

Informe sobre la restauración de la escalera prioral de la colegiata de San Isidoro de León

por:

Santiago Huerta Fernández
Gema López Manzanares

DEPARTAMENTO DE ESTRUCTURAS DE EDIFICACIÓN
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Consejería de Educación y Cultura
Junta de Castilla y León

Madrid, enero de 2001

Índice

1. Introducción	1
2. Marco teórico	1
2.1 El material: hipótesis del análisis límite	1
2.2 Condición de estabilidad; seguridad	4
2.3 Teorema Fundamental; límite inferior del coeficiente de seguridad	4
2.4 Movimientos y patologías	5
3. Estudio de agrietamientos y seguridad de la escalera antes de la intervención ..	6
4. Desmontaje del último tramo	7
4.1 Construcción: cuñas de madera y pedernal	7
4.2 Recuperación de la forma: posibles alternativas. Desmontaje y montaje ..	9
5. Mecánica de la escalera	10
5.1 Geometría. Observaciones generales	11
5.2 Análisis mecánico	13
6. Bibliografía	26
7. Documentación fotográfica	27

1. Introducción

La escalera prioral de la colegiata de San Isidoro de León es renacentista. Sufrió el derrumbamiento de la bóveda superior en fecha indeterminada (quizá en el siglo XVIII). La escalera resistió el impacto de la fábrica pero el arco del último tramo superior cedió, agrietándose en la clave y en los arranques. Esto produjo un descenso del perfil más exterior de la bóveda de este tramo, quedando los escalones inclinados visiblemente hacia el hueco. La escalera se mantuvo, aparentemente sin problemas, hasta que en los años 1960 se decidió apea el descansillo con un muro de carga de ladrillo hueco. Además, el espacio debajo del descansillo se cerró quedando un pequeño cuarto que escondía la rica labra del intradós de la escalera y un hermoso bajorrelieve en la pared. Con excelente criterio se decidió en 1999 recuperar la escalera en su estado original, eliminando el muro, restituyendo su forma original y permitiendo la vista completa de los bajorrelieves del intradós de las bóvedas. Los arquitectos directores de la obra son Ramón Cañas y Carlos Sesmilo; la empresa constructora PROART.

El trabajo consistió en:

- 1) Dar asistencia técnica durante las operaciones de apeo, desmontaje, montaje y descimbramiento de la escalera.
- 2) Realizar los estudios necesarios para asegurar las operaciones del apartado anterior.
- 3) Escribir el presente informe que debe resumir el funcionamiento estructural de la escalera y exponer la justificación de las operaciones realizadas durante la restauración.

2. Marco teórico

Al realizar los estudios se ha aplicado la teoría del Análisis Límite de Estructuras de Fábrica, tal y como la ha desarrollado fundamentalmente Heyman en los últimos años —véase Heyman (1995a y 1995b). En este apartado se resumirán los principios e ideas fundamentales.

2.1 El material: hipótesis del análisis límite

Se considera la estructura de fábrica formada por un material rígido-unilateral, que resiste compresiones pero no resiste tracciones. Es decir, imaginamos la fábrica como un

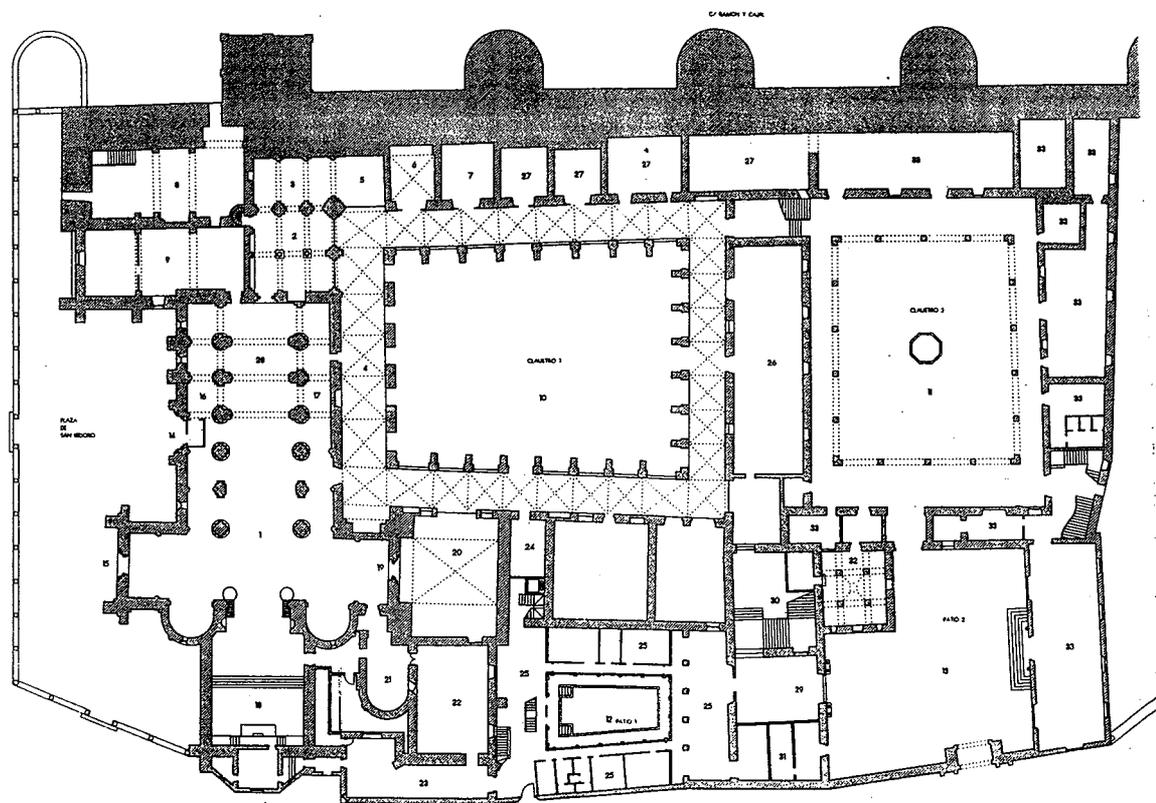


Figura 1. Planta de la colegiata de San Isidoro

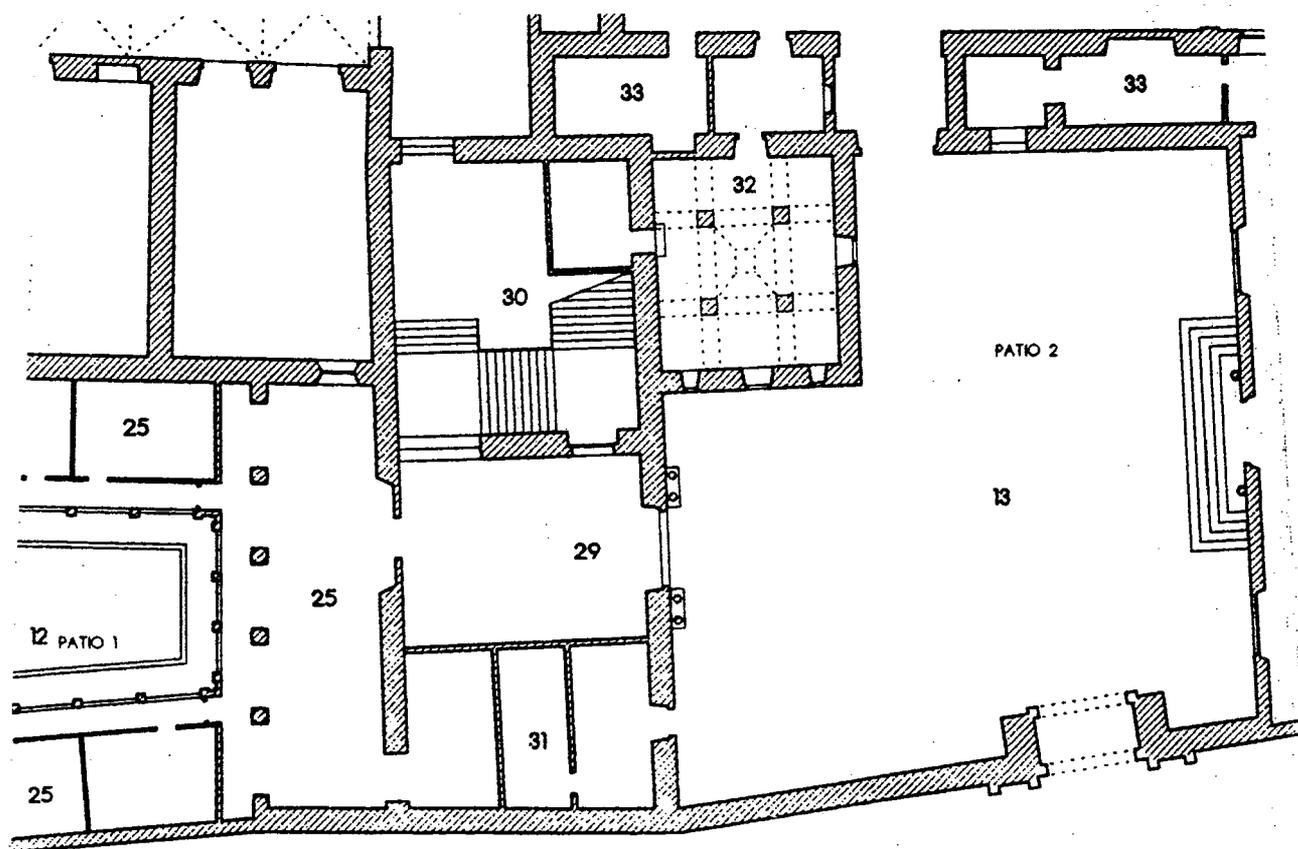


Figura 2. Detalle de la zona de la escalera

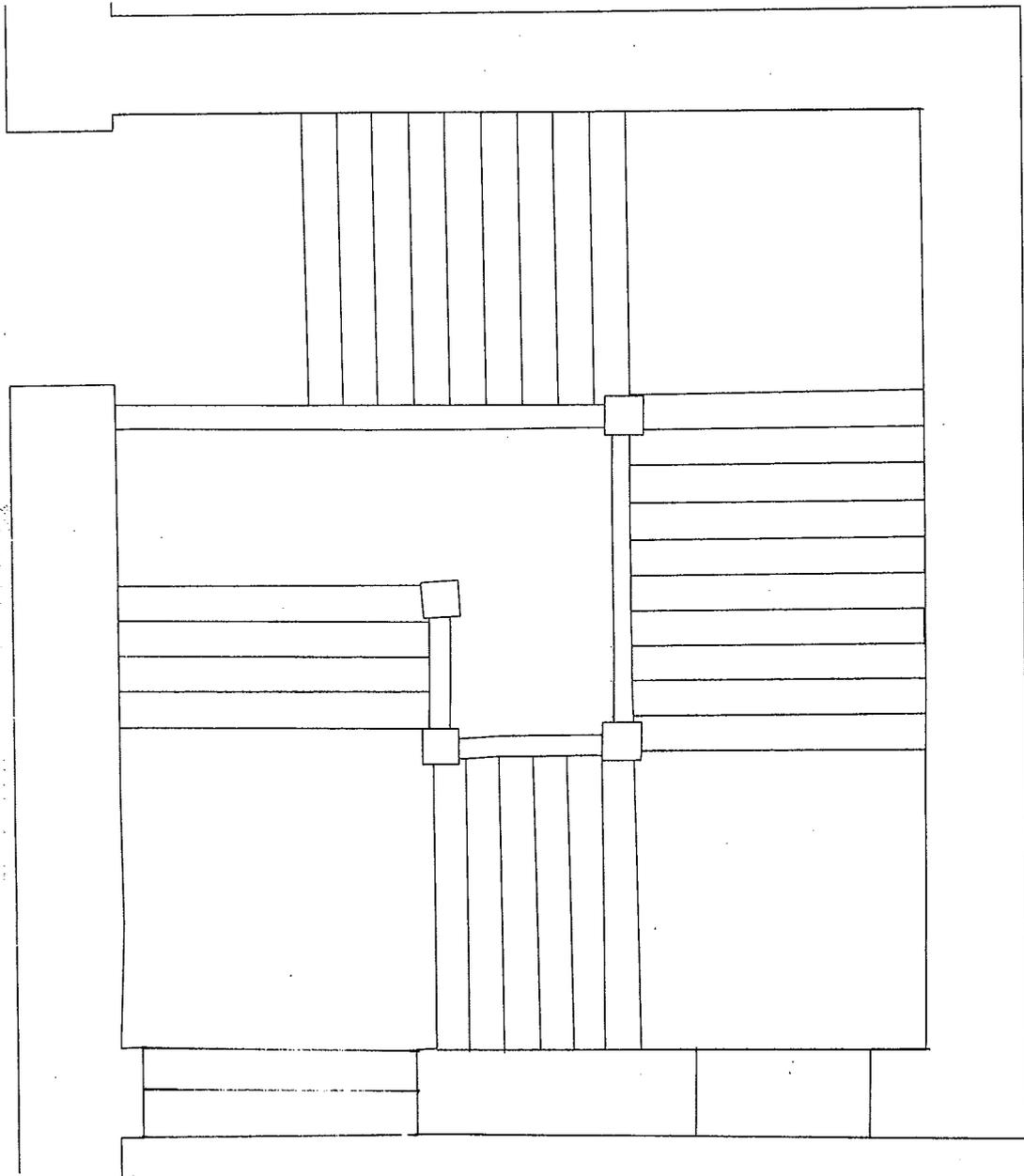


Figura 3. Planta de la escalera (escala 1:75)

conjunto de bloques indeformables en contacto seco y directo que se sostienen por su propio peso. Supondremos también que las tensiones son bajas, no habiendo peligro de fallo por resistencia, y que el rozamiento entre las piedras es suficientemente alto como para impedir su deslizamiento. Estas tres hipótesis dan lugar a los Principios del Análisis Límite de las Fábricas:

- (1) la fábrica presenta una resistencia a compresión infinita;
- (2) la fábrica tiene una resistencia a tracción nula;
- (3) el fallo por deslizamiento es imposible.

La hipótesis (1) va ligeramente en contra de seguridad y se comprobará mediante un cálculo numérico. La suposición (2) va, evidentemente, a favor de seguridad. Finalmente, la hipótesis (3), vuelve a estar en contra de seguridad, pero los casos de deslizamiento entre piedras son extremadamente raros (suelen estar asociados a movimientos sísmicos).

2.2 Condición de estabilidad; seguridad

La condición de estabilidad de una fábrica construida con un material que cumpla los principios anteriores exige que la trayectoria de las fuerzas, la «línea de empujes», esté contenida dentro de la estructura; esto es, para cada sección hipotética de la estructura la resultante de las fuerzas debe estar contenida en su interior.

La seguridad está determinada, en cada sección, por la distancia relativa de la resultante de tensiones (empuje) a sus bordes. El coeficiente de seguridad es geométrico y definirá la posición que dicho empuje no debe sobrepasar dentro de cada sección. Los coeficientes de seguridad dependen del tipo y uso de la estructura, y tienen un carácter empírico. En particular, para el caso de edificios, son distintos para arcos y bóvedas y para estribos; el coeficiente de estos últimos es mucho más restrictivo, por los motivos que se discutirán en el apartado dedicado a la seguridad del sistema de contrarresto.

2.3 Teorema Fundamental; límite inferior del coeficiente de seguridad

Si la estructura es hiperestática, como es habitual, será posible encontrar infinitas líneas de empujes contenidas dentro de la fábrica, que corresponden a las infinitas situaciones de equilibrio posibles (la línea de empujes no es más que una representación gráfica de las ecuaciones de equilibrio).

Si se cumplen los principios del análisis límite enunciados antes se puede demostrar

—véase Kooharian (1953); Heyman (1995a)— el siguiente Teorema Fundamental del Análisis Límite (Teorema de la Seguridad o del Límite Inferior):

Dada una estructura, si es posible encontrar una situación de equilibrio compatible con las cargas que no viole la condición de límite del material (esto es, que no aparezcan tracciones) la estructura no colapsará. Aplicado a las fábricas: si es posible dibujar una línea de empujes contenida dentro de la estructura la estructura no se hundirá.

La potencia del Teorema radica en que la línea de empujes, es decir, la situación de equilibrio, puede ser elegida libremente. Elegida una línea, podremos aplicar las condiciones de seguridad a cada una de las secciones que atraviesa y obtener, de esta forma, un límite inferior para el coeficiente de seguridad geométrico: sabemos que la estructura tiene al menos ese coeficiente de seguridad (en general, sería posible encontrar una línea de empujes que diera una situación más favorable).

El problema de la seguridad de las fábricas es, pues, un problema de estabilidad. De los tres criterios fundamentales que debe cumplir una estructura (resistencia, rigidez y estabilidad), es éste último el que gobierna el proyecto de las fábricas: las tensiones son bajas y las deformaciones pequeñas.

El criterio de estabilidad conduce a una visión de las estructuras de fábrica basada firmemente en la geometría: es la forma la que posibilita que las trayectorias de esfuerzos estén siempre dentro de los límites de la fábrica (para una exposición clara y muy detallada de este enfoque, véase Heyman, 1999).

2.4 Movimientos y patologías

Las grietas son algo natural en un material que no resiste tracciones. De hecho, los agrietamientos son la única forma de adaptarse a pequeñas variaciones en las condiciones de contorno (por ejemplo, a un pequeño desplazamiento de los estribos, etc.). Las grietas dividen la estructura en un conjunto «articulado» de bloques que se mueve y adapta a las nuevas condiciones de contorno. A cada movimiento corresponde un agrietamiento distinto y una estructura puede presentar a lo largo de su historia distintos agrietamientos, que corresponden a distintas posiciones de las líneas de empujes (distintas soluciones de las ecuaciones de equilibrio). Sin embargo, el Teorema Fundamental nos asegura que, si encontramos «un sistema de líneas de empujes» (esto es una cierta situación de equilibrio) dentro de la fábrica, aunque pueden moverse bruscamente, éstas nunca se saldrán de los límites de la fábrica con lo que la estabilidad está asegurada.

3. Estudio de los agrietamientos y la seguridad de la escalera antes de la intervención

El impacto de la bóveda sobre la escalera tuvo el efecto de producir un incremento brusco del empuje de la bóveda del último tramo de la escalera. Como consecuencia de ello se produjeron fracturas y agrietamientos visibles en las piedras del arco de borde, que dan al hueco de la escalera.

Las fracturas se localizaron en tres puntos:

- 1) En la cabeza del arco, en el contacto con el muro y suelo del piso superior.
- 2) En el arranque del arco, en la piedra común a la bóveda superior, el descansillo y la bóveda inferior. Es aquí donde la fractura ha sido más visible.
- 3) En el arranque del arco, en el contacto con la pared y el descansillo.

Como se verá después en el análisis estructural, en los dos últimos puntos hay una concentración importante de tensiones.

Los agrietamientos se concentran también en el arco de borde y se han producido para adaptarse a un incremento de la luz de la bóveda debido a un cedimiento del sistema de contrarresto como consecuencia del impacto. Las grietas son las típicas de este tipo de movimiento: tres grietas, una en la zona intermedia abierta hacia abajo y dos en los arranques abiertas hacia arriba. El arco se «triararticula» permitiendo el movimiento y el empuje se hace mínimo. El agrietamiento es muy visible pero, en la medida en que el arco no ha cambiado sustancialmente de forma, la seguridad no ha variado.

La escalera en su estado agrietado tenía una seguridad equivalente a la escalera original sin deformar; con toda probabilidad, podría haberse demolido el muro del descansillo sin ningún problema y, de hecho, la escalera aparentemente había estado unos 200 años en esta situación. No obstante los siguientes argumentos podían justificar la intervención:

- 1) El agrietamiento había conducido a un descenso apreciable del arco de borde con la consiguiente inclinación de los escalones del último tramo.
- 2) Podía haber fracturas internas no visibles en el interior de la bóveda.

4. Desmontaje del último tramo

Para recuperar la geometría del último tramo y verificar el estado interno de la fábrica era preciso desmontarlo y volverlo a montar. La operación era posible tratándose de una bóveda de sillares de piedra bien labrada sobre la que apoya un relleno de fábrica que sustenta los escalones.

En primer lugar fue preciso apejar toda la escalera, aunque la intervención se iba a limitar al último tramo.

En segundo lugar se procedió a ir demontando los escalones que en origen eran piedras enterizas de todo el ancho de la escalera (unos 3 m). Después se fue eliminando el relleno hasta dejar visto el trasdós de la bóveda de la escalera. El descansillo sólo se levantó en la zona de encuentro con el tramo superior.

4.1 Construcción: cuñas de madera y pedernal

Al levantar el relleno quedó vista la estructura de la bóveda. En concreto pudieron apreciarse algunos detalles de enorme interés:

1) en la parte superior los últimos sillares presentaban unos hierros embutidos, aproximadamente en la mitad de sus caras que encajaban en unas perforaciones realizadas en los sillares contiguos que ya pertenecían al muro. La intención era evidente: evitar un posible deslizamiento en cabeza de la bóveda.

2) en toda la bóveda se observaban cuñas en las juntas entre sillares. Estas cuñas eran de dos tipos, correspondientes a dos funciones distintas:

a) cuñas de madera, empleadas para replantera el asiento de los sillares.

b) cuñas de pedernal, usadas para poner en carga, «pre-comprimir», la bóveda antes del descimbramiento y evitar los movimientos por fluencia de las juntas de mortero. Las cuñas, a veces, estaban dispuestas en un cajeado para facilitar su introducción. Todas las cuñas eran fragmentos de cantos rodados, de forma

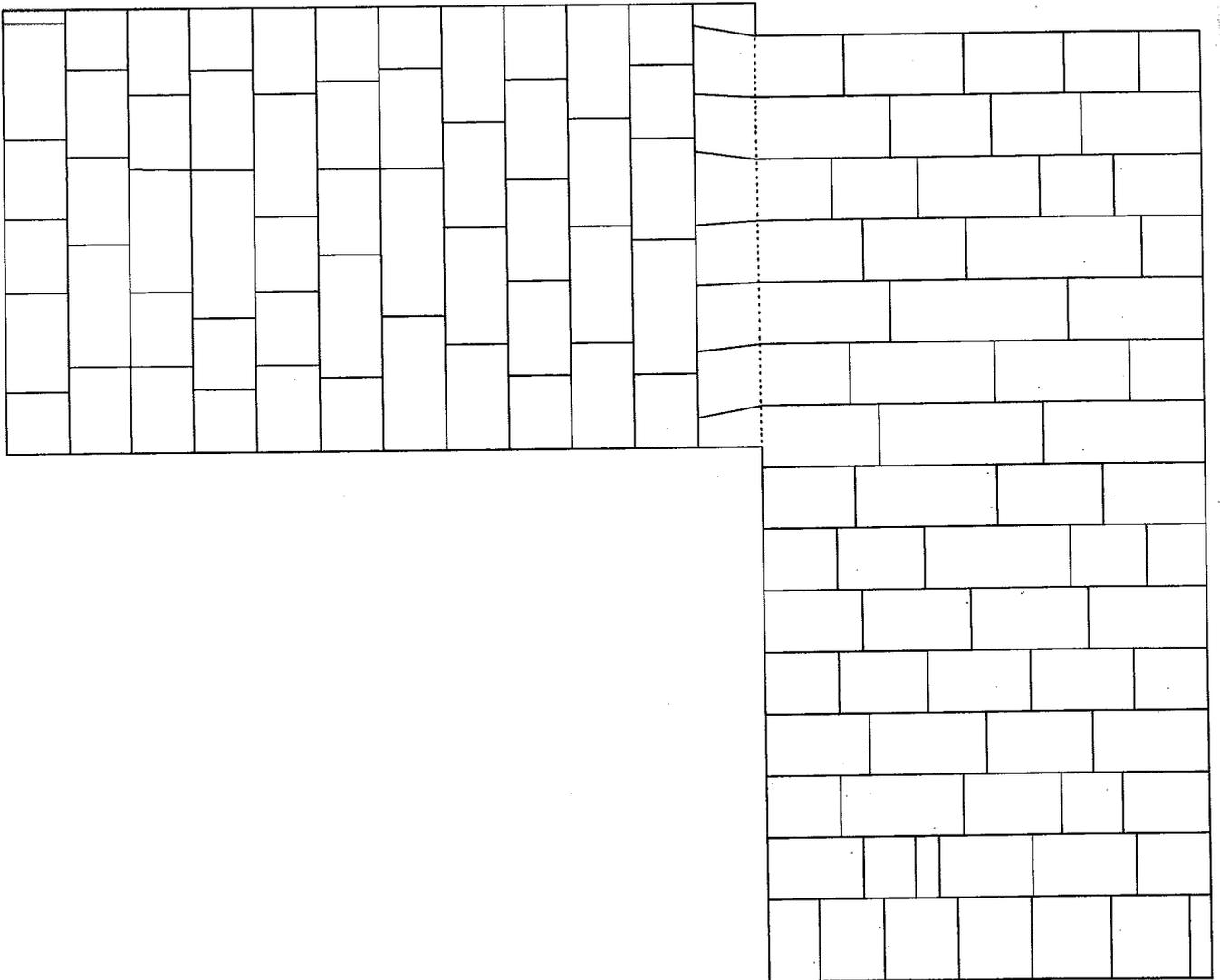


Figura 4. Despiece de los dos últimos tramos de la escalera, desarrollados en planta
(tramo superior arriba)

lenticular y unos 10 cm de dimensión media. Una de las caras estaba siempre redondeada. Las cuñas de pedernal fueron introducidas a martillazos entre las piedras, de ahí el material (el durísimo pedernal), la forma redondeada y los cajeados.

3) El encuentro de la bóveda con el descansillo se realizaba mediante grandes sillares en "L". En el de extremo la fractura dejaba ver una espiga de hierro que se embutía en los siguientes sillares.

4.2 Recuperación de la forma: posibles alternativas. Desmontaje y montaje

Realizado el apeo de la escalera había dos posibilidades para recuperar la forma original de la bóveda:

- 1) desmontar y volver a montar.
- 2) levantar el apeo hasta recuperar la forma.

La segunda evitaba todo el proceso de desmontaje y montaje, pero tenía como inconveniente la dificultad en la limpieza y resanado de las juntas de los sillares. Finalmente, se decidió desmontar y volver a montar.

Para desmontar se numeraron los sillares, se eliminaron las cuñas y se dispuso de unas argollas para poder proceder al levantamiento mediante una grúa. Retirados los sillares se ajustó la cimbra a la geometría original: la bóveda del último tramo era un cañón cilíndrico y su perfil podía obtenerse con toda fiabilidad en el encuentro con la pared

Los sillares se fueron disponiendo de nuevo de abajo a arriba, empleando cuñas provisionales de madera para su asentamiento. Se realizó el replanteo de todo el tramo no sin cierta dificultad, pues había que tener en cuenta el espesor de las juntas; esto obligó a varios tanteos, teniendo que levantar en dos ocasiones casi la mitad de los sillares. Terminado se ordenó acuñar los sillares empleando las mismas cuñas de pedernal y verter mortero de cal en las juntas, con el mínimo de aditivo para acelerar el fraguado.

Con la escalera todavía apeada se procedió a ejecutar el relleno y sentar los escalones de piedra en base al replanteo original. Eso no fue difícil porque en la pared había quedado nítidamente marcado el dibujo de los escalones originales.

Terminados los escalones se pudo descimbrar. En el descimbramiento no se produjo ningún movimiento, prueba del buen acuñado entre sillares y del excelente mortero empleado.

5. Mecánica de la escalera

El estudio de la estabilidad de una construcción de fábrica que lleva en pie varios siglos puede considerarse un ejercicio casi retórico: en efecto, la mejor demostración de la seguridad de una estructura es, precisamente, su permanencia en el tiempo. Además, en el caso de las obras de fábrica la seguridad es función de la forma, de una correcta geometría. Si ésta no cambia con el tiempo, la seguridad inicial permanece inalterable.

Puede ocurrir, y este es el caso de la escalera prioral, que alguna acción exterior (el hundimiento de la bóveda sobre la escalera) conduzca a una modificación visible de la forma. Esto no significa, necesariamente, su hundimiento: la nueva forma puede ser todavía viable, como ha ocurrido con la escalera que, agrietada, ha permanecido en pie durante quizá dos siglos.

Estos argumentos geométricos no hubieran sorprendido a los antiguos maestros renacentistas o góticos. De hecho, el cálculo tradicional consistía en fijar, precisamente, las proporciones correctas de la obra: dimensiones generales y espesor de arcos, muros y estribos. Las antiguas «reglas estructurales» son, en su mayor parte, reglas geométricas de proporción (Heyman 1995a; Huerta, 1990 y 1999).

Para la mentalidad de un arquitecto o ingeniero moderno esto puede parecer extraño. El mérito del profesor Heyman ha sido, principalmente, el poner de manifiesto la identidad de las conclusiones de la teoría geométrica tradicional y el moderno cálculo de estructuras.

Pero la moderna teoría tiene una ventaja fundamental sobre la antigua. Las reglas geométricas sólo se aplicaban a casos concretos; eran fruto de la práctica constructiva y de la observación de ejemplos ya construidos. Las reglas góticas no sirven para edificios renacentistas o barrocos. Por el contrario, nosotros podemos aplicar la teoría para estudiar cualquier estructura de fábrica. Podemos profundizar más en el

conocimiento de los distintos tipos y relacionar las distintas formas estructurales.

En el presente apartado se estudiará la mecánica de un tipo muy difundido de escalera de piedra renacentista, tomando como ejemplo de estudio la escalera prioral. Los estudios sobre la mecánica de las escaleras de piedra son casi inexistentes (por ejemplo, Heyman, 1995b, sólo estudia el caso de los escalones volados) y las reflexiones y cálculos que siguen esperamos que sirvan para aumentar nuestro conocimiento en este campo.

El estudio está destinado a interpretar el comportamiento en base a posibles situaciones de equilibrio con un nivel razonablemente bajo de tensiones, acorde con las suposiciones citadas en el apartado 2.

5.1 Geometría. Observaciones generales

La escalera tiene cuatro tramos de los cuales dos apoyan directamente sobre el terreno. Estos últimos son objeto de estudio. El tramo superior monta o apoya sobre el inferior, que se continúa en el descansillo. Ésta es la disposición tradicional de escaleras de fábrica que se ha usado sistemáticamente, al menos en España, desde el Renacimiento. (Fray Lorenzo de San Nicolás, 1639, describe este sistema para piedra, rosca de ladrillo o tabique, con bastante detalle.)

En general, para el caso de la piedra cada uno de los tramos es una bóveda de cañón que apoya sobre el descansillo que es continuación de la bóveda inferior. El descansillo puede ser plano o puede estar sobre la continuación de la bóveda inferior (este es siempre el caso si la bóveda es de ladrillo o tabicada). Por último, para escaleras de dimensiones no muy grandes los tramos pueden ser rectos. Todos los casos aparecen recogidos en la Figura 5 de Fray Lorenzo de San Nicolás.

En la escalera prioral la geometría es como sigue:

- el tramo superior es una bóveda de cañón cilíndrica con un radio de curvatura de unos 13 m (unos 46 pies castellanos, de 28 cm). El espesor de la bóveda es el que aparece moldurado en el arco de borde, de unos 34 cm (algo más de un pie).

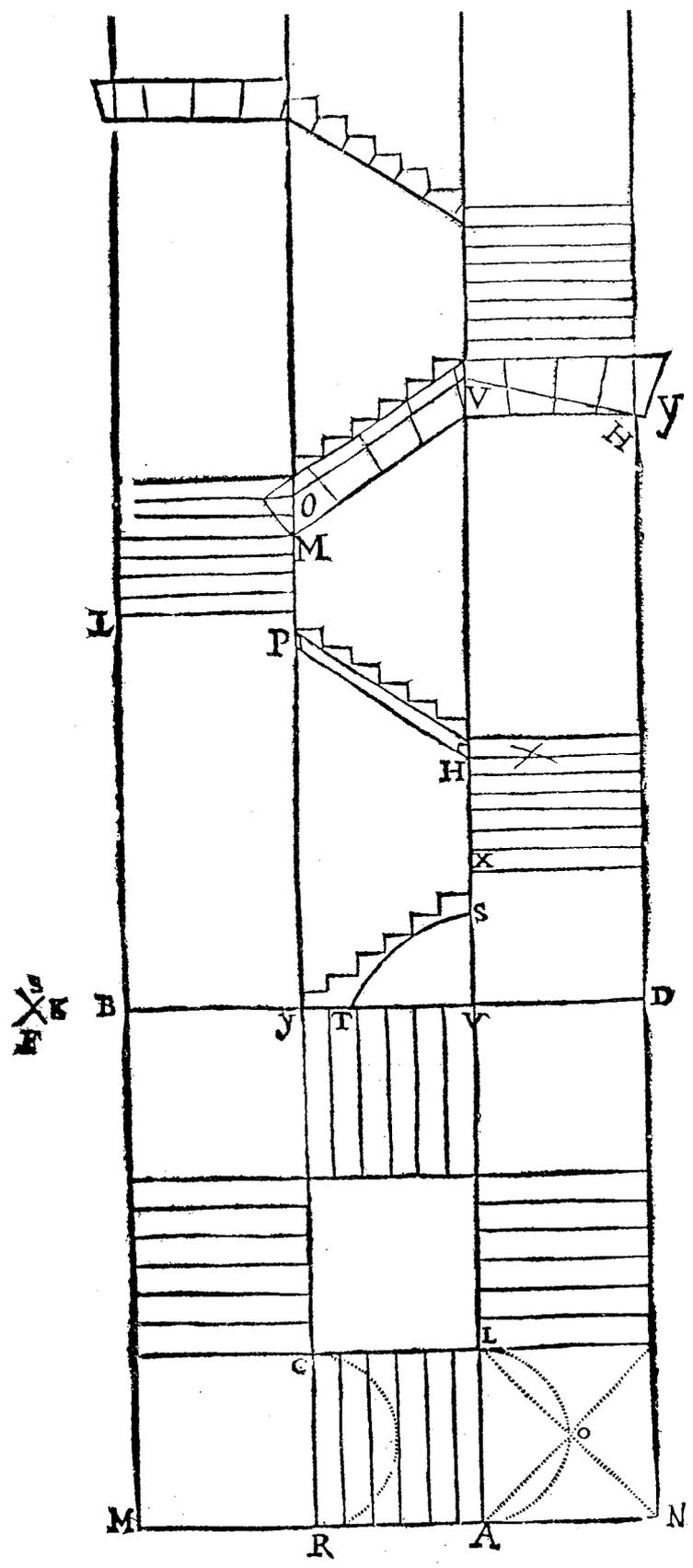


Figura 5. Formas posibles de escaleras de fábrica, según Fray Lorenzo de San Nicolás

- el tramo inferior es una bóveda curiosa, pues se trata de una superficie reglada. Su geometría está definida por los dos arcos extremos. El de la pared, continuo, con un radio de curvatura también de unos 13 m. El que da al hueco es un arco «quebrado»; tiene un tramo circular, con el mismo radio de 13 m y luego un tramo recto horizontal en la zona del descansillo. (El espesor de bóveda y descansillo es el mismo que en el tramo superior.) La superficie de la bóveda se obtiene desplazando una recta, paralelamente al plano de la pared frontal, que apoya en ambos arcos extremos.

5.2 Análisis mecánico

El demostrar la estabilidad del tramo inferior (incluso descansillo), considerado aisladamente, no supone ningún problema. Aplicando el «método de los cortes» para buscar una solución posible de equilibrio en compresión, imaginaremos la bóveda dividida en una serie de arcos cortados por planos verticales paralelos a los planos de los arcos de borde. Si para cada uno de estos arcos es posible dibujar una línea de empujes que represente el equilibrio de la bóveda, bajo su propio peso más el peso del relleno y escalones, entonces, el tramo es seguro. La forma de los arcos varía y se han estudiado tres arcos: los dos arcos extremos (el del hueco y el de la pared), y uno intermedio. Como puede verse en las Figuras 6, 7, 8, 9 y 9bis, no es difícil dibujar varias líneas de empujes, entre ellas una que esté dentro de la mitad central, demostrando que existe un coeficiente de seguridad geométrico mayor o igual a 2 (para el concepto de coeficiente de seguridad geométrico véase Heyman 1982 y 1995). Las tensiones medias son del orden de 10-15 kg/cm², perfectamente admisibles para la buena sillería de la bóveda.

La estabilidad del tramo superior puede estudiarse también de la misma manera y en las Figuras 11, 12, 13 y 14, se han dibujado distintas líneas de empujes, considerando el peso propio más el relleno y escalones. Es interesante la línea de mínimo empuje, Figura 11, pues ésta corresponde a la situación agrietada debido a un pequeño cedimiento de los apoyos. De hecho esta era la situación de la escalera antes de la intervención y puede verse que la posición de la grieta de en medio coincide bastante aproximadamente con el punto de tangencia de la línea de empujes. Como antes las tensiones medias se acercan a los 10 kg/cm². En la Figura 13 se ha dibujado una línea que permita ver el efecto del acuñado: como puede verse en más de la mitad del arco la línea puede considerarse contenida dentro de una franja de unos 10 cm, que es la profundidad a la que puede considerarse que entran las cuñas.

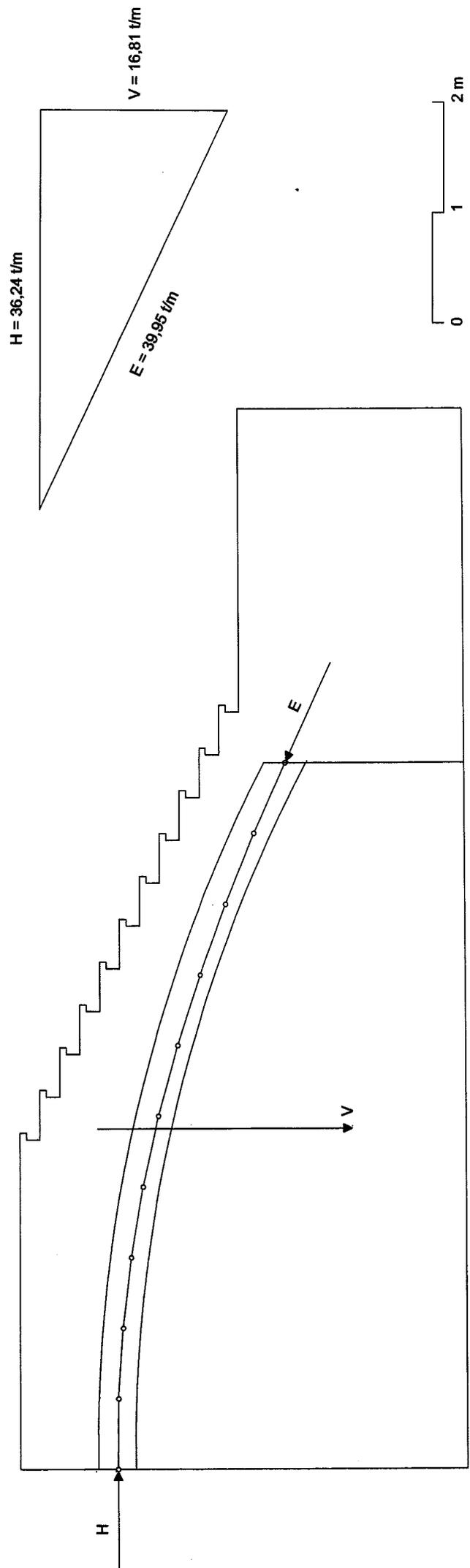


Figura 6. Tramo inferior. Arco de la pared. Línea de empujes contenida en la mitad central

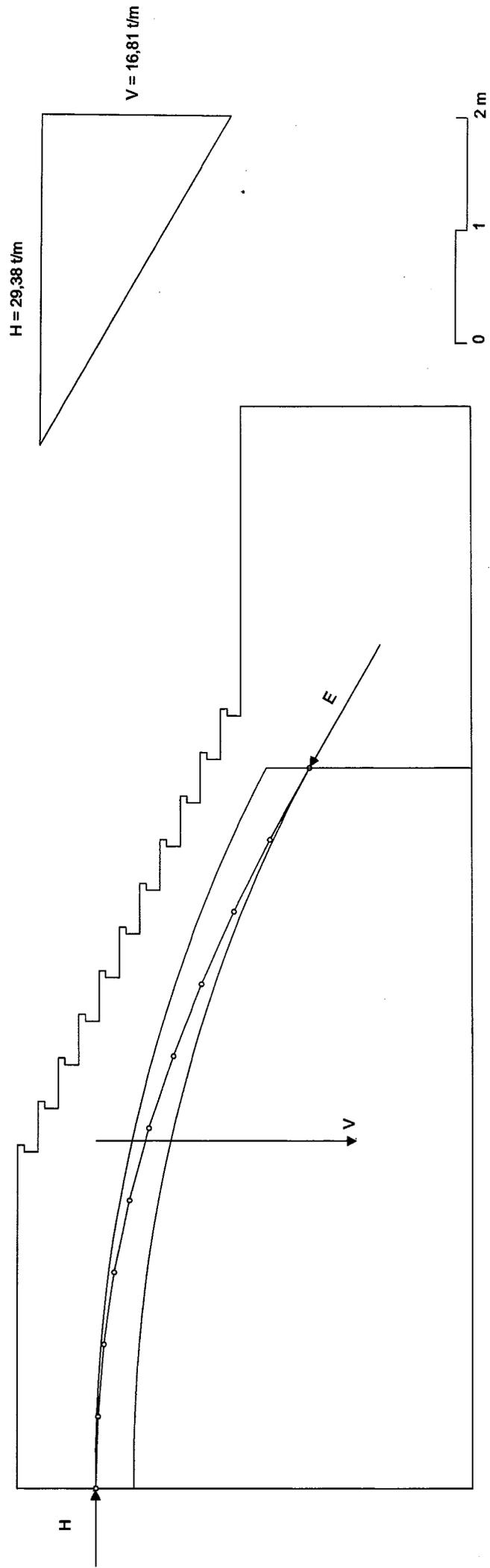


Figura 7. Tramo inferior. Arco de la pared. Línea de empujes que pasa por el trasdós en cabeza y por el intradós en el arranque

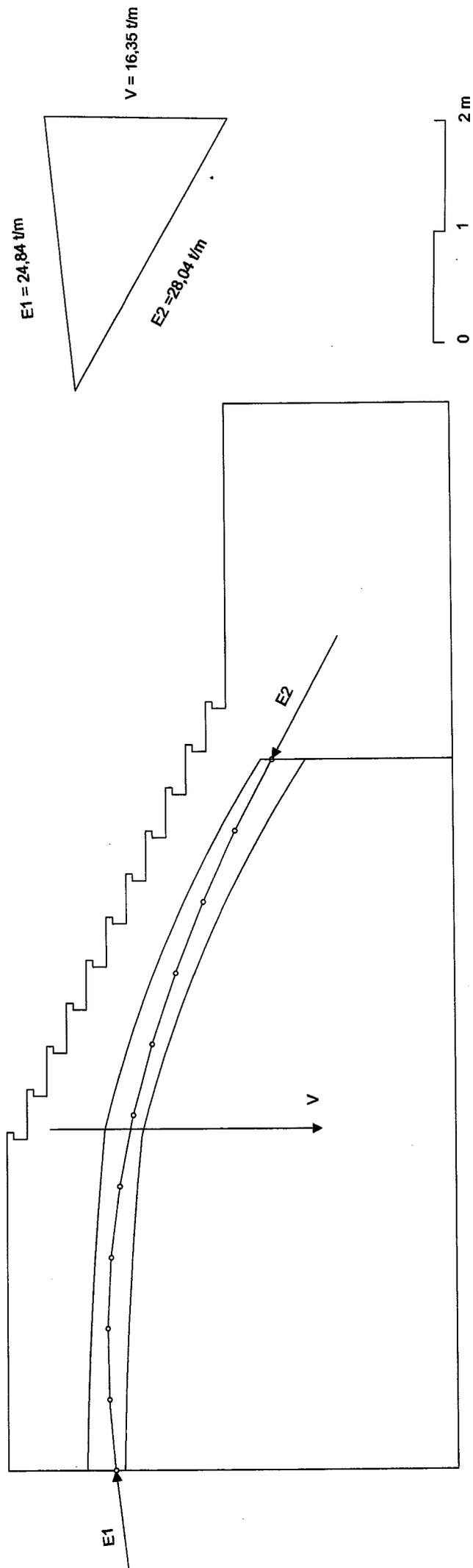


Figura 8. Tramo inferior. Arco de en medio. Línea de empujes contenida en la mitad central

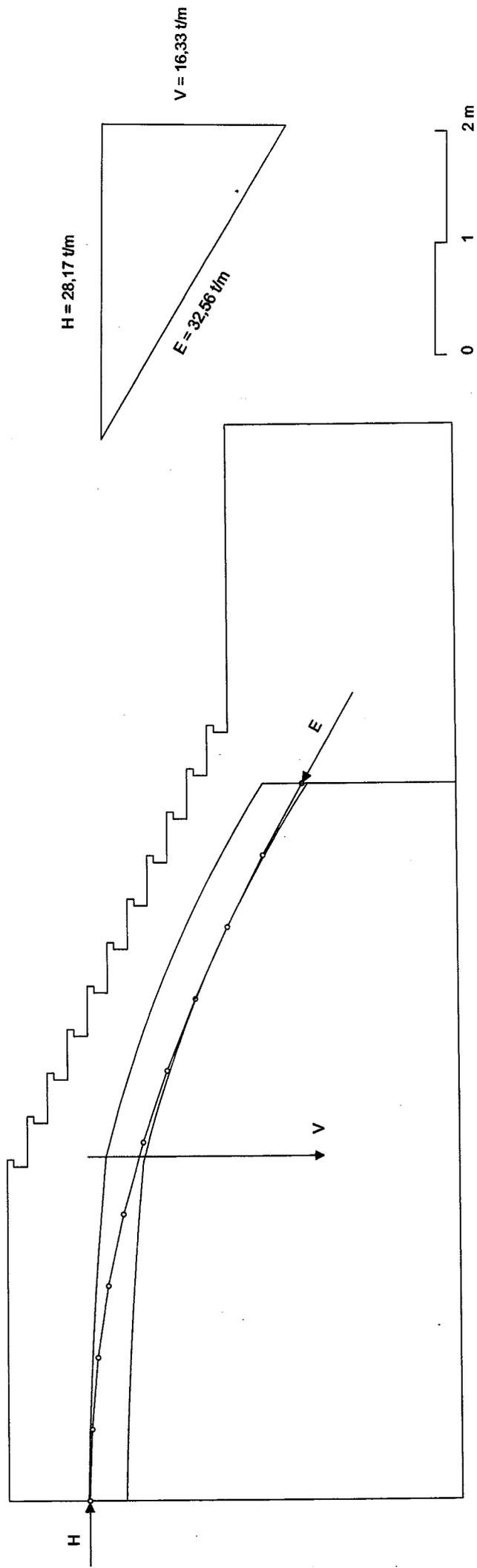


Figura 9. Tramo inferior. Arco de empujes que pasa por el trasdós en cabeza y por el intradós en el arranque

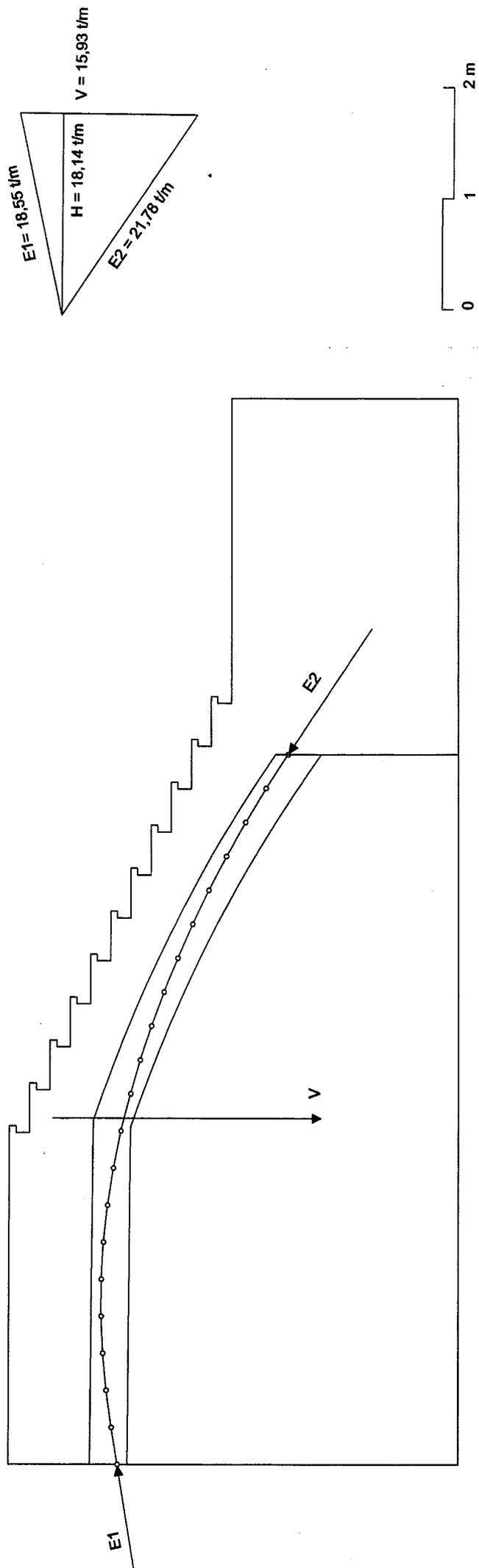


Figura 9bis. Tramo inferior. Arco del hueco. Línea de empujes contenida en la mitad central

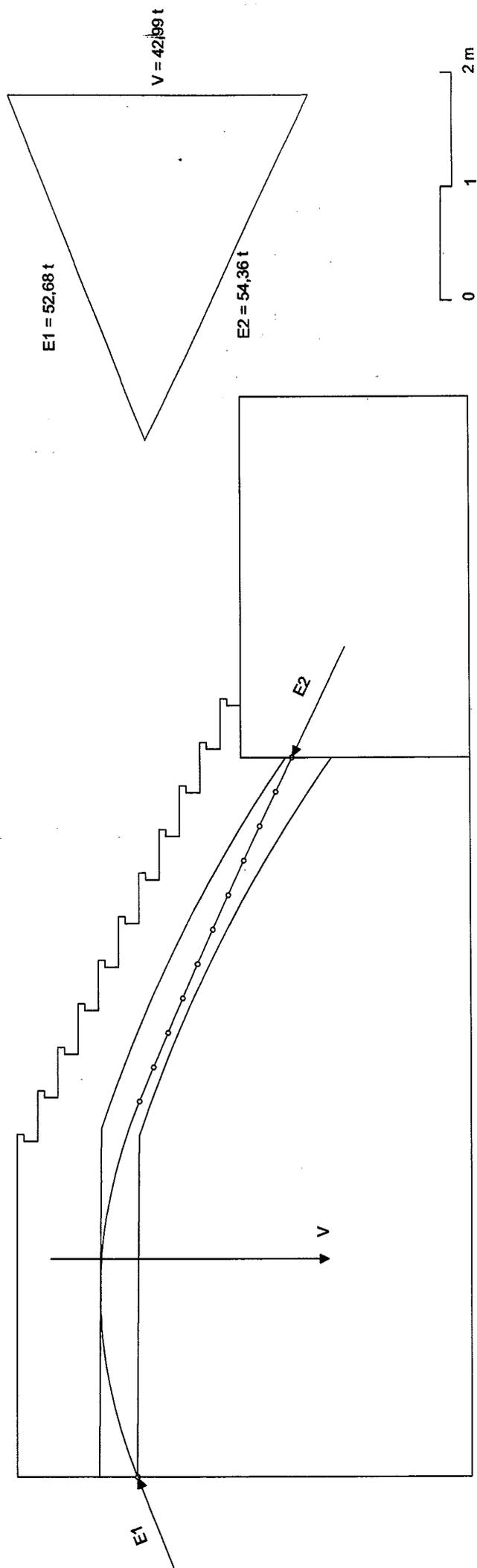
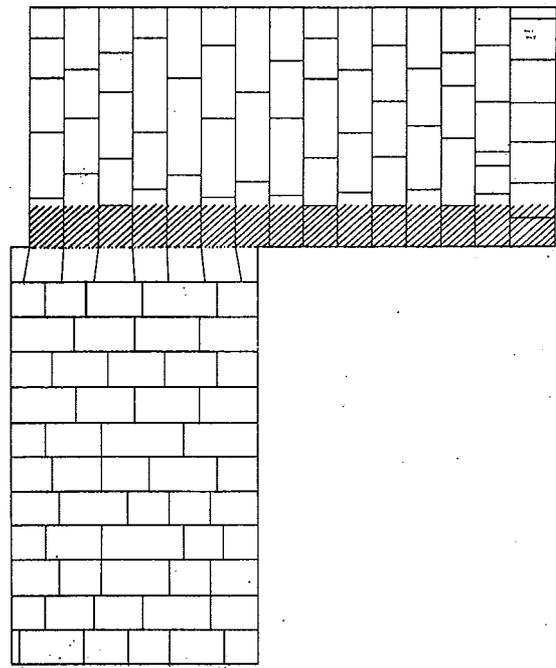


Figura 10. Tramo inferior. Línea de empujes del arco rayado en la planta desarrollada, que sustenta el tramo superior de la escalera y su propio peso

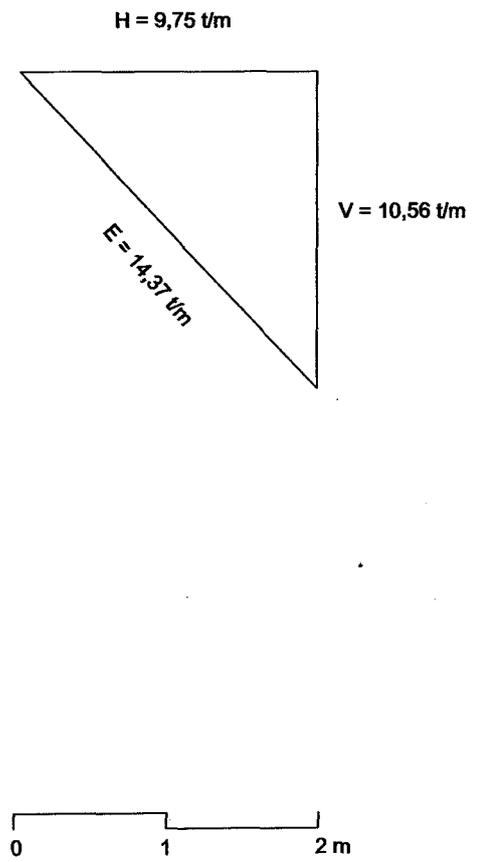
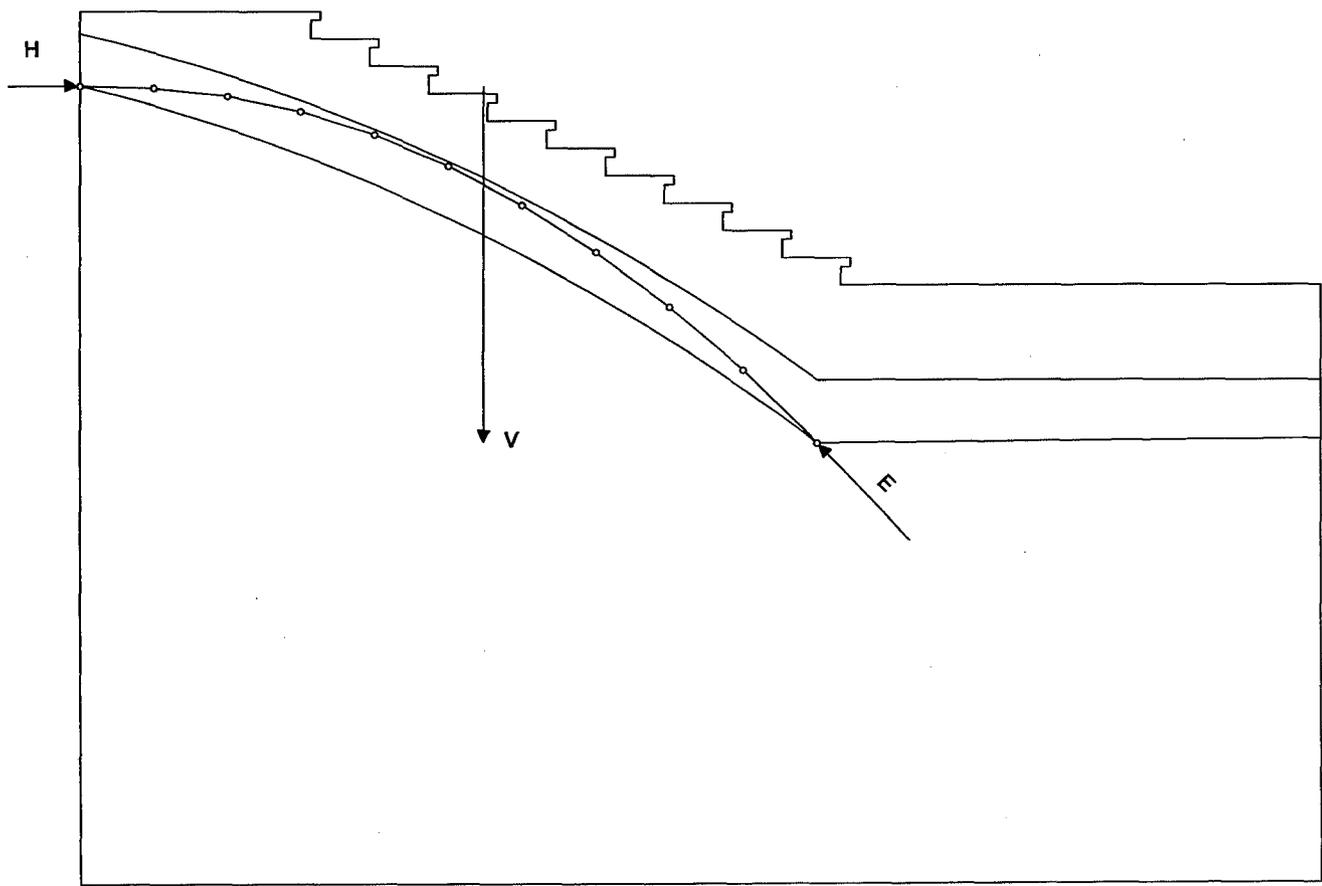


Figura 11. Tramo superior. Arco típico de un metro. Línea de empuje mínimo

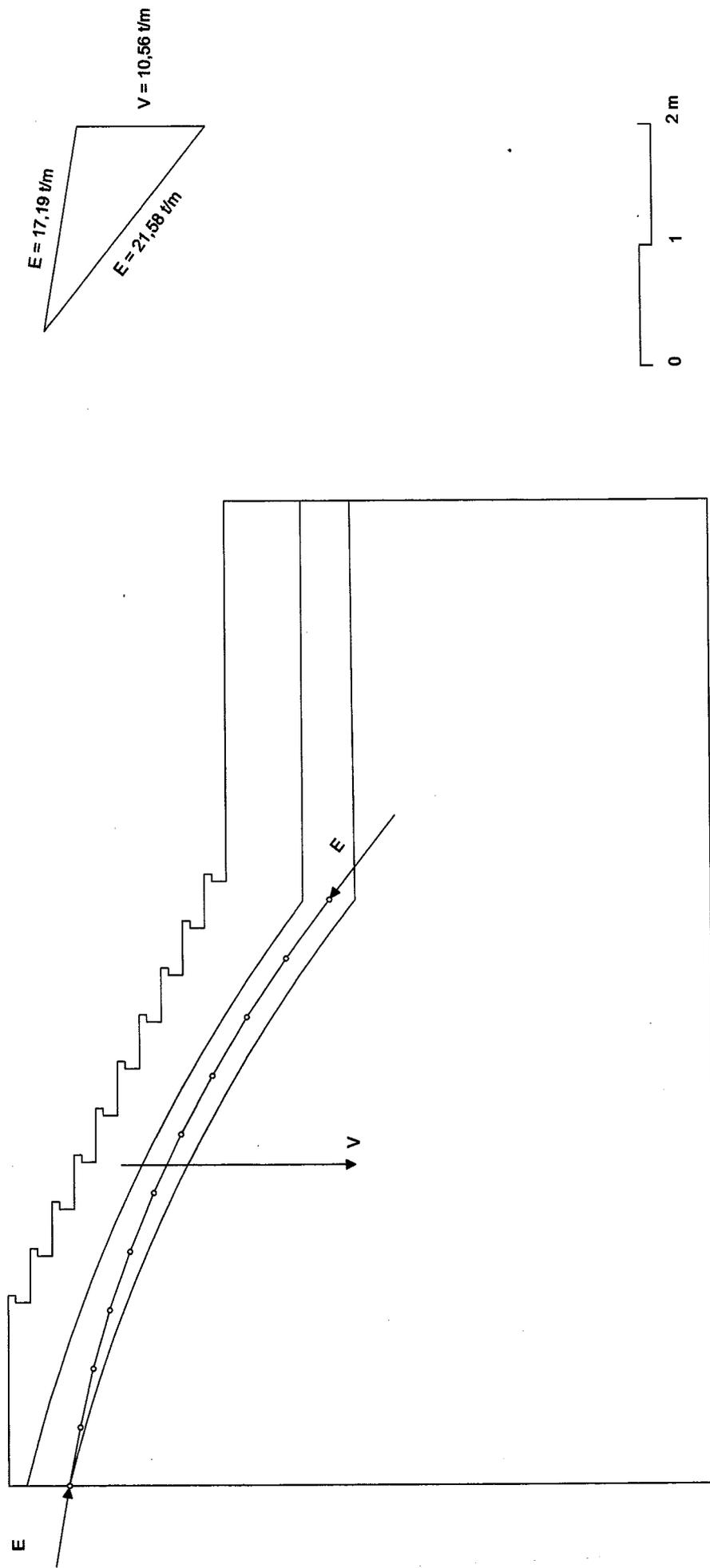


Figura 12. Tramo superior. Arco típico de un metro. Línea tangente a la línea media en el arranque y con componente vertical mínima del empuje en cabeza

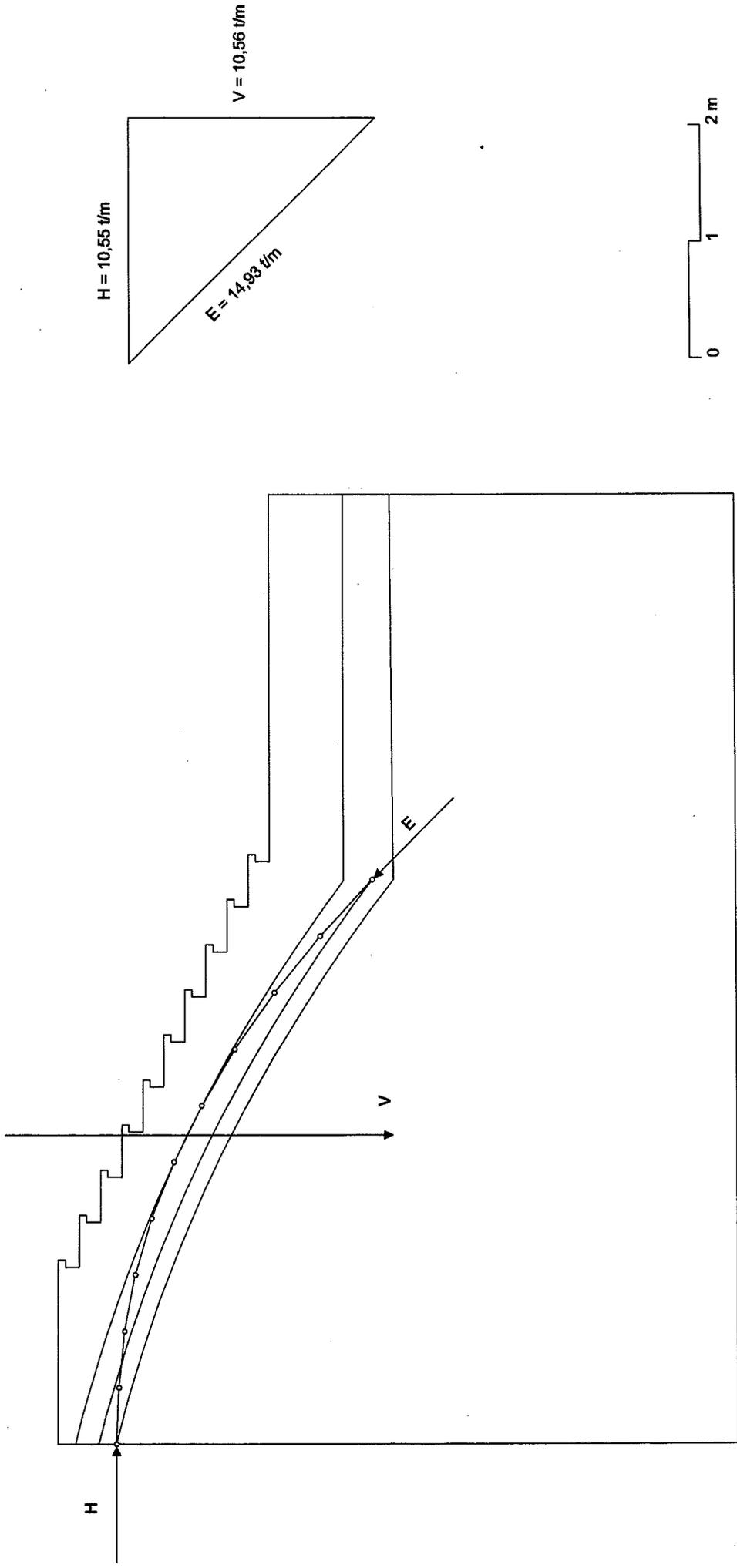


Figura 13. Tramo superior. Arco típico de un metro. Línea de empuje mínimo que pasa por la mitad central en el arranque

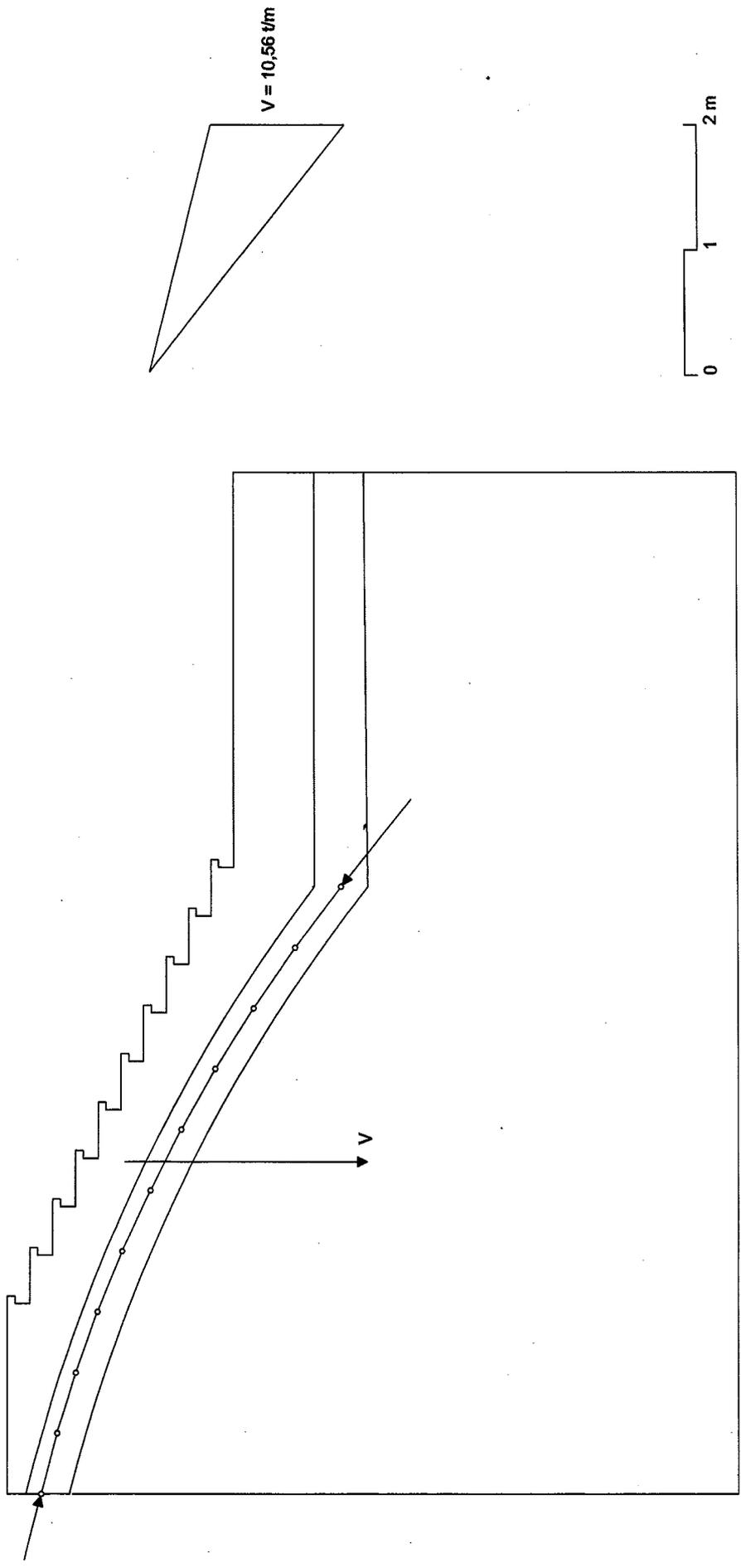


Figura 14. Tramo superior. Arco típico de un metro. Línea de empujes que se aproxima a la línea media

En la Figura 14 se ha dibujado una línea que se acerca lo más posible a la directriz del arco. No obstante, esta línea es imposible pues el empuje en cabeza presenta una componente vertical que no tiene con qué equilibrarse puesto que el tramo desembarca en un hueco de paso. Sirva esto para llamar la atención de que el equilibrio debe ser posible, y esto incluye las reacciones con el contorno.

El problema radica, en realidad, en ver cómo puede transmitirse el peso del tramo superior que apoya sobre el descansillo de una forma en que no se produzcan excesivas tensiones. En esta zona de apoyo, donde hay un cambio brusco en la dirección de los esfuerzos, se produzcan concentraciones de tensión y en el despiece de la sillería aparece, efectivamente, que hay piedras de mayor tamaño que forman una especie de nervio (ver Figura 10). Por otra parte, como se ha dicho en un apartado anterior, las piedras de este nervio son comunes a la bóveda en la zona del descansillo, teniendo forma de "L" abierta. Finalmente, los cortes no son verticales, como en la bóveda sino que son inclinados formando el despiece de un arco adintelado, en la zona del descansillo. Es evidente, la intención de reforzar la esquina para transmitir los esfuerzos del tramo superior.

Para estudiar el apoyo del tramo superior, podemos considerar que produce un empuje aproximadamente tangente al arranque de la bóveda; la línea de empujes correspondiente se ha dibujado en la Figura 12, y apenas precisa de componente vertical en cabeza. El descansillo recibe, pues, el empuje de una carga inclinada uniformemente distribuida. Se trata de ver cómo se puede transmitir esta carga a los muros exteriores de contrarresto.

La primera hipótesis consiste en imaginar dicha carga inclinada descompuesta en una vertical y otra horizontal, ambas uniformemente repartidas. La componente horizontal se transmite a través de las piedras del descansillo hasta el muro. Queda, por tanto, sólo la componente vertical que consideramos que actúa sobre el nervio quebrado antes citado. La línea de empujes correspondiente se ha dibujado en la Figura 10 (el nervio quebrado aparece rayado en planta). El problema es que, debido al poco espesor de la zona adintelada, se producen tensiones bastante grandes, del orden de 100 kg/cm^2 , un orden de magnitud superiores a las comentadas anteriormente. Evidentemente si en la Figura 10, se considera el relleno de buena mampostería se podría peraltar más la línea de empujes y reducir las tensiones quizá a la mitad.

Sin embargo, parecía necesario estudiar otras posibilidades conducentes a un funcionamiento de la escalera sin necesidad de suponer tensiones tan grandes. Para ello basta con darse cuenta que el punto de esquina, común a las dos bóvedas y al descansillo puede considerarse unido por tres bielas de piedra a los muros de borde. Dos bielas horizontales en dos lados del descansillo y otra inclinada contenida dentro del arco de borde. Cualquier fuerza aplicada en dicho punto puede descomponerse según las tres direcciones de las bielas; el equilibrio será viable mientras dichas componentes compriman las bielas.

Imaginaremos, pues, el tramo superior apoyado sobre dicho punto fijo y buscaremos una solución de equilibrio. Para ello consideraremos que en el arranque de la bóveda se forma un arco adintelado, de un cierto canto, de manera que el peso del tramo se trasmite inclinadamente hacia los extremos: el punto de esquina y el muro. Nótese que en la planta del convento, Figura 2, puede verse un grueso muro que estriba contra el muro de la escalera para recibir el empuje concentrado contra el muro. El empuje contenido dentro del plano tangente al arco en el arranque puede descomponerse en tres componentes: dos contenidas en un plano horizontal y una tercera vertical. De las dos componentes horizontales una será normal al descansillo y, como en el caso anterior, se transmitirá hasta el muro del fondo. Nos olvidamos de ella. Las otras dos producen un empuje inclinado que, en un lado se transmite al muro al que se ha aludido antes; en el otro la componente es resistida por una biela recta contenida dentro del nervio de borde. Este empuje inclinado es de unas 22 toneladas. Como la biela de compresión tiene un espesor de unos $15 \times 50 \text{ cm}^2$, la tensión de 30 kg/cm^2 . En este mecanismo se han reducido las tensiones a $1/3$, alcanzando un valor perfectamente admisible para la buena sillería de que está hecha la escalera.



Madrid, 16 de enero de 2001

Fdo: SANTIAGO HUERTA FERNÁNDEZ
Dr. Arquitecto. Profesor Titular de Estructuras
Universidad Politécnica de Madrid

6. Bibliografía

- Heyman, Jacques (1982). *The masonry arch*. Chichester: Ellis Horwood.
- Heyman, Jacques (1995a). *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera/CEHOPU.
- Heyman, Jacques. (1995b). "The mechanics of masonry stairs." *Structural Studies of Historical Buildings. Volume 2: Dynamics, Repairs and Restoration*, Southampton: Computational Mechanics Publications, pp. 259-65.
- Heyman, Jacques (1999). *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera/CEHOPU.
- Huerta Fernández, Santiago (1990). «Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas en España, ca. 1500- ca. 1800.» Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Arquitectura.
- Huerta Fernández, Santiago (1999). «The medieval 'scientia' of structures: the rules of Rodrigo Gil de Hontañón. » *Omaggio a Edoardo Benvenuto*. Génova: Facoltà di Architettura.
- Kooharian, Anthony (1953). «Limit Analysis of Voussoir (Segmental) and Concrete Arches.» *Proceedings of the American Concrete Institute* 49: 317-28.
- San Nicolás, Fray Lorenzo (1639). *Arte y Uso de Arquitectura. Primera parte*. Madrid: s.i.

7. Documentación fotográfica



1



2



3



4



6



5



7



8



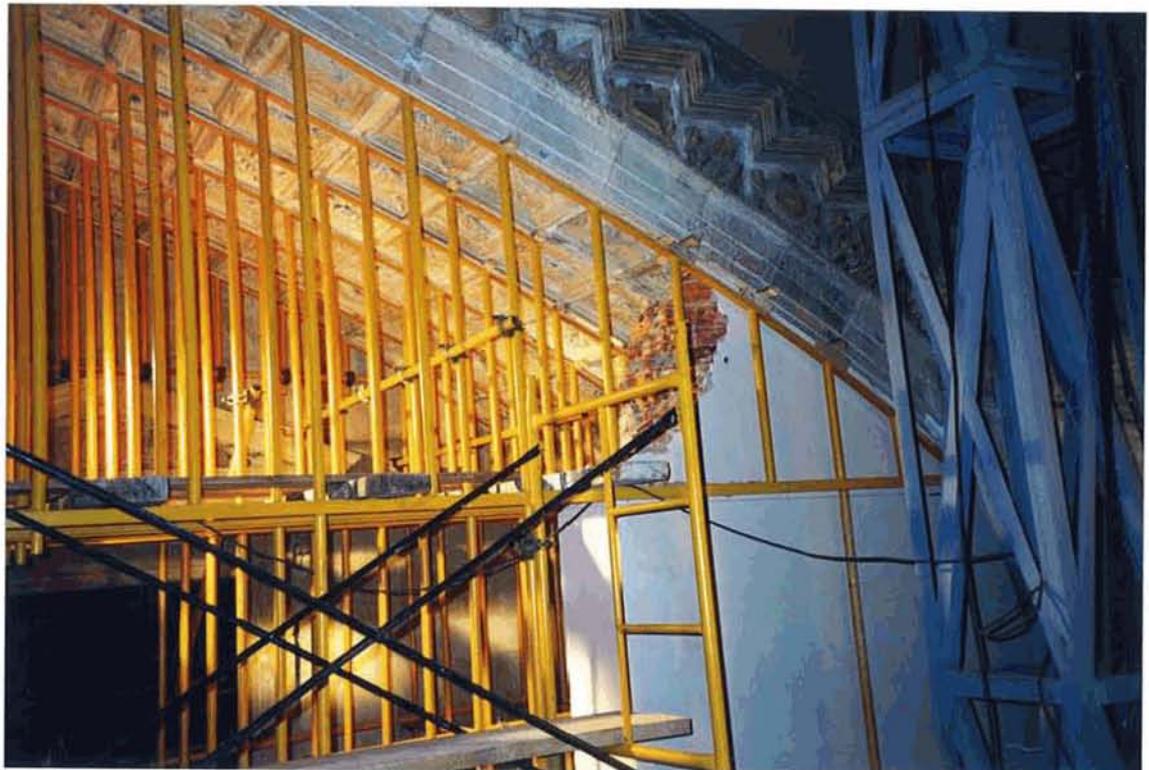
9



10



11



12



14



13



15



16



17



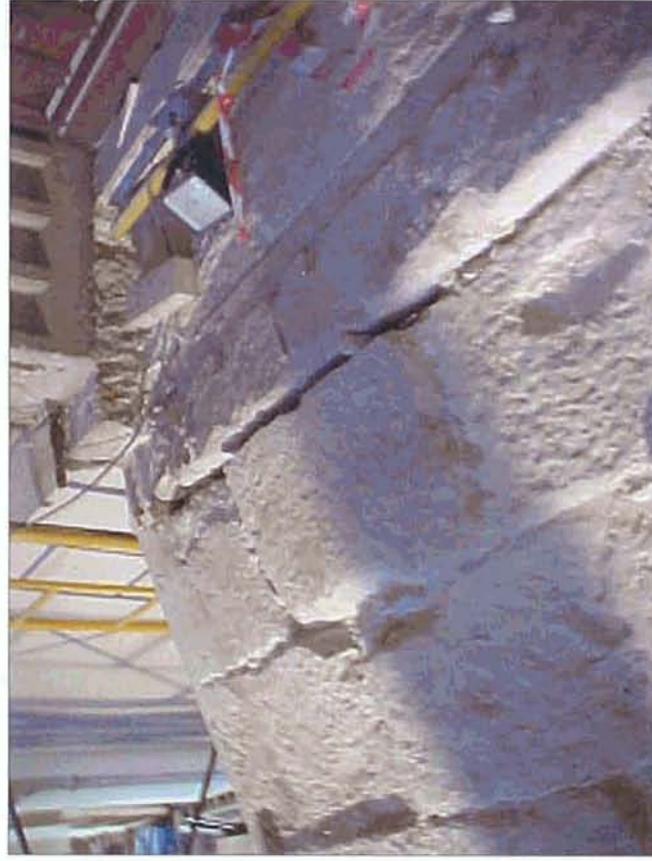
18



19



20



21



22



24



26



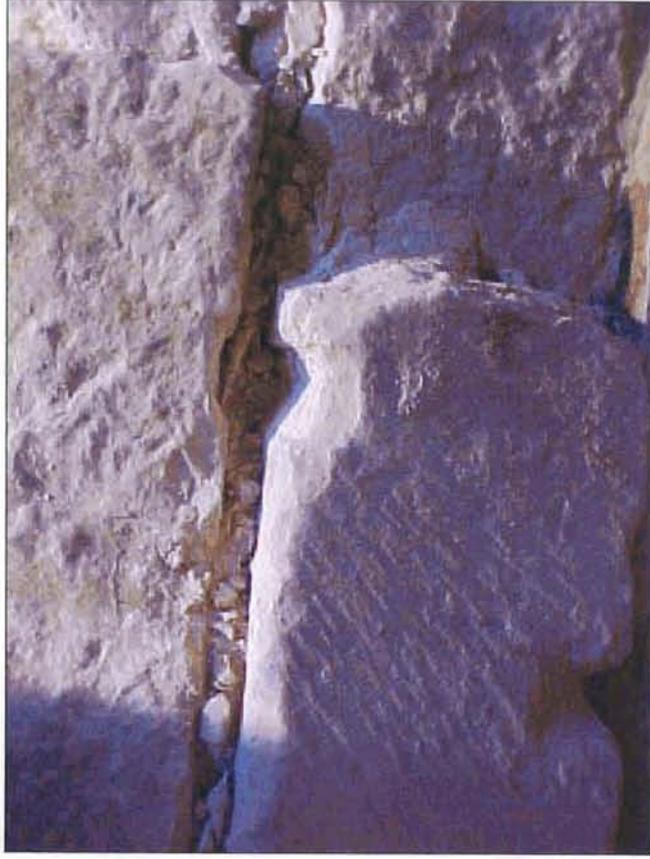
23



25



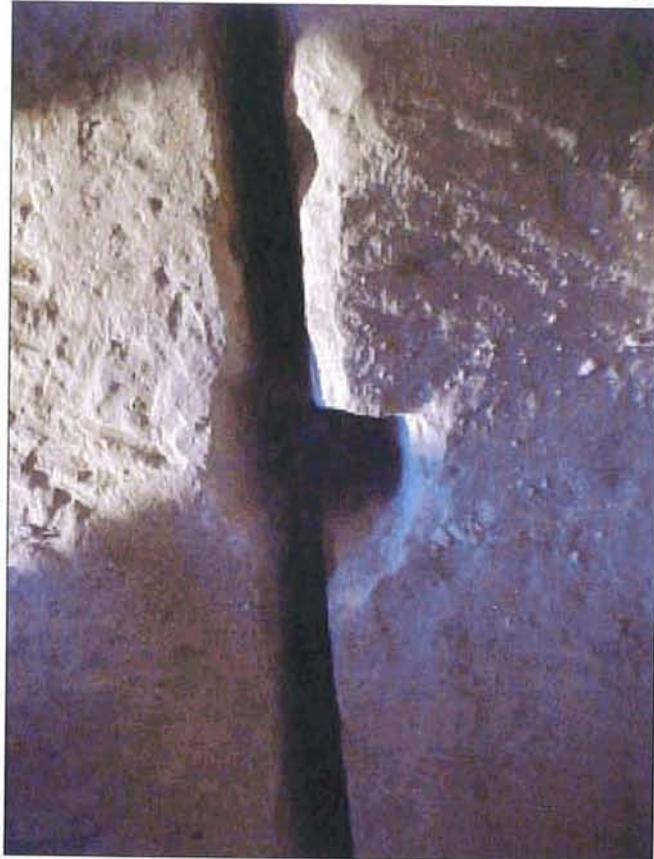
27



28



29



30



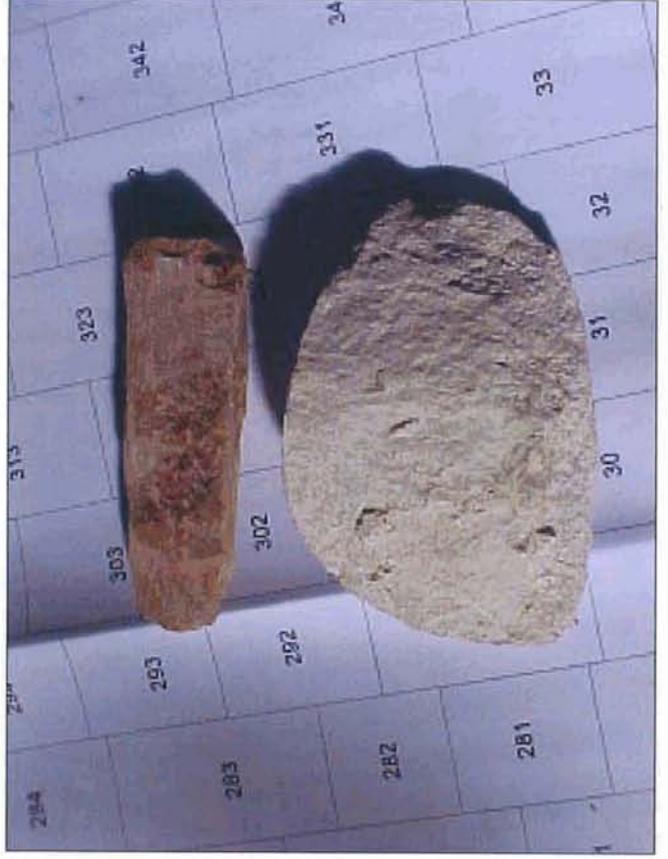
31



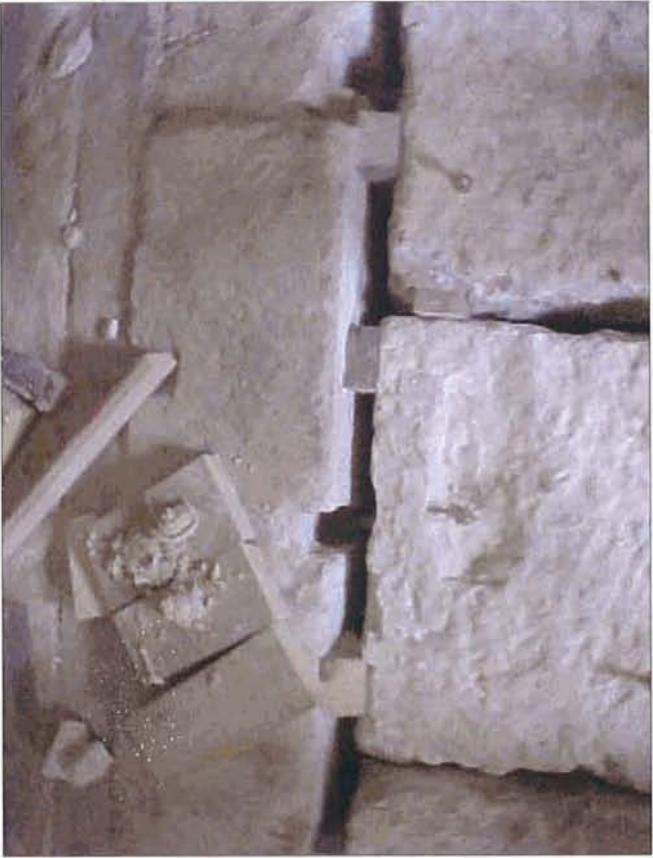
33



32



34



36



38



35



37



39



40



41



42

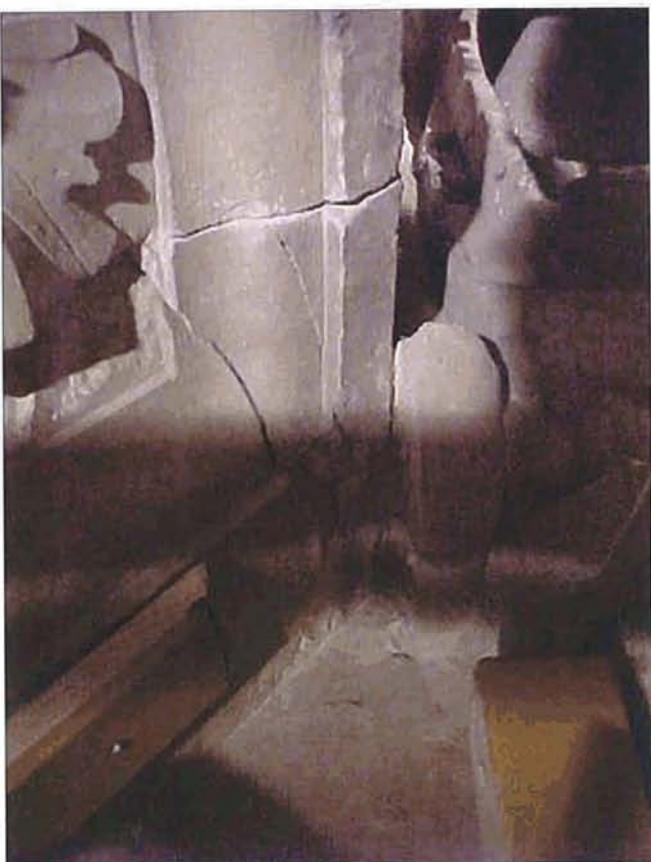
44



46



43



45





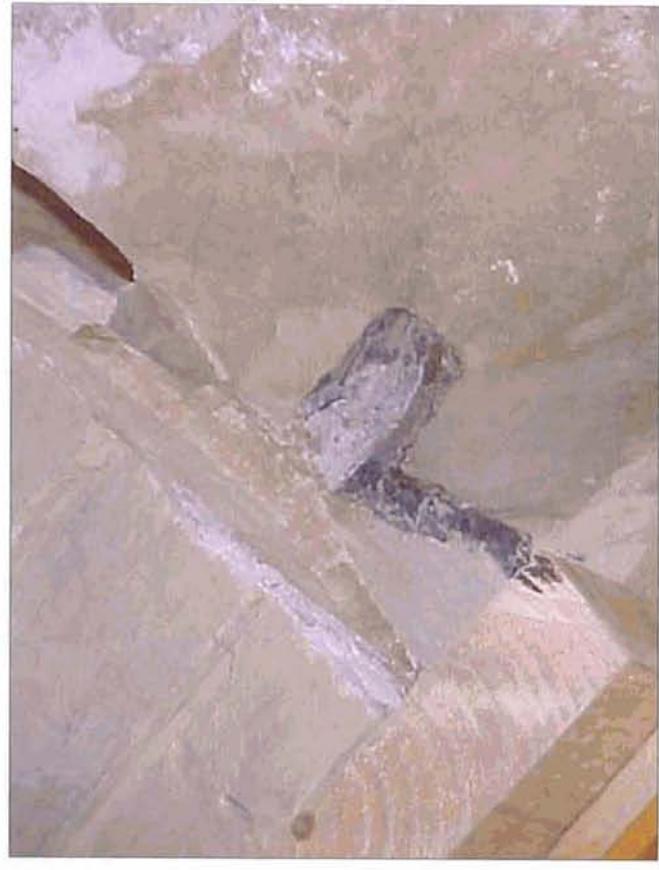
47



48



49



50

52



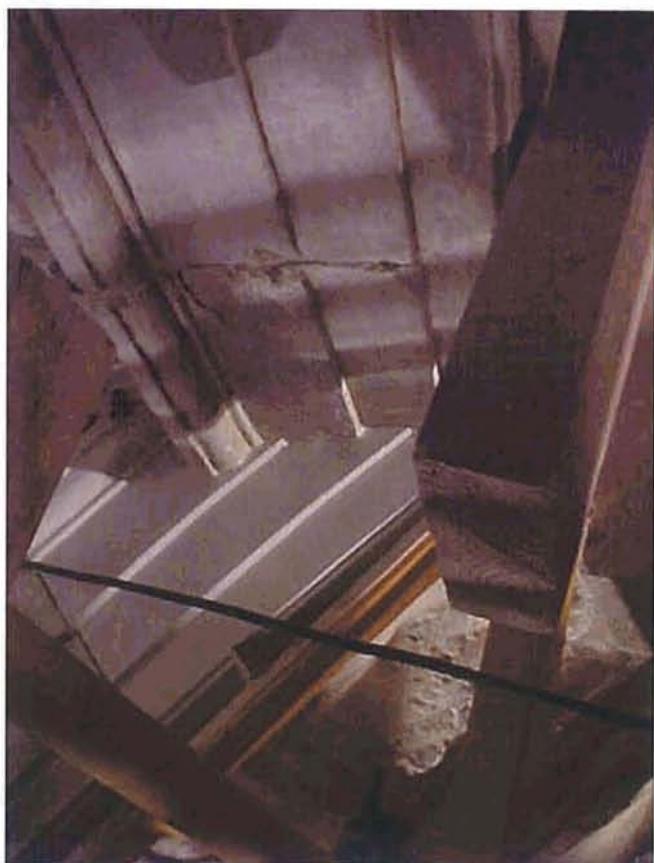
54



51

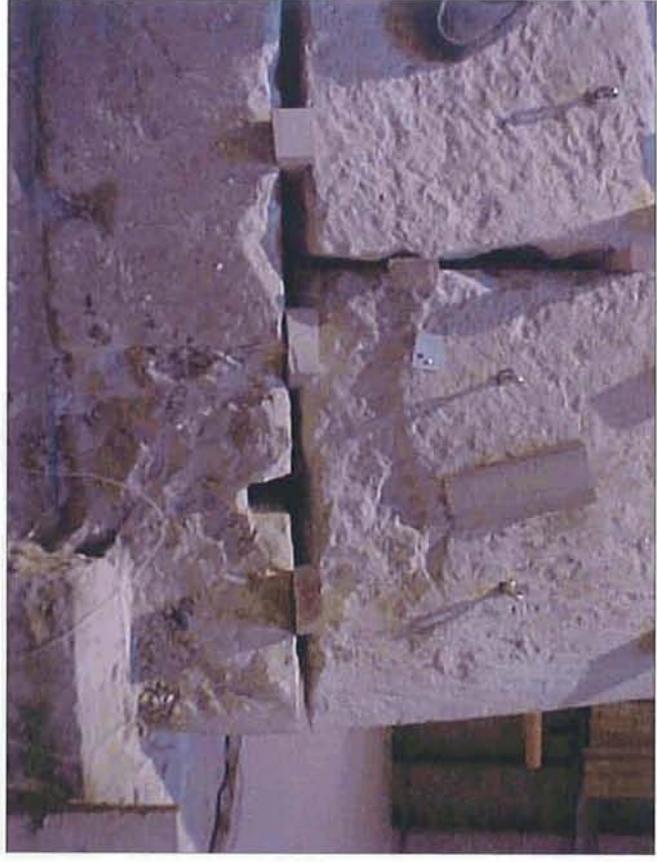


53





55



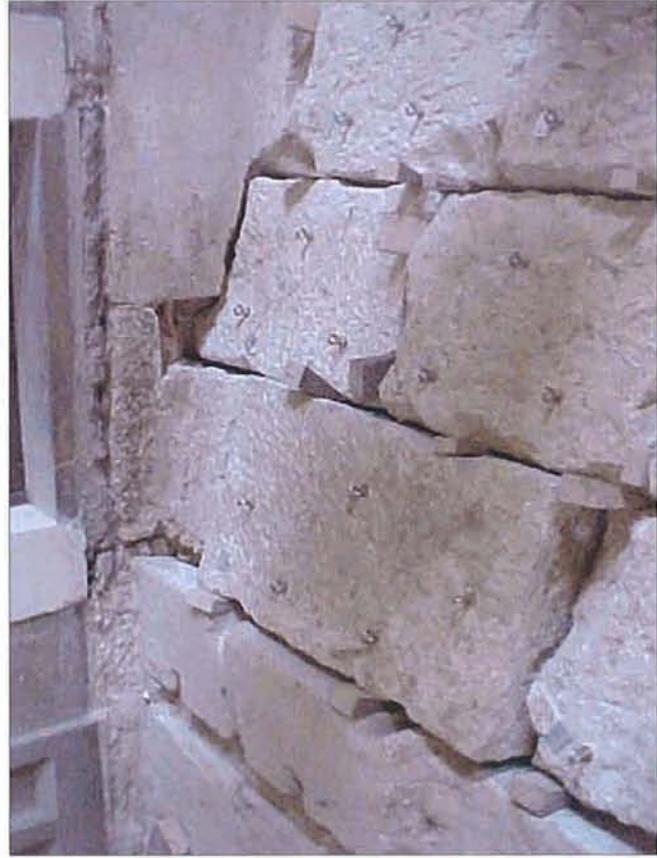
56



57



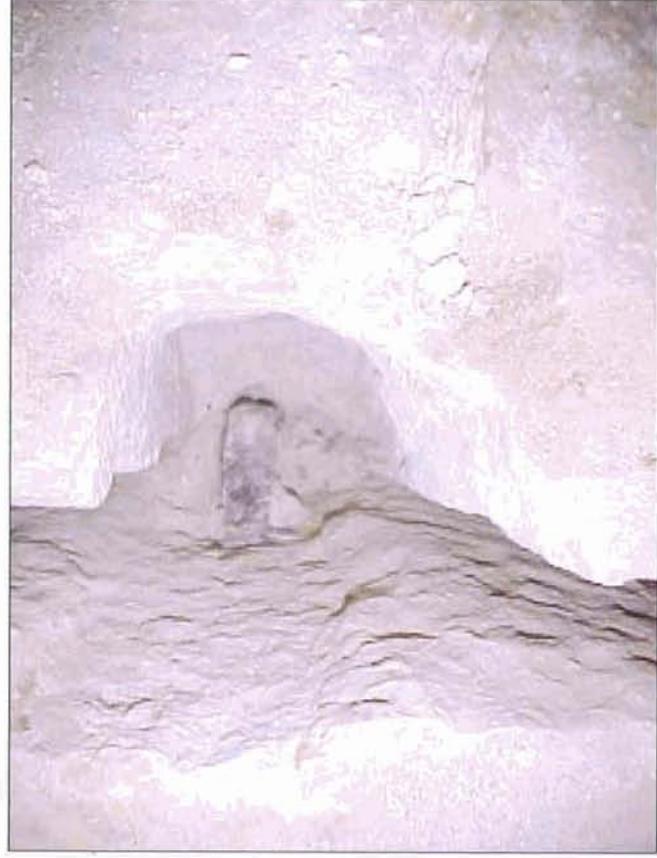
58



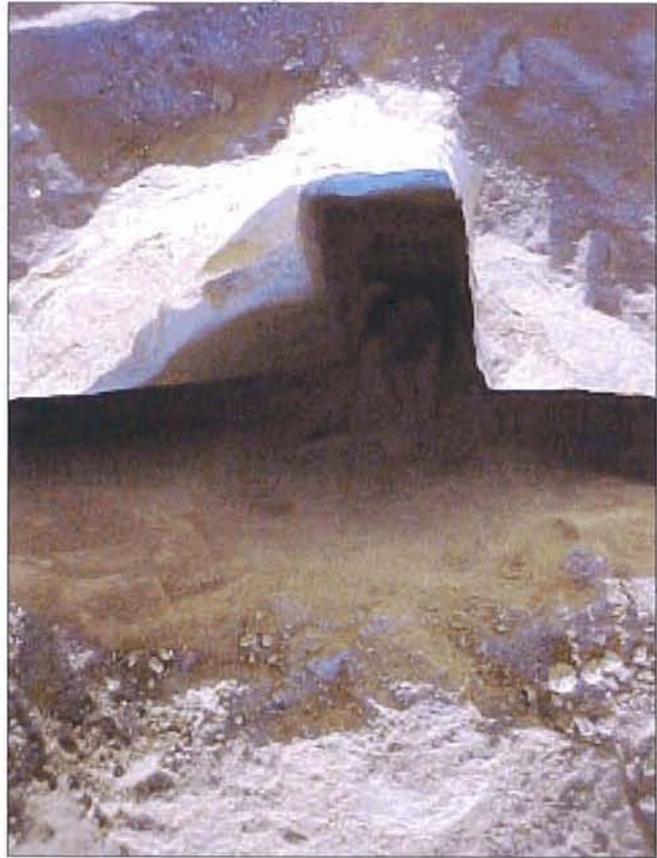
59



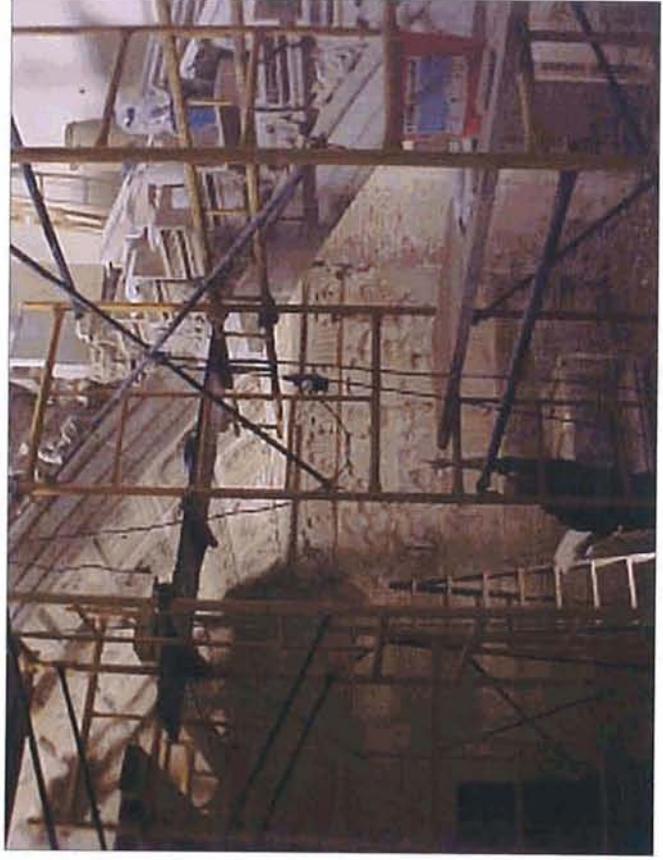
61



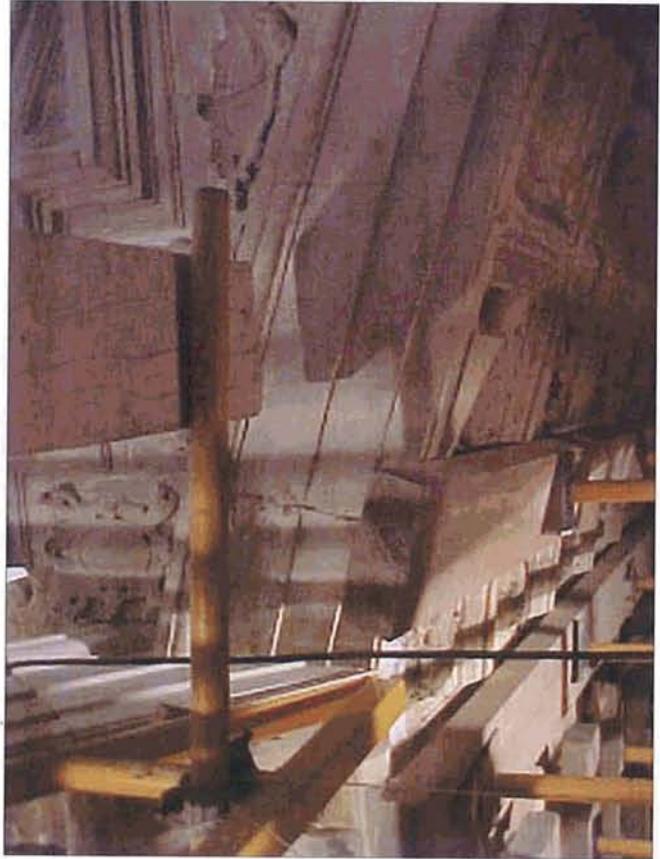
60



62



66



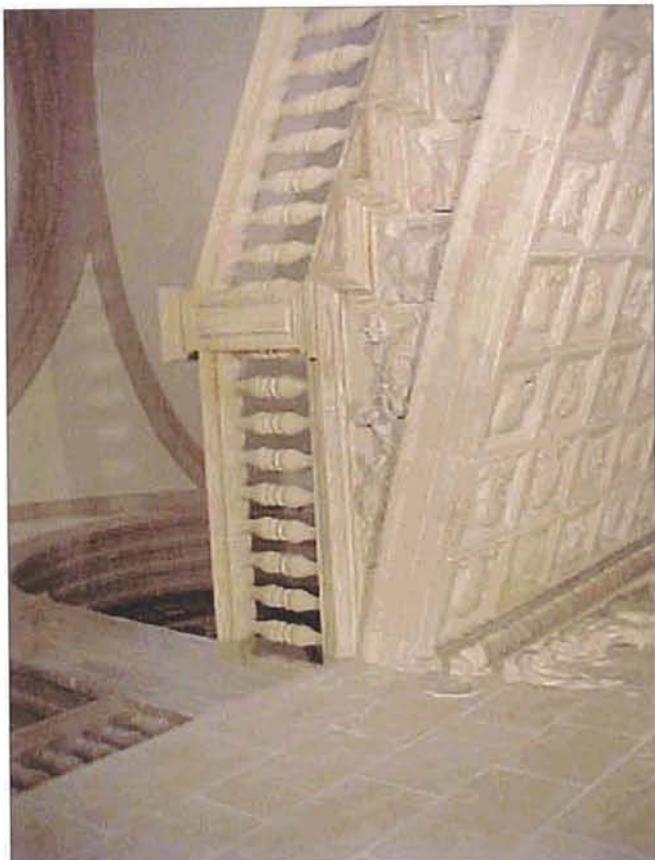
65



64



63





71



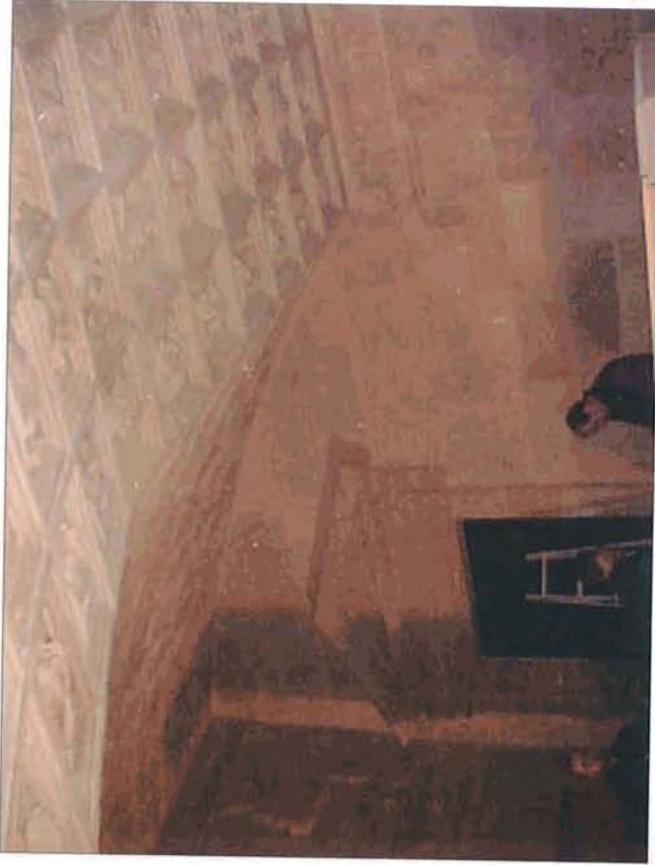
72



73



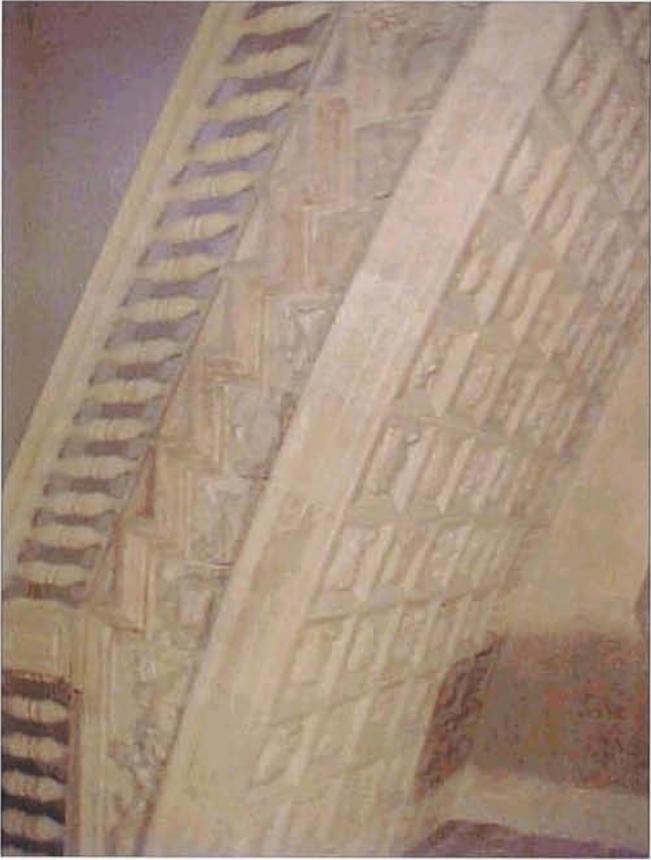
74



76



78



75



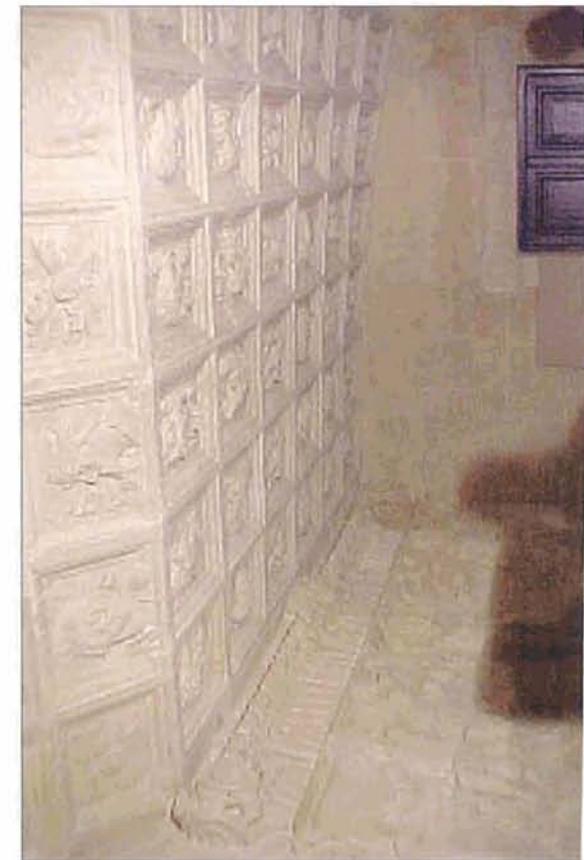
77



79



80



81



82



83



84



85



86