

LA FORMA DEL HUECO EN LA ESTRUCTURA DE FÁBRICA

Por MANUEL J. FREIRE TELLADO
Arquitecto

Al enfrentarse con una obra de fábrica no cabe pensar en la diferenciación de funciones que ha introducido el mundo industrial —de la mano del método científico— en nuestra consciencia actual y, por ende, en el proyecto de arquitectura. Aproximarse a un edificio de fábrica implica un modo de análisis diferente del que subyace en nuestra forma de pensar contemporánea, acostumbrada a diferenciar y acotar funciones, diseccionándolas de forma independiente unas de otras (1). Por contra, en un edificio de fábrica las funciones estructural, de cerramiento, espacial, aislamiento y acondicionamiento, e incluso la decorativa, se concentran sobre un mismo elemento: la fábrica. Tanto más cuando históricamente el conocimiento de la fábrica residía en un conjunto de reglas sin una justificación precisa, en las que, por citar un ejemplo, consideraciones tectónicas eran enmascaradas dentro de consideraciones geométricas: el dimensionamiento de las pilastras que soportaban una cúpula se basaba en que el área de éstas debía ser al menos el área que la cúpula cubría, sin hacer mención a lo que hoy serían cuestiones obvias: tamaño absoluto, espesor, altura, forma, solicitaciones...

Con estas premisas, el análisis se plantea desde la investigación de los distintos elementos constitutivos de la fábrica, estudiándolos desde los diferentes puntos de vista que nos permite el modelo científico actual. Se obtiene así una imagen global de cada uno de los elementos constituyentes de la edificación, visiones que posteriormente son integradas para elaborar la valoración del edificio como una unidad. Dentro de este ánimo se esbozan estas líneas: un elemento, el hueco —o mejor, la ventana— es estudiada en su forma desde un punto de vista estructural, señalando las mo-

dificaciones trascendentes que su diseño introduce en el comportamiento global del muro. Se entiende así que las reflexiones que se acompañan no pretenden menospreciar el examen del elemento desde cualquier otro punto de vista, sino añadir la visión estructural a las razones de la conformación del hueco.

Se puede definir la fábrica como *una construcción realizada con piezas de piedra natural o artificial, ajustadas —esto es, con juntas intermedias— y generalmente enlazadas por mortero* (2). En la definición aparecen reflejadas propiedades como la discontinuidad del material pétreo empleado —ya que se dispone en forma de piezas más o menos paralelepédicas— y la heterogeneidad —puesto que se emplean al menos dos materiales, las piezas y el mortero, de características diferentes—. Tarea prioritaria de la historia de la construcción fue conseguir que este conjunto de piezas dispares se comportasen como un todo —esto es, como un *continuo*— ante las distintas solicitaciones que aparecerían en la vida de la edificación. Soluciones que a lo largo de la Historia se concretaron en los *opus* romanos, en el muro de sillería, en los aparejos de ladrillo...

Conseguido el trabajo como un «continuo», la forma particular en que se reúnen las piezas y el mortero de unión conjuntamente con la propia heterogeneidad de los materiales y sus características específicas —ambos con escasa resistencia a la tracción— dan como resultado un elemento con un comportamiento muy diferente de acuerdo con la dirección en la que se estudien sus propiedades. Este comportamiento *anisótropo*, con una respuesta altamente condicionada por el tipo de esfuerzo al que se encuentre sometido —gran capacidad resistente a la compresión y muy escasa a la tracción— es consecuencia no sólo de la escasa capacidad del material pétreo para resistir las tracciones sino que se encuentra ligado también con la dificultad de la transmisión de éstas entre las distintas piezas que conforman el muro. Ello se debe al carácter fuertemente *heterónimo* del enlace entre las piezas y el mortero de unión, carácter éste resaltado por la buena transmisión de las compresiones frente a la casi nula transmisión de tensiones de tracción, limitada al valor de la adherencia entre el material pétreo y el mortero de unión. Esta transmisión de tracciones era, para los muros históricos —muy flojos—, no más que un deseo: el sueño de una noche de verano para los arquitectos.

Ello motivó el desarrollo constructivo de ciertas formas y configuraciones que pudiesen eliminar la aparición de tracciones, dando lugar a la consabida arquitectura de la resistencia por forma: el mundo de la compresión, ejemplarizado en los arcos. Se significó en el alto grado de depuración formal y constructiva (3) de los huecos que se plantearon a lo largo de la Historia —foto 0 y 0.A—. Esta constatación da pie a la investigación desarrollada: analizar la repercusión de las características resistentes de la fábrica en la formalización final del hueco, entendiendo que, desde el punto de vista mecánico, la característica fundamental de la fábrica reside en su incapacidad para absorber tracciones.

Para ello se ha planteado el análisis de un lienzo de muro de $5 \times 3 \text{ m}^2$ en el que se ha abierto un hueco pequeño, de 1 m^2 de superficie. El tamaño del muro pretende ser lo suficientemente amplio como para que las perturbaciones de borde no sean muy relevantes (4). En el caso del hueco, su tamaño se corresponde con la exigencia normativa para un dormitorio de 10 m^2 , una estancia típica en una vivienda. Las formas del hueco que se plantean abar-

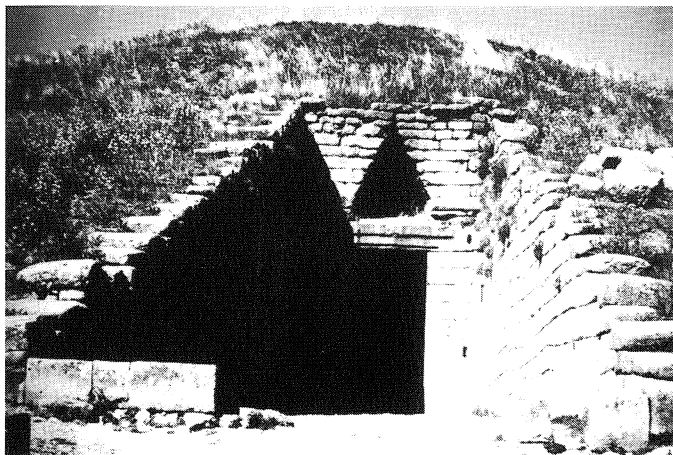


Foto 0



Foto 0 A

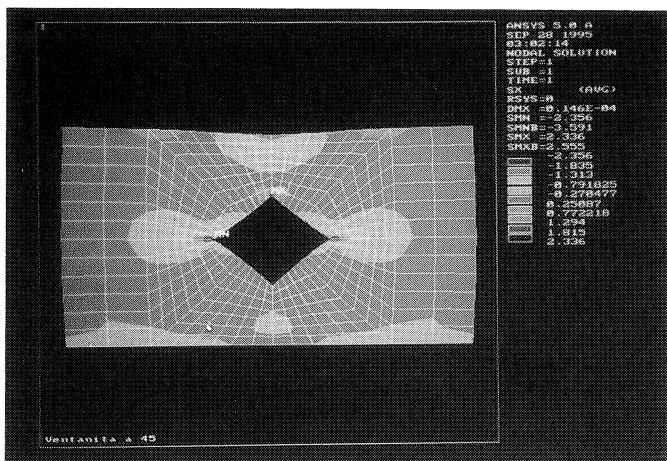


Foto 1

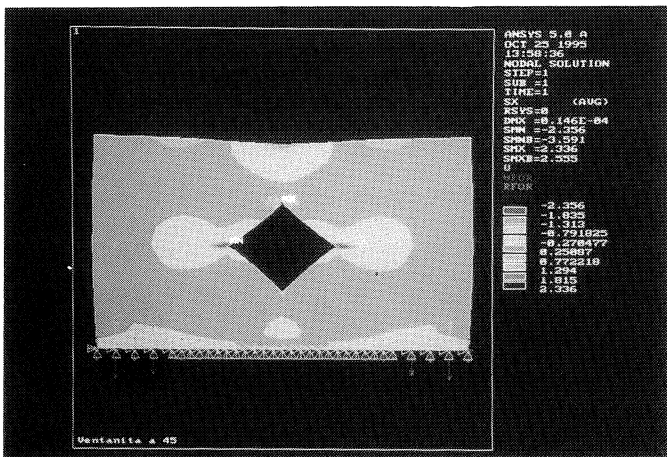


Foto 1.A

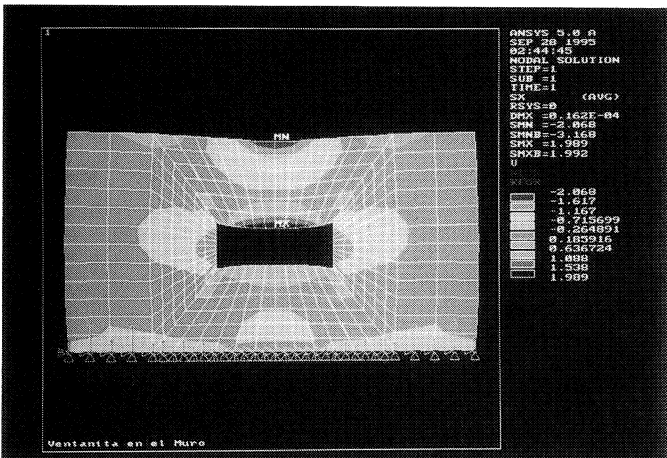


Foto 2

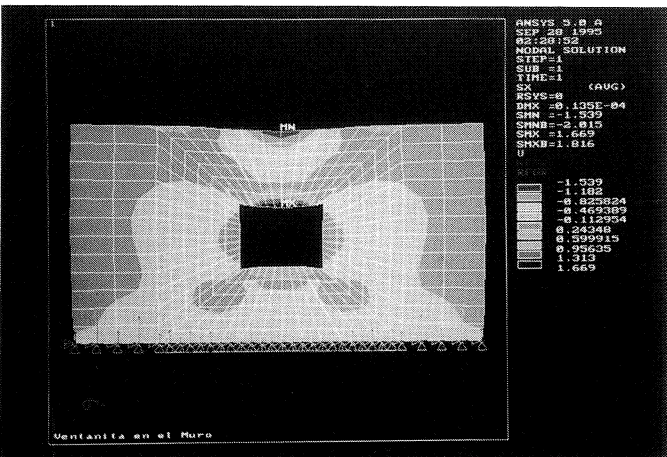


Foto 3

can algunas de la edificación histórica, como la ventana rectangular vertical o el óculo, aportes de la contemporaneidad, como la ventana rectangular horizontal o el modelo construido por Melnikov en su casa —que a partir de ahora designaremos como *Ventana de Melnikov*— (5), utilizando en todo caso la ventana cuadrada como referencia. La investigación ha pretendido analizar formas que pudieran resultar de cierta relevancia —histórica o plástica— desde la perspectiva del momento actual. No están todas las que son, pero sí son todas las que están.

Este muro se ha supuesto solicitado verticalmente con una carga lineal de 1,50 t/m, de forma tal que las tensiones que se reflejan en los gráficos se pueden entender en kp/cm^2 si admitimos un espesor de muro resistente de 10 cm. El valor de la carga se corresponde aproximadamente con el que transmitiría un forjado de viviendas biapoyado de 4,5 m de luz, dimensión razonable en una edificación de fábrica.

El cálculo se ha enfocado mediante el Método de los Elementos Finitos (M.E.F.), desarrollado con el empleo del programa ANSYS 5.0 A. Brevemente se pueden describir las fases del método como (6):

- Se consideran los desplazamientos función de unos parámetros —inicialmente desconocidos— expresando los desplazamientos de todos los puntos de forma aproximada.
- A partir de estos desplazamientos —función de los susodichos parámetros— obtener las expresiones de los esfuerzos, que serán evidentemente aproximaciones a los reales.
- Aplicar la condición de Nulidad del Trabajo Virtual para cualquier deformación arbitraria. Se consigue con la aplicación de esta condición deducir el valor de los parámetros indicados y, por tanto, los valores de todo el modelo.

El M.E.F. se ha utilizado dentro del campo elástico. Esta decisión plantea la dificultad conceptual de la continuidad, isotropía y elasticidad de la fábrica. De acuerdo con las consideraciones expuestas anteriormente, la continuidad queda garantizada mediante el empleo de las adecuadas soluciones constructivas, mientras que las otras condiciones resultan admisibles dado el orden de magnitud de las tensiones que se barajan. En el apartado de elástico, se debe señalar que no se dispone hoy en día de un diagrama Tensión-Deformación aceptado para la fábrica, pese a notables intentos en este sentido (7), por lo que la hipótesis realizada es suficientemente aproximada por la escasa magnitud de las tensiones que se barajan (8).

Antes de entrar en valoraciones comparativas de los resultados, la mera contemplación de los modelos que representan los estados tensionales consecuencia de los distintos huecos —fotos 1 a 6— permite entender la formulación constructiva del hueco en la edificación tradicional. Cuestiones tales como el empleo de jambas, dinteles y alfizares de madera en fábricas de baja calidad —muros de adobe o piedra muy pobre, foto 7—, se explican, desde el punto de resistente, con la concentración de esfuerzos y el tipo de éstos que muestran el cálculo: las tracciones horizontales (S_x) que se desarrollan en dintel y alfizar, el incremento de tensiones verticales de compresión (S_y) que se producen en las jambas, así como la concentración de tensiones que se desarrolla en los vértices justifican el empleo de elementos de mayor resistencia para absorberlas.

Este mismo razonamiento sobre el estado tensional permite entender, desde un punto de vista estructural, las valoraciones de los huecos empleando los recercados —foto 8—: al incremento de las solicitaciones en el borde de los huecos se responde aportando mayor sección de material resistente. Su forma, recercados perimetrales —foto 8— o discontinuos con articulación de los vértices —foto 9—, no es de extrañar tras la evaluación de los resultados obtenidos. Cobran así justificación precisa estas soluciones típicas de la construcción histórica desde el Renacimiento —fotos 8 y 11, Colegio Nuestra Señora de la Antigua, Monforte de Lemos—. Que estos regresamientos de la sección se articulen en composiciones figurativas de distintas índoles es indiferente desde el punto de vista de nuestro estudio.

No es difícil tampoco entender construcciones del hueco como las de la fotografía —foto 10—, con grandes piezas graníticas en los bordes del hueco dentro de un muro de pizarra, ni tampoco de dar explicación a las fisuras que rodean las piezas graníticas de los bordes: dada la dificultad de garantizar la continuidad de la fábrica con un mortero pobre, el enlace entre granito y pizarra resulta insuficiente y el gradiente tensional hace el resto: dibuja la fisura.

Se aprecia asimismo que el conocimiento intuitivo del comportamiento del muro que tenían los constructores populares no encuentra su plena justificación desde el punto de vista resistente, pues es difícil explicar la disposición de piezas de gran resistencia en zonas de escasas solicitaciones, como ocurre en la parte del muro bajo el alféizar.

La revisión de los resultados del análisis del muro con ventana rectangular o cuadrada permite comprender la razón estructural de la solución de óculo sobre hueco rectangular tan grata a los constructores renacentistas —foto 11, Claustro Mayor del Colegio de la Compañía de Monforte de Lemos—, dado el vacío tensional que aparece sobre la ventana rectangular y que resulta claramente apreciable en la representación gráfica de los resultados de las modelizaciones realizadas.

Una comparación de las salidas obtenidas permite establecer algunas conclusiones:

- Es, curiosamente, la ventana cuadrada girada la que muestra un peor comportamiento, con valores tensionales marcadamente más elevados que se concentran en los vértices —foto 1—. Un comportamiento tan claramente desfavorable excluye este modelo de la valoración comparativa que sigue a estas líneas.
- Contrariamente a las loas de Ignacio Paricio (9), la ventana circular no es esa «*perforación perfecta de un lienzo estructural*» en el que «*las cargas se desvían a los lados del hueco para recogerse inmediatamente bajo él*» ni «*la situación mecánica de la sección inferior del muro es idéntica a la superior*», sino que incluso el tradicional hueco rasgado tiene un comportamiento mecánico superior. El óculo presenta los consabidos problemas de clave y riñones, factores de hundimiento de tantos arcos de medio punto —foto 4—.
- Pero es sin duda la intuición de Melkinov —foto 6— la que proporciona los mejores resultados tensionales, que podrían verse incluso mejorados con una pequeña colaboración del vértice superior. ¿Es así tal vez algo menos descabellado el apelativo de *Constructivismo*?

Antes de proseguir con las comparaciones, se recuerda que la fábrica es un material heterogéneo y anisótropo, con una marcada incapacidad para resistir las tracciones, tanto horizontales como verticales. La razón de esta incapacidad reside, como se ha comentado, en que la absorción de tracciones radica exclusivamente en la adherencia del mortero a las piezas, adherencia que como mínimo no se puede considerar muy fiable. Estas consideraciones justifican que en las valoraciones de este estudio se primen las formas que eliminan la aparición de tracciones aunque de ello resulte unas tensiones de compresión más elevadas sobre la fábrica. Asimismo se han considerado como de comportamiento más favorable aquellas soluciones que provoquen un estado tensional lo más uniforme posible sobre el muro.

Desde estas premisas, la comparación —fotos 1 a 6— de las gráficas S_x —que representan las tensiones horizontales que se desarrollan en las distintas soluciones, con signo — para las compresiones y + para las tracciones— permite la clasificación que sigue con un orden de exposición creciente desde la más desfavorable a la más favorable: *Ventana Rectangular Horizontal*, con las tracciones de mayor extensión y magnitud tanto en dintel como en alféizar; la *Ventana Cuadrada* y la *Ventana Rectangular Vertical* arrojan reducciones sucesivas de las tracciones en módulo y extensión. Se ha considerado a la *Ventana Circular* como de comportamiento superior, puesto que si bien se produce una concentración de tracciones de mayor magnitud, su extensión es muy limitada, por lo que constructivamente se pueden englobar dentro de una pieza de clave que evite al mortero la necesidad de soportarlas. Se valora además comportamiento general del muro que provoca este hueco del que desaparecen las ligeras tracciones horizontales de los casos anteriores. Sin embargo, el mejor comportamiento lo presenta la *Ventana de Melnikov* con un punto localizado de tracciones y todo el resto del muro con tensiones horizontales próximas al valor nulo o en todo caso, comprimidas. Estas características han permitido al arquitecto su ejecución sin necesidad de ningún elemento auxiliar, tal y como se aprecia en la foto 12.

Como referencia de la trascendencia de la magnitud de estas tracciones tomemos como ejemplo una fábrica con una resistencia de cálculo de 32 kp/cm^2 —una fábrica de cierta calidad—. La resistencia admisible a las tracciones —considerando el empleo de los morteros actuales de cemento— que para esta fábrica ad-

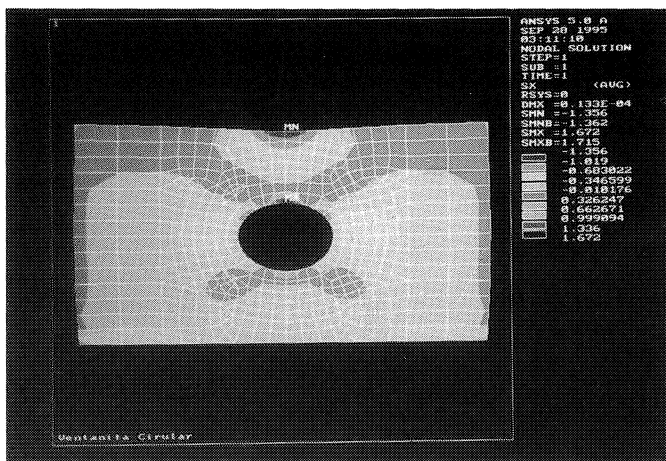


Foto 4

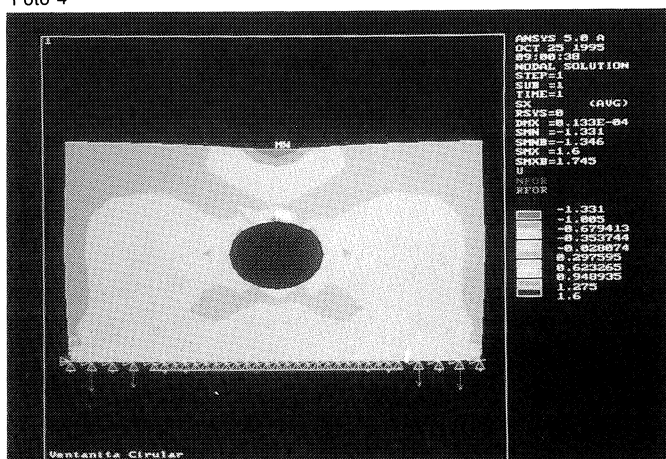


Foto 4.A

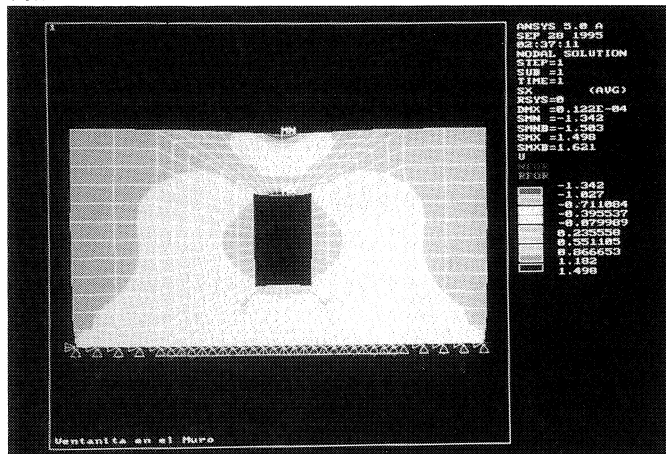


Foto 5

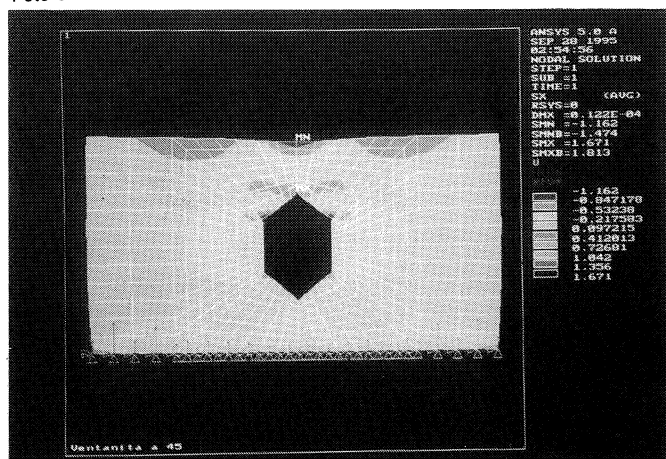


Foto 6



Foto 7



Foto 8



Foto 10

mite FL-90 es de $3,2 \text{ kp/cm}^2$ para cargas mayoradas, por lo que resulta un valor de $1,94 \text{ kp/cm}^2$ para acciones sin mayorar si se emplean los coeficientes de seguridad de la norma citada. Comparase este valor con los valores máximos que resultan de los análisis que se acompañan. Es fácil comprender así la necesidad de cargaderos ya en este tipo de huecos, que tradicionalmente se han resuelto con el empleo de dinteles pétreos de una pieza en la construcción tradicional en piedra. Se observa así que cargas derivadas exclusivamente de un forjado producen tensiones que no resultan admisibles en ciertos casos, obligando al empleo de elementos auxiliares.

En cuanto a las tensiones verticales, S_y , la evaluación de los resultados —de los cuales por razones de extensión no se incluyen los gráficos— ha llevado a la siguiente clasificación, en orden ascendente de conveniencia en el comportamiento: *Ventana Horizontal, Circular, Cuadrada, Vertical y de Melnikov*. La ventana horizontal presenta los valores pésimos en las características analizadas: la mayor concentración de tensiones, máxima tracción en módulo y extensión así como las más amplias diferencias entre las tensiones de trabajo en los distintos puntos del muro. En el caso del hueco circular, la concentración de tensiones alta y el muro con una forma de trabajo muy diferente según las zonas —que provocaría problemas de trabazón de la fábrica— han llevado a su mala consideración en este apartado, si bien elimina casi completamente las tensiones de tracción verticales. La ventana cuadrada es una significativa mejora en los tres parámetros valorados de la rectangular, mejora que se amplía con la ventana vertical. En el caso de la *Ventana de Melnikov*, si bien se produce una concentración de tensiones ligeramente más elevadas que en el caso anterior, se ha primado el comportamiento más adecuado que presenta el muro y las menores tracciones producidas.

Por último, la evaluación de la Tensión Equivalente —concepto que expresa una valoración promediada de las tensiones que se producen en el punto— proporciona una clasificación que se aparta de las anteriores, que podríamos ordenar —en orden creciente— como *Ventana Horizontal, Cuadrada, Circular, Melnikov y Vertical* —no se han incluido los gráficos tensionales por la misma razón que en el apartado anterior—. El comportamiento de esta última explica la disposición de los sillares de granito que conforman los refuerzos del hueco que se observan en los muros de pizarra lucenses —foto 10—.

Desde la primera de las soluciones señaladas, la *Ventana Horizontal*, con zonas de gran concentración tensional y grandes diferencias de comportamiento tensional entre los distintos puntos del muro —junto a zonas muy solicitadas, otras que prácticamente *ni trabajan*—, se produce una mejoría paulatina consistente en la disminución de los valores de las concentraciones de tensiones, así como un funcionamiento del muro más uniforme. Se ha estimado como positiva la uniformidad en el nivel de tensiones de las distintas partes del muro a fin de evitar las roturas producidas por diferencias en las solicitaciones que soportan las piezas.

Se hace la salvedad de que la valoración de este criterio es discutible, por cuanto el muro se comporta como material heterogéneo y anisótropo, por lo cual las distintas tensiones que se desarrollan sobre él no tienen la misma importancia. Se desacredita parcialmente este criterio, que queda desde luego muy por detrás de los dos anteriormente expuestos en la importancia que se le concede en este estudio.

Con ánimo de abundar en las valoraciones apuntadas en las discusiones sobre las tensiones S_x y S_y , se acompaña este artículo de tres conjuntos de gráficos específicos. El conjunto de nombre *Tensiones Horizontales por el Eje del Muro*, corresponde a la representación de la variación de magnitud de las tensiones horizontales desarrolladas en la sección vertical del muro realizada por la mitad de su longitud, para los distintos tipos de huecos estudiados. Este conjunto permite apreciar la eliminación de tensiones de tracción que provoca la solución de Melnikov, pese al hecho de estar realizado el corte por el único punto —el vértice superior— que arroja una concentración de tensiones de tracción, tal como se refleja en la correspondiente gráfica tensional, perteneciente al grupo que refleja las tensiones S_x en alzado.

Para la evaluación de la variación de las tensiones verticales se proponen los grupos que muestran su variación a las cotas 1,50 y 0,00. Estas últimas se corresponden con las presiones transmitidas por el muro y se analizarán en el próximo apartado.

A la hora de analizar las gráficas que muestran las tensiones verticales a cota 1,50, se debe tener presente que a tal cota se

están seccionando los puntos singulares —vértices— de la *Ventana Rotada*, por lo que los valores resultantes —que rozan los 12 kp/cm²— deben ser excluidos de la comparación —véase que esto ocurría también en el caso anterior para la ventana de Melnikov, pero los resultados se mantenían dentro de límites razonables—. Esta reflexión sobre el caso de la *Ventana Rotada* y el afán clarificador ha llevado a proponer la gráfica comparativa filtrada, en la que para mayor claridad se ha eliminado la traza correspondiente a la *Ventana Cuadrada*. Evidentemente, la zona central a tensión nula corresponde al vacío del hueco de las distintas soluciones. Por otra parte, las gráficas resultan lo bastante elocuentes como para no precisar ninguna otra puntualización.

REPERCUSION DE LA FORMA DEL HUECO EN LA MAGNITUD DE LAS REACCIONES TRANSMITIDAS

Los gráficos que se adjuntan corresponden a la magnitud de las tensiones verticales en el punto de contacto del muro con su cimiento. Se han realizado los cálculos para las dos series de modelos estudiados, pero, como puede observarse son significativamente coincidentes, salvo quizás en la zona más afectada por las perturbaciones de borde. Con tensiones en la órbita de 2,40 kp/cm² para la Serie 93 y en el entorno de 2,75 kp/cm² para la Serie 82 se puede hablar de cierta discrepancia, que también arroja unos valores ligeramente más altos en la zona de los riñones para la modelización T. 93 (del orden de 0,10-0,15 kp/cm²). En todo caso, las tensiones transmitidas son más uniformes en el caso de la modelización Tipo 93. Esta comparación se refuerza con la coincidencia de resultados que arrojan las comparativas de ambas series para las tensiones horizontales y para las verticales a cota 1,50.

Si nos referimos a los datos arrojados por la Serie 93 —por ser el error estimado menor—, vemos que la forma del hueco produce variaciones de la tensión de hasta 0,245 kp/cm² sobre un valor mínimo de 0,50 en la zona bajo el hueco —¡casi un 50%!—, variaciones menores en la zona de los riñones —de 0,168 kp/cm² sobre una tensión en el entorno de 1,65 kp/cm²—, la más próxima a la que estaría un muro sin perforaciones —1,50 kp/cm²—, y nuevamente variaciones amplias en la zona de borde —0,465 sobre 2,303 kp/cm²—.

Los modelos analizados presentan un comportamiento bastante similar por parejas: el par de mejor comportamiento es el de la *Ventana Vertical* y la *Ventana de Melnikov*, la zona media estará ocupada por las *Ventanas Circular* y *Cuadrada*, presentando un comportamiento notoriamente inferior el par *Ventanas Horizontal* y *Rotada*.

Es de destacar que el comportamiento del muro implica que la reducción de la tensión en el centro del muro, bajo el hueco, es proporcionalmente mayor —0,50 sobre 1,50; reducción a 1/3— que el incremento tensional que se ha de producir para compensar este efecto —2,75 sobre 1,50; relación 1.83/1—, pero muy aproximados en valor absoluto —aunque ligeramente mayor el incremento sobre la tensión de referencia de 1,50 kp/cm²—. Curiosamente, la disminución de tensiones bajo el hueco se equilibra con un incremento tensional en la zona extrema y no en la inmediatamente adyacente.

Destaca también la gran distorsión tensional que introduce la ventana rotada, hasta convertirse en la que presenta el máximo valor tensional. Pese a ello, se ha considerado como de comportamiento inferior la *Ventana Horizontal*, por ser su gradiente tensional más pronunciado en las zonas centrales.

Este mismo criterio, la uniformidad tensional, ha llevado a considerar superior el comportamiento producido en el muro por la *Ventana de Melnikov* frente a la *Ventana Vertical*, pese a su máximo valor de tensión ligeramente más alto que su rival, por describir una gráfica más tendida —y por lo tanto, sometida a menores tensiones cortantes—. De la misma forma, se ha optado por la *Circular* frente a la *Cuadrada*. Un «ranking» ficticio nos llevaría a la clasificación —de mejor a peor— *Ventana de Melnikov*, *Vertical*, *Circular*, *Cuadrada*, *Rotada* y *Horizontal*. El gráfico anexo permite la comparación entre los valores de las dos soluciones arrojadas como extremas.

CONSTRUCCION DEL MODELO

Las modelizaciones propuestas —que se han dejado visibles en los gráficos de representación de los estados tensionales del muro— se han elegido con el criterio de concentración de elemen-



Foto 9



Foto 11

tos en las zonas en las que se esperaba un mayor gradiente tensional, adecuando la forma de los elementos al estado tensional que resultaba previsible. Se ha formulado así una zona central con una mayor densidad de elementos —elementos de menor tamaño—, ya que en ella se producen las mayores diferencias tensionales, y dos zonas laterales con una concentración más baja para mantenerse dentro de los límites de la versión del programa de cálculo empleada.

En cuanto a la forma de los elementos, se intentó conseguir elementos de tipo cuadrilátero, evitando en lo posible la aparición de elementos triangulares por la disminución de precisión que introducen en el cálculo. Se buscó además que el mallado fuese simétrico, de acuerdo con el aspecto del elemento a estudiar. Se procuró asimismo que la forma del mallado fuese congruente con los resultados obtenidos, lo que obligó a formular diferentes mallados para alguno de los casos.

En todo caso no se admitió ninguna modelización cuya Estimación del Error por Métodos Energéticos superase el 10%. Las distintas estimaciones del error que proporciona el programa se han incluido en la Tabla Resumen final. Esta evaluación del error resultó determinante a la hora de decidirse por la discretización a emplear en la ventana circular, ya que, curiosamente, el modelo que se presenta tiene la estimación de error más baja de entre los considerados.

Para tener en cuenta la influencia de la continuidad de la deformada y de su derivada —continuidad de las pendientes del modelo deformado— se han realizado dos ciclos de cálculos. Una serie de ellos tiene en cuenta únicamente los desplazamientos de los nodos de los elementos (82) mientras que la segunda considera además las rotaciones que sufren estos nodos (93). Los elementos empleados han sido del tipo Isoparamétrico de 8 nodos y 2 grados de libertad por nodo —Serie 82— y el Shell93 de 8 nodos y 6 grados de libertad por nodo —Serie 93— (10). Los resultados de ambos conjuntos de modelizaciones son congruentes, con un escaso margen de variación tal y como se deduce de la tabulación final y de los gráficos de comparativas tensionales que se han efectuado.

En cuanto al valor del Módulo de Young introducido en el cálculo, se han seguido los valores propuestos por FL-90 —ya que es la única norma básica en el mundo de la fábrica en España—, eligiéndose una fábrica de ladrillo de cierta calidad, formada por un ladrillo perforado de 200 kp/cm² tomada con mortero M-80 de plasticidad sograsa, con juntas de espesor inferior a 1 cm. De acuerdo con la norma citada, en estas condiciones la resistencia de cálculo de la fábrica es de 32 kp/cm² —valor aceptable también para ciertos tipos de fábrica de piedra—, con un módulo de Young de 50.000 kp/cm². Sirvan estos datos para la evaluación de los resultados obtenidos.

CONCLUSIONES

El análisis de una estructura de fábrica precisa de una visión multifocal dada las múltiples funciones que desarrolla simultáneamente y el propio universo conceptual de sus autores. Las características de los elementos que componen la fábrica y su amplio uso a lo largo de la Historia han desembocado en soluciones constructivas muy depuradas.

Se explica así que el análisis desde el punto estructural de la forma del hueco permita la explicación de las formas de huecos históricos, de la coherencia de las soluciones decorativas empleadas así como también la justificación de fisuraciones de múltiples tipos que son visibles dentro del patrimonio edificado. Ello es así ya que la forma del hueco se revela trascendente en el comportamiento general del muro, tanto a nivel de las tensiones que se producen en el interior de éste, como en la forma y magnitud de las tensiones transmitidas a los elementos que lo soportan.

En el análisis de un hueco de superficie constante, las formas analizadas, presentadas en orden de comportamiento más o menos favorable han sido: *Ventana de Melnikov*, *Ventana Vertical*, *Ventana Circular*, *Ventana Cuadrada*, *Ventana Horizontal* y *Ventana Rotada*. Dentro de este estudio destacan las características siguientes:

- Resulta reseñable la alta concentración de tensiones que provoca la ventana rotada.
- Las ventanas de forma rectangular provocan tracciones en el dintel y alféizar de cierta extensión y magnitud, claramente dependiente de la luz del hueco. Por ello precisan solu-

ciones particulares para el dintel —piezas enterizas, arcos planos o cargaderos—.

- La ventana circular presenta los consabidos problemas de tracciones en claves y presiones en los riñones.
- La ventana de Melnikov provoca un comportamiento muy uniforme en el muro, introduciendo muy escasas tracciones, que se concentran en el vértice superior. La magnitud de éstas —reducida— y muy limitada extensión —puntual— permiten que sean absorbidas por una pieza de dimensiones pequeñas, por lo que se permite su ejecución sin ningún tipo de elemento auxiliar.

FICHA TECNICA

Programa: ANSYS 5,0 A. Licencia: Departamento Tecnología de la Construcción.

Dimensiones Lienzo: 5,00 x 3,00 m.

Módulo de Young E_x : 50.000 kp/cm²

Coefficiente de Poisson: ν_{xy} : 0,15.

Espesor: 0,10 m.

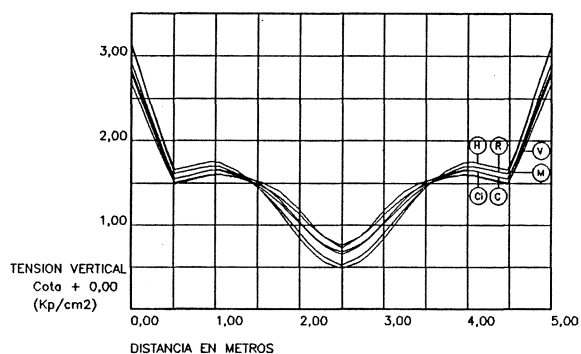
Carga: 1,50 t/m.

Elementos: 8 nodos, 2 g.l. / 9 nodos, 6 g.l.

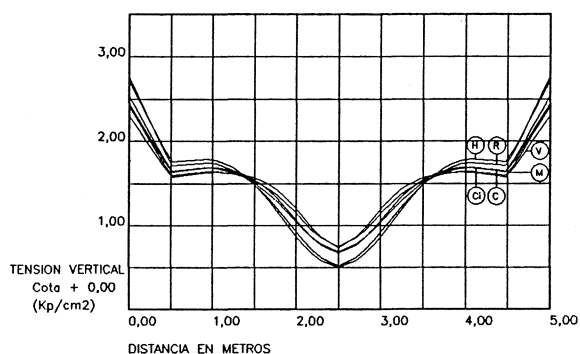
Tamaño Máximo Elementos: Zona Central: 0,25 / Zonas Laterales: 0,50.

- (1) GONZALEZ MORENO-NAVARRO, A.: *Metodología de la Restauración Monumental*. Ponencia englobada en «As actuaciones no Patrimonio Construido: Un diálogo interdisciplinar». Santiago de Compostela, 18-22 Septiembre 1995 —pendiente de publicación—.
- (2) AA.VV.: *Curso de Rehabilitación*. El Cálculo. C.O.A.M.
- (3) Como muestra de ello, véanse por ejemplo:
PALACIOS GONZALO, J. C.: *La estereotomía de la Esfera*. Arquitectura n.º 267, págs. 55-56. Julio 1987.
FREIRE TELLADO, M. J.: «Trazados de monte bajo la escalera del Colegio Nuestra Señora de la Antigua en Monforte de Lemos». Revista «Lucus», n.º 42, págs. 59 a 65. Excma. Diputación de Lugo. Septiembre 1994.
- (3) Para una modelización que estudie temas de interacción entre huecos, véase:
COOK, D.-PEGGRAM, G.: *Analysis of Crack Damage in three Georgian facades in the city of Bath, England, with a simple approach to the repair problem*. Ponencia presentada al Congreso «Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings III». Bath. Junio 1993.
- (5) AA.VV.: *Melnikov: The Muscles of Invention*. Págs. 90 y ss. Ed. Van Hezik-Fonds. Rotterdam 1990.
- (6) CERVERA BRABO, J.: *El Método de los Elementos Finitos*, de «Métodos de Análisis en Teoría de la Elasticidad». Instituto Juan de Herrera. Madrid 1987.
- (7) JENARO GARRIDO, J. M.: *Obras de Fábrica Resistentes. Consideraciones Generales de Cálculo*. Informes de la Construcción, vol. 38, n.º 384, págs. 35-50. Octubre 1986.
- (8) Puede resultar ilustrativa la revisión de las ponencias:
GONZALEZ MORENO-NAVARRO, J. L.: *Análisis Físico-Constructiva del Monumento: Estudios de los materiales, elementos y sistemas constructivos y estructurales. Sus patologías: análisis y experiencia*. CARLUCCIO, GIUSEPPE: *Intervenciones Recientes en el Patrimonio Monumental en Italia*. Ponencias ambas englobada en «As actuaciones no Patrimonio Construido: Un diálogo interdisciplinar». Santiago de Compostela, 18-22 septiembre 1995 —pendiente de publicación—.
y también:
GAMBAROTTA, L.-LAGOMARSINO, S.: *Structural analysis of Roman honorary arches: Constantine's Arch*.
CROCI, G.-CARLUCCIO, G.-VISOVIC, A.: *The structural analyses and restoration projects for the St. Francis, St. Claire and St. Mary of the Angels Basilicas in Assisi*. Ponencias ambas presentas al Congreso «Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings III». Bath. Junio 1993.
- (9) IGNACIO PARICIO: «La forma en la obra de fábrica». Arquitectura n.º 267, págs. 66-75. Julio 1987.
- (10) ANSYS User's Manual. Revisión 5.0. Volumes I and II. Swanson Analysis Systems, Inc.

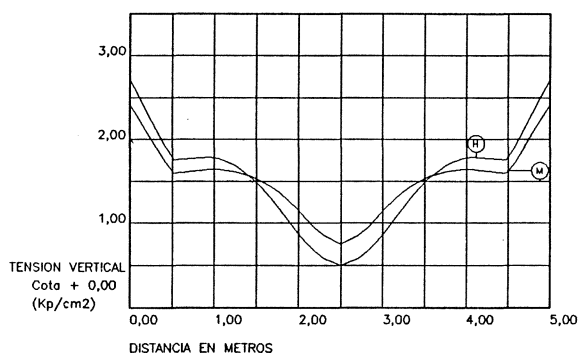
TENSIONES VERTICALES EN LA BASE.



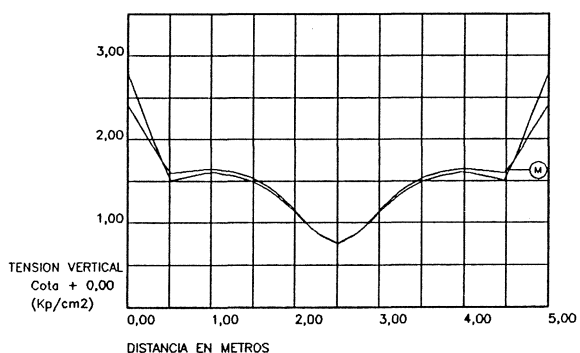
Comparativa de Resultados Serie 82



Comparativa de Resultados Serie 93

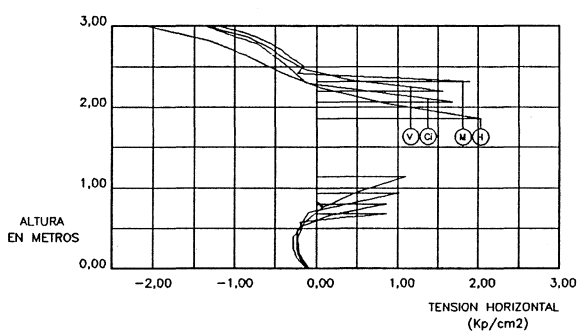


Comparativa V.Horiz./V.Melnikov.

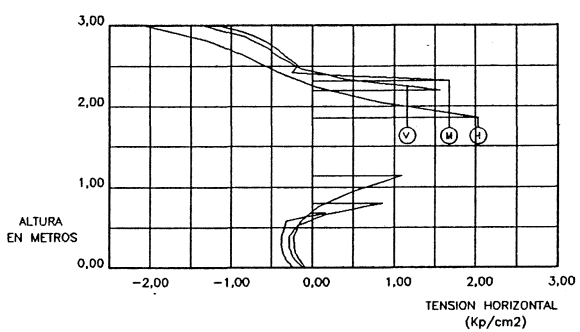


Comparativa V.Meln.82/V.Meln.93

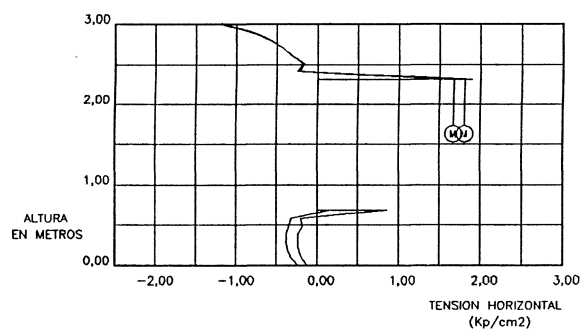
TENSIONES HORIZONTALES POR EL EJE.



Comparativa de Resultados Serie 93.

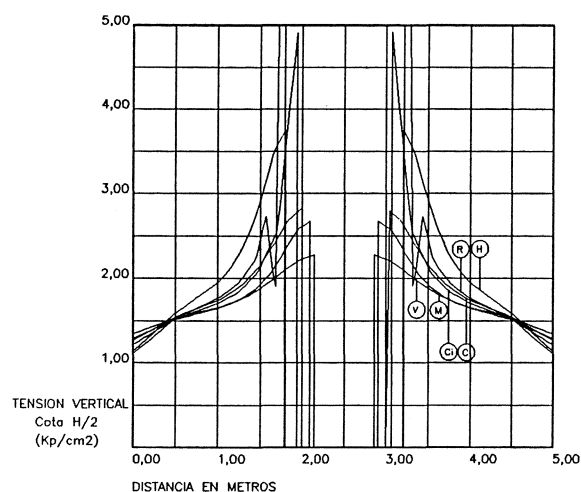


V. Melnikov / Vertical / Horizontal.

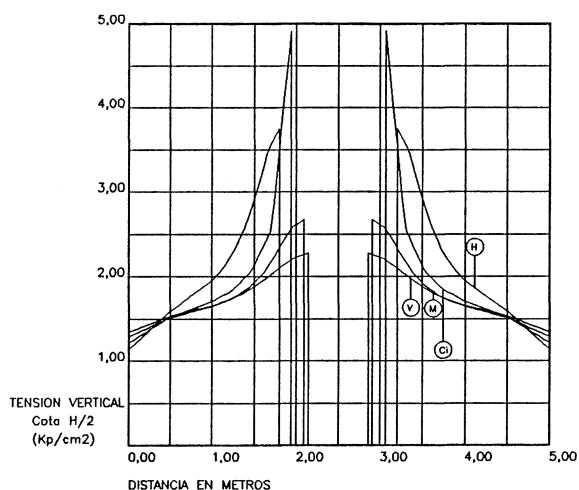


Comparativa V.Melnikov Series 82 y 93.

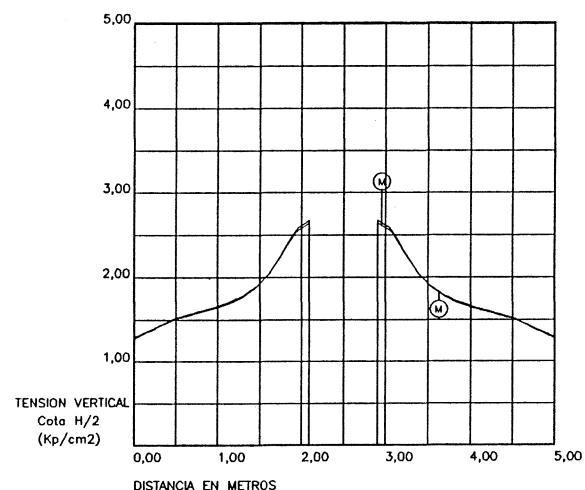
TENSIONES VERTICALES A 1,50 m.



Comparativa Resultados Serie 93.



Comparativa de Resultados Filtrada.



Comparativa V. Melnikov Series 82 y 93.

COMPARACION DE RESULTADOS

ELEMENTO 82

MAGNITUD	V. CUADRADA	V. VERTICAL	V. HORIZONTAL	V. CIRCULAR	V. ROTADA	V. MELNIKOV
Dimensiones	1,00 x 1,00	0,7143 x 1,40	1,40 x 0,7143	$r = 0,5642$	1,00 x 1,00	0,8165
Tensión X	-1,539/1,669	-1,342/1,498	-2,088/1,989	-1,356/1,672	-2,356/2,336	-1,162/1,162
Tensión Y	-4,7/0,2897	-4,02/0,242	-6,602/0,4193	-4,913/0,0968	-12,899/0,41	-4,314/0,2178
T. Equivalente	0,1888/5,214	0,041/4,382	0,056/6,784	0,0544/4,89	0,053/11,926	0,0506/4,7
Desplaz. máximo	-0,135.10 ⁻⁴	-0,122.10 ⁻⁴	-0,162.10 ⁻⁴	-0,133.10 ⁻⁴	-0,146.10 ⁻⁴	-0,122.10 ⁻⁴
Est. error (%)	6,975	5,85	8,144	2,42	7,27	4,419

ELEMENTO 93

MAGNITUD	V. CUADRADA	V. VERTICAL	V. HORIZONTAL	V. CIRCULAR	V. ROTADA	V. MELNIKOV
Dimensiones	1,00 x 1,00	0,7143 x 1,40	1,40 x 0,7143	$r = 0,5642$	1,00 x 1,00	0,8165
Tensión X	-1,573/1,721	-1,377/1,5609	-2,1003/2,0316	-1,372/1,683	-2,4217/2,5306	-1,208/1,2103
Tensión Y	-4,719/0,3013	-4,0694/0,2611	-6,64/0,4366	-4,9168/0,1565	-12,9723/0,4175	-4,309/0,2265
T. Equivalente	0,141/5,1903	0,1987/4,36	0,1267/6,7563	0,0812/4,8733	0,0341/12,044	0,1758/4,7035
Desplaz. máximo	-0,138.10 ⁻⁴	-0,125.10 ⁻⁴	-0,165.10 ⁻⁴	-0,136.10 ⁻⁴	-0,149.10 ⁻⁴	-0,125.10 ⁻⁴
Est. error (%)	6,4324	5,3010	7,9280	3,4224	6,6362	3,9679