

La técnica de cimentación de puentes hasta el siglo XVIII

Francisco de Asís Ramírez Chasco

La descripción de los métodos de cimentación empleados en la construcción, en general, y en los puentes en particular, no es un tema que habitualmente se trate en la bibliografía de los autores clásicos con el detalle que la trascendencia de su función requiere. No obstante lo dicho, son muchas y muy bellas las construcciones realizadas que han perdurado hasta nuestros días constituyendo un patrimonio magnífico que todavía puede sorprendernos y deleitarnos.

En los párrafos que siguen, se tratará de dar una visión general del estado de la técnica de cimentación hasta el siglo XVIII, analizando algunos textos que, bien por la trascendencia de sus autores o por su marcado carácter recopilatorio, ilustren convenientemente el tema tratado.

En primer lugar, nos referiremos a Andrea Palladio, y en concreto a su obra *Los Cuatro Libros de Arquitectura*, publicada en 1570, cuya amplia repercusión ha trascendido a su propia época.

En el Primer Libro, incluye un capítulo, concretamente el VIII, dedicado a la cimentación de edificaciones. En él, Palladio hace algunas apreciaciones que no pasan de ser indicaciones elementales y poca luz arrojan sobre el estado de la técnica de las cimentaciones en su época. Se encuentran, no obstante, apreciaciones que de alguna manera intuyen el concepto de «tensiones admisibles en el terreno»: así, se indica que «los cimientos deben ser el doble de anchos que las paredes que soportan y se deberá tener en cuenta la calidad del terreno y la magnitud del

edificio, haciéndolos todavía más anchos en terrenos movedizos ...».

Se repite pues el concepto de cimentación que ya se halla en los escritos de Vitruvio y de Alberti tal y como expone detalladamente el profesor Antonio Castro en su trabajo *Historia de la Construcción Medieval*.

En el Tercer Libro, Palladio dedica varios capítulos al tema de los puentes, concretamente del IV al XV. La mayoría de ellos son puramente descriptivos y se refieren fundamentalmente a la composición y proporciones de la parte del puente por encima de la cimentación.

Quizá se podría decir que la mayor aportación de Andrea Palladio a la construcción de puentes se centra en la invención y aplicación de la *celosía* como método de ejecución de tramos de puente con luces importantes a partir de elementos estructurales de pequeño tamaño. No parece que la construcción de la cimentación de sus obras fuera algo que mereciera particular interés para este autor.

Siguiendo con esta visión cronológica, es preciso significar las aportaciones de Vincenzo Scamozzi a quien puede considerarse continuador y divulgador de las ideas de Palladio, autor del libro *L'Idea dell'architettura universale*, publicado en 1615.

Scamozzi trata con mayor detalle el tema de las cimentaciones, y describe cuatro formas diferentes para su ejecución.

La primera, encerrando el espacio en el cual se quiere construir la cimentación por medio de diques

hechos de estacas hincadas hasta llegar a suelo consistente, en dos hileras bien cerradas y atadas mediante riostras, rellenando posteriormente el entredós con creta o con otro terreno impermeable. Después de lo cual es preciso vaciar el agua de dentro y excavar la cimentación según el tipo de terreno, pilotándolo incluso si fuera necesario, para asentar los muros de los cimientos. Comenta Scamozzi que este método no es adecuado más que para construir sobre los ríos que no son ni demasiado rápidos ni demasiado profundos. Este sistema de cimentación también se explica en la Obra de Juanelo Turriano *Los Veintiún Libros de los Ingenios y Máquinas*, de donde se reproducen las figuras 1 y 2.

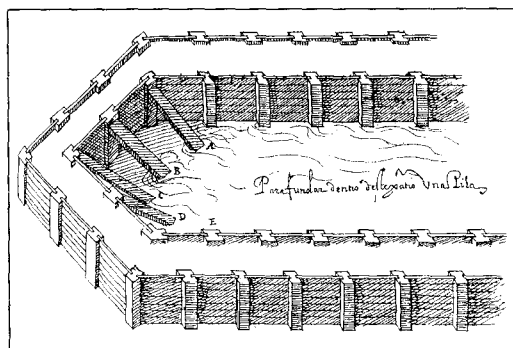


Figura 1

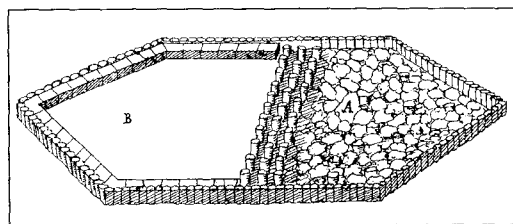


Figura 2

La segunda se realiza construyendo los cimientos sobre emparrillados o almadías de madera de roble, resistentes y bien atados, mantenidos sobre la superficie del agua con cables o máquinas. La cimentación se construirá con gruesas piedras de mampostería re-juntadas con mortero de cal, puzolana o cemento.

Posteriormente, se descienden con los mismos cables y máquinas a plomo hasta el fondo del agua. Este método, comenta Scamozzi, se había venido empleando desde tiempos del Emperador Claudio en el Puerto de Ostia y como Draguet Reys hizo en Constantinopla en la hermosa mezquita que construyó en el mar. El procedimiento exige, a su criterio, un fondo uniforme y bien agregado.

La tercera consiste en hacer circular, toda, o la mayor parte del agua del río, por cualquier otro lugar, sea habilitándole otro lecho o dejándole caer en fosas profundas. En este caso, es preciso tomar, dice, grandes precauciones, tener todos los materiales dispuestos, y un gran número de obreros que pueda tener suficientemente avanzada la obra en poco tiempo, con el fin de que la mampostería haya hecho buen agarre y esté suficientemente asegurada, antes de que esté obligado a reconducir el río a su cauce original.

La última, que es la que él cree que utilizó Trajano para la construcción de un puente sobre el Danubio, consiste en excavar un nuevo lecho cortando un meandro o rodeo del río y construir el puente en seco en este lugar. Cuando está bien asegurado, abrir el tramo a la corriente por sus dos extremos, cerrando con fuertes diques el primer lecho, por el que el río discurría desviándose de su cauce original. Esta forma, dice, es la más segura de todas.

En este repaso histórico es interesante incluir las aportaciones de Blondel al tema de la cimentación de puentes. Particularmente interesante es el caso que se cita de este autor relativo al puente de Xaintes sobre el río Charante que tuvo que reconstruir: El antiguo Puente cimentado sobre pilotes en terreno arcilloso fue derribado. Al analizar las causas del fallo de la estructura se encontró que el hinchamiento del terreno había producido el remonte de los pilotes, siendo ésta la causa del colapso de la obra. Se comprobó cómo algunos pilotes debido al hinchamiento de la arcilla sobresalían más de un pie por encima de la rasante de los otros.

La solución adoptada consistió en excavar 7 pies el lecho del cauce, resguardando todo el espacio de actuación mediante un dique construido al efecto. Una vez que la excavación llegó a la cota prevista, se colocó un emparrillado formado por maderos de roble de 12 a 14 pulgadas de grosor colocados a escuadra y dispuestos a hueco-macizo. Este emparrillado se extendió no solamente al enclave de las pilas sino también al hueco de los arcos.

Los cajones del emparrillado se llenaron de mampostería y se cubrió la parte superior con maderos de 5 a 6 pulgadas de espesor, bien clavados por todo el emparrillado. Posteriormente sobre este cajón, se construyó una cimentación de piedra de 5 pies de espesor. Es sobre esta plataforma de 5 pies de espesor a partir de la cual se levantaron las pilas, que en el primer año únicamente fueron elevadas hasta la altura de las impostas, con el fin de que durante el invierno pudiera consolidarse todo el conjunto.

Gautier publica en 1716 el primer *Tratado de Puentes* del que se tiene constancia histórica; dicha obra que tiene un afán didáctico y un interés compilatorio innegables, supone un esfuerzo para reunir en un texto el conjunto de conocimientos de la época sobre todas las disciplinas que convergen en la construcción de puentes. En la obra se intercalan las indicaciones de carácter teórico con casos prácticos en los que el autor intervino o tuvo constancia documentada de los mismos. Específicamente el tema de las cimentaciones, Gautier lo aborda del siguiente modo:

Si el fondo sobre el que apoyan las pilas es consistente, se debe nivelar y colocar encima la mampostería encajándole algunas pulgadas, si el tiempo y los agotamientos lo permiten. Se colocará después la primera hilada de sillares, así como todos los paramentos, hasta la altura de las aguas más bajas, donde normalmente se inicia el nacimiento de las bóvedas. El resto de la obra será construida siguiendo el Arte, con los materiales que la región pueda abastecer, sea mampostería, sean guijarros, o bien ladrillo. Con todos ellos se puede componer con orden un cuerpo de Puente perfectamente bello y sólido.

Si el fondo que se ha despejado no tiene la consistencia adecuada y se decide cimentar las pilas del Puente con emparrillados, grupos de pilotes de relleno y de ribeteado y con tablestacas entre pilotes, todo este armazón de madera, que debe estar preparado, deberá ser colocado sin demora, para minimizar la necesidad de agotamientos que incrementan los costes previstos en presupuesto.

En los casos en que el terreno sea de baja consistencia, Gautier indica como procedimiento de cimentación el representado en la figura 3.

Representa el Plano de una cimentación en emparrillado, con sus pilotes de relleno 1, 2, 3, 4 hasta un número de 41, y con pilotes de revestimiento con ranura y tablestacas, desde el nº 42 hasta el 76 inclusive. Este

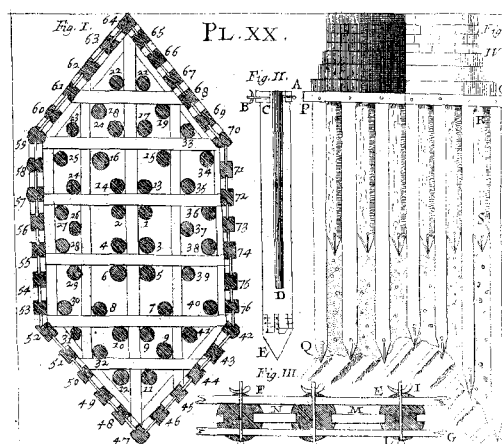


Figura 3

emparrillado en cimentación será más o menos largo y ancho, según la base que tenga la cimentación.

Se advertirá que cada celda del emparrillado está rellena por lo general con dos pilotes diagonalmente opuestos, que se clavan en mayor o menor medida, según la consistencia del fondo que se encuentre. Este pilotaje de relleno está distribuido de la forma que se indica, guardando el orden con que es preciso hincar los pilotes, comenzando por el centro nº 1, y siguiendo el orden de la numeración, hasta el nº 76; ya que si se comenzara en orden inverso, no se podrían disponer pilotes de relleno en la cimentación, como consecuencia de la compactación originada en el terreno por la acción de los pilotes de borde.

La Figura II muestra a mayor escala, un poste de revestimiento, el modo en que está dispuesto con su casco o refuerzo E, su acanalamiento o ranura CD, para recibir la tablestaca, los largueros y entramados CA, con los cuales se cose la cabeza de los pilotes que se bulonan en AB, y que se atraviesan con pasadores en B, hacia adentro de la obra.

La Figura III muestra aún con mayor precisión el arriostamiento en cabeza de estos pilotes trabados, de forma que los largueros, FE, LG están en el extremo en la cabeza de los pilotes, bulonados en LI y atravesados con un pasador en IE, con tablestacas en su entredós MN, y tal que el espacio entre los largueros y las tablestacas MN es únicamente, o debe ser, de la anchura de las ranuras de dichos pilotes, con el fin de mantenerlos en posición, tal como representa la Figura II, y de modo que las cabezas de los bulones y los pasadores deben ser enzunchados y asegurados a los largueros.

La Figura IV representa en alzado el tajamar de una pila cimentada sobre el emparrillado precedente, con sus pilotes de revestimiento y tablestacas, en la cual se aprecia que todos los pilotes descansan sobre un fondo consistente, como por ejemplo roca en Q, que el Río no ha podido aún socavar por abajo, y que este mismo pilote PQ, ha perforado el lecho de grava, sobre el cual se ha colocado el emparrillado PO. Los pilotes de revestimiento OQ, están sujetos por los largueros OP, y cada uno bulonado en cabeza como se representa en Alzado. Están además provistos de tablestacas en su entredós, hasta S, que es la mayor profundidad de agua que se da en el Río antes de cimentar la pila, y en el cual el espacio SQ, se recarga posteriormente de piedras, cuando el Río llegue a socavar por debajo de S.

Este sistema fue empleado por Gautier en la reparación del puente de Coursan en el Languedoc, que había sido derribado por una inundación hacia el año 1705. Según describe el autor, las ruinas de este puente al caer rellenaron los huecos, y los agujeros que las aguas habían ocasionado socavando las cimentaciones. Estas ruinas emergían por encima de la superficie del agua. Se propuso restaurar este puente. Se hizo, según costumbre, un dique alrededor de la pila que debía soportar la bóveda mayor, de 12 toises de luz aproximadamente. Se efectuaron las excavaciones en este gran dique y se retiraron todos los materiales que se habían desplomado del puente, a fin

de hacer sitio a la nueva obra de fábrica que se debía colocar para construir la pila.

Cuando se estimó que todo estaba preparado para cimentar, se sondeó el emplazamiento de la obra encontrándose en la zona donde debía apoyarse el emparrillado un terreno sin consistencia a profundidades variables que oscilaban de 3 a 4 pies en algunos lugares hasta 15 ó 16 en otros.

Gautier argumentó que cualquiera que fuese la naturaleza del terreno donde debía cimentarse la pila, se podía mediante pilotes, conseguir una obra igualmente estable en todo su emplazamiento. De otro modo, cualquier solución que se tomara, no permitiría cimentar con mayor seguridad, ni terminar la obra en el tiempo previsto. El criterio fue aceptado y la obra se concluyó con éxito.

Un sistema similar se propone para recalzar pilas de puentes cuando es necesario consolidar la cimentación que sufre pérdida de sustentación como consecuencia de la erosión del cauce donde apoya.

En este sentido la figura 4 ilustra suficientemente el proceso y se refiere específicamente a las obras de consolidación llevadas a cabo por Gautier para asegurar las pilas del Puente Nuevo de Toulouse.

Las figuras I, II y III representan las plantas, alzado y obras de consolidación de cimientos, para reparar una pila socavada, que como se acaba de mencionar corresponde a una de las del Puente Nuevo de Toulouse; se aprecia en la Fig. I, que el terreno indicado

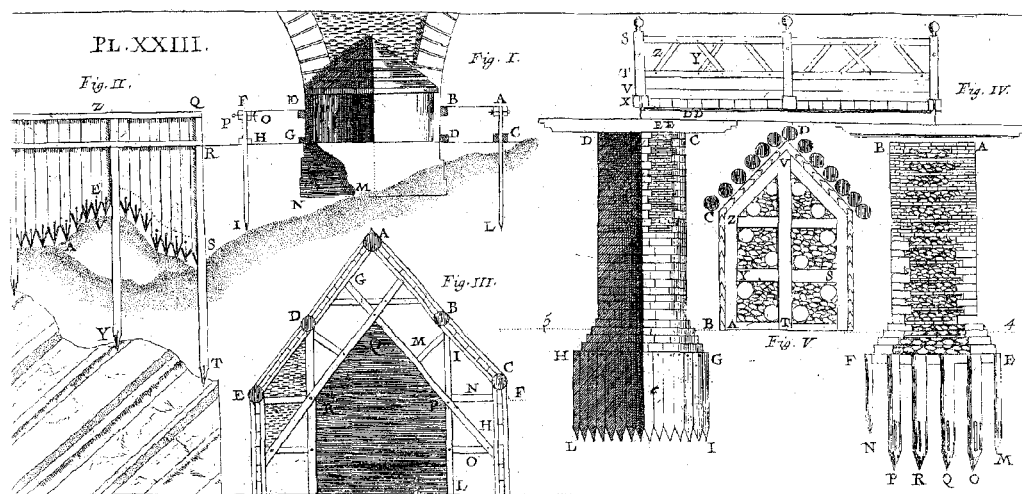


Figura 4

por G M N, había sido arrastrado produciéndose el socavamiento de la pila por la corriente de las aguas, de forma que la zona M N quedaba descalzada.

De manera que para reparar esta obra, se proyectó alrededor de la pila QPR, Fig. III, el entramado de madera E, D, A, B, C, en el cual las tablestacas están indicadas en la Fig. I por IF y LA; en alzado (Fig. II), por CQ y BES; los pilotes en planta (Fig. III), vienen representados por E, D, A, B, C. Todo este conjunto se elevaba hasta una altura aproximada de 3 pies por encima de las aguas más bajas (HC, Fig. I).

Posteriormente se rellenó de mampostería a fondo perdido el espacio comprendido entre EF y NI (Fig. I). Como esta mampostería quedaba retenida por las tablestacas que descansaban en la arena o en la grava, se rellenaba el socavamiento GMN, impidiendo que el Río pudiera excavar por debajo como había sucedido anteriormente.

Las Figuras IV y V, representan 1ª, Fig. V, parte de la planta de una pila con emparillado V Z Y S T, complementado con pilotes de relleno en las celdas del emparillado, tablestacas acopladas en bisel entre sí mediante ranuras AB, CZ, y rematada con pilotes de ribeteado en cabeza CD. La Fig. IV, representa en

sección el mismo plano de pila, donde el emparillado se define por EF, el pilotaje por P, R, Q, O, las tablestacas de borde por FN y EM.

Por último, se aprecian los distintos materiales que se emplean para construir las pilas y paramentos. Normalmente se empleaban sillares hasta la cota de avenidas; siguiendo por encima con ladrillo y sillares en los ángulos. Por último, en el interior de la obra, en el perfil AB, se ven diferentes capas e hiladas, unas veces constituidas por lechos de guijarros, y otras veces de ladrillo en aparejo.

Gautier propone aún otro método cuando las cimentaciones de las pilas se han de efectuar sobre roca sana bajo una corriente de agua de modo que no permita el pilotaje. Para estos casos, se empleaba un encajonamiento a guisa de tonel de 8 a 9 pies de diámetro, en el interior del cual se colocaba otro tonel de 3 ó 4 pies de diámetro, de modo que sobresalieran ambos aproximadamente 6 pulgadas por encima de la superficie de las aguas. El conjunto se posicionaba sobre la roca que se pretendía horadar.

En la figura 5 puede observarse, concretamente en la Figura IV, el detalle gráfico del sistema expuesto en los párrafos anteriores.

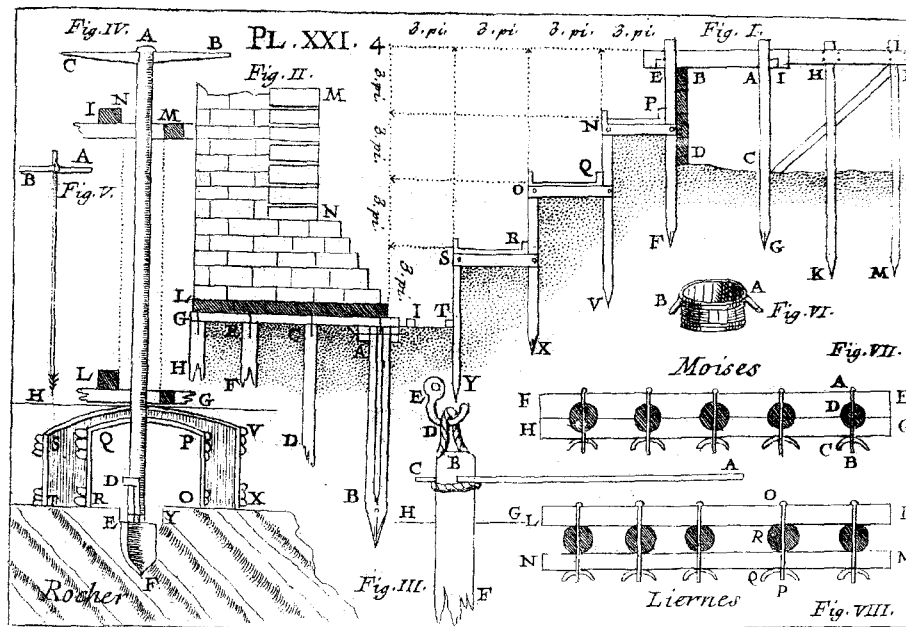


Figura 5

La Figura IV representa un gran taladro, para barrenar una roca EFY, a fin de clavar en ese lugar un pilote por debajo de la superficie del agua HG; la pala del taladro EFY está clavada en D al manguito EA; las manivelas CB hacen girar el taladro accionado por obreros situados sobre el andamio IM, a través del cual el taladro pasa por una abertura practicada entre dos vigas MN; hay otra plancha LG por debajo, muy próxima de la superficie de las aguas HG, por donde se le hace pasar también.

Por encima del macizo rocoso, y alrededor de la pala del taladro, se ve la manera descrita anteriormente que se empleaba para achicar el agua por encima de una roca; se aprecia la cuba más pequeña OPQR, en medio de la cual, cuando su interior es vaciado de agua, el obrero puede horadar con el cincel y el mazo en EFY, y que previamente se aseguraba con la doble gran cuba STVX. El entredós de una y otra STQR, OPVX, quedaba protegido con un relleno de tierra arcillosa.

La Figura I representa en perfil la manera de hacer los diques por niveles, para alturas de diez a doce pies. De modo que si BAL es la superficie de las aguas del Río por debajo de la cual fuera preciso ex-

cavar la cimentación de una pila, o de cualquier otra obra, se colocaba el tirante EL asegurado con las estacas EF, AG, HK y LM. En el espacio AB se montaba el dique ABCD, que se aseguraba en cabeza con una travesa o tirante EBAI. Se le entibaba en BD y AC rellenando el espacio ABCD, de tierra arcillosa hasta el fondo de grava CD.

Gautier indica además en su Tratado otros métodos de cimentación, que ilustra con ejemplos, entre los cuales incluiremos brevemente los siguientes:

En la Ciudadela de Nimes, una esquina de altura «muy considerable» se cimentó mediante escalonamientos, ahorrando con ello una buena suma de dinero (figura 6).

Este mismo método se puede aprovechar para construir los estribos de un Puente en los casos en que las orillas de los Ríos donde deben ser proyectados, presenten disposiciones del terreno suficientemente seguras y favorables para aguantar todos los empujes de las bóvedas. De este modo cuando se encuentre roca, se puede simplificar y no hacer más que un paramento sirviéndose de la propia roca como estribo; esto ahorra los grandes espesores de mampostería que se estaría obligado dar a los Puentes en estos lugares.

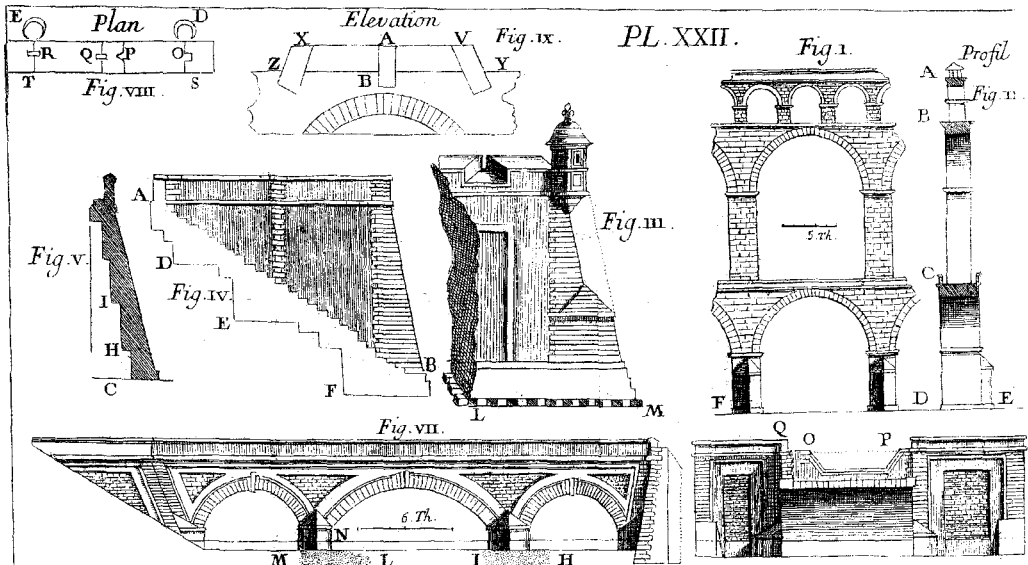


Figura 6

En la figura 6 se destacan los detalles relativos a los siguientes aspectos: la Figura III, representa un cuerpo de construcción, como por ejemplo la fachada de un baluarte, cimentado exclusivamente sobre un emparrillado BLM, en cuadrícula a hueco y macizo esto es, con separación igual al ancho del tablón. La Figura IV, representa un ángulo de una muralla, o de cualquier otro tipo de obra en general, construido en escalera sobre una rampa AB, de modo que se ha economizado en las cimentaciones escalonando el desmonte del terreno natural AD, DE, y EF. Este es el método que Gautier empleó en la Ciudadela de Nîmes La Fig. V, representa el perfil de un lienzo de muralla en la misma Ciudadela, donde se ahorró cerca de la mitad de la mampostería, construyendo contra roca (interior del perfil IHC).

A través de esta exposición puede concluirse que ya en esta época se conocían y practicaban la mayor parte de los métodos de cimentación empleados en la actualidad (pilotes, cajones, cimentación a fondo perdido, etc.), si bien era la experiencia, la intuición y el

ingenio las premisas básicas a la hora de decidir y dimensionar el sistema de cimentación más adecuado a cada caso. Evidentemente tendría que desarrollarse la ciencia de la mecánica de suelos y de la resistencia de materiales así como el cálculo diferencial para poder abordar el cálculo y dimensionamiento de este tipo de obras de un modo científico.

BIBLIOGRAFÍA

- Castro Villalba, A.: *Historia de la Construcción Medieval*. Ed. UPC, 1996.
- Gautier, Hubert: *Tratado de Puentes*. París, 1716.
- Palladio, Andrea: *Los Cuatro Libros de la Arquitectura*, 1570.
- Scamozzi, Vincenzo: *L'Idea dell'architettura universale*, 1615.
- Turriano, Juanelo: *Los Veintiún Libros de los Ingenios y Máquinas*. II Tomos. Colegio de Ingenieros de Caminos. Ed. Turner. Madrid, 1983.