

# **DISEÑO Y VERIFICACIÓN DE CARGA AXIAL DE PILOTES**

Jorge E. Alva Hurtado <sup>(1)</sup>

Nilton Guillén Chávez <sup>(2)</sup>

## **RESUMEN**

Se presenta en este artículo la metodología utilizada para el diseño y verificación de pilotes en suelo fino, sometidos a carga axial. Además se presentan los resultados de un ensayo de carga ejecutado y su interpretación para determinar la carga admisible de los mismos. Los pilotes diseñados y verificados corresponden a la cimentación del Puente Killman, en Cochabamba, Bolivia.

Para el diseño de los pilotes según la metodología propuesta, se requiere la ejecución de un estudio geotécnico de cimentación que incluye ensayos de penetración estándar en el campo y ensayos de clasificación en el laboratorio. La capacidad última de carga se ha predicho mediante el empleo de fórmulas empíricas, para luego determinar la capacidad admisible en base a un factor de seguridad apropiado.

La verificación de la capacidad de carga de los pilotes se efectúa mediante ensayos de carga y fórmulas de hinca que se ejecutan en el campo. Adicionalmente en el diseño de los pilotes hay que considerar el factor de eficiencia de grupo y el asentamiento.

## **INTRODUCCION**

En este artículo se documenta la verificación de la carga axial de los pilotes existentes en los estribos este y oeste y la pila central del puente Killman, localizado en la ciudad de Cochabamba, Bolivia. El estudio se llevó a cabo como parte de la tarea de la Asociación PyV-GMI contratada por la Honorable Municipalidad de Cochabamba para supervisar la construcción de la obra (Alva Hurtado, 1992).

Se utilizaron los métodos de predicción de carga axial basados en fórmulas empíricas que utilizan resultados de ensayos de penetración estándar. También se ejecutó un ensayo de carga in-situ para determinar la capacidad de carga y asentamiento de los pilotes en el estribo este. Se calculó la eficiencia del grupo de pilotes y se evaluó el asentamiento individual y del grupo de pilotes. En este artículo tan sólo se presenta el análisis de carga

---

(1) *Profesor Principal y Director del CISMID, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería.*

(2) *Asistente de Investigación del CISMID-FIC-UNI*

axial de los pilotes individuales, considerando la predicción de la carga última y la carga de diseño y su verificación mediante un ensayo de carga.

## **ANTECEDENTES**

De acuerdo a la información disponible, en la cimentación del puente Killman existían en los estribos pilotes de concreto tipo Franki artesanal, con un diámetro de 0.45 m en el fuste, una longitud de 10.70 m y un diámetro en el bulbo no precisado. Se notaba en superficie la existencia de 19 pilotes en cada estribo, 5 de los cuales eran verticales y el resto inclinados. La superestructura del puente no había sido construida al iniciar el estudio de verificación de la cimentación.

En la cimentación de la pila central existían pilotes de concreto armado, prefabricados, que habían sido hincados en el terreno. Estos pilotes tenían una sección cuadrada de 0.30 m y una longitud de 8.60 metros. Existen 39 de estos pilotes en la cimentación de la pila central. No se pudo inspeccionar estos pilotes ya que se encontraban en el cauce del río.

El puente Killman se encontraba en construcción con diseño terminado; sin embargo, la Supervisión decidió revisar el diseño, comenzando por las características del terreno y la capacidad de carga de los pilotes existentes. La solución final fue rediseñar el puente con una estructura más ligera, compatible con las cargas y los asentamientos de los pilotes y grupos de pilotes determinados en este estudio. La Figura 1 presenta la estructura original del Puente Killman y su cimentación, así como las ubicaciones de los sondajes ordenados por la Supervisión para verificar la cimentación.

## **ESTUDIO GEOTECNICO DE CIMENTACIÓN**

Con el propósito de verificar las características de la cimentación, se ordenó la ejecución de tres sondajes con ensayos de penetración estándar en las ubicaciones de los estribos este y oeste y la pila central. Los trabajos fueron realizados por Méndez (1992) bajo la dirección de la Supervisión. La Figura 2 presenta los resultados de los ensayos de clasificación y los valores de N del ensayo de penetración estándar.

La estratigrafía en el área en estudio está constituida por suelos finos. En el estribo este existen capas alternadas de suelos limosos y arcillas, mientras que en la pila central y el estribo oeste el suelo es más uniforme, del tipo limoso de baja plasticidad. Los valores de N aumentan con la profundidad hasta 20-25 golpes/pie a los 20 metros. El nivel freático es superficial. Los sondajes se ejecutaron a rotación con el empleo de lodo bentonítico.

## **PREDICCIÓN DE LA CARGA ÚLTIMA**

La predicción de la carga última y de la carga admisible de los pilotes individuales se realizó mediante el programa de cómputo FEPC (Guillén, 1994), que incorpora los métodos de Aoki-Velloso (1975), Decourt-Quaresma (1978), Velloso (1982) y Meyerhof (1976). El programa requiere el conocimiento del perfil estratigráfico, los valores de N (golpes/pie) del ensayo SPT con profundidad, los parámetros de los distintos métodos involucrados, el tipo de pilote y sus dimensiones. El manual de usuario del programa de cómputo y las fórmulas empíricas utilizadas se presentan en Alva Hurtado (1993).

La predicción de la carga última de los pilotes en los estribos ha considerado un pilote de concreto tipo Franki artesanal, con un diámetro en el fuste de 0.45 m y diámetro en la punta variable. Se escogió el valor de 0.60 m como el más representativo. La longitud de los pilotes en los estribos se estimó en 10.70 metros en base a la documentación existente. La predicción de la carga última de los pilotes de la pila central ha considerado pilotes de concreto hincados con una sección cuadrada de 0.30 m y una longitud de 8.60 metros. La predicción de la capacidad admisible de los pilotes por carga axial considera un factor de seguridad de 2.5 para todos los métodos, a excepción del método de Decourt-Quaresma, que emplea un factor de seguridad de 1.3 para carga en el fuste y 4.0 para carga en la punta. El método de Meyerhof realiza los cálculos considerando o sin considerar la corrección de los valores de N por sobrecarga.

Con el propósito de comparar los resultados de los distintos métodos, se presenta en la Tabla 1 los resultados de la predicción de la carga última y la carga de diseño ( $FS = 2.5$ ) de los pilotes individuales del estribo este del puente Killman, en base al sondaje realizado en dicha zona. Se aprecia que el método de Aoki-Velloso presenta el valor más bajo de la carga de diseño para estas condiciones. Los pilotes del estribo oeste presentan valores mayores de carga, ya que el subsuelo tiene una mayor resistencia según el sondaje realizado en dicha zona. La predicción de la capacidad de carga de los pilotes de la pila central arrojó valores de diseño superiores a las 40 toneladas.

## **ENSAYO DE CARGA**

Con el propósito de verificar la carga última de los pilotes individuales del estribo este del puente Killman, los cuales arrojaron un valor menor de carga de diseño que los del estribo oeste, se ejecutó un ensayo de carga siguiendo la norma ASTM D-1143. El personal y los equipos para la ejecución del ensayo fueron de la localidad. La supervisión e interpretación del ensayo fueron realizados por los autores.

La Figura 3 presenta la ubicación del pilote vertical ensayado y la ubicación del sondaje utilizado en la predicción de la carga de diseño. La Figura 4 presenta los resultados del ensayo de carga en el pilote ensayado, siguiendo el procedimiento de la norma ASTM. La interpretación de la carga última del ensayo de carga fue realizada siguiendo los métodos de Davisson, Butler y Hoy, Fuller y Hoy y Vesic, que se documentan en Prakash y Sharma

(1990). El método de Davisson define la carga última como aquella que corresponde a un asentamiento que excede la compresión elástica del pilote en  $x = 3.8 + D/120$ , donde D es el diámetro del pilote en mm. El método de Butler y Hoy define a la carga de rotura como el punto de intersección de dos rectas tangentes, la primera corresponde a la tangente a la curva con una inclinación de 0.05 pulg/ton y la segunda recta tangente es aquella paralela a la línea de compresión elástica del pilote y tangente a la curva. El método de Fuller y Hoy indica que la carga de rotura corresponde al punto en la curva carga-asentamiento tangente a una recta de inclinación 0.05 pulg/ton. El método de Vesic establece un asentamiento de 1 pulgada que corresponde a la carga última.

La interpretación gráfica de estos métodos se presenta en la Figura 5 y los resultados en la Tabla 2. Se aprecia que la carga de diseño considera un factor de seguridad de 2.0 si es que se realiza el ensayo de carga. Los resultados de la aplicación de los métodos de Davisson y Butler y Hoy son similares, siendo inferiores a los valores de los métodos de Fuller y Hoy y Vesic. Se concluye que los pilotes del estribo este tienen una carga individual de diseño de 30 toneladas.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Para la predicción de la carga axial de pilotes fue necesario realizar un estudio geotécnico de cimentación apropiado, de suficiente profundidad y con la ejecución de ensayos de penetración estándar.
2. Existen variaciones en los valores de carga última y carga de diseño de los pilotes sometidos a carga axial, determinados en base a las fórmulas empíricas. El método de Aoki-Velloso presenta los valores más bajos de capacidad de carga de los pilotes de los estribos, mientras que el método de Meyerhof presenta los valores más bajos para los pilotes de la pila central. Se utilizó en la predicción el método de Aoki-Velloso.
3. El ensayo de carga realizado en un pilote del estribo este indica que puede considerarse una carga de diseño de 30 toneladas, con un factor de seguridad de 2.0. La eficiencia de grupo de los pilotes de los estribos este y oeste es de 1.0. El asentamiento del grupo de pilotes de los estribos es de 12 mm.
4. La capacidad de carga de diseño de los pilotes de la pila central es de 30 toneladas, considerando una eficiencia de grupo de 0.7 y un factor de seguridad de 2.5, ya que no se efectuó ensayo de carga en estos pilotes. El asentamiento del grupo de pilotes en la pila central sería de 19 milímetros.
5. Se recomendó rediseñar el puente Killman, aligerando las cargas para que éstas sean compatibles con las capacidades de carga y asentamiento de los pilotes de la cimentación existentes en la cimentación.

6. Se recomienda el empleo de la metodología descrita para el diseño de pilotes sometidos a carga axial.

## REFERENCIAS

1. Alva Hurtado J.E. (1992), "Estudio Verificatorio de la Capacidad de Carga Axial de los Pilotes de la Pila Central y Estribos del Puente Killman", Informe presentado a P y V-GMI.
2. Alva Hurtado J.E. (1993), "Cimentaciones Profundas", Seminario Cimentaciones de Estructuras, Comité Peruano de Mecánica de Suelos, Fundaciones y Mecánica de Rocas, Lima.
3. Aoki N. y Velloso D.A. (1975), "Un Método Aproximado para Calcular la Capacidad de Carga de Pilotes", V Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Buenos Aires, Argentina, pp. 367-376.
4. Decourt L. y Quaresma A.R. (1978), "Capacidad de Carga de Pilotes a partir de Valores de SPT", 6to. Congreso Brasileiro de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Río de Janeiro.
5. Guillén N. (1994), "Capacidad Última de Carga de Pilotes en Carga Axial", Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
6. Méndez M. (1992), "Estudio Geotécnico Complementario. Construcción Puente Killman", Informe presentado a la H.M. de Cochabamba, Bolivia.
7. Meyerhof G.G. (1976), "Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundation", Eleventh Terzaghi Lecture, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, GT3, pp. 195-228.
8. Prakash S. y Sharma H.D. (1990), "Pile Foundations in Engineering Practice", John Wiley, New York.
9. Velloso P.P.C. (1982), "Cimentaciones – Aspectos Geotécnicos", Vol.3, Pontificia Universidad Católica, Río de Janeiro.
10. Vesic A.S. (1977), "Design of Pile Foundations", National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice, Transportation Research Board, Washington, D.C.

**TABLA 1 RESULTADOS DE PREDICCIÓN DE LA CARGA ULTIMA DE PILOTES PUENTE KILLMAN  
FRANKI ARTESANAL (  $\phi = 0.45$  m  $\phi_b = 0.60$  m L = 10.7 m)**

<b>Carga Ultima (toneladas)</b>					
Método	Aoki-Velloso	Decourt-Quaresma	P.P. Velloso	Meyerhof (SC)*	Meyerhof (CC)*
Sondaje					
Estribo Este	50.7	84.8	121.3	109.1	98.6
Carga Diseño (tons) FS = 2.5	20.3	33.9	48.5	43.7	39.5

SC = Sin Corrección

CC = Con Corrección

**TABLA 2 RESULTADOS DE INTERPRETACIÓN DE ENSAYOS DE CARGA EN PILOTES PUENTE KILLMAN  
FRANKI ARTESANAL (  $\phi = 0.45$  m  $\phi_b = 0.60$  m L = 10.7 m)**

<b>Carga Ultima (toneladas)</b>				
Método	Davisson	Butler y Hoy	Fuller y Hoy	Vesic ( $\rho = 1''$ )
Pilote				
Estribo Este	60	60.9	75.5	78
Carga Diseño (tons) FS = 2.0	30	30.5	37.8	39

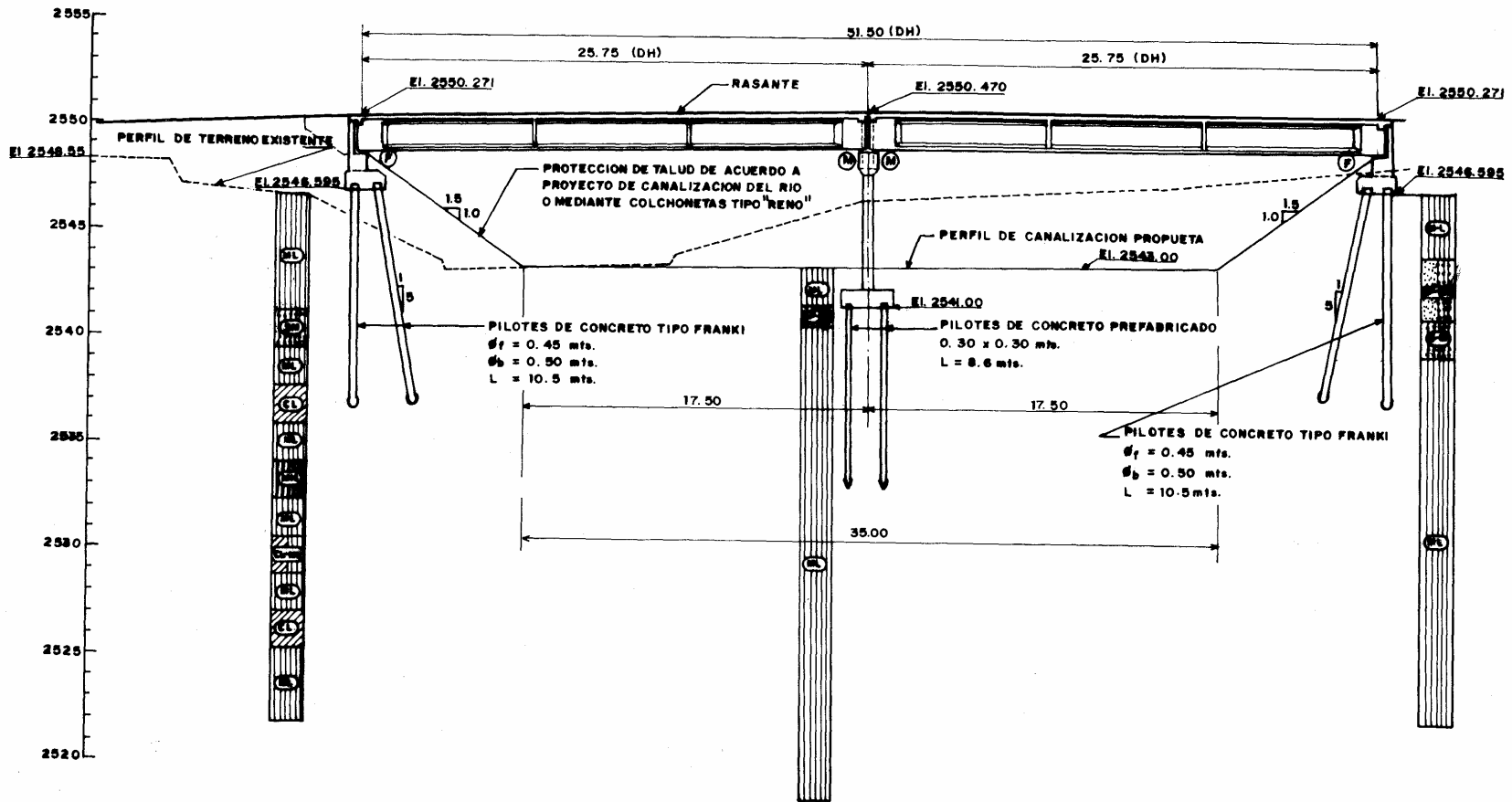
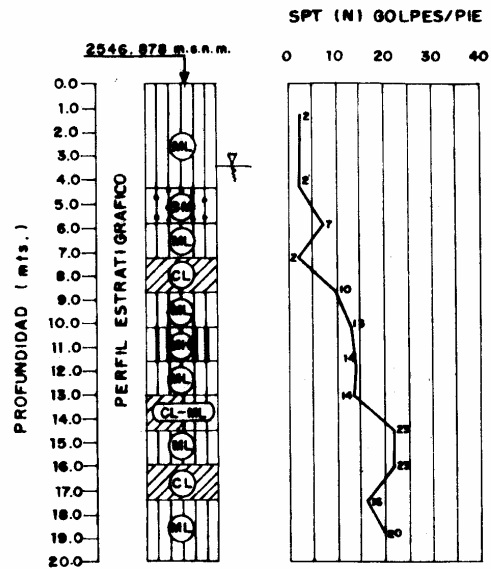
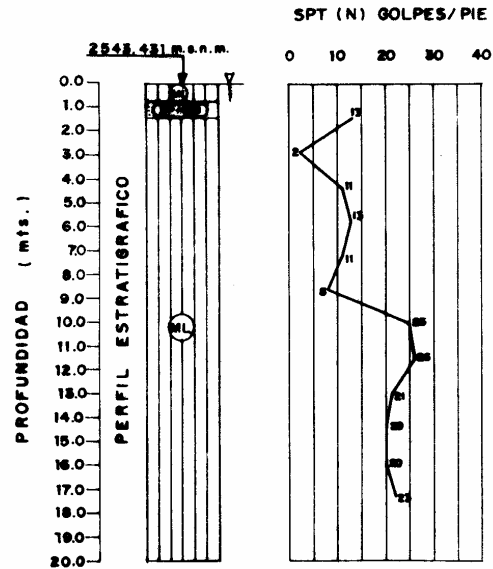


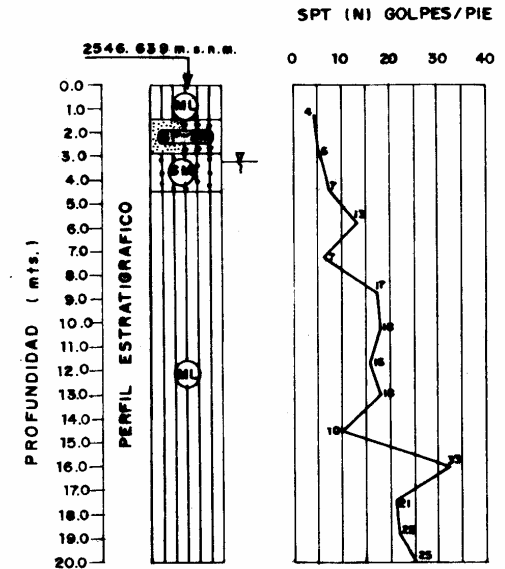
Fig. N° 1: ESTRUCTURAS ORIGINALES DEL PUENTE KILLMAN Y PERFIL ESTRATIGRAFICO INTEGRADO  
 (Cochabamba Bolivia)



**(A) : SONDAJE ESTRIBO ESTE**  
 FUENTE: ESTUDIO GEOTECNICO COMPLEMENTARIO-SETIEMBRE 1992 COCHABAMBA-BOLIVIA.



**(B) : SONDAJE PILAR CENTRAL**  
 FUENTE: ESTUDIO GEOTECNICO COMPLEMENTARIO SETIEMBRE 1992 COCHABAMBA-BOLIVIA.



**(C) : SONDAJE ESTRIBO OESTE**  
 FUENTE: ESTUDIO GEOTECNICO COMPLEMENTARIO-SETIEMBRE 1992 COCHABAMBA-BOLIVIA.

**Fig. N° 2: PERFILES ESTRATIGRAFICOS Y VALORES DE N (Golpes/pie) EN LOS ESTRIBO Y LA PILA CENTRAL DE PUENTE KILLMAN-COCHABAMBA-BOLIVIA**



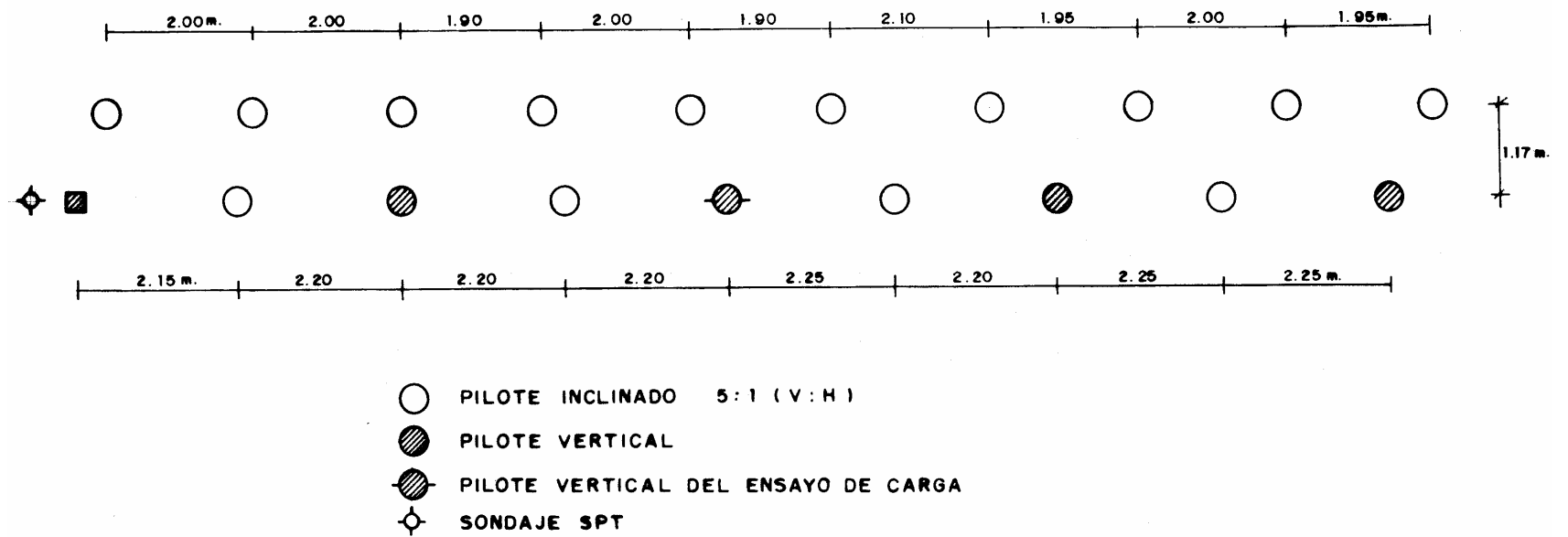
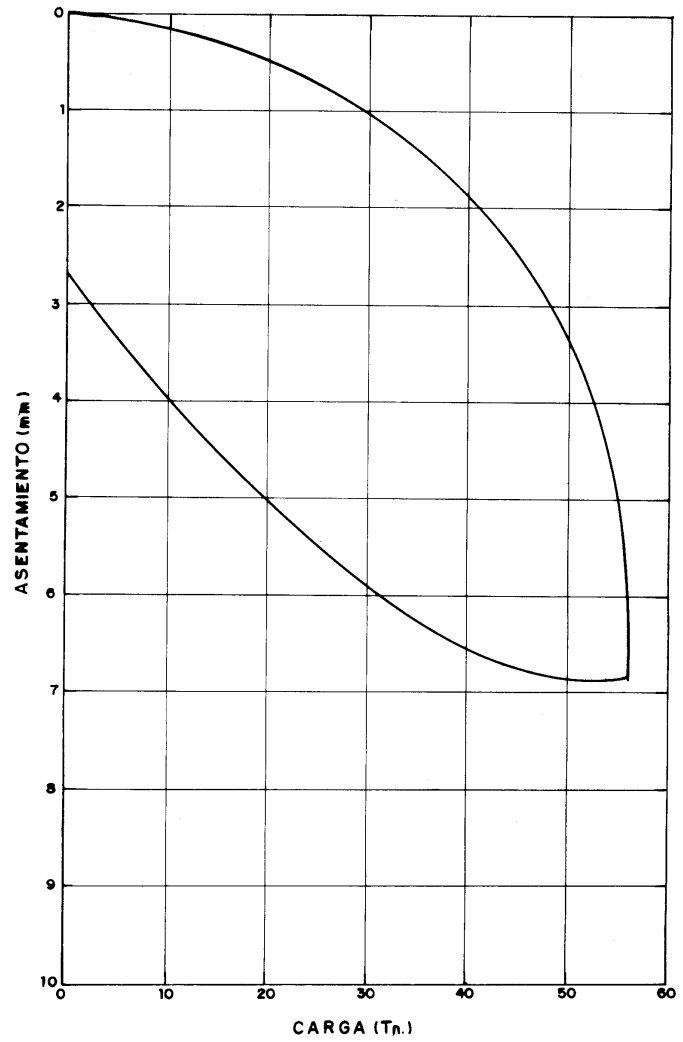


Fig. N° 3: UBICACION "IN SITU" DE LOS PILOTES TIPO FRANKI (Estribo Este Puente Killman, Cochabamba Bolivia)



**Fig. N° 4: RESULTADO DEL ENSAYO DE CARGA (Pilote Tipo Franki Estribo Este Puente Killman, Cochabamba Bolivia)**

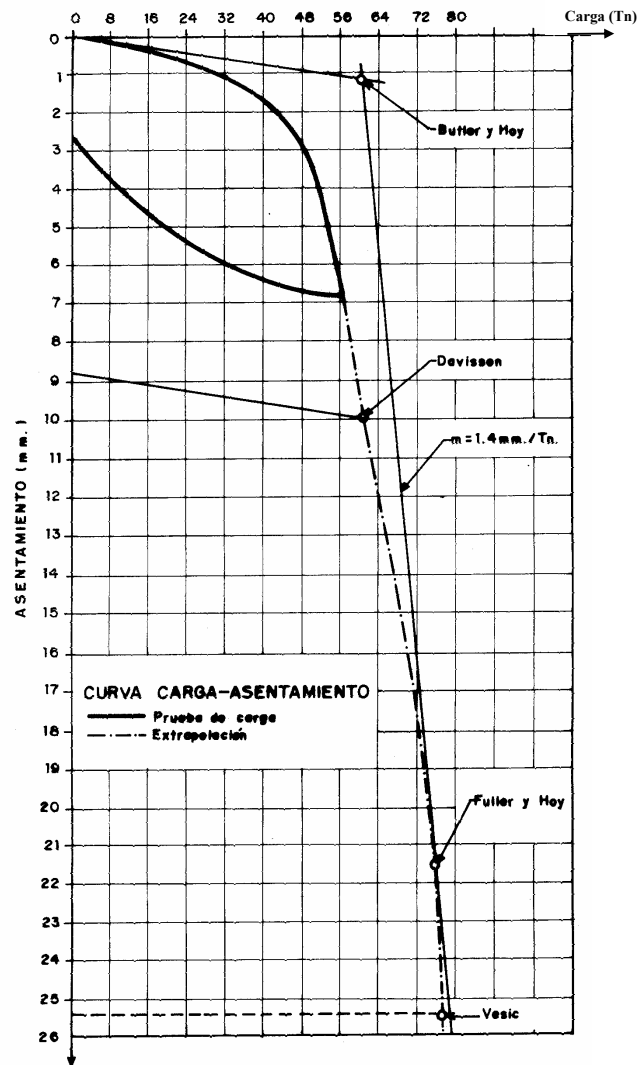


Fig N° 5: INTERPRETACION DEL ENSAYO DE CARGA SEGÚN METODOS GRAFICOS (Davisson, Fuller y Hoy, Butler y Hoy, Vesic)