

AJUSTE TOPOGRÁFICO PARA LA CONSOLIDACIÓN ESTRUCTURAL DEL PUENTE DE SERRANOS DE VALENCIA.

Luis Bosch Roig¹ José Herraiz Boquera¹, Pablo Navarro Esteve¹, Valeria Marcenac¹, Ignacio Bosch Reig¹ y Jose Luis Denia Rios²

Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la Universidad Politécnica de Valencia.

1 Unidad de análisis e interacción en la arquitectura monumental e histórica

2 Laboratorio de fotogrametría

AUTOR DE CONTACTO: Luis Bosch Roig, luibosro@arq.upv.es

RESUMEN: *Se trata de exponer el sistema de orientación adoptado para la realización de perforaciones de gran longitud, en las que el punto de entrada del taladro y el punto de salida de la perforación están prefijados, y donde la precisión es determinante para la obtención de un buen resultado en la realización posterior de los anclajes.*

Se analizan métodos de orientación directos que permiten dirigir el sistema pero obtienen poca precisión o no admiten una comprobación continua; no permitiendo tener en cuenta las posibles desviaciones por holguras o caída del taladro durante la perforación. El sistema adoptado es una alineación de los controles del taladro, guiada por un replanteo topográfico. Se estudia la geometría de la perforación y su implementación en cualquier posición del espacio para garantizar la máxima precisión en el direccionamiento.

PALABRAS CLAVE: consolidation, geodetic control, geodetic instruments, replanteo, laser, drill.

INTRODUCCIÓN

Durante los trabajos de restauración del puente histórico de Serranos de la Ciudad de Valencia edificado en el año 1518, y en concreto, para la consolidación estructural de los dos últimos vanos, nº 8 y 9, se estableció la necesidad de situar 12 anclajes internos, que unieran los dos alzados laterales del puente, de parte a parte, es decir en toda su anchura de 11m., para con ello asegurar su estabilización estructural. (Roig, P., 2008, 146-154)

Para ello se proyectó la realización de las correspondientes perforaciones, condicionadas por la materialidad, geometría y deformación de las bóvedas de los citados vanos, lo que supuso la necesidad de fijar de antemano los puntos de entrada (aguas abajo), y de salida (aguas arriba), de las perforaciones. (Boquera, A.M., 2007, 497-505)

OBJETO

El objetivo del trabajo que se expone en el presente artículo, se corresponde con la determinación del sistema de ajuste topográfico mas adecuado, para conseguir realizar las perforaciones señaladas, con una precisión tal que las posibles desviaciones en el extremo de salida, es decir a 11 m de distancia, fueran en horizontal, inferiores a la mitad del radio de la perforación, esto es < 2 cm., y en vertical inferiores al citado radio, es decir < 4 cm.

Como dato de partida de especial relevancia, cabe decir que la geometría del puente y la disposición de los andamios para los trabajos de restauración en curso, no permitían observar el punto de salida de la perforación, desde su punto de entrada. Por ello, se planteó la necesidad de diseñar un procedimiento de trabajo sencillo de modo que el operador de la perforación pudiera controlar la ejecución del taladro, desde el primer momento en el que fija

la máquina de taladrar al puente, realizando a continuación la perforación en la dirección correcta para que su salida se realice por el punto previsto, pudiendo en todo momento controlar que en el proceso de rotación y empuje del sistema no se están produciendo desviaciones superiores a las admisibles.

Otro dato de partida de interés, se corresponde con el tipo de máquina perforadora por rotación utilizada, la cual se desliza en una determinada dirección, apoyándose en un vástago-guía de tan solo 1m de longitud, de forma que para conseguir perforar los 11 m de distancia, se van añadiendo elementos intermedios roscados, de 8 cm de diámetro, y 50 cm de longitud. Ello, lleva consigo que solo debido al peso propio del taladro de 11m (22 elementos de 50cm), la flecha real en la punta del voladizo del mismo, sea superior a la desviación máxima admitida < 4 cm

Por todo ello, el diseño del método de actuación, debía tener en cuenta todos estos condicionantes, asegurando la precisión del sistema, de forma que el punto de salida de la perforación se mantuviera centrado en la correspondiente dovela de piedra del arco que forma el límite externo de la bóveda del vano.

ANTECEDENTES

El método mas sencillo e intuitivo de orientar la dirección del taladro requiere dos operaciones, dirigir el taladro y nivelar esa dirección. Para dirigir el taladro necesitaremos dirigir el soporte-guía de la máquina perforadora, con la ayuda de un instrumento topográfico, observando simultáneamente el soporte y una plomada situada al efecto en el punto de salida del taladro.

Este procedimiento tiene como inconveniente no permitir la comprobación continua de que no hay variaciones en la dirección del soporte durante el proceso de empuje y rotación. Por otro



Imagen 1 Muro de calibración durante el primer taladro y equipo topográfico.

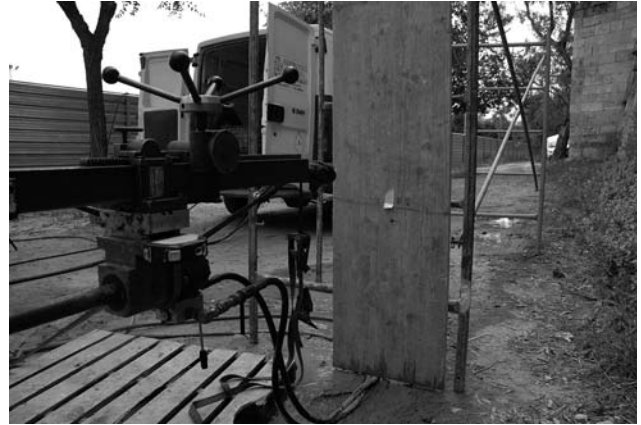


Imagen 3 Taladro con el colimador de laser apuntando a la señal.



Imagen 2 Taladro con el colimador de laser.



Imagen 4 Salida de la perforación para la calibración del sistema.

lado disponer la estación topográfica sobre el andamio, no resulta estable y apuntar a una plomada al otro lado del puente puede resultar complicado cuando el andamio interfiera en la dirección de puntería.

Si obtenemos por cálculo la pendiente que debe tener el taladro podremos dirigir la pendiente del soporte del taladro con la ayuda de un nivel de calidad. Esto tiene como inconveniente que no tiene en cuenta la caída del taladro en punta (flecha), que no es lineal con la distancia. Además no permite tener comprobación continua de que no hay variaciones en la dirección del soporte durante el proceso de empuje y rotación.

METODOLOGÍA

El método diseñado dispone de las siguientes características: se sitúa solidario al soporte de perforación un emisor de láser, de modo que se encuentre sensiblemente alineado con el soporte o el sistema de perforación (apuntando en dirección contraria a la dirección de perforación, es decir hacia atrás). Este alineador de láser servirá para alinear el taladro apuntando hacia un punto previamente replanteado sobre un panel vertical, situado a una distancia entre 7 y 10 m. del puente para que la alineación sea precisa (a esa distancia la señal se observa con claridad así como el puntero de láser). En cualquier momento se puede encender el alineador de láser y comprobar si el avance de la perforación continúa según lo previsto.

El sistema requiere una calibración que compruebe la geometría del taladro así como su efecto sobre la perforación realizada. Para ello, se construyó ex profeso en la obra un banco de ensayos, consistente

en un muro de 11 m. de longitud, 1 metro de altura y 50 cm. de anchura.

Lo importante era realizar la calibración del sistema y comprobar su precisión, en relación con la dirección de la perforación, por lo que no era preciso reproducir exactamente las mismas condiciones de materialidad que tiene el puente. Por ello, y por cuestiones de eficacia, tiempo y economía, se realizó el banco de ensayos con fábrica de ladrillo macizo tomado con yeso, disponiendo en la cabecera del mismo, una losa de piedra de la misma cantera que la que conforma el puente, de forma que pudiéramos verificar si existía alguna cuestión reseñable a la hora de anclar la máquina e iniciar el proceso de perforación.

Se hace necesario, para conocer la geometría del conjunto, conocer las coordenadas de dos puntos en el sistema de perforación y otros dos en el sistema de alineación. Como ambos sistema son solidarios, en cualquier momento o en cualquier perforación, entre la posición calibrada y la posición real solo hay traslaciones y rotaciones. Para ello se realizaron varias perforaciones de prueba sobre el muro con el alineador de láser instalado y mediante la utilización simultánea de 2 equipos de topografía se midieron simultáneamente las coordenadas del punto de entrada del taladro, el punto de salida del taladro, el punto de emisión del láser y un punto proyectado por el láser alejado de este mas de 7m. (IMAGEN 3; 4 y 5)

Denominando: (X_0, Y_0, Z_0) las coordenadas del punto de entrada;

(X_1, Y_1, Z_1) las coordenadas del punto de salida; (X_3, Y_3, Z_3)



Imagen 5 Fin de la última prueba con salida del taladro por el punto previsto. Se pueden ver otras perforaciones diseñadas en pruebas anteriores.



Imagen 6 Base de replanteo aguas abajo.

las coordenadas del punto de emisión del láser; (X_4, Y_4, Z_4) las coordenadas de un punto en la trayectoria del láser.

Considerando el vector que parte del punto de entrada del taladro y termina en cualquier otro de los tres restantes, la relación en cualquier posición de perforación tiene el mismo tamaño por lo que solo hay una rotación. Una matriz de rotación se puede expresar en función de tres giros en el espacio según los tres ejes coordenados:

Sin embargo podremos suponer que ya que el taladro se fija

$$M_R = \begin{pmatrix} \cos g \cos b & -\text{sen} g \cos a + \cos g \text{sen} b \text{sen} a & \text{sen} a \text{sen} g + \cos a \text{sen} b \cos g \\ \text{sen} g \cos b & \cos g \cos a + \text{sen} a \text{sen} b \text{sen} g & -\text{sen} a \cos g + \cos a \text{sen} b \text{sen} g \\ -\text{sen} b & \text{sen} a \cos b & \cos a \cos b \end{pmatrix}$$

siempre verticalmente la rotación (**a**) en la dirección del taladro es despreciable existiendo solo rotaciones en las direcciones

perpendiculares al eje del taladro (**b** y **g**). Para simplificar los cálculos conviene que el eje Z sea vertical, situando el eje X en la dirección horizontal contenida en el plano del eje del taladro, siendo el eje Y siguiendo el triedro directo. Según esto podremos

suponer que solo hay rotaciones según los ejes Y o Z (**b** y **g**), simplificándose la ecuación:

Si le colocamos como subíndice una c a las coordenadas de la posición calibrada, y una t a las coordenadas en proceso de taladro, la relación entre la posición calibrada y la posición del taladro nos lo

da la ecuación indicada a la derecha del párrafo anterior.

$$M_R = \begin{pmatrix} \cos g \cos b & -\text{sen} g & \text{sen} b \cos g \\ \text{sen} g \cos b & \text{sen} b \text{sen} g & \text{sen} b \text{sen} g \\ -\text{sen} b & 0 & \cos a \cos b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{1t} - X_{0t} \\ Y_{1t} - Y_{0t} \\ Z_{1t} - Z_{0t} \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} X_{1c} - X_{0c} \\ Y_{1c} - Y_{0c} \\ Z_{1c} - Z_{0c} \end{pmatrix}$$

Esta ecuación aplicada al punto 1 genera tres ecuaciones con tres incógnitas en las que la segunda y la tercera permiten determinar (

b y **g**) y por tanto la matriz de rotación M. La misma ecuación aplicada a los puntos 3 y 4 ($i=3$ o $y=4$) permiten determinar la trayectoria del láser en el espacio cuando el taladro se encuentre en perforación.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = l \begin{pmatrix} X_4 - X_3 \\ Y_4 - Y_3 \\ Z_4 - Z_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_i - X_{0t} \\ Y_i - Y_{0t} \\ Z_i - Z_{0t} \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} X_{ic} - X_{0c} \\ Y_{ic} - Y_{0c} \\ Z_{ic} - Z_{0c} \end{pmatrix}$$

Obteniendo para $i=3$ el punto de emisión del láser y para $i=4$ un punto en el espacio de la trayectoria del láser. Una vez obtenido para cada taladro las coordenadas del puntero de láser y un punto en la trayectoria del láser la ecuación de la línea recta resulta sencilla en para-métricas:

Cualquier valor de **l** obtiene un punto en la trayectoria del láser, por lo que si queremos uno específico (que tenga una coordenada



Imagen 7 Punto replanteado en el suelo para situar en su vertical la referencia de perforación.



Imagen 8 Haciendo una perforación en el puente.



Imagen 8 Perforación en el puente.

Datos de la calibración.				Distancia entre estaciones			
Taladro				Láser			
Xo= 0.2160	X1= -11.6440	X3= 0.2290	X4= 7.0550	12.831			
Yo= -2.1850	Y1= -2.6110	Y3= -2.3300	Y4= -2.1800	99.9812			
Zo= -0.5790	Z1= -0.7040	Z3= -0.4800	Z4= -0.3470	Dif cota 0.004			
Vxo1 -11.8600		Vxo3 0.0130	Vxo4 6.8390				
Vyo1 -0.4260		Vyo3 -0.1450	Vyo4 0.0050				
Vzo1 -0.1250		Vzo3 0.0990	Vzo4 0.2320				
Ori -3.105689	Niv= -0.010532	Ori -1.481380	Niv= 0.597198	Ori 0.000731	Niv= 0.033910		
Dis xy 11.867648		Dis xy 0.145582	Dis xy 6.839002	Dis xy 6.839002			
		Dif ori= 1.624309	Dif niv= 0.586665	Dif ori= 3.106420	Dif niv= 0.023378		
Datos de la medición:				Resultados del cálculo:			
Xo= -0.8910	X1= -11.8100	X3= -0.8826	X4= 5.9448	Otro punto..... Elegir X = 6.828			
Yo= -1.8260	Y1= -1.8750	Y3= -1.9713	Y4= -2.0358	X= 6.8280			
Zo= -0.8870	Z1= -1.0110	Z3= -0.7878	Z4= -0.6494	Y= -2.0442			
Vxo1 -10.9190		Vxo3 0.0084	Vxo4 6.8358	Z= -0.6315			
Vyo1 -0.0490		Vyo3 -0.1453	Vyo4 -0.2098	Dxy= 7.1274			
Vzo1 -0.1240		Vzo3 0.0992	Vzo4 0.2376	Horiz= 118.5185			
Ori -3.137105	Niv= -0.011356	Ori -1.512796	Niv= 0.598021	Ori -0.030685	Niv= 0.034733	Vert= 105.6255	
Dis xy 10.919110		Dis xy 0.145582	Dis xy 6.839002	Dis xy 6.839002			
Dif ori	-0.031416	Dif niv	-0.000823	Dif ori= 1.624309	Dif niv= 0.586665	Dif ori= 3.106420	Dif niv= 0.023378

X determinada) basta con calcular θ en la primera ecuación y sustituirla en las tres para calcular (X, Y, Z) (comprobando la X):

Para su aplicación las ecuaciones planteadas anteriormente requieren determinar las coordenadas de los puntos elegidos como entradas y salidas de los taladros. La geometría de los taladros se definió a partir de dos soportes fijos de observación, situados a ambos lados del puente

El soporte aguas abajo sirve para determinar las coordenadas de los puntos de entrada del taladro, dos puntos de referencia en la fachada del puente y seis puntos para transferir coordenadas al pilar aguas arriba del puente. El pilar aguas arriba se sitúa midiendo los seis puntos de transferencia medidos también desde aguas abajo, y permite medir la posición de los puntos de salida de las perforaciones. Para asegurar la repetitibilidad se miden también dos puntos de referencia sobre la fachada del puente.

Se estableció un sistema de coordenadas particular para este trabajo semejante al del taladro, con origen de coordenadas en el pilar aguas abajo y con el eje de las Z vertical y el eje de las X perpendicular a la fachada del puente con la dirección positiva hacia aguas abajo. El replanteo del punto para la alineación del láser en la ejecución de la perforación, se realizó mediante las siguientes operaciones:

- 1.- Situar un panel paralelo al puente, frente al sistema de perforación a mas de 7 m de distancia.
- 2.- Medir la posición (x, y, z) de un punto del panel para conocer la distancia X del panel al puente.
- 3.- Calcular para ese alejamiento X, el punto de concurrencia del láser con el panel.
- 4.- Comprobar topográficamente para ese punto las tres coordenadas (X, Y, Z) del punto calculado de la trayectoria del láser.
- 5.- Calculo topográfico de los datos de observación del punto a replantear.
- 6.- Localización en la estación de los datos de replanteo y puntería con el colimador encendido.
- 7.- Marcado del punto replanteado.

Una vez replanteado el punto en el panel, la perforación puede comenzar, anclando la máquina y orientando el taladro con el láser dirigido hacia el punto del panel.

Para facilitar el cálculo se desarrolló un programa en Excel, que a partir de las coordenadas de los cuatro puntos resultantes de la calibración, calcula para cada par de puntos (entrada y salida del taladro): Coordenadas del puntero de láser; Coordenadas de otro punto de la trayectoria del láser; Ecuación de la recta trayectoria del láser; Elegida la coordenada X, cálculo del punto en la trayectoria; Datos para el replanteo topográfico a partir del pilar aguas abajo.

CONCLUSIONES

Se puede dirigir un sistema de perforación utilizando un proyector de láser solidario con el sistema de perforación, controlando el punto hacia donde apunta el colimador de láser.

Para asegurar la repetitibilidad del proceso es importante la instalación de unos pilares de observación y referencia así como unos puntos de control.

La calibración del sistema requiere la realización al menos de un taladro de prueba, así como la medición de los cuatro puntos importantes del sistema (punto de entrada del taladro, punto de salida del taladro, punto de salida del láser y otro punto alejado en la trayectoria del láser.

El calculo topográfico puede resultar simple para la definición geométrica de las coordenadas de cualquier punto en la dirección del puntero de láser, así como para definir la geometría del replanteo (dirección horizontal, ángulo vertical y distancia geometría o reducida).

La utilización de una estación con colimador de láser facilita el replanteo así como la visión del punto a marcar.

AGRADECIMIENTOS:

El presente artículo se desarrolla en el marco de las investigaciones derivadas de la concesión, por el Ministerio de Educación y Ciencia, del Proyecto de Investigación del Plan Nacional, referencia: BIA 2005-09377-C03-01.

Los autores del presente artículo, desean dejar constancia de su agradecimiento a las personas y empresas que con su colaboración han ayudado al buen fin del trabajo expuesto.

BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA:**Libros**

- A.A.V.V. (1991): *Anchors in concrete, design and behavior*, ACI, Detroit.
- Austin, E. H. (1983): *Drilling engineering handbook*, D. Reidel Publishing, Dordrecht, Holland.
- Bosch Reig, I. (2006): *Intervención en el patrimonio: Análisis tipológico y constructivo. El caso de la Real Capilla de la Virgen de los Desamparados de Valencia*, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Chueca Pazos, M. (1996): *Topografía: Metodos topográficos*, Paraninfo, Madrid.
- Irvine, W. (1980): *Surveying for construction*, McGraw-Hill, London.
- Kennie, T.J.M. (1990): *Engineering surveying technology*, Blackie, Glasgow.
- Lapointe, L. (1984): *Topographie appliquee aux travaux publics, batiments et levers urbains*, Eyrolles, Paris.
- Santos Mora, A. (1998): *Aplicaciones industriales de la topografía*, Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía, Madrid.

Capítulos de libro

Roig Picazo, P. (2008): 'La ricezione della teoria e della prassi del restauro di Cesare Brandi in Spagna. L'esempio dell'Università Politecnica di Valencia', en *A 100 anni dalla nascita di Cesare Brandi. Cesari Brandi Oggi Prime ricognizioni*, ed. Il Prato, Saonara (Pd), 146-154.

Artículos en actas de congresos

- A.A.V.V. (1994): 'In-situ deep soil improvement', en *proceedings of sessions sponsored by Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers in conjunction with the ASCE National Convention in Atlanta, Georgia, October 9-13 1994*, ed. ASCE National Convention (1994. Atlanta), New York.
- Martínez Boquera, A., Alonso Durá, A. y Bosch Reig, I. (2006): 'Análisis del comportamiento estructural de los Puentes Históricos de Serranos y Trinidad en Valencia' en *Preprints 16th International Meeting on Heritage Conservation, Valencia*, 1849-1866.
- Martínez Boquera A., Alonso Durá A. y Bosch Reig I. (2007): 'Structural analysis for the diagnosis of cracking in the Gothic masonry structures of the vaults of Serranos Bridge in Valencia, Spain', en *5ª International Conference on Arch Bridges, Madeira*: 497-505.

English version

TITLE: *Topographic adjustment for the structural consolidation of the Serrano's bridge of Valencia.*

ABSTRACT: *This work presents a system to guide the work of making long perforations whose drill entry points and drill exit points are established, and where accuracy is crucial to obtain a good result for subsequent anchorages.*

Direct guidance methods that allow a control of the system were analysed. However, they proved poorly accurate or did not make continuous verifications possible, and did not allow possible deviations from the drill becoming loose or falling while drilling to be taken into account. The adopted system is an alignment of the drill controls and the topography of the surfaces is reconsidered. The geometry of the drilling and its implementation in any position of the surface is analysed to ensure maximum accuracy in the drilling direction.

KEYWORDS: *consolidation, geodetic control, geodetic instruments, reconsideration, laser, drill.*