

## Criterios estructurales de intervención y refuerzo en paños de sillería. Murallas romanas de Zaragoza (Plaza César Augusto).

En el presente documento se propone un criterio geométrico para determinar la necesidad de reforzar los paños de sillar de las murallas romanas de Zaragoza, entre el Torreón de la Zuda y el Mercado Central.

Los paños objeto del documentos son los dos situados entre los tres torreones y los dos extremos, compuestos actualmente por sillares de época romana en su mayoría, contando con piezas complementarias de momentos históricos más recientes que se proyecta retirar para dar homogeneidad al conjunto.

En los casos en los que el criterio geométrico lo indique, se propone emplazar en puntos específicos sillares romanos actualmente descontextualizados.

Se toma como premisa para el establecimiento del estado de cargas que las únicas acciones horizontales que van a ser aplicadas sobre los paños de la muralla van a ser los de la presión dinámica del viento, y que esta se determina según los criterios del Código Técnico de la Edificación (CTE) en su Documento Básico de Acciones (DB-SE-A).



Para establecer la idoneidad del muro frente a la presión del viento se idealiza este como una ménsula con una carga distribuida constante, que genera un momento flector igual a  $M_{f,v} = qD^2/2$  siendo  $q$  la fuerza eólica y  $D$  la distancia desde la sección considerada hasta la coronación del muro.

Este momento flector descentra la carga gravitatoria (vertical) que deriva del peso del propio muro teniendo en cuenta que la densidad de la fábrica de sillería de alabastro se ha considerado como  $\varphi_M = 26 \text{ kN/m}^3$ .

La excentricidad del binomio carga vertical + momento flector provoca que el peso se transmita únicamente en una banda de muro junto a la cara de sotavento, generándose una distribución triangular (o trapezoidal) de tensiones.

Calculando la tensión máxima de dicha distribución se puede comprobar si esta es asumible por la fábrica resistente y por lo tanto si es necesario aumentar el espesor de la sección analizada.

Se toma como valor de tensión máxima admisible  $\sigma_{\max} = 2,00 \text{ N/mm}^2$ .

No se dispone de la estimación por ensayos de la capacidad de los sillares de alabastro que forman la muralla, aunque la resistencia a compresión habitualmente atribuida al material es de entre 5 y 10 N/mm<sup>2</sup> al que se aplica un coeficiente de seguridad de 2.5, aunque se han obtenido únicamente tensiones máximas de 1,32 N/mm<sup>2</sup>, que supondría un FS > 5 en el caso de un “alabastro promedio” despreciando el efecto del mortero.

Puede anotarse que los métodos de dimensionamiento hasta finales de la edad media implicaban que la resistencia a compresión de los sillares era infinita siempre que se mantuviera la carga excentrica aplicada en el interior de la anchura del muro.

Al mismo tiempo las juntas entre sillares deben ser capaces de soportar el esfuerzo horizontal a través de la fuerza de rozamiento entre piezas, por lo que conocida la superficie de contacto, el esfuerzo horizontal y el vertical, se puede calcular el coeficiente de rozamiento mínimo que es capaz de transmitir la rasante.

En cualquier caso este criterio ha resultado menos limitante que el anterior, obteniéndose siempre valores reducidos, por debajo de 0,15 estando este del lado de la seguridad ya que se ha utilizado el valor mínimo viable de peso del muro.

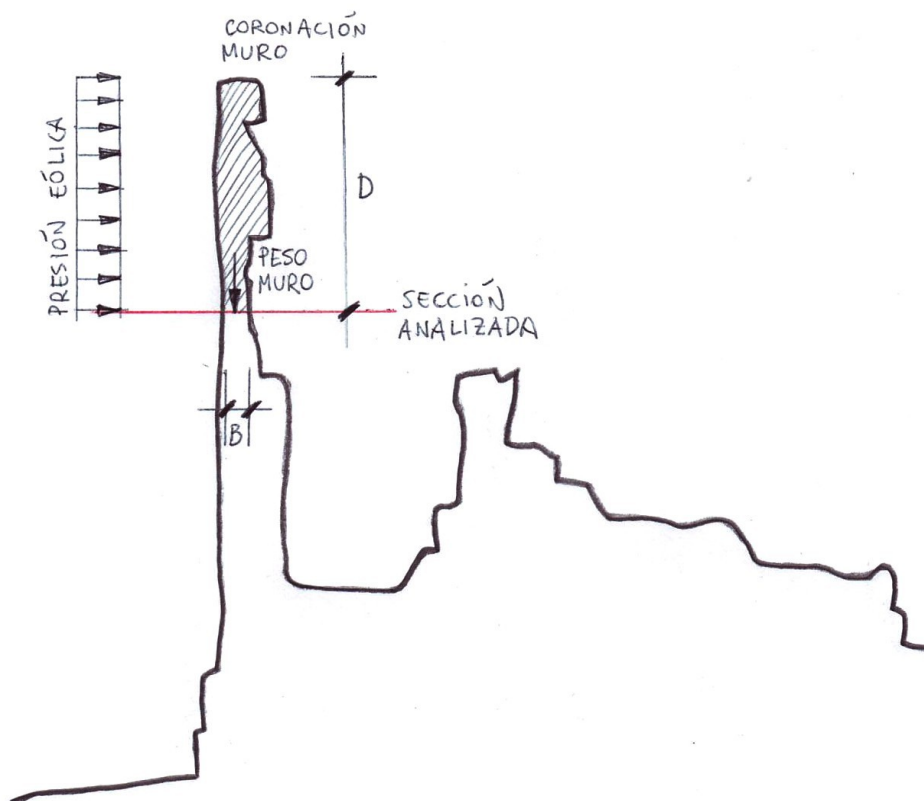
Con estas dos comprobaciones positivas se limita inferiormente el espesor del muro en función de la distancia a la coronación del mismo

En el caso de que el valor, una vez retirados los componentes más modernos, del espesor del muro sea menor del obtenido, deberá aumentar dicho espesor.

El valor a considerar es el promedio en bandas de 1-1,5m de anchura de forma que el hecho de que exista una oquedad puntual que reduzca drásticamente el espesor del muro en esa área no afecta a la estabilidad del conjunto siempre que cuente con zonas de mayor espesor a ambos lados. Esta circunstancia puede darse en juntas entre sillares que hayan tomado una anchura mayor debido a la degradación, a la fractura de un sillar, etc.

En caso de que durante la ejecución no se pueda establecer sin ambigüedad el espesor medio de una banda, se acumulen puntos como los antedichos u otros motivos, se deberán tomar las medidas concretas para su comprobación antes de ser validada la sección.

Cuando el muro, cualquiera que sea su espesor, no haya sufrido alteraciones en los últimos 75 años puede darse por válido dado que se considera que ha sido capaz de soportar las acciones que se le exigirían a lo largo de su vida útil, en aplicación de CTE-DB-SE en su apartado sobre Elementos Existentes al no modificarse ni la naturaleza de las cargas ni su magnitud y mantenerse las características y dimensiones de los elementos resistentes.



Los espesores mínimos que cumplen con los criterios descritos son:

Distancia a coronación (m)	Espesor de muro (m)	Distancia a coronación (m)	Espesor de muro (m)
0,50	0,30	5,00	0,60
1,00	0,30	5,50	0,60
1,50	0,30	6,00	0,65
2,00	0,35	6,50	0,70
2,50	0,40	7,00	0,70
3,00	0,45	7,50	0,75
3,50	0,45	8,00	0,75
4,00	0,50	8,50	0,80
4,50	0,55	9,00	0,85

Para la determinación del valor de las presiones del viento sobre la muralla se ha considerado un grado de aspereza V y una altura máxima de 9m dentro de la zona geográfica B, lo que implica utilizar los siguientes valores:

Coefficiente de exposición  $c_e = 1,20$

Valor básico de la presión dinámica  $q_b = 0,45\text{kN/m}^2$

El coeficiente de presión se toma de UNE-EN-1994-1-4 Eurocódigo Acciones. Viento de entre los correspondientes a Muros autoportantes considerando un grado de solidez  $\phi=1$  y los resaltes de los torreones como contrafuertes que rigidizan los paños de sillar.

Se obtienen

$$C_{p,A} = 2,10$$

$$C_{p,B} = 1,80$$

por lo que se utiliza el valor aplicable en la zona A para valorar la capacidad del muro.

Y por lo tanto

$$q = q_b C_e C_p = 0,45 \text{ kN/m}^2 \times 1,20 \times 2,10 = 1,13 \text{ kN/m}^2$$

Dist a coronación	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50 m
Ancho muro	0,3	0,3	0,3	0,35	0,4	0,45	0,45	0,5	0,55 m
Momento viento	0,14	0,57	1,28	2,27	3,54	5,10	6,95	9,07	11,48 m.kN
Qtramos sup		3,90	7,80	11,70	16,25	21,45	27,30	33,15	39,65 kN
Qtotal	3,90	7,80	11,70	16,25	21,45	27,30	33,15	39,65	46,80 kN
Excentricidad	0,04	0,07	0,11	0,14	0,17	0,19	0,21	0,23	0,25 m
Ancho zona cargada	341	232	123	106	104	114	46	64	89 mm
$\sigma_{\text{máx dist trap}}$	0,02	0,06	0,12	0,16	0,19	0,21	0,28	0,30	0,31 N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{\text{máx dist tria}}$	0,02	0,05	0,15	0,24	0,33	0,38	1,14	1,00	0,84 N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{\text{máx.}}$	0,02	0,05	0,15	0,24	0,33	0,38	1,14	1,00	0,84 N/mm <sup>2</sup>
Coef rozamiento	0,15	0,15	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11

Dist a coronacion	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00	8,50	9,00 m
Ancho muro	0,6	0,6	0,65	0,7	0,7	0,75	0,75	0,8	0,85 m
Momento viento	14,18	17,15	20,41	23,96	27,78	31,89	36,29	40,97	45,93 mkN
Qtramos sup	46,80	54,60	62,40	70,85	79,95	89,05	98,80	108,55	118,95 kN
Qtotal	54,60	62,40	70,85	79,95	89,05	98,80	108,55	118,95	130,00 kN
Excentricidad	0,26	0,27	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35 m
Ancho zona cargada	121	75	111	151	114	157	122	167	215 mm
$\sigma_{\text{máx dist trap}}$	0,33	0,39	0,40	0,41	0,47	0,47	0,53	0,53	0,53 N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{\text{máx dist tria}}$	0,72	1,32	1,02	0,85	1,25	1,01	1,42	1,14	0,97 N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{\text{máx.}}$	0,72	1,32	1,02	0,85	1,25	1,01	1,42	1,14	0,97 N/mm <sup>2</sup>
Coef rozamiento	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08