 |
| | 2.00 | 3.1416 | 3015.76 | 3316.00 | 461.29 | 507.21 | 1227.09 | 1349.25 |

Tal como se aprecia en las tablas anteriores, los pilotes de los ejes 1, 2 y 3, desplantados en terreno duro, son capaces de soportar las cargas del puente para cualquiera de las tres situaciones (valores máximos, mínimos y promedio) y para cualquier diámetro, incluido el evaluado. Sin embargo, los pilotes del eje 4, desplantados en el estrato medio, NO son capaces de soportar las cargas actuantes para ningún diámetro de los analizados, para el análisis con los parámetros mínimos y pasa por muy poco para el diámetro de 1.5 m, para el análisis con los parámetros promedio.

8. Instrumentación electrónica para monitoreo de seguridad estructural

Con el paso del tiempo se han diseñado estructuras cada vez más esbeltas y robustas, dando como resultado periodos de oscilación de su comportamiento que pueden ser más largos dependiendo del sistema estructural, los factores ambientales y/o de los materiales con los que fueron construidos, debido a esto y para contar con información concreta del comportamiento estructural se necesitan periodos largos de monitoreo que nos permitan revelar daños o degradación tempranamente y así disminuir costos en reparaciones. La ausencia de monitoreo podría llevar serios problemas que se demuestran de alguna forma solamente cuando ya la situación es crítica y muchas veces muy costosa o incluso irreversible.

Gracias a los recientes avances de las tecnologías de información y de comunicaciones, especialmente las inalámbricas y la electrónica digital, es posible el diseño y desarrollo de soluciones de bajo costo, bajo consumo de energía, reducido tamaño, multifuncionales, modulares y confiables, con nodos de tamaño reducido y que pueden comunicarse a distancias relativamente largas. Usando sensores adecuados se logra medir remotamente algún fenómeno físico de interés como por ejemplo temperatura, humedad, esfuerzos, desplazamientos y aceleraciones entre otros.

Esta propuesta contempló hacer el trabajo en etapas: análisis preliminar, determinación de la estrategia de monitoreo, etapa de instalación y operación del sistema de monitoreo, almacenamiento y manejo de los datos, análisis y procesamiento de los resultados y conclusiones.

8.1. Análisis preliminar

En esta etapa se llevó a cabo la identificación de los parámetros que sirvieron para definir el comportamiento actual de los puentes por medio de una inspección visual; para localización de los elementos estructurales que presentan deformación, inclinación, desplazamiento, grietas y rotura con el objeto de formar criterios para determinar la estrategia de monitoreo más adecuada. A continuación se presentan imágenes de la primera inspección visual.



Figura 8.1. Desplazamientos y grietas en neoprenos y estructuras de concreto.

Se observó en el puente la Pigua III, que los soportes de neopreno entre la estructura transversal del puente o tablero y su soporte o cabezal del estribo muestran deformación en el sentido longitudinal del tablero, como si éste los empujara desde arriba, pasando la geometría de la cara lateral de los neoprenos de ser un rectángulo a convertirse en un romboide.



Figura 8.2. Deformaciones en neoprenos del cabezal de margen derecha.

Este desplazamiento es relativo y debe verse también la posibilidad de que el cabezal del estribo se haya movido inclinándose al lado contrario del terraplén de salida del puente, sin que el tablero se haya desplazado.

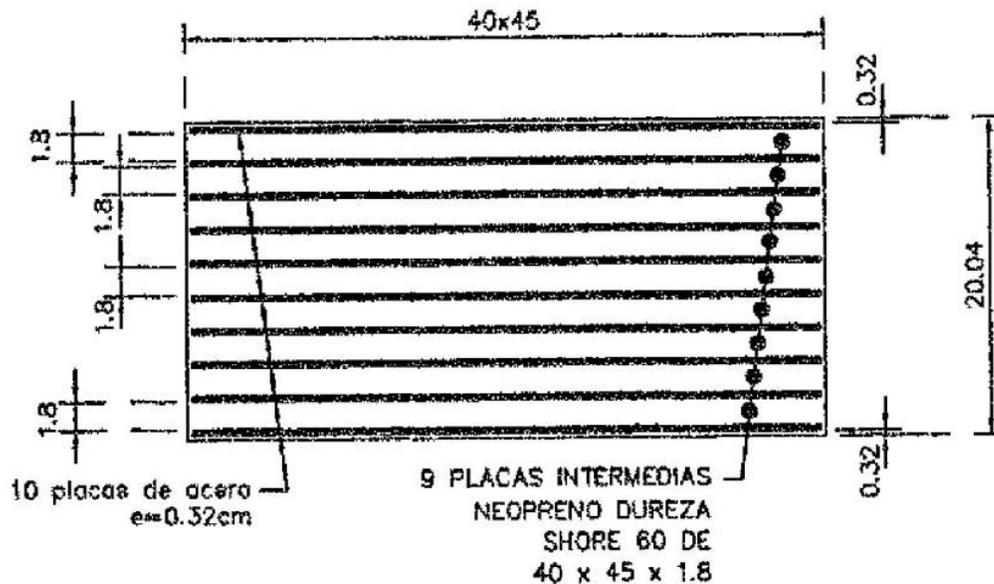


Figura 8.3. Geometría y características de los soportes de neopreno.

8.2. Determinación de la estrategia de monitoreo

Consideraciones de diseño

- Se identificó el punto estructural que se desea monitorear y los parámetros que darían idea de la tendencia del comportamiento. Esto es: a) Tablero y estribo de los puentes, b) Estribos y taludes.
- Se identificaron los factores ambientales que influirán en los resultados del sistema estructural. Entre ellos: la variación de la temperatura, humedad, los tipos de cargas presentes, etc.
- Se determinaron las limitaciones en la adquisición de datos durante la operación. Por ejemplo: Falta de energía eléctrica, vandalismo, la distancia entre los sensores, etc.

Adquisición de datos

- Selección del tipo, la cantidad y la ubicación de los sensores.
- Desarrollo del sistema de adquisición de datos. Por ejemplo: si el sistema alámbrico es recomendado para hacer evaluaciones rápidas y cuando hay suministro continuo de energía.
- La ubicación de los sensores debe basarse en una evaluación previa para que la información permita inferir sobre el estado global de la estructura.

- Integración y selección de la información de múltiples sensores. Por ejemplo: sincronización de los datos, integración de información de múltiples canales, aceleraciones, velocidades o desplazamientos relativos.
- Instalación de los sensores. Considerar los riesgos en instalación de los sensores en toda la estructura.

Observación de datos

- Identificación de tendencias de los datos que den información de posible daño. Técnicas de procesamiento de resultados obtenidos por los sensores.

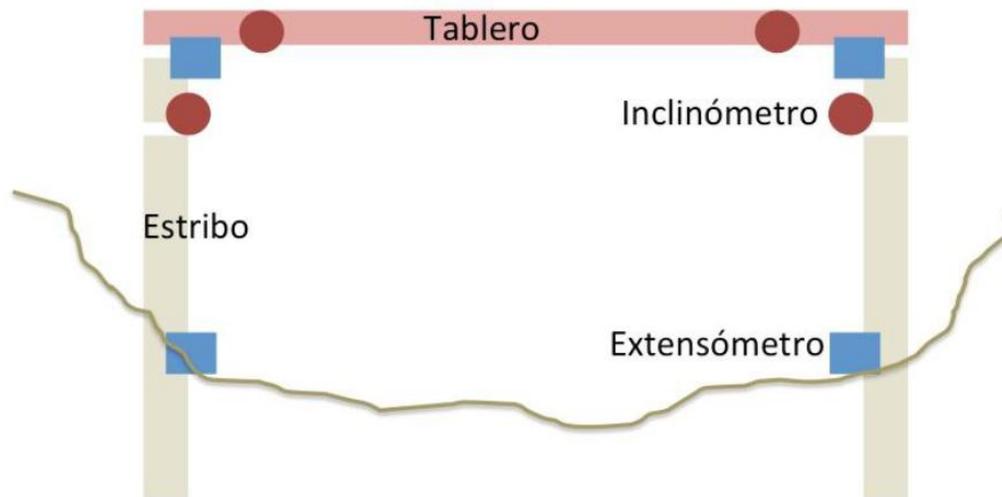


Figura 8.4. Determinación de la ubicación de sensores de la red de monitoreo. Extensómetros entre tablero y estribo y estribo y talud. Inclinómetros en tablero y estribo de ambas márgenes.

La intención de los dispositivos seleccionados, es establecer una tendencia de desplazamiento relativo entre las estructuras del puente y de su interacción con el terreno donde se encuentran desplazados. Con los extensómetros se identifica si hay desplazamientos relativos entre el cabezal del estribo y el tablero o entre el estribo y el terraplén que rodea las pilas del estribo. Con los inclinómetros, se establecerá si hay giros respecto de su posición original al momento de instalar los sensores.

De acuerdo a los parámetros a monitorear, las consideraciones de diseño y las características de instalación se plantearon tres posibles alternativas.

La primer alternativa propone instalar unos postes en el puente, cada uno con un panel solar, un gabinete que por dentro llevaría un transmisor GSM, una batería recargable un

controlador de carga y cableado para conectar cada uno de los sensores, sin embargo esta solución fue descartada ya que entre más elementos se hace más costosa, evidente al público y vulnerable a vandalismo, incluso la instalación se complica pues se requerirían extensos cables para conectar los sensores.

Otra solución fue instalar un gabinete por cada sensor: con panel solar, batería y transmisor GSM que envía los datos de forma directa a la base de datos de la página web, aunque en esta alternativa no hay cables ni postes; también es evidente al público y el sistema se hace propenso a vandalismo.

La tercer alternativa consistió en desarrollar una red de nodos-sensores de bajo consumo de energía con su batería incluida, cada nodo-sensor envía vía radio a un trasmisor GSM y finalmente cuando se completa un paquete de variables de monitoreo estructural lo envía vía GSM a una página web donde se almacena en una base de datos. Con esta solución los nodos sensores se vuelven económicos, no necesitan cableado, no necesitan panel solar ni gabinete, la instalación se hace un “poco” más fácil, la batería está integrada pues son de bajo consumo de energía, son discretos, el transmisor GSM es el único que necesita batería y panel solar sin embargo se buscó la manera de hacer su instalación discreta.

Se propusieron tres posibles soluciones y se elaboró una tabla de objetivos ponderados.

Tabla 8.1. Tabla de objetivos ponderados para seleccionar la estrategia de monitoreo. La de mayor puntuación es la más adecuada.

| Objetivo | | Parametros a monitorear | | | Características de instalación | | | Consideraciones de diseño | | | | Total | | |
|---------------------|--------------|---|---|---------------|--|--|-------------------|---|-------|-------|-------------------------|-------|-----------|----------|
| | | temperatura, humedad, cargas automoviles) | desplazamientos horizontales, cabeceo, alaveo | nivel del río | Falta de energía eléctrica (implica tiempo en instalación) | No perforar la estructura para evitar posibles daños | fácil de instalar | Tipo de comunicación considerando las distancias de los sensores en el puente | | | Bajo consumo de energía | | Económico | Discreto |
| | | | | | | | | GSM | Radio | Ambas | | | | |
| | Peso | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.05 | 0.15 | 0.06 | 0.06 | 0.08 | 0.1 | 0.05 | 0.05 | 5 |
| Primer alternativa | Magnitud | Buena | | | Complicada | | | Complicada | | | | | | |
| | Calificación | 3 | 3 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Valor | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Segunda alternativa | Magnitud | Buena | | | Regular | | | Regular | | | | | | |
| | Calificación | 5 | 5 | 5 | 5 | 2.5 | 3 | 2 | 2 | 0 | 3 | 3 | 0 | |
| | Valor | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.125 | 0.45 | 0.12 | 0.12 | 0 | 0.3 | 0.15 | 0 | 3.27 |
| Tercer alternativa | Magnitud | Buena | | | Regular | | | Buena | | | | | | |
| | Calificación | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3.5 | 0 | 0 | 5 | 4 | 3.5 | 4 | |
| | Valor | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.25 | 0.525 | 0 | 0 | 0.4 | 0.4 | 0.175 | 0.2 | 3.95 |

Se tomó la tercera alternativa como la mejor solución, esta consistió en desarrollar una red sensorial, un sensor tipo inclinómetro fijo (nodo - sensor), un sensor tipo extensómetro (nodo - sensor), un sensor para medir las variaciones de nivel. La red sensorial de nodos transmiten vía radio a un transmisor GSM (transmisor automático de datos TDA); pero además se consideró necesario realizar la instalación de una estación climatológica para determinar las condiciones ambientales de interés que pueden afectar la vida útil y el estado físico de la estructura; por ejemplo, lluvia (humedad), temperatura (sol), velocidad del viento dirección del viento etc., el sol y la

humedad son dos factores importantes que pueden alterar la geometría de una estructura.

Tabla 8.2. Especificaciones técnicas del nodo Inclinómetro.

| | | |
|--|--|---|
| Voltaje de operación Seudino (consumo) | | 3.3 V |
| Batería | Tipo D | Litio 3.6V 19000mAh |
| enclouser | dimensiones | 92X92X60 mm |
| | IP67 | |
| corriente max. de operación | | 229 mA |
| RADIO 888-XBP9B-DMWT-002 | INDOOR | 10 Kbps: up to 2000 ft (610 m); 200 Kbps: up to 1000 ft (305 m) |
| | OUTDOOR | 10 Kbps: up to 9 miles (15.5 km); 200 Kbps: up to 4 miles (6.5 km) (with 2.1dB dipole antennas) |
| Sensor IMURAZOR 9 Degrees of Freedom | TG-3200 - triple-axis digital-output gyroscope | |
| | ADXL345 - 13-bit resolution, ±16g, triple-axis accelerometer | |
| | HMC5883L - triple-axis, digital magnetometer | |

Tabla 8.3. Especificaciones técnicas de los extensómetros.

| | | |
|--|----------------|---|
| Voltaje de operación Seudino (consumo) | | 3.3 V |
| Bateria | Tipo D | Litio 3.6V 219000mAh |
| enclouser | dimensiones | 92X92X60 mm |
| | IP67 | |
| RADIO 888-XBP9B-DMWT-002 | INDOOR | 10 Kbps: up to 2000 ft (610 m); 200 Kbps: up to 1000 ft (305 m) |
| | OUTDOOR | 10 Kbps: up to 9 miles (15.5 km); 200 Kbps: up to 4 miles (6.5 km) (with 2.1dB dipole antennas) |
| Potenciómetro | rango | 10cm |
| | rango efectivo | 6cm |
| | humedad | No afecta a 95% HR, 4 horas <50 ° C |

8.3. Desarrollo de la red de sensores

Para llevar a cabo la red de monitoreo sensores- nodos, se seleccionó DigiMesh que es un protocolo de malla con nombre alternativo de la compañía Digi Internacional quien ofrece varios productos basados en ZigBee entre las ventajas que presenta son el menor costo pues no se necesita un gran cantidad de routers para alcanzar una gran escalabilidad, por otro lado la confiabilidad de la red, ya que la comunicación entre dos nodos cualesquiera de una red en malla puede llevarse a cabo incluso si uno o más nodos se desconectan de ésta de forma imprevista, o si alguno de los enlaces entre dos nodos adyacentes falla, ya que el resto evitarán el paso por ese punto los nodos adyacentes a un nodo o enlace fallido propagarán un cambio en la tabla de rutas, notificando a nodos contiguos del cambio en la red, y así sucesivamente. En consecuencia, una red en malla resulta muy confiable. Aunque la facilidad de solución de problemas y el aumento de la confiabilidad son ventajas muy interesantes es un sistema complejo de programar.

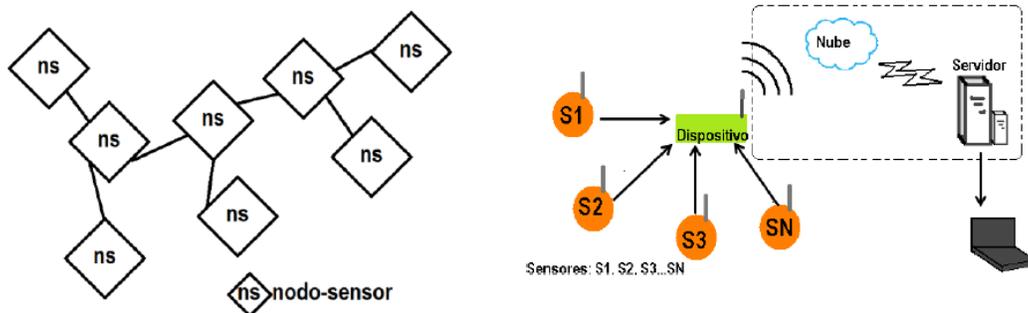


Figura 8.5. Ejemplo de la estructura de la red de sensores.

Se emplea una red sensorial inalámbrica tipo “Mesh”, formada por sensores tipo inclinómetro fijo (nodo sensor), sensores tipo extensómetros (nodo sensor) y un sensor para medir las variaciones de nivel de espejo del río. Además de la estación climatológica mixta. Cada nodo sensor envía al dispositivo transmisor de datos automático TDA vía radio; el TDA envía vía GSM a la nube y los datos son presentados en una página web.

8.4. Instalación y operación del sistema de monitoreo

Se llevó a cabo la instalación de sensores previa su programación y puesta en cero, así como la operación de las líneas de comunicación, planes de mantenimiento y posibles reparaciones del sistema de monitoreo.

Se contó con apoyo y autorización de la CONAGUA para colocar un juego de sensores climatológicos y de variación de nivel del río, en su estación limnimétrica, donde además

tienen instalada una estación climatológica. Esta estación se encuentra a 100 m aguas abajo de los puentes.

Se instalaron en la pila central margen derecha del puente Pigua III el transmisor automático de datos TDA y su alimentación, a base de baterías y celdas solares; y en la estructura Tablero - Estribo de margen derecha los sensores (inclinómetro y extensómetro).



Figura 8.6. Instrumentos desarrollados para monitoreo estructural.

Se armaron los instrumentos de medición de acuerdo a las especificaciones desarrolladas en el proyecto, a fin de contar con un monitoreo permanente de las deformaciones o desplazamientos del tablero y su soporte de margen derecha de cada uno de los puentes la Pigua. Solo se instaló en la Pigua III, cabezal de margen derecha, a fin de hacer pruebas de funcionamiento.

La red de observación se diseñó con sensores acelerómetros y extensómetros junto con un dispositivo TDA (transmisor de datos automático) que centraliza los datos y los transmite vía GSM a una página web que recibe cada 15 minutos los mensajes del TDA. Este visor en la web organiza, respalda y presenta los datos en forma de gráficos donde el tiempo en las abscisas refleja el transcurso de los eventos generados y censados por los instrumentos.

8.4.1. Instalación del transmisor automático de datos (TDA)

Cada nodo sensor envía sus lecturas al transmisor automático de datos, este concentra la información de cada nodo-sensor y envía por GSM los datos a un servidor en la nube.

Se instaló en la plataforma de la pila centro margen derecha del puente Pigua III, donde recibe luz solar y no se alcanzan a ver de lejos los instrumentos que ahí se colocaron. El difícil acceso a ese sitio, disminuye el riesgo de vandalización o robo.



Figura 8.7. Pila del puente centro margen derecha.

En la pila del puente centro margen derecha fue donde se seleccionó apropiado la instalación del TDA pues por su difícil acceso, es menos probable que se la roben o dañen. En esa plataforma se instaló una celda solar, una caja de baterías con su regulador de carga y el propio transmisor GSM.



Figura 8.8. TDA con antena.



Figura 8.9. Panel solar del TDA.



Figura 8.10. Maniobras para instalación del TDA sobre la plataforma de la pila del puente Pigua III, centro, margen derecha.

8.4.2. Instalación de inclinómetro

Estos dispositivos permiten observar probables movimientos de cabeceo o alabeo, tanto del tablero del puente, como de su soporte o estribo.

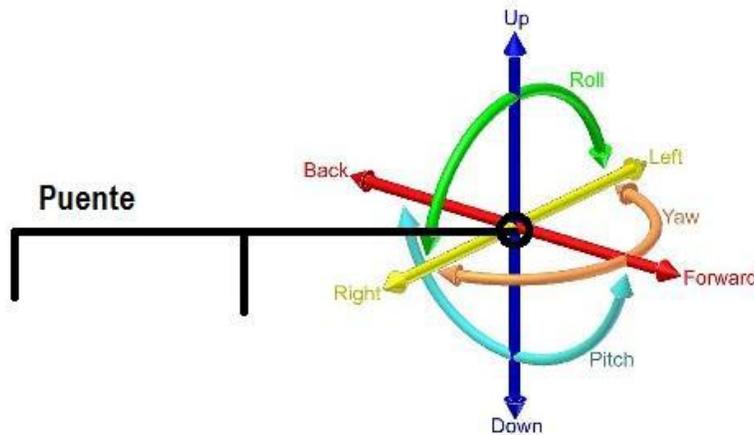


Figura 8.11. Disposición del sensor "inclinómetro" en el puente para detectar los giros. Cabeceo ROLL y alabeo del puente PITCH.

Este dispositivo se instaló sobre el estribo de margen derecha del puente Pigua III. La instalación del dispositivo se hace con un par de pijas con taquete y resina epóxica como adherente. El equipo no está a la mano y se procuró disimular su presencia para evitar vandalismo.



Figura 8.12. Instalación del sensor "inclinómetro" en el estribo de margen derecha.

8.4.3. Instalación de extensómetro.

El funcionamiento del extensómetro es similar al de un vernier, si se presentara un movimiento relativo entre el tablero del puente y su estribo, el extensómetro será el que envíe ese dato a través de la red, para que aparezca en un medio de fácil observación que esté conectado a internet. Indicará la magnitud del desplazamiento y la fecha y hora del evento.

En la figura siguiente se muestra la instalación esquemática de la interacción entre el tablero y el estribo del puente, lo que explica la posición del extensómetro en dicho sitio. Se entiende que las magnitudes esperadas de un posible movimiento sean de milímetros, por ello, el dispositivo en forma de regla, es pequeña.

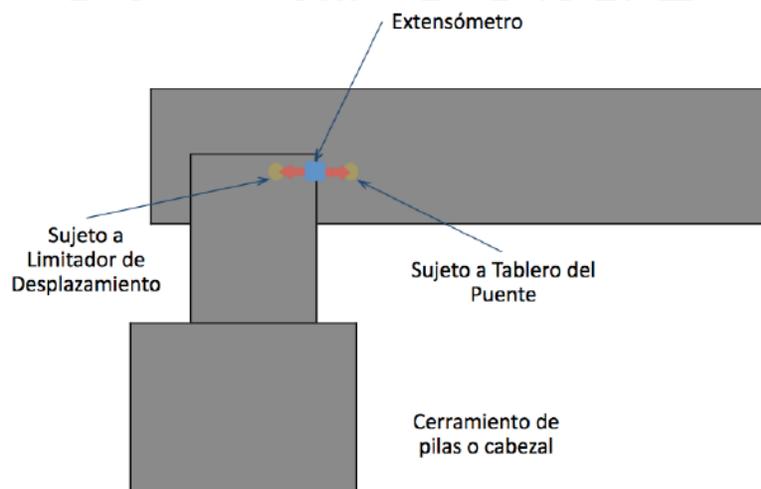


Figura 8.13. Esquema de instalación del extensómetro en la estructura del puente.

A continuación se observa en la foto de la izquierda el cabezal de margen derecha del puente La Pigua III, y se señala con una flecha blanca el limitador de desplazamiento horizontal del tablero, que es un dado de concreto que forma parte del cabezal. Ahí se instaló el extensómetro, que mide los desplazamientos relativos entre el cabezal del estribo y el tablero del puente. Dentro de la misma caja se encuentran ambos sensores, el inclinómetro y el extensómetro.



Figura 8.14. Ubicación del extensómetro en el cabezal de margen derecha del puente La Pigua III.



Figura 8.15. Aspecto del extensómetro e inclinómetro instalados en el cabezal de margen derecha de La Pigua III.

8.4.4. Instalación de inclinómetros

Se instaló un inclinómetro en el tubo de observación dejado en el sondeo SPT-1 realizado y descrito en el capítulo 3. En este punto se podrá estimar si existe algún giro del tubo por un posible movimiento del talud de margen derecha. El inclinómetro se instaló empleando un nivel de burbuja para orientarlo adecuadamente en su posición de trabajo.

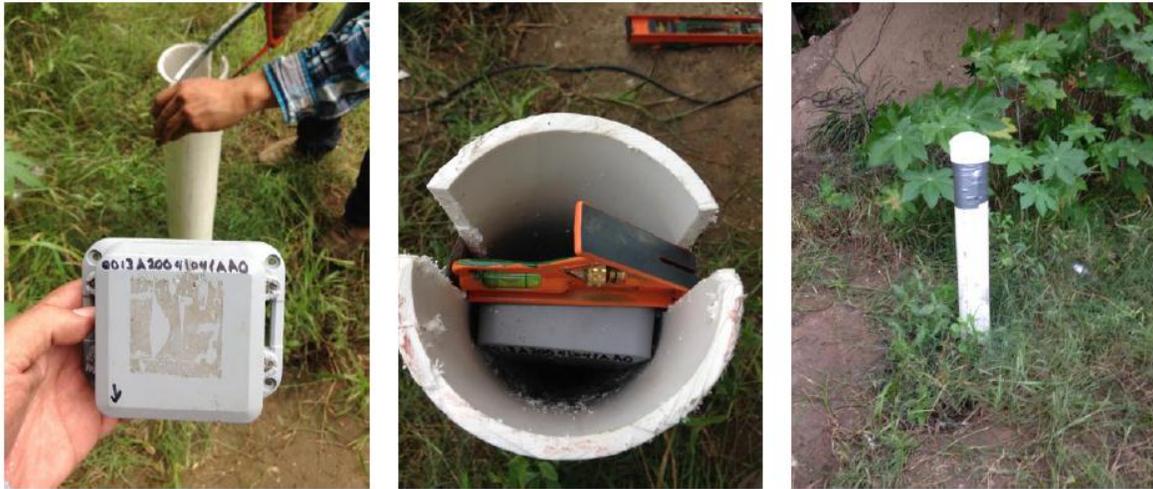


Figura 8.16. Inclinómetro colocado en tubo de observación del SPT-1, para observar posibles deformaciones del talud de margen derecha del puente La Pigua III.

También se instalaron inclinómetros en el cabezal del estribo de margen izquierda del puente la Pigua III, así como en el tablero del puente La Pigua II y en el estribo de margen derecha del puente La Pigua I.



a)

b)

c)

Figura 8.17. Inclinómetros colocados en a) el estribo de margen izquierda del puente La Pigua III, b) tablero del puente La Pigua II y c) estribo de margen derecha del puente La Pigua I.

A continuación se presenta la lista de los sensores instalados y su ubicación.

Tabla 8.4. Lista de sensores instalados en los puentes La Pigua I, II y III.

| No. | Clave de sensor | Ubicación | Clave de Ubicación ID |
|-----|------------------|--|-----------------------|
| 1 | 0013A20040FCC366 | Inclinómetro colocado en Pigua I Tablero margen derecha en alma de vigueta. | IN PI TA MD |
| 2 | 0013A20041041AB5 | Inclinómetro colocado en Pigua III Tablero margen derecha. R+ giro hacia rampa del puente R- giro hacia el centro del puente . (el sensor está de cabeza) | IN PIII TA MD |
| 2 | 0013A20041041AB5 | Extensómetro colocado en Pigua III Tablero-Estribo margen derecha. | EX PIII TA-ES MD |
| 3 | 0013A20041041AA0 | Inclinómetro colocado en Pigua III Tubo de exploración - deformación talud margen derecha. | IN PIII TUB-EXP MD |
| 4 | 0013A20040FCC363 | Inclinómetro colocado en Pigua III Estribo margen derecha en cabezal de apoyo de tablero. | IN PIII ES MD |
| 5 | 0013A20040DB4828 | Inclinómetro colocado en Pigua I Estribo margen derecha apoyo cilíndrico del estribo amarre radial de tablaestacas. | IN PI ES MD |
| 7 | 0013A20040E4EFF7 | Inclinómetro colocado en Pigua III Estribo margen izquierda en cabezal de apoyo de tablero. | IN PIII ES MI |

8.4.5. Actualizaciones de la estación climatológica mixta

Agua abajo de los puentes se encuentra la estación limnimétrica de la CONAGUA, donde se adicionaron equipos de medición complementarios al proceso de monitoreo. Las actualizaciones que se realizaron a la estación climatológica permiten actualmente que:

- la estación climatológica mixta envíe vía GSM de forma automática los datos,
- los datos obtenidos de la estación climatológica mixta, dados por las mediciones de temperatura, humedad, precipitación, dirección del viento ráfaga y velocidad de viento, hora, fecha queden almacenadas en la memoria para ser enviadas en caso de no haber conexión con la red GSM,
- sea posible ver el nivel de batería que proporciona el panel solar que alimentan a la estación climatológica.



Figura 8.18. Sitio donde se efectuó la instalación del sensor de variación de nivel del cauce Carrizal y variables climáticas.

8.5. Presentación de datos

El equipo concentrador de datos será programado para enviar los datos de cada uno de los sensores a una base de datos por medio de un canal de comunicación GSM y a través de un sistema web el usuario puede acceder a estos datos, consultarlos y procesarlos a través de una computadora. En las siguientes figuras se presentan gráficos sencillos de interpretar. La liga de la página Web donde se tiene acceso a los datos capturados en el sitio de monitoreo es <http://instrutronica.com/telemetry/lapigua> en donde, con el password o clave, es posible acceder a su contenido.

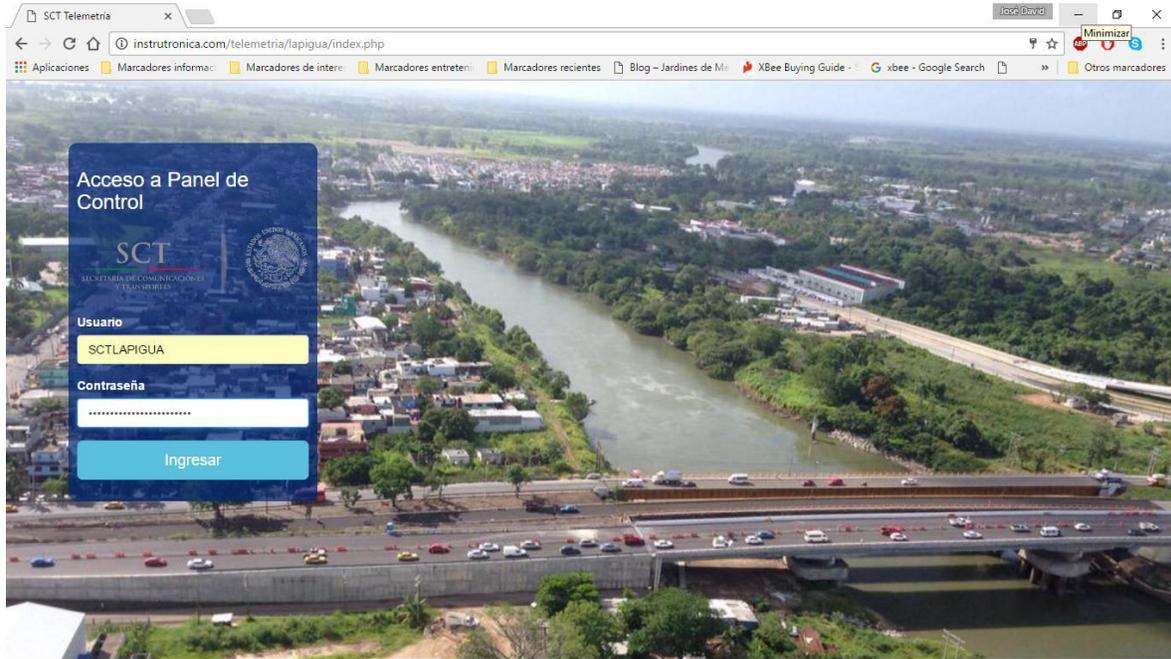
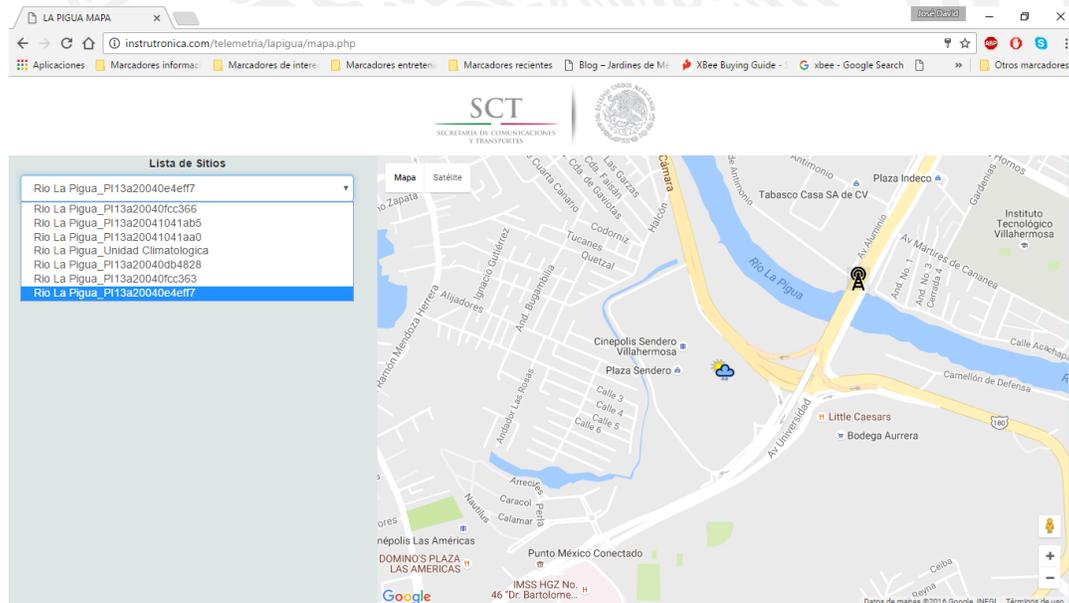


Figura 8.19. Vista de la página web principal, con clave de acceso y usuario.

<http://instrutonica.com/telemetria/lapigua>

Usuario: SCTLAPIGUA Contraseña: LAPIGUA.MITELEMETRIA.123.



Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, 62550. México.

Tel: (777) 329 36 00 www.imta.gob.mx

Página 83

Figura 8.20. Mapa de localización de los dispositivos instalados y un menú para seleccionar alguno de los sensores instalados en el puente y visualizar los datos que está enviando.

| No. Medición | Y | P | R | V | D | Fecha y Hora de la Medición |
|--------------|--------|-------|-------|-----|---|-----------------------------|
| 25 | -62.11 | -0.21 | -2.02 | 3.5 | | 2016/11/24,4:39:10 |
| 24 | -62.21 | -0.19 | -1.98 | 3.5 | | 2016/11/24,4:24:6 |
| 23 | -62.11 | -0.33 | -1.97 | 3.5 | | 2016/11/24,4:9:2 |
| 22 | -62.19 | -0.28 | -2.08 | 3.5 | | 2016/11/24,3:53:58 |
| 21 | -62.12 | -0.17 | -1.96 | 3.5 | | 2016/11/24,3:38:54 |
| 20 | -62.09 | -0.18 | -1.96 | 3.5 | | 2016/11/24,3:23:50 |
| 19 | -62.13 | -0.16 | -1.92 | 3.5 | | 2016/11/24,3:8:46 |
| 18 | -62.01 | -0.14 | -1.90 | 3.5 | | 2016/11/24,2:53:42 |
| 17 | -62.19 | -0.23 | -1.91 | 3.5 | | 2016/11/24,2:38:38 |
| 16 | -62.12 | -0.20 | -2.01 | 3.5 | | 2016/11/24,2:23:34 |
| 15 | -62.08 | -0.18 | -1.91 | 3.5 | | 2016/11/24,2:8:30 |

Figura 8.21. Tabla de los datos actuales enviados por el sensor seleccionado; con opción a seleccionar la fecha que se desea visualizar (se despliega un calendario).

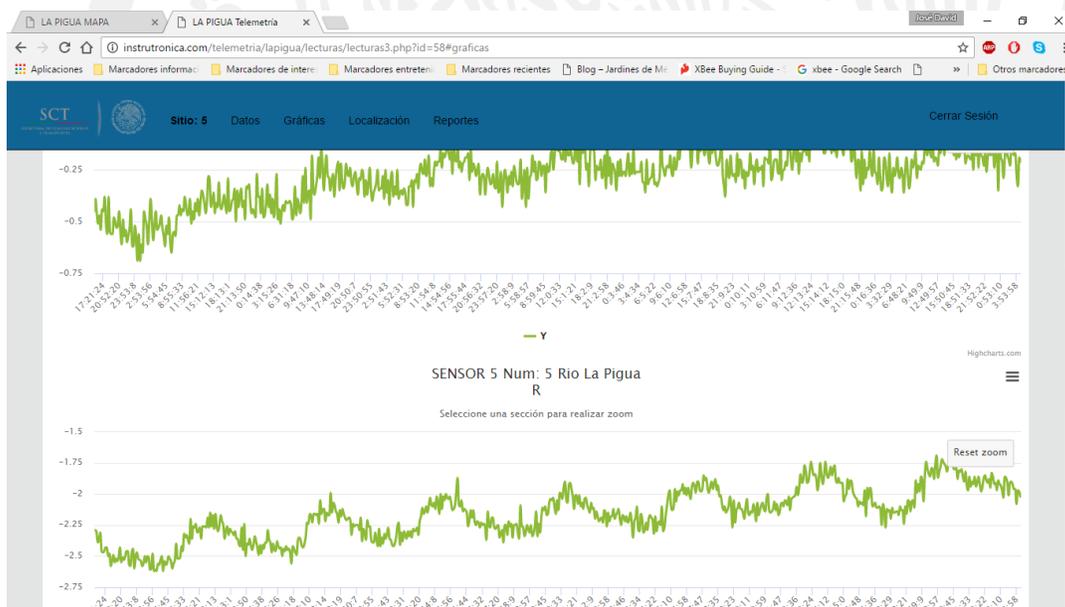


Figura 8.22. En la opción Gráficas, se pueden ver los datos ordenados cronológicamente en un periodo de tiempo.

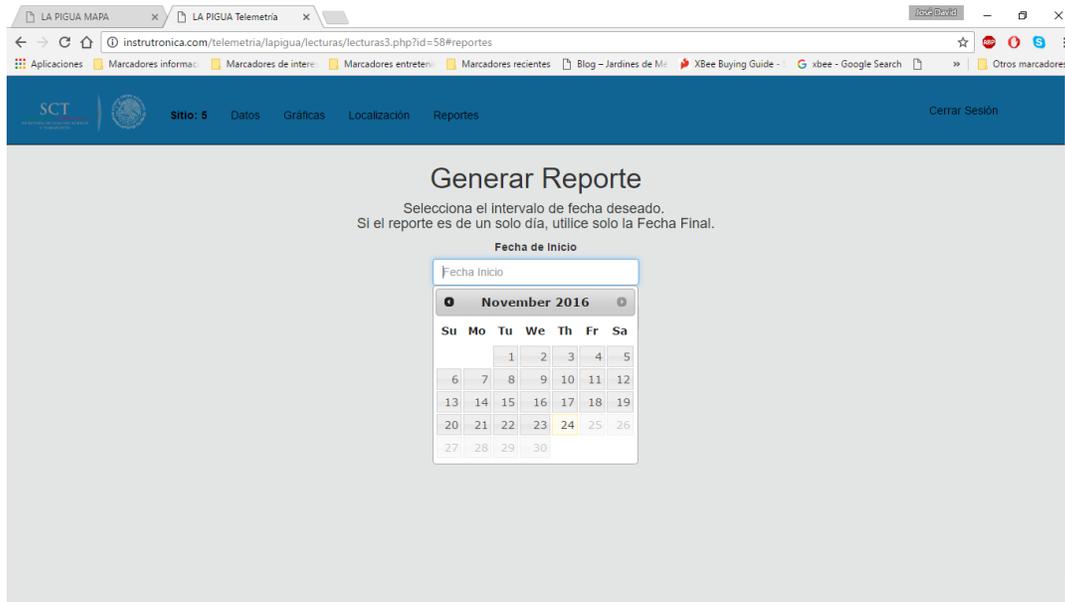


Figura 8.23. En la opción Reportes se puede seleccionar un intervalo de tiempo por fecha y se descarga de forma automática un archivo .CSV

En las siguientes figuras se presentan los resultados en gráficos de los datos monitoreados por los sensores.

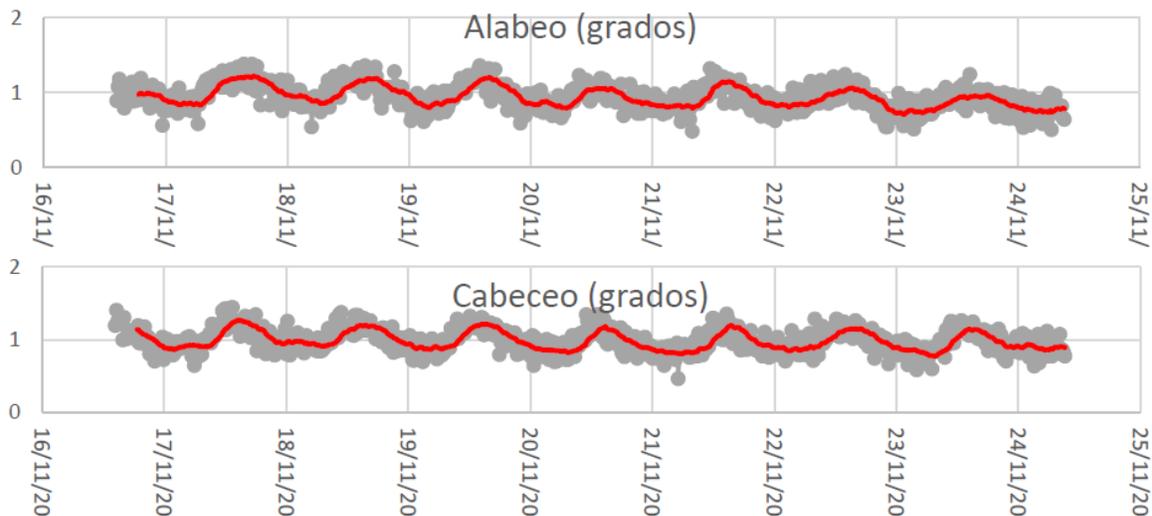


Figura 8.24. Gráficas Sensor 0013A20040FCC366 Colocado en Pigua I tablero margen derecha en alma de vigueta.

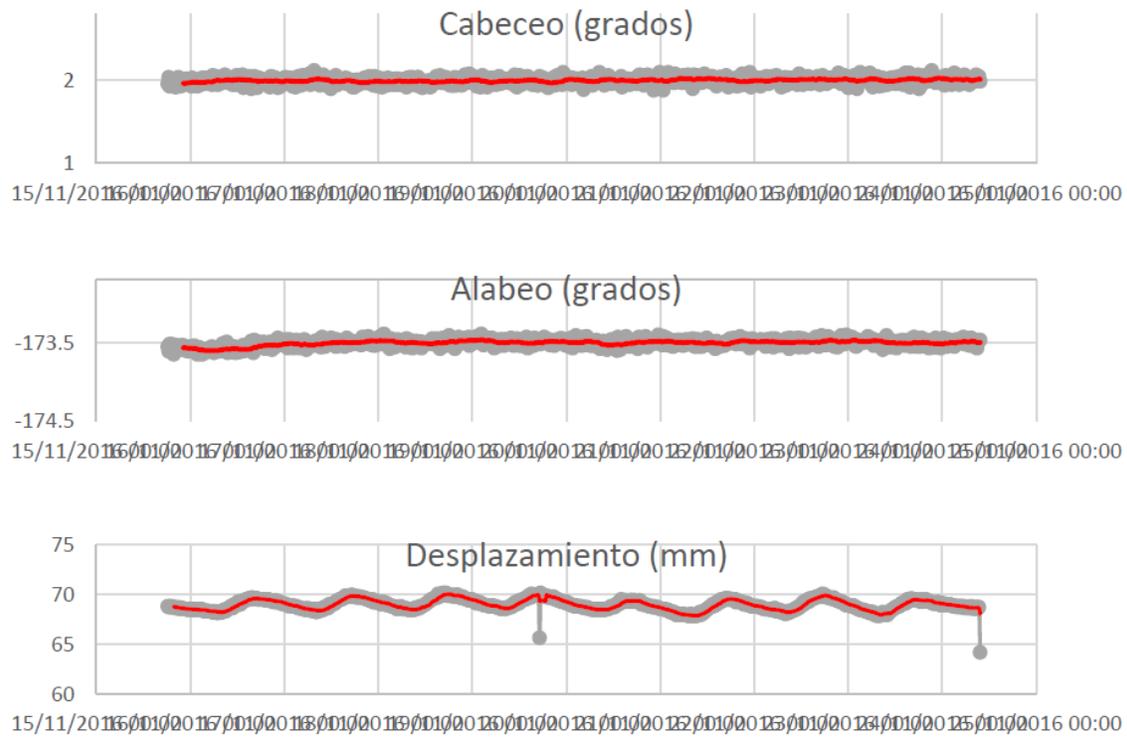


Figura 8.25. Gráficas Sensor 0013A20041041AB5 Colocado en Pigua III TABLERO margen derecha - extensómetro Tablero-Estribo.

La forma de apreciar los datos es observando su tendencia, ya que la electrónica del dispositivo y el propio sensor son afectados por los cambios de temperatura del entorno ya que los datos son tomados de forma continua cada 15 minutos y en ese período de tiempo los cambios de temperatura son significativos en el comportamiento del sensor.

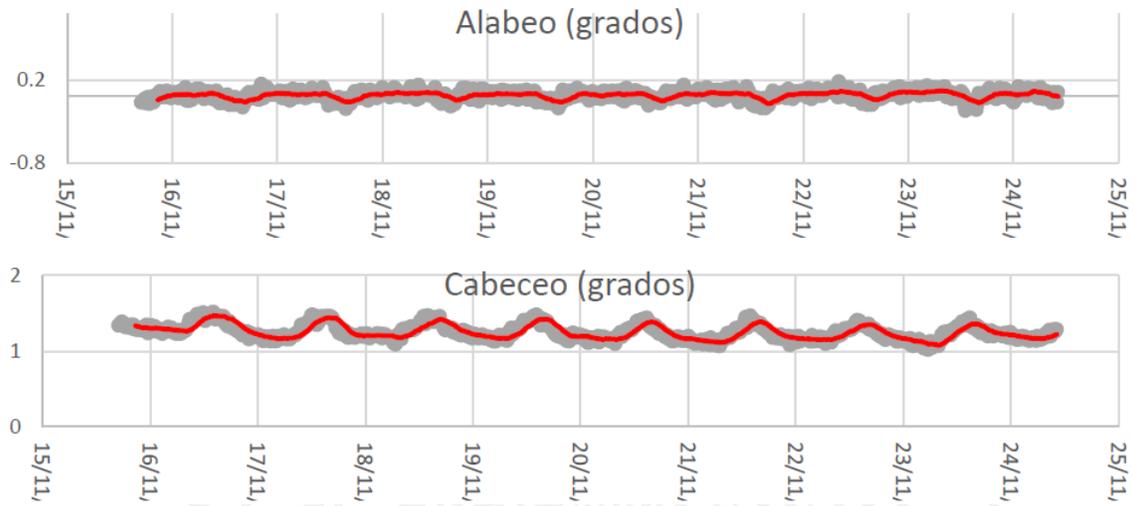


Figura 8.26. Sensor 0013A20041041AA0 Colocado en Pigua III Tubo de observación - deformación talud margen derecha.

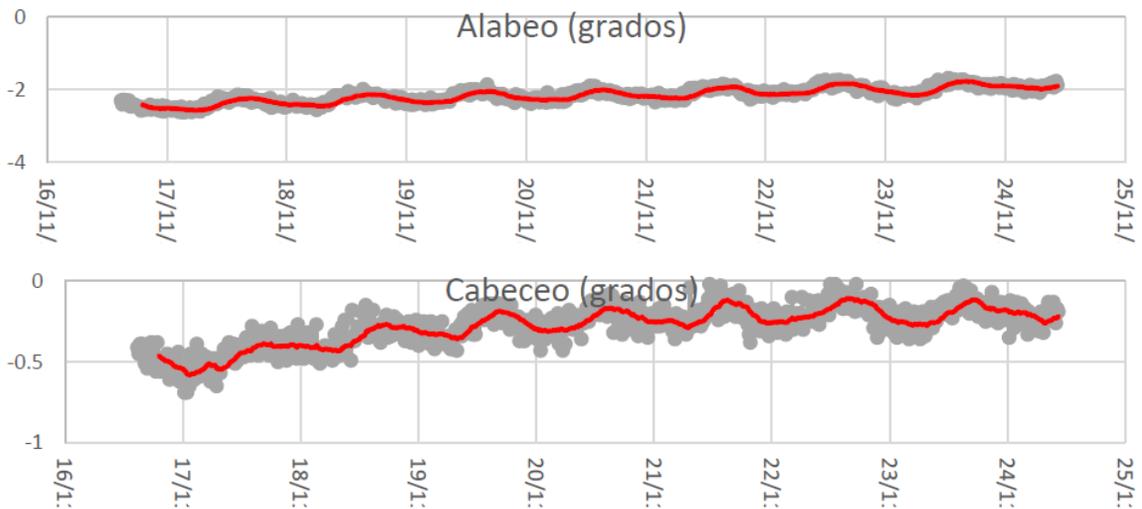


Figura 8.27. Sensor 0013A20040DB4828 colocado en Pigua I estribo margen derecha apoyo cilíndrico del estribo amarre radial de tablaestacas.

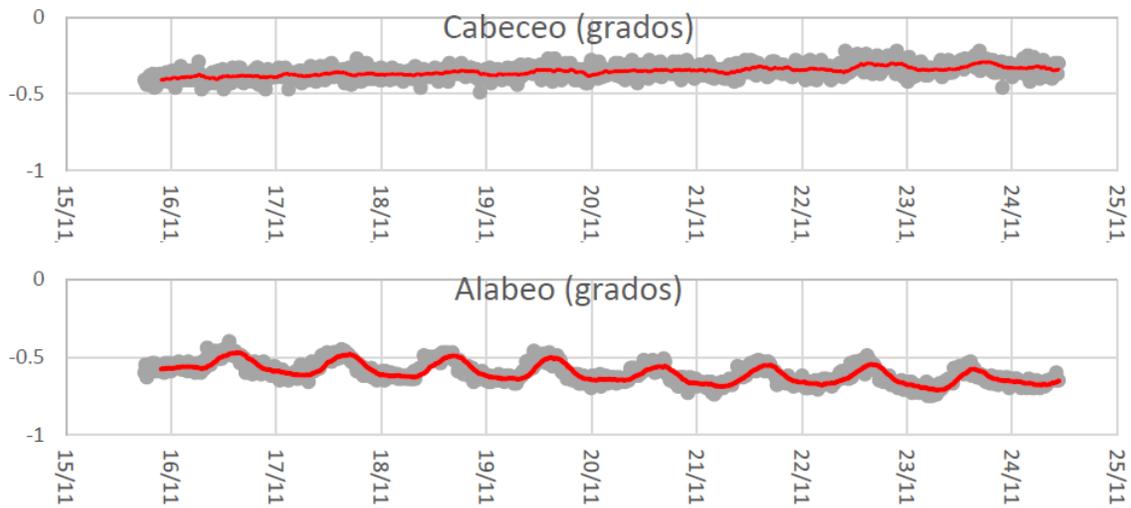


Figura 8.28. Sensor 0013A20040FCC363 Colocado en Pigua III Estribo margen derecha en cabezal de apoyo de tablero.

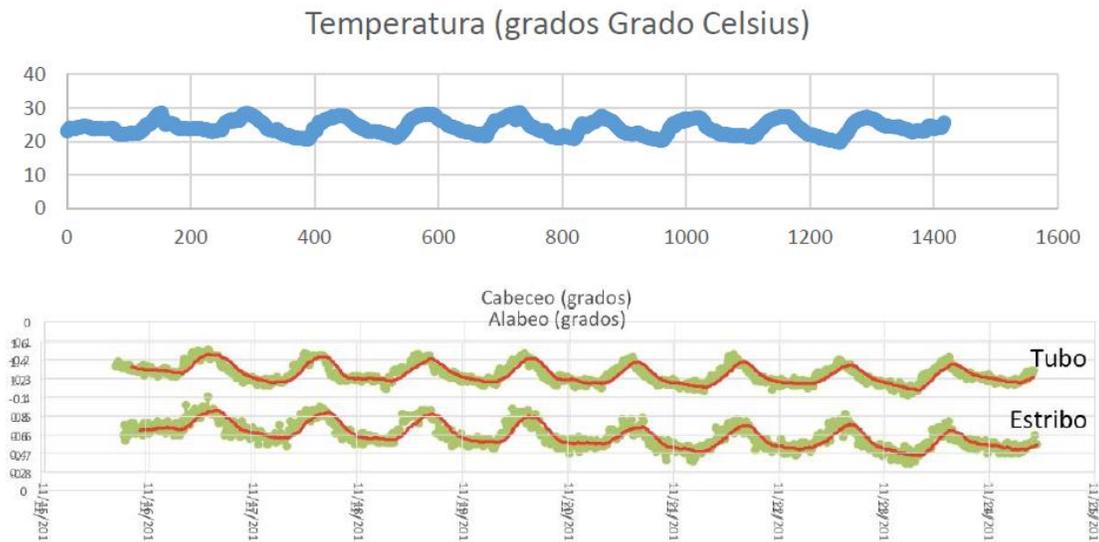


Figura 8.29. Se observa que el comportamiento de los inclinómetros instalados en el tubo de observación del talud de la Pigua III y el que se instaló en su estribo, se comportan de manera similar. Comparando con las variaciones de temperatura y la forma de las gráficas de los inclinómetros se establece, que para la misma temperatura, los datos de los inclinómetros son similares, indicando que la estructura que monitorean no tiene movimiento alguno, al menos en el período observado.

El cabeceo y el alabeo del tablero son prácticamente imperceptibles, los sensores no muestran ninguna tendencia de giro de las estructuras sometidas a monitoreo, al menos durante el período de observación.

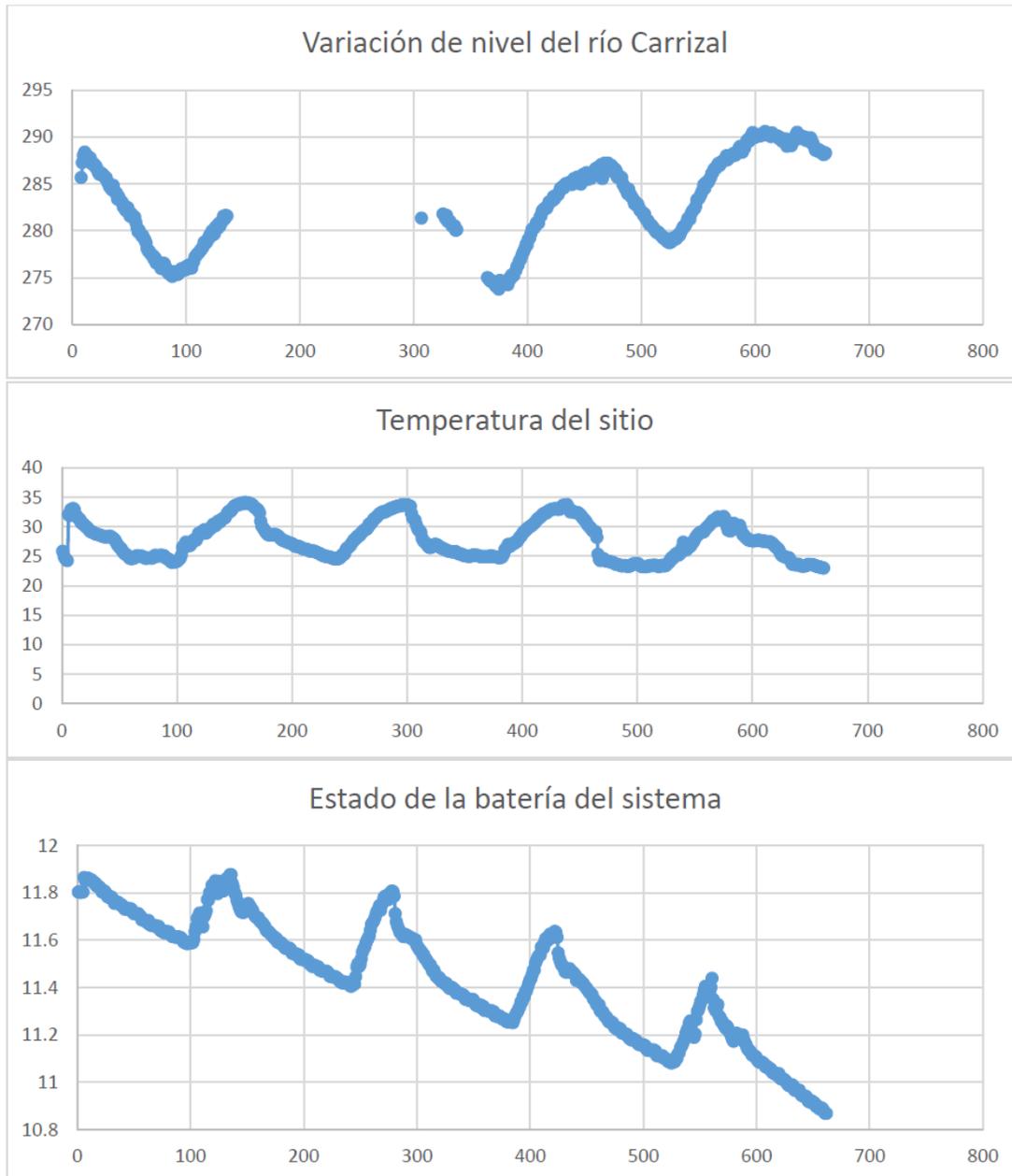


Figura 8.30. Se observa que la batería no se recupera, posiblemente por la alta nubosidad de la época. Se propone cambiar a una batería de mayor duración y una celda solar de mayor área de captación.

8.6. Conclusiones

El sistema de monitoreo a base de inclinómetros fijos, extensómetros y transmisor automático de datos muestra en tiempo real datos de los posibles movimientos o deformaciones a las que está sujeta la estructura por solicitaciones de carga, es necesario tener un histórico de datos ya que un periodo amplio de observación permite determinar la tendencia de su comportamiento, ésto como apoyo para los análisis de estabilidad estructural que sean necesarios. El sistema de monitoreo servirá para futuras verificaciones de la salud estructural del puente y potencialmente de apoyo para programar un adecuado mantenimiento de la estructura.

Aunque es posible hacer mejoras en la red, las pruebas de red que se realizaron resultaron satisfactorias pues demuestran que es viable llevar un monitoreo de salud estructural.

La comparación de los datos de temperatura y el comportamiento de los datos de los inclinómetros facilita su interpretación, sugiriendo deriva térmica del propio instrumento, pues con visitas en el sitio se confirma que las estructuras no han sufrido ningún desplazamiento relativo o giro en el período de observación.

9. Análisis y propuestas conceptuales de solución

De acuerdo con lo expuesto en el capítulo 7.2, los pilotes del apoyo del eje 4 del puente La Pigua III, correspondiente a la margen derecha, muestran incompetencia para soportar plenamente las cargas que bajan sobre dicho apoyo, debido a que no fue desplantada en el estrato duro, lo que ha generado movimientos de dicho apoyo por la falta de confinamiento de los pilotes y a que no se genera la condición de empotramiento. Estos movimientos pueden continuar su desarrollo hasta generar problemas estructurales severos a la calzada del puente, inhabilitándolo para el desempeño de su función principal.

A continuación se presenta la propuesta conceptual de rehabilitación que establezca el apoyo de margen derecha y detenga los movimientos que actualmente están ocurriendo. De acuerdo con las opiniones del personal de la SCT encargada de la supervisión del proyecto, la propuesta de rehabilitación afectará en lo mínimo el funcionamiento del puente.

La propuesta se centra en la construcción de una estructura auxiliar de apoyo adjunta al apoyo del eje 4, pero desplantado a una profundidad adecuada que permita la transferencia de cargas directamente al estrato duro. Esta nueva estructura se ligará al cabezal del apoyo actual mediante una serie de trabes que permitan formar una condición tridimensional en las que se repartan las cargas actuantes. El dimensionamiento de la nueva estructura deberá realizarse para considerar que en un momento dado ésta pueda soportar la totalidad de las cargas que bajan al apoyo de margen derecha (1783.77 t).

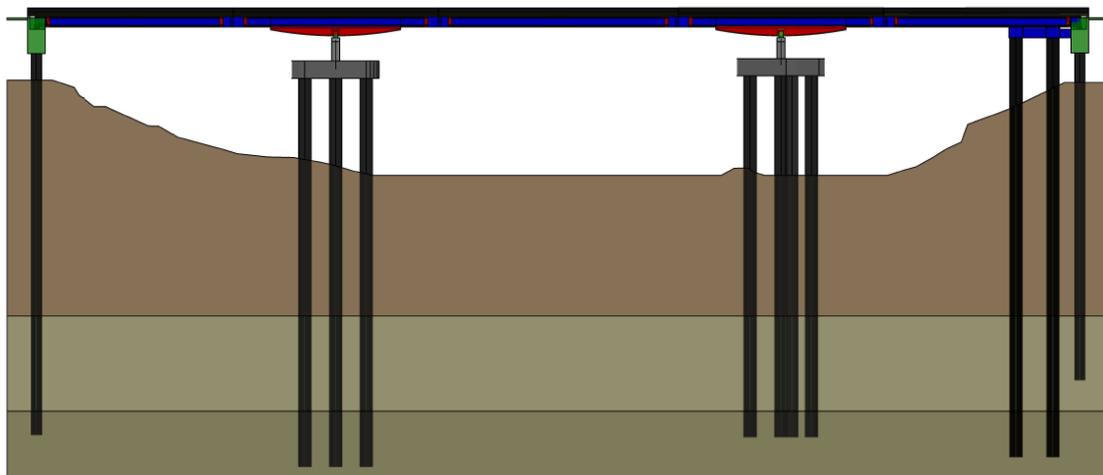


Figura 9.1. Vista lateral del puente con la estructura auxiliar en margen derecha bajo el puente La Pigua III.

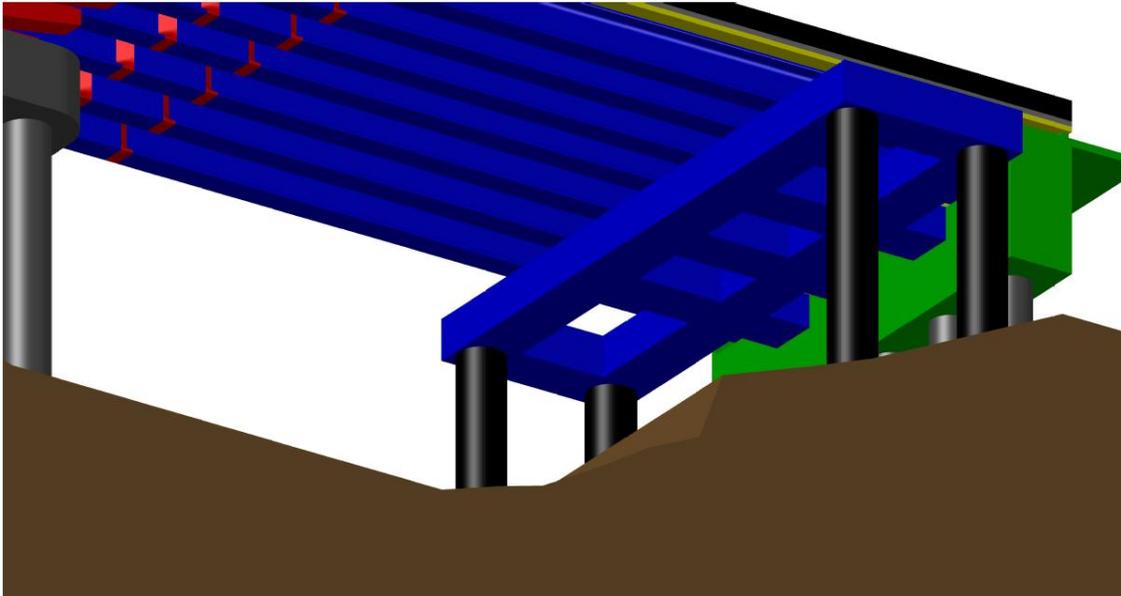


Figura 9.2. Vista desde la parte inferior de la estructura auxiliar de apoyo en margen derecha del puente La Pigua III.

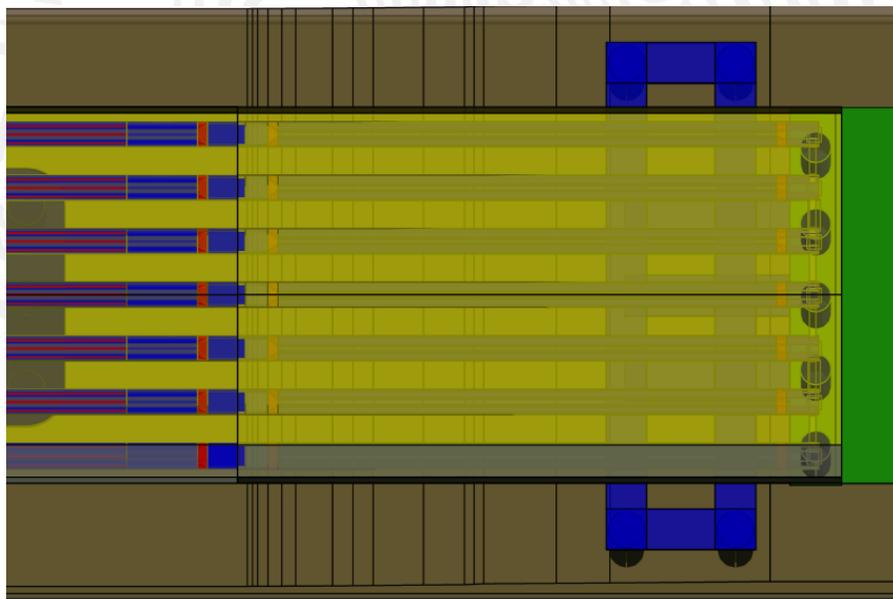


Figura 9.3. Vista superior de la estructura auxiliar en margen derecha bajo el puente La Pigua III.

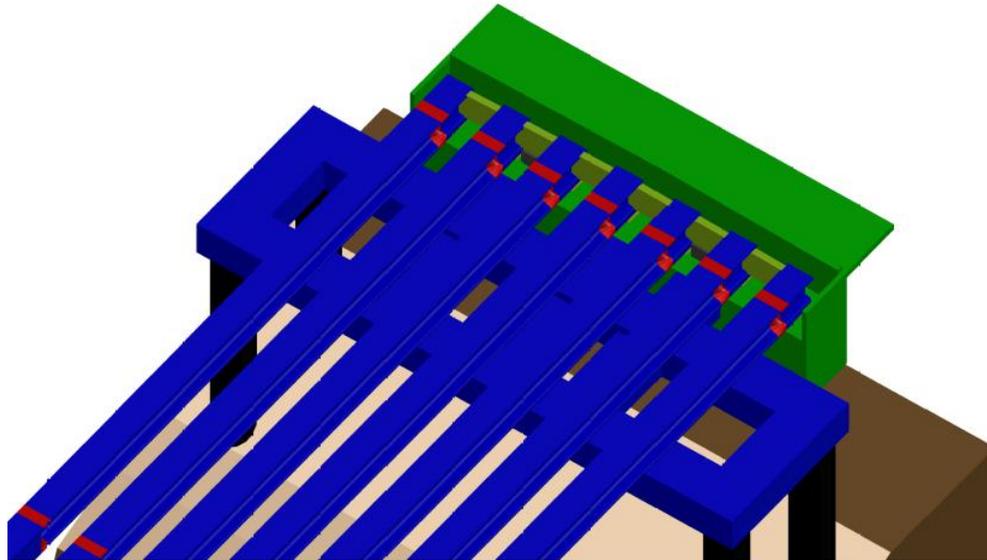


Figura 9.4. Detalle del apoyo de las traves sobre la estructura auxiliar de apoyo en la margen derecha del puente La Pigua III.

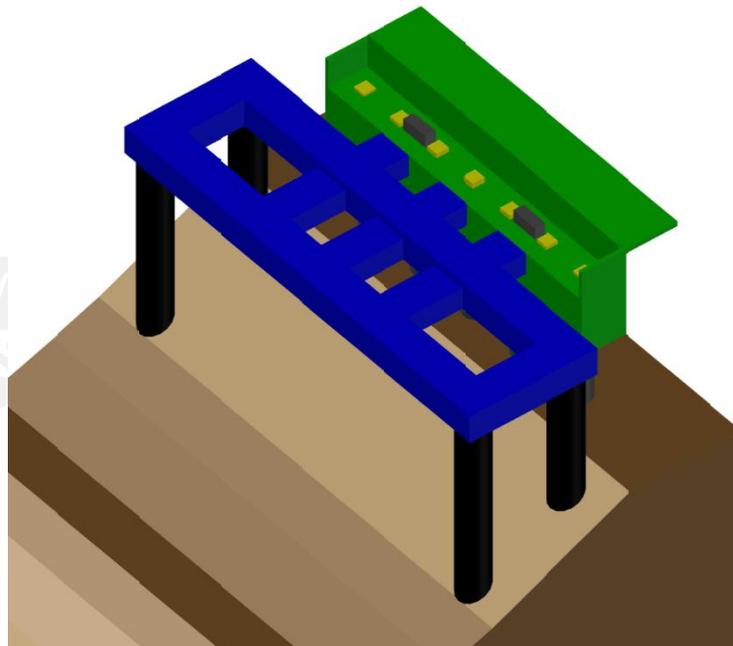


Figura 9.5. Detalle de la interconexión de la estructura auxiliar con el apoyo en la margen derecha del puente La Pigua III.

Para el dimensionamiento de los pilotes se realizó un análisis de capacidad de carga considerando el modelo geotécnico elaborado y los parámetros del suelo máximos, mínimos y promedio. Los resultados se presentan a continuación:

| Profundidad de desplante (m) | Dimensiones de la cimentación | | VALORES MÁXIMOS | | VALORES MÍNIMOS | | VALORES PROMEDIO | |
|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------|---|--|---|--|---|--|
| | Diámetro (D) | Área (A _p) | Capacidad de carga resistente por punta (q _{Rp}) | Carga resistente admisible por punta (P _{Rp}) | Capacidad de carga resistente por punta (q _{Rp}) | Carga resistente admisible por punta (P _{Rp}) | Capacidad de carga resistente por punta (q _{Rp}) | Carga resistente admisible por punta (P _{Rp}) |
| | (m) | (m ²) | (t/m ²) | (t) | (t/m ²) | (t) | (t/m ²) | (t) |
| 54.70 | 1.50 | 1.7671 | 5489.03 | 3394.97 | 3979.40 | 2461.26 | 4734.22 | 2928.12 |
| | 1.60 | 2.0106 | 5505.62 | 3874.40 | 3994.07 | 2810.70 | 4749.85 | 3342.55 |
| | 1.70 | 2.2698 | 5522.19 | 4386.99 | 4008.73 | 3184.66 | 4765.46 | 3785.82 |
| | 1.80 | 2.5447 | 5538.74 | 4933.03 | 4023.37 | 3583.38 | 4781.06 | 4258.21 |
| | 1.90 | 2.8353 | 5555.28 | 5512.79 | 4038.00 | 4007.11 | 4796.64 | 4759.95 |
| | 2.00 | 3.1416 | 5571.81 | 6126.53 | 4052.61 | 4456.07 | 4812.21 | 5291.30 |

La tabla se debe interpretar de la misma manera que las tablas presentadas en el capítulo 7.2. Tal como se aprecia, con la condición de desplante sobre el estrato duro, la capacidad de carga, para cualquiera de los diámetros analizados, es suficiente para soportar las solicitaciones sobre el apoyo, considerando incluso que el apoyo actual transfiriera el total de la carga a los cuatro pilotes nuevos, que entonces deberían soportar una carga de aproximadamente 900 t cada uno de ellos, considerando un factor de carga de 2. Sin embargo, se recomienda el diámetro de 1.5 m, similar al existente en los apoyos de los extremos del puente, con el que se obtienen capacidades de carga del más del doble de la solicitud a cada pilote.

El diseño de los pilotes y traveses deberá ser realizado por el especialista en estructuras, con las consideraciones presentadas en este informe.

10. Referencias

- a) APARICIO, M.J., Fundamentos de hidrología superficial. LIMUSA, 1992.
- b) Chow, V. T., Maidment D. R. y Mays L. W., Applied hydrology. McGraw-Hill, 1988.
- c) Comisión Nacional del Agua (CNA), Instructivo de Hidrología para Determinar la Avenida Máxima Ordinaria Asociada a la Delimitación de Zona Federal, 1987.
- d) COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA), Programas de Prevención Contra Contingencias Hidráulicas para los trece Organismos de Cuenca. Convenio de colaboración IMTA-CONAGUA, Anexo Técnico TH1313, 2014. <http://hidrosuperf.imta.mx/pronacch>.
- e) INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA (INEGIa,), Edafología Serie II, Período 2002-2006. Descarga en 2014.
- f) INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA (INEGIb,) Uso de suelo y vegetación, Serie V correspondiente al año 2005. Descarga en 2014.
- g) LAFRAGUA, C.J. y APARICIO, M.J., Curvas intensidad-duración-período de retorno para la vertiente del Golfo de México. XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Guayaquil, Ecuador, 1996.
- h) Sontek, 2013. RiverSurveyor S5/M9 System Manual. Firmware Version 3.50.
- i) Matlab
- j) C.F.E. (1981). Hidráulica Fluvial. Manual de Diseño de Obras Civiles.
- k) Melville, B. (1984). Live-bed scour at bridge Piers. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 110, No.9, 1234-1247
- l) Melville, B., and Sutherland, A.J. (1988). Design method for local scour at bridge piers. *Journal of the Hydraulic Division ASCE* 114 (10), 1210-1226
- m) Jones (1983). Comparison of prediction equations for bridge pier and abutment scour. Transportation Research Record 950, TRB, National Research Council, Washington, D.C. 202-209.
- n) Richardson, J.R., Richardson, E.V. (2007). Bridge Scour Evaluation. Chap 10 en Sedimentation Engineering. Processes, Measurements, Modeling and Practice. Editado por Marcelo H. García. ASCE. Manuals and Reports on Engineering Practice No. 10

Anexo A. Reportes de las pruebas de laboratorio para la caracterización sedimentológica de los sedimentos en el cauce



Distribución granulométrica



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal Id. de Lab.: MDaA1Km
 Ubicación: Villahermosa, Tabasco. Pozo: - Profundidad: - m
 Muestra: M1 M.Derecho UTM X: 509052 Fecha: 24/05/2016
 UTM Y: 1993378

| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | OBSERVACIONES | | |
|----------------|----------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|----------------------|---|---|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | Análisis efectuado con la muestra total de <u>2000.00</u> g | |
| | | | | | | | Humedad testigo | |
| | | | | | | | Grava, w = <u>-</u> % | |
| | | | | | | | Tierra, w = <u>-</u> % | |
| | | | | | 100.00 | | | |
| | No. 4 | 4.75 | 15.40 | 0.77 | 99.23 | | -----> % MATERIAL MENOR QUE No. 4 | |
| | Sumas = | | 15.4 | 0.77 | | | -----> % DE GRAVA | |
| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | | OBSERVACIONES | |
| | | | | | MUESTRA < No. 4 | MUESTRA TOTAL | | |
| | | | | | 100.00 | 99.23 | | |
| | 10 | 2.000 | 35.80 | 1.80 | 98.20 | 97.44 | | Análisis efectuado con muestra de <u>1984.80</u> g del material menor que la malla No. 4. |
| | 20 | 0.850 | 32.10 | 1.62 | 96.58 | 95.84 | | |
| | 40 | 0.425 | 22.50 | 1.13 | 95.45 | 94.71 | | |
| | 60 | 0.250 | 153.30 | 7.72 | 87.72 | 87.05 | | |
| | 100 | 0.150 | 174.90 | 8.81 | 78.91 | 78.30 | | % MAT. FINO MENOR QUE 200 |
| | 200 | 0.075 | 388.70 | 19.58 | 59.33 | 58.87 | | |
| | Sumas | | 807.30 | 40.67 | | | | |
| Charola | | 1177.50 | 59.33 | | | CHAROLA No. <u>1</u> | | |
| Suma = | | | 100.00 | | | | | |

Observaciones Los valores de D₁₀, D₃₀ y D₆₀ se extrapolaron de la curva granulométrica.

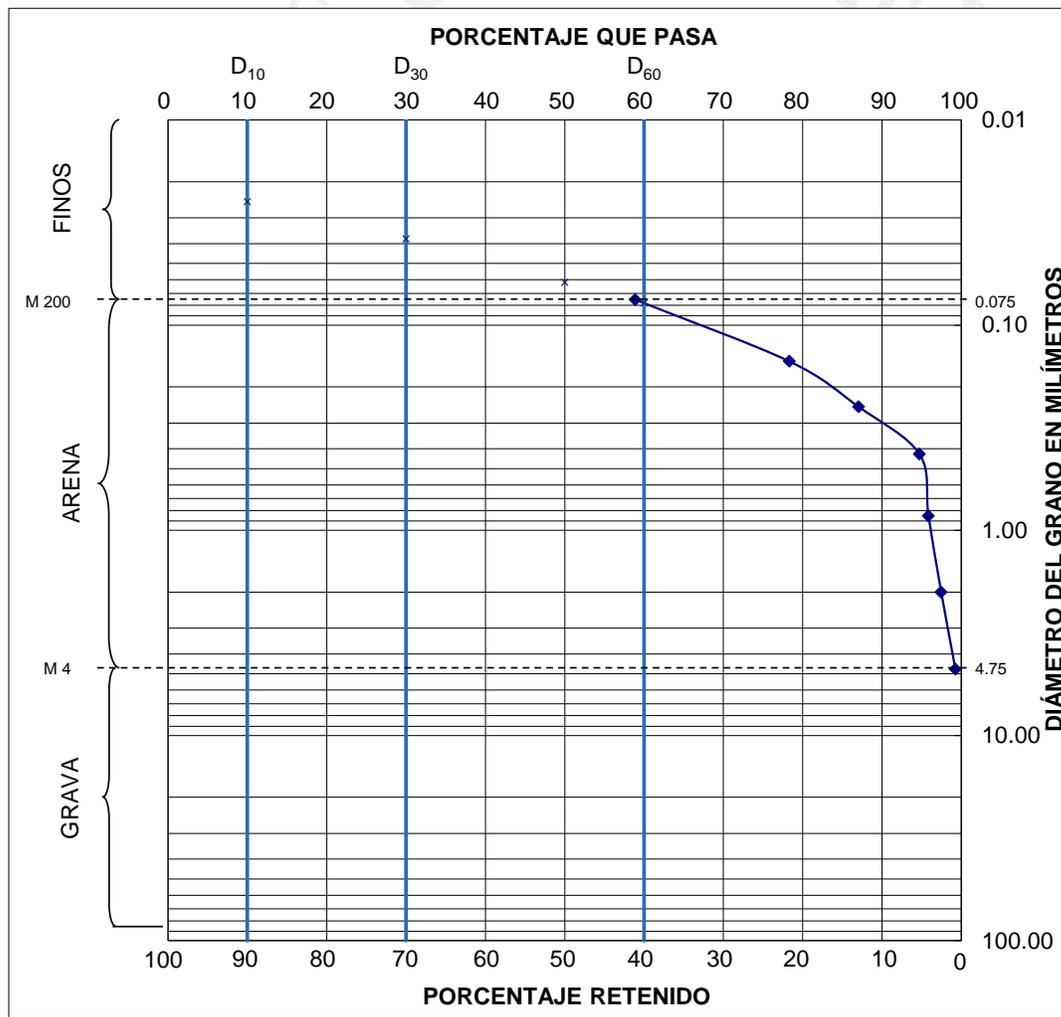
Operador: J. Manuel Lopez Cálculo: J. F. Montiel Fecha: 24/05/2016



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

| | | |
|---|------------------------------|------------------------------------|
| Sitio: <u>Rio Carrizal</u> | Pozo: <u>-</u> | Id. de Lab.: <u>MDaA1Km</u> |
| Ubicación: <u>Villahermosa, Tabasco.</u> | UTM X: <u>509052</u> | Profundidad: <u>-</u> m |
| Muestra: <u>M1 M.Derecho</u> | UTM Y: <u>1993378</u> | Fecha: <u>24/05/2016</u> |



| | | |
|--|---|--------------------------------------|
| Grava: <u>0.77</u> | Arena: <u>40.36</u> | Finos: <u>58.87</u> |
| D₁₀ = <u>0.025</u> | D₃₀ = <u>0.04</u> | D₆₀ = <u>0.078</u> |
| C_u = D₆₀ / D₁₀ = <u>3.12</u> | C_c = (D₃₀)² / D₁₀ x D₆₀ = <u>0.74</u> | |



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal Id. de Lab.: CaA1Km
 Ubicación: Villahermosa, Tabaco Pozo: - Profundidad: - m
 Muestra: M1 Centro UTM X: 509107 Fecha: 24/05/2016
 UTM Y: 1993385

| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | OBSERVACIONES | |
|----------------|----------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|---|---|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | Análisis efectuado con la muestra total de <u>2000.00</u> g |
| | | | | | | | Humedad testigo |
| | | | | | | | Grava, w = <u>-</u> % |
| | | | | | | | Tierra, w = <u>-</u> % |
| | | | | | | | |
| | No. 4 | 4.75 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | | -----> % MATERIAL MENOR QUE No. 4 |
| | Sumas = | | 0.00 | 0.00 | | | -----> % DE GRAVA |
| | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | | OBSERVACIONES |
| | | | | MUESTRA < No. 4 | MUESTRA TOTAL | | |
| | | | | | | Análisis efectuado con muestra de <u>1997.20</u> g del material menor que la malla No. 4. | |
| 40 | 0.425 | 60.90 | 3.05 | 96.95 | 96.95 | | |
| 60 | 0.250 | 1411.00 | 70.65 | 26.30 | 26.30 | | |
| 100 | 0.150 | 346.90 | 17.37 | 8.93 | 8.93 | | |
| 200 | 0.075 | 173.80 | 8.70 | 0.23 | 0.23 | % MAT. FINO MENOR QUE 200 | |
| Sumas | | 1992.60 | 99.77 | | | | |
| Charola | | 4.60 | 0.23 | | | CHAROLA No. <u>1</u> | |
| Suma = | | | 100.00 | | | | |

Observaciones

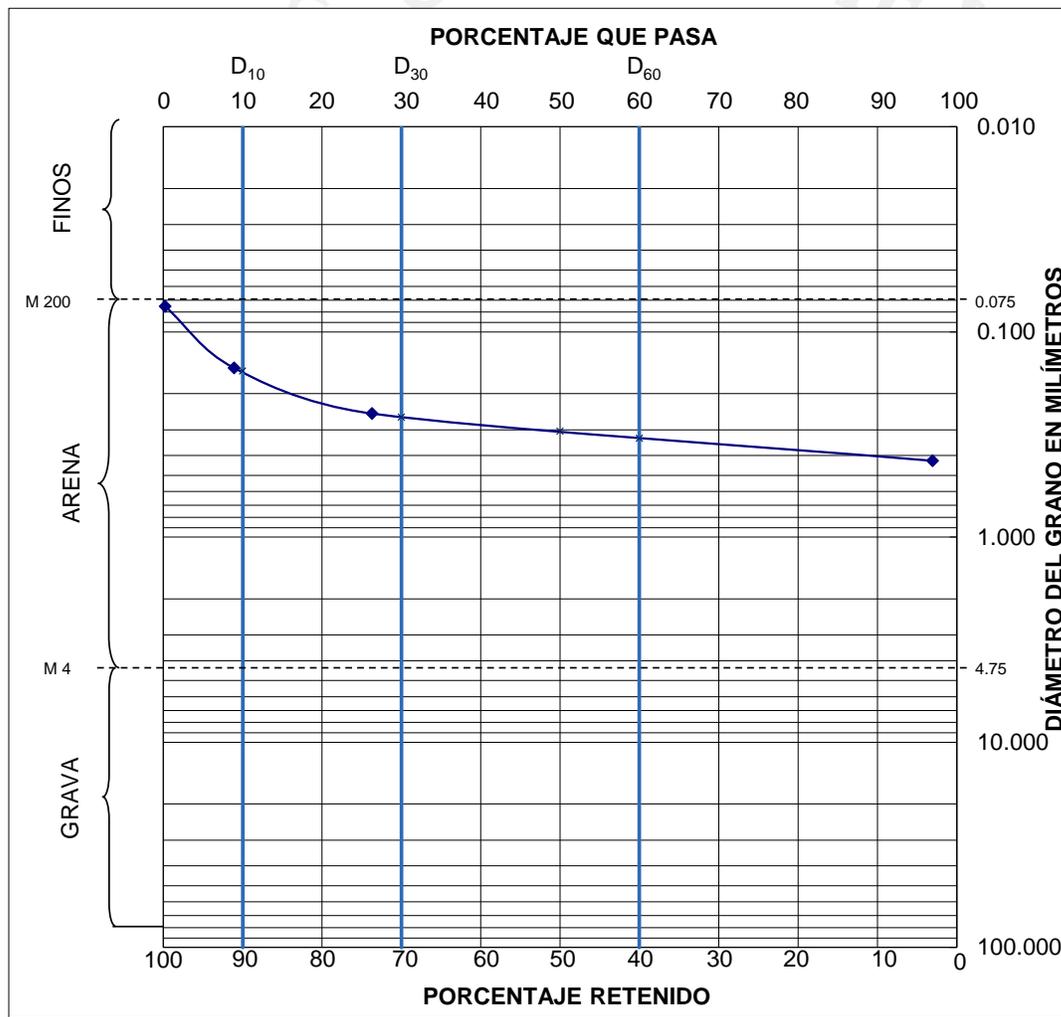
Operador: J. Manuel Lopez Calculó: J. F. Montiel Fecha: 24/05/2016



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

| | | |
|---|------------------------------|-----------------------------------|
| Sitio: <u>Rio Carrizal</u> | Pozo: <u>-</u> | Id. de Lab.: <u>CaA1Km</u> |
| Ubicación: <u>Villahermosa, Tabaco</u> | UTM X: <u>509107</u> | Profundidad: <u>-</u> m |
| Muestra: <u>M1 Centro</u> | UTM Y: <u>1993385</u> | Fecha: <u>24/05/2016</u> |



| | | |
|--|---|-------------------------------------|
| Grava: <u>0.00</u> | Arena: <u>99.77</u> | Finos: <u>0.23</u> |
| D₁₀ = <u>0.155</u> | D₃₀ = <u>0.26</u> | D₆₀ = <u>0.33</u> |
| C_u = D₆₀ / D₁₀ = <u>2.13</u> | C_c = (D₃₀)² / D₁₀ x D₆₀ = <u>1.32</u> | |



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal Id. de Lab.: MlaA1Km
 Ubicación: Villahermosa, Tabasco. Pozo: - Profundidad: - m
 Muestra: M1 M.Izquierdo UTM X: 509152 Fecha: 24/05/2016
 UTM Y: 1993390

| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | OBSERVACIONES | |
|----------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|------------------------|---|---|
| | | | | | | | Análisis efectuado con la muestra total de <u>2000.00</u> g Humedad testigo Grava, w = <u>-</u> % Tierra, w = <u>-</u> % |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | No. 4 | 4.75 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | -----> % MATERIAL MENOR QUE No. 4 | |
| | Sumas = | | 0 | 0.00 | -----> % DE GRAVA | | |
| MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | | OBSERVACIONES | |
| | | | | MUESTRA < No. 4 | MUESTRA TOTAL | | |
| | | | | 100.00 | 100.00 | Análisis efectuado con muestra de <u>1999.90</u> g del material menor que la malla No. 4. | |
| 10 | 2.000 | 23.60 | 1.18 | 98.82 | 98.82 | | |
| 20 | 0.850 | 27.70 | 1.39 | 97.43 | 97.43 | | |
| 40 | 0.425 | 18.10 | 0.91 | 96.53 | 96.53 | | |
| 60 | 0.250 | 137.10 | 6.86 | 89.67 | 89.67 | | |
| 100 | 0.150 | 122.30 | 6.12 | 83.56 | 83.56 | | |
| 200 | 0.075 | 366.50 | 18.33 | 65.23 | 65.23 | % MAT. FINO MENOR QUE 200 | |
| Sumas | | 695.30 | 34.77 | | | | |
| Charola | | 1304.60 | 65.23 | | | CHAROLA No. <u>1</u> | |
| Suma = | | | 100.00 | | | | |

Observaciones Los valores de D₁₀, D₃₀ y D₆₀ se extrapolaron de la curva granulométrica.

Operador: J. Manuel Lopez Cálculo: J. F. Montiel Fecha: 24/05/2016



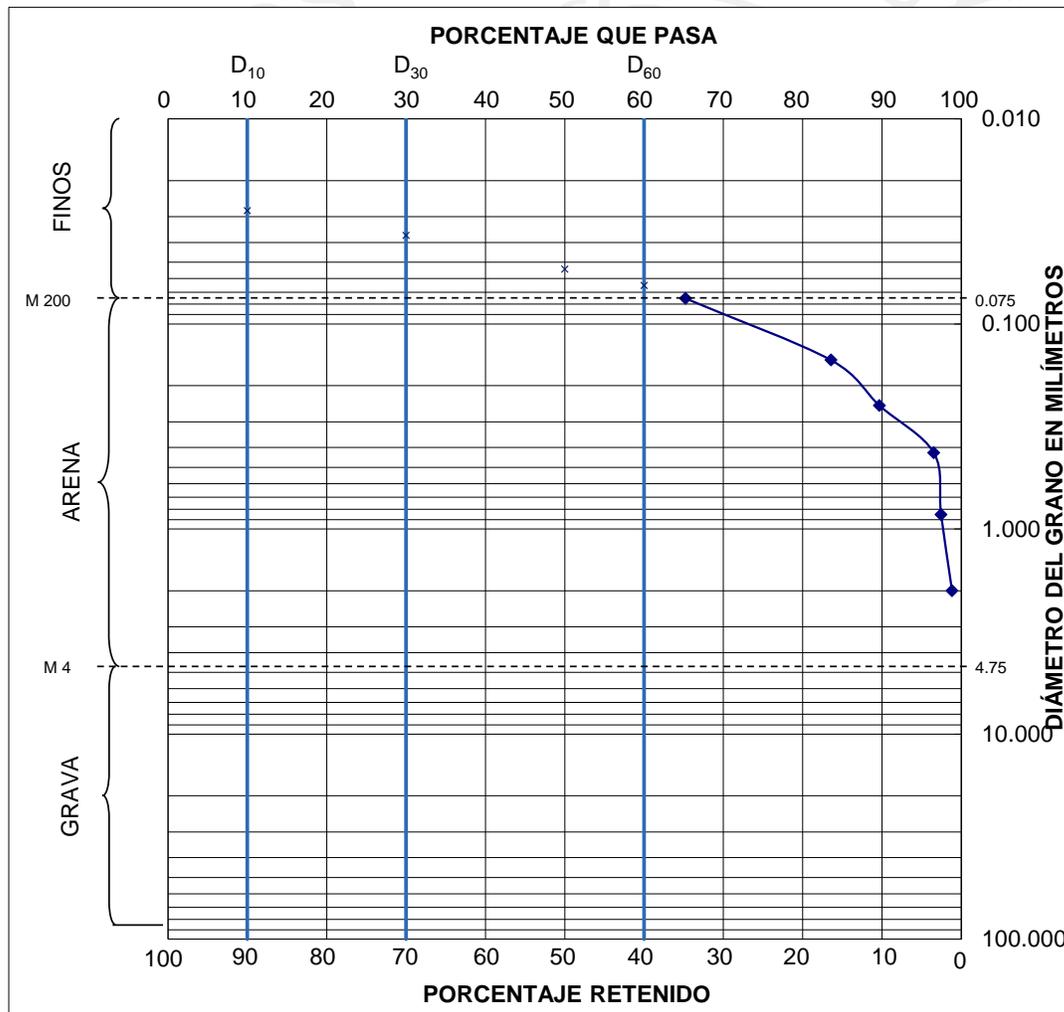
INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal
Ubicación: Villahermosa, Tabasco.
Muestra: M1 M.Izquierdo

Pozo: -
UTM X: 509152
UTM Y: 1993390.00

Id. de Lab.: MlaA1Km
Profundidad: - m
Fecha: 24/05/2016



| | | |
|--------------------------------|--|---------------------|
| Grava: 0.00 | Arena: 34.77 | Finos: 65.23 |
| $D_{10} = 0.028$ | $D_{30} = 0.04$ | $D_{60} = 0.07$ |
| $C_u = D_{60} / D_{10} = 2.32$ | $C_c = (D_{30})^2 / D_{10} \times D_{60} = 0.75$ | |



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal Id. de Lab.: MDaA0.5Km
 Ubicación: Villahermosa, Tabasco Pozo: - Profundidad: - m
 Muestra: M2 M.Derecho UTM X: 5095253 Fecha: 24/05/2016
 UTM Y: 1992844

| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | OBSERVACIONES | | |
|----------------|--------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|----------------------|---|---|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | Análisis efectuado con la muestra total de <u>2000.00</u> g | |
| | | | | | | | Humedad testigo | |
| | | | | | | | Grava, w = <u>-</u> % | |
| | | | | | | | Tierra, w = <u>-</u> % | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | 100.00 | |
| | No. 4 | 4.75 | 10.70 | 0.54 | 99.47 | | -----> % MATERIAL MENOR QUE No. 4 | |
| Sumas = | | 10.7 | 0.54 | | -----> % DE GRAVA | | | |
| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | | OBSERVACIONES | |
| | | | | | MUESTRA < No. 4 | MUESTRA TOTAL | | |
| | | | | | | | | |
| | 10 | 2.000 | 14.90 | 0.75 | 99.25 | 98.72 | | Análisis efectuado con muestra de <u>1989.30</u> g del material menor que la malla No. 4. |
| | 20 | 0.850 | 18.60 | 0.94 | 98.32 | 97.79 | | |
| | 40 | 0.425 | 21.50 | 1.08 | 97.24 | 96.72 | | |
| | 60 | 0.250 | 122.90 | 6.18 | 91.06 | 90.57 | | |
| | 100 | 0.150 | 148.90 | 7.49 | 83.57 | 83.13 | | |
| | 200 | 0.075 | 394.20 | 19.82 | 63.76 | 63.42 | | % MAT. FINO MENOR QUE 200 |
| | Sumas | | 721.00 | 36.24 | | | | |
| Charola | | 1268.30 | 63.76 | | | CHAROLA No. <u>1</u> | | |
| Suma = | | | 100.00 | | | | | |

Observaciones Los valores de D₁₀, D₃₀ y D₆₀ se extrapolaron de la curva granulométrica.

Operador: J. Manuel Lopez Cálculo: J. F. Montiel Fecha: 24/05/2016



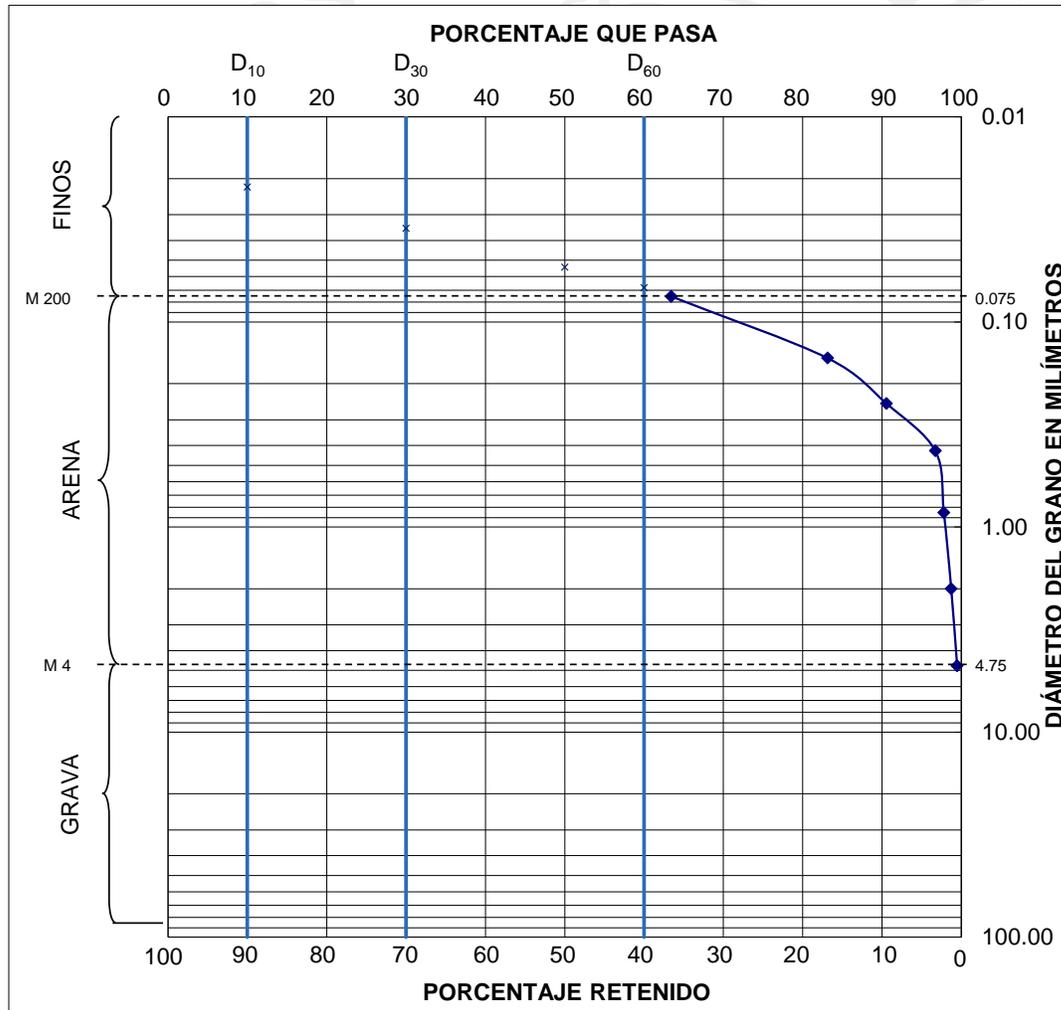
INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal
Ubicación: Villahermosa, Tabasco
Muestra: M2 M.Derecho

Pozo: -
UTM X: 5095253
UTM Y: 1992844

Id. de Lab.: MDaA0.5Km
Profundidad: - m
Fecha: 24/05/2016



| | | |
|--------------------------------|--|---------------------|
| Grava: 0.54 | Arena: 36.05 | Finos: 63.42 |
| $D_{10} = 0.022$ | $D_{30} = 0.04$ | $D_{60} = 0.07$ |
| $C_u = D_{60} / D_{10} = 3.09$ | $C_c = (D_{30})^2 / D_{10} \times D_{60} = 0.82$ | |



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal Id. de Lab.: CaA0.5Km
 Ubicación: Villahermosa, Tabasco. Pozo: - Profundidad: - m
 Muestra: M2 Centro UTM X: 509300 Fecha: 24/05/2016
 UTM Y: 1992849

| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | OBSERVACIONES | |
|----------------|----------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|---|---|
| | | | | | | | Análisis efectuado con la muestra total de <u>1870.00</u> g Humedad testigo Grava, w = <u>-</u> % Tierra, w = <u>-</u> % |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | 100.00 | | |
| | No. 4 | 4.75 | 6.20 | 0.33 | 99.67 | -----> % MATERIAL MENOR QUE No. 4 | |
| | Sumas = | | 6.2 | 0.33 | -----> % DE GRAVA | | |
| | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | | OBSERVACIONES |
| | | | | | MUESTRA < No. 4 | MUESTRA TOTAL | |
| | | | | 100.00 | 99.67 | Análisis efectuado con muestra de <u>1863.00</u> g del material menor que la malla No. 4. | |
| 10 | 2.000 | 45.80 | 2.46 | 97.54 | 97.22 | | |
| 20 | 0.850 | 87.50 | 4.70 | 92.84 | 92.54 | | |
| 40 | 0.425 | 813.80 | 43.68 | 49.16 | 49.00 | | |
| 60 | 0.250 | 817.00 | 43.85 | 5.31 | 5.29 | | |
| 100 | 0.150 | 71.40 | 3.83 | 1.48 | 1.47 | | |
| 200 | 0.075 | 25.40 | 1.36 | 0.11 | 0.11 | % MAT. FINO MENOR QUE 200 | |
| Sumas | | 1860.90 | 99.89 | | | | |
| Charola | | 2.10 | 0.11 | | | CHAROLA No. <u>1</u> | |
| Suma = | | | 100.00 | | | | |

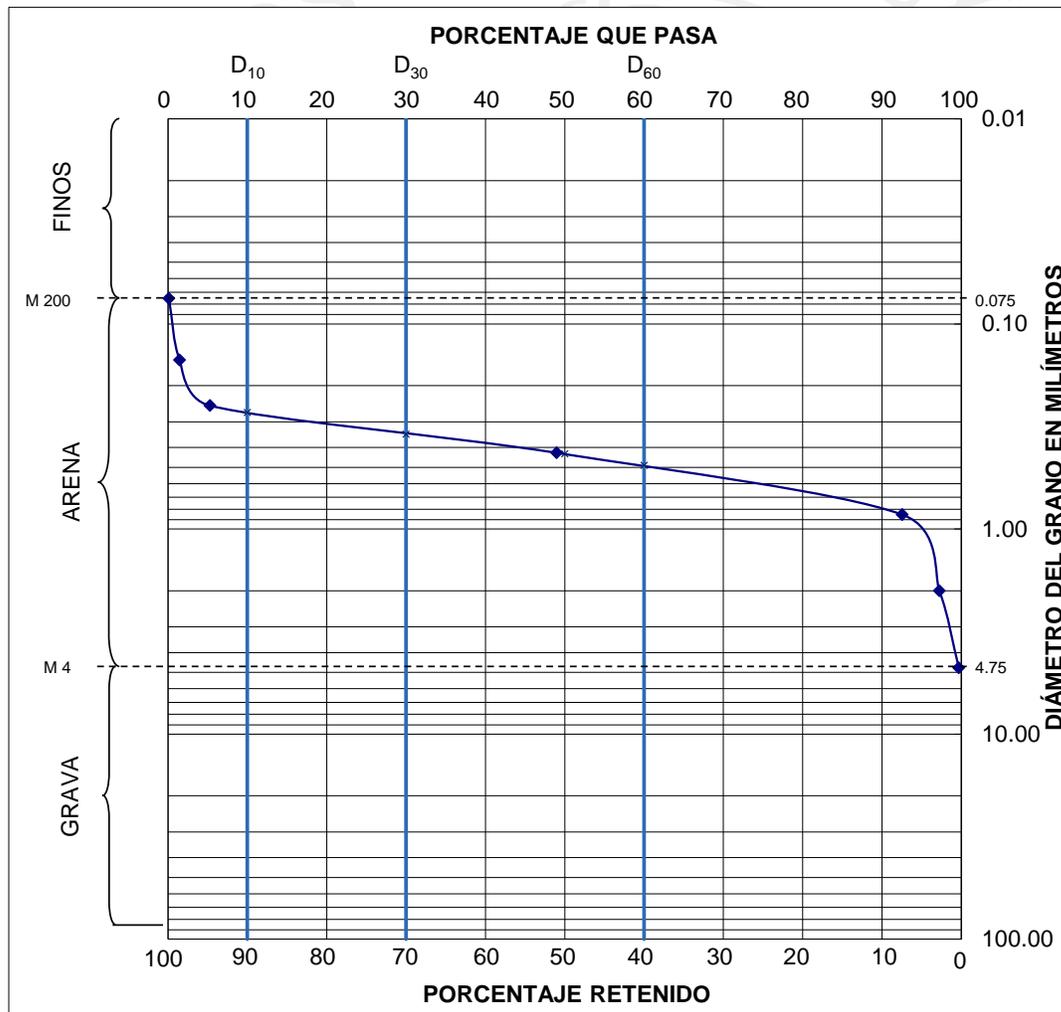
Observaciones _____
 Operador: J. Manuel Lopez Calculó: J.F Montiel Fecha: 24/05/2016



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

| | | |
|---|------------------------------|-------------------------------------|
| Sitio: <u>Rio Carrizal</u> | Pozo: <u>-</u> | Id. de Lab.: <u>CaA0.5Km</u> |
| Ubicación: <u>Villahermosa, Tabasco.</u> | UTM X: <u>509300</u> | Profundidad: <u>-</u> m |
| Muestra: <u>M2 Centro</u> | UTM Y: <u>1992849</u> | Fecha: <u>24/05/2016</u> |



| | | |
|--|---|-------------------------------------|
| Grava: <u>0.33</u> | Arena: <u>99.56</u> | Finos: <u>0.11</u> |
| D₁₀ = <u>0.27</u> | D₃₀ = <u>0.35</u> | D₆₀ = <u>0.49</u> |
| C_u = D₆₀ / D₁₀ = <u>1.81</u> | C_c = (D₃₀)² / D₁₀ x D₆₀ = <u>0.90</u> | |



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal Id. de Lab.: MlaA0.5Km
 Ubicación: Villahermosa, Tabasco. Pozo: - Profundidad: - m
 Muestra: M2 M.Izquierdo UTM X: 509332 Fecha: 24/05/2016
 UTM Y: 1992852

| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | OBSERVACIONES | | |
|----------------|----------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|----------------------|---|---|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | Análisis efectuado con la muestra total de <u>2000.00</u> g | |
| | | | | | | | Humedad testigo | |
| | | | | | | | Grava, w = <u>-</u> % | |
| | | | | | | | Tierra, w = <u>-</u> % | |
| | | | | | | | | |
| | | No. 4 | 4.75 | 0.00 | 0.00 | | 100.00 | -----> % MATERIAL MENOR QUE No. 4 |
| | Sumas = | | 0 | 0.00 | | -----> % DE GRAVA | | |
| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | | OBSERVACIONES | |
| | | | | | MUESTRA < No. 4 | MUESTRA TOTAL | | |
| | | | | | 100.00 | 100.00 | | |
| | 10 | 2.000 | 18.40 | 0.92 | 99.08 | 99.08 | | Análisis efectuado con muestra de <u>2000.00</u> g del material menor que la malla No. 4. |
| | 20 | 0.850 | 30.80 | 1.54 | 97.54 | 97.54 | | |
| | 40 | 0.425 | 25.30 | 1.27 | 96.28 | 96.28 | | |
| | 60 | 0.250 | 121.40 | 6.07 | 90.21 | 90.21 | | |
| | 100 | 0.150 | 134.10 | 6.71 | 83.50 | 83.50 | | |
| | 200 | 0.075 | 350.20 | 17.51 | 65.99 | 65.99 | | % MAT. FINO MENOR QUE 200 |
| | Sumas | | 680.20 | 34.01 | | | | |
| Charola | | 1319.80 | 65.99 | | | CHAROLA No. <u>1</u> | | |
| | Suma = | | | 100.00 | | | | |

Observaciones Los valores de D₁₀, D₃₀ y D₆₀ se extrapolaron de la curva granulométrica.

Operador: J. Manuel Lopez Calculó: J. F. Montiel Fecha: 24/05/2016



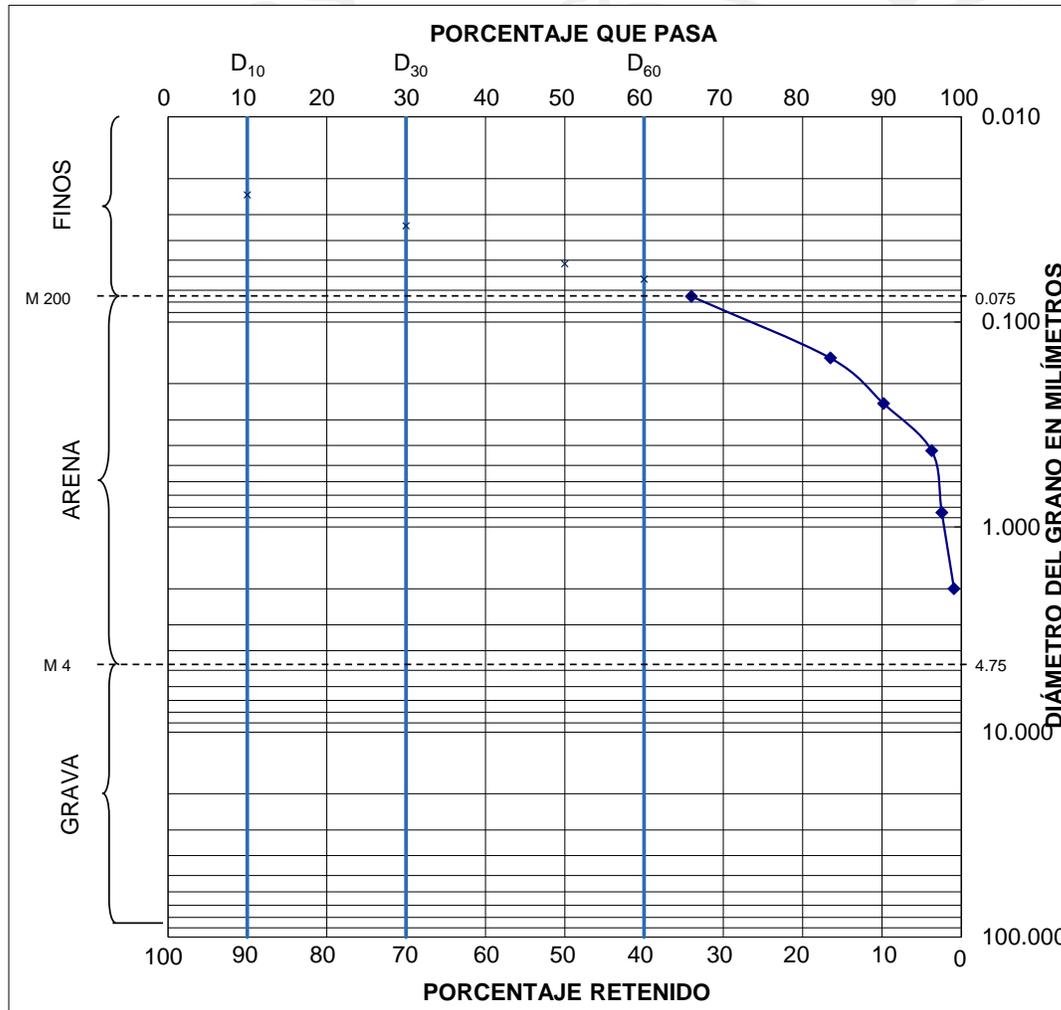
INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal
Ubicación: Villahermosa, Tabasco.
Muestra: M2 M.Izquierdo

Pozo: -
UTM X: 509332
UTM Y: 1992852

Id. de Lab.: MlaA0.5Km
Profundidad: - m
Fecha: 24/05/2016



| | | |
|--------------------------------|--|---------------------|
| Grava: 0.00 | Arena: 34.01 | Finos: 65.99 |
| $D_{10} = 0.024$ | $D_{30} = 0.03$ | $D_{60} = 0.06$ |
| $C_u = D_{60} / D_{10} = 2.58$ | $C_c = (D_{30})^2 / D_{10} \times D_{60} = 0.78$ | |



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal Id. de Lab.: MDPTEaA
 Ubicación: Villahermosa, Tabasco. Pozo: - Profundidad: - m
 Muestra: M3 M.Derecho UTM X: 509580 Fecha: 24/05/2016
 UTM Y: 1992500

| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | OBSERVACIONES | |
|----------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|------------------------|---|---|
| | | | | | | | Análisis efectuado con la muestra total de <u>2000.00</u> g Humedad testigo Grava, w = <u>-</u> % Tierra, w = <u>-</u> % |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | No. 4 | 4.75 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | -----> % MATERIAL MENOR QUE No. 4 | |
| | Sumas = | | 0 | 0.00 | -----> % DE GRAVA | | |
| MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | | OBSERVACIONES | |
| | | | | MUESTRA < No. 4 | MUESTRA TOTAL | | |
| | | | | 100.00 | 100.00 | Análisis efectuado con muestra de <u>2000.00</u> g del material menor que la malla No. 4. | |
| 10 | 2.000 | 4.50 | 0.23 | 99.78 | 99.78 | | |
| 20 | 0.850 | 30.20 | 1.51 | 98.27 | 98.27 | | |
| 40 | 0.425 | 25.70 | 1.29 | 96.98 | 96.98 | | |
| 60 | 0.250 | 121.10 | 6.06 | 90.93 | 90.93 | | |
| 100 | 0.150 | 159.90 | 8.00 | 82.93 | 82.93 | | |
| 200 | 0.075 | 403.40 | 20.17 | 62.76 | 62.76 | | % MAT. FINO MENOR QUE 200 |
| Sumas | | 744.80 | 37.24 | | | | |
| Charola | | 1255.20 | 62.76 | | | CHAROLA No. <u>1</u> | |
| Suma = | | | 100.00 | | | | |

Observaciones Los valores de D₁₀, D₃₀ y D₆₀ se extrapolaron de la curva granulométrica.

Operador: J. Manuel Lopez Calculó: J. F. Montiel Fecha: 24/05/2016



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal Id. de Lab.: CPTeAa
 Ubicación: Villahermosa, Tabasco. Pozo: - Profundidad: - m
 Muestra: M3 Centro UTM X: 509601 Fecha: 25/05/2016
 UTM Y: 1992541

| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | OBSERVACIONES | |
|---------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|------------------------|----------------------|---|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | Análisis efectuado con la muestra total de <u>2000.00</u> g |
| | | | | | | | Humedad testigo |
| | | | | | | | Grava, w = <u>-</u> % |
| | | | | | | | Tierra, w = <u>-</u> % |
| | | | | | 100.00 | | |
| | No. 4 | 4.75 | 7.40 | 0.37 | 99.63 | | -----> % MATERIAL MENOR QUE No. 4 |
| | Sumas = | | 7.4 | 0.37 | | | -----> % DE GRAVA |
| MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | | OBSERVACIONES | |
| | | | | MUESTRA < No. 4 | MUESTRA TOTAL | | |
| | | | | 100.00 | 99.63 | | |
| 10 | 2.000 | 5.20 | 0.26 | 99.74 | 99.37 | | |
| 20 | 0.850 | 10.00 | 0.50 | 99.24 | 98.87 | | |
| 40 | 0.425 | 133.30 | 6.69 | 92.55 | 92.20 | | |
| 60 | 0.250 | 1515.20 | 76.05 | 16.50 | 16.44 | | |
| 100 | 0.150 | 183.80 | 9.22 | 7.28 | 7.25 | | |
| 200 | 0.075 | 139.00 | 6.98 | 0.30 | 0.30 | | |
| Sumas | | 1986.50 | 99.70 | | | | |
| Charola | | 6.00 | 0.30 | | | CHAROLA No. <u>1</u> | |
| Suma = | | | 100.00 | | | | |

Observaciones

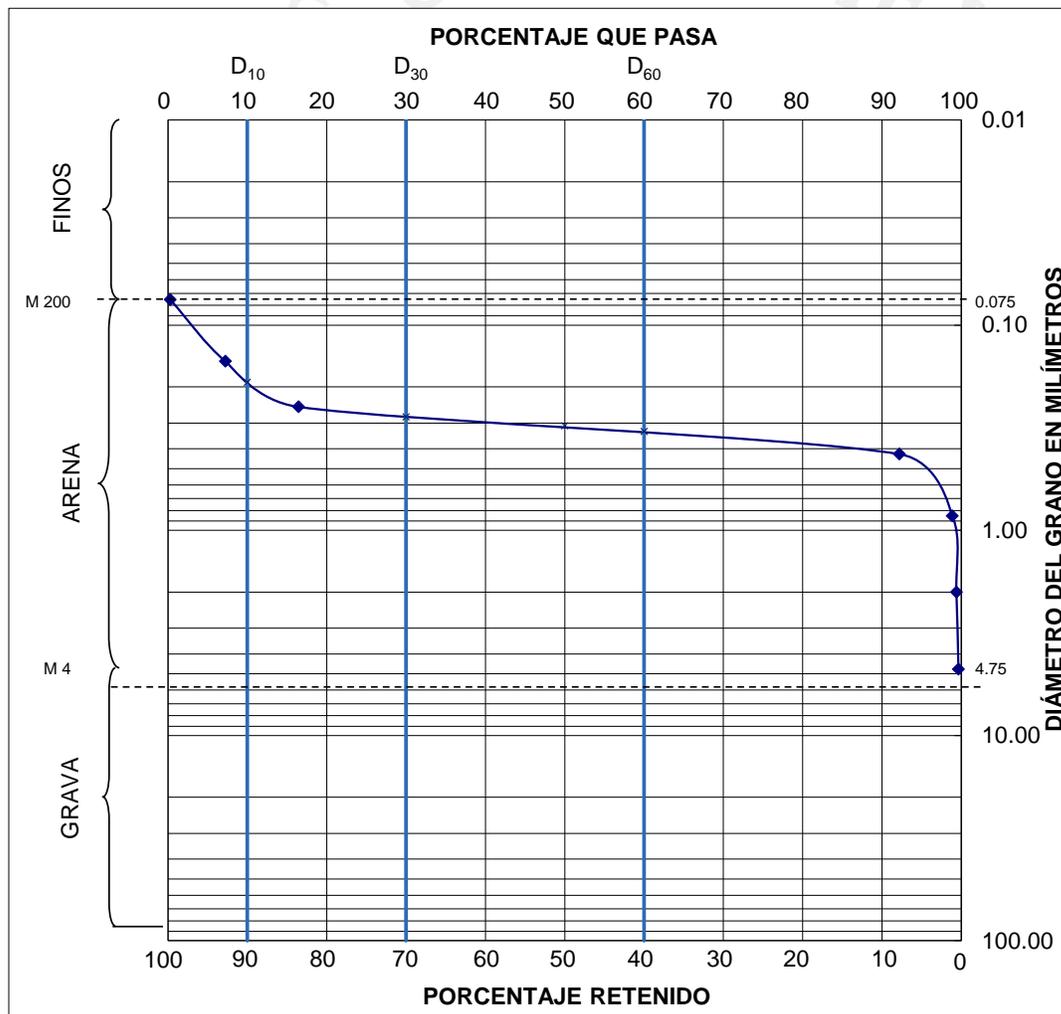
Operador: J. Manuel Lopez Calculó: J. F. Montiel Fecha: 25/05/2016



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

| | | |
|---|------------------------------|-----------------------------------|
| Sitio: <u>Rio Carrizal</u> | Pozo: <u>-</u> | Id. de Lab.: <u>CPTeAa</u> |
| Ubicación: <u>Villahermosa, Tabasco.</u> | UTM X: <u>509601</u> | Profundidad: <u>-</u> m |
| Muestra: <u>M3 Centro</u> | UTM Y: <u>1992541</u> | Fecha: <u>25/05/2016</u> |



| | | |
|--|---|-------------------------------------|
| Grava: <u>0.37</u> | Arena: <u>99.33</u> | Finos: <u>0.30</u> |
| D₁₀ = <u>0.19</u> | D₃₀ = <u>0.28</u> | D₆₀ = <u>0.33</u> |
| C_u = D₆₀ / D₁₀ = <u>1.74</u> | C_c = (D₃₀)² / D₁₀ x D₆₀ = <u>1.25</u> | |

SEMARNAT

SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA
DEL AGUA





INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal Id. de Lab.: MIPTeAa
 Ubicación: Villahermosa, Tabasco. Pozo: - Profundidad: - m
 Muestra: M3 M.Izquierdo UTM X: 509614 Fecha: 24/05/2016
 UTM Y: 1992569

| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | OBSERVACIONES | | |
|----------------|----------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|----------------------|---|---|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | Análisis efectuado con la muestra total de <u>2000.00</u> g | |
| | | | | | | | Humedad testigo | |
| | | | | | | | Grava, w = <u>-</u> % | |
| | | | | | | | Tierra, w = <u>-</u> % | |
| | | | | | | | | |
| | No. 4 | 4.75 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | | -----> % MATERIAL MENOR QUE No. 4 | |
| | Sumas = | | 0 | 0.00 | -----> % DE GRAVA | | | |
| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | | OBSERVACIONES | |
| | | | | | MUESTRA < No. 4 | MUESTRA TOTAL | | |
| | | | | | 100.00 | 100.00 | | |
| | 10 | 2.000 | 18.60 | 0.93 | 99.07 | 99.07 | | Análisis efectuado con muestra de <u>1999.80</u> g del material menor que la malla No. 4. |
| | 20 | 0.850 | 34.90 | 1.75 | 97.32 | 97.32 | | |
| | 40 | 0.425 | 28.30 | 1.42 | 95.91 | 95.91 | | |
| | 60 | 0.250 | 114.50 | 5.73 | 90.18 | 90.18 | | |
| | 100 | 0.150 | 144.50 | 7.23 | 82.96 | 82.96 | | % MAT. FINO MENOR QUE 200 |
| | 200 | 0.075 | 395.50 | 19.78 | 63.18 | 63.18 | | |
| | Sumas | | 736.30 | 36.82 | | | | |
| Charola | | 1263.50 | 63.18 | | | CHAROLA No. <u>1</u> | | |
| Suma = | | | | 100.00 | | | | |

Observaciones Los valores de D₁₀, D₃₀ y D₆₀ se extrapolaron de la curva granulométrica.

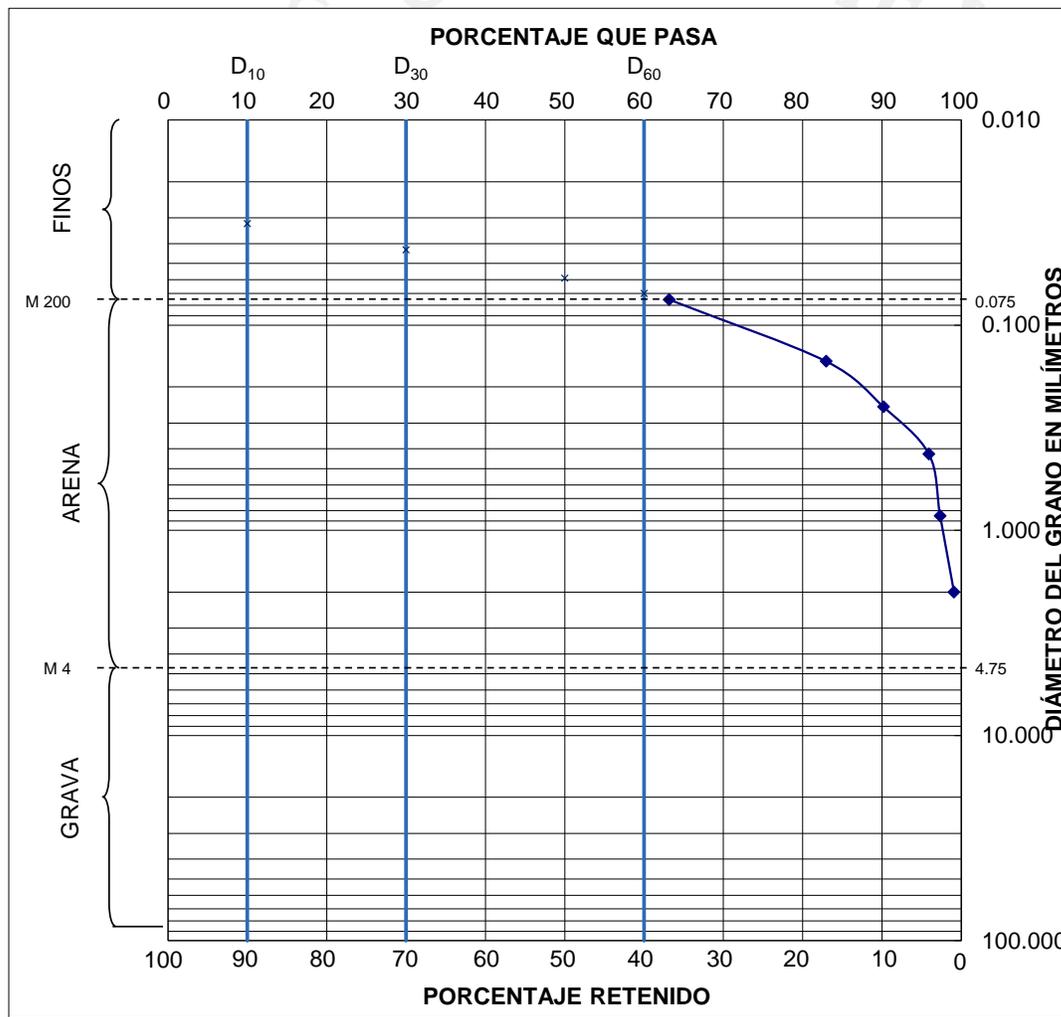
Operador: J. Manuel Lopez Calculó: J. F. Montiel Fecha: 24/05/2016



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

| | | |
|---|------------------------------|------------------------------------|
| Sitio: <u>Rio Carrizal</u> | Pozo: <u>-</u> | Id. de Lab.: <u>MIPTeAa</u> |
| Ubicación: <u>Villahermosa, Tabasco.</u> | UTM X: <u>509614</u> | Profundidad: <u>-</u> m |
| Muestra: <u>M3 M.Izquierdo</u> | UTM Y: <u>1992569</u> | Fecha: <u>24/05/2016</u> |



| | | |
|--|---|-------------------------------------|
| Grava: <u>0.00</u> | Arena: <u>36.82</u> | Finos: <u>63.18</u> |
| D₁₀ = <u>0.032</u> | D₃₀ = <u>0.04</u> | D₆₀ = <u>0.07</u> |
| C_u = D₆₀ / D₁₀ = <u>2.19</u> | C_c = (D₃₀)² / D₁₀ x D₆₀ = <u>0.83</u> | |

SEMARNAT

SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA
DEL AGUA





INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal Id. de Lab.: MDPTEaa
 Ubicación: Villahermosa, Tabasco Pozo: - Profundidad: - m
 Muestra: M4 M.Derecho UTM X: 509704 Fecha: 25/05/2016
 UTM Y: 1992468

| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | OBSERVACIONES | |
|----------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|---|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | Análisis efectuado con la muestra total de <u>2000.00</u> g |
| | | | | | | | Humedad testigo |
| | | | | | | | Grava, w = <u>-</u> % |
| | | | | | | | Tierra, w = <u>-</u> % |
| | | | | | 100.00 | | |
| | No. 4 | 4.75 | 6.20 | 0.31 | 99.69 | | -----> % MATERIAL MENOR QUE No. 4 |
| | Sumas = | | 6.2 | 0.31 | -----> % DE GRAVA | | |
| MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | | OBSERVACIONES | |
| | | | | MUESTRA < No. 4 | MUESTRA TOTAL | | |
| | | | | 100.00 | 99.69 | | |
| 10 | 2.000 | 16.20 | 0.81 | 99.19 | 98.88 | | |
| 20 | 0.850 | 44.60 | 2.24 | 96.95 | 96.65 | | |
| 40 | 0.425 | 31.30 | 1.57 | 95.38 | 95.09 | | |
| 60 | 0.250 | 166.90 | 8.37 | 87.01 | 86.74 | | |
| 100 | 0.150 | 175.80 | 8.82 | 78.19 | 77.95 | | |
| 200 | 0.075 | 341.10 | 17.11 | 61.08 | 60.90 | | |
| Sumas | | 775.90 | 38.92 | | | | |
| Charola | | 1217.90 | 61.08 | | | % MAT. FINO MENOR QUE 200 | |
| Suma = | | | 100.00 | | | CHAROLA No. <u>1</u> | |

Observaciones Los valores de D_{10} , D_{30} y D_{60} se extrapolaron de la curva granulométrica.

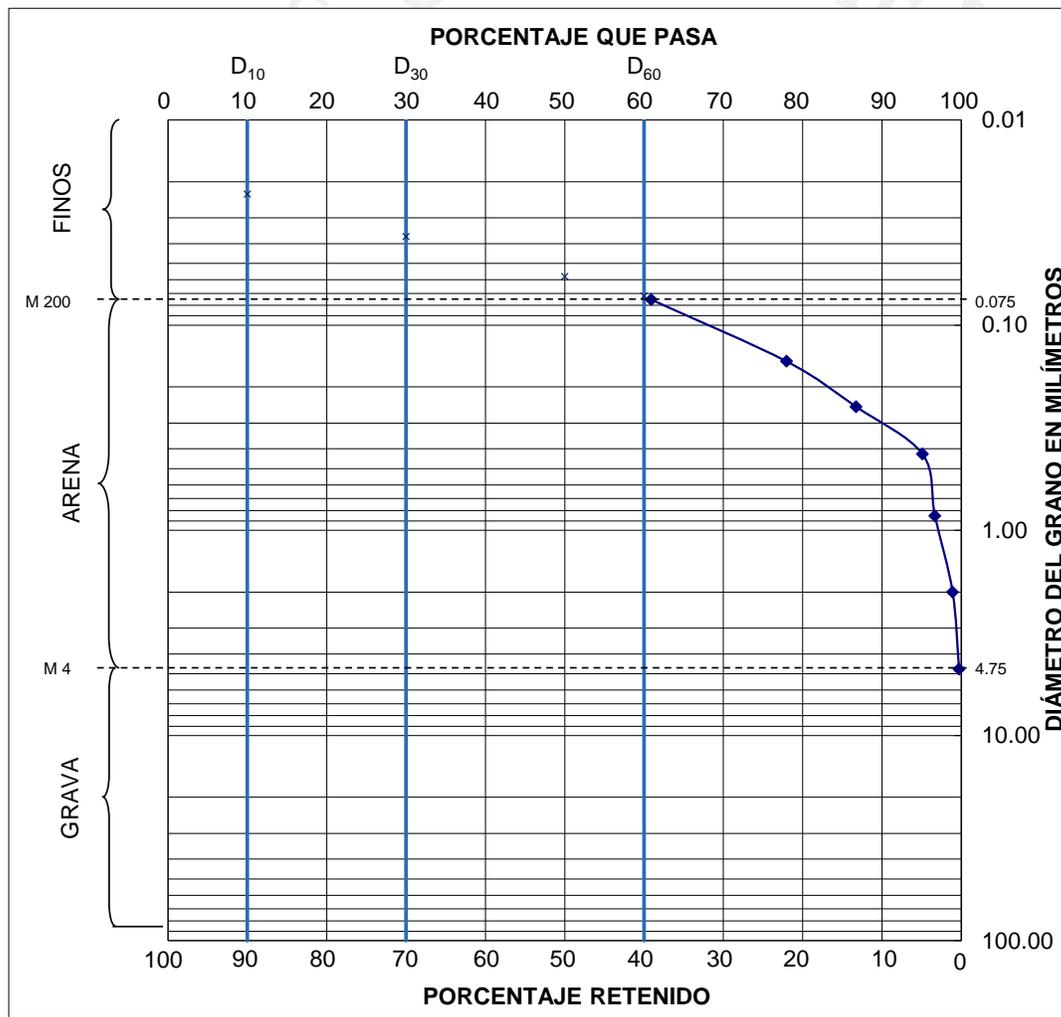
Operador: J. Manuel Lopez Calculó: J. F. Montiel Fecha: 25/05/2016



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

| | | |
|--|------------------------------|------------------------------------|
| Sitio: <u>Rio Carrizal</u> | Pozo: <u>-</u> | Id. de Lab.: <u>MDPTEaa</u> |
| Ubicación: <u>Villahermosa, Tabasco</u> | UTM X: <u>509704</u> | Profundidad: <u>-</u> m |
| Muestra: <u>M4 M.Derecho</u> | UTM Y: <u>1992468</u> | Fecha: <u>25/05/2016</u> |



| | | |
|--|---|-------------------------------------|
| Grava: <u>0.31</u> | Arena: <u>38.80</u> | Finos: <u>60.90</u> |
| D₁₀ = <u>0.023</u> | D₃₀ = <u>0.04</u> | D₆₀ = <u>0.07</u> |
| C_u = D₆₀ / D₁₀ = <u>3.13</u> | C_c = (D₃₀)² / D₁₀ x D₆₀ = <u>0.83</u> | |





INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal Id. de Lab.: CPTeaa
 Ubicación: Villahermosa, Tabasco. Pozo: - Profundidad: - m
 Muestra: M4 Centro UTM X: 509733 Fecha: 25/05/2016
 UTM Y: 1992504

| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | OBSERVACIONES | |
|----------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|------------------------|---|---|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | Análisis efectuado con la muestra total de <u>2000.00</u> g |
| | | | | | | | Humedad testigo |
| | | | | | | | Grava, w = <u>-</u> % |
| | | | | | | | Tierra, w = <u>-</u> % |
| | | | | | | | |
| | No. 4 | 4.75 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | | -----> % MATERIAL MENOR QUE No. 4 |
| | Sumas = | | 0 | 0.00 | -----> % DE GRAVA | | |
| MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | | OBSERVACIONES | |
| | | | | MUESTRA < No. 4 | MUESTRA TOTAL | | |
| | | | | 100.00 | 100.00 | Análisis efectuado con muestra de <u>1998.10</u> g del material menor que la malla No. 4. | |
| 20 | 0.850 | 3.80 | 0.19 | 99.81 | 99.81 | | |
| 40 | 0.425 | 96.40 | 4.82 | 94.99 | 94.99 | | |
| 60 | 0.250 | 1645.40 | 82.35 | 12.64 | 12.64 | | |
| 100 | 0.150 | 142.80 | 7.15 | 5.49 | 5.49 | | |
| 200 | 0.075 | 105.80 | 5.30 | 0.20 | 0.20 | | |
| Sumas | | 1994.20 | 99.80 | | | % MAT. FINO MENOR QUE 200 | |
| Charola | | 3.90 | 0.20 | | | CHAROLA No. <u>1</u> | |
| Suma = | | | 100.00 | | | | |

Observaciones

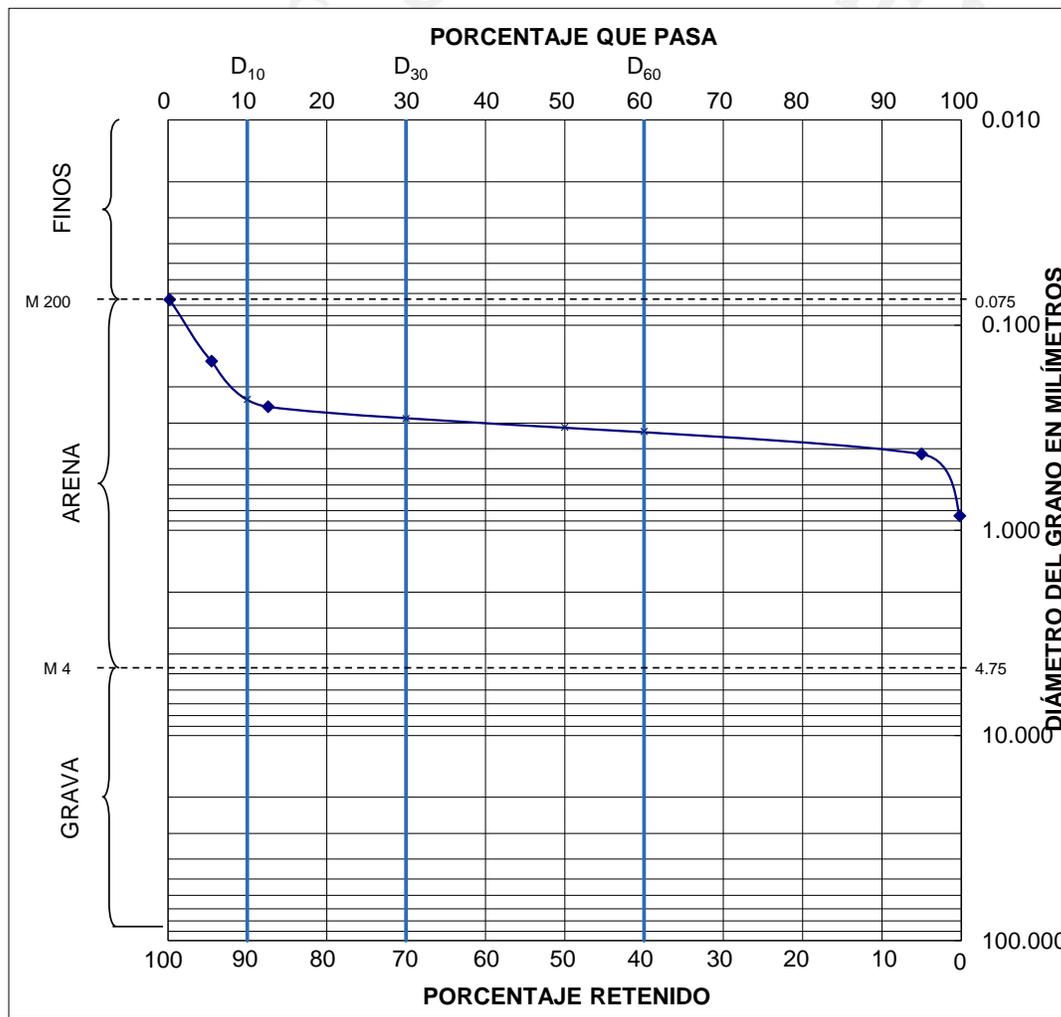
Operador: J. Manuel Lopez Calculó: J. F. Montiel Fecha: 25/05/2016



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal Id. de Lab.: CPTeaa
 Ubicación: Villahermosa, Tabasco. Pozo: - Profundidad: - m
 Muestra: M4 Centro UTM X: 509733 Fecha: 25/05/2016
 UTM Y: 1992504



| | | | | | |
|--|-------------|--|--------------|-------------------|-------------|
| Grava: | <u>0.00</u> | Arena: | <u>99.80</u> | Finos: | <u>0.20</u> |
| D ₁₀ = | <u>0.23</u> | D ₃₀ = | <u>0.29</u> | D ₆₀ = | <u>0.33</u> |
| C _u = D ₆₀ / D ₁₀ = | <u>1.43</u> | C _c = (D ₃₀) ² / D ₁₀ x D ₆₀ = | <u>1.07</u> | | |

SEMARNAT

SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES



IMTA

INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA
DEL AGUA





INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal Id. de Lab.: MIPTeaa
 Ubicación: Villahermosa, Tabasco. Pozo: - Profundidad: - m
 Muestra: M4 M.Izquierdo UTM X: 509769 Fecha: 25/05/2016
 UTM Y: 1992551

| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | OBSERVACIONES | |
|----------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|------------------------|---|---|
| | | | | | | | Análisis efectuado con la muestra total de <u>2000.00</u> g Humedad testigo Grava, w = <u>-</u> % Tierra, w = <u>-</u> % |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | No. 4 | 4.75 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | -----> % MATERIAL MENOR QUE No. 4 | |
| | Sumas = | | 0 | 0.00 | -----> % DE GRAVA | | |
| MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | | OBSERVACIONES | |
| | | | | MUESTRA < No. 4 | MUESTRA TOTAL | | |
| | | | | 100.00 | 100.00 | Análisis efectuado con muestra de <u>2000.00</u> g del material menor que la malla No. 4. | |
| 20 | 0.850 | 27.20 | 1.36 | 98.64 | 98.64 | | |
| 40 | 0.425 | 27.30 | 1.37 | 97.28 | 97.28 | | |
| 60 | 0.250 | 109.90 | 5.50 | 91.78 | 91.78 | | |
| 100 | 0.150 | 122.70 | 6.14 | 85.65 | 85.65 | | |
| 200 | 0.075 | 374.60 | 18.73 | 66.92 | 66.92 | | % MAT. FINO MENOR QUE 200 |
| Sumas | | 661.70 | 33.09 | | | | |
| Charola | | 1338.30 | 66.92 | | | CHAROLA No. <u>1</u> | |
| Suma = | | | 100.00 | | | | |

Observaciones Los valores de D₁₀, D₃₀ y D₆₀ se extrapolaron de la curva granulométrica.

Operador: J. Manuel Lopez Calculó: J. F. Montiel Fecha: 25/05/2016



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal Id. de Lab.: MDaa0.5Km
 Ubicación: Villahermosa, Tabasco. Pozo: - Profundidad: - m
 Muestra: M5 M.Derecho UTM X: 510165 Fecha: 25/05/2016
 UTM Y: 1992321

| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | OBSERVACIONES | | |
|----------------|----------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|----------------------|---|---|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | Análisis efectuado con la muestra total de <u>2000.00</u> g | |
| | | | | | | | Humedad testigo | |
| | | | | | | | Grava, w = <u>-</u> % | |
| | | | | | | | Tierra, w = <u>-</u> % | |
| | | | | | 100.00 | | | |
| | No. 4 | 4.75 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | | -----> % MATERIAL MENOR QUE No. 4 | |
| | Sumas = | | 0 | 0.00 | | | -----> % DE GRAVA | |
| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | | OBSERVACIONES | |
| | | | | | MUESTRA < No. 4 | MUESTRA TOTAL | | |
| | | | | | 100.00 | 100.00 | | |
| | 10 | 2.000 | 16.40 | 0.82 | 99.18 | 99.18 | | Análisis efectuado con muestra de <u>2000.00</u> g del material menor que la malla No. 4. |
| | 20 | 0.850 | 18.20 | 0.91 | 98.27 | 98.27 | | |
| | 40 | 0.425 | 14.10 | 0.71 | 97.57 | 97.57 | | |
| | 60 | 0.250 | 120.80 | 6.04 | 91.53 | 91.53 | | |
| | 100 | 0.150 | 129.30 | 6.47 | 85.06 | 85.06 | | % MAT. FINO MENOR QUE 200 |
| | 200 | 0.075 | 388.40 | 19.42 | 65.64 | 65.64 | | |
| | Sumas | | 687.20 | 34.36 | | | | |
| Charola | | 1312.80 | 65.64 | | | CHAROLA No. <u>1</u> | | |
| Suma = | | | | 100.00 | | | | |

Observaciones Los valores de D₁₀, D₃₀ y D₆₀ se extrapolaron de la curva granulométrica.

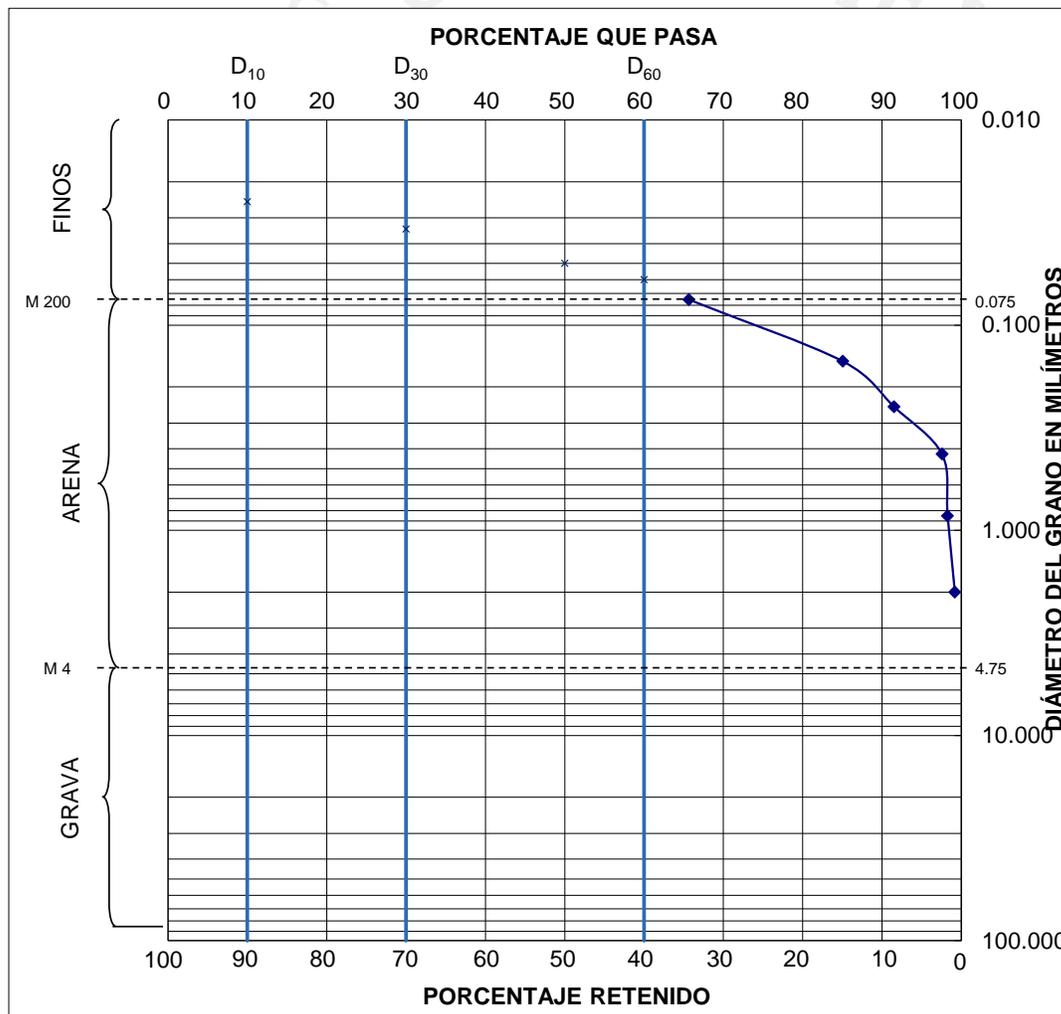
Operador: J. Manuel Lopez Calculó: J. F. Montiel Fecha: 25/05/2016



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

| | | |
|---|------------------------------|--------------------------------------|
| Sitio: <u>Rio Carrizal</u> | Pozo: <u>-</u> | Id. de Lab.: <u>MDaa0.5Km</u> |
| Ubicación: <u>Villahermosa, Tabasco.</u> | UTM X: <u>510165</u> | Profundidad: <u>-</u> m |
| Muestra: <u>M5 M.Derecho</u> | UTM Y: <u>1992321</u> | Fecha: <u>25/05/2016</u> |



| | | |
|--|---|-------------------------------------|
| Grava: <u>0.00</u> | Arena: <u>34.36</u> | Finos: <u>65.64</u> |
| D₁₀ = <u>0.025</u> | D₃₀ = <u>0.03</u> | D₆₀ = <u>0.06</u> |
| C_u = D₆₀ / D₁₀ = <u>2.40</u> | C_c = (D₃₀)² / D₁₀ x D₆₀ = <u>0.77</u> | |





INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal Id. de Lab.: Caa0.5Km
 Ubicación: Villahermosa, Tabasco Pozo: - Profundidad: - m
 Muestra: M5 Centro UTM X: 510174 Fecha: 25/05/2016
 UTM Y: 1992356

| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | OBSERVACIONES | |
|---------------|----------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|--|---|
| | | | | | | | Análisis efectuado con la muestra total de <u>2000.00</u> g Humedad testigo Grava, w = <u>-</u> % Tierra, w = <u>-</u> % |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | No. 4 | 4.75 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | -----> % MATERIAL MENOR QUE No. 4 | |
| | Sumas = | | 0 | 0.00 | -----> % DE GRAVA | | |
| | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | | OBSERVACIONES |
| | | | | MUESTRA < No. 4 | MUESTRA TOTAL | | |
| | | | | | | Análisis efectuado con muestra de <u>1997.80</u> g del material menor que la malla No. 4. % MAT. FINO MENOR QUE 200 | |
| 40 | 0.425 | 15.90 | 0.80 | 100.00 | 100.00 | | |
| 60 | 0.250 | 1032.50 | 51.68 | 47.52 | 47.52 | | |
| 100 | 0.150 | 465.20 | 23.29 | 24.24 | 24.24 | | |
| 200 | 0.075 | 474.20 | 23.74 | 0.50 | 0.50 | | |
| Sumas | | 1987.80 | 99.50 | | | | |
| Charola | | 10.00 | 0.50 | | | CHAROLA No. <u>1</u> | |
| Suma = | | | 100.00 | | | | |

Observaciones

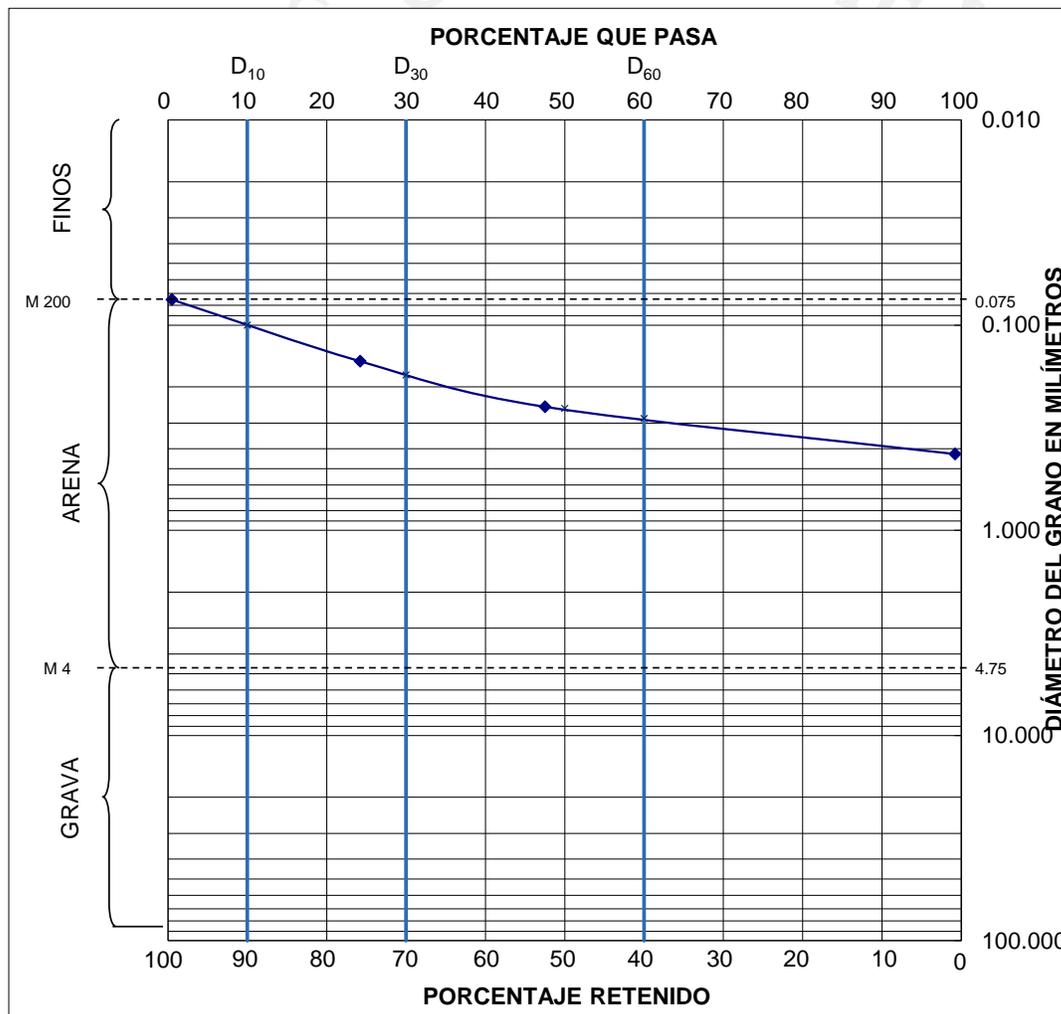
Operador: J. Manuel Lopez Calculó: J. F. Montiel Fecha: 25/05/2016



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

| | | |
|--|------------------------------|-------------------------------------|
| Sitio: <u>Rio Carrizal</u> | Pozo: <u>-</u> | Id. de Lab.: <u>Caa0.5Km</u> |
| Ubicación: <u>Villahermosa, Tabasco</u> | UTM X: <u>510174</u> | Profundidad: <u>-</u> m |
| Muestra: <u>M5 Centro</u> | UTM Y: <u>1992356</u> | Fecha: <u>25/05/2016</u> |



| | | |
|--|---|-------------------------------------|
| Grava: <u>0.00</u> | Arena: <u>99.50</u> | Finos: <u>0.50</u> |
| D₁₀ = <u>0.1</u> | D₃₀ = <u>0.18</u> | D₆₀ = <u>0.29</u> |
| C_u = D₆₀ / D₁₀ = <u>2.85</u> | C_c = (D₃₀)² / D₁₀ x D₆₀ = <u>1.07</u> | |





INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal Id. de Lab.: Mlaa0.5Km
 Ubicación: Villahermosa, Tabasco. Pozo: - Profundidad: - m
 Muestra: M5 M.Izquierdo UTM X: 510184 Fecha: 25/06/2016
 UTM Y: 1992391

| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | OBSERVACIONES | |
|----------|---------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|---|---|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | Análisis efectuado con la muestra total de <u>2000.00</u> g |
| | | | | | | | Humedad testigo |
| | | | | | | | Grava, w = <u>-</u> % |
| | | | | | | | Tierra, w = <u>-</u> % |
| | | | | | | | |
| | No. 4 | 4.75 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | | -----> % MATERIAL MENOR QUE No. 4 |
| | Sumas = | | 0 | 0.00 | -----> % DE GRAVA | | |
| | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | | OBSERVACIONES |
| | | | | MUESTRA < No. 4 | MUESTRA TOTAL | | |
| | | | | | | Análisis efectuado con muestra de <u>1999.70</u> g del material menor que la malla No. 4. | |
| | | | | 100.00 | 100.00 | | |
| 40 | 0.425 | 18.50 | 0.93 | 99.07 | 99.07 | | |
| 60 | 0.250 | 98.40 | 4.92 | 94.15 | 94.15 | | |
| 100 | 0.150 | 135.80 | 6.79 | 87.36 | 87.36 | | |
| 200 | 0.075 | 352.90 | 17.65 | 69.72 | 69.72 | % MAT. FINO MENOR QUE 200 | |
| Sumas | | 605.60 | 30.28 | | | | |
| Charola | | 1394.10 | 69.72 | | | CHAROLA No. <u>1</u> | |
| Suma = | | | 100.00 | | | | |

Observaciones Los valores de D₁₀, D₃₀ y D₆₀ se extrapolaron de la curva granulométrica.

Operador: J. Manuel Lopez Calculó: J. F. Montiel Fecha: 25/06/2016



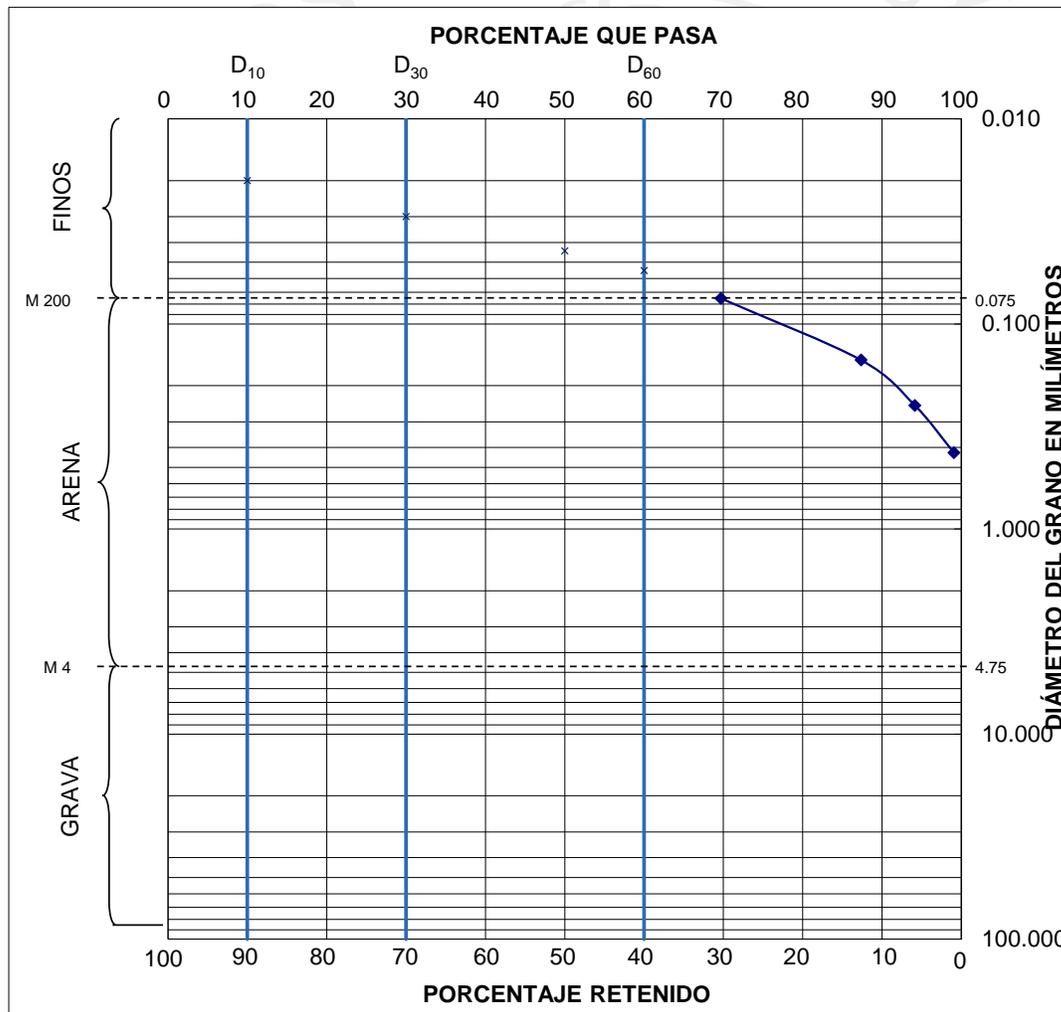
INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal
Ubicación: Villahermosa, Tabasco.
Muestra: M5 M.Izquierdo

Pozo: -
UTM X: 510184
UTM Y: 1992391

Id. de Lab.: Mlaa0.5Km
Profundidad: - m
Fecha: 25/06/2016



| | | |
|--------------------------------|--|---------------------|
| Grava: 0.00 | Arena: 30.28 | Finos: 69.72 |
| $D_{10} = 0.02$ | $D_{30} = 0.03$ | $D_{60} = 0.06$ |
| $C_u = D_{60} / D_{10} = 2.75$ | $C_c = (D_{30})^2 / D_{10} \times D_{60} = 0.82$ | |



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal Id. de Lab.: Mlaa1Km
 Ubicación: Villahermosa, Tabasco Pozo: - Profundidad: - m
 Muestra: M6 M.Derecho UTM X: 510456 Fecha: 25/05/2016
 UTM Y: 1992207

| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | OBSERVACIONES | | |
|----------------|----------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|---------------|---|---|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | Análisis efectuado con la muestra total de <u>2000.00</u> g | |
| | | | | | | | Humedad testigo | |
| | | | | | | | Grava, w = <u>-</u> % | |
| | | | | | | | Tierra, w = <u>-</u> % | |
| | | | | | | | | |
| | No. 4 | 4.75 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | | -----> % MATERIAL MENOR QUE No. 4 | |
| Sumas = | | 0 | 0.00 | -----> % DE GRAVA | | | | |
| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | | OBSERVACIONES | |
| | | | | | MUESTRA < No. 4 | MUESTRA TOTAL | | |
| | | | | | 100.00 | 100.00 | | |
| | 20 | 0.850 | 12.50 | 0.63 | 99.37 | 99.37 | | Análisis efectuado con muestra de <u>1997.30</u> g del material menor que la malla No. 4. |
| | 40 | 0.425 | 42.80 | 2.14 | 97.23 | 97.23 | | |
| | 60 | 0.250 | 120.50 | 6.03 | 91.20 | 91.20 | | |
| | 100 | 0.150 | 150.40 | 7.53 | 83.67 | 83.67 | | |
| | 200 | 0.075 | 374.50 | 18.75 | 64.92 | 64.92 | | % MAT. FINO MENOR QUE 200 |
| | Sumas | | 700.70 | 35.08 | | | | |
| | Charola | | 1296.60 | 64.92 | | | | CHAROLA No. <u>1</u> |
| Suma = | | | 100.00 | | | | | |

Observaciones Los valores de D₁₀, D₃₀ y D₆₀ se extrapolaron de la curva granulométrica.

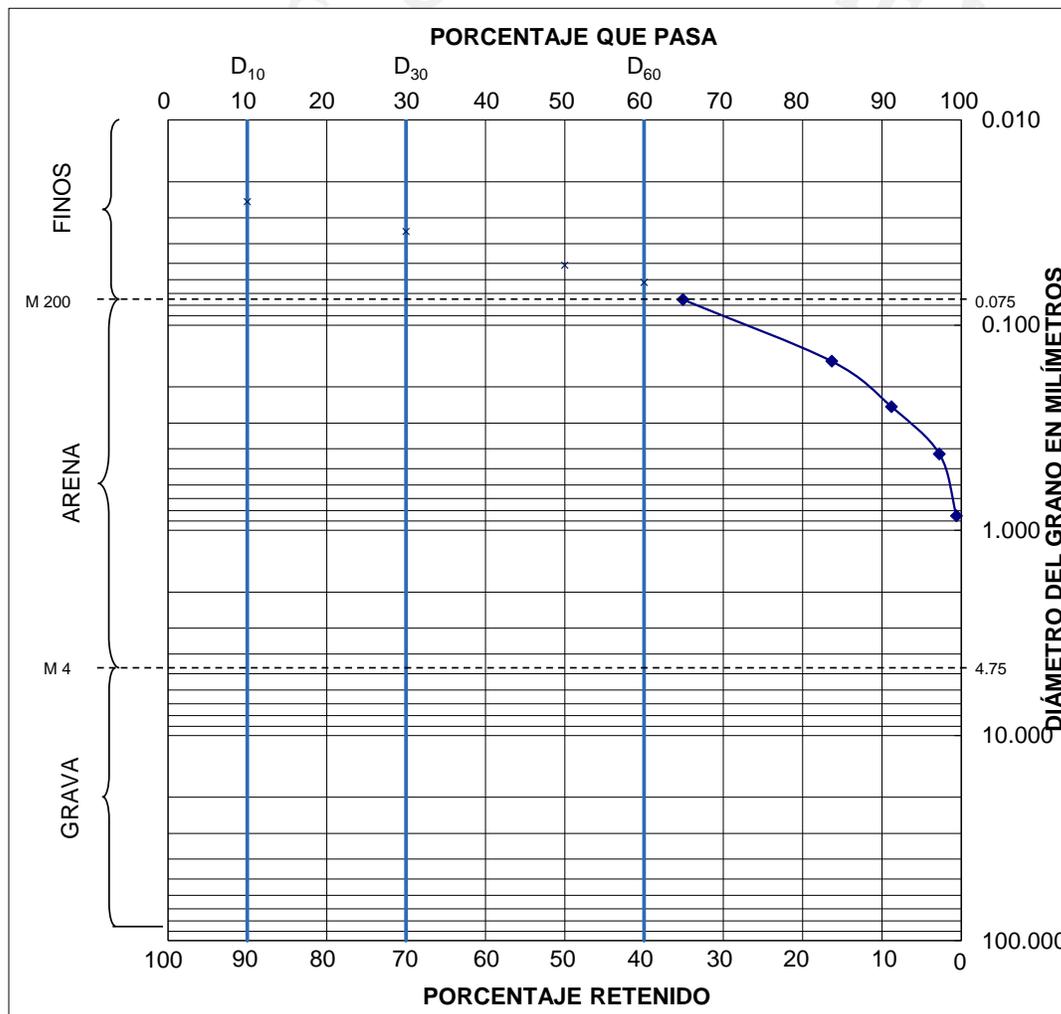
Operador: J. Manuel Lopez Calculó: J. F. Montiel Fecha: 25/05/2016



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

| | | |
|--|------------------------------|------------------------------------|
| Sitio: <u>Rio Carrizal</u> | Pozo: <u>-</u> | Id. de Lab.: <u>Mlaa1Km</u> |
| Ubicación: <u>Villahermosa, Tabasco</u> | UTM X: <u>510456</u> | Profundidad: <u>-</u> m |
| Muestra: <u>M6 M.Derecho</u> | UTM Y: <u>1992207</u> | Fecha: <u>25/05/2016</u> |



| | | |
|--|---|-------------------------------------|
| Grava: <u>0.00</u> | Arena: <u>35.08</u> | Finos: <u>64.92</u> |
| D₁₀ = <u>0.025</u> | D₃₀ = <u>0.04</u> | D₆₀ = <u>0.06</u> |
| C_u = D₆₀ / D₁₀ = <u>2.48</u> | C_c = (D₃₀)² / D₁₀ x D₆₀ = <u>0.79</u> | |





INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal Id. de Lab.: Caa1Km
 Ubicación: Villahermosa, Tabasco Pozo: - Profundidad: - m
 Muestra: M6 Centro UTM X: 510478 Fecha: 25/05/2016
 UTM Y: 1992224

| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | OBSERVACIONES | |
|----------------|----------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|---|---|
| | | | | | | | Análisis efectuado con la muestra total de <u>1650.00</u> g Humedad testigo Grava, w = <u>-</u> % Tierra, w = <u>-</u> % |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | No. 4 | 4.75 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | -----> % MATERIAL MENOR QUE No. 4 | |
| | Sumas = | | 0 | 0.00 | -----> % DE GRAVA | | |
| | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | | OBSERVACIONES |
| | | | | MUESTRA < No. 4 | MUESTRA TOTAL | | |
| | | | | 100.00 | 100.00 | Análisis efectuado con muestra de <u>1649.70</u> g del material menor que la malla No. 4. | |
| 40 | 0.425 | 11.70 | 0.71 | 99.29 | 99.29 | | |
| 60 | 0.250 | 1365.30 | 82.76 | 16.53 | 16.53 | | |
| 100 | 0.150 | 148.80 | 9.02 | 7.51 | 7.51 | | |
| 200 | 0.075 | 120.20 | 7.29 | 0.22 | 0.22 | | |
| Sumas | | 1646.00 | 99.78 | | | % MAT. FINO MENOR QUE 200 | |
| Charola | | 3.70 | 0.22 | | | CHAROLA No. <u>1</u> | |
| Suma = | | | 100.00 | | | | |

Observaciones

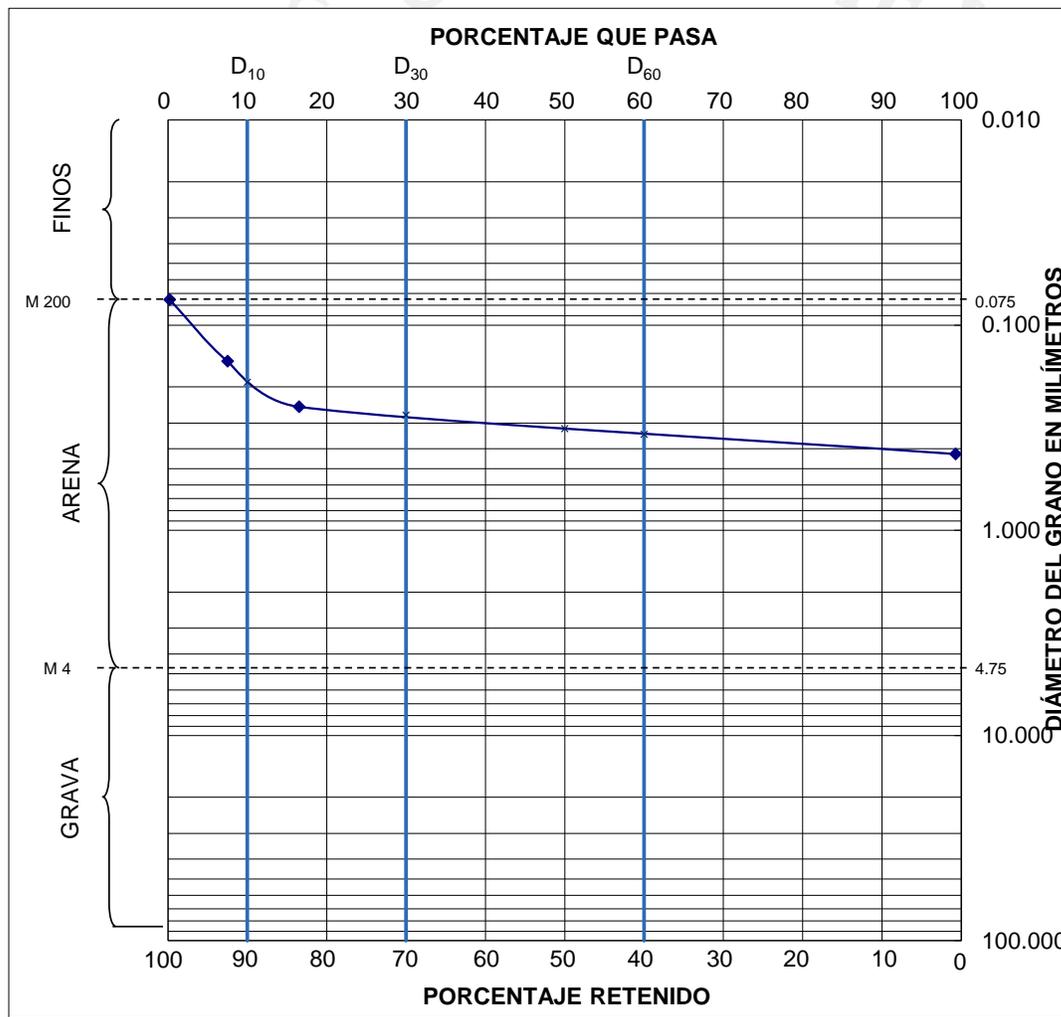
Operador: J. Manuel Lopez Calculó: J.F. Montiel Fecha: 25/05/2016



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal Id. de Lab.: Caa1Km
 Ubicación: Villahermosa, Tabasco Pozo: - Profundidad: - m
 Muestra: M6 Centro UTM X: 510478 Fecha: 25/05/2016
 UTM Y: 1992224



| | | |
|--|--|-----------------------------|
| Grava: <u>0.00</u> | Arena: <u>99.78</u> | Finos: <u>0.22</u> |
| $D_{10} = \underline{0.19}$ | $D_{30} = \underline{0.28}$ | $D_{60} = \underline{0.34}$ |
| $C_u = D_{60} / D_{10} = \underline{1.79}$ | $C_c = (D_{30})^2 / D_{10} \times D_{60} = \underline{1.17}$ | |





INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

Sitio: Rio Carrizal Id. de Lab.: Mlaa1Km
 Ubicación: Villahermosa, Tabasco. Pozo: - Profundidad: - m
 Muestra: M6 M.Izquierdo UTM X: 510503 Fecha: 26/05/2016
 UTM Y: 1992241

| VÍA SECA | MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | OBSERVACIONES | |
|----------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|------------------------|---|---|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | Análisis efectuado con la muestra total de <u>2000.00</u> g |
| | | | | | | | Humedad testigo |
| | | | | | | | Grava, w = <u>-</u> % |
| | | | | | | | Tierra, w = <u>-</u> % |
| | | | | | | | |
| | No. 4 | 4.75 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | | -----> % MATERIAL MENOR QUE No. 4 |
| | Sumas = | | 0 | 0.00 | -----> % DE GRAVA | | |
| MALLA | ABERTURA EN mm | PESO RETENIDO g | % PARCIAL RETENIDO | % ACUMULATIVO QUE PASA | | OBSERVACIONES | |
| | | | | MUESTRA < No. 4 | MUESTRA TOTAL | | |
| | | | | | | | |
| | | | | 100.00 | 100.00 | Análisis efectuado con muestra de <u>1999.10</u> g del material menor que la malla No. 4. | |
| 40 | 0.425 | 26.20 | 1.31 | 98.69 | 98.69 | | |
| 60 | 0.250 | 1321.50 | 66.10 | 32.58 | 32.58 | | |
| 100 | 0.150 | 398.30 | 19.92 | 12.66 | 12.66 | | |
| 200 | 0.075 | 248.90 | 12.45 | 0.21 | 0.21 | % MAT. FINO MENOR QUE 200 | |
| Sumas | | 1994.90 | 99.79 | | | | |
| Charola | | 4.20 | 0.21 | | | CHAROLA No. <u>1</u> | |
| Suma = | | | 100.00 | | | | |

Observaciones

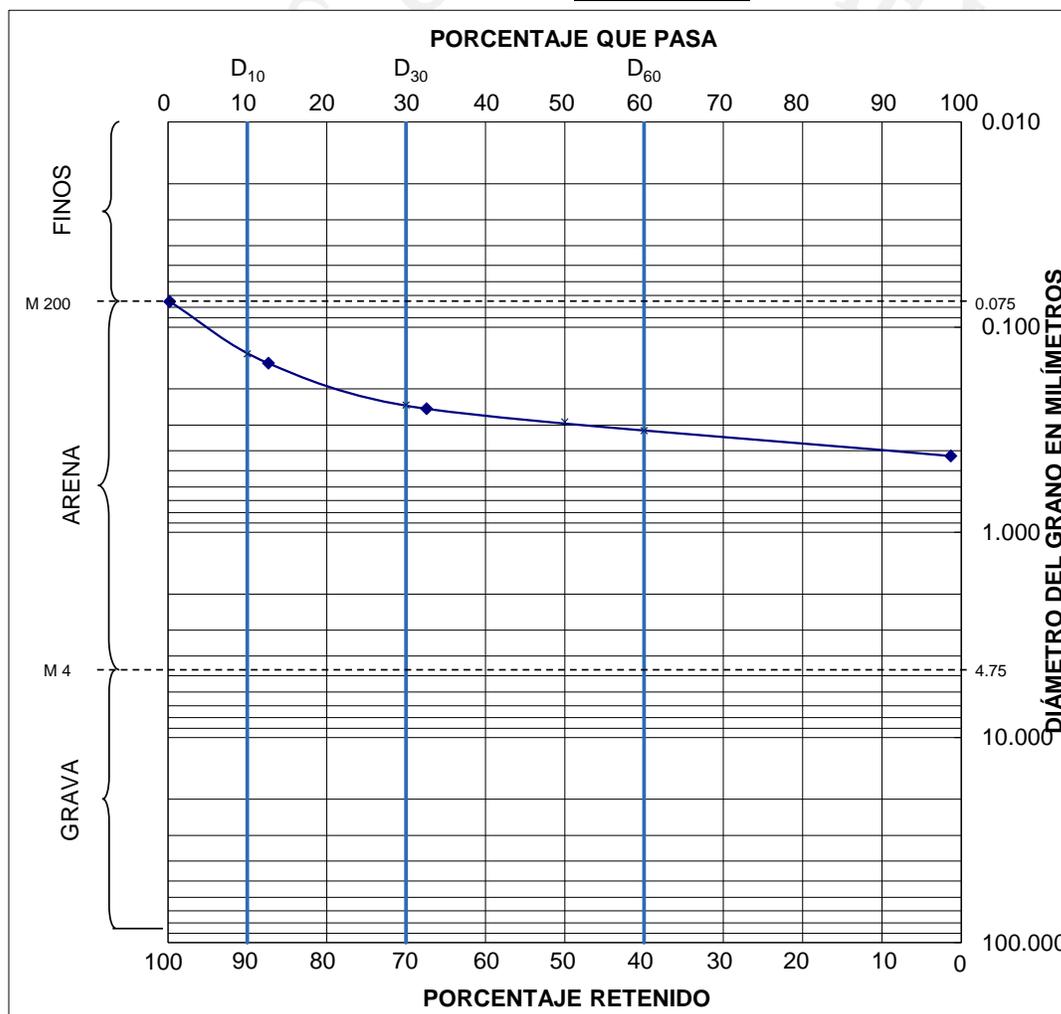
Operador: J. Manuel Lopez Calculó: J.F. Montiel Fecha: 26/05/2016



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (VÍA SECA)

| | | |
|---|------------------------------|------------------------------------|
| Sitio: <u>Rio Carrizal</u> | Pozo: <u>-</u> | Id. de Lab.: <u>Mlaa1Km</u> |
| Ubicación: <u>Villahermosa, Tabasco.</u> | UTM X: <u>510503</u> | Profundidad: <u>-</u> m |
| Muestra: <u>M6 M.Izquierdo</u> | UTM Y: <u>1992241</u> | Fecha: <u>26/05/2016</u> |



| | | |
|--|---|-------------------------------------|
| Grava: <u>0.00</u> | Arena: <u>99.79</u> | Finos: <u>0.21</u> |
| D₁₀ = <u>0.135</u> | D₃₀ = <u>0.24</u> | D₆₀ = <u>0.32</u> |
| C_u = D₆₀ / D₁₀ = <u>2.37</u> | C_c = (D₃₀)² / D₁₀ x D₆₀ = <u>1.33</u> | |





Densidad de sólidos



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

DENSIDAD DE SÓLIDOS

Sitio: Rio Carrizal Id de lab.: MDaa0.5KM
 Ubicación: Villahermosa, Tabasco. Pozo: _____ Profundidad: - m
 Muestra: M5 M. Derecho UTM X: 510165 Fecha: 25/05/2016
 UTM Y: 1992321

| Material < que la malla N°4 | | | | Mat > que la malla N°4 | |
|---|--------|--------|--|---------------------------------------|---|
| Prueba N° | 1 | 2 | | Peso grava húmeda (g) | - |
| Matraz N° | A | B | | Peso grava seca (g) | - |
| W _{mws} (g) | 852.09 | 803.71 | | Peso agua absorbida (g) | - |
| Temperatura | 24.30 | 24.30 | | Volumen desalojado (cm ³) | - |
| W _{mw} (g) | 710.13 | 669.22 | | % de absorción | - |
| W _{ms} (g) | 438.83 | 385.80 | | Volumen real de sólidos | - |
| W _m (g) | 210.83 | 169.80 | | Densidad de masa, S _m | - |
| W _s =W _{ms} -W _m (g) | 228.00 | 216.00 | | Densidad de sólidos, S _s | - |
| W _s +W _{mw} -W _{mws} (g) | 86.04 | 81.51 | | | |
| S _s | 2.65 | 2.65 | | | |
| Promedio S _s | 2.65 | | | | |

W_m = Peso del matraz antes de agregar los sólidos.

W_{ms} = Peso del matraz después de agregar los sólidos.

W_{mws} = Peso del matraz + agua+ muestra a t°.

W_{mw} = Peso del matraz + agua a t°(de la curva de calibración).

W_s = Peso del suelo seco.

$$S_s = \text{Densidad de sólidos} = \frac{W_s}{W_s + W_{mw} - W_{mws}}$$

Observaciones: _____
 Operador: JOSE MANUEL LÓPEZ Calculó: J. F. MONTIEL Fecha: 25/05/2016



INGENIERIA INTELIGENTE Y EFICIENTE

DENSIDAD DE SÓLIDOS

Sitio: Rio Carrizal Id de lab.: Caa0.5Km
 Ubicación: Villahermosa, Tabasco. Pozo: _____ Profundidad: - m
 Muestra: M5 Centro UTM X: 510174 Fecha: 24/05/2016
 UTM Y: 1992356

| Material < que la malla N°4 | | | | Mat > que la malla N°4 | |
|---|--------|--------|--|---------------------------------------|---|
| Prueba N° | 1 | 2 | | Peso grava húmeda (g) | - |
| Matraz N° | A | B | | Peso grava seca (g) | - |
| W _{mws} (g) | 847.55 | 857.91 | | Peso agua absorbida (g) | - |
| Temperatura | 24.30 | 24.30 | | Volumen desalojado (cm ³) | - |
| W _{mw} (g) | 672.19 | 718.44 | | % de absorción | - |
| W _{ms} (g) | 453.72 | 442.33 | | Volumen real de sólidos | - |
| W _m (g) | 172.72 | 218.33 | | Densidad de masa, S _m | - |
| W _s =W _{ms} -W _m (g) | 281.00 | 224.00 | | Densidad de sólidos, S _s | - |
| W _s +W _{mw} -W _{mws} (g) | 105.64 | 84.53 | | | |
| S _s | 2.66 | 2.65 | | | |
| Promedio S _s | 2.66 | | | | |

W_m = Peso del matraz antes de agregar los sólidos.
 W_{ms} = Peso del matraz después de agregar los sólidos.
 W_{mws} = Peso del matraz + agua+ muestra a t°.
 W_{mw} = Peso del matraz + agua a t°(de la curva de calibración).
 W_s = Peso del suelo seco.
 S_s = Densidad de sólidos =
$$\frac{W_s}{W_s+W_{mw}-W_{mws}}$$

Observaciones: _____
 Operador: JOSE MANUEL LÓPEZ Calculó: J. F. MONTIEL Fecha: 24/05/2016

