

LA FACHADA TRASVENTILADA DE PIEDRA

EVOLUCIÓN CONCEPTUAL Y CONSTRUCTIVA A PARTIR DEL MURO COMPUESTO



ROCÍO GALLEGO BLÁZQUEZ

MÁSTER DE INVESTIGACIÓN EN ARQUITECTURA. TRABAJO FIN DE MÁSTER. ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE VALLADOLID. DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS, INGENIERÍA DEL TERRENO Y MECÁNICA DE LOS MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE LAS ESTRUCTURAS. DIRECTORA: MARÍA SOLEDAD CAMINO OLEA
SEPTIEMBRE 2014

LA FACHADA TRASVENTILADA DE PIEDRA

EVOLUCIÓN CONCEPTUAL Y CONSTRUCTIVA A PARTIR DEL MURO COMPUESTO

ROCÍO GALLEGO BLÁZQUEZ

DIRECTORA: MARÍA SOLEDAD CAMINO OLEA

MÁSTER DE INVESTIGACIÓN EN ARQUITECTURA
TRABAJO FIN DE MÁSTER
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE VALLADOLID
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS, INGENIERÍA DEL TERRENO Y MECÁNICA DE LOS MEDIOS
CONTINUOS Y TEORÍA DE LAS ESTRUCTURAS
SEPTIEMBRE 2014

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría expresar mi sincero agradecimiento a todas aquellas personas que de una manera u otra me han ayudado en la realización del presente trabajo.

En primer lugar a mi tutora, Dña. María Soledad Camino Olea, por sus consejos y ánimos, así como su constante ayuda a lo largo del desarrollo del trabajo.

A D. Fernando Hernández Izquierdo, archivista del Archivo Histórico de Patentes, por poner a mi disposición toda la información solicitada.

Al estudio de arquitectura de D. Francisco Mangado, por toda la documentación cedida.

A Strow sistemas, y especialmente a su arquitecto D. Martín Loureiro Prego, por los documentos e información enviados.

A D. Aurelio de Grado y Dña. Estefanía Fernández Prieto, del Centro Tecnológico Pinacal Inser, por la ayuda ofrecida y el aporte de bibliografía y documentación.

A todas aquellas personas que me han aportado conocimientos de interés para el desarrollo del trabajo.

A mi familia y amigos, en especial a mi hermano David y a mi madre María Teresa, por sus constantes ánimos y cariño.

A Alberto, apoyo emocional y compañero a lo largo de todos los viajes y visitas realizadas.

Quisiera agradecer especialmente a mi padre, Ángel Luis Gallego Añez, consejero y maestro a lo largo de mi vida, por toda su ayuda, consejos, enseñanzas y documentación prestada a lo largo de todo el desarrollo del trabajo.

A mis padres...

RESUMEN

La piedra siempre ha sido un material muy utilizado en las construcciones. Durante siglos su utilización se ha realizado fundamentalmente a base de sillares o mampuestos que formaban muros masivos en los que la piedra trabajaba estructuralmente. Desde que se abandonaron estos sistemas, hasta el actual sistema de fachada trasventilada, se ha pasado al revestimiento a base de placas delgadas de piedra en un breve espacio de tiempo. La piedra ha sufrido un cambio radical tanto en su utilización, como en su funcionamiento y necesidades.

Por ello, el presente trabajo centra su estudio en el análisis de la fachada trasventilada de piedra. Para ello, se analizarán conceptual y constructivamente tanto el desarrollo de los distintos sistemas constructivos que ha derivado en la aparición de la fachada trasventilada como los medios tecnológicos que lo han hecho posible.

ABSTRACT

Stone has always been a widely used construction material. For centuries its use has always been fundamentally based on blocks of stone or masonry forming massive walls where the stone worked structurally. Since these systems were abandoned until the current system of ventilated facade it has passed to use facings based on thin stone panels in a short space of time. Stone has undergone a radical change in its use, behavior and needs.

Therefore, this work focused its study on the analysis of the ventilated facade of stone. The work will analyse conceptual and constructively the building systems that have resulted in the emergence of the ventilated facade, and the technological means that have made it possible.

ÍNDICE

•	INTRODUCCIÓN	
•	OBJETIVOS	
•	DESARROLLO	
1.	LA PIEDRA NATURAL	9
1.1	Definiciones	9
1.2	Clasificación geológica	11
1.2.1	Clasificación geológica	11
1.2.2	Clasificación técnico-comercial	11
1.2.3	Clasificación según normas UNE	15
1.2.4	Clasificación según normas ASTM	15
2.	EXTRACCIÓN	17
2.1	Extracción manual	19
2.1.1	Las primeras canteras: Egipto y Grecia	19
2.1.2	La explotación a gran escala en Roma	20
2.1.3	La extracción entre los siglos V y XVII: etapas de transición	27
2.2	La extracción mecánica desde el siglo XVII	27
2.2.1	La extracción entre los siglos XVII y XVIII	27
2.2.2	La extracción durante el siglo XIX	29
2.2.3	La extracción durante el siglo XX	31
2.2.4	La extracción hoy en día	35
2.3	Conclusiones parciales	37
3.	TRANSFORMACIÓN: CORTE Y LABRA	39
3.1	Corte	41
3.1.1	Método de cuñas	41
3.1.2	Método de aserrado	43
3.1.3	El procedimiento actual de corte	55
3.1.4	Conclusiones parciales	58
3.2	Labra	59
3.2.1	Introducción	59
3.2.2	Desde la antigüedad hasta el siglo XIX	59
3.2.3	La labra mecánica desde finales del siglo XIX	73
3.2.4	Conclusiones parciales	77
4.	TRANSPORTE Y COLOCACIÓN EN OBRA	79
4.1	Transporte	81
4.1.1	El transporte hasta el siglo XIX	81
4.1.2	El transporte desde el siglo XX	87
4.2	Colocación en obra	89
4.2.1	La colocación hasta el siglo X	89

4.2.2	La colocación entre los siglos XI y XIX	91
4.2.3	La colocación a partir del siglo XX	97
4.3	Conclusiones parciales	97
5.	CONSTRUCCIÓN DE LA FACHADA	99
5.1	Muro compuesto	101
5.1.1	Definición	101
5.1.2	Muro compuesto egipcio	101
5.1.3	Muro compuesto griego	103
5.1.4	Muro compuesto romano	105
5.1.5	Muro compuesto entre los siglos VI y XVI	111
5.1.6	Conclusiones parciales	114
5.2	Muro mixto	117
5.2.1	Muro renacentista	117
5.2.2	La fachada en los siglos XVIII y XIX	119
5.2.3	Conclusiones parciales	127
5.3	Muro chapado	129
5.3.1	Antecedentes. Primeros chapados romanos	129
5.3.2	El legado de Roma. Los chapados durante el Imperio bizantino	131
5.3.3	Recuperación del aplacado delgado en el siglo XIX. Contexto	131
5.3.4	La ruptura con la tradición. Victor Horta	132
5.3.5	Los defensores del concepto de revestimiento	133
5.3.6	La expresión de la fijación a principios del s. XX	135
5.3.7	Chapados amarterados	145
5.3.8	Fijación mediante anclajes metálicos	153
5.3.9	Conclusiones parciales	168
5.4	Fachada trasventilada	171
5.4.1	Primeras fachadas trasventiladas	171
5.4.2	Formación de la fachada trasventilada	177
5.4.3	Construcción de la fachada trasventilada de piedra	177
5.4.3-1	La importancia de la cámara de aire	177
5.4.3-2	El aislamiento continuo	178
5.4.3-3	Materiales	179
	Piedra natural	179
	El soporte	181
	Los anclajes	183
5.4.3-4	Cálculo	197
5.4.4	Modulación y diseño	201
5.4.5	Conclusiones parciales	215
6.	CONCLUSIONES	223

- **ÍNDICE DE FIGURAS**
- **BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES**

INTRODUCCIÓN

La piedra natural siempre ha tenido un especial atractivo para el arquitecto. Se trata de un material que tanto por sus propiedades físicas y mecánicas, como por sus amplias cualidades estéticas ha sido ampliamente utilizado en la edificación a lo largo de la historia.

Al margen de las épocas y los estilos arquitectónicos, la piedra es el material con el que se han construido una buena parte de los monumentos y edificaciones singulares del patrimonio arquitectónico.

La utilización de la piedra natural en fachadas ha evolucionado en gran medida. Sin embargo, esta evolución no ha sido constante, produciéndose de manera desigual según la época y las circunstancias. Tanto la técnica de la construcción de fachadas con piedra como los medios tecnológicos que la han hecho posible han evolucionado enormemente a lo largo del tiempo, permitiendo que se adaptasen a los nuevos tiempos y estilos arquitectónicos, adquiriendo especial importancia actualmente, en una época en la que están apareciendo una gran cantidad de materiales novedosos fruto de la industria.

Desde que se abandonó la construcción muraria de la piedra, hasta los actuales sistemas trasventilados la piedra ha sufrido un cambio radical en su utilización. Tras la construcción a lo largo de muchos siglos mediante sillares y mampuestos, se ha pasado al revestimiento a base de placas delgadas, y su papel estructural se ha ido reduciendo hasta llegar a ser prácticamente inexistente en la arquitectura contemporánea.

Nos encontramos en un momento en el que la utilización de la piedra ha adquirido una nueva dimensión, al realizarse mediante la exploración del propio material, de sus posibles texturas, escala, colores, composición, luces y sombras... Esto nos da la verdadera dimensión del abanico de posibilidades que ha surgido mediante la búsqueda de soluciones imaginativas y el aprovechamiento de las ventajas y novedades que permitía la técnica.

En este escenario cobra una especial relevancia el uso de la piedra aplicado al sistema de fachada trasventilada, siendo el estudio de la misma objeto del presente trabajo.

OBJETIVOS

El presente trabajo se centra en el análisis de la fachada trasventilada de piedra, tanto de su aparición como de su construcción y posibilidades de diseño. Generalmente, su inicio se explica desde el punto de vista de la aparición de la fachada trasventilada genérica a través de conceptos como el “rain screen”. Sin embargo, en este caso se pretende analizar este proceso a través del estudio de los distintos sistemas constructivos en piedra.

Se realizará, por tanto, un análisis de la evolución que se ha producido desde la construcción a base de muros compuestos, sistema a partir de cual empiezan a aparecer conceptos de interés para el presente estudio. Para ello, se estudiarán descriptivamente, y gráficamente a través de ejemplos, las distintas técnicas que se han ido desarrollando y han derivado en el progresivo adelgazamiento y cambio de la fachada de piedra. De este modo, se pretende analizar los motivos y hechos relevantes en el proceso de aparición y desarrollo de la fachada trasventilada de piedra.

Por otro lado, se analizará este sistema de fachada en cuanto a sus ventajas, materiales y construcción, que nos permitirá conocer su funcionamiento frente al de los anteriores sistemas constructivos. También se llevará a cabo un estudio de la evolución de sus diseños y despieces, a través de ejemplos singulares, que permitirá conocer su potencial, así como las tendencias compositivas de la arquitectura contemporánea.

Por otra parte, para comprender esta evolución es necesario conocer la manera en la que se trabaja la piedra desde el yacimiento en el que se encuentra hasta su utilización en la construcción, y que constituye todo un proceso de transformación formado por varias fases. Tanto los sistemas de extracción y corte de la piedra, como la manera en que ésta se trabaja, así como los sistemas de elevación y transporte, están directamente relacionados con el proceso de construcción de la fachada en cada época. Todas estas fases han sufrido también una gran transformación, especialmente a raíz de la revolución industrial y la incorporación de las máquinas. Por tanto, también tiene especial interés el análisis de estos procesos, así como de su evolución, lo cual nos permitirá comprobar la implicación de estos avances tecnológicos en la propia evolución de la fachada.

1.1 DEFINICIONES

“**Piedra natural**” es el término que se utiliza generalmente para referirse a las piedras naturales utilizadas en construcción. La piedra natural se refiere, por tanto, a todas las rocas que, después de un proceso de elaboración que incluye tanto la extracción de la propia roca, como la transformación posterior necesaria, son aptas para ser utilizadas como material noble de construcción.

- En España el término de **Piedra Natural** incluye tanto a la denominado **Piedra de Cantería** o Piedra Natural de Construcción como a las denominadas **Rocas Ornamentales**, más exigentes en cuanto a su acabado. ¹

Según el diccionario de la RAE, “**Piedra**” es cualquier trozo de roca tallado para la construcción.

- En Europa se utiliza el término **Piedra Natural** para referirse a rocas de construcción cuando se habla en términos técnico-comerciales. ²
- En Norteamérica, se emplea el término de **Piedra Dimensional** (*dimension stone*) como al equivalente de Piedra Natural y especifica la naturaleza de los materiales, siendo requerimientos habituales acordados por productores y consumidores el color, tamaño de grano, diseño y acabado superficial. ³
- Si se utiliza terminología geológica puede ser acertado el término de **roca dimensional** (como equivalente de *dimension stone*) para referirse al material, esto es, a las rocas susceptibles de usarse como piedra natural. ⁴

Por ello, el término de “piedra natural” es aplicable tanto a al material como al producto de construcción. En cuanto a material cabe entenderlo como la materia prima constituyente, mientras que en el producto esta materia ya ha sufrido un proceso de elaboración dándole forma, y en algún caso, mejorando las propiedades del material original. ⁵

El material “piedra natural” o “**piedra**” como habitualmente se designa en España, se puede clasificar de acuerdo a criterios técnico-comerciales en función de sus propiedades para la elaboración y de acabado, las cuales condicionan su procesado y afectan a las propiedades del producto final. Aunque existen algunas concordancias terminológicas, no se emplean criterios geológicos más que cuando se hace especial mención a la naturaleza del material.

¹ Instituto valenciano de la edificación, instituto tecnológico de la construcción (2010). Guía de la piedra natural. Generalitat Valenciana, pág. 133.

² *Ibidem*.

³ *Ibidem*.

⁴ *Ibidem*.

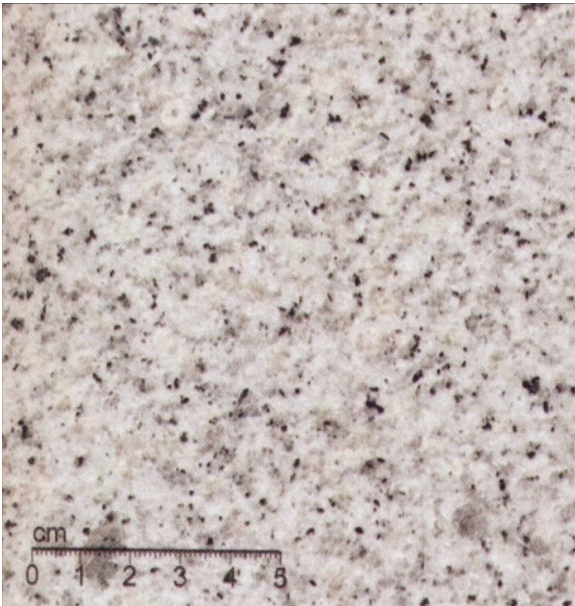
⁵ Francisco Javier Cerdeño del castillo, et al. (2007). La piedra natural en la arquitectura contemporánea. Aitemin, Centro Tecnológico, Toledo.



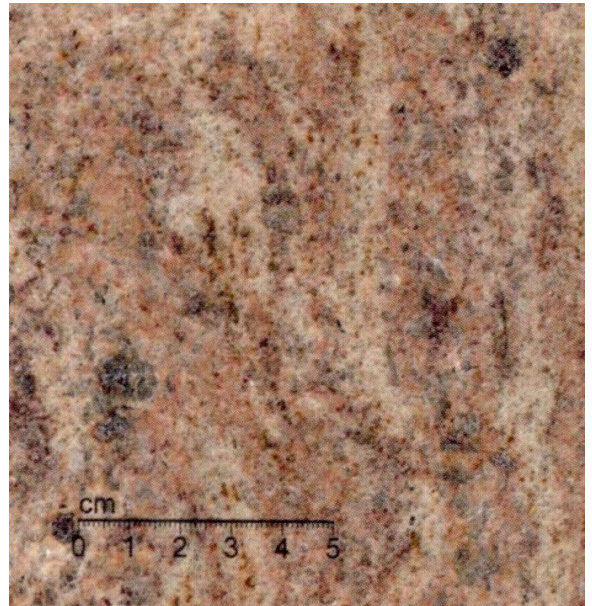
1.1



1.2



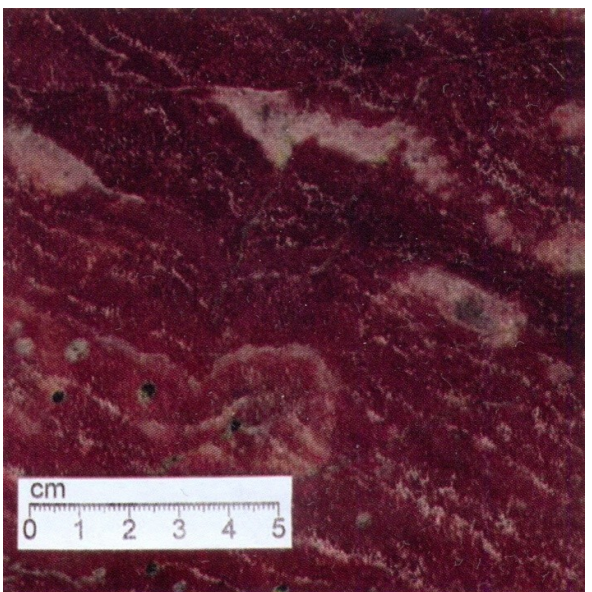
1.3



1.4



1.5



1.6

1.2 CLASIFICACIÓN

Sin embargo, ni la terminología ni la clasificación están claramente definidos mediante unos puntos de referencia universalmente aceptados, sino que están muchas veces abiertos a interpretaciones subjetivas. En la normativa europea no existen valores de referencia que permitan una clasificación estricta de la piedra natural, aunque se establecen ciertos criterios de acuerdo a la dureza del material, composición mayoritaria o aptitud al pulido y labrado. Sin embargo, la normativa ASTM establece unos criterios que permiten una clasificación más objetiva.⁶

1.2.1 CLASIFICACIÓN GEOLÓGICA

En las ciencias de la Tierra, los distintos grupos de rocas se clasifican de acuerdo con su origen y según su composición mineralógica y química. Las rocas pueden consistir en agrupaciones de una o más especies minerales. Algunas veces la diferencia entre estos grupos de rocas debe únicamente a mínimas variaciones en la composición química o en las condiciones de presión o temperatura. Se dividen en tres grupos principales de acuerdo con su origen:⁷

- Sedimentarias: formadas a partir de la precipitación de soluciones y de productos de la erosión de las rocas, aunque éstos tienen que estar cementados y compactados formando rocas sólidas.
- Ígneas: formadas por el enfriamiento y cristalización del magma procedente del interior de la Tierra.
- Metamórficas: formadas por efecto de la enorme presión y temperatura sobre las rocas sedimentarias o a partir de rocas ígneas transformadas y vitrificadas.

1.2.2 CLASIFICACIÓN TÉCNICO-COMERCIAL

Comercialmente la piedra natural se clasifica atendiendo a criterios técnicos, basados fundamentalmente en la aptitud a procesos de elaboración (labrado, cortado y pulido) y su durabilidad.

La clasificación más frecuentemente utilizada es la siguiente:⁸

- Mármol. Roca compuesta principalmente de minerales con una dureza entre 3 y 4 de la escala de Mohs. Todas las rocas carbonatadas, tales como el mármol (*figura 1.1*), caliza (*figura 1.2*), dolomía, ónice...pertenece a esta categoría.

1.1
Mármol Crema Marfil
Instituto Valenciano de la Edificación (2010)

1.2
Caliza Crema Europa
Instituto Valenciano de la Edificación (2010)

1.3
Granito Gris
Instituto Valenciano de la Edificación (2010)

1.4
Gneis Rojo
Instituto Valenciano de la Edificación (2010)

1.5
Pizarra
Instituto Valenciano de la Edificación (2010)

1.6
Cuarcita
Instituto Valenciano de la Edificación (2010)

⁶ Ibídem

⁷ Theodor Hugues, Ludwig Steiger, Johann Weber (2008). Piedra natural. Tipos de piedra. Detalles. Ejemplos. Gustavo Gili, Barcelona, pág. 10

⁸ Francisco Javier Cerdeño del castillo, et al. (2007). La piedra natural en la arquitectura contemporánea. cit. págs. 24-26

COMERCIAL		CIENTÍFICA					
		Composicional	Genética				
			Rocas Igneas		Rocas Metamórficas	Rocas Sedimentarias	
			Plutónicas	Volcánicas			
GRANITO	Granito Claro	Rocas silíceas	Granitos Granodioritas Pegmatitas		Gneises		
	Granito Negro		Gabros Monzonitas Tonalitas Doleritas Peridotitas				
	Basalto			Andesitas Basaltos			
PIZARRA					Esquistos Filitas Pizarras		
MÁRMOL	Rocas verdes			Serpentinas Anfibolitas Peridotitas			
	Mármoles		Rocas carbonatadas			Mármoles	
	Calizas Travertinos					Calizas Dolomías Travertinos	
OTRAS ROCAS	Arenisca	Otras rocas				Areniscas Conglomerados	
	Alasbastro					Yeso Anhidrita Alabastro	
	Pumita			Ignimbritas Tobas Pumitas			
	Cuarcita					Cuarcitas	

- Granito. Roca compuesta de un aglomerado de cristales visibles, cuya dureza es 7 u 8 en la escala de Mohs. En la jerga comercial los granitos incluyen: granito (*figura 1.3*), sienita, dolerita, diorita, gneis (*figura 1.4*)...
- Pizarra. La pizarra (*figura 1.5*) es una roca que se puede exfoliar fácilmente en láminas delgadas por la pizarrosidad, para producir placas de caras aproximadamente paralelas. La pizarrosidad es un tipo especial de foliación generada por metamorfismo de grado muy bajo a bajo y por acortamiento tectónico intenso.
- Otras rocas como el alabastro, la cuarcita (*figura 1.6*) y algunas areniscas se suelen incorporar dentro de otro grupo independiente.

Al conjunto de estos 4 primeros grupos se le suele denominar piedras ornamentales.

- Piedra de cantería. En general, cualquier roca que no admite pulido se considera una “piedra de cantería” en el uso comercial. Sin embargo, como piedra de cantería se comercializan muchas piedras que admiten pulido como algunas areniscas, basalto, pizarra, gneis y algunos granitos.

En la (*figura 1.7*) se muestra una tabla en que aparece reflejada la correspondencia entre la clasificación geológica y la técnico-comercial.

Las principales propiedades de la piedra natural que condicionan la técnica de elaboración y de las que depende la clasificación antes mencionada son: ⁹

- Lajosidad: permite un tipo de herramienta de trabajo que aprovecha la capacidad de separarse en lajas cuando se incide según un plano de debilidad intrínseco. Es el caso típico de las pizarras y de las pizarras carbonatadas.
- Dureza: condiciona el tipo de maquinaria y de herramienta de corte. Da lugar a tres grandes grupos de familias de piedra natural:
 - Rocas duras, formado por las silíceas (granitos, cuarcitas y areniscas cuarzosas).
 - Rocas de dureza moderada carbonáticas (mármoles y calizas).
 - Rocas blandas (alabastro y areniscas y calizas porosas).
- Brillo del material pulido. Condiciona el método de acabado superficial y aporta valor añadido al material. Se reconoce esta propiedad a los granitos y a los mármoles.

⁹ Instituto valenciano de la edificación, instituto tecnológico de la construcción (2010). cit. págs. 16-17.

CLASIFICACIÓN TÉCNICO-COMERCIAL Y CARACTERÍSTICAS MÁS RELEVANTES DE CADA GRUPO				
DENOMINACIÓN TÉCNICO-COMERCIAL	CARACTERÍSTICAS			
	COMPOSICIÓN QUÍMICA MAYORITARIA	DUREZA MOHS DE CONSTITUYENTES MAYORITARIOS	APTITUD AL PULIDO	LAJOSIDAD
Pizarra	Silíceas	-	-	SI
Granito		> 5	SI	NO
Areniscas y cuarcitas		> 5	NO	NO
Mármol	Calcáreas	3 - 4	SI	NO
Calizas		3 - 4	NO	NO
Alabastro	Sulfatos	< 3	-	-

1.8

CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES DE PIEDRA NATURAL SEGÚN NORMATIVA ASTM							
MATERIAL	NORMA GENÉRICA	SUBDIVISIÓN	CUARZO (%)	ABS. AGUA (%) ⁽¹⁾	DENSIDAD (kg/m ³) ⁽¹⁾	MOD. FLEX (Mpa) ⁽²⁾	
			≥	<	>	≥	
PIZARRAS	C629-03	(P1) Interior		0,45		49,6 (+) 37,9 (=)	
		(P2) Exterior		0,25		62,1 (+) 49,6 (=)	
	C406-06	Pizarra de techar	S1		0,25		
			S2		0,36		
S3				0,45			
GRANITOS	C615-03	-	-	0,40	2560	10,34	
ARENISCAS Y CUARCITAS	C616-03	I. Arenisca	60	8	2003	2,4	
		II. Arenisca cuarcítica	90	3	2400	6,9	
		III. Cuarcita	95	1	2560	13,9	
MARMOLES	C503-03	I. Calcítico	-	0,2	2595	7	
		II. Dolomítico	-	0,2	2800		
		III. Serpentina ⁽³⁾	-	0,2 (E) 0,6 (I)	2690		
		IV. Travertino ⁽⁴⁾	-	2,5	2305		
CALIZAS	C568-03	I. Densidad baja	-	12	1760	2,9	
		II. Densidad media	-	7,5	2160	3,4	
		III. Densidad alta	-	3	2560	6,9	
ALABASTRO	-	-	-	-	-	-	

1.9

1.2.3 Clasificación según normas UNE

En España existe una tradición tanto en la denominación comercial como en la clasificación de los materiales de piedra natural que proviene de antiguas normas ya derogadas. De ellas, sólo queda en vigor la norma UNE-EN 12326-1:2004, para el caso de pizarras.

De modo genérico las normas europeas de piedra natural no definen el material, sino los productos. Las únicas normas en las que se definen materiales son la norma UNE-EN 12440 "Denominación de la piedra natural" y la UNE-EN 12670 "Terminología de la piedra natural".

En la normativa europea no existen valores de referencia que permitan una clasificación estricta de la piedra natural, aunque se establezcan ciertos criterios de acuerdo a dureza del material, composición mayoritaria o aptitud al pulido y labrado (figura 1.8).

1.2.4 Clasificación según normas ASTM

Los únicos criterios internacionalmente aplicables para las agrupaciones relevantes de piedra natural de uso extensivo se recogen en las normas ASTM. En la *figura 1.8* se recogen a modo de valores de referencia las características principales para la clasificación de materiales en los distintos grupos de piedra natural que establecen las normas. (*figura 1.9*)¹⁰

El profesor José M. Fernández París elaboró una tabla de especificaciones a partir de las normas ASTM, aportando criterios para la aceptación o rechazo de las piedras según sus características técnicas.¹¹

La piedra natural es un material heterogéneo, con unas características intrínsecas muy diferentes según la tipología. La elección del tipo de piedra para la construcción de una fachada va a ser, por tanto, de suma importancia para su correcto funcionamiento, en función de los requerimientos de resistencia y durabilidad que se necesiten.

1.8
Clasificación basada en criterios técnicos y comerciales no necesariamente coincidentes con las aceptaciones geológicas.
Ángel Miguel Pitarch Roig (2010)

1.9
Clasificación de los materiales según la normativa ASTM.
(1) coeficiente de absorción de agua y Densidad según procedimiento de ensayo C97
(2) módulo de rotura a flexión según procedimiento de ensayo C99
(3) Las serpentinas tienen una norma específica adicional, C1526-03
(4) Los travertinos tienen una norma específica adicional, C1527-03
(I) Uso en interiores
€ Uso en exteriores
(=) Ensayos realizados paralelamente a los granos
(+) Transversalmente a Iso granos
Ángel Miguel Pitarch Roig (2010)

¹⁰ *Ibidem*. pág. 19.

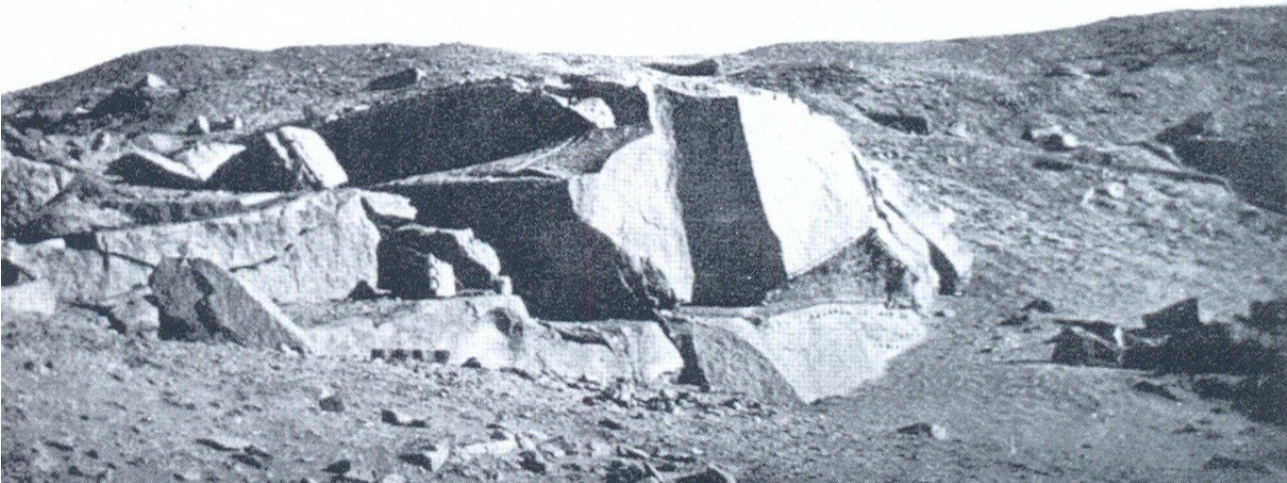
¹¹ Fernández París, José M. (1982). Valoración del estado de alteración de los materiales pétreos en los monumentos. *Materiales de construcción* nº185. pág. 59.

En el caso de la extracción de la roca es fundamental conocer las condiciones geológicas de las canteras para elegir las adecuadamente: reservas, dimensiones, fracturamientos, calidades, tipos y colores.

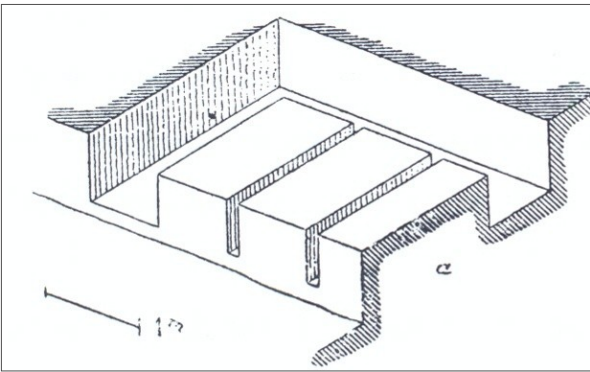
El procedimiento para la extracción se basa en la siguiente secuencia:

- Desmonte del estéril que recubre las capas de roca.
- Extracción de los bloques de piedra.

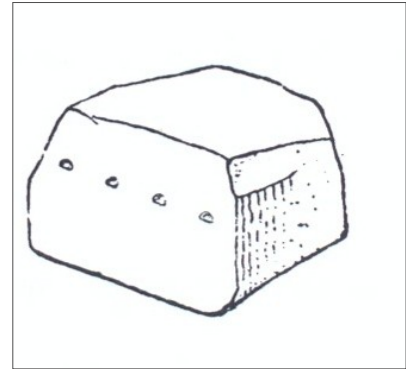
Estas fases no han cambiado mucho a lo largo de los siglos. Por el contrario, sí lo han hecho considerablemente los medios que lo hacían posible. Tanto la maquinaria como los dispositivos utilizados han evolucionado enormemente desde el punto de vista tecnológico, derivando en una extracción de la piedra progresivamente más rápida e industrializada.



2.1



2.2



2.3



2.4

2.1 EXTRACCIÓN MANUAL

2.1.1 LAS PRIMERAS CANTERAS: EGIPTO Y GRECIA

2.1.1-1 LA EXTRACCIÓN EN EGIPTO

Los egipcios fueron la primera civilización que explotó canteras de piedra de una manera generalizada. En el año 2600 a.C., el rey Zóser decidió establecer su residencia eterna en Saquara, y para la construcción de los numerosos templos, su visir y arquitecto Imhotep organizó una serie de expediciones geológicas que permitieron descubrir un gran número de tipos de rocas, que escogían por sus características estéticas al no poseer conocimientos sobre las características mecánicas. (figura 2.1) ¹

Ya en esa época se definieron los dos métodos básicos de extracción de piedra, que posteriormente se seguirán utilizando a lo largo de los siglos hasta la aparición de los sistemas mecanizados, hecho que se indicará más adelante. La elección entre ambos sistemas se realizaba según la dureza de las piezas, habiendo uno para las piedras blandas, y otro para las piedras duras.

■ SISTEMA DE EXPLOTACIÓN DE PIEDRAS BLANDAS

Los bloques de piedras blandas, como calizas y areniscas, se desprendían abriendo catas de medio metro de altura y de la misma anchura del bloque final que se quisiera obtener. Posteriormente se abrían otras catas por los otros lados del bloque hasta llegar a la base. Por último se introducían unas cuñas de madera humedecidas, protegidas lateralmente por unas placas metálicas. Las cuñas se hinchaban durante la noche por el efecto de la humedad por lo que al día siguiente ya podían desprender el bloque con facilidad con la ayuda de palancas (figura 2.2). ²

■ SISTEMA DE EXPLOTACIÓN DE PIEDRAS DURAS

Para la extracción de piedras duras, como el granito o el basalto, en primer lugar se abrían entalladuras laterales a golpes de mazas y cantos de dolerita, en las que se introducían cuñas de bronce o de madera que desgajaban el bloque. (figura 2.3) ³

La característica fundamental de estos sistemas es que los bloques se extraían de la cantera con sus dimensiones prácticamente finales, para que pudieran ser utilizadas en las construcciones con unos mínimos retoques (figura 2.4).

¹ López Jimeno, Carlos (2012). Manual de rocas ornamentales. Prospección, explotación, elaboración y colocación. Carlos López Jimeno, Madrid. pág. 42.

² Choisy, Auguste (2006). El arte de construir en Egipto. Tr. Íntegra de la edición L'art de bâtir chez les Égyptiens, de 1904, por Gema López Manzanares, Instituto Juan de Herrera, Madrid.

³ Ibídem

2.1
Trabajo en cantera egipcia de granito de Asuán. Se ven las entalladuras abiertas para la extracción de los bloques.
Auguste Choisy (1904)

2.2
Sistema de extracción en cantera egipcia de los bloques de piedras blandas.
Auguste Choisy (1904)

2.3
Sistema de extracción en cantera egipcia de los bloques de piedras duras.
Auguste Choisy (1904)

2.4
Bloques extraídos parcialmente en la cantera egipcia de Asuán. La extracción se paralizó porque apareció una grieta (puede verse en la fotografía en la parte central) que hizo inutilizable el bloque.
Archivo fotográfico del autor

2.1.1-2 LA EXTRACCIÓN EN GRECIA

Durante la época griega no se aportaron novedades en cuanto a los sistemas de extracción, ya que adoptaron los mismos métodos existentes ya explicados. Sin embargo, sí que introdujeron ciertas novedades.

- A partir del **s. VII a.C.** comenzaron a utilizarse herramientas de hierro (hasta entonces el hierro se había considerado un metal precioso).⁴ Estas herramientas permitían trabajar la piedra con mayor facilidad, por lo que aportaron grandes ventajas, facilitando en gran medida las labores de extracción.
- Por otro lado, se introdujeron los contratos entre el arquitecto y el cantero⁵, dándose instrucciones claras sobre tamaños y aspecto de los bloques.

2.1.2 LA EXPLOTACIÓN A GRAN ESCALA EN ROMA

2.1.2-1 INICIOS

En torno al **s. II a.C.** los romanos descubrieron el cemento hidráulico. Éste permitía la unión de todas las partes del muro en un todo solidario, por lo que frente a las piezas resistentes de gran formato se empezaron a utilizar piedras pequeñas de tipo mampuesto que encontraban en las inmediaciones de Roma. Durante esa época se levantaron una gran cantidad de edificios en un breve espacio de tiempo, y este sistema les permitía un importante ahorro de tiempo y un gran aprovechamiento del material. Por ello, durante este tiempo se abandonó temporalmente la explotación de canteras⁶.

A partir del **s. I d. C.**, con la búsqueda de nuevos aparejos más complejos constituidos a base de sillares y a raíz de la aparición de la cantera de Carrara⁷, se recuperó el oficio de extraer piedra. Ésta empezó a extraerse en grandes cantidades, dando lugar a la primera explotación que realmente se realizaba a gran escala (*figuras 2.5, 2.6*).

⁴ Patrón, Vicente. (2001). El nacimiento de una técnica. Tectónica Nº2. Envolventes 2. Cerramientos pesados. pág. 10.

⁵ Según los datos obtenidos por Roland Martin se realizaban contratos con una serie de indicaciones muy precisas sobre el tamaño exacto de las piezas, sus características y estado, rebajes, veteado..., aunque por razones estéticas y no constructivas. Generalmente las labores de extracción de cantera eran dadas en adjudicación a una serie de contratistas. Éstos quedaban encargados de extraer las piezas, efectuar un primer rebaje de acuerdo con las plantillas de madera y detalles aportados por el arquitecto, y transportar los bloques hasta el lugar de colocación sin sufrir desperfectos. Todo este proceso ha sido descrito de manera muy detallada por Roland Martin que, además cita varios epígrafes de un contrato realizado en Eleusis, hacia el siglo IV, con este mismo motivo. Algunos ejemplos epígrafes los reproducimos a continuación:

"... Extraer (de las canteras) de Egina bloques de piedra blanda, rebajarlos por todos los lados en ángulo recto, con superficie sin desbastar, y transportarlos a Eleusis en buen estado, sin desconchaduras, en número de 44.

...Extraer bloques del Pentélico para las metopas, con una altura de 5 pies menos un palmo y 3 palmos de grosor. Rebajarlos en todas sus caras en ángulo recto, dejando la superficie basta, de acuerdo con el croquis facilitado por el arquitecto, y entregarlos en buenas condiciones, blancos, sin vetas, en números de 15. transportar los bloques desde el Pentélico hasta Eleusis, con una longitud de 5 pies, anchura de 5 pies menos un palmo, 3 palmos de grueso, y entregarlos en el santuario en buenas condiciones, sin desconchaduras, en número de 15.

Marín Sánchez, Rafael (2000). La construcción griega y romana. Universidad Politécnica de Valencia, Servicio de Publicaciones, Valencia.

⁶ Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. Picard, París

⁷ La cantera de carrara fue puesta en explotación durante la época de Julio César, pero realmente empezó a funcionar a gran escala en la de Augusto. La utilización de este mármol se hizo muy popular por su color blanco y las grandes cualidades estéticas que poseía.

Castro Villalba, Antonio (1999). Historia de la construcción arquitectónica. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

A pesar de no tener conocimientos científicos que les permitiesen conocer a ciencia cierta el funcionamiento del material, sí que aportaron una serie de conocimientos nuevos tras la observación y la experimentación que suponía el uso de distintos tipos de piedras, que ayudaron en gran medida a la elección tanto de la cantera como de los distintos sistemas de extracción.

2.1.2-2 ELECCIÓN DE LA CANTERA

La elección de la cantera se realizaba según una serie de cualidades físicas, evaluadas por el cantero en función de la dureza de talla. Jean Pierre Adam hizo una clasificación de las piedras que utilizaban que comprendía seis categorías, definidas como: ⁸

- Muy blanda
- Blanda
- Semi-compacta
- Compacta
- Dura
- Fría.

Vitrubio hizo algunas observaciones sobre la elección de piedras blandas y las precauciones a tener en cuenta:

“Las piedras que no son duras presentan la ventaja de cortarse fácilmente y dan buen resultado cuando se las emplea para lugares cubiertos, pero cuando se las coloca al exterior, las heladas y la lluvia hacen que se conviertan en polvo.” ⁹

“Sacarlas de la cantera en verano y no en invierno y exponerlas al aire en un lugar descubierto dos años antes de colocarlas en una obra.” ¹⁰

Al tomar estas precauciones, las rocas porosas perdían su humedad, llamada *agua de cantera*, y la intemperie permitía eliminar aquellas que no resistirían una exposición exterior. Estas novedades permitieron realizar una extracción más controlada, así como la explotación de canteras de roca blanda, que anteriormente solían ser desechadas.

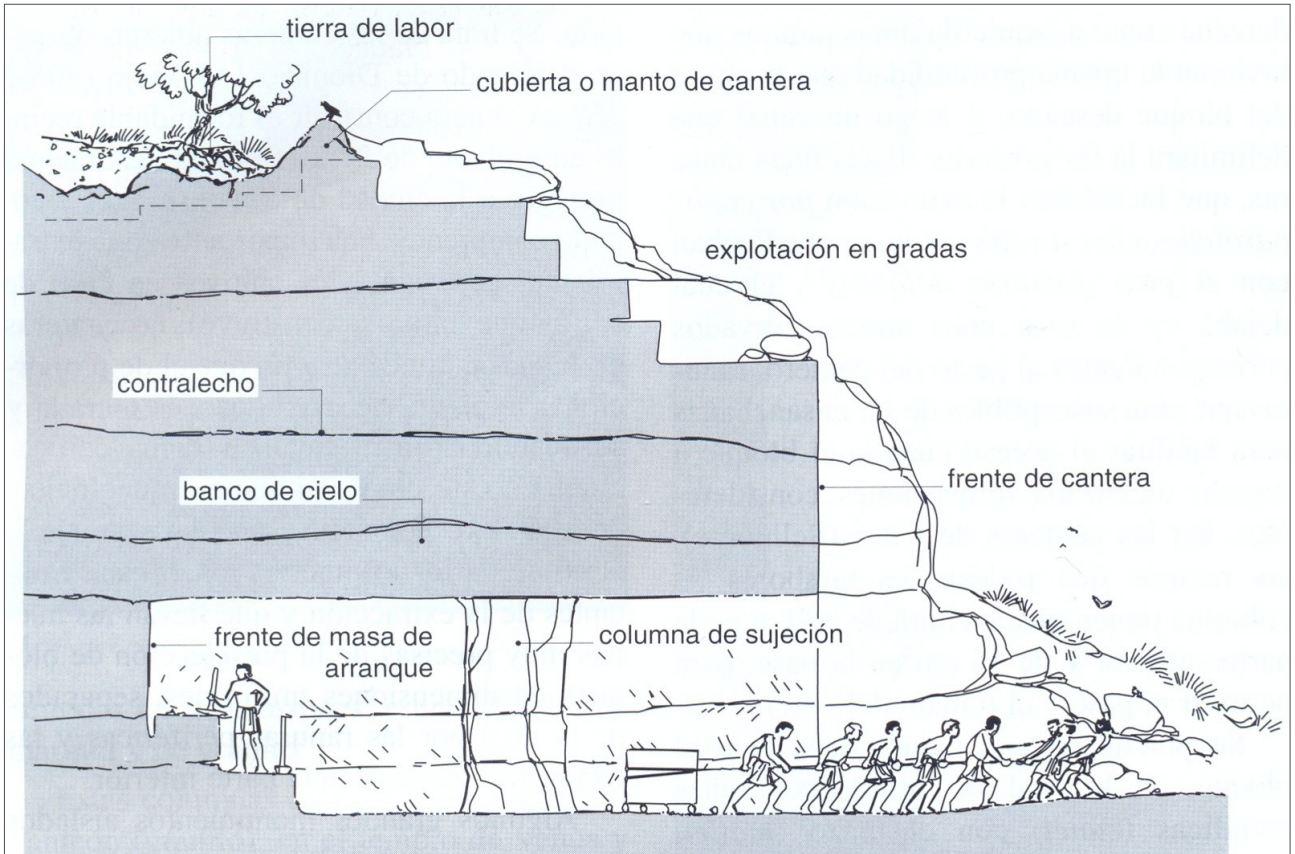
2.1.2-3 ELECCIÓN DEL SISTEMA DE EXTRACCIÓN

En cuanto a los sistemas de extracción, los romanos utilizaban los sistemas anteriormente citados, aunque desarrollándolos e introduciendo variaciones, así como ciertas novedades. Los romanos fueron la primera civilización en realizar explotaciones subterráneas, así como el aprovechamiento de las vetas de los macizos rocosos para facilitar la extracción (*figura 2.5*).

⁸ Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. cit.

⁹ Vitrubio, II, 7

¹⁰ Ibidem



2.5



2.6



2.7

■ EXPLOTACIÓN AÉREA

La explotación aérea era la más común. Se llevaba a cabo según la siguientes indicaciones: ¹¹

- La explotación progresaba escalonadamente, en alturas de una hilada como mínimo.
- La altura de las hiladas era muy a menudo de 60 a 65 centímetros, elección métrica sencilla que permite llegar a unas dimensiones de bloque finales de 2 pies de altura.
- Cuando la explotación en gradas había alcanzado su nivel más bajo al pie del declive natural, o si la veta rocosa se prolongaba en profundidad, los canteros bajaban verticalmente uno o varios frentes de arranque, avanzando por alturas de hiladas, siguiendo un método análogo al anterior. Una vez retiradas dichas hiladas, quedaba una escarpada pared vertical denominada el *frente de cantera* (figura 2.6).

□ SISTEMA POR ESTRATOS

El primer sistema de explotación al que recurrieron se basó en buscar los estratos y fisuras naturales de la roca, que permitía extraer la roca fácilmente con cuñas metálicas (también utilizaban las de madera, aunque en menos ocasiones) y empujando con palancas. ¹²

Este sistema suponía una extracción mucho más fácil y rápida, en la que el conocimiento de las vetas era clave. Pero se extraían volúmenes de roca irregulares, por lo que se introdujo la nueva y compleja tarea de tener que cortar estos bloques para regularizar su forma, tarea que se explicará más adelante.

Para facilitar en la medida de lo posible el trabajo y para evitar la gran cantidad de material desperdiciado, así como un ahorro de tiempo en la talla, se recurrió a otros sistemas.

□ EXTRACCIÓN MEDIANTE CATAS ¹³

1. Se realizaban unas ranuras que tuvieran la misma profundidad que la altura del bloque deseado y luego un canal que delimitara el lado posterior (figura 2.7).
2. Finalmente se realizaba otra ranura bajo el bloque. Una vez realizadas las ranuras el bloque se extraía ejerciendo presión con una palanca.

2.5

Esquema de los distintos tipos de explotación en las canteras romanas.

Arriba, extracción a cielo abierto mediante gradas.

Abajo, explotación en galería subterránea.

Jean Pierre Adam (1989)

2.6

Frente de cantera en la toba del Aniene (Latium), donde pueden verse claramente las marcas de los cortes por hiladas. En la parte superior puede verse la capa de cubrición de la cantera.

Jean Pierre Adam (1989)

2.7

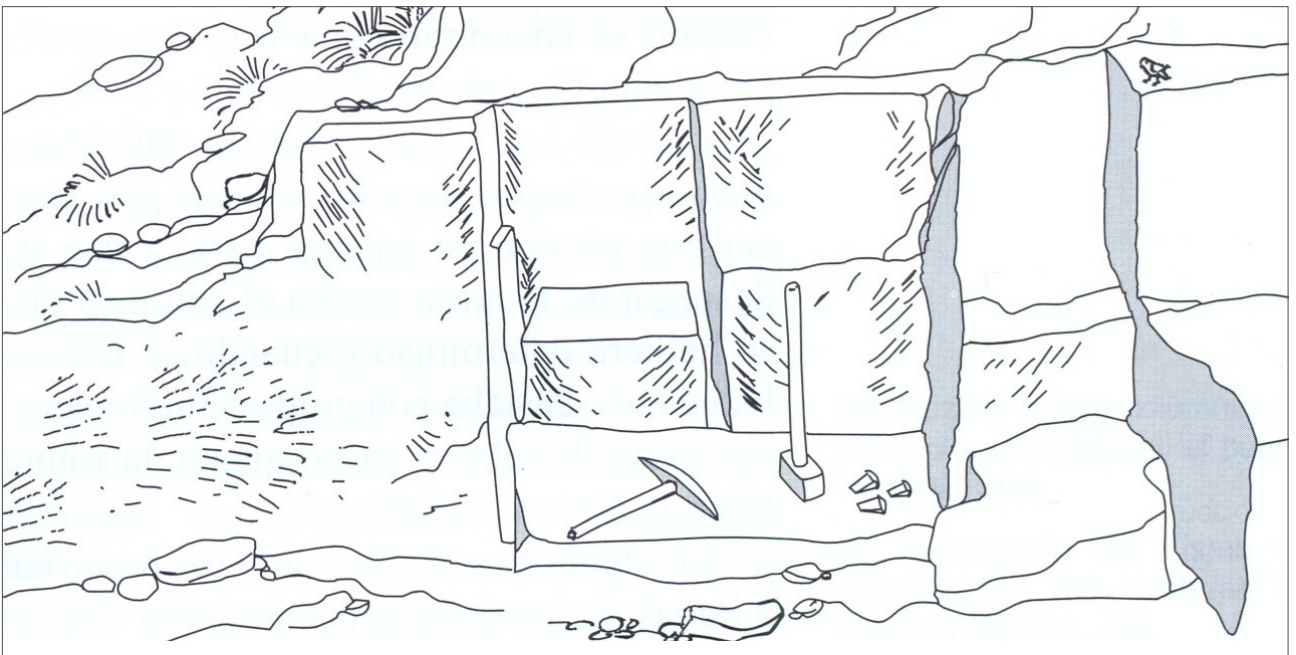
Ranuras preparatorias para la extracción de bloques de piedra.

Jean Pierre Adam (1989)

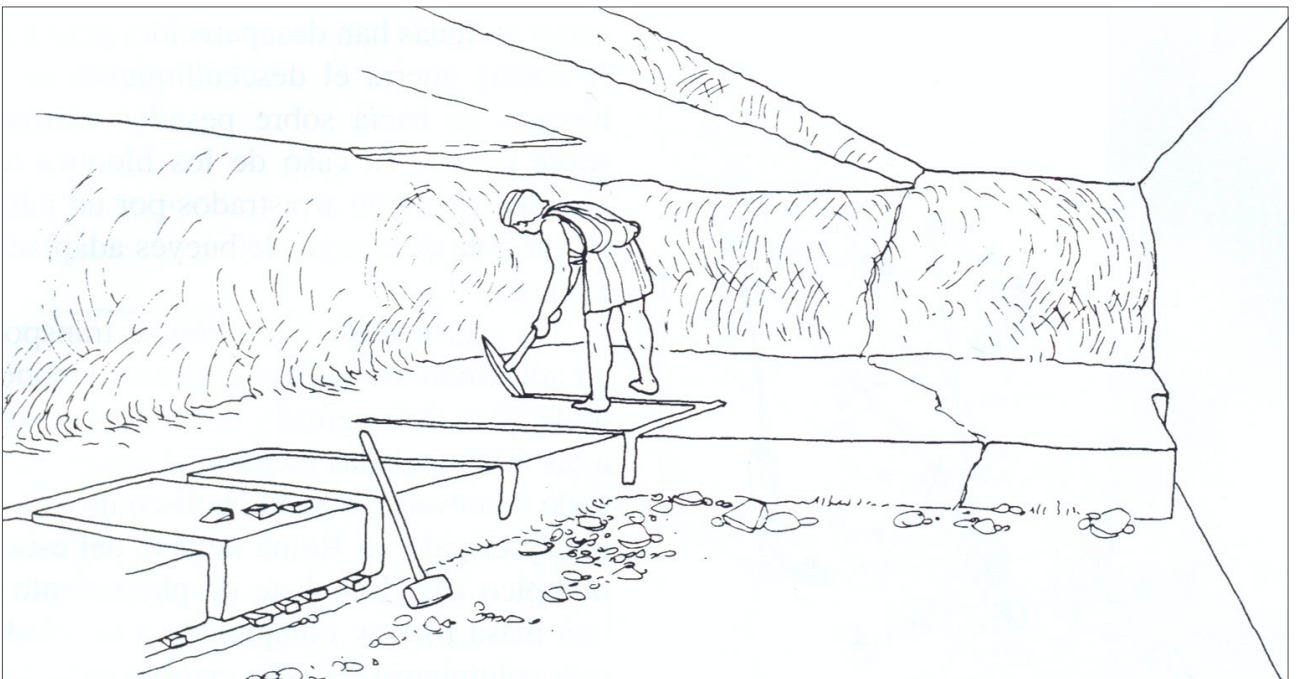
¹¹ Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. cit.

¹² Choisy, Auguste (1999). El arte de construir en Roma. Ed. a cargo de Santiago Huerta Fernández y Francisco J. Girón Sierra. Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid. págs. 25-29.

¹³ Ibídem.



2.8



2.9

Este sistema, conocido como de catas, no es sino una evolución del sistema para piedras blandas explicado anteriormente.

□ EXTRACCIÓN MEDIANTE CUÑAS ¹⁴

1. En primer lugar se realizaban las ranuras laterales y posterior que definían el bloque, al igual que en caso anterior.
2. Posteriormente se realizaba una ranura inferior, en la que se introducían cuñas metálicas (*cunei*) que se golpeaban con un mazo (*mallei*). Generalmente se aprovechaban las vetas o líneas de estratigrafía para facilitar el trabajo (*figura 2.8*).
3. Una vez introducidas las cuñas, bastaba con golpear fuertemente cada una de ellas para conseguir la rotura.

■ **EXPLOTACIÓN SUBTERRÁNEA**

Durante el descenso vertical era común encontrarse con un cambio del tipo de subsuelo o bien en con una capa freática. En estos casos, resultaba conveniente penetrar en la masa rocosa por galerías (*fosae*), procedimiento infinitamente menos productivo, por la razón evidente de que la mayor parte de la roca debe permanecer en su sitio para garantizar la contención y la cubierta. ¹⁵

El corte subterráneo se guiaba por los mismos métodos utilizados al aire libre (*figura 2.9*). Sin embargo, cuando la galería o la sala eran bajas había que conformarse con extraer bloques que ocupaban toda la altura de practicando ranuras frontales y periféricas siguiendo los estratos, convirtiéndose así determinante el corte final por introducción de cuñas, ya que era el único que permitía arrancar la faz posterior, que de otra forma era inaccesible. ¹⁶

Cuando la roca presentaba una gran altura, sin líneas de ruptura ni interrupciones, el trabajo se hacía mucho más fácil, ya que era posible abrir salas de grandes dimensiones y permitían reproducir en el frente de la masa rocosa las condiciones de trabajo del exterior, avanzando por gradas y descenso vertical. ¹⁷

Ello conllevará a una clara definición de la manera en que tenían que planificarse los trabajos, que si se realizaba adecuadamente y con los cuidados necesario daba lugar a una extracción bastante más controlada que la que se venían haciendo hasta ese momento. Como se irá viendo más adelante, estos procedimientos se mantendrán intactos a lo largo de muchos siglos.

2.8
Esquema del método de extracción de bloques por el sistema de cuñas. Se puede ver como las marcas realizadas para desprender el bloque corresponden con la medida aproximada del bloque final.

Jean Pierre Adam
(1989)

2.9
Esquema de la explotación de canteras subterráneas por el método de cuñas. Se pueden ver las catas realizadas en los tres laterales del bloque y las cuñas introducidas para desprender el bloque por la cara inferior.

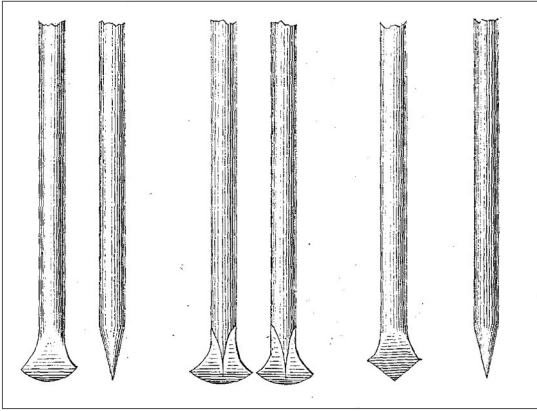
Jean Pierre Adam
(1989)

¹⁴ *Ibidem*.

¹⁵ Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. cit.

¹⁶ *Ibidem*.

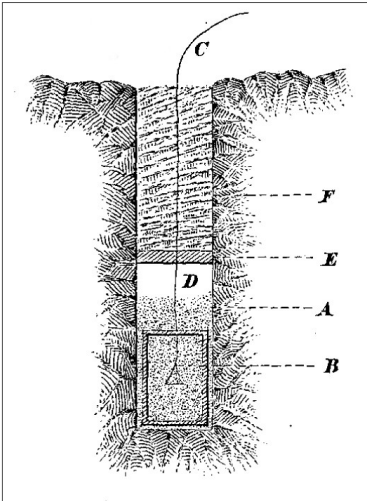
¹⁷ *Ibidem*.



2.11



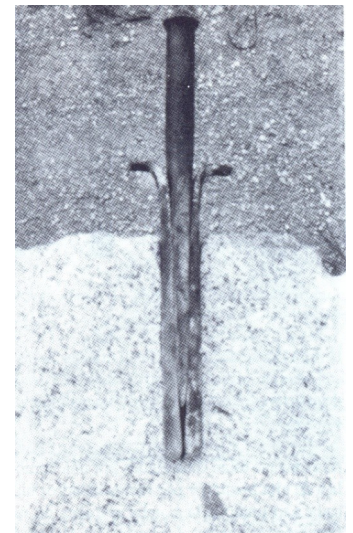
2.10



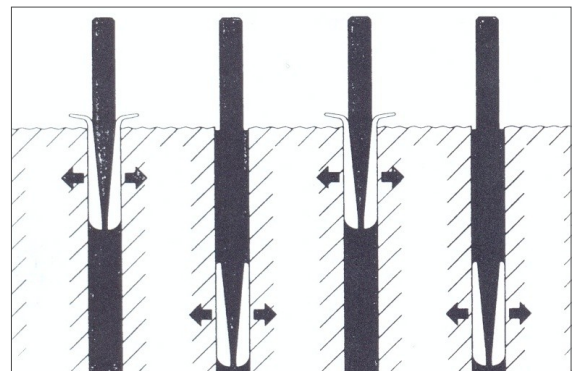
2.12



2.13



2.14



2.15

2.1.3 LA EXTRACCIÓN ENTRE LOS SIGLOS V Y XVII: ETAPAS DE TRANSICIÓN

Desde la caída del Imperio Romano y hasta el s. XVII no se aportaron grandes novedades en los métodos de extracción de bloques de piedra. Se recurrió a la utilización de los mismos o similares sistemas conocidos hasta entonces.

2.10

Extracción de bloques mediante el método de voladura. Se ha utilizado un cordón detonante.

Juan Herrera Herbert (1995)

Durante el periodo gótico se aportó una novedad de interés relacionada con la extracción aunque no directamente implicada en el método. Con la utilización de las herramientas de medida y de planeidad en la cantera (en Roma se utilizaban para el proceso de puesta en obra) se produjo un impulso en la industrialización y elementos muy estandarizados, como sillares de medidas fijas. Así, se consiguió una extracción realizada de una manera más precisa que facilitó en gran medida el proceso de colocación posterior.¹⁸

2.11

Barrenas utilizadas para perforar la roca.

Manuel Pardo (1885)

Esta práctica se perdió finalizado el periodo gótico, no produciéndose bloques estandarizados hasta la llegada de la extracción mecanizada varios siglos después.

2.12

Barrenos realizados en la roca. Se puede ver el cartucho de pólvora en el fondo y el relleno en la parte superior.

Manuel Pardo (1885)

2.2 LA EXTRACCIÓN MECÁNICA DESDE EL SIGLO XVII

Hasta principios del siglo XVII la tendencia que se venía ejerciendo consistía en la extracción de un bloque destinado a ser utilizado en la construcción con breves retoques. A partir de esta fecha, la utilización de nuevos métodos permitió que se pudiesen extraer bloques de dimensiones mayores que posteriormente eran divididos en otros más pequeñas.

2.13

Extracción de bloques mediante el método de las rozas, mediante cuñas metálicas.

Juan Herrera Herbert (1995)

2.2.1 LA EXTRACCIÓN ENTRE LOS SIGLOS XVII Y XVIII

Durante el s. XVII, conforme la tecnología de extracción en minas fue avanzando, los canteros adoptaron también diferentes métodos mineros aprovechando las características específicas de las rocas con el fin de extraerlas más fácilmente.

2.14

Cuña metálica, también conocida como pinchote, para la extracción manual de bloques. La cuña está constituida por tres elementos: la propia cuña y dos pletinas metálicas con sección longitudinal en ángulo de retención.

Juan Herrera Herbert (1995)

■ EXTRACCIÓN MEDIANTE BARRENOS

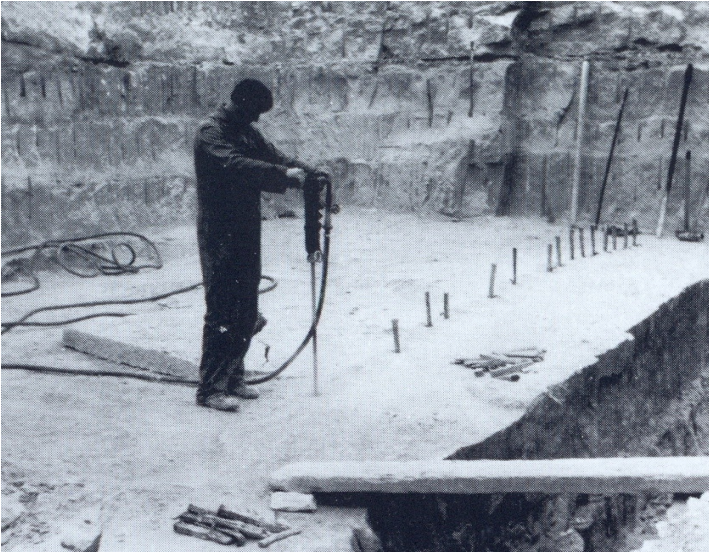
Se empezó a utilizar un procedimiento que consistía en barrenar la roca (figura 2.10). Consistía en hacer un agujero cilíndrico de unos 6 centímetros de diámetro con la ayuda de unos elementos denominados barrenas (figura 2.11), en el cual se colocaba un cartucho lleno de pólvora de mina (sustituida desde finales del s. XIX por dinamita), que posteriormente se llenaba con arena fina o arcilla comprimida (figuras 2.12). Cuando el barreno estallaba, la fuerza explosiva de la pólvora abría la roca en varias direcciones, dividiéndola en bloques fáciles de sacar por medio de palancas. Era común utilizar este sistema en rocas comunes

2.15

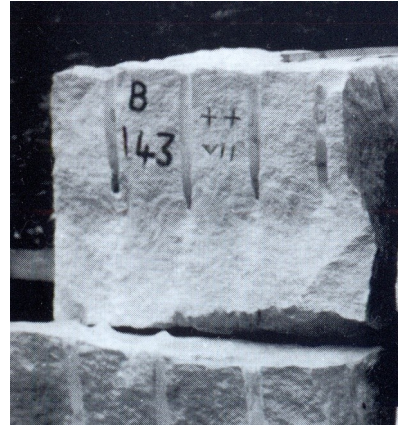
Acción conjunta de cuñas metálicas manuales con tirafondos. Se puede ver como con el efecto del tirafondo la profundidad es mayor que con las anteriores pletinas.

Juan Herrera Herbert (1995)

¹⁸Rabasa Díaz, Enrique (2000). Forma y construcción en piedra: de la cantería medieval a la estereotomía del siglo XX. Akal, Madrid.



2.16



2.17



2.18

y abundantes, pero en piedras menos abundantes y con un mayor valor estético, como el mármol, no se recomendaba utilizar este sistema porque se producía una gran cantidad de desperdicio de material.¹⁹

■ EXTRACCIÓN MEDIANTE ROZAS

En estos casos se recomendaba utilizar el método manual conocido en ese momento como método de las rozas (*figura 2.13*) y que no es sino una versión más evolucionada del método de cuñas (*figura 2.14*). Frente a la arbitrariedad de los trabajos anteriores, que hizo en muchas ocasiones tener que abandonar canteras porque las piezas se rompían una vez extraídas, a partir del s. XVII se dan una serie de pautas más precisas para la correcta realización del proceso, gracias a un mayor conocimiento de las propiedades intrínsecas y geotécnicas de las rocas, así como la importancia de las foliaciones, plegamientos, y fracturas naturales.

Con el pico y en la dirección de la veta de la roca y sobre las líneas de corte, se abrían las rozas o aberturas en forma de V, en las que se introducían cuñas de hierro. Con una maza el cantero iba golpeando las cuñas, recorriéndolas todas, hasta que la piedra tras un golpe, sonara a hueca. Posteriormente se extraía el bloque con ayuda de palancas. Con este método sólo se podía llegar a ahondar 4 o 5 metros en la roca.²⁰

2.2.2 LA EXTRACCIÓN DURANTE EL SIGLO XIX

Durante el siglo XIX aparecieron los primeros avances tecnológicos de relevancia cuyo principal objetivo era facilitar el trabajo.

■ EXTRACCIÓN MEDIANTE TIRAFONDOS

Las cuñas de tirafondo, que consistían en unas cuñas más evolucionadas que sustituyeron a las anteriores, se introducían en los barrenos a una profundidad considerable, haciendo que los esfuerzos de tracción no se produjesen sólo en las proximidades de la superficie, y permitiendo la extracción de piezas de mayores dimensiones (*figura 2.15*).²¹

■ EXTRACCIÓN MEDIANTE HERRAMIENTAS NEUMÁTICAS

En el s. XIX se inventó el compresor de aire, y éste se empezó a incorporar la neumática en la industria minera. A finales del s. XIX se empezó a incorporar

2.16, 2.17
Bloques extraídos mediante barrenos neumáticos durante el siglo XX.
Peter Stanier (1985)

2.18
Cantera de piedra arenisca de Merseyside, en 1914. Se puede ver como la introducción de la maquinaria ha cambiado el aspecto de la cantera frente a las anteriores. En este caso ya se llegaba a producir cortes de 3 metros de profundidad.
Peter Stainer (1985)

¹⁹ Sánchez Pérez, Antonio (1884). Manual del cantero y marmolista. Dirección y administración Dr. Foruquet, 7, Madrid. pág. 56

²⁰ Azconegui Morán, Francisco; Castellanos Miguélez, Agustín (1993). El trabajo de la piedra. Guía práctica de cantería. Escuela Taller de Restauración 'Centro Histórico de León', León. pág 63.

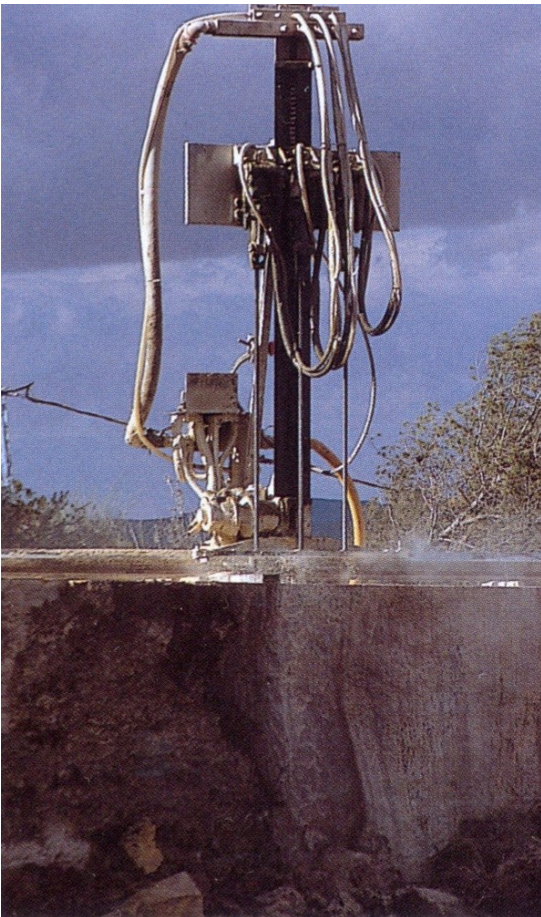
²¹ López Jimeno, Carlos (2012). Manual de rocas ornamentales. Prospección, explotación, elaboración y colocación. Gráficas Arias Montano, Madrid. págs. 293-294



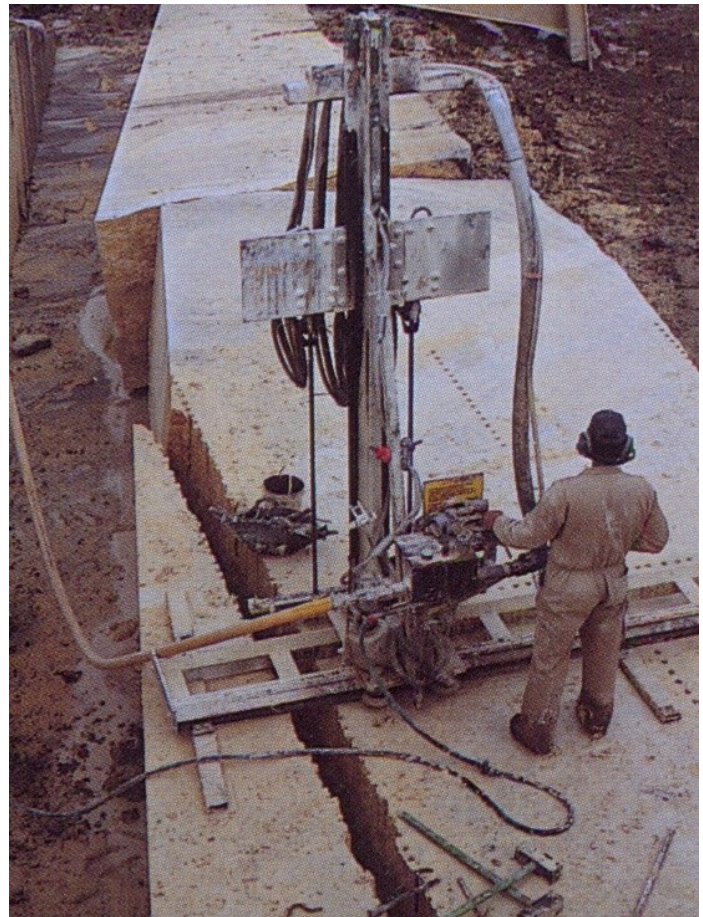
2.19



2.20



2.21



2.22

también en la industria de la extracción de piedra. Aparecieron los barrenos neumáticos (*figuras 2.16, 2.17*), que permitían ejecutar el trabajo mucho más rápidamente y limitaba el esfuerzo físico del obrero.²²

2.2.3 LA EXTRACCIÓN DURANTE EL SIGLO XX

A lo largo del s. XX fueron apareciendo distintas máquinas que derivaron en una progresiva y rápida evolución del proceso de extracción en las canteras (*figura 2.18*). El principal cambio organizativo que se produjo a raíz de la utilización de maquinaria tiene que ver con el tamaño de los bloques. Las dimensiones de los bloques tenían las máximas dimensiones permitidas por la maquinaria disponible, que posteriormente se subdivide en varios bloques comerciales de dimensiones fácilmente manipulables (*figuras 2.19, 2.20*).

Aproximadamente, las dimensiones finales correspondientes a bloques se encuentran en los siguientes intervalos:²³

- Longitud: 1,90 3,30 metros
- Anchura: 1,00 a 1,50 metros
- Altura: 0,90 a 1,20 metros

■ CORTE CON PERFORACIÓN

A principios del s. XX se incorporó al sistema de barrenos neumáticos un carril sobre el que iban guiados las barrenas para hacer las perforaciones a intervalos regulares. Esta máquina se conoce como perforadora cortabloques (*figuras 2.21, 2.22*).²⁴

El corte con perforación es un sistema de extracción aplicable a piedras duras y de dureza media. El primer paso consistía en desprender un bloque de gran tamaño del macizo rocoso. Para ello, se deben abrir dos canales laterales mediante explosión o barrenos. Una vez hechos los canales laterales, se practican barrenos al pie del banco en sentido horizontal y en el plano posterior vertical del bloque. La explosión controlada de la carga introducida a intervalos regulares en los barrenos, provoca el desprendimiento de un bloque más o menos regular. El siguiente paso consiste en desprender del bloque piezas de un tamaño menor comercial, abriendo barrenos en la superficie superior del bloque, y subdividiendo el bloque mediante explosivos o cuñas.²⁵

■ LANZA TÉRMICA

Este método de extracción se inició a partir de 1930. Es un método de extracción empleado únicamente para yacimientos de rocas ígneas, como el granito. Esta

²² Azconegui Morán, Francisco; Castellanos Miguélez, Agustín (1993). El trabajo de la piedra. Guía práctica de cantería. cit. pág 63.

²³ López Jimeno, Carlos (2012). Manual de rocas ornamentales. Prospección, explotación, elaboración y colocación. Gráficas Arias Montano, Madrid. págs. 212-213.

²⁴ Íbidem. págs. 293-294

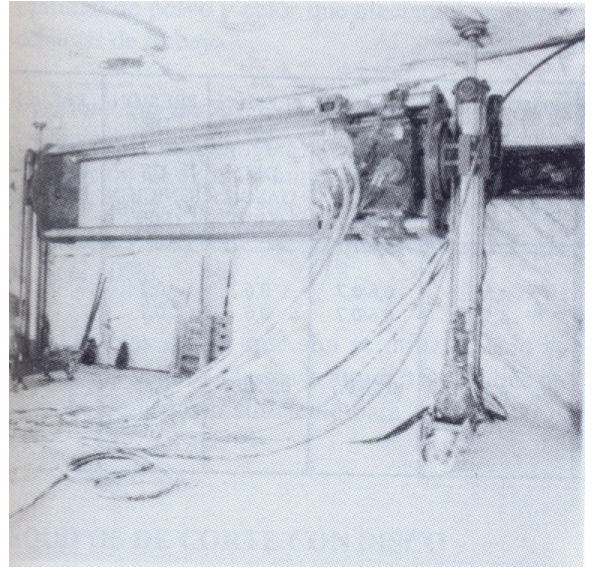
²⁵ Íbidem. pág 299-307.

2.19, 2.20
Extracción de grandes bloques y vuelco con empujadores hidráulicos para su posterior división en bloques más pequeños. Cantera de mármol travertino en Italia.
AA.VV (1982)

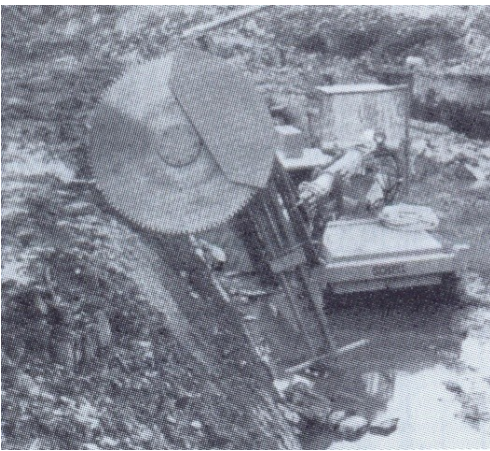
2.21,2.22
Corte de piedra caliza mediante perforadora cortabloques, que Rafael Moneo utilizó para la construcción del Ayuntamiento de Murcia, 1999.
David Dernie (2003)



2.23



2.24



2.25



2.26



2.28



2.27

herramienta se emplea en el corte de las caras verticales para la independización de grandes bloques primarios de roca.²⁶

El equipo está constituido por una lanza de longitud variable, pudiendo llegar a los 6 y 8 metros, y que puede ser manejada por una sola persona. En su interior discurren dos conductos, uno para el gas-oil, y otro para el combustible, que desembocan en una cámara de combustión. La combustión se inicia mediante la inyección de un combustible y un comburente. La anchura de las rozas producidas por la lanza varían entre 10 y 13 centímetros.²⁷

Se utilizó como técnica alternativa a la realización de barrenos, para ahorrar costos. Su uso está en claro retroceso ya que presenta numerosos inconvenientes como elevados niveles de ruido, calor y polvo, y un evidente deterioro del material.

■ CORTE CON ROZADORA

La extracción mediante corte con rozadora se empezó a emplear desde finales de los años 40, en canteras a cielo abierto (*figura 2.23*) y subterráneas (*figura 2.24*) de rocas de dureza media y baja. Las primeras máquinas de corte con rozadora llegaron a España en los años 50.

La máquina se compone de un brazo móvil y orientable sobre el que se desliza una cadena provista de dientes cortantes de carborundo primero y posteriormente de diamante o tungsteno, dispuestos a una distancia de 4 centímetros unos de otros. El conjunto es accionado por motor eléctrico y se desplaza a través de carriles dispuestos en la dirección del corte deseado. El corte es bastante limpio, evitando los trabajos posteriores de escuadrado de la pieza. Además, permite obtener los bloques sin necesidad de recurrir a sucesivas etapas de división.²⁸

■ CORTE CON DISCO

Este tipo de maquinaria llegó a España en la década de 1970 (*figura 2.25*). Se emplea en la extracción de piedras de dureza media y blanda, en explotaciones amplias, a cielo abierto. La maquinaria consiste en un motor que mueve un disco cortador (actualmente con dientes de diamante), montados ambos sobre un equipo móvil que se desplaza a través de carriles (*figura 2.26*). Su ventaja se basa en la obtención de bloques perfectamente escuadrados, aunque su tamaño viene condicionado por el diámetro del disco.²⁹

■ CORTE CON HILO

La técnica de corte con hilo (cable) fue desarrollada en Italia a principios del s. XX, y supuso un gran avance. El proceso consistía en mover con un sistema de

2.23

Corte con rozadora de brazo en la cantera de granito de Campaspero, Valladolid.

José Ignacio García de los Ríos Cobo (2001)

2.24

Rozadora utilizada en galerías subterráneas.

Carlos López Gimeno (2012)

2.25

Cortadora de disco sobre orugas en una cantera de pizarra.

Carlos López Gimeno (2012)

2.26

Cortes mediante disco en la cantera de arenisca de Villamayor, Salamanca.

José Ignacio García de los Ríos Cobo (2001)

2.27

Cortes producidos por el hilo diamantado en la cantera de mármol de Espejón, Soria.

José Ignacio García de los Ríos Cobo (2001)

2.28

Cortes mediante hilo diamantado en la cantera de pizarra de Riofrío de Aliste, Zamora.

Archivo fotográfico de Ángel Luis Gallego. Cedida.

²⁶ *Ibidem.* págs. 285-286.

²⁷ *Ibidem.*

²⁸ *Ibidem.* págs 275-278.

²⁹ *Ibidem.* págs 287-288.



2.29



2.30

poleas, y a una cierta velocidad, un hilo helicoidal de acero, que actuaba como vehículo de arrastre de la arena abrasiva y del agua refrigerante, en contacto con la roca que se deseaba cortar. El uso de ese hilo implicaba un desgaste continuo y consecuentemente una reducción de su diámetro.³⁰

Posteriormente el hilo helicoidal fue sustituido por el hilo diamantado, un cable de acero continuo que lleva insertos dientes de diamante de forma cilíndrica, y que derivó en grandes avances en el campo de las rocas duras y abrasivas.

La utilización del hilo diamantado para la extracción de mármol en cantera es una técnica que se empezó a considerar por Diamant Boart en 1968, pero hasta el año 1972 no se puso en práctica por primera vez en una cantera sueca, donde se resolvieron infinidad de problemas de tensiones, resistencia mecánica del hilo, etc. Posteriormente, en el año 1978, en las canteras de Carrara (Italia) se aplicó este tipo de máquina, introduciéndose en España en los primeros años ochenta.³¹

El proceso generalmente se inicia con la realización de un canal lateral con barrenos, a través de los cuales se introduce el hilo diamantado, aunque se puede realizar utilizando sólo el hilo diamantado (*figuras 2.27, 2.28*).

■ CORTE CON AGUA

El sistema de corte mediante agua pura a presión se inventó en la década de **1950** por el Dr. Norman Frank, un ingeniero estadounidense que buscaba nuevas formas de aserrar árboles. En el año **1979** el Dr. Mohamed Hashish inventó el proceso de agregar materiales abrasivos al chorro de agua. Aunque inicialmente se utilizaba en las industrias aeronáutica y espacial, su uso se hizo muy popular y en la década de **1990** se empezaron a utilizar estas máquinas para la extracción de piedra en Estados Unidos.³²

Esta máquina produce un corte de gran precisión y muy rápido con el mínimo desperdicio de material.

2.2.4 LA EXTRACCIÓN HOY EN DÍA

Hoy en día, la selección de los equipos de arranque se lleva a cabo considerando, en primer lugar, diferentes factores intrínsecos de la roca, como resistencia a compresión, dureza, tenacidad, porosidad, abrasividad,... que determinan los rendimientos de corte.

La altura de banco se establece, en general, a partir de las dimensiones de los equipos de perforación o corte, de los de carga y de las características del maci-

2.29

Explotación mediante bancos altos en la cantera de granito Gris Vila, de Villacastín, Segovia.

José Ignacio García de los Ríos Cobo (2001)

2.30

Explotación mediante bancos bajos en la cantera de pizarra de Riofrío de Aliste, Zamora.

Archivo fotográfico de Ángel Luis Gallego. Cedida.

³⁰ *Ibidem.* págs 268-269.

³¹ Flow. Datos obtenidos de la página web del comerciante. Historia. <http://www.flowwaterjet.com/es-MX/waterjet-technology/history.aspx>. (Consulta: sábado 10 de mayo de 2014).

³² *Ibidem.*

zo rocoso. Este parámetro, en la práctica, alcanza valores inferiores a 10 metros generalmente. En España la limitación por seguridad para canteras a cielo abierto es de 12 metros.³³

El sistema actual consiste en un ciclo de producción muy organizado, constituido por una serie de operaciones elementales que se efectúan de manera secuencial y automatizada.

La elección del método de extracción se va a realizar especialmente en función del espacio disponible y de las propias condiciones del yacimiento.

■ MÉTODO DE LAS REBANADAS VERTICALES

Este método de explotación consiste en dividir el yacimiento en rebanadas verticales, de altura similar al espesor de la propia zona explotable. Cada rebanada vertical es dividida en forma descendente en grandes bloques o bancadas de varios miles de metros cúbicos de volumen. A continuación se vuelcan con empujadores hidráulicos o con explosivos sobre un lecho de caída constituido por escombros finos situados en la plaza de la cantera, para posteriormente dividirlos en etapas sucesivas hasta llegar a los bloques comerciales. Este método sólo se utiliza cuando el yacimiento presenta dificultades de acceso.³⁴

■ MÉTODO DE BANQUEO

En los métodos de explotación por banqueo el yacimiento está parcialmente subdividido en rebanadas horizontales o inclinadas, según superficies paralelas y equidistantes. Manteniendo unas plazas de dimensiones adecuadas entre los distintos niveles, es posible tener varios bancos en explotación. Estos métodos pueden agruparse en dos:³⁵

□ Bancos altos. La explotación con bancos altos, con alturas que van desde los 3 hasta los 12 metros, se aplican a los yacimientos masivos de granito (*figura 2.29*), mármol y calizas. Según las dimensiones, se dividen en tres categorías:

- Bancada clásica: tiene una altura y longitud del orden de 12 metros y un espesor que varía entre 1, 2 y 3 metros.
- Gran bloque: todas sus dimensiones tienen el mismo orden de magnitud, desde los 3 o 4 metros, hasta los 6 u 8 metros, con la altura sensiblemente mayor que la anchura.
- Bancada larga: se adopta normalmente en yacimientos poco fracturados con espesores medios.

Las técnicas de corte que se pueden utilizar para estos métodos son la perforación y voladura, la lanza térmica, el hilo diamantado y el chorro de agua.

□ Bancos bajos. Estos métodos se aplican en yacimientos masivos muy homogéneos y poco fracturados, donde la altura de los bancos se hace igual a la altura de los bloques comerciales (*figura 2.30*). Este método es más versátil que los anteriores, al permitir una mayor adaptación, y más seguro. Las técnicas de corte que se utilizan rozadoras de brazo, perforación y voladura con cordón detonante y cuñas.

³³ López Jimeno, Carlos (2012). Manual de rocas ornamentales. Prospección, explotación, elaboración y colocación. cit. págs 212-213.

³⁴ Íbidem. págs 213-214.

³⁵ Íbidem. págs 214-215.

2.3 CONCLUSIONES PARCIALES

- Desde la antigüedad hasta el siglo XVII las técnicas de extracción de la piedra apenas han tenido evolución. A lo largo de las distintas civilizaciones se han seguido utilizado los dos sistemas básicos de extracción manual de cuñas y catas. Pese a realizarse de una manera progresivamente más precisa y eficiente y utilizar unas herramientas más tecnológicas, el método y los procedimientos a seguir se mantuvieron intactos, puesto que se trataba de métodos relativamente eficaces y fáciles si se disponía de los medios adecuados, que permitían la extracción de piezas que con escasos ajustes podían utilizarse en las construcciones.
- La labor del cantero, que dependía fundamentalmente de su saber y capacidad artesanal, tenía una especial importancia dentro de todo el proceso desde la extracción a la puesta en obra. De la adecuada ejecución de la extracción de la pieza dependía facilitar en gran medida la posterior tarea de desbastar, labrar y trabajar la pieza.
- Estas labores de extracción manual de la piedra suponían una dura tarea que en las épocas en las que no se disponía de gran cantidad de medios humanos y materiales se trató de evitar, reutilizando mampuestos o sillares que encontraban y recogían.
- La introducción de los sistemas mecánicos de extracción supusieron un cambio radical en el proceso, que pasó de ser manual y artesanal a mecanizado.

El primer sistema mecánico de extracción se introdujo durante el s. XVII, y consistía en la extracción mediante barrenos y pólvora, que permitía una extracción mucho más rápida, pero obligaba a cortar la roca para formar bloques regulares y producían bastante desperdicio de material.

La incorporación de las herramientas neumáticas constituye el primer sistema que aportó ventajas realmente útiles (extracción de bloques mayores con menos esfuerzo físico y mano de obra) para el camino hacia la extracción totalmente industrializada.

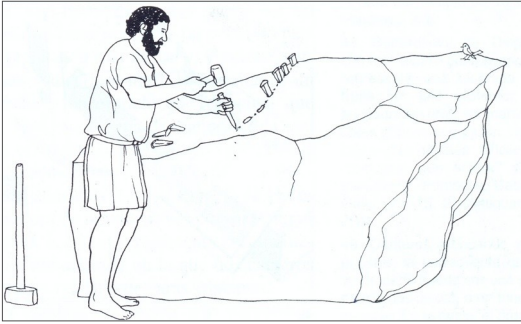
- Hasta finales del s. XVIII no se disponía de conocimientos científicos sobre la resistencia del material y su comportamiento, por lo que la elección de las canteras se realizaba generalmente por cuestiones estéticas, por las betas y coloración de la roca; o estratégicas, por su ubicación y la distancia al taller o a la obra. Esto derivaba en muchas ocasiones en bloques que se fracturaban durante su extracción y quedaban inservibles, provocando en muchos casos el abandono de la cantera.
- La extracción de bloques con un tamaño normalizado aportó grandes ventajas tanto durante el proceso de extracción como posteriormente a la hora de ejecutar el muro. Aunque esta práctica se introdujo de manera general a partir del siglo XIX, la primera referencia se encontró durante el periodo gótico medieval, donde extraían piezas idénticas frente a las individualizadas anteriores.
- La introducción de las herramientas neumáticas durante el siglo XIX, y posteriormente de la moderna maquinaria de extracción del siglo XX dieron el paso definitivo a la extracción industrializada. El tamaño de los bloques extraídos, que progresivamente había sido menor para facilitar el trabajo, crece ahora encontrando su límite en el propio tamaño de la máquina. Se extraen bloques de grandes dimensiones que posteriormente son divididos en la propia cantera para transportarlos al taller o serrería.

TRANSFORMACIÓN: CORTE Y LABRA

El proceso de transformación de la piedra consiste en aquellos pasos destinados a dar forma a los bloques que salen de la cantera, formando piezas destinadas a ser utilizadas en las construcciones.

Las diversas operaciones que incluye se dividen en dos grupos elementales: el proceso de corte y aserrado, y el proceso de labra de la piedra (desbaste y acabado).

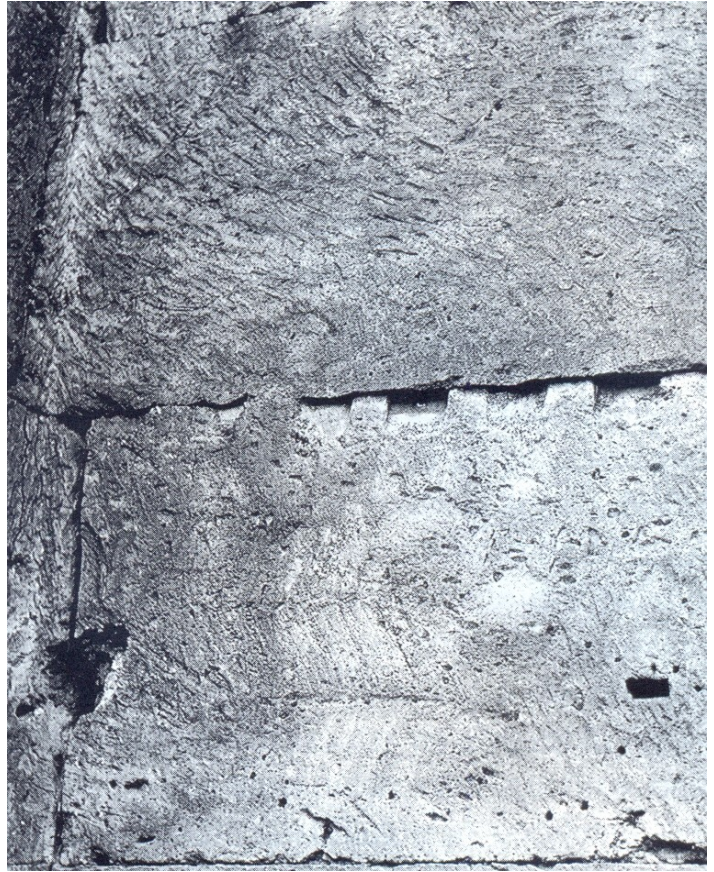
Estos procesos son quizás los que hayan sufrido una transformación más evidente a lo largo del tiempo, al realizar un cambio tan radical y en tan poco espacio de tiempo de las técnicas manuales canteriles a la fabricación de piezas de manera totalmente mecanizada y en muchos casos incluso automatizada.



3.1.1



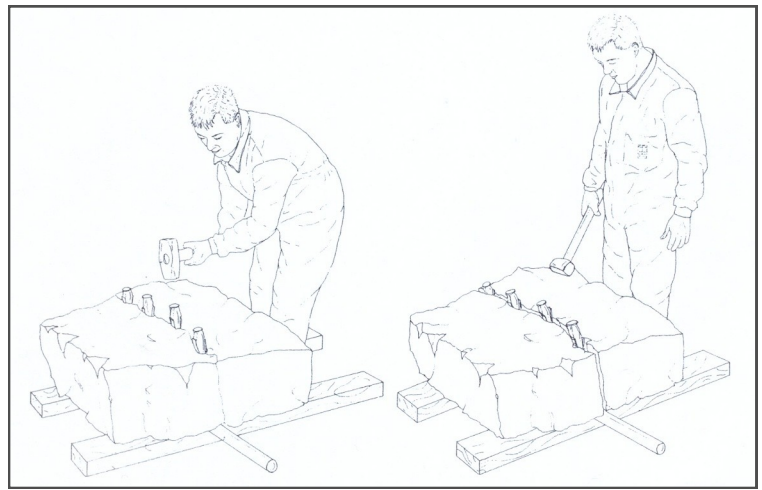
3.1.3



3.1.2



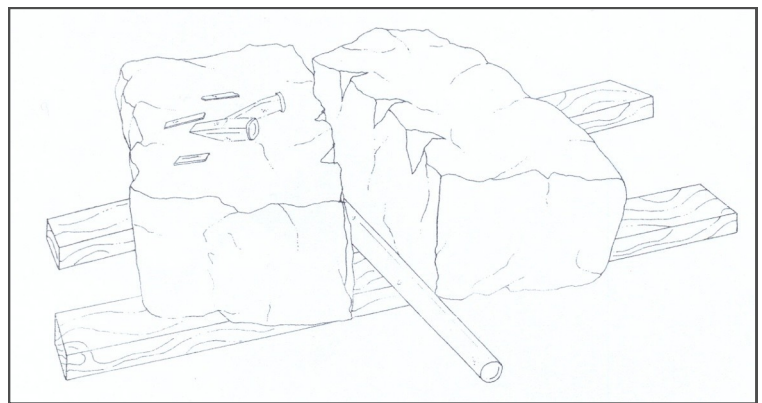
3.1.4



3.1.5



3.1.6



3.1.7

3.1 CORTE

3.1.1

Esquema de partición en la época romana de un bloque de gran tamaño en bloques regulares de menor tamaño por el método de cuñas.

Jean Pierre Adam (1989)

3.1.2

Bloque de toba donde se pueden ver las concavidades producidas por las cuñas para el corte de bloques en la época romana.

Jean Pierre Adam (1989)

3.1.3

Bloque de mármol preparado para una partición con cuñas, en el Foro de Ostia. Dimensiones de los agujeros de las cuñas: largo= 18-20 cm; ancho= 4-5 m.

Jean Pierre Adam (1989)

3.1.4

Bloque de mármol preparado para una partición con cuñas. *Archivo fotográfico del autor.*

3.1.5

Esquema explicativo del procedimiento de partición con cuñas.

Azconegui Morán (1993)

3.1.6

Corte producido en un bloque de piedra por el efecto del golpear con cuñas y mazas.

Archivo fotográfico del autor.

3.1.7

Bloque partido con el método de cuñas.

Azconegui Morán (1993)

El procedimiento de corte se empezó a utilizar por primera vez en Roma. Este hecho derivó directamente del aprovechamiento de las vetas de las masas rocosas para la extracción de bloques, tanto en el método de estratos como en el de cuñas.

De este modo se obtenían bloques que podían ser más o menos irregulares, pero que en cualquier caso no podían ser utilizados directamente en la construcción. Por ello, tuvieron que idear un sistema de corte, en primer lugar para regularizar su forma, y en segundo lugar para subdividir los bloques cuando éstos eran de grandes dimensiones.

3.1.1 MÉTODO DE CUÑAS

3.1.1-1 ORIGEN Y CORTE TRADICIONAL

El primer método de corte utilizado derivaba del método de extracción mediante cuñas, explicado en el capítulo anterior. Aunque en un principio empleaban este sistema para todo tipo de piedras, más adelante quedó definido como el más adecuado para el corte de las piedras más duras únicamente.

Consistía en: ¹

1. Marcar inicialmente la línea de corte.
2. Posteriormente se introducían varias cuñas metálicas a lo largo de la línea (*figura 3.1.1*).
3. Para producir el corte se golpeaba con un mazo la cuña central hasta que el bloque se abría (*figuras 3.1.2, 3.1.3*).

Este sistema se ha seguido empleando de manera artesanal y manual durante siglos. El procedimiento no ha variado demasiado aunque la realización se ha ido haciendo de una manera más técnica, especialmente a partir del s. XVIII.

3.1.1-2 PROCEDIMIENTO DE CORTE CON CUÑAS EN EL S. XIX

Durante el siglo XIX el procedimiento quedó completamente definido en cuanto a los pasos a realizar y a la manera de hacerlo. Consistía en:

1. El cantero señala una línea a-b en la superficie del bloque por el lugar donde deba partirse.
2. Escuadra aproximadamente una línea que baja desde a por el costado y

¹ Choisy, Auguste (1999). El arte de construir en Roma. Ed. a cargo de Santiago Huerta Fernández y Francisco J. Girón Sierra. Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid.



3.1.8



3.1.9

otra desde el lado b y se marcan las líneas con cincel.

3. Se practican taladros introduciendo en ellos las cuñas metálicas (*figura 3.1.4*).
4. Una vez que están todas fijadas en los taladros y en posición, se golpean metódicamente con el martillo hasta que el bloque se abra (*figuras 3.1.5, 3.1.6*).

Cuando los bloques tenían grandes dimensiones los canteros preferían dejar las cuñas introducidas durante algún tiempo e incluso verter agua en los agujeros, ya que ayudaba a cuartear el bloque.²

También facilitaba mucho esta labor la colocación de una barra de sección triangular abajo, en la parte opuesta a las cuñas, ya que facilita que la pieza se abra antes. Dicha barra podía ser de hierro o de madera dura (*figura 3.1.7*).

El empleo de esta manera de tratar la piedra supuso el inicio de un nuevo paso en el proceso. Sin embargo, tenía una serie de limitaciones, ya que era posible que se desviara la línea de corte, especialmente si la piedra no era muy dura, y este método no permitía la producción de piezas de poco espesor, quedando relegado únicamente para la fabricación de sillares.

3.1.2 MÉTODO DE ASERRADO

3.1.2-1 ORIGEN

Conscientes de las limitaciones que presentaba el sistema anterior, los romanos comenzaron a buscar nuevos modos de corte e idearon el método de aserrado.

En un primer momento utilizaron las sierras empleadas para el trabajo de la madera para regularizar la forma de los bloques que venían de la cantera. Estas primeras herramientas tenían una precisión que en realidad no era muy superior a la que se conseguía la mayoría de las veces con las cuñas, pero evitaba cualquier riesgo de un desvío del corte.

■ SIERRAS PARA PIEDRAS BLANDAS

Cuando la piedra que cortaban era relativamente blanda podían emplearse estas hojas dentadas de carpintero (*figuras 3.1.8*), con las que progresivamente fueron consiguiendo una línea de corte mucho más perfeccionada (*figuras 3.1.9*).³

■ SIERRAS PARA PIEDRAS DURAS

Para piedras más duras se sustituyó la hoja dentada por la acción de una hoja

3.1.8
Bloque de mármol
aserrado con sierra de
carpintero.
Enrique Rabasa Díaz
(2000)

3.1.9
Bloque de mármol
aserrado, en la obra
del Templo de Venus
en Pompeya.
Jean Pierre Adam
(1989)

² Azconegui Morán, Francisco; Castellanos Miguélez, Agustín (1993). El trabajo de la piedra. Guía práctica de cantería. Escuela Taller de Restauración 'Centro Histórico de León', León.

³ Choisy, Auguste (1999). El arte de construir en Roma. cit.



3.1.10



3.1.11

lisa y un abrasivo (arena). Para producir el corte preparaban la línea de corte con un punzón (de este modo se evitaba el desvío de la sierra) y durante la operación se echaba agua en toda la ranura para moderar el calentamiento del hierro. ⁴

- Sierras troncador: cuando los bloques eran de pequeñas o medianas dimensiones se utilizaban sierras del tipo troncador, es decir, provistas de una empuñadura de tracción en cada extremo y requerían el trabajo conjunto de dos personas. ⁵
- Sierras con bastidor: cuando se trataba de bloques de dimensiones mayores, la hoja era mantenida en tensión mediante un marco de madera, y denominadas sierras de bastidor de lama continua, que según la calidad y el tamaño de la misma podía colgar de un puente o no. ⁶

El acabado tan perfeccionado que consiguieron regularizando bloques con estos últimos tipos de sierras manuales hizo que lo desarrollaran y comenzaran con las primeras experiencias de corte de los bloques cuadrados o rectangulares de piedra en piezas progresivamente más delgadas. El sillar grueso de piedra redujo progresivamente su grosor, dando lugar a los primeros aplacados utilizados para el revestimiento de muros. ⁷

3.1.2-2 LAS PRIMERAS MÁQUINAS PARA LA PRODUCCIÓN DE PLACAS DELGADAS DE PIEDRA

El procedimiento para conseguir estos aplacados de piedra mediante el sistema de aserrado manual era muy costoso por su dificultad y la gran cantidad de tiempo que requería. Se cree que dos hombres en una jornada completa avanzaban entre 3 y 4 cm en el corte. Esto se debe a que con este sistema no se cortaba realmente la piedra, sino que más bien se iba desgastando por abrasión. Para alargar la vida de la hoja de sierra se echaba agua y arena silíceas. En principio, las losas solían tener un grosor que permitía que el revestimiento fuera autoportante, pero con el tiempo y el desarrollo de la técnica llegaron a conseguir placas muy delgadas, de incluso 1 centímetro de espesor, consiguiendo el máximo aprovechamiento del material sin producir desperdicios. ⁸

El espesor tan delgado de estas placas hace pensar que se realizaron con medios mecanizados, dado lo complejo y complicadísimo que resultaría su realización manual (*figura 3.1.10*). Los indicios de la primera máquina para serrar pie-

3.1.10

Huellas en una columna antigua reutilizada, realizadas con una sierra de cuatro hojas de corte, probablemente tensadas en un marco múltiple, en Gerasa. S. IV d.C.

Klaus Grewe (2010)

3.1.11

Relieve sobre el sarcófago de Marco Aurelio Amiano en Hierápolis, s. III d.C. Está representada una sierra de doble corte para serrar piedras.

Klaus Grewe (2010)

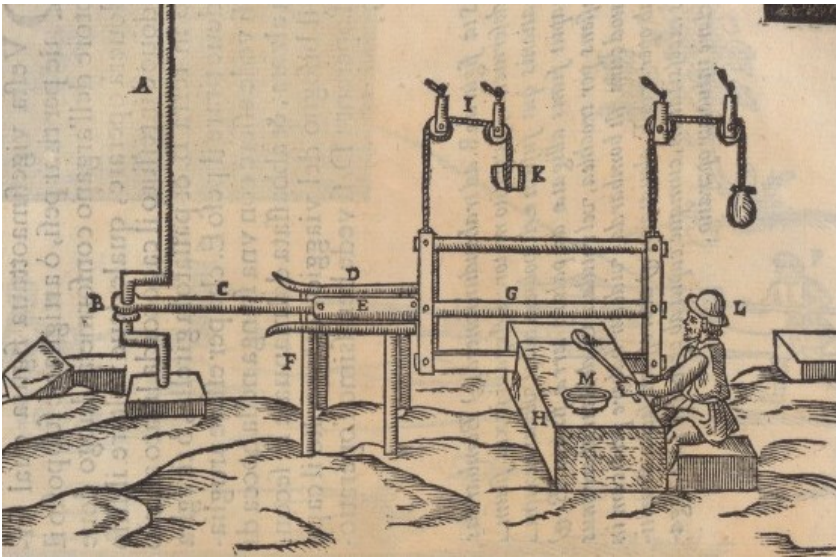
⁴ Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. Picard, París

⁵ *Ibidem*.

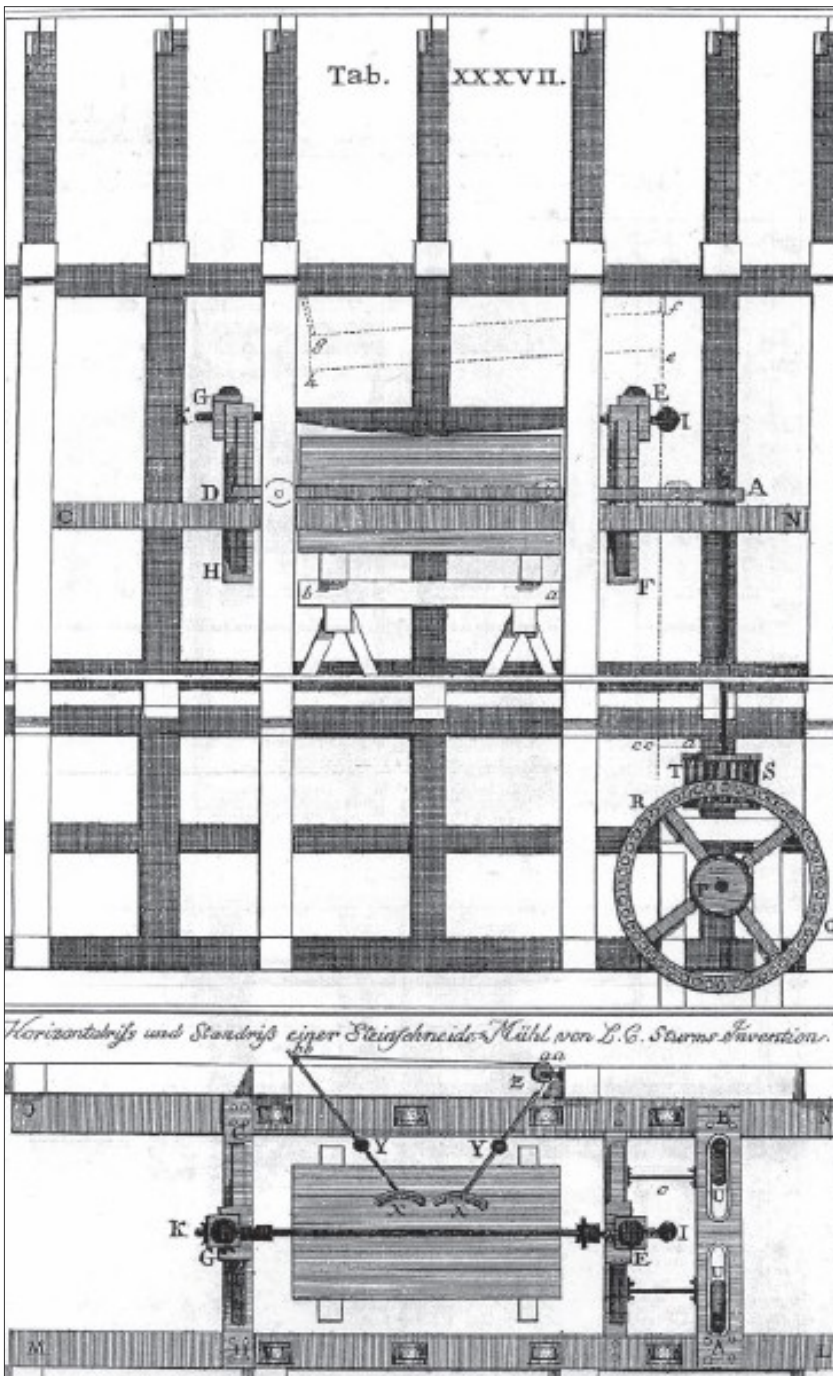
⁶ *Ibidem*.

⁷ Durante la época de agosto se reconstruyeron numerosos edificios públicos, sustituyendo materiales de acabado como terracota, estuco o adobe por revestimientos de piedra. Se realizaban aplacados de losas de mármol pulidas y planas, recibidas sobre grandes gruesos de mortero de cal. *Ibidem*.

⁸ Grewe, Klaus (2010). La máquina romana de serrar piedras. Tr. Miguel Ordoñez. Las técnicas y las construcciones de la ingeniería romana. <http://www.klaus-grewe.de> (Consulta: lunes, 24 de marzo de 2014)



3.1.12



3.1.13

dras se han encontrado en un relieve sobre el sarcófago de Marco Aurelio Amiano, que data del **s. III d.C.**, en Hierápolis, Turquía (*figura 3.1.11*). Consistía en rueda hidráulica que se accionaba por unas palas movidas por el impacto del agua. Ésta tenía un movimiento continuo que alimentaba a una sierra de doble corte.⁹

Aunque no se conservan restos ni relieves, se han encontrado algunos datos sobre la utilización de molinos hidráulicos para serrar piedra, anteriores a esta época. La primera referencia directa de la aplicación de estos sistemas se encontró en un poema del poeta Ausonio en el año **371 a.C.** En su poema al río Mosella escribió:

“ A ti (Mosella) que te llegan tan rápido como pueden tus aguas, acariciándote, empuja el río Kyll con ímpetu y el río Ruwer, famoso por su mármol. Peces excelentes habitan en el Kyll, en sus remolinos, giran allí en el Ruwer los molinos de grano y extraen lisas placas de mármol de un bloque, chirriando las hojas de corte, pudiéndose oír un ruido incesante desde ambas orillas.”

No se tienen referencias directas de la aplicación del método de aserrado en épocas posteriores a la caída del Imperio romano, ni mediante sierras manuales ni mediante estos sistemas mecánicos vistos. En el caso de que los bloques extraídos resultasen demasiado grandes, éstos se dividían en trozos más pequeños mediante el sistema de cuñas metálicas golpeadas con mazas. Al no permitir las cuñas la producción de placas delgadas, éstas dejaron de emplearse en las fachadas, y no será hasta el s. XVII cuando se volverán a encontrar herramientas y máquinas que permitan su fabricación.

3.1.2-3 DESARROLLO TECNOLÓGICO ENTRE LOS SIGLOS XVII Y XIX

■ GIOVANNI BRANCA

La siguiente referencia encontrada de una sierra mecánica fue en **1629**, cuando el ingeniero y arquitecto Giovanni Branca publicó un modelo de sierra de vaivén para el corte de piedras (*figura 3.1.12*). Se trataba de una sierra de lama lisa, sujeta por contrapesos, cuyo vaivén se transmitía por un cigüeñal. La fuerza motriz podía ser una rueda hidráulica o un molino de viento. El operario se limitaba a echar el elemento abrasivo por la hendidura y a vigilar el vaivén.¹⁰

■ L. C. STURM

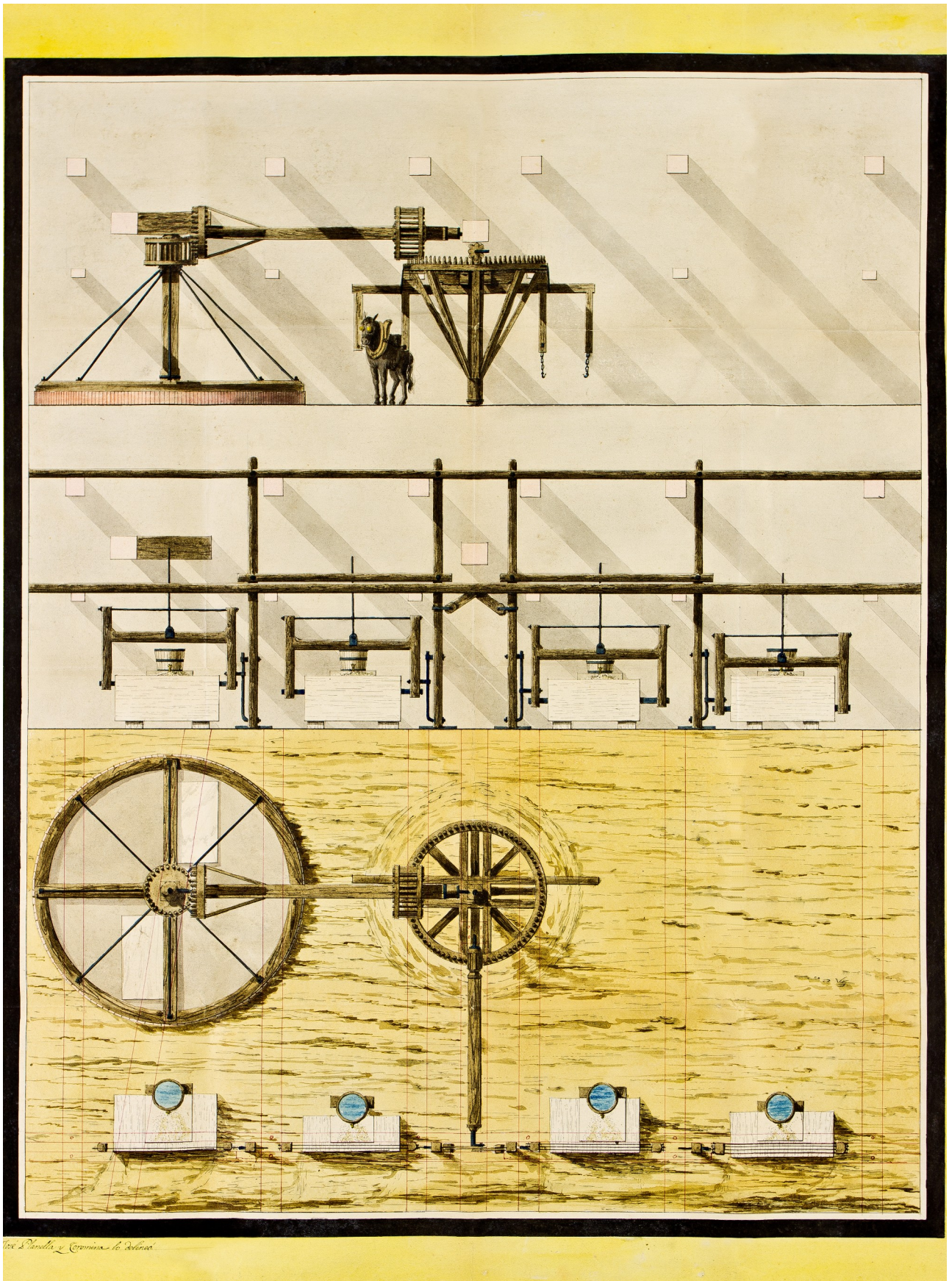
En **1718** L. C. Sturm presentó un nuevo modelo de máquina hidráulica (*figura 3.1.13*). Se trataba de un carro puesto en movimiento por un engranaje de una hoja de corte tensada en un marco con deslizamiento vertical. Esta máquina aportó una serie de novedades frente a la anterior, como el sistema de abasteci-

3.1.12
Máquina hidráulica
para serrar piedra.
Giovanni Branca
(1629)

3.1.13
Máquina para serrar
piedra mediante una
sierra de vaivén.
L. C. Sturm (1718)

⁹ Ibídem.

¹⁰ Branca, Giovanni. (1629) Le machine.



1682. La Piovra e Corvina de Volcan

miento automático de arena y de goteo para el agua. La transmisión se producía con un engranaje compuesto por una rueda dentada y un piñón y frente al movimiento de la sierra anterior ahora ésta está sujeta a un carro y es el carro el que se mueve.¹¹

Pese a la mejora que proporcionaba estos sistemas parece que no fueron bien acogidos y realmente no empezaron a aplicarse hasta la aparición de la máquina de vapor presentada en 1769 por James Watt.

A raíz de la revolución industrial, se produjo un incremento de la producción industrial que derivó en la sustitución de la herramienta manual por la máquina, constituyendo un cambio fundamental en las condiciones técnicas de producción.

■ PEDRO FÁBREGAS

En España, las primera máquina mecanizada patentadas para serrar piedra datan del s. XIX. Las patentes y privilegios de invención existentes en la materia señalan el año **1830**, cuando se registra un privilegio de invención con el nombre de una “máquina para serrar con la mayor economía y brevedad posible los mármoles y toda clase de piedra”, de D. Pedro Fábregas. Esta máquina interesa desde el punto de vista tecnológico no sólo por su doble utilidad (cortar y pulir), sino porque es la primera introducida en España, proveniente de la tecnología más avanzada en Europa en ese momento, la italiana.¹²

Como se puede apreciar en el plano que acompaña a la memoria descriptiva del privilegio (*figura 3.1.14*), con esta máquina se podían serrar hasta cuatro bloques de mármol a la vez, y al mismo tiempo se puede realizar el pulido de las piezas ya cortadas.

Es una máquina de tracción animal, lo cual hace que aventajara a otras que sólo dependían del potencial humano, no sólo en tiempo, ya que dos personas realizando la operación de corte para cada pieza invertirían demasiado tiempo, sino que además habría que pagar salarios excesivos, lo que llevaría a una situación no competitiva con las otras máquinas extranjeras.

A continuación se muestra un fragmento de la memoria que acompaña al expediente.

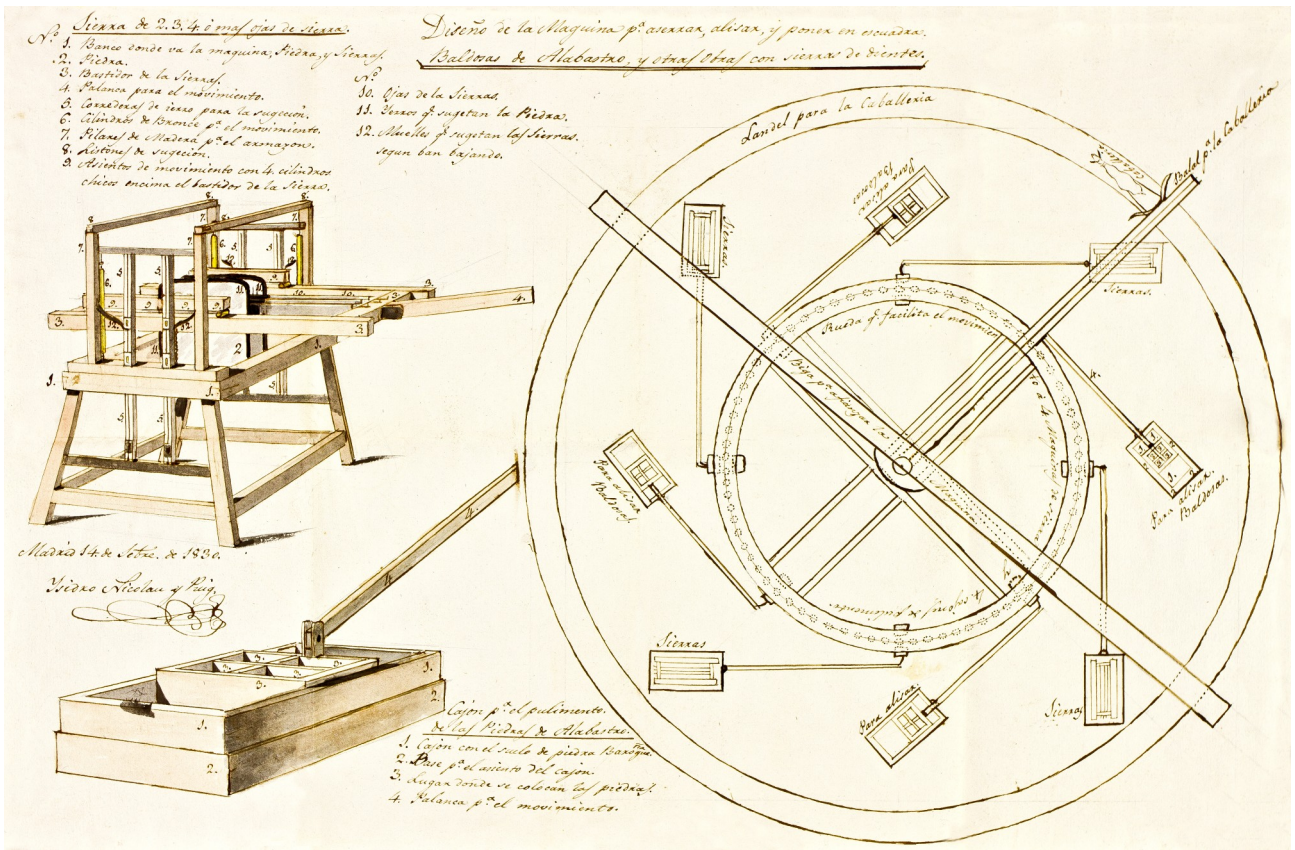
“ Resulta del diseño presentado y a mi entender bastante comprensivo y que es susceptible su enlace de un mayor impulso, ya sea por medio del vapor bien del agua, cuyos elementos presentarían resultados incomparablemente favorables al sistema de los animales, sin privarme de ninguno de los recursos. Así, obran al mismo tiempo diez “filos” (hojas de sierra), montados en unos soportes al pie de la máquina. Un soporte abraza a cuatro hojas de sierra, otra a tres, otra a dos y otra a una. Los cuales graduando la fuerza y duplicando los serrotes de su actual movi-

3.1.14
Máquina para serrar con la mayor economía y brevedad posible los mármoles y toda clase de piedra. Plano del privilegio de invención.

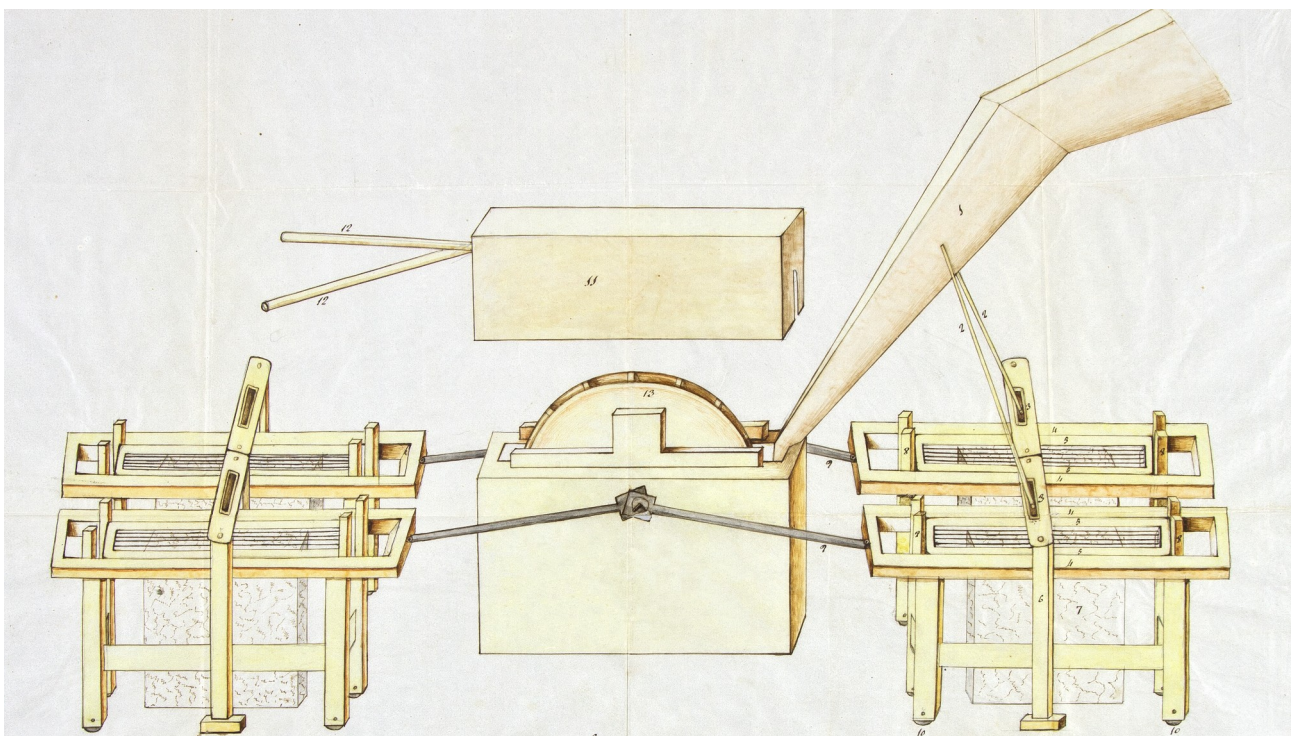
D. Pedro Fábregas (1830)

¹¹ Grewe, Klaus (2010). La máquina romana de serrar piedras. cit. pág.395

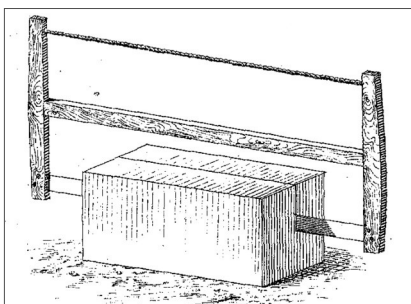
¹² Datos obtenidos de los expedientes del Archivo Histórico de Patentes.



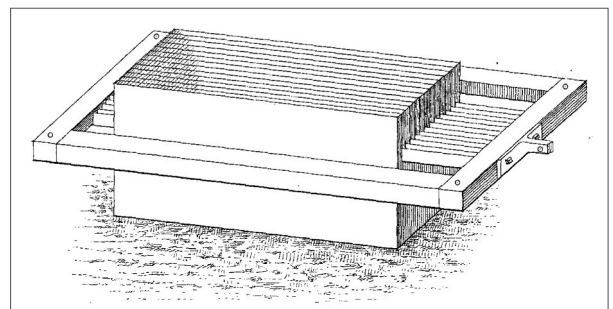
3.1.15



3.1.16



3.1.17



3.1.18

miento sin la menor dificultad se pueden aumentar cuando se quieren, pues así lo admite la disposición en que están contruidos, sin necesidad de variar lo esencial. Viendo la perspectiva, cualquier persona inteligente comprenderá que la ventaja es tanta como que mientras que dos hombres sierran una pieza, la máquina arroja diez y pule otras tantas al mismo tiempo.”

■ ISIDRO NICOLAU Y PUIG

También en 1930 D Isidro Nicolau y Puig presentó una “máquina para aserrar piedra, alisar y poner en escuadra” (*figura 3.1.15*). La máquina, movida por tracción animal, disponía de 4 bancos para serrar y cuatro cajones de pulimentar. Cada banco de serrar se compone de un bastidor con 5 sierras, por lo que en cada corte se pueden sacar 6 placas delgadas. Al estar compuesta por 4 bancos, se podrían producir 24 placas a la vez.¹³

■ JUAN GÓMEZ Y REYES

En 1854 D. Juan Gómez y Reyes presentó una patente de invención de una “máquina para aserrar piedras de todas magnitudes y grueso” (*figura 3.1.16*). En este caso, el movimiento se producía mediante agua arrojada desde un depósito sobre una rueda. Ésta transmitía el movimiento a cuatro cadenas que a su vez activaban cuatro módulos de sierra. Cada uno de ellos se sujetaba mediante un bastidor principal exterior y otro bastidor interior que aseguraba las sierras de corte, 4 por cada módulo.¹⁴

Estas novedosas máquinas constituyen las primeras patentes españolas, que al igual que otras patentadas a la par en otros países, aportaban una serie de ventajas que dieron paso a la aparición de las grandes máquinas mecanizadas del siglo XX.

- **Permitían el corte de varios bloques al mismo tiempo**
- **Disminuían la necesidad de mano de obra**
- **Aumentaba la productividad**
- **Permitían realizar varios cortes al bloque, produciendo varias placas delgadas al mismo tiempo.**

Sin embargo, en España aún en el s. XIX se recomendaba la utilización de sierras y tronzadores manuales para el aserrío de la piedra (*figuras 3.1.17, 3.1.18*), rechazando estos novedosos sistemas mecanizados.

Las primeras máquinas utilizadas en España, por tanto, provenían de países como Francia, Alemania, Inglaterra, y especialmente Italia, que fueron los máximos exportadores de esta tecnología al resto del mundo.

3.1.15
Máquina para aserrar piedra, alisar y poner en escuadra. Plano del privilegio de invención. D. Isidro Nicolau y Puig (1830)

3.1.16
Máquina para aserrar piedras de todas magnitudes y grueso. Plano del privilegio de invención. D. Juan Gómez y Reyes (1854)

3.1.17
Sierra manual de una hoja. Antonio Robira y Rabassa (1897)

3.1.18
Sierra manual de múltiples hojas de corte. Florencio Ger y Lobeza (1898)

¹³ Datos obtenidos de los expedientes del Archivo Histórico de Patentes.

¹⁴ *Ibidem*.



3.1.19



3.1.20

3.1.2-4 EL CORTE MECANIZADO DESDE EL S. XX

Conforme avanzaban los métodos de extracción en canteras fueron desarrollándose paralelamente máquinas que cortaban el bloque resultante que llegaba de la cantera, en las serrerías o en los talleres, formando las placas delgadas que por esos años empezaron a utilizarse a modo de chapados.

■ CORTE CON TELARES

Las primeras máquinas que se desarrollaron a partir de las sierras tradicionales fueron los telares multiflejes, desde **principios del s. XX**. El funcionamiento de estas máquinas se basaba en principios antiguos. El corte se producía debido a la presión ejercida por flejes de acero, que son movidos verticalmente por el marco portacuchillas, y a la acción abrasiva de la granalla de acero o fundición que, mezclada con agua y cal se vertía sobre el bloque.¹⁵

Actualmente se fabrican telares con flejes diamantados (*figura 3.1.19*), que producen un corte mucho más rápido que los tradicionales. Éstos se suelen utilizar en el tratamiento de granitos. Cuando los telares se utilizan para la regularización de bloques muy disformes, sólo se utiliza un fleje, denominándose monolama.

■ CORTE CON CORTABLOQUES

Posteriormente llegaron las máquinas de sierra de disco. Aunque ya se habían patentado en España máquinas de disco desde la década de **1920**¹⁶, éstas no se empezaron a utilizar a gran escala hasta la década de **1960**.

Las primeras sierras eran de acero hasta que fueron sustituidas por los discos diamantados. Este sistema se suele utilizar para cortar bloques de piedras duras. Al disponer de discos diamantados de gran diámetro se pueden realizar cortes muy profundos en sucesivas pasadas de 3 a 8 centímetros cada una, llamadas incrementos (*figura 3.1.20*).¹⁷

Las primeras máquinas realizaban el corte con un único disco, y posteriormente aparecieron también las sierras multidisco. Éstas permitían realizar varios cortes al mismo tiempo, normalmente de 3 a 12.¹⁸

■ CORTE CON HILO

El corte con hilo se realizaba inicialmente mediante hilo helicoidal, de acero continuo (*figura 3.1.21*), que posteriormente fue sustituido por el hilo diamantado (*figura 3.1.22*) durante la década de **1980**.

¹⁵ López Jimeno, Carlos (2012). Manual de rocas ornamentales. Prospección, explotación, elaboración y colocación. Gráficas Arias Montano, Madrid. pág. 357.

¹⁶ Datos obtenidos de los expedientes del Archivo Histórico de Patentes.

¹⁷ López Jimeno, Carlos (2012). Manual de rocas ornamentales. Prospección, explotación, elaboración y colocación. cit.

¹⁸ *Ibidem*.

3.1.19
Telar multifleje.
José Ignacio García de los Ríos Cobo (2001)

3.1.20
Cortes mediante sierra de disco. Se puede observar el chorro de agua con el que se humedece la sierra para evitar que esta se degrade.
Archivo fotográfico de Ángel Luis Gallego. Cedida.



3.1.21



3.1.22



3.1.23

El sistema de descenso del hilo está formado por un motor eléctrico de velocidad variable que se ajusta según el tipo de piedra. Actualmente los cortes se realizan mediante un sistema automático, que acciona el carro portabloques, pudiendo incluso programar espesores diferentes (figura 3.1.23). La velocidad de corte del hilo varía según la serrabilidad del material, pero puede llegar a serrar hasta 0,5 m² por minuto en piedras blandas y 5 m² por hora en piedras duras.¹⁹

3.1.3 EL PROCEDIMIENTO ACTUAL DE CORTE

Hoy en día, el proceso de corte de los bloques para la formación de placas consta de una serie de etapas, que dependen del tipo de roca a tratar.

3.1.3-1 GRUPO DE GRANITOS Y MÁRMOLES (figura 3.1.24)²⁰

En este caso, el corte se hace de la siguiente manera:

1. Precorte. Se perfilan los bloques que llegan muy disformes. Este proceso sustituye a la etapa de desbaste, que se explicará más adelante.
2. Corte primario. Se cortan los bloques en planchas cuya anchura será la altura del aserrado y su longitud la del bloque. Esta etapa se puede realizar mediante la siguiente maquinaria:
 - Telar de flejes diamantados
 - Cortabloques monodisco gigante
 - Cortabloques multidisco con disco secundario horizontal
3. Corte secundario. Consiste en un corte longitudinal y transversal de las planchas para su comercialización (figuras 3.1.25, 3.1.26). Se realiza con:
 - Corte con hilo en sierras puente
 - Sierras multidisco

3.1.3-2 GRUPO DE PIZARRAS²¹

El procedimiento para las pizarras se puede realizar de manera mecanizada, aunque también se puede llevar a cabo todavía de una manera más artesanal.

1. Exfoliado primario. Consiste en dividir los rachones o bloques que vienen de la cantera en otros menores que no sobrepasen los 30-35 centímetros de espesor, con martillos neumáticos, exfoliadoras neumáticas o incluso de manera totalmente artesanal con cuñas y mazos, aprovechando los planos de esquistosidad.

3.1.21
Serrado de un bloque mediante la utilización de hilo de acero.
David Dernie (2003)

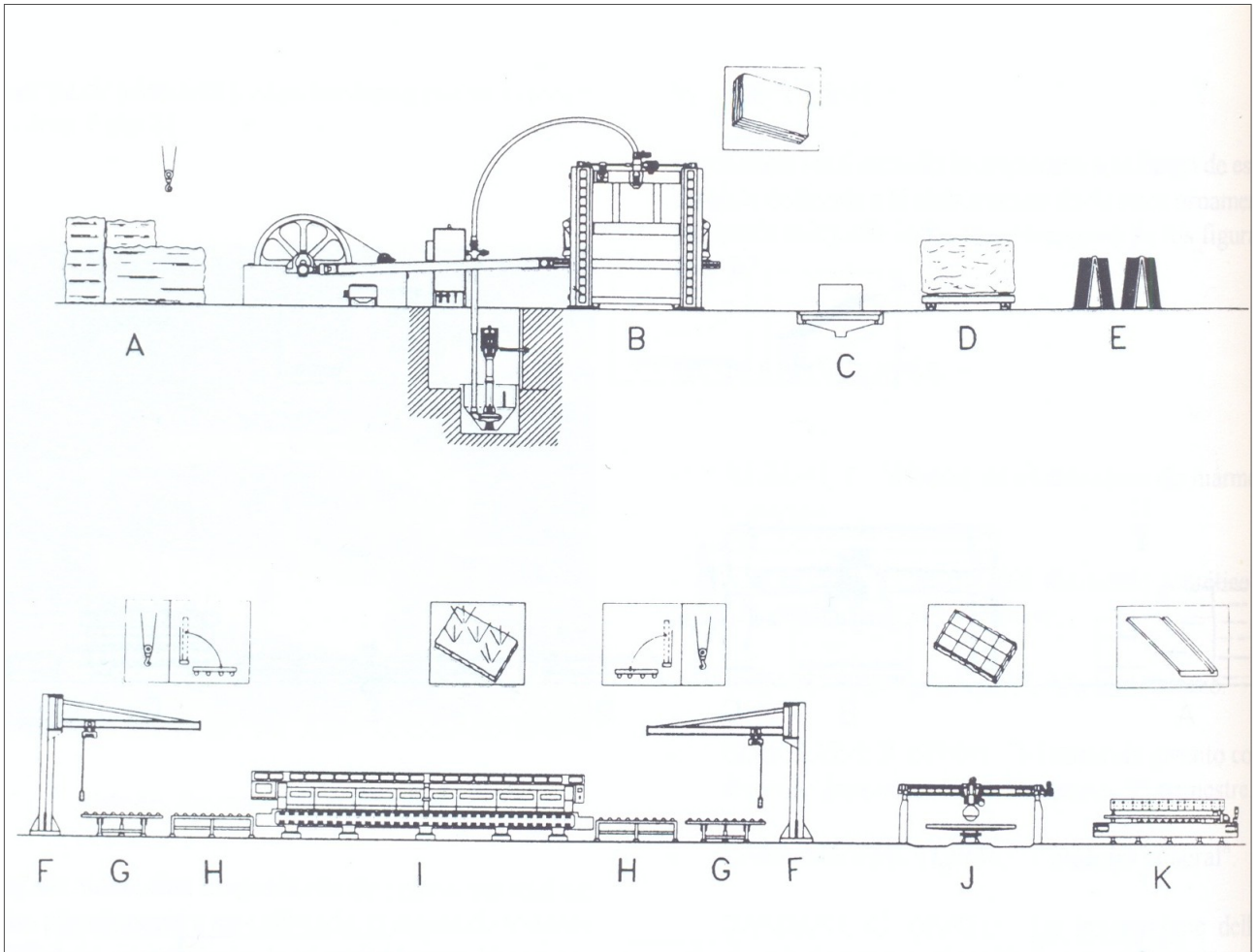
3.1.22
Hilo diamantado.
Archivo fotográfico del autor.

3.1.23
Cortadora puente de hilo diamantado.
Archivo fotográfico de Ángel Luis Gallego. Cedida.

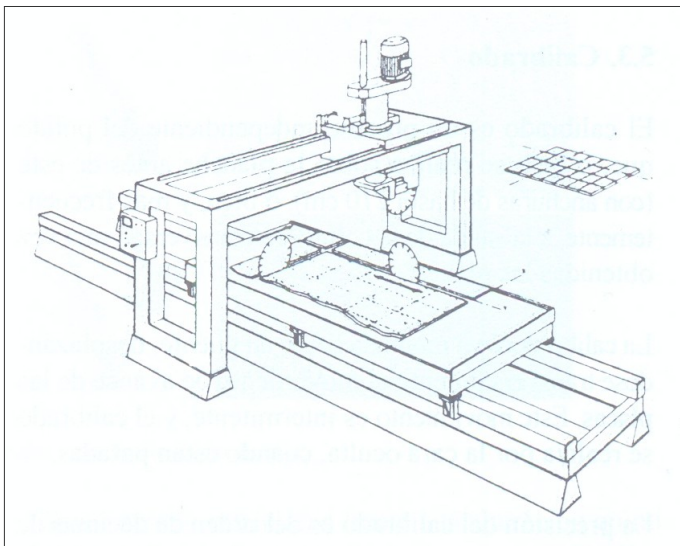
¹⁹ Diamant Boart. Datos obtenidos de la página web del comerciante. <http://www.diamant-boart.com/es/> (Consulta: sábado 10 de mayo de 2014)

²⁰ López Jimeno, Carlos (2012). Manual de rocas ornamentales. Prospección, explotación, elaboración y colocación. cit. pág. 354

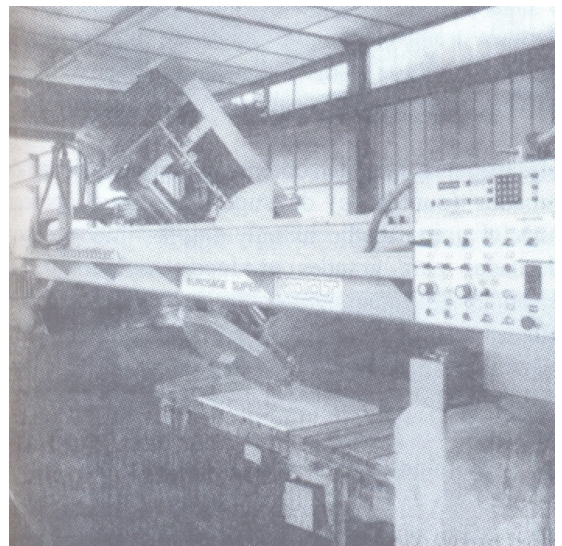
²¹ *Ibidem.* págs. 339-343



3.1.24



3.1.25



3.1.26

3.1.24

Esquema de línea de elaboración tipo de placas de granito.

A) Bloques almacenados listos para su carga y aserrado

B) Telas pendular para el aserrado en planchas

C) Transportador motorizado del carro portabloques.

D) Carro transportador de planchas

E) Almacenamiento de las planchas hasta su aserrado

F) Pluma para la manipulación de las planchas

G) Banco basculante para la carga y descarga

H) Mesa de rodillos

I) Tren continuo de desbaste y pulido

J) Sierra puente para el corte transversal y longitudinal de las planchas

K) Pulidora continua de cantos

Ana Benito Soria (2012)



3.1.27

3.1.25

Esquema de corte longitudinal y transversal de la placa.

Ana Benito Soria (2012)

3.1.26

Sierra puente con cabeza móvil para corte longitudinal y transversal de la placa.

Ana Benito Soria (2012)

3.1.27

Exfoliación manual para la obtención de placas de pizarra.

Peter Stainer (1985)

3.1.28

Preparación de placas de pizarra. En esta fase se está realizando la exfoliación final a mano, de manera artesanal.

Archivo fotográfico de Ángel Luis Gallego. Cedida.



3.1.28

2. Serrado. Consiste en el troceado en bloques paralelepípedos, comúnmente llamados tochos, de plantillas ligeramente superiores a las placas comerciales. Esta fase se realiza generalmente mediante sierras de disco diamantado, ya sea mediante sierras en líneas paralelas (varias sierras trabajando independientemente) o en línea serie (varias sierras trabajando una detrás de la otra).
3. Exfoliado final. Consiste en la exfoliación de los tochos a los espesores comerciales. Este proceso puede hacerse tanto de forma manual en los bancos de labrado (*figuras 3.1.27, 3.1.28*), como de forma mecánica con máquinas de ventosas.

3.1.4 CONCLUSIONES PARCIALES

- La posibilidad de producir placas de poco espesor está muy relacionada con la evolución hacia una construcción más ligera y ha dependido fundamentalmente de la disponibilidad de los medios adecuados.
- Los romanos fueron los primeros en introducir el método de aserrado, por el especial interés que en conseguir placas delgadas y con un buen acabado. En un principio utilizaban sierras de carpintero por no existir herramientas específicas para piedra, pero al ser un trabajo duro y lento derivó en la evolución y el desarrollo de las primeras máquinas hidráulicas. La primera referencia de la utilización de estas máquinas se encontró en un poema del año 371 a.C., y la primera referencia gráfica del siglo III d. C.
- Al no disponer de tales medios las posteriores civilizaciones abandonaron esta práctica. Hasta el siglo XVII no se han vuelto a encontrar referencias de la construcción de este tipo de máquinas. Aportaban las ventajas de agilizar y acelerar el proceso, además del ahorro de mano de obra. Sin embargo, la especialización que habían ido adquiriendo los canteros a lo largo de los años mediante los métodos tradicionales manuales hizo que prefirieran mantener sus métodos a la utilización de estas novedosas patentes, que por otra parte eran escasas y bastante grandes y costosas.
- Estos artilugios no fueron bien aceptados hasta la llegada de la industrialización, cuando el número de patentes que fue apareciendo era mucho mayor, y países como Francia, Alemania, Inglaterra, y principalmente Italia comenzaron a exportar dicha tecnología, que permitía conseguir varias placas delgadas a la vez y con la vigilancia de un único operario. Las primeras patentes españolas de máquinas para serrar piedra están registradas en el año 1830, y a pesar de presentar diseños muy acordes con los europeos tardaron unos años en ser utilizadas a gran escala.
- El proceso de corte se ha ido convirtiendo a lo largo del siglo XX en una línea de producción totalmente industrializada que se encarga de realizar todos los procesos de cortes y acabados necesarios para convertir el bloque de piedra que viene de la cantera en un producto acabado listo para la puesta en obra.
- Las modernas máquinas de corte permiten un corte cada vez más preciso y automatizado. Ya no sólo se limitan a formar las placas, sino que son capaces de moldear o biselar los cantos, así como formar los necesarios agujeros o ranuras que necesite la pieza. De esta manera el proceso está mucho más controlado y se simplifica en gran medida la puesta en obra.

3.2 LABRA

3.2.1 INTRODUCCIÓN

La característica básica para la labra de la piedra es la **labrabilidad**, aptitud o facilidad que presenta una roca para dejarse trabajar. Normalmente, la aptitud de labrabilidad disminuye cuando las piedras son demasiado duras o tienen una estratificación demasiado marcada.

Una vez extraídos los bloques de la cantera es necesario darles la forma adecuada para su posterior colocación en obra. Este proceso se conoce como labra de la piedra, y comprende dos etapas fundamentales:¹

- **Desbaste y talla:** consiste en preparar los bloques dándoles una forma aproximada y sobredimensionándolos con respecto del tamaño definitivo. Estos sobrantes o excesos del bloque se denominan creces de cantera.
- **Labra:** abarca una serie de operaciones realizadas con mayor esmero y precisión según avanza el trabajo, hasta dar a la piedra el tamaño, la forma y el acabado deseado definitivo.

El proceso de labra de los bloques de piedra se ha realizado a lo largo de muchos siglos de una manera manual y artesanal por el cantero, sin variar los procedimientos a lo largo de este tiempo. Como sucedía con otros procesos, a lo largo del siglo XIX sucedieron una serie de hechos significativos que transformaron radicalmente el proceso, por lo que para el análisis de dicha evolución se han definido dos etapas diferenciadas.

3.2.2 DESDE LA ANTIGÜEDAD HASTA EL S. XIX

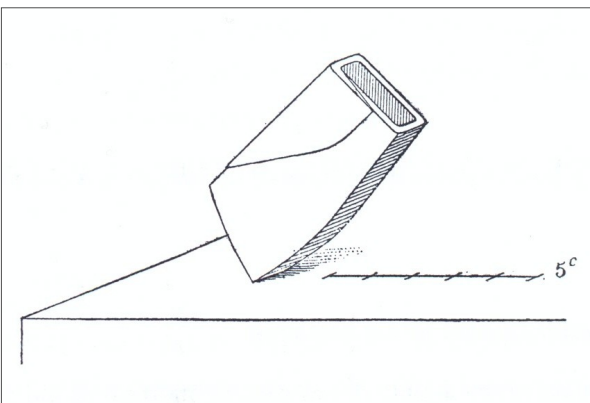
Durante esta etapa, los bloques de piedra generalmente se han transportado desde la cantera en bruto o someramente desbastados, para posteriormente realizar las labores de trabajar y labrar la piedra en el taller o la propia construcción. Los motivos para organizar el trabajo de esta manera, pese a tener que transportar unos volúmenes de piedra ligeramente mayores a los finales eran varios.

- En primer lugar se pretendía evitar desperfectos en las piezas durante el transporte, debido a los caminos irregulares que tenían que recorrer y a las vibraciones producidas por los carros, carentes de suspensión.
- La segunda razón, y probablemente la más importante era una cuestión de organización del trabajo, ya que el hecho de tallar la piedra sobre la marcha de la construcción permitía una planificación muy cuidadosa de los despieces y acabados.

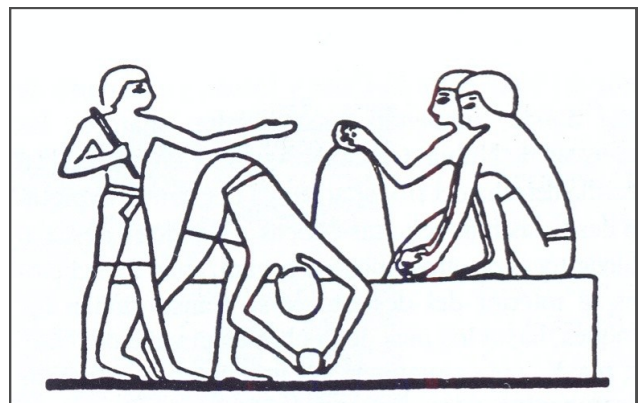
¹ López Jimeno, Carlos (2012). Manual de rocas ornamentales. Prospección, explotación, elaboración y colocación. cit.



3.2.1



3.2.2



3.2.3

3.2.2-1 EL TRABAJO DE LA PIEDRA EN EGIPTO

Las primeras herramientas para trabajar la piedra se utilizaban en Egipto. Durante esta época no se tenía un gran número de herramientas, por lo que en muchos casos se utilizaban indistintamente para el desbaste de los grandes sillares que venían de la cantera y posteriormente para la labra (*figura 3.2.1*). Se utilizaban: ²

- Cinceles de bronce con un filo bastante similar al de los actuales de acero.
- Martilleo con punzón
- Aserrado mediante láminas metálicas y arena, previo mojado de la piedra.
- Escoplo bimetálico: para el trabajo de las piedras más grandes y duras utilizaba este cincel más complejo, analizado por Albert Colson. (*figura 3.2.2*). ³
- Brocas: se utilizaban para pulir las piezas mediante rozamiento y con la ayuda de cantos rodados y arena silíceas (*figura 3.2.3*).

A pesar de disponer de estas herramientas, el bronce hacía que fuese bastante complicado conseguir resultados de buena calidad, por lo que sólo se labraba lo estrictamente necesario para que las piezas tuvieran un correcto asiento. ⁴

3.2.2-2 EL TRABAJO DE LA PIEDRA EN GRECIA

La aportación más significativa durante la época griega fue la incorporación de las **herramientas de hierro**, que a partir del **s. VII a.C** comenzaron a utilizarse herramientas, dando lugar a nuevas posibilidades de trabajar la piedra por la facilidad de labra que permitía. Las herramientas de hierro ya realizan cortes en la piedra, frente a las antiguas de bronce, que más bien la debilitaban. ⁵

3.2.2-3 EL TRABAJO DE LA PIEDRA EN ROMA

■ LAS HERRAMIENTAS

Durante la época romana se inventó un gran número de instrumentos de hierro (*figura 3.2.4*). Así, los romanos definieron la gran mayoría de las herramientas manuales básicas que se seguirán utilizando a lo largo de los siglos hasta la llegada de la mecanización, y que pese a poseer progresivamente una mayor precisión, tanto la herramienta como la propia traza seguirán siendo prácticamente iguales.

3.2.1
Marcas de la utilización de cinceles de bronce para tallar los sillares. Las muescas son muy similares a las realizadas en épocas posteriores con los cinceles de hierro e incluso los de acero.
Archivo fotográfico del autor.

3.2.2
Escoplo bimetálico empleado en Egipto para el corte de las piedras duras.
Auguste Choisy (1904)

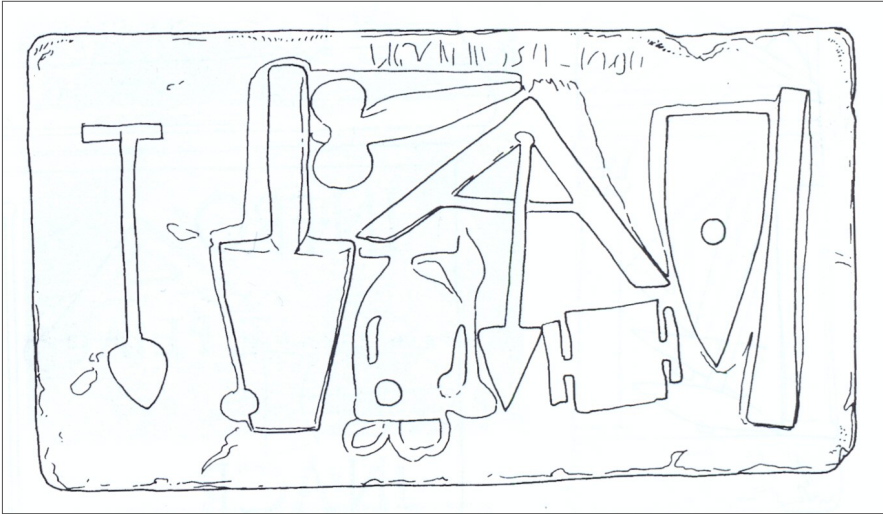
3.2.3
Representación de los trabajos de elaboración de un bloque mediante esferas de doletrita. Tumba de Tebas en Egipto, 1500 a.C.
Juan Herrera Herbert (2012)

² Choisy, Auguste (2006). El arte de construir en Egipto. Tr. Íntegra de la edición L'art de bâtir chez les Égyptiens, de 1904, por Gema López Manzanares, Instituto Juan de Herrera, Madrid.

³ Estaba formado por un núcleo de bronce con el 13% de estaño de 4 milímetros de espesor y un recubrimiento de bronce prácticamente puro de 1 milímetro de espesor.
Ibíd.

⁴ Ibíd.

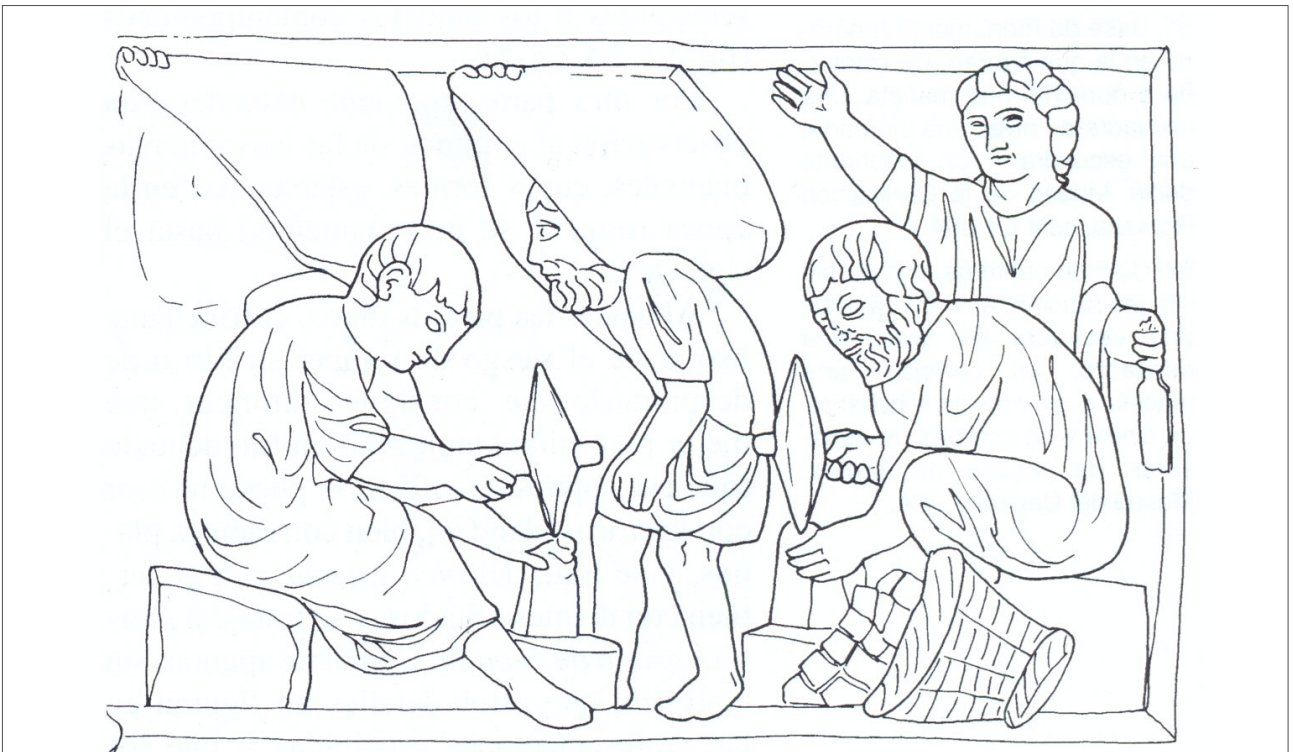
⁵ Patrón, Vicente. (2001). El nacimiento de una técnica. Tectónica Nº2. Envoltentes 2. Cerramientos pesados. pág. 10.



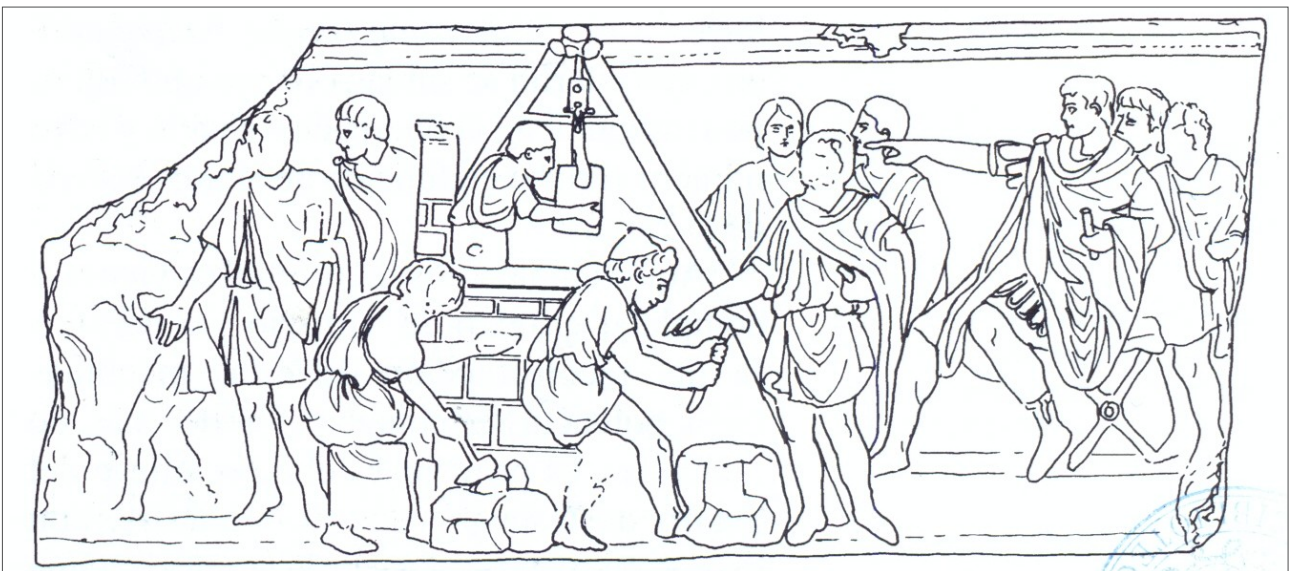
3.2.4



3.2.5



3.2.6



3.2.7

En 1961 A. Leroi-Gourhan las dividió en dos categorías, definiéndolas como:

□ DE PERCUSIÓN LANZADA

En esta primera categoría el instrumento tiene mango y se utiliza sólo, y se utilizaba para las labores de escuadrías y esbozos, como serían: ¹⁹

- El trinchante: se utilizaba para las piedras duras. Como el trinchante liso corre el riesgo de romper su filo utilizaban un filo dentado. Aunque los trinchantes encontrados no presentan dientes, sí se han encontrado huellas dentadas dejadas por las herramientas (*figura 3.2.5*).
- La escoda: se utilizaba también con piedras duras.
- La pícola: es la herramienta por definición para las rocas blandas (*figura 3.2.6*).

□ DE PERCUSIÓN POSADA

En este caso, las herramientas se utilizan con la ayuda de un percutor, que podía ser un martillo o un mazo (*figura 3.2.7*). Cuando el percutor lleva una cabeza metálica se denomina maceta. Su potencia es mayor pero su precisión menor, por lo que se emplea en piedras duras. A esta categoría pertenecían (*figura 3.2.8*): ⁶

- El puntero o punzón: que se utiliza para las tallas preliminares o los alomhadillados rústicos. Dependiendo de la forma de atacar la piedra, es decir, de forma perpendicular u oblicua, se conseguirá una talla punteada por numerosos impactos, que no se pueden distinguir de la talla escodada. O bien una talla punterolada de surcos paralelos verticales, oblicuos o curvados, siguiendo el gesto en arco de círculo descrito por los brazos (efecto que también se puede conseguir con la escoda) (*figura 3.2.9*).
- La gradina: se utilizaba en superficies que ya habían sido trabajadas con puntero.
- La gubia
- El cincel: para trabajos de precisión

■ **PROCEDIMIENTO** ⁷

1. Los canteros empiezan a dar forma a un bloque, con el pico, el trinchante o la escoda, estando éste puesto en obra, es decir, apoyado sobre un calce de piedra o de madera, con el fin de ser presentado según una inclinación cómoda (*figura 3.2.10*).
2. Se delimita una cinceladura periférica o atacadura, dibujando el plano rectangular de una de las caras y controlando el trazado con una **regla** (para

3.2.4

Bajorelieve de Diogenes Structor, albañil pompeyano, que representa una plomada, una trulla, una escuadra de nivel, un martillo de caras cóncavas o pícola, y un cincel entre otros objetos más difíciles de identificar. Encontrado en Pompeya.

Jean Pierre Adam (1989)

3.2.5

Canteros romanos fabricando piezas de mampostería. La herramienta que se de perfil podría ser una escoda de dos picos o un trinchante. En la cesta se puede ver el material acabado.

Jean Pierre Adam (1989)

3.2.6

Pícola antigua romana y pícola moderna. La forma y la traza de ambas herramientas se mantiene de una forma muy similar.

Jean Pierre Adam (1989)

3.2.7

Escena de una obra de construcción en un bajo relieve hallado en Terracina. En un primer plano se ve a los obreros tallando los sillares de piedra a pie de obra. El de la derecha, con martillo de caras cóncavas, y el de la izquierda con maza.

Jean Pierre Adam (1989)

⁶ Castro Villalba, Antonio (1999). Historia de la construcción arquitectónica. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

⁷ Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. cit.



3.2.8



3.2.9



3.2.10



3.2.11

conseguir una superficie plana) y una **escuadra** (para conseguir ángulos rectos).

3. Una vez terminado el desbaste, el cantero afina su trabajo con cinceles, gradinas o gubias, empezando siempre por las cinceladuras periféricas que definen cada uno de los planos.
4. Definición del acabado, según la finura que se quiera conseguir. Al igual que con las herramientas, ya en esta época quedaron definidos los acabados básicos que posteriormente se seguirían utilizando (*figura 3.2.11*):
 - Los distintos tipos de **punteados** realizados con cinceles y punzones de puntas variables, y cuyo resultado dependerá fundamentalmente del ángulo con el que se trabaja con la herramienta respecto del plano de trabajo.
 - El acabado **pulido**, que denominaron *pulimento*, y conseguían frotando la piedra humedecida con una roca de grano duro y apretado.

3.2.8

Herramientas principales del cantero para trabajar la piedra, desde la época romana hasta el s. XX. Arriba, dos macetas. Abajo, de derecha a izquierda: un puntero, tres cinceles, un puntero morro de asno, un escafilador y una gradina.

Jean Pierre Adam
(1989)

3.2.9

Cantero desbastando un sillar utilizando el puntero de hierro.

Jean Pierre Adam
(1989)

3.2.10

Desbaste de un paramento de toba con trinchante, realizado con el paramento ya finalizado.

Jean Pierre Adam
(1989)

3.2.11

Bloque de mármol reutilizado para ejercicios de talla de aprendices romanos, donde se pueden apreciar varios acabados. Talla escodada en abanico, punteada, con gradina y pulida.

Museo nacional, Roma

■ ESPECIALIZACIÓN

Ante la gran variedad de herramientas utilizadas por los romanos, apareció por primera vez la especialización y cada obrero utilizaba un tipo de herramienta para cada fase del trabajo. No obstante, se podría decir que la cantería como gremio especializado realmente aparece en durante la Edad Media.⁸

3.2.2-4 EL TRABAJO DE LA PIEDRA DURANTE LA EDAD MEDIA

■ GREMIOS Y CUADRILLAS

Durante la Edad Media se definieron de una manera muy clara los gremios y las cuadrillas de canteros, encontrando su máxima expresión en el período gótico.

Éstos tenían ya una jerarquía muy definida formada por aprendices, oficiales y maestros de cantería (*figura 3.2.12*). Los conocimientos se traspasaban de maestro a aprendiz y era un oficio que pasaba de generación en generación en el era complicado que una persona ajena pudiese ser aceptada como aprendiz.⁹

Se definieron tres especialidades:¹⁰

- Sacadores, que se encargaban de la extracción y el primer desbaste de la piedra.
- Asentadores, con el trabajo propiamente constructivo.
- Talladores, que realizaban las labores más especializadas y apreciadas,

⁸ *Ibidem*

⁹ Joël Sakarovitch, et al... (2009). El arte de la Piedra. Teoría y Práctica de la Cantería. CEU ediciones, Madrid

¹⁰ Rabasa Díaz, Enrique (2000). Forma y construcción en piedra: de la cantería medieval a la estereotomía del siglo XX. Akal, Madrid



3.2.12



3.2.17



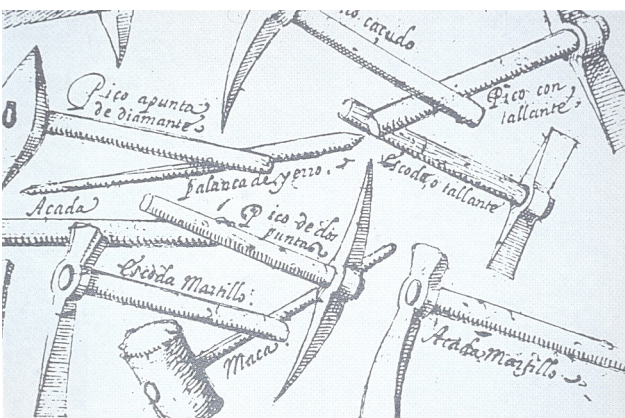
3.2.18



3.2.13



3.2.15



3.2.14



3.2.16

las más solicitadas y mejor pagadas (*figura 3.2.13*).

■ PROCEDIMIENTO

La labra de los sillares, al igual que en las etapas anteriores, se basada en un proceso de desbaste y talla, seguido de un trabajo de labra. Las herramientas utilizadas eran aún muy similares a las herramientas romanas (*figuras 3.2.14, 3.2.15, 3.2.16*).

Aunque estas prácticas se realizaban, como ya se ha indicado, en el taller o la propia obra, durante el periodo gótico se inició una nueva costumbre, convirtiéndose éste en el único periodo en el que consta que se extendieron el desbaste y talla, e incluso la labra de los sillares a pie de cantera. Este hecho estaba motivado por la incorporación de los tamaños normalizados y los elementos estandarizados. En estos casos se necesitaba una mayor y más cuidadosa organización y distribución del trabajo, pero la construcción del muro era mucho más rápida y precisa (*figuras 3.2.17, 3.2.18*).¹¹

■ PREVISIÓN Y DIBUJO

A pesar de que en alguna época, especialmente durante el Románico del s. X, se utilizaban todavía en ocasiones sillarejos simplemente desbastados, el aspecto más característico del trabajo de la piedra durante toda la Edad Media es la rica y precisa estereotomía que sin duda exigía un trazado previo.

La especialización y los amplios conocimientos sobre la estereotomía de la piedra, conseguidos durante la Edad Media, se deben en gran medida a que empezaron a utilizar los **dibujos constructivos** para definir las piezas con sus dimensiones exactas y los aparejos. En muchos casos se recurría a **monteas**, dibujos grabados directamente sobre la piedra en los suelos y paredes de la propia obra, a tamaño natural en la propia obra, y que por lo que tanto eran efímeras en la mayoría de los casos, aunque sí se conservan ejemplos de esta práctica.¹²

En otros casos se realizaban mediante dibujos en pergamino, que solían ser alzados a escala. Sin embargo, existía todavía una gran escasez de medios materiales para la producción de documentos gráficos, por lo que son pocos los dibujos conservados. Los dibujos técnicos medievales que se conservan son siempre posteriores al s. XV. El único cuaderno sobre cantería anterior a esa fecha es el cuaderno de Villard de Honnecourt, **1225-1253**, aunque no se sabe a ciencia cierta si era arquitecto o un aficionado. En cualquier caso muestra, mediante di-

3.2.12

Construcción de una iglesia dedicada a San Miguel. Se puede ver a los canteros tallando los sillares conforme se levanta el muro.

Atribuido al círculo del Maestro de Ávila, último tercio del s. XV.

3.2.13

Dos maestros canteros trabajando unos sillares ante el obispo. Representado en un capitel del claustro de la Catedral de Gerona, s. XII.

Realización: Miguel Sobrino González

3.2.14

Herramientas de cantería utilizadas en el s. XVI. Se pueden ver picos, martillos, escodas y maza.

Juanelo Turriano (1570)

3.2.15, 3.2.16

Herramientas modernas de cantería análogas a las utilizadas durante la Edad Media.

Taller de José Peña en Cigüeña (Burgos).

3.2.17

Canduela, Palencia
Juan Manuel Baéz Mezquita (2001)

3.2.18

Monasterio de Moreuela, Zamora

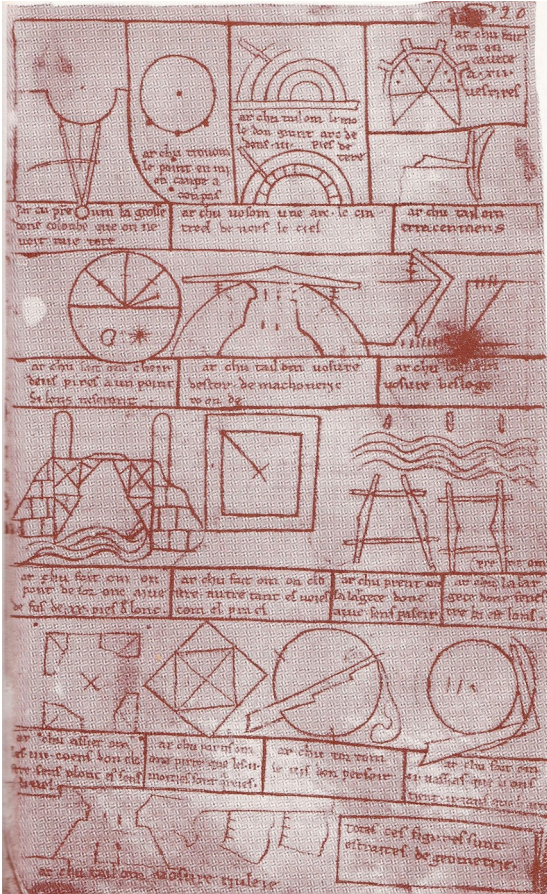
Juan Manuel Baéz Mezquita (2001)

¹¹ Con este sistema se levantó de una manera ejemplar el monasterio de San Lorenzo de El Escorial (1563-1584). Los desechos que se producían con la talla de la piedra se aprovechaban para la realización del relleno del muro.

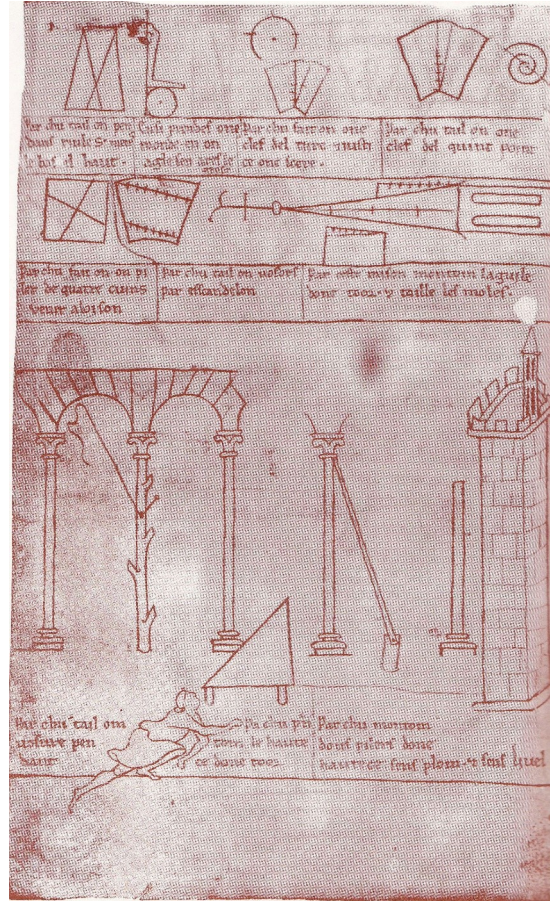
García Tapia, Nicolás (1990). Ingeniería y arquitectura en el Renacimiento Español. Universidad de Valladolid. Secretariado de Publicaciones. Valladolid.

¹² Joël Sakarovitch, et al... (2009). El arte de la Piedra. Teoría y Práctica de la Cantería. cit.

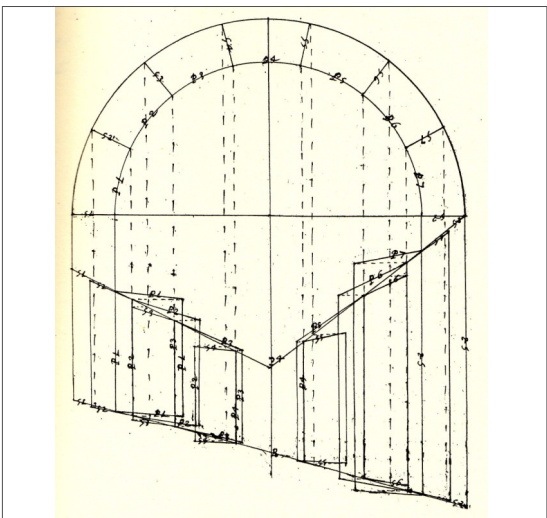
¹³ Rabasa Díaz, Enrique (2000). Forma y construcción en piedra: de la cantería medieval a la estereotomía del siglo XX. cit.



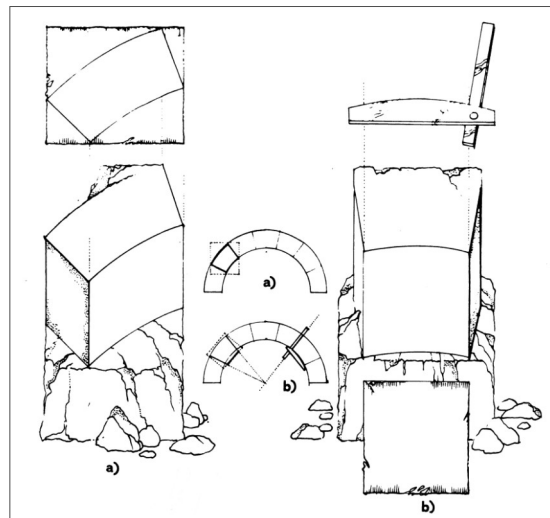
3.2.19



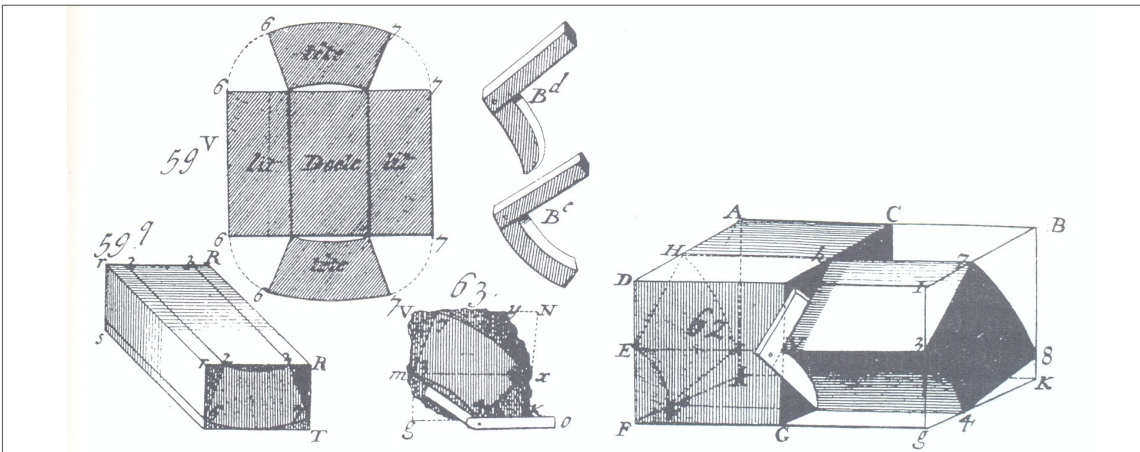
3.2.20



3.2.21



3.2.22



3.2.23

bujos y escuetas frases, trazados para la definición de las piedras (*figuras 3.2.19, 3.2.20*).¹³

Todos estos conocimientos sobre dibujo derivaron en la aparición de las herramientas de medida como compases y escuadras. Se conservan ejemplos de este tipo piezas utilizadas en Roma, pero las utilizaban para el proceso de comprobación de la forma en obra y no para el proceso de diseño y planificación que permitía el dibujo.

3.2.2-5 EL TRABAJO DE LA PIEDRA EN EL RENACIMIENTO

■ ESTEREOTOMÍA DE LA PIEDRA

El Renacimiento recibe una larga experiencia heredada de los conocimientos de los gremios medievales, por lo que tomaron las viejas tradiciones canteriles del gótico y evolucionaron en gran medida todo el proceso de dibujo previo. Utilizaron una **representación gráfica** semejante a lo que hoy conocemos como sistema diédrico, aunque éste no fue claramente establecido por Gaspard Monge a finales del s. XVIII. Evolucionaron la técnica de la representación, llegando a dar definiciones geométricas casi perfectas, y desarrollaron los conceptos de coplanaridad, perpendicularidad y proporcionalidad (*figura 3.2.21*).¹⁴

Todos estos nuevos conceptos sobre generación de la forma empezaron a verse explicados en libros técnicos a partir del s. XVII. En 1643 François Derand clasificó con insistencia los procedimientos de talla de las piezas en métodos generales. Existen textos anteriores a estos, como los de Alonso de Vandelvira o Ginés Martínez de Aranda, que aludían a métodos similares, pero sin aportar tantas explicaciones. Los dos métodos de talla de los sillares se definieron como (*figuras 3.2.22, 3.2.23*):¹⁵

3.2.19, 3.2.20
Procedimientos de diseño y talla de piezas de piedra para la construcción.
Villard de Honnecourt (1225-1235)

3.2.21
Resolución de trazas mediante la utilización de la geometría.
Alonso de Vandelvira, (1575-1590)

3.2.22
Representación de los métodos para la talla de una dovela por "robos" o escuadría (a) y por "plantas" o plantillas (b).
José Carlos Palacio González (1987)

3.2.23
Método combinado de escuadría y plantillas para la talla de dovelas y sillares.
Frézier (1737-1739)

□ MÉTODO DE ROBOS O ESCUADRÍAS

Los sillares se tallan comprobando en todo momento que su forma y posición son las correctas, mediante las líneas rectas o curvas generadas que servía de guía.

□ MÉTODO DE PLANOS O PLANTILLAS

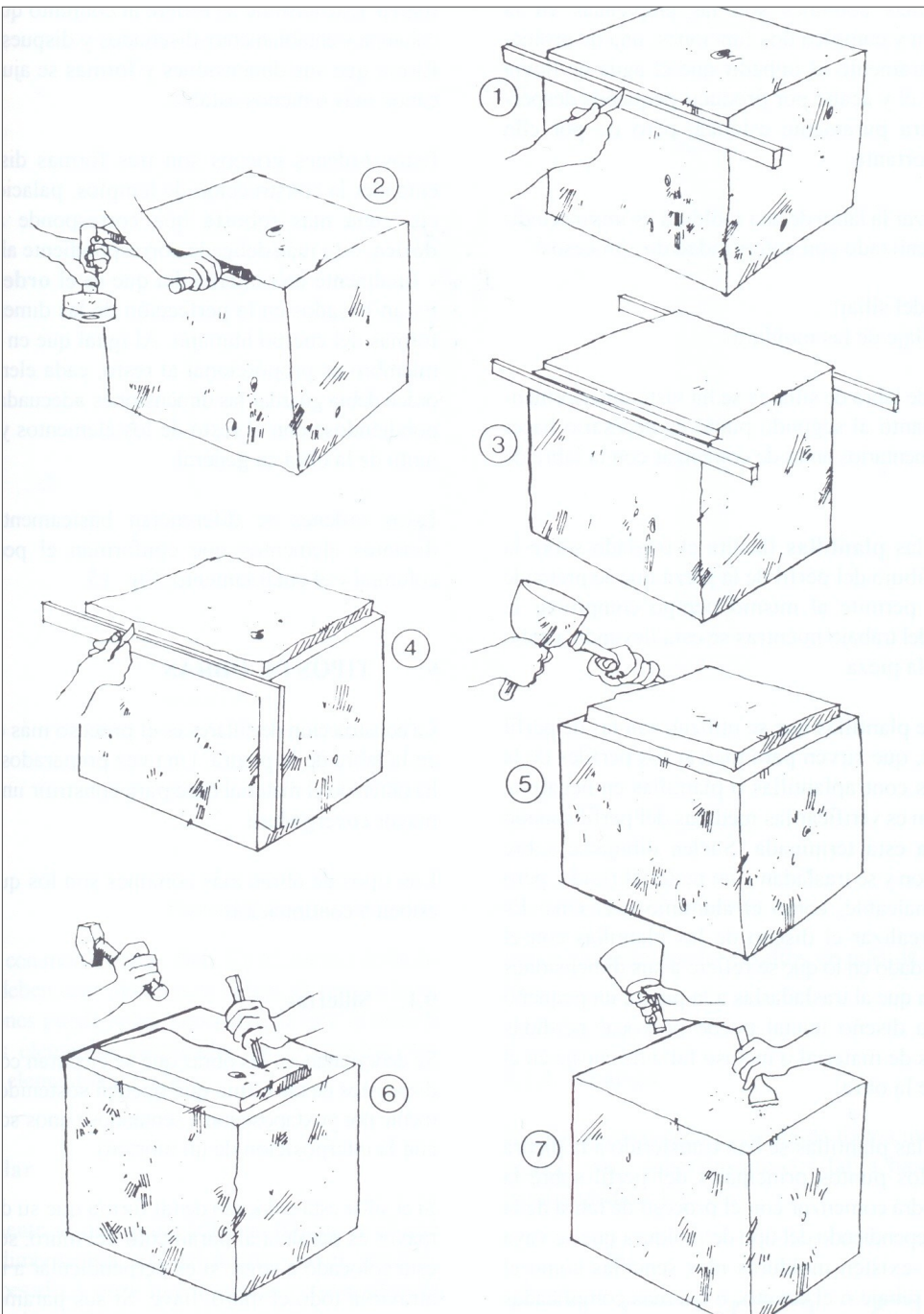
Se utilizan plantillas rígidas de madera, o flexibles de cartón, hojalata o plomo (según el tipo de pieza), que se extendían sobre la superficie tallada de la pieza para marcar su contorno y posteriormente para comprobarlo. La forma se conse-

¹⁴ Palacio González, José Carlos (1987). La estereotomía como fundamento constructivo del Renacimiento español. Informes de la construcción, vol.39, nº 389, pp.75-76

¹⁵ Rabasa Díaz, Enrique (2000). Forma y construcción en piedra: de la cantería medieval a la estereotomía del siglo XX. cit.



3.2.24



3.2.25

guía guardando siempre el ángulo diedro entre caras contiguas.

3.2.2-6 EL TRABAJO DE LA PIEDRA EN LOS SIGLOS XVIII Y XIX

■ PROCEDIMIENTO

Los canteros durante estos siglos realizaban un trabajo manual muy especializado, gracias a todos los conocimientos heredados de las épocas anteriores.

1. Desbaste de todas las caras del sillar, marcando las líneas de corte de referencia y eliminando todas las protuberancias existentes sobre dichas líneas.
2. Labra (figuras 3.2.24, 3.2.25):¹⁶
 1. Elección de uno de los lados largos de la superficie de trabajo.
 2. Realización de la primera atacadura. Las atacaduras son superficies planas labradas a cincel en los bordes de la piedra y se utilizan como referencia.
 3. Realización de la atacadura en el lado opuesto.
 4. Realización de las dos últimas atacaduras del plano y comprobación.
 5. Se rebaja mediante cincel o pico hasta enrasarlo al mismo nivel de los bordes, eliminando las mayores protuberancias.
 6. Se labran estrías rectas o diagonales con puntero a lo largo de la superficie.
 7. Se desbastan estas estrías con gradinas, dejando la superficie en condiciones de aplicarle el acabado.
3. Acabado:
 - Punteados, mediante bujarda
 - Rayados, mediante bujarda trinchante o carril de cepillado
 - Pulido, mediante rozamiento

■ HERRAMIENTAS

Las herramientas utilizadas seguirán siendo todavía muy similares a las antiguas romanas en forma y trazado, y se agrupaban en tres grupos definidos como:

- Herramientas para medir, trazar y comprobar
- Herramientas de desbaste
- Herramientas de labra

3.2.24

Labra de una pieza de cornisa de arenisca según el método tradicional.

Francisco Gómez Canales (2005)

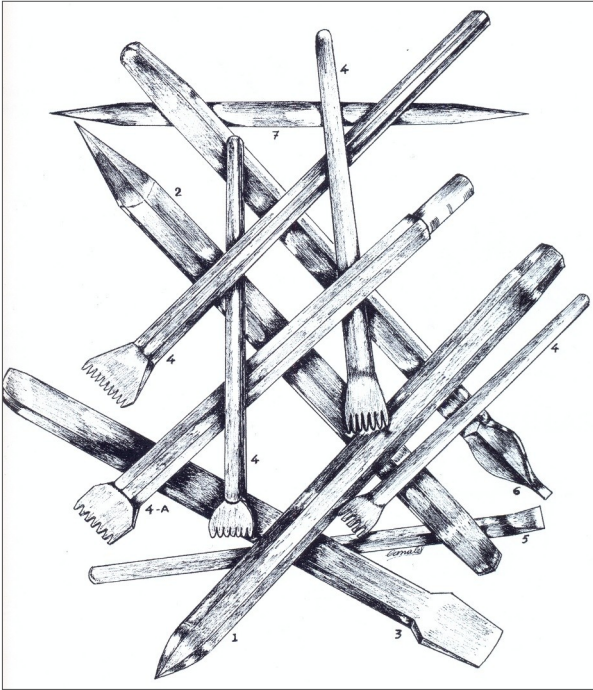
3.2.25

Proceso de labra artesanal de un sillar.

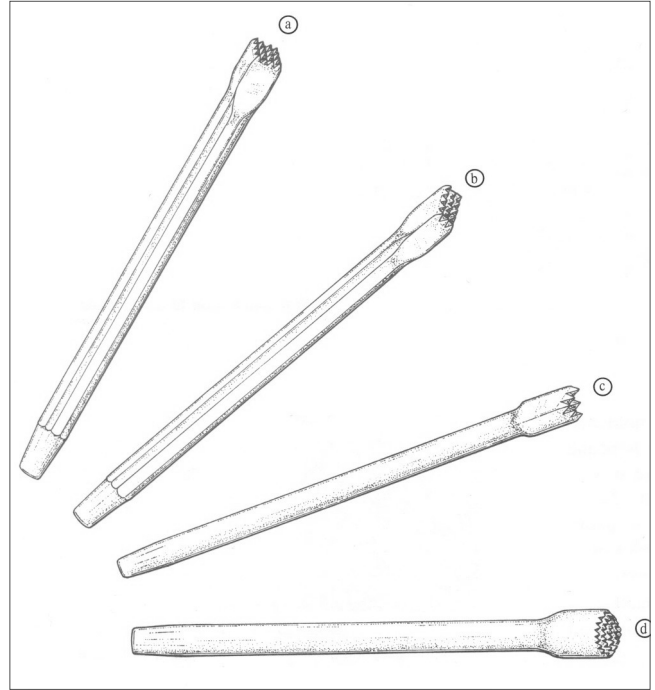
Ana Benito Soria (1995)

¹⁶ López Jimeno, Carlos (2012). Manual de rocas ornamentales. Prospección, explotación, elaboración y colocación. Gráficas Arias Montano, Madrid. pág. 357.

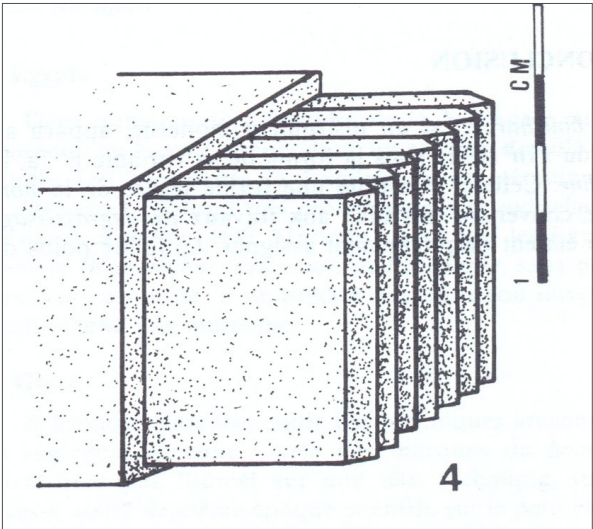
¹⁷ Bessac, Jean-Claude (1986). L'outillage traditionnel du tailleur de pierre : de l'Antiquité à nos jours. CNRS, París



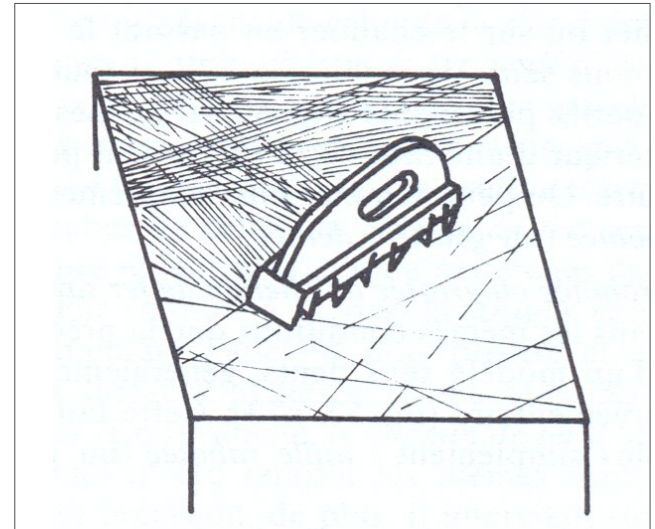
3.2.26



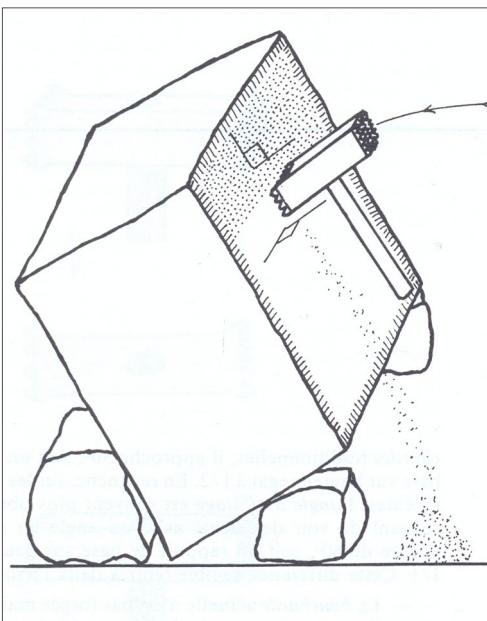
3.2.27



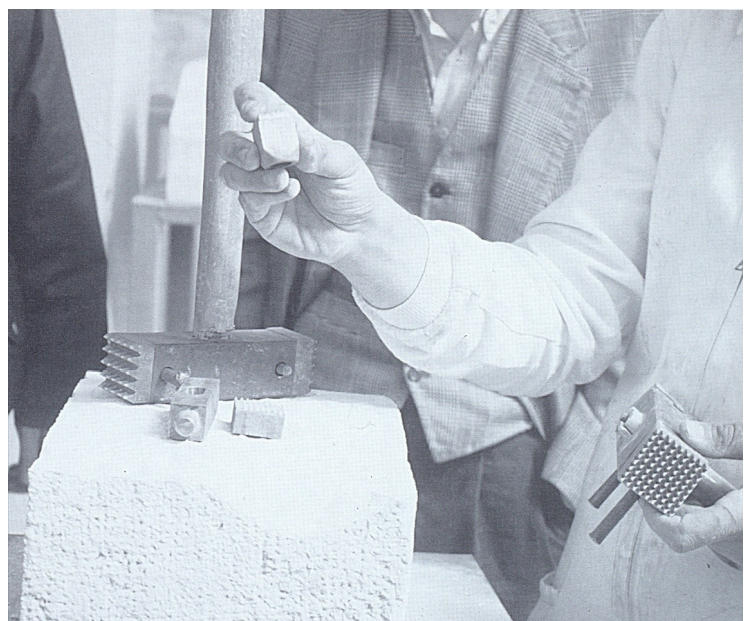
3.2.28



3.2.29



3.2.30



3.2.31

Además de las tradicionales (*figura 3.2.26*), también aparecieron algunas herramientas nuevas, para conseguir nuevos efectos de acabado, como: ¹⁷

- El cincel bujarda o martillina (*figura 3.2.27*), durante el s.XVII.
- También durante el s. XIX aparecieron nuevas herramientas, como la bujarda trinchante (*figura 3.2.28*), el carril de cepillado (*figura 3.2.29*), o la característica textura de acabado de puntos en cuadrícula que apareció con el uso de la bujarda (*figura 3.2.30, 3.2.31*), instrumento que sustituyó al trinchante en esa función de ligero rebaje de la piedra hasta la planitud.

Como sucedió con el proceso de corte, pese a ya existir durante el s. XIX novedades y avances en la técnica, como se indicará en el punto siguiente, todavía a finales del s. XIX los tratados sobre cantería recomendaban la utilización de estas herramientas y procesos manuales.

3.2.3 LA LABRA MECÁNICA DESDE FINALES DEL S. XIX

3.2.26
Punteros, cinceles, gradinas, punzones.
Francisco Gómez Canales(2005)

A finales del s XIX se empezó a incorporar la maquinaria para la labra de la piedra, que en unas décadas relegó completamente a la labor artesanal que se venía realizando desde la antigüedad.

3.2.27
Martillina, de arriba abajo: de cabeza cuadrada, rectangular, triangular, circular.
Alberto Díez Nogal, et al.... (1993)

3.2.3-1 LA LABRA MECÁNICA

Durante el siglo XIX se inventó el compresor de aire, y se empezó a incorporar la neumática en la industria, aunque para el trabajo de la piedra se incorporó entre finales del siglo XIX y principios del siglo XX.

3.2.28
Bujarda trinchante.
Jean-Claude Bessac (1986)

■ HERRAMIENTAS NEUMÁTICAS

El empleo de este tipo de herramientas neumáticas facilitó enormemente el trabajo del cantero, ya que sustituye n la fuerza muscular que debe aplicarse en la utilización de las herramientas manuales por la presión del aire comprimido. El empleo de la maza y de todos los instrumentos utilizados para la percusión se reemplazaron progresivamente por los martillos neumáticos. ¹⁸

3.2.29
Carril de cepillado.
Jean-Claude Bessac (1986)

Las herramientas se acoplaban al martillo neumático, por cuyo cuerpo se hace pasar el aire comprimido procedente del compresor, empujando al pistón interior hacia delante para golpear con fuerza en la base de la herramienta. ¹⁹

3.2.30
Bujarda.
Jean-Claude Bessac (1986)

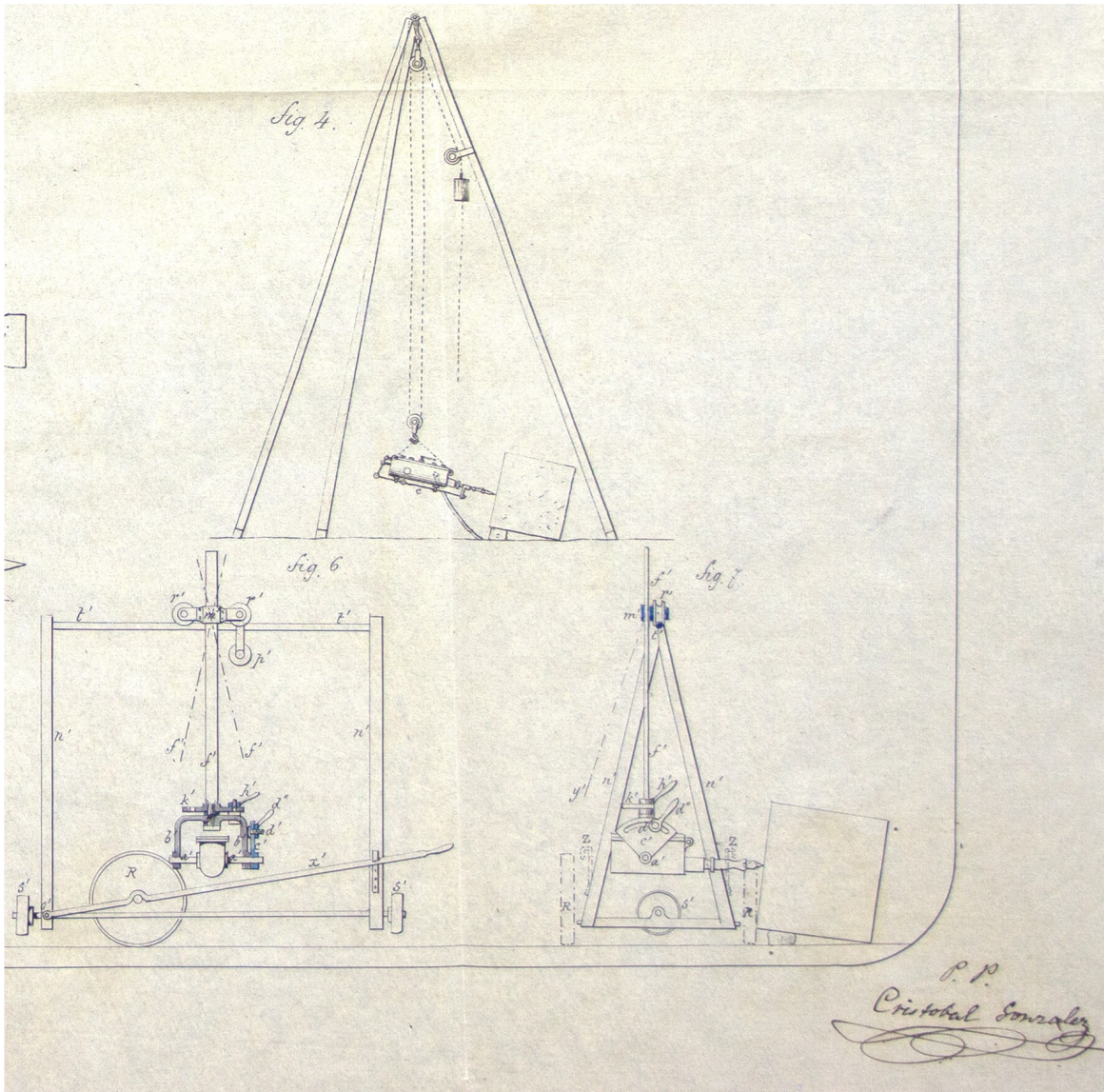
3.2.31
Bujarda de cabezas intercambiables. Se puede ver la huella de la bujarda en la cara frontal del sillar.
Enrique Rabasa Díaz (2000)

¹⁸ Azconegui Morán, Francisco; Castellanos Miguélez, Agustín (1993). El trabajo de la piedra. Guía práctica de cantería. Escuela Taller de Restauración 'Centro Histórico de León', León.

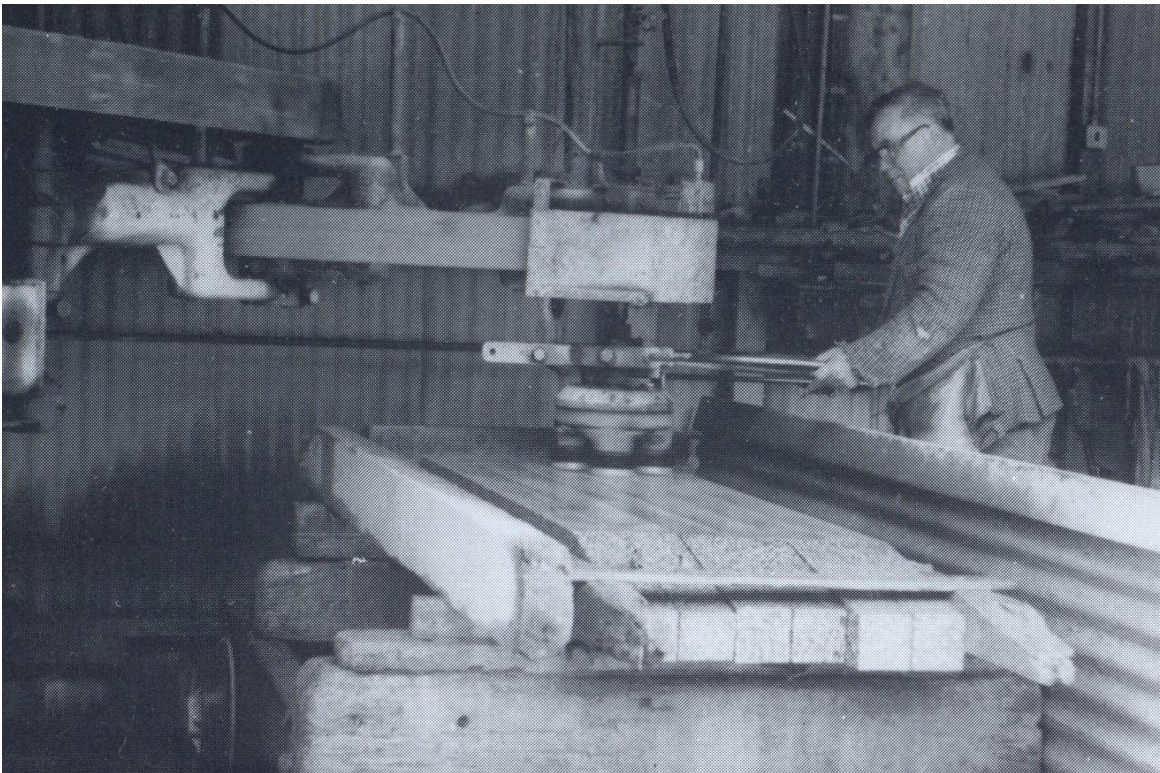
¹⁹ *Ibidem*

²⁰ *Ibidem*

²¹ Datos obtenidos de los expedientes del Archivo Histórico de Patentes.



3.2.32



3.2.33

Las primeras herramientas que se acoplaron a los martillos neumáticos fueron los cinceles, seguidas posteriormente por los punteros, gradinas, medias cañas, martillinas y bujardas.²⁰

El primer privilegio de invención en España de una máquina para la labra mecánica de la piedra es de D. Cristóbal González, en **1870**. El invento consistía en una máquina movida por vapor o por aire comprimido, suspendida por medio de un dispositivo que permitía al obrero dirigirla sobre la piedra y labrarla sin tener que hacer uso de su fuerza (*figura 3.2.32*).²¹

■ HERRAMIENTAS ELÉCTRICAS

Posteriormente se sustituyó el aire comprimido por la energía eléctrica. La primera patente española encontrada de un cincel eléctrico data de 1897.²²

■ HERRAMIENTAS DE PULIDO

La evolución de las máquinas de pulido de la piedra están directamente relacionadas con la evolución vista anteriormente de las máquinas de corte.

Como se vio en el privilegio de D. Pedro Fábregas, de **1830**, la máquina era capaz de pulir las piezas al mismo tiempo que se cortaban otras.

Posteriormente han ido apareciendo pulidoras más especializadas y dedicadas sólo a esta función, en las que un operario controlada el brazo articulado encargado de pulir la placa (*figura 3.2.33*).

3.2.3-2 EL PROCESO DE ACABADO HOY EN DÍA

A lo largo del siglo XX el trabajo de la labra se fue convirtiendo definitivamente en un trabajo mecanizado. Actualmente se realiza mediante una serie de etapas automatizadas dentro de la línea de producción de las placas de piedra, que varía según el acabado deseado.

■ ABUJARDADO

Se realiza mediante bujardas automáticas dotadas de bancos móviles y de un útil neumático que se desplaza transversalmente sobre un puente fijo o también de un tramo fijo y de un útil que se desplaza transversalmente sobre deslizaderas con cremallera. Estas máquinas permiten obtener gran variedad de grabados (punteados) de superficies según el tipo de cabeza de bujarda utilizado (*figura 3.2.34*).²³

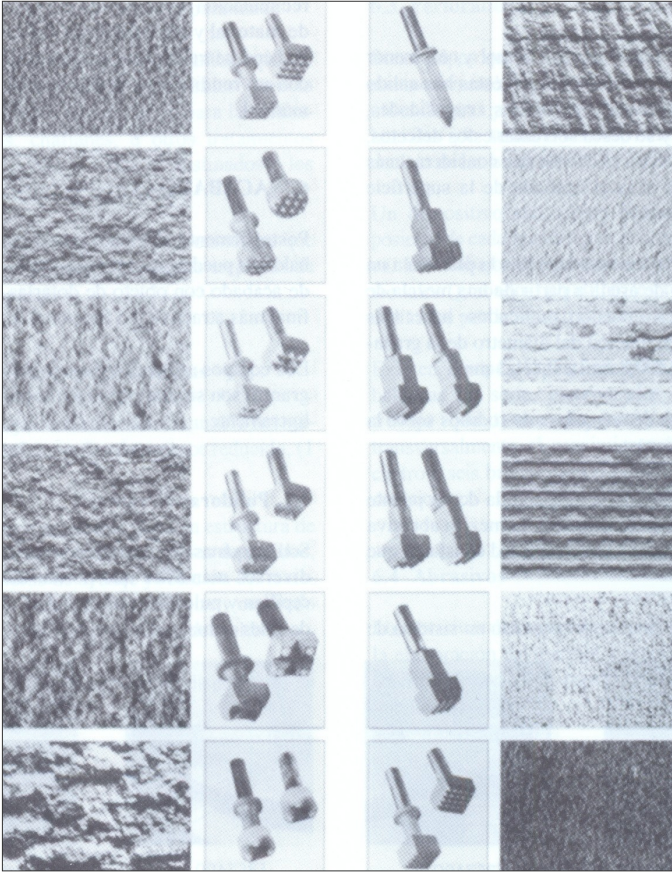
■ FLAMEADO

3.2.32
Máquina para la labra de la piedra. Plano del privilegio de invención. D. Cristóbal González (1870)

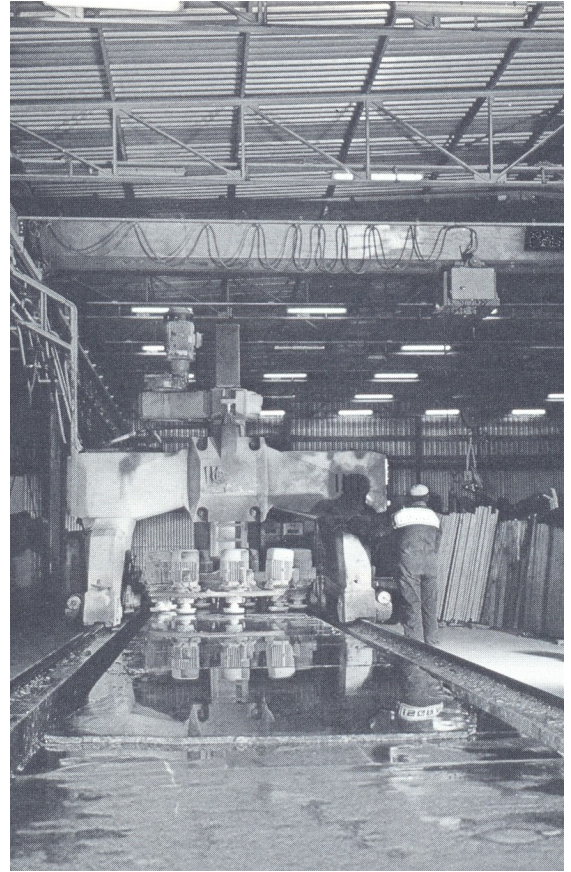
3.2.33
Operario manejando una pulidora en 1978. Peter Stainer (1985)

²² Datos obtenidos de los expedientes del Archivo Histórico de Patentes.

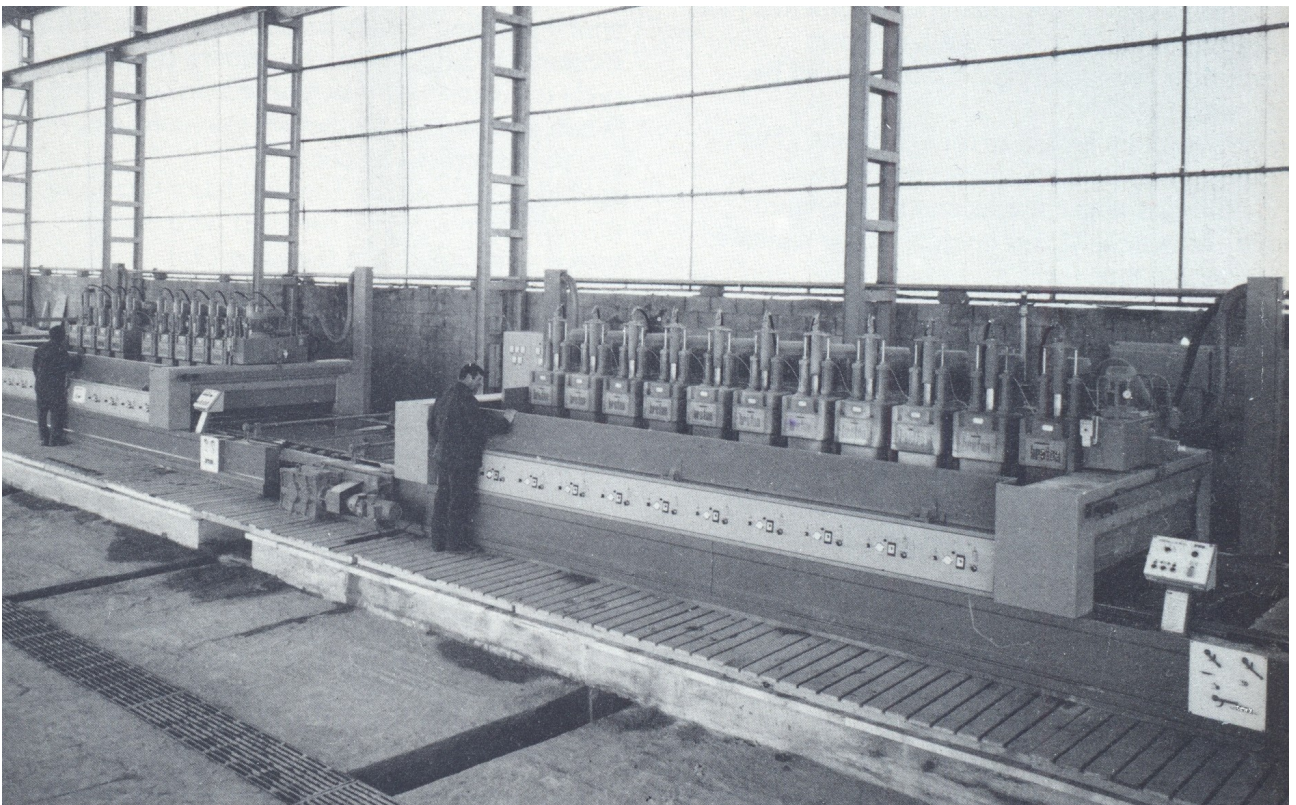
²³ López Jimeno, Carlos (2012). Manual de rocas ornamentales. Prospección, explotación, elaboración y colocación. cit. pág. 386.



3.2.34



3.2.35



3.2.36

Este tratamiento se ha hecho más demandado en los últimos años, especialmente para las rocas ígneas de estructura granítica en general. El tratamiento consiste en aplicar una llama a elevada temperatura (1500 °C) alimentada por una mezcla de combustible y oxígeno para, a continuación, enfriarla rápidamente con un chorro de agua, saltando alguno de los componentes de la superficie de la placa y revelando su estructura cristalina.²⁴

■ ARENADO

Se obtiene sometiendo a las placas a un lavado con chorro de arena a partir de una mezcla de agua y arena silíceas a presión, pudiéndose hacer más grueso o fino en función del diámetro de la granalla empleada. La mezcla abrasiva se rocía uniformemente desde una boquilla distribuidora suspendida de un puente móvil.²⁵

■ PULIDO

Actualmente se utilizan dos tipos de máquinas en función de la inversión económica que se quiera realizar.

- Por un lado estarían las máquinas con brazo articulado y las pulidoras de puente sobre banco fijo con movimiento automático (*figura 3.2.35*).²⁶
- Por otro, cuando el elevado consumo eléctrico no está justificado, se utilizan trenes continuos de pulido (*figura 3.2.36*).²⁷

3.2.4 CONCLUSIONES PARCIALES

- La labra de la piedra se ha realizado de manera manual desde la antigüedad. Consistía en un trabajo totalmente artesanal que con el tiempo se fue haciendo más especializado. No fue hasta el siglo XIX cuando empezaron a aparecer avances tecnológicos, que no sustituyeron completamente a las técnicas manuales hasta llegado el siglo XX, coincidiendo con la utilización de delgadas placas de piedra en revestimientos.
- La verdadera tarea de trabajar la piedra surgió a partir del s. VII ya que se empezó a utilizar el hierro para fabricar herramientas que permitían realizar cortes y muescas en la piedra, ya que las anteriores de bronce básicamente desgastaban y debilitaban el material.
- Los romanos fueron los grandes promotores del proceso de desbaste y labrado de los bloques de piedra. Las herramientas de hierro que idearon se han mantenido prácticamente inalterables a lo largo de los siglos. A pesar de actualizarse los materiales, durante el siglo XIX las formas e incluso

3.2.34
Distintos tipos de bujardas y acabados superficiales.
Ana Benito Soria (2012)

3.2.35
pulidoras de puente sobre banco fijo con movimiento automático.
AA.VV (1982)

3.2.36
Tren continuo de pulido.
AA.VV (1982)

²⁴ *Ibidem*.

²⁵ *Ibidem*. Pág. 388.

²⁶ *Ibidem*. Pág. 381.

²⁷ *Ibidem*. Pág. 381.

las trazas todavía se mantenían casi idénticas a las romanas. La invención y el diseño de todos estos tipos de herramientas durante la época romana se realizó con la intención de la especialización. Los obreros utilizaban cada herramienta para la realización de una función diferente.

- La primera gran aportación de la civilización medieval fue el desarrollo de los gremios y cuadrillas. Éstos poseían una jerarquía y unos lazos sociales muy estrictos y de difícil acceso, pero a cambio introdujeron trabajos claramente especializados y la definición de tareas. No sólo se utilizaba cada herramienta para una tarea concreta, sino que ahora estaba claramente definido que tipo de trabajador estaba capacitado para la realización de dicha tarea. La otra gran aportación medieval consiste en la producción de los primeros escritos y dibujos que explicaban, aunque brevemente, el proceso de definir y trabajar las piezas.
- La suma de ambas aportaciones hizo que adoptaran una gran cantidad de conocimientos y derivó en la aparición de la práctica de la estereotomía de la piedra durante el renacimiento, práctica fundamental para la correcta definición de la forma de las piezas.
- Una decisión común para casi todas las épocas era que sólo se realizara en la cantera el desbaste previo. Tanto la labra definitiva como las labores de acabado se realizaban por los maestros talladores en la propia obra. Esta estrategia se basaba en la idea de proteger al máximo el acabado de la pieza y que éste no sufriera desperfectos durante el transporte. Las únicas excepciones a esta práctica se produjeron al utilizar elementos de medidas estandarizadas, durante el periodo gótico. Al introducir los sillares de medidas fijas, éstos se empezaron a recibir en obra o en los talleres junto a ella, ya completamente acabados para que la ejecución de las obras se realizara más rápidamente. Este hecho constituye la primera referencia al trabajo industrializado en taller.
- Con la incorporación de la maquinaria para la labra de la piedra se fue abandonando el trabajo artesanal de labrar los bloques de piedra, que se venía realizando desde la antigüedad. Las primeras innovaciones consistieron en la aparición de las herramientas neumáticas y posteriormente de las eléctricas. El primer privilegio de invención de una máquina para la labra, registrado en España data del año 1870, y el primer cincel eléctrico de 1897.

Ya en el siglo XX, y paralelamente al desarrollo de las máquinas de corte, el proceso de desbaste y talla de la piedra fue desapareciendo puesto que eran las propias máquinas de corte las que realizaban unos cortes previos de desbaste y regularización del bloque antes de producir las placas.

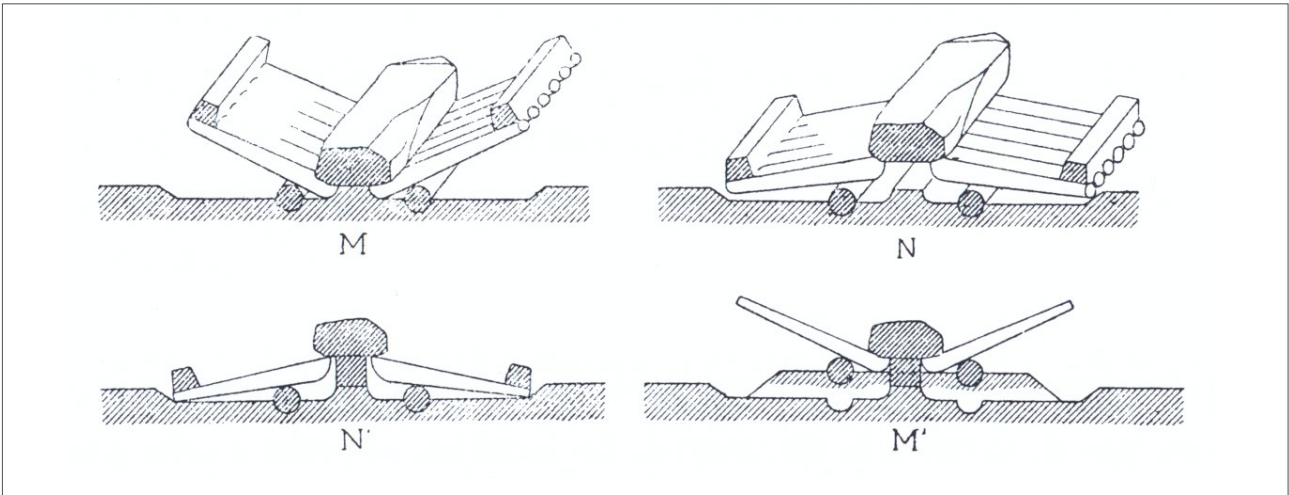
El proceso de labra o acabado, en cambio, sí se mantuvo y se industrializó. Las máquinas que se dedicaban a esta función empezaron a realizar los distintos acabados de una manera automatizada y entendida como un paso más dentro del tren o la línea de transformación y elaboración en taller de las placas de piedra.

TRANSPORTE Y COLOCACIÓN EN OBRA

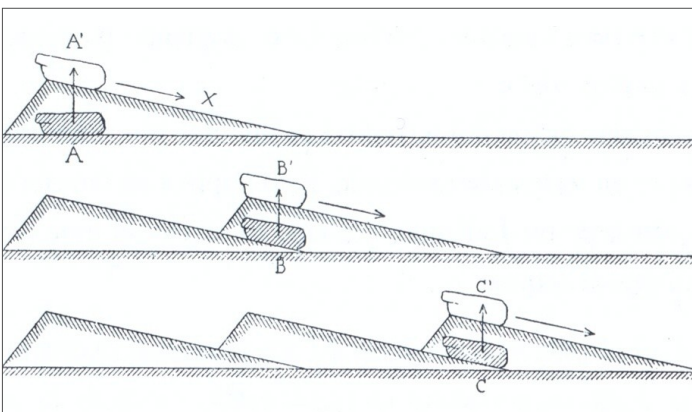
La principal dificultad que han supuesto tanto el transporte de los bloques de piedra desde la cantera hasta el taller o la construcción y posteriormente dentro de la construcción, como la elevación de las propias piezas siempre ha tenido una dificultad directamente relacionada con el tamaño, y por lo tanto el peso, de los sillares.

La necesidad de tener que transportar piezas muy pesadas durante largas distancias hizo necesaria la invención de artilugios y la planificación de recorridos y procedimientos que con el tiempo se fueron adaptando a las nuevas necesidades.

Tanto la tipología de las construcciones, como la maquinaria y los equipos auxiliares que las han hecho posible, han sufrido un desarrollo progresivo directamente relacionado con los medios y las posibilidades de cada época.



4.1.1



4.1.2



4.1.3

4.1 TRANSPORTE

El transporte de los bloques de piedra ha sufrido una evolución desigual a lo largo del tiempo debido a la gran diferencia existente en cuanto al tamaño de bloques utilizados y los medios disponibles.

4.1.1 EL TRANSPORTE HASTA EL SIGLO XIX

Hasta el siglo XIX el transporte de los bloques de piedra ha constituido un trabajo bastante duro, fundamentalmente a causa del gran tamaño y peso de los bloques y de las malas condiciones de las vías de comunicación.

4.1.1-1 EL TRANSPORTE EN EGIPTO

En Egipto el transporte suponían una gran dificultad dado el tamaño de las grandes piezas. La ventaja de poder transportarlas por el río Nilo permitió que la elección de la piedra se basase en la trabajabilidad del material y la facilidad de puesta en obra, y no en la distancia de la cantera a la construcción.

■ TRANSPORTE MEDIANTE RAMPAS

No obstante, para los casos en los que no era posible el transporte por barco, o para el propio pie de obra, idearon un sistema muy ingenioso que se basaba en el deslizamiento sobre rampas escalonadas artificiales. Para ello, elevaban los bloques a las sucesivas rampas mediante la utilización de palancas a lo largo de toda la pieza (*figura 4.1.1*) y se hacían rellenos progresivos. (*figura 4.1.2*)¹

■ TRANSPORTE POR TRINEO

Otro sistema utilizado era el transporte por trineo (*figura 4.1.3*), formado por dos largueros unidos mediante traviesas y tirado por dos bueyes, que supuso un ahorro de tiempo, pero aún hacía muy complicada la tarea puesto que era común utilizar piezas de entre 1 metro y 1 metro y medio de espesor y altura y de hasta 3 metros de largo.²

4.1.1-2 EL TRANSPORTE EN GRECIA

En el año 1500 a.C. comenzó a utilizarse la rueda para el transporte, de modo que los bloques podían ser transportados de una manera mucho menos costosa, mediante:³

4.1.1
Sistema egipcio de elevación de los bloques por medio de palancas y rellenos sucesivos.
Auguste Choisy (1904)

4.1.2
Sistema egipcio de transporte de los bloques por deslizamiento sobre rampas escalonadas.
Auguste Choisy (1904)

4.1.3
Trineo de transporte de grandes dimensiones conservado en el museo de el Cairo, Egipto.
Juan de la Torre Suárez (2014)

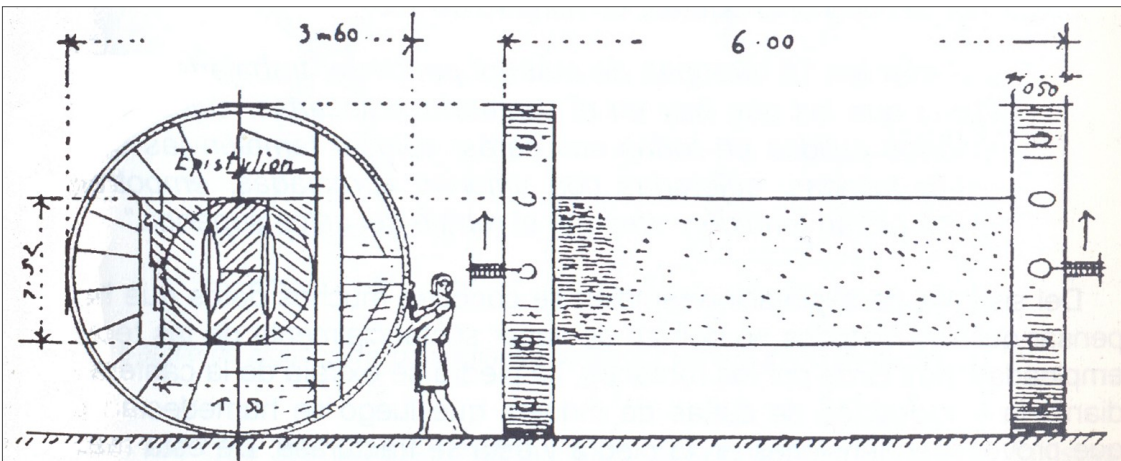
¹ Choisy, Auguste (2006). El arte de construir en Egipto. Tr. Íntegra de la edición L'art de bâtir chez les Égyptiens, de 1904, por Gema López Manzanares, Instituto Juan de Herrera, Madrid.

² Ibídem

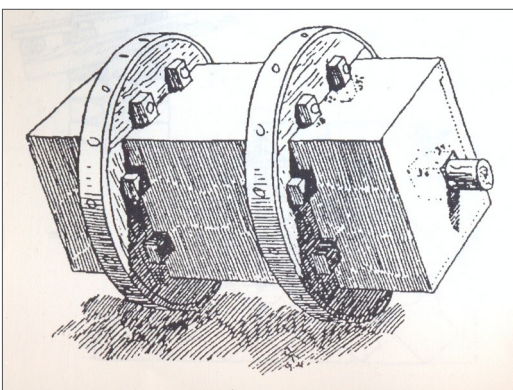
³ Ibídem



4.1.4



4.1.5



4.1.6



4.1.7

■ TRANSPORTE EN CARROS

Los griegos recurrieron y utilizaron estos sistemas a base de carros tirados por mulos y asnos (*figura 4.1.4*).

■ TRANSPORTE MEDIANTE RUEDAS

Cuando las piezas tenían un tamaño considerable idearon unos artilugios a modo de grandes ruedas de madera que rodeaban la pieza. (*figuras 4.1.5, 4.1.6*)⁴

4.1.1-3 EL TRANSPORTE EN ROMA

En Roma se adoptaron los métodos griegos de transporte, adaptándolos a sus necesidades, tanto en CARROS, como mediante la utilización de grandes RUEDAS para las piezas de mayores dimensiones. El hecho de que no idearan nuevos métodos para el transporte se debe a que los tamaños de bloques que manejaban tenían unas dimensiones muy similares a los griegos.

■ TRANSPORTE POR TRINEO

A pesar del gran avance técnico de la rueda, todavía se seguía utilizando el sistema de trineos (*figura 4.1.7*). Para facilitar el transporte desde largas distancia los romanos realizaron calzadas que hacían más fácil el paso de los trineos.⁵

■ TRANSPORTE MEDIANTE RODILLOS

Colocando las piezas sobre rodillos de madera y empujadas con cuerdas.

Durante la épocas griega y romana, la elección del tipo de piedra aún se realizaba según sus aptitudes para el acabado, evaluadas por el cantero, y anteponiendo estas decisiones a la distancia de la cantera.

4.1.1-4 EL TRANSPORTE EN LA EDAD MEDIA

■ PREVISIÓN

A partir de la civilización romana se trató de trasladar la menor cantidad de piedra posible y los sillares se redujeron progresivamente de tamaño. Durante la Edad Media en muchos casos se aprovecharon sillares de otras construcciones para evitar el proceso de extracción y facilitar el transporte.

4.1.4

Sistema romano de transporte de bloques de piedra mediante carros tirados por animales. Este sistema siguió siendo utilizado hasta la aparición de los métodos modernos mecanizados.

Jean Pierre Adam (1989).

4.1.5, 4.1.6

Métodos griego y romano de transporte de grandes sillares. Estos métodos fueron utilizados por los griegos y desarrollados posteriormente por los romanos.

Jean Pierre Adam (1989)

4.1.7

Descenso de bloques de mármol de la cantera de Pentecostés. Se realizaban calzadas aprovechando la pendiente del terreno para facilitar el proceso.

A. K. Orlandos.

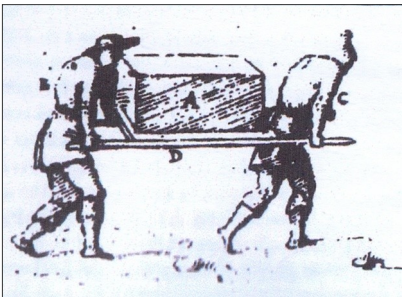
⁴ Marín Sánchez, Rafael (2000). La construcción griega y romana. Universidad Politécnica de Valencia, Servicio de Publicaciones, Valencia.

⁵ Choisy, Auguste (1999). El arte de construir en Roma. Ed. a cargo de Santiago Huerta Fernández y Francisco J. Girón Sierra. Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid. pág. 30

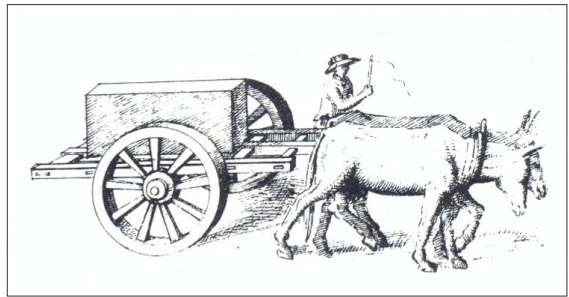
⁶ Marín Sánchez, Rafael (2000). La construcción griega y romana. cit. págs. 81-82



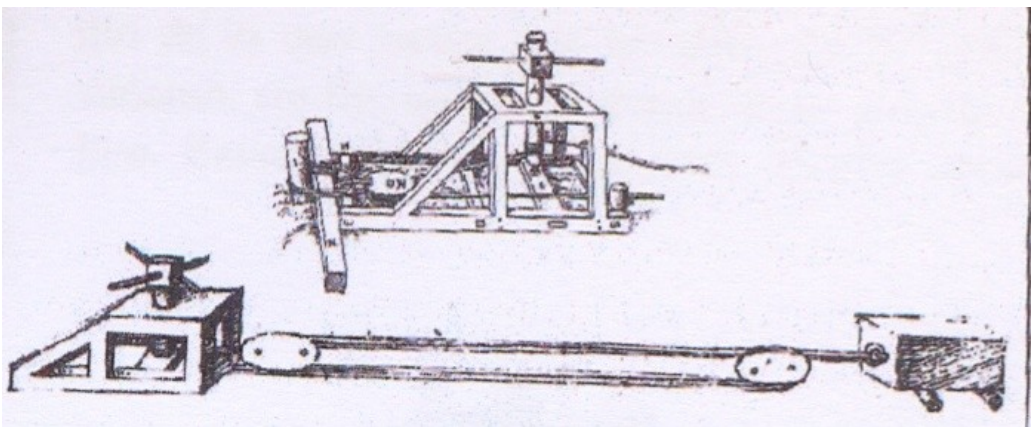
4.1.8



4.1.9



4.1.10



4.1.11

Por otro lado, los sillares tenían un tamaño más reducido y normalizado, que facilitaba tanto su transporte como su elevación y manipulación (*figura 4.1.8*). Todas estas transformaciones están muy ligadas a las nuevas tipologías de edificios que aparecen, en particular el nacimiento de las catedrales.⁷

No disponiendo ya de los grandes recursos económicos de los que disponían los romanos, se empezó a dar una mayor importancia a la previsión y planificación, reduciendo la necesidad de mano de obra y los tiempos de producción. La piedra se extraía de canteras más cercanas a las construcciones y en puntos más estratégicamente ubicados, por lo que la prioridad pasó a ser la facilidad de transporte y la cercanía de la cantera.⁸

■ SISTEMA

Desde la Edad Media y hasta la aparición de los medios mecánicos, los **carros** y **trineos de transporte** fueron progresivamente más evolucionados, y las ruedas más eficientes. Especialmente destacó el desarrollo de los carros, al introducir a las ruedas llantas metálicas.⁹

4.1.1-5 EL TRANSPORTE ENTRE LOS SIGLOS XV Y XVII

El primero en definir la maquinaria utilizada fue Vitrubio en Los Diez Libros de Arquitectura, publicado por primera vez en el año **1486**. En el primer capítulo del décimo libro dio a conocer los principios en los que se apoyaban estas máquinas. Dividió las máquinas en:

- Ascensionales
- Neumáticas
- **De desplazamiento**

Posteriormente, a finales del s. XVI, también se explicaron los distintos sistemas de transporte y elevación en “Los Veintún Libros de los Ingenios y de las Máquinas”, aunque ya con ilustraciones y explicaciones.¹⁰

- TRANSPORTE CON “ÇEVILLA”
Peso llevado manualmente con “çevilla” por dos hombres (*figura 4.9*).
- TRANSPORTE CON CARRO
Mediante un carro tirado por animales (*figura 4.1.10*).

4.1.8
Transporte mediante carro durante la Edad Media.
Biblioteca Nacional Central de Florencia

4.1.9
Transporte mediante “çevilla”.
Los Veintún Libros de los Ingenios y Máquinas (1570)

4.1.10
Transporte con carro.
Los Veintún Libros de los Ingenios y Máquinas (1570)

4.1.11
Transporte mediante polca.
Los Veintún Libros de los Ingenios y Máquinas (1570)

⁷ Graciani García, Amparo (1998). Aportaciones medievales a la maquinaria de construcción. Actas del Segundo Congreso Nacional de la Construcción.

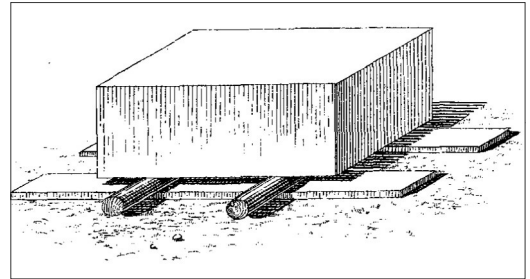
⁸ Graciani García, Amparo (1998). Aportaciones medievales a la maquinaria de construcción. Actas del Segundo Congreso Nacional de la Construcción.

⁹ *Ibidem*.

¹⁰ Los Veintún Libros de los Ingenios y Máquinas fue Atribuido durante mucho tiempo de Juanelo Turriano, aunque como indica Nicolás García Tapia, la autoría de este libro pertenece a Pedro Juan de Lastanosa, y está probada documentalmente gracias al inventario de su biblioteca, donde se encontraba en su escritorio el original del libro de los ingenios. Ésta junto con otras pruebas se encuentran en el libro del mismo autori Pedro Juan de Lastanosa y Pseudo-Juanelo Turriano (1987). LluL, Vol. 10. págs. 51-74



4.1.12



4.1.14



4.1.13

- TRANSPORTE MEDIANTE POLCA

Mediante polca, un mecanismo que permitía empujar pesos importantes mediante palancas o pequeñas piezas (*figura 4.1.11*).

4.1.1-6 EL TRANSPORTE EN LOS SIGLOS XVIII Y XIX

El transporte durante estos siglos no sufrió grandes cambios, puesto que aún se utilizaban los sistemas tradicionales.

■ **CARROS DE TRANSPORTE**

Durante el siglo XVIII los bloques de piedra se transportaban en carros de transporte de dos o de cuatro ruedas, tirados por animales. Generalmente se dejaban varios animales en la parte trasera para realizar las funciones de freno.¹¹ Con la introducción de la extracción mediante barrenos se empezaron a extraer bloques de mayores dimensiones, por lo que en estos casos resultaba bastante duro el camino hasta el taller (*figura 4.1.12, 4.1.13*).

Durante la década de 1820 se empezaron a mejorar las condiciones de transporte, motivado por la revolución industrial y la aparición del ferrocarril. Al mejorarse los caminos, los carros eran capaces de transportar los bloques más fácilmente.¹²

Más adelante se introdujeron las primeras máquinas a motor, que permitían transportar bloques con pesos y volúmenes mayores de piedra desde la cantera.¹³

■ **MÉTODO DE RODILLOS**

En los tratados de construcción de finales del siglo XIX se recomendaba utilizar este método de transporte a base de rodillos sobre los que se desplazaba el bloque, para el transporte dentro de la cantera o de la obra (*figura 4.1.14*).

4.1.12

Sistema de transporte de bloques de piedra desde la cantera de Portland en 1805.
Peter Stainer (1895)

4.1.13

Sistema de transporte de bloques de piedra en carro de cuatro ruedas.
A Pedra das Meigas (2013)

4.1.14

Sistema tradicional de transporte mediante rodillos, utilizado todavía durante el s. XIX.
Antonio Robira y Rabassa (1897)

4.1.2 **EL TRANSPORTE DESDE EL S. XX**

No fue hasta principios del s. XX cuando se empezaron a utilizar sistemas realmente industrializados, inicialmente en Inglaterra y desde mediados del s. XX también en España.¹⁴

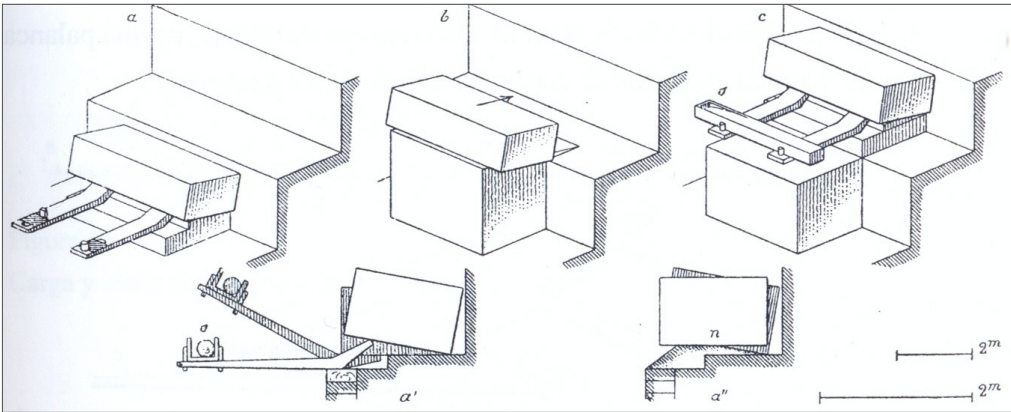
Desde la introducción de estos nuevos sistemas, se produjo un desarrollo muy rápido de los vehículos utilizados para transportar las cargas, que pasaron en poco tiempo a poder cargar con una gran cantidad de toneladas.

¹¹ Stanier, Peter (2009). *Quarries and quarrying*. Shire Classics, Oxford. Pág. 6.

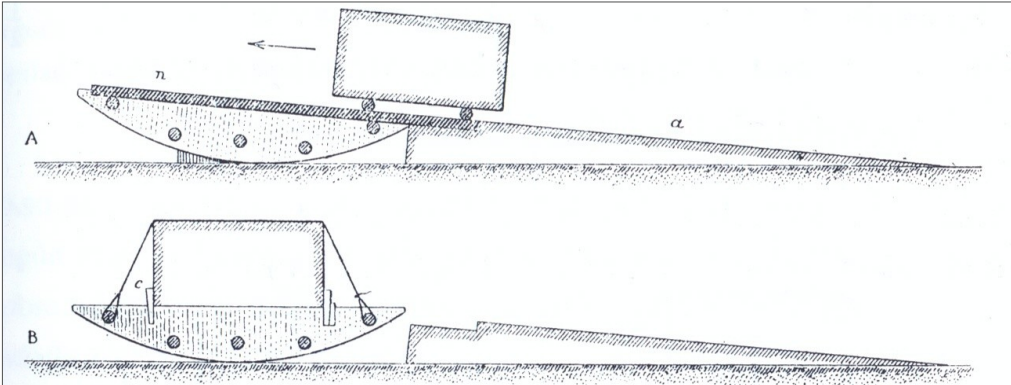
¹² *Ibídem*.

¹³ *Ibídem*.

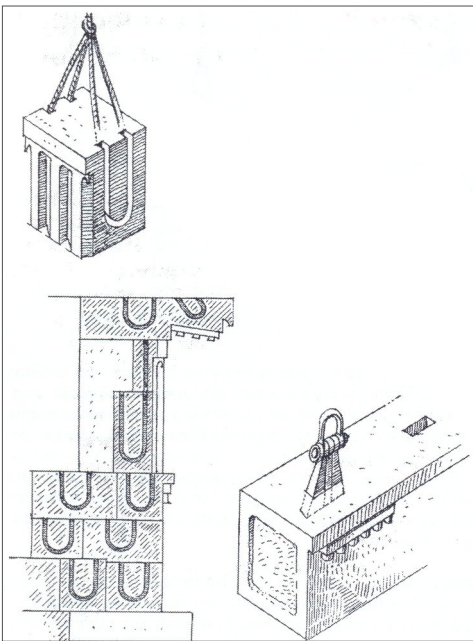
¹⁴ Galabré, F (1969). *Maquinaria general en obras y movimientos de tierras*. Reverté, Barcelona.



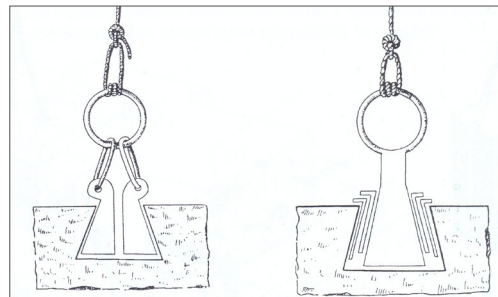
4.2.1



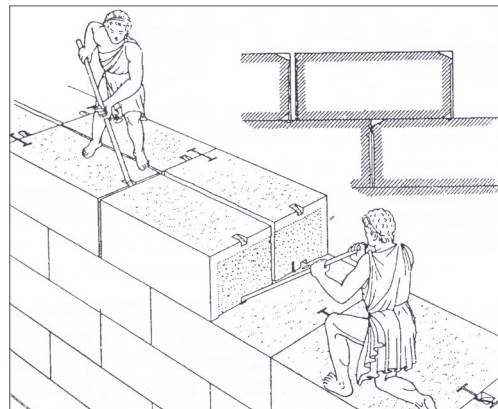
4.2.2



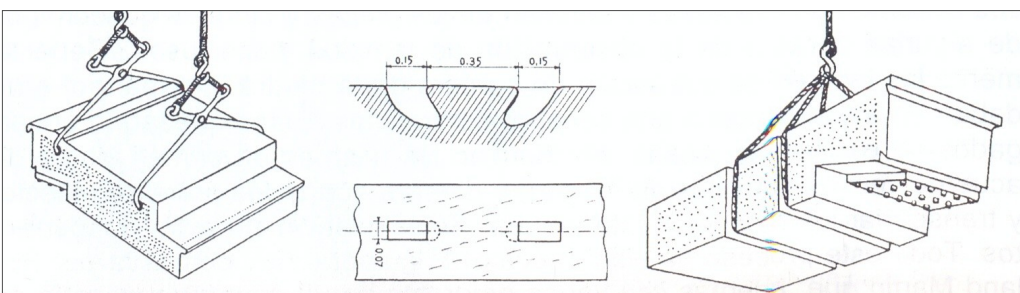
4.2.3



4.2.5



4.2.6



4.2.4

4.2 COLOCACIÓN EN OBRA

4.2.1 LA COLOCACIÓN HASTA EL SIGLO X

Durante esta etapa el principal problema de la colocación de los grandes sillares de piedra se debe a su tamaño, y por tanto a la elevación de dichas piezas. Los bloques salían de la cantera con sus dimensiones casi finales para su posterior colocación en obra, por lo que la maquinaria de elevación se utilizaba indistintamente en la cantera y en la construcción.

4.2.1-1 LA COLOCACIÓN EN EGIPTO

■ ELEVACIÓN POR ESCALONES

Durante la construcción del muro, las piezas se elevaban por escalones, ya fueran las propias hiladas del aparejo o mediante gradas artificiales de ascenso. Cuando las piezas no eran excesivamente grandes, éstas se elevaban mediante el calce progresivo con palancas que inclinaban la pieza para su posterior colocación (*figura 4.2.1*).¹

■ BALANCÍN ELEVADOR

En el caso de las piezas de mayor tamaño y peso la tarea se presentaba bastante más compleja e idearon un artilugio conocido como balancín elevador (*figura 4.2.2*), del que se conservan varios ejemplares, y que frente al sistema de calce presentaba la ventaja de ser basculante sobre su base y oscilante sobre un punto central.²

4.2.2-2 LA COLOCACIÓN EN GRECIA

Los sistemas vistos hasta ahora suponían un esfuerzo físico y una cantidad de mano de obra excesivos. No fue hasta la aparición de la rueda y con los conocimientos adoptados sobre ruedas y poleas cuando se produjo un claro avance tecnológico. Todos estos nuevos métodos supusieron un claro ahorro de tiempo y de costo de mano de obra que se comenzaron a utilizar en Grecia y que posteriormente fueron desarrollados por los romanos.

■ ELEVACIÓN MEDIANTE CASTAÑUELAS Y PINZAS

Los sillares se elevaban en unos casos introduciendo cordajes en hendiduras realizadas en la propia piedra, que luego quedaban disimuladas mediante casta-

4.2.1
Empleo de palancas para la puesta en obra de los bloques.
Auguste Choisy (1904)

4.2.2
Carga y atado de bloque sobre el balancín elevador.
Auguste Choisy (1904)

4.2.3
Métodos griegos de elevación de sillares.
Durm

4.2.4
Métodos griegos de elevación de sillares.
Roland

4.2.5
Métodos griegos de elevación de sillares.
Rafael Marín Sánchez (2000)

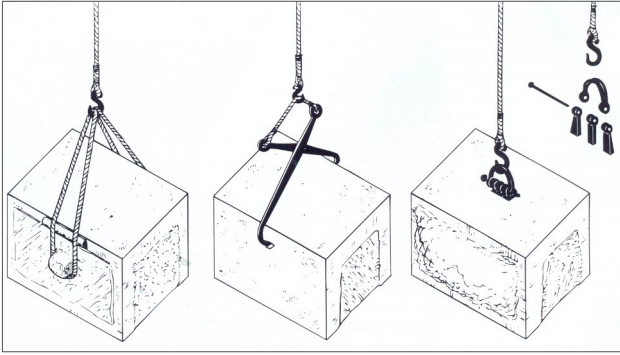
4.2.6
Sistema griego de colocación de los sillares en el muro mediante el empleo de palancas de madera endurecidas al fuego.
Rafael Marín Sánchez (2000)

¹ Choisy, Auguste (2006). El arte de construir en Egipto.

² Ibídem

³ Marín Sánchez, Rafael (2000). La construcción griega y romana. cit. pág. 81-82.

⁴ Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. Picard, París. pág. 55



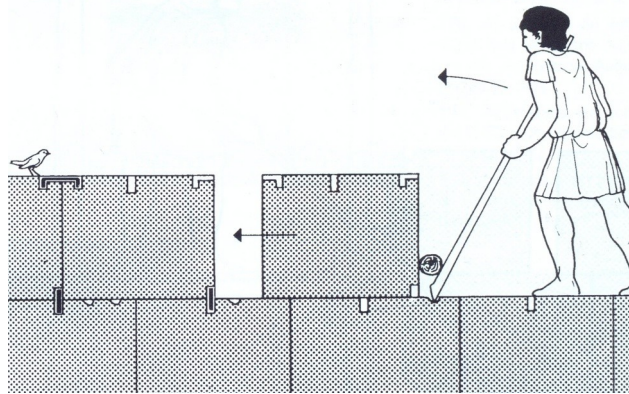
4.2.7



4.2.8



4.2.9



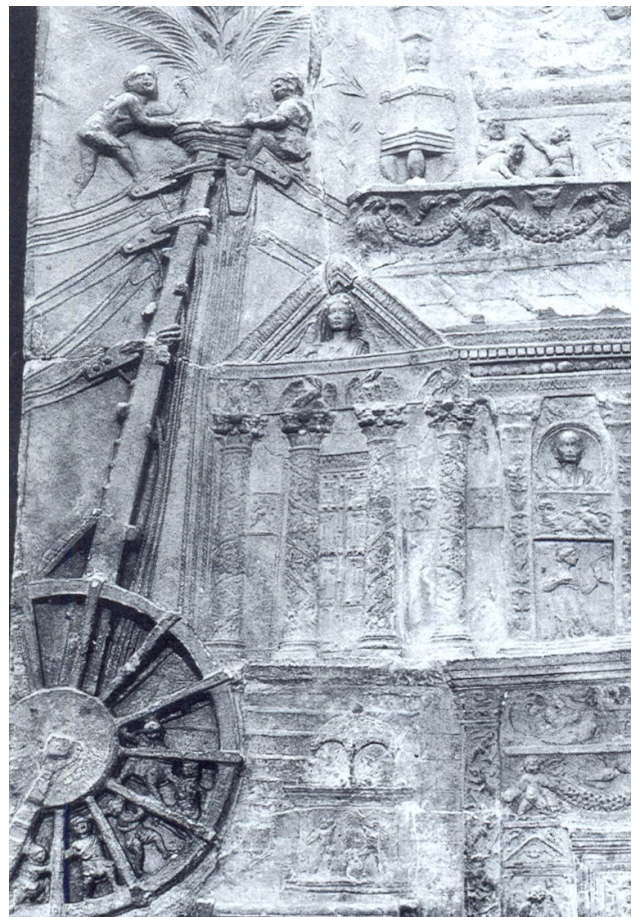
4.2.10



4.2.11



4.2.12



4.2.13

4.2.7
Métodos romanos de elevación. De izquierda a derecha: espigas de elevación, garras y clavijas.
Jean Pierre Adam (1989)

4.2.8
Marcas cuadradas de la elevación de las piezas mediante el método de garras. Teatro Romano de Mérida.
Archivo fotográfico del autor.

4.2.9
Garras utilizadas en el s. XX para elevar sillares.
Jean Pierre Adam (1989)

4.2.10
Ajuste de sillares.
Jean Pierre Adam (1989)

4.2.11
Muecas en piedras del Teatro Romano de Mérida utilizadas para el ajuste definitivo de las piezas.
Archivo fotográfico del autor.

4.2.12
Escena de obra de construcción de un bajorrelieve hallado en Terracina. Sobre el muro del fondo, se puede ver a un obrero recibiendo un sillar sujeto mediante garras colgadas de una cabria.
Jean Pierre Adam (1989)

4.2.13
Máquina elevadora romana con rueda motriz accionada por cinco hombres. Figura en el bajorrelieve funerario de la familia Haterii, época de Domiciano.
Jean Pierre Adam (1989)

ñuelas metálicas o pinzas. Otros sistemas utilizados se basaban en la colocación de anclajes en hendiduras o ranuras en forma de U, en los que se introducían las cuerdas del maquinillo o grúa (*figuras 4.2.3, 4.2.4, 4.2.5*).³

Para el ajuste definitivo de las piezas se utilizaban palancas de madera endurecidas al fuego que se introducían en acanaladuras en las piezas, previstas para ello, y que posteriormente quedaban ocultas por la pieza contigua (*figura 4.2.6*).⁴

4.2.2-3 LA COLOCACIÓN EN ROMA

Como se indicó anteriormente en el capítulo referido al transporte, Vitrubio dividió las tipologías de máquinas en:

- **Ascensionales**
- Neumáticas
- De desplazamiento

Las “máquinas ascensionales” que se desarrollaron durante la época romana son:

■ **ELEVACIÓN MEDIANTE CASTAÑUELAS Y PINZAS**

Los primeros métodos que adoptaron para elevar las piezas consistieron en los vistos anteriormente durante la época griega. Las castañuelas y pinzas romanos no eran sino una versión un poco más desarrollada de las griegas (*figuras 4.2.7, 4.2.8*). Por otro lado, el diseño de estas piezas no varía mucho de las utilizadas siglos después para la elevación tradicional de sillares (*figura 4.2.9*).

La colocación final de las piezas también se realizaba según el método griego de empuje con palancas de madera endurecida (*figuras 4.2.10, 4.2.11*).

Más adelante, se fueron definiendo una serie de sistemas de elevación basados en el concepto de “máquina elevadora”, que darán pie a los futuros sistemas más desarrollados durante el Medievo y el Renacimiento.

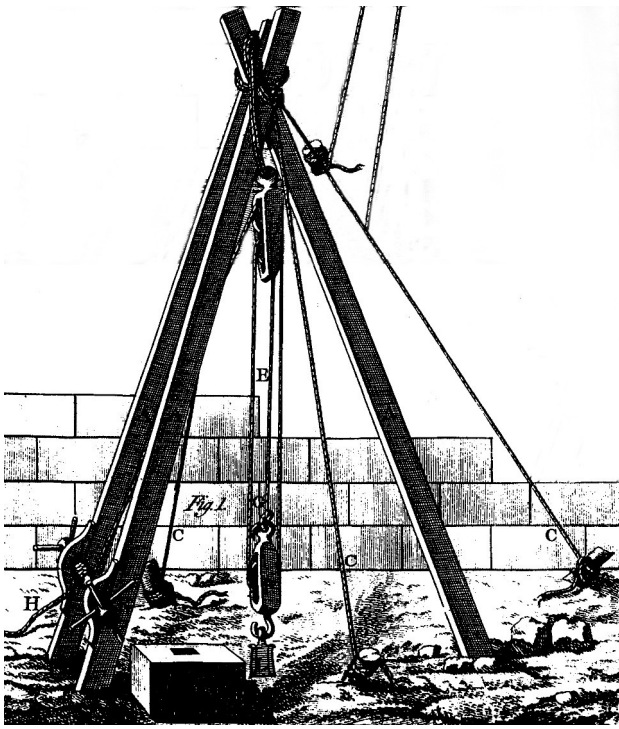
■ **TORNO ELEVADOR**

Constituido por dos piezas de madera unidas en su parte superior y separadas en la inferior (*figura 4.2.12*).⁵ Posteriormente esta máquina pasó a llamarse cabria.

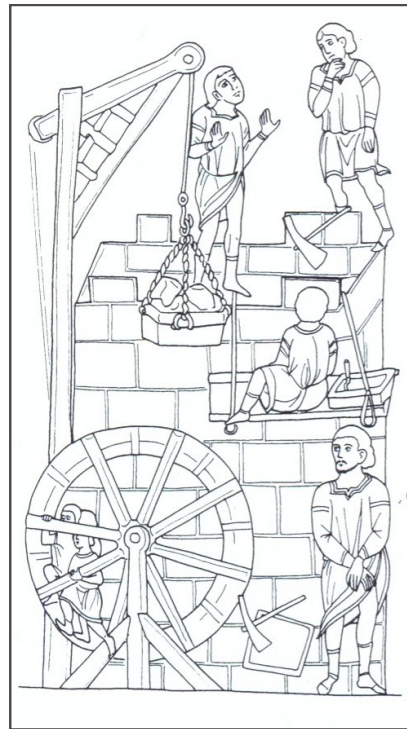
■ **MÁQUINA ELEVADORA**

Los conocimientos sobre la tecnología de los molinos propició la aparición de las

⁵ *Ibidem.* págs. 46-49



4.2.14



4.2.16



4.2.15

Domine labia mea a
 peries. Et os meū anū

primeras máquinas elevadoras accionadas mediante ruedas que movían varios hombres. Sin embargo, estas máquinas eran escasas y sólo se usaban en determinadas construcciones singulares (*figura 4.2.13*).⁶

4.2.3 LA COLOCACIÓN ENTRE LOS SIGLOS XI Y XIX

Durante estos siglos las piezas de piedra fueron reduciendo su tamaño y espesor, por lo que para la elevación de las piezas se desarrolló en gran medida el concepto de máquina elevadora iniciado por los romanos. La maquinaria utilizada en la cantera y en la construcción empezó a ser diferente y a tener una evolución diferenciada. Mientras que en la cantera se seguía pensando en la elevación de grandes bloques, individuales, en la construcción se empezó a pensar en la elevación de varias piezas pequeñas a la vez.

4.2.3-1 LA COLOCACIÓN DURANTE LA EDAD MEDIA

■ MAQUINARIA

Las máquinas que se desarrollaron para elevar las piezas se pueden clasificar en:

□ CABRIA

Durante la Edad Media continuaron desarrollando los sistemas de levantamiento de piezas basados en cuerdas y poleas. Este sistema, derivado de los tornos de elevación romanos, generalmente se utilizaba para elevar los sillares a los carros (*figura 4.2.14*).

□ CABESTRANTE

Aparecen con frecuencia en las escenas de construcción. Los sillares se elevaban por medio de una hondilla y una cuerda doble de cáñamo que se suspendía de un gancho metálico (*figura 4.2.15*). En realidad este sistema es una versión en vertical de la polca.⁷

□ GRÚA

La máquina que mayores ventajas aportó fue la máquina elevadora a modo de grúa, que se accionaba mediante una rueda y que podía elevar una gran cantidad de peso (*figura 4.2.16*). A pesar de que aún seguían utilizando pinzas y anclajes para elevar sillares, generalmente se prefería la elevación mediante grúa, porque tenía la ventaja de elevar varias piezas al mismo tiempo y suponían un gran ahorro de tiempo.⁸

4.2.14

Cabria utilizada en la construcción durante el s. XVIII.

Vitrubio (1486)

4.2.15

Construcción de la torre de Babel en el Libro de Horas de la reina Juana de Castilla.

Biblioteca nacional de España

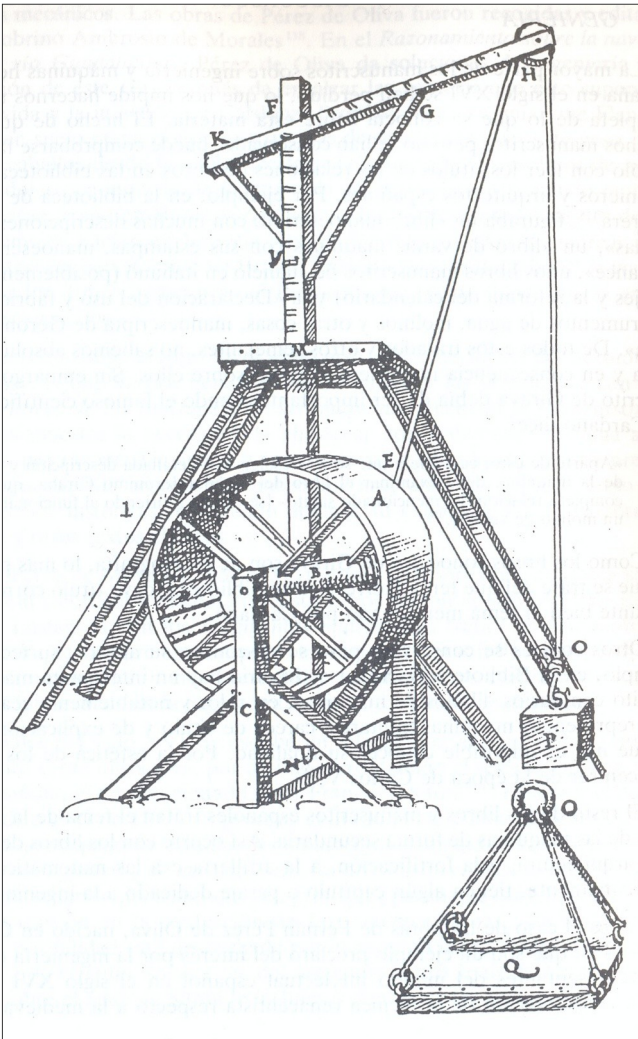
4.2.16

Máquina elevadora medieval accionada por una gran rueda.

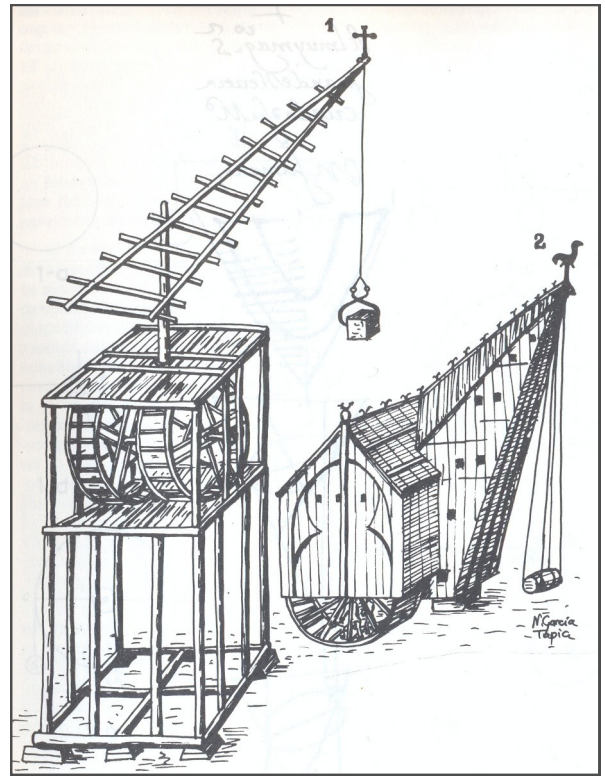
Histoire Universelle (s. XIII)

⁶ *Ibíd.*

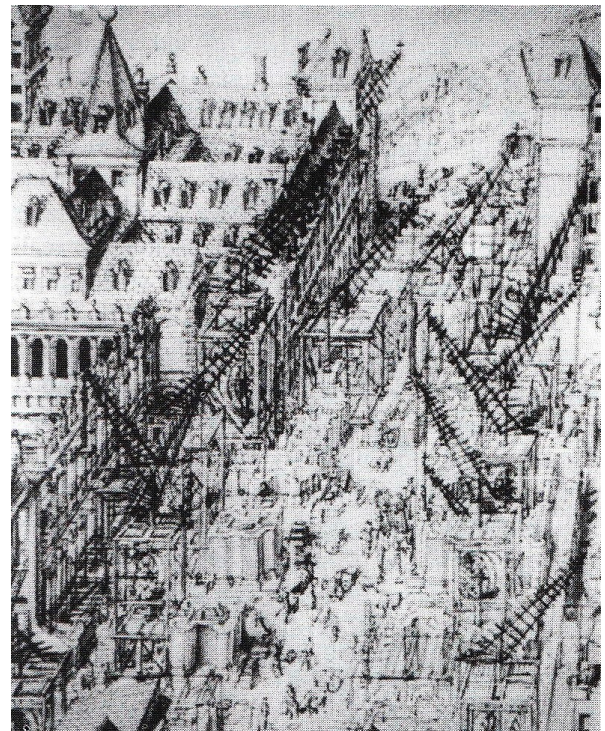
⁷ De Ignacio Vicens, Guillermo; et al... (2000). Medios de elevación de materiales en la construcción medieval. Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción.



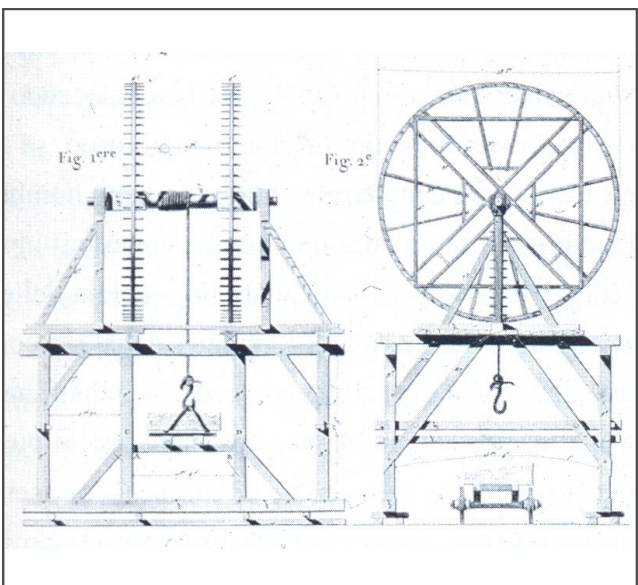
4.2.17



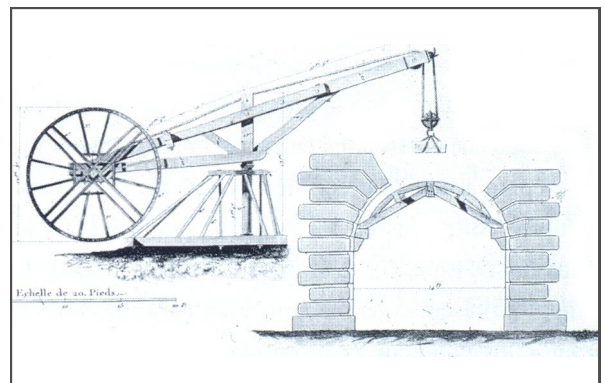
4.2.18



4.2.19



4.2.20



4.2.21

■ DESARROLLO DURANTE EL PERIODO GÓTICO

La evolución del románico al gótico se reflejó en las mejoras de los sistemas de elevación, que incidieron directamente en los andamiajes. Durante el románico se utilizaban andamios más pesados que se apoyaban en el suelo. En el gótico las mejoras introducidas en la maquinaria de elevación permitieron colocar directamente los materiales sobre el muro, aligerando considerablemente los andamios, convertidos ya únicamente en una superficie de trabajo del albañil.⁹

Por otro lado, los sillares tenían un tamaño más reducido y normalizado, que facilitaba su elevación y manipulación.

4.2.3-2 LA COLOCACIÓN ENTRE LOS SIGLOS XVI Y XVII

Desde ese momento se continuó desarrollando el sistema de grúas, que utilizado tanto para elevar una o varias piezas a la vez, aceleraba enormemente el proceso (*figura 4.2.17*).

Durante las construcciones renacentistas del s. XVI se utilizaron grandes grúas elevadoras, aprovechándose de los nuevos conocimientos adoptados sobre ingeniería, que eran progresivamente más ligeras y permitían elevar los sillares a alturas mayores. Sin embargo, los ingenios de este tipo de grúas más evolucionadas llegaban a España por importación, especialmente de Inglaterra.

4.2.17

Grúa utilizada en las construcciones de edificios durante el siglo XVI.

Pseudo - Juanelo Turriano (1570)

- El ejemplo más sobresaliente de estas grúas fue el del Monasterio del Escorial, de Juan de Herrera, construido en el plazo de 21 años, entre los años 1563 y 1584, gracias a una nueva organización constructiva., así como a una ingente maquinaria: cabrias, grúas de nuevo tipo con estructura desde el suelo,...(*figuras 4.2.18, 4.2.19*)¹⁰

4.2.18

Grúa utilizada en la construcción de El Escorial (1) y de Flandes (2).

Nicolás García Tapia (1990)

- Otro ejemplo singular es el caso de la mayor fábrica de monedas de su tiempo, del mismo arquitecto. En él se movilizó uno de los convoyes de maquinaria industrial que se haya dado en el s. XVI. Se puso en marcha desde Innsbruck hasta Segovia por tierra y mar, transportando más de 40 piezas de maquinaria durante 1 año.¹¹

4.2.19

Representación de la construcción del Monasterio de El Escorial
Anónimo (1576). Colección de Lord Salisbury, Londres

4.2.20, 4.2.21

Grúa utilizada en la construcción de puentes durante el s. XVIII.
Jean-Rodolphe Perrenet (2005)

⁸ *Ibidem.*

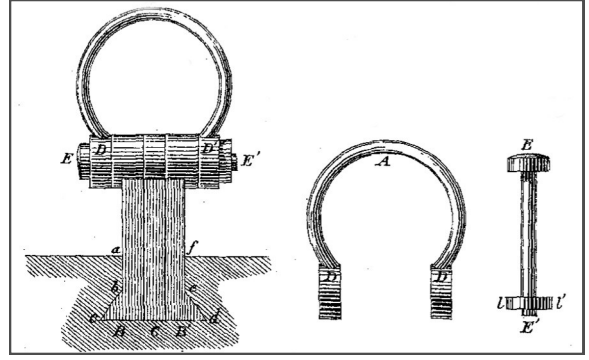
⁹ *Ibidem.*

¹⁰ García Tapia, Nicolás (1990). Ingeniería y arquitectura en el Renacimiento Español. Universidad de Valladolid. Secretariado de Publicaciones. Valladolid.

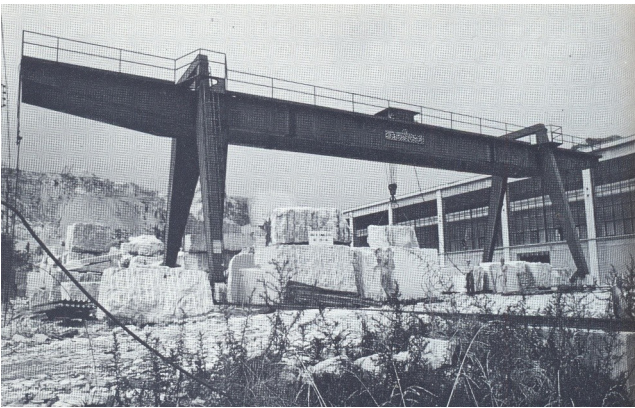
¹¹ García Tapia, Nicolás (1989). Técnica y poder en Castilla durante los siglos XVI y XVII.. Universidad de Valladolid. Secretariado de Publicaciones. Valladolid.



4.2.22



4.2.23



4.2.24



4.2.25



4.2.26

4.2.3-3 LA COLOCACIÓN EN LOS SIGLOS XVIII Y XIX

Posteriormente y especialmente a lo largo del s. XVIII se produjo un gran desarrollo en el diseño de las grúas de elevación, motivado por la gran cantidad de puentes construidos durante esa época (*figuras 4.2.20, 4.2.21*).¹²

En esta época se empezó a hacer mucho más evidente la diferencia entre estas grúas y las utilizadas por aquel entonces en las canteras (*figura 5.1.22*).

En las obras en las que no era posible el uso de grúas, era muy común recurrir a sistemas tradicionales, aún muy utilizados por esas épocas, como el método de anclajes para la elevación (*figura 4.2.23*). Estos anclajes sujetaban la pieza por hendiduras realizadas en la misma y, si bien es cierto que con mejores materiales y un diseño más tecnológico, no son sino una renovada versión de los sistemas que ya utilizaban en Grecia y Roma.

4.2.4 LA COLOCACIÓN A PARTIR DEL SIGLO XX

A lo largo del siglo XX se produjo un rápido desarrollo de las grúas. La distinción iniciada entre grúas utilizadas en la cantera y las utilizadas en la construcción se hizo completa. Mientras que las primeras se convirtieron en grandes y potentes máquinas que elevaban muchas toneladas (*figuras 4.2.24, 4.2.25*), en la construcción se ejemplificó el proceso, ya que el progresivo adelgazamiento de las piezas hizo que las tareas de colocar las piezas resultaran mucho más sencillas.

Los grupos de placas de piedra se elevan mediante grúas y montacargas, para posteriormente ser colocadas desde andamios. Los más comunes consisten en andamios apoyados tubulares, colgados móviles manuales o colgados móviles motorizados.¹³

En los últimos años se ha hecho muy popular la utilización de plataformas elevadoras sobre mástil (*figura 4.2.26*). Éstas son máquinas de accionamiento eléctrico, que por medio de un sistema piñón-cremallera, elevan una plataforma de trabajo que discurre en vertical sobre uno o dos mástiles, en función de la longitud de la plataforma. Tienen una gran capacidad de carga y pueden elevar tanto a los operarios como a los materiales, nivelándose automáticamente.¹⁴

4.2.22
Grúa utilizada en la cantera de Comblanchien, Francia, según una postal de principios del s. XIX.
A. Olivier

4.2.23
Sistema tradicional de elevación utilizado todavía durante el s. XIX.
Antonio Robira y Rabassa (1897)

4.2.24
Grúa puente utilizada en canteras.
AA.VV (1982)

4.2.25
Maquinaria de grandes dimensiones utilizada en cantera utilizada en la década de 1980.
AA.VV (1982)

4.2.26
Plataforma elevadora sobre mástil.
Archivo del estudio de arquitectura JH Arquitectos. Cedita

¹² Perronet, Jean-Rodolphe (2005). La construcción de puentes en el s. XVIII. Tr. Antonio de las Casas Gómez, et al..., Instituto Juan de Herrera, Madrid.

¹³ Mingolarra, José Ignacio (2009). Seguridad práctica en la construcción. Osalán, Instituto Vasco de Seguridad y Salud Laborales, Bizkaia.

¹⁴ *Ibidem*. Pág. 255.

4.3 CONCLUSIONES PARCIALES

El transporte y la elevación son dos procesos íntimamente ligados, con un desarrollo muy similar en cuanto a los motivos y los hechos que impulsaron dicha evolución.

- La dificultad que suponían el transporte y elevación de las piezas es consecuencia directa del tamaño de las mismas. Tanto en Egipto como en Grecia y Roma se recurrieron a sistemas ingeniosos cuyo principal objetivo era la posibilidad de manejar grandes pesos.
- Cuando en la Edad Media no se disponía de tantos recursos ni medios económicos, se tuvo que hacer uso de otros sistemas más sencillos y menos costosos. Paralelamente disminuía el tamaño de los sillares, por lo que los trabajos de transporte y elevación se ejemplificaron enormemente y se podían realizar para varias piezas a la vez y no de una en una como se venía haciendo anteriormente.
- Tanto para el caso del transporte como para el caso de la elevación no ha existido, en general, una evolución muy clara en cuanto a los medios disponibles. En la mayoría de las épocas se utilizaba el método que resultara más fácil de aplicar para cada caso concreto, adaptando métodos ya existentes y consiguiendo el máximo aprovechamiento de los recursos.
- La única maquinaria que ha tenido una clara evolución constante y progresiva ha sido la de la “máquina elevadora” o grúa, que ha evolucionado desde los primeros prototipos hasta las actuales máquinas, capaces de elevar una gran cantidad de peso.

Las primeras máquinas para elevar los sillares se inventaron en Roma. Sin embargo, realmente estas máquinas comenzaron a utilizarse de forma habitual y se hicieron más eficientes y eficaces durante y a partir del s. XIII, con motivo de la búsqueda de una construcción más económica y rápida.

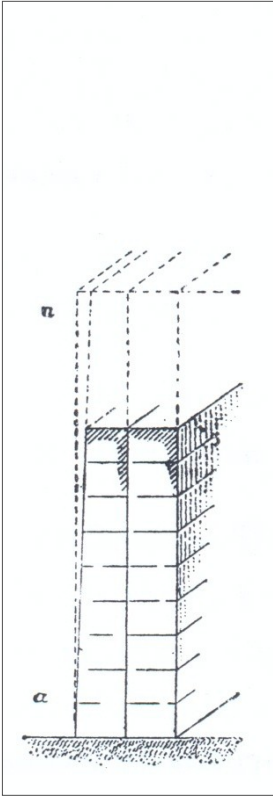
Durante los siglos XVI y XVII se dio un gran impulso para el desarrollo de las grúas, motivado por la construcción de grandes edificaciones. Los grandes impulsores fueron los ingleses, que las fabricaban y exportaban a otros países. Posteriormente a lo largo del s. XVIII y motivado por el gran número de puentes que se construyeron por esa época, se produjo un gran impulso en su evolución, fabricándose una gran cantidad de máquinas.

- El verdadero gran salto en cuanto a la evolución de los medios auxiliares que permitía el transporte y la elevación de las piezas de piedra se produjo durante el siglo XX, cuando se construyeron máquinas muy especializadas por un lado para el trabajo en cantera y la elevación de grandes bloques, y por otro lado, grúas montacargas y andamiajes cuya función era asegurar un montaje de las fijaciones y de las placas de piedra mucho más sencillo y seguro.

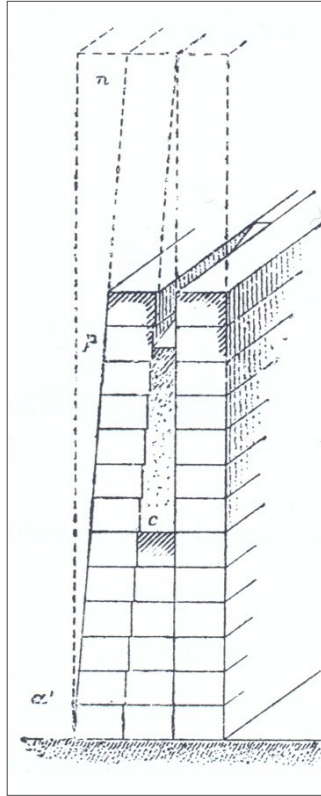
Los sistemas constructivos empleados en la arquitectura tienen una relación muy directa con la disponibilidad de materiales y medios auxiliares, los conocimientos tecnológicos de cada periodo histórico, así como con la racionalidad en el uso de los recursos para conseguir su máximo aprovechamiento.

Para conocer el progresivo desarrollo de los sistemas constructivos, que ha derivado en la construcción de fachadas trasventiladas se han analizado los siguientes sistemas:

- Muro compuesto
- Muro mixto
- Muro chapado
- Fachada trasventilada



5.1.1



5.1.2



5.1.3



5.1.4

5.1 MURO COMPUESTO

5.1.1 DEFINICIÓN

Las imágenes que solemos ver en muros de fábricas pétreas aparentan ser macizas. Sin embargo, en muchas de ellas no encontramos sino un muro compuesto por varias hojas. Desde el punto de vista constructivo surgen varias **justificaciones** para su uso.

- Al utilizar rellenos más ligeros, **disminuía el peso propio** del muro. Esta cuestión era muy a tener en cuenta cuando la altura del elemento era considerable, puesto que se podía provocar roturas por aplastamiento del material en las secciones inferiores del muro.
- Se producía un importante **ahorro de material**, teniendo en cuenta además que el elemento generalmente estaba sometido a tan solo su propio peso, y por tanto podía ser aligerado sin que ello afectase a su comportamiento estructural.
- Se producía también un **ahorro de tiempo y mano de obra**, al tener que utilizar únicamente sillares regulares en las hojas exteriores, y trabajas sólo en su cara expuesta y en las caras de contacto con otros sillares.

5.1.1

Muro compuesto formado por dos hojas adosadas. Para conseguir una mayor estabilidad se le daba una inclinación a muro de hasta 10°.

Auguste Choisy (1904)

5.1.2

Muro compuesto formado por dos hojas separadas. Para conseguir una mayor estabilidad se le daba una inclinación a muro de hasta 10°.

Auguste Choisy (1904)

5.1.3

Muro compuesto egipcio formado por dos paramentos y relleno sin trabazón. Pirámides de Gizeh.

Archivo fotográfico del autor

5.1.4

Aparejo irregular. Templo de Edfú.

Archivo fotográfico del autor.

5.1.2 MURO COMPUESTO EGIPCIO

■ SISTEMA CONSTRUCTIVO

El muro egipcio se componía de dos paramentos distintos e independientes, donde no existía trabazón de ningún tipo, y que según su posición podían ser: ¹

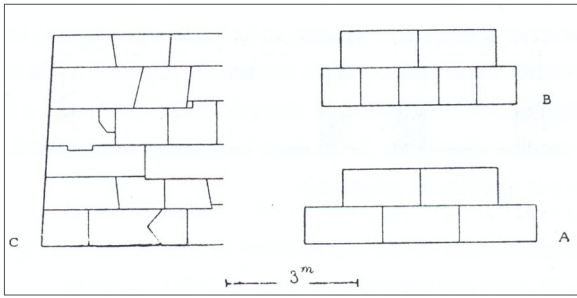
- **Dos hojas adosadas directamente una a la otra** (*figura 5.1.1*).
- **Dos hojas que quedaban separadas por un intervalo**. Cuando ambas caras estaban separadas se formaba un relleno entre ellas a base de mampuestos y cascotes, mezclados con un mortero realizado in-situ a base de yeso y arena, generalmente terrosa (*figuras 5.1.2, 5.1.3*).

■ APAREJOS

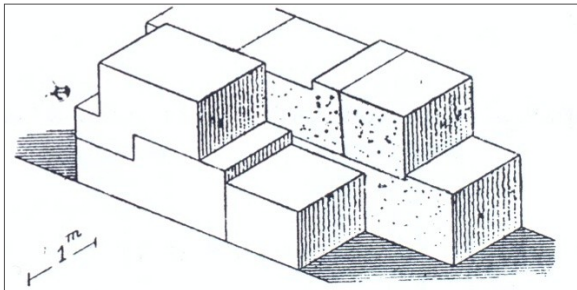
Las primeras referencias de muros compuestos de varias hojas podemos encontrarlas en Egipto. Los **motivos** fundamentales de su utilización están relacionados con la utilización de herramientas de cobre: ²

¹ Choisy, Auguste (2006). El arte de construir en Egipto. Tr. Íntegra de la edición L'art de bâtir chez les Égyptiens, de 1904, por Gema López Manzanares, Instituto Juan de Herrera, Madrid.

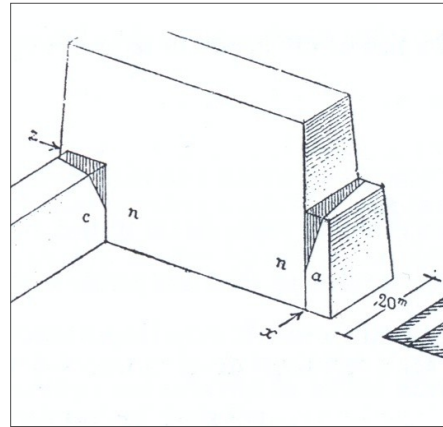
² Ibídem.



5.1.5



5.1.6



5.1.7



5.1.8



5.1.9

- La dificultad en la labra de los asientos impedía los teóricos aparejos regulares (*figura 5.1.4*).
- Por ello desarrollaban unos aparejos más o menos irregulares, como resultado de la colocación de los sillares en combinaciones que con pequeños retoques permitían mantener la forma que traían de la cantera (*figuras 5.1.5, 5.1.6*).
- Ante la irregularidad de estos aparejos suponía una gran dificultad su trabazón.

■ JUNTAS

También introducían este mortero entre los intersticios que quedaban entre los sillares, pero siempre posteriormente a su colocación, ya que debido a la mala calidad del yeso utilizado, estos morteros eran bastante deficientes y lo trataban como un simple relleno.³

Un descubrimiento de interés durante esta civilización fue la previsión de **juntas de dilatación**. A la hora de la realización del muro tenían en cuenta los asientos de los distintos paños. Como trabajaban en terrenos inestables, evitaban toda ligazón entre paños desigualmente cargados, conscientes de las grietas en forma de x que aparecían en los muros en los que no tenían en cuenta estas precauciones (*figura 5.1.7*). Podemos encontrar las primeras referencias claras de este sistema en las construcciones del templo de Karnak (*figura 5.1.8*).

■ LLAVES

La resistencia del muro venía dada por el propio efecto de estabilización debido al gran tamaño de las piezas. Aunque no era lo común, se han encontrado algunos muros en los que se utilizaron **llaves de madera** en cola de milano para el anclaje entre sillares yuxtapuestos del mismo muro. En cualquier caso, en ninguno de ellos se han encontrado elementos de trabazón o cosido entre los distintos paramentos.⁴

El perfil adoptado más antiguo es el de cola de milano, ya que permitía la fabricación de espigas en madera dura, en roble, en cedro o en olivo (*figura 5.1.9*).

5.1.3 MURO COMPUESTO GRIEGO

■ SISTEMA CONSTRUCTIVO

El muro griego se trataba de un muro compuesto por dos hojas de piedra trabajadas hacia su cara exterior y una hoja central interior de menor calidad formada por mortero de cal y fragmentos de piedra. Éste sistema, conocido como **emplec-**

5.1.5
Aparejo real realizado en Egipto irregular a la izquierda, y aparejo teórico regular no conseguido en esa época.
Auguste Choisy (1904)

5.1.6
Muro compuesto egipcio formado por dos paramentos y relleno sin trabazón.
Auguste Choisy (1904)

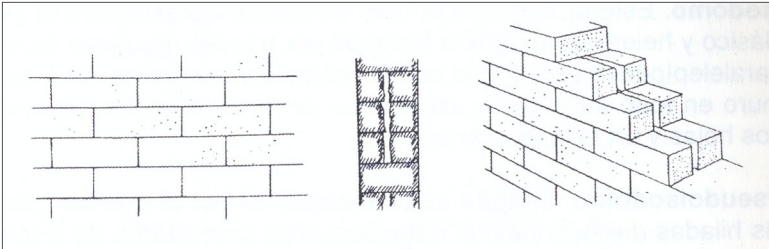
5.1.7
Junta de dilatación.
Auguste Choisy (1904)

5.1.8
Junta de dilatación.
Templo de Karnak.
Archivo fotográfico del autor.

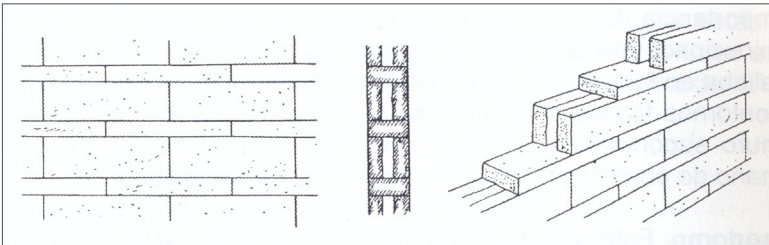
5.1.9
Llaves de madera para unir sillares contiguos.
Templo de Karnak.
Auguste Choisy (1904)

³ *Ibídem.*

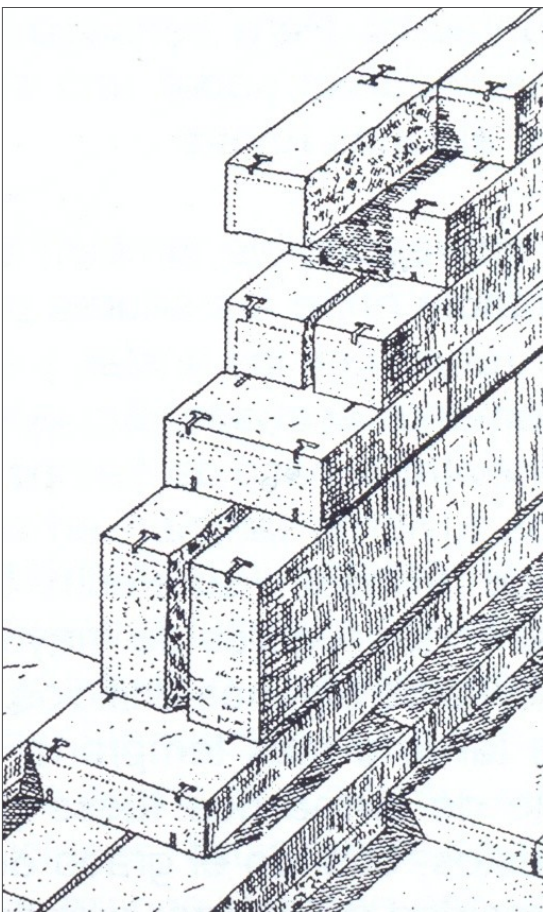
⁴ *Ibídem.*



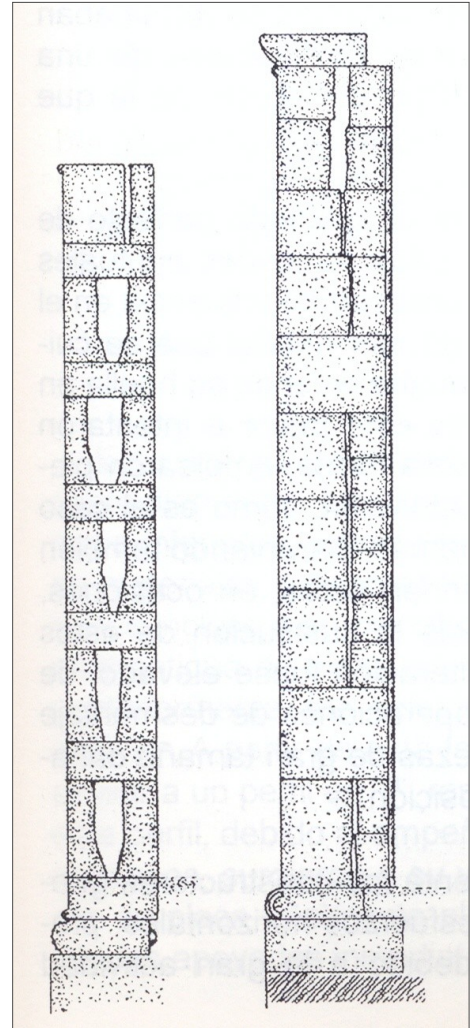
5.1.11



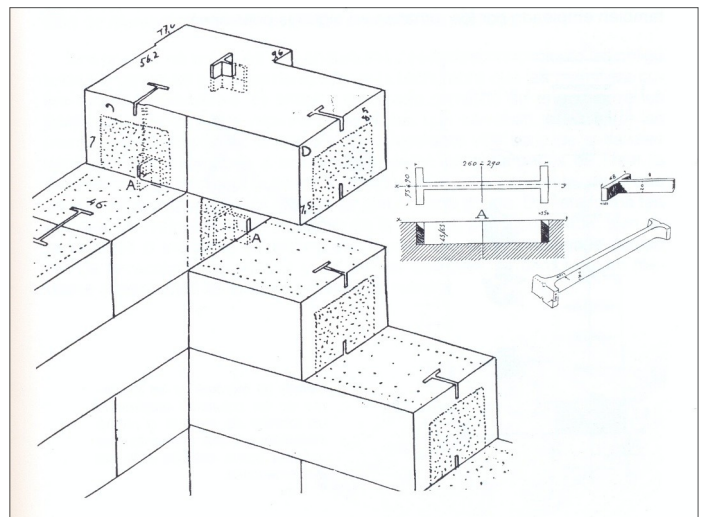
5.1.12



5.1.13



5.1.10



5.1.14

ton, constituye el primer sistema en el que se buscó la trabazón de las tres hojas para constituir un todo solidario (*figura 5.1.10*).

■ APAREJOS

Gracias a la utilización de las herramientas de hierro los griegos empezaron a realizar los primeros aparejos regulares a partir del **s. VII a.C** por la facilidad de labra que permitía, apareciendo también al mismo tiempo los primeros aparejos trabados. Los aparejos que desarrollaron, y que posteriormente se convertirán en los dos aparejos fundamentales, son:

- Aparejo **isodomo**, formado por hiladas regulares de paralelepípedos rectos (*figura 5.1.11*).
- Aparejo **seudoisodomo**, con hiladas alternadas de diferente tamaño que permitía un aprovechamiento mayor del material (*figura 5.1.12*).

Normalmente la hilada inferior, conocida como *ortostatos*, estaba formada por bloques de mayor tamaño y con el doble de altura que las demás para soportar de una manera más eficaz las tensiones a las que se encuentra sometida.⁵

■ LLAVES

El empleo sillares simplemente yuxtapuestos con juntas en seco hacía prácticamente obligado el uso de llaves que cosiesen el muro en toda su sección, haciendo trabajar todo el elemento en conjunto y proporcionando al muro una mayor estabilidad frente a los esfuerzos horizontales.

A partir del siglo **VI a.C** los griegos recurrieron al **plomo** para fabricar espigos también en forma de doble cola de milano, aún conservando el uso de la madera, que primeramente eran fundidos en un molde y luego se introducían en las muescas y se martilleaban para que su adherencia fuera mayor. Estas clavijas y grapas se disponían en distintas posiciones para fijar los sillares a su posición (*figuras 5.1.13, 5.1.14*).⁶

5.1.4 MURO COMPUESTO ROMANO

Frente a este “todo solidario” de la arquitectura griega, los romanos desarrollaron un sistema en el que lo realmente portante era el núcleo, dejando que las caras externas sirviesen únicamente de encofrado perdido, y viéndose reducido el uso de la piedra a **revestimiento** del núcleo.⁷

5.1.10

Detalle de un muro ejecutado con la técnica del *emplecton* griego. Se observa el arranque del muro sobre los ortostatos. *Rafael Marín Sánchez, (2000)*

5.1.11

Aparejo de muro isodomo respectivamente. En la sección se pueden ver los perpieños que cosían el muro. *Rafael Marín Sánchez, (2000)*

5.1.12

Aparejo de muro seudoisodomo. En la sección se pueden ver los perpieños que cosían el muro. *Rafael Marín Sánchez, (2000)*

5.1.13

Esquema de muro desarrollado con la técnica del *emplecton* griego y marcas de las llaves. *Rafael Marín Sánchez, (2000)*

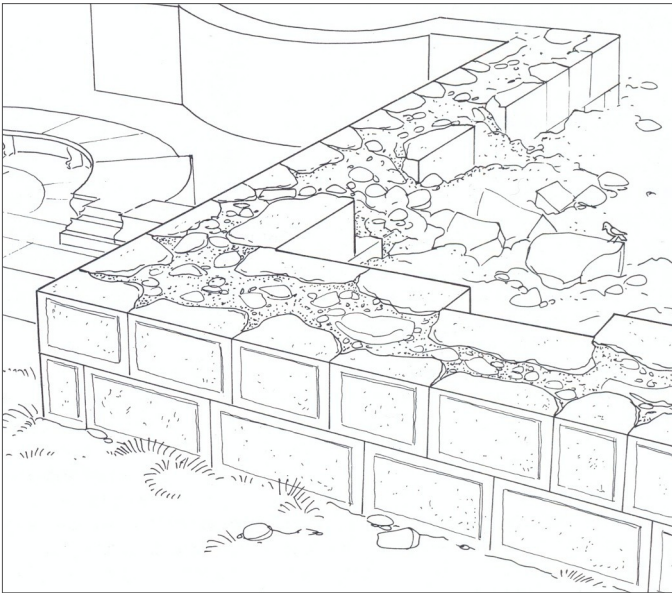
5.1.14

Detalle de algunos de los anclajes empleados para el izado de las piezas. *Rafael Marín Sánchez (2000)*

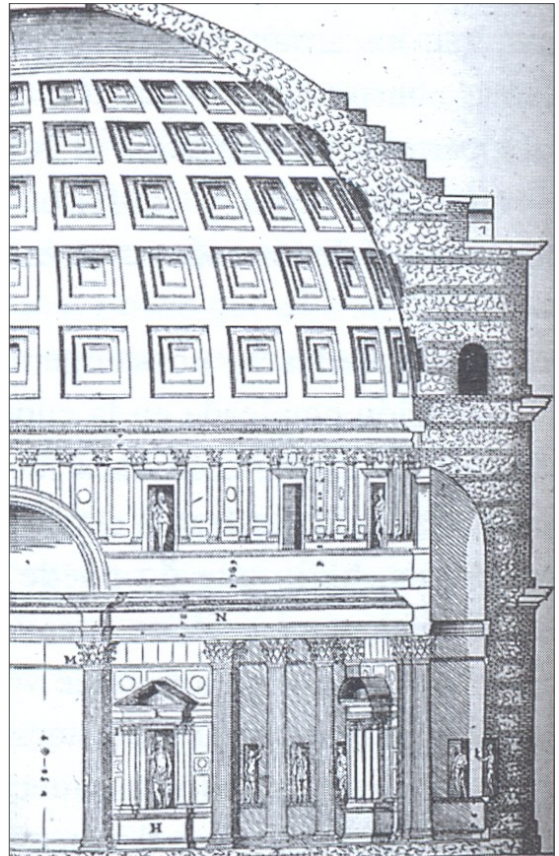
⁵ Marín Sánchez, Rafael (2000). La construcción griega y romana. Universidad Politécnica de Valencia, Servicio de Publicaciones, Valencia.

⁶ Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. Picard, París.

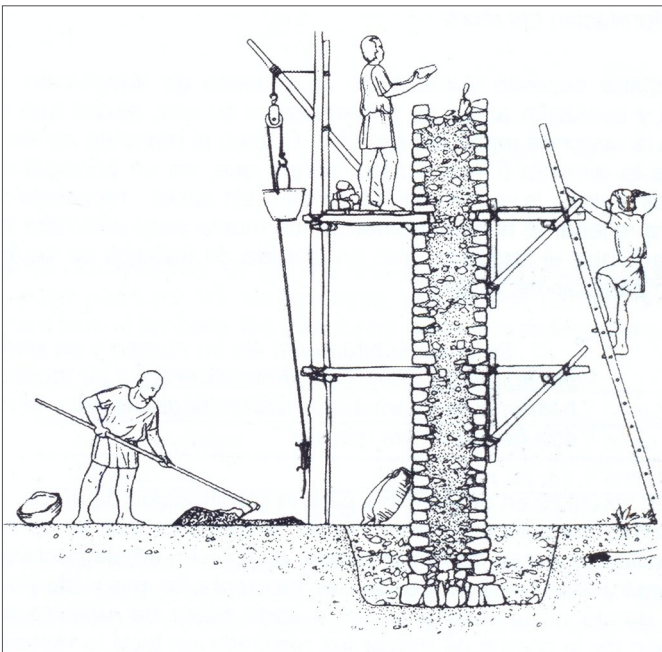
⁷ Patrón, Vicente. (2001). El nacimiento de una técnica. Tectónica Nº2. Envoltentes 2. Cerramientos pesados. pág. 10.



5.1.15



5.1.17



5.1.16



5.1.18

En realidad, el muro romano, conocido como **opus emplectum**, se puede entender como una evolución de la técnica del *emplecton* griego. La diferencia entre las dos formas de entender el muro derivaba de la aparición del cemento hidráulico romano, material que descubrieron y utilizaron casi por casualidad y que empleaban como relleno y núcleo del muro: el *opus caementicium*. Esto permitió a los romanos la unión de las piedras sin necesidad de recurrir a otros sistemas de fijación (*figuras 5.1.15, 5.1.16, 5.1.17, 5.1.18*). Alrededor del siglo II a.C., los romanos aprendieron a usar la puzolana, un tipo de ceniza volcánica que, mezclada con cal y pequeños cascotes, formaba un cemento impermeable y que no se disolvía al combinarse con el agua sino que se endurecía.⁸

■ SISTEMA CONSTRUCTIVO

Auguste Choisy realizó en 1984 una clasificación en la que explicaba los dos métodos utilizados para la construcción del muro, que definió como:

□ EJECUCIÓN SIN COMPRESIÓN

Para la ejecución de estos muros compuestos construían en primer lugar las dos hojas exteriores, que tenían dos requisitos esenciales. Por una parte, debían servir como encofrado al relleno, por lo que tenían que estar dotadas de una cierta consistencia que evitase su pandeo, y por otra, debían servir de acabado superficial. Posteriormente se vertía el relleno, alternando una capa de 3 o 4 cm de espesor de hormigón romano con otra de fragmentos de piedra a modo de mampostería.⁹

□ EJECUCIÓN CON COMPRESIÓN

A partir del **s. I d.C** también empezaron a desarrollar otro método de ejecución más complejo, generalmente destinado a edificaciones de calidad. En este caso, el núcleo se ejecutaba por compresión y los paramentos exteriores constaban de sillares de gran estabilidad. A pesar de ser un método más lento y complicado, les permitía generar aparejos más estéticos y de mayor calidad al estilo de los griegos (*figura 5.1.19*).

Para ejecutar el núcleo se alternaban entre los paramentos exteriores de piedra una espesa capa de 10 o 15 cm de mortero romano con otra capa de pequeños fragmentos de piedra, guijarros o cascotes, que se apisonaba enérgicamente de modo que el mortero se introdujera en todos los intersticios (*figuras 5.1.20, 5.1.21*). Con la utilización de estos nuevos aparejos se recuperó también el sistema griego de anclajes entre sillares contiguos mediante grapas de hierro revestidas de plomo.¹⁰

⁸ Adam, Jean-Pierre (1984). *La construction romaine: matériaux et techniques*. Picard, París

⁹ Choisy, Auguste (1999). *El arte de construir en Roma*. Ed. a cargo de Santiago Huerta Fernández y Francisco J. Girón Sierra. Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid.

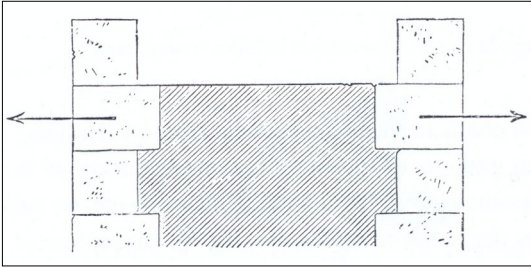
¹⁰ *Ibidem*.

5.1.15
Representación de un muro compuesto romano.
Jean-Pierre Adam (1984)

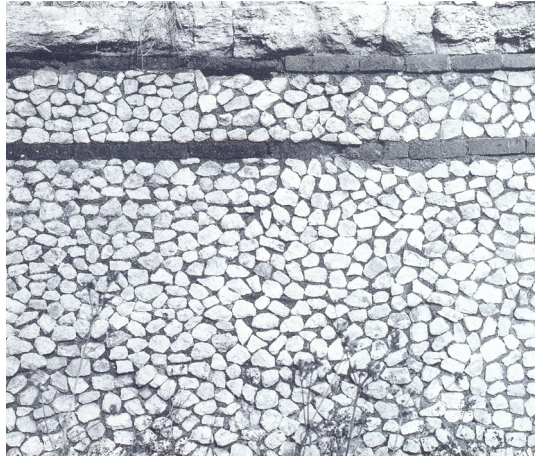
5.1.16
Construcción de un muro compuesto romano mediante andamios empotrados.
Jean-Pierre Adam (1984)

5.1.17
Sección del Panteón de Adriano, Roma, según Palladio. Siglo II d. C.
Palladio

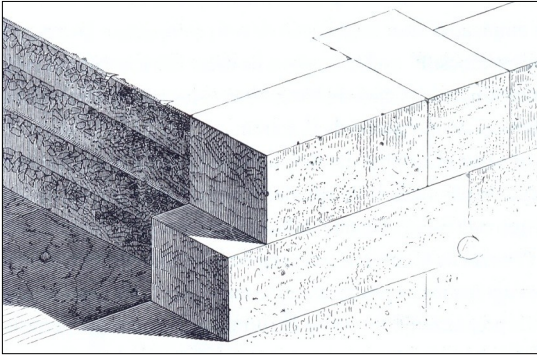
5.1.18
Fachada del Coliseo romano, ejecutada con un muro compuesto que no era estructural. s. I a.C - s. I d.C.
Archivo fotográfico del autor



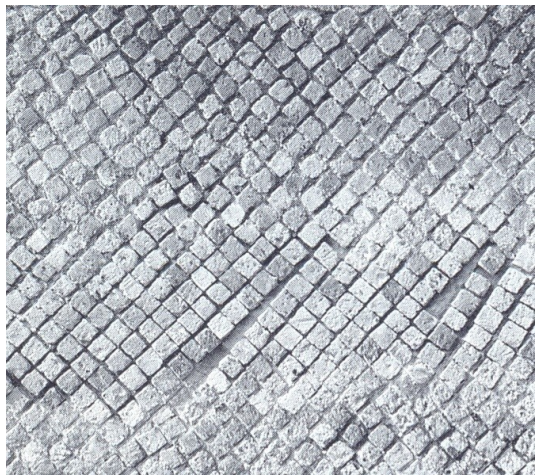
5.1.19



5.1.22



5.1.20



5.1.23



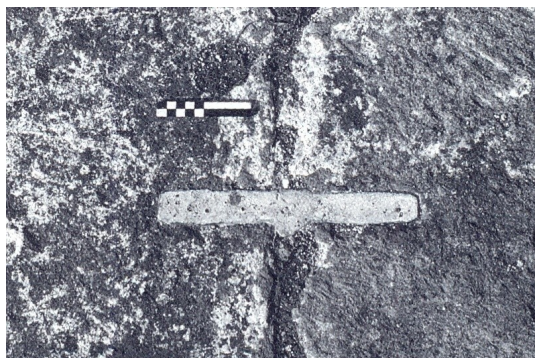
5.1.21



5.1.24



5.1.25



5.1.26

■ APAREJOS

□ EJECUCIÓN SIN COMPRESIÓN

Con el desarrollo de esta tipología de muro, y aprovechándose de la facilidad de ejecución que presentaba, se desarrollaron una serie de aparejos, siempre constituidos por piezas de pequeño tamaño que servían de encofrado perdido y acabado al mismo tiempo.

5.1.19
Efecto del apisonado del núcleo de hormigón sobre los paramentos.
Auguste Choisy (1999)

• Opus incertum

El primero y más simple fue el *opus incertum*, utilizado durante la época republicana ante la gran cantidad de piedras de pequeño tamaño existente en los alrededores de Roma (*figura 5.1.22*). Aunque en principio supuso una ventaja por la rapidez con la que se realizaba, la evolución progresiva en la talla de estas piezas, por necesidades de normalización e industrialización, hizo que aparecieran otros aparejos más regulares.¹¹

5.1.20
Muro romano ejecutado con núcleo de hormigón apisonado y paramentos de sillería..
Auguste Choisy (1999)

• Opus reticulatum

El opus reticulatum se conformaba mediante piezas de piedra, fabricadas y almacenadas previamente, talladas en forma de pirámide cuadrada o romboidal. Los vértices de estas piezas se introducían en el muro, comprimiéndolo y sujetándolo al mismo tiempo (*figuras 5.1.23*).¹²

5.1.21
Muro romano ejecutado con núcleo de hormigón apisonado y paramentos de sillería. Teatro Romano de Mérida. s. I a.C.
Archivo fotográfico del autor

• Opus mixtum

En el *opus mixtum*, desarrollado paralelamente al anterior, se empleaba el ladrillo para solucionar los puntos más débiles y establecer juntas de cosido, y la piedra para la elaboración de los grandes paños que definían la mayor parte de la superficie del muro (*figuras 5.1.24*).¹³

5.1.22
Opus incertum, romano. s. I d.C.
Jean-Pierre Adam (1984)

5.1.23
Opus reticulatum, romano. s. I d.C.
Jean-Pierre Adam (1984)

□ EJECUCIÓN CON COMPRESIÓN

5.1.24
Opus mixtum, romano. s. II d.C. Ostia.
Archivo fotográfico del autor

- Aparejo isodomo
- Aparejo pseudoisodomo

■ JUNTAS

Tanto en los muros desarrollados en Grecia como en Roma, los sillares se colocaban en seco, con ausencia de mortero en las juntas, ya éste se utilizaba como un aglomerante y no para transmitir o regularizar las presiones entre las piedras.

5.1.25
Grapas de unión en forma de cola de milano, utilizada en muros romanos.
Auguste Choisy (1999)

■ LLAVES

La época romana mantuvo a veces los procedimientos griegos, aunque utilizaban

5.1.26
Grapas de unión en forma de π, utilizada en muros romanos.
Jean-Pierre Adam (1984)

¹¹ Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. cit.

¹² Ibidem.

¹³ Ibidem.



5.1.27



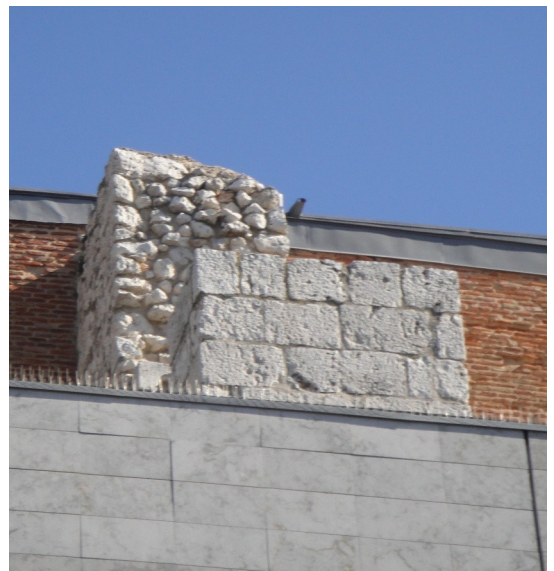
5.1.28



5.1.29



5.1.30



5.1.31

generalmente una **grapa de hierro** con perfil en forma de π , recubierta por una capa de plomo que llenaba el resto de la cavidad (*figuras 5.1.25, 5.1.26*).¹⁴

Además de la rapidez de ejecución de la pieza de hierro, la cavidad receptora practicada en los dos sillares juxtapuestos no requería la precisión de talla de las muescas de doble T. Una vez colocada la grapa, el volumen restante se llenaba con una colada de plomo que podía, o bien empotrar solamente las dos uñas verticales, o bien recubrir todo el conjunto.¹⁵

5.1.5 MURO COMPUESTO ENTRE LOS SIGLOS VI Y XVI

Con la desaparición del imperio romano se dejó de utilizar el cemento de puzolanas. Pese a continuar realizando muros derivados del *opus emplectum*, se recurrió a una construcción de peor calidad, que presentaba más problemas de asentamientos, resistencias y trabazón.

■ SISTEMA CONSTRUCTIVO

Se empezó a emplear una mezcla ripio o desperdicio de cantería y mampostería, combinado con mortero de cal o incluso barro según la época y el lugar, y utilizaban las mejores y más trabajadas piedras para formar el paramento exterior, aunque el tamaño de éstas se redujo considerablemente frente al de los muros anteriores. El grosor total de estos muros variaba según la parte del edificio, pero solía oscilar entre los 70 y los 100 cm (*figuras 5.1.27, 5.1.28*).¹⁶

Los constructores medievales pretendieron levantar grandes paramentos de sillería a la manera de los romanos, pero disponían de una situación tanto económica como administrativa muy inferior. Incluso llegaron a imitar paramentos romanos a base de piedras de sillería colocadas en seco, pero no disponían de medios suficientes ni para transportar ni para elevar bloques de piedra de gran volumen.¹⁷

Ante el mal resultado de los mismos por utilizar un relleno de calidad muy inferior al romano, comenzaron a desarrollar nuevas estrategias menos costosas pero que satisficieran las necesidades requeridas. El trabajo de las piedras y el concepto de distribución de cargas y del equilibrio de fuerzas pasó a ser primordial para una correcta ejecución (*figuras 5.1.29, 5.1.30, 5.1.31*).

- Las primeras modificaciones que se aportaron al muro se desarrollaron durante la época románica. En primer lugar, se empezaron a utilizar **vigas** de madera longitudinales que **cosían el muro** (*figura 5.1.32*). También

5.1.27
Castillo de Zamora, de la época románica. s. XI.
Archivo fotográfico del autor.

5.1.28
Sección de un muro en Castroverde de Campos.
Archivo fotográfico Ángel Luis Gallego. Cedida

5.1.29
Restos de la Colegiata de Santa María la Mayor. Valladolid. s. XIII.
Archivo fotográfico del autor.

5.1.30
Catedral de Valladolid. s. XVI.
Archivo fotográfico de María Soledad Camino Olea. Cedida

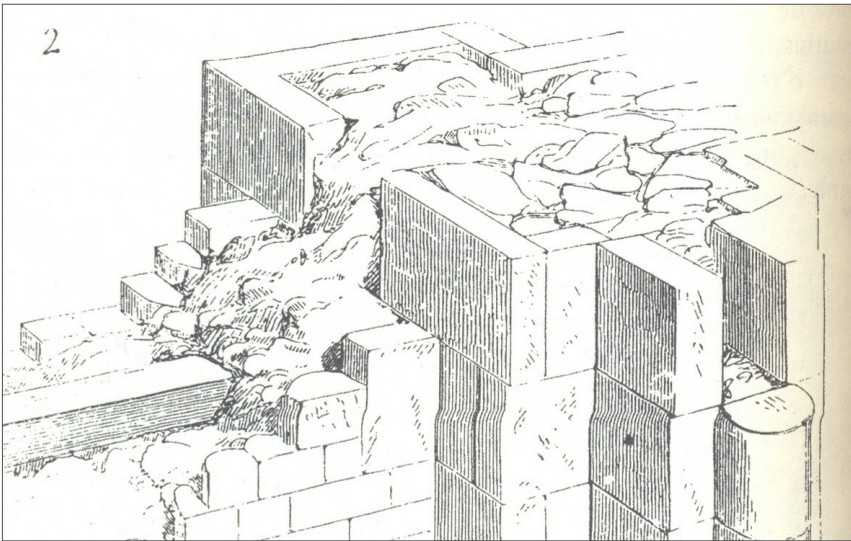
5.1.31
Iglesia de San Agustín (actual Archivo Histórico Municipal). s. XVI-XVII.
Archivo fotográfico del autor.

¹⁴ *Ibidem*.

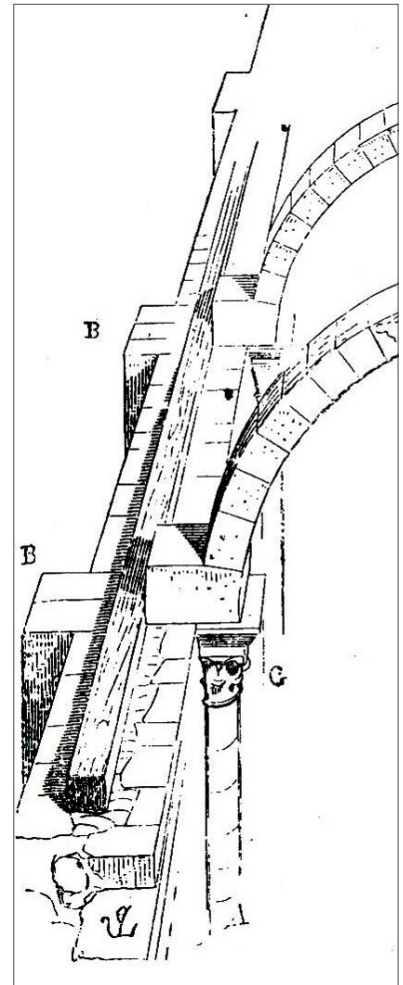
¹⁵ *Ibidem*.

¹⁶ Castro Villalba, Antonio (1999). Historia de la construcción arquitectónica. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona

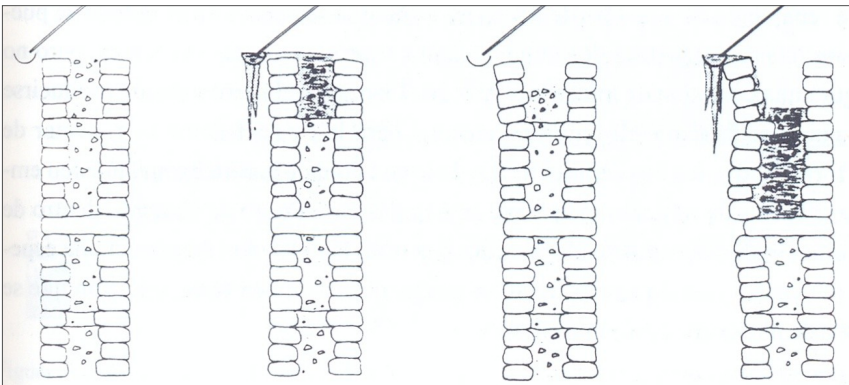
¹⁷ Viollet-le-Duc, Eugène Emmanuel (1996). La construcción medieval. Ed. a cargo de Enrique Rabasa Díaz y Santiago Huerta Fernández. Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid



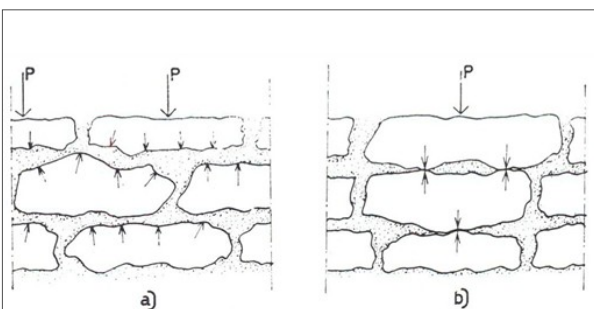
5.1.32



5.1.34



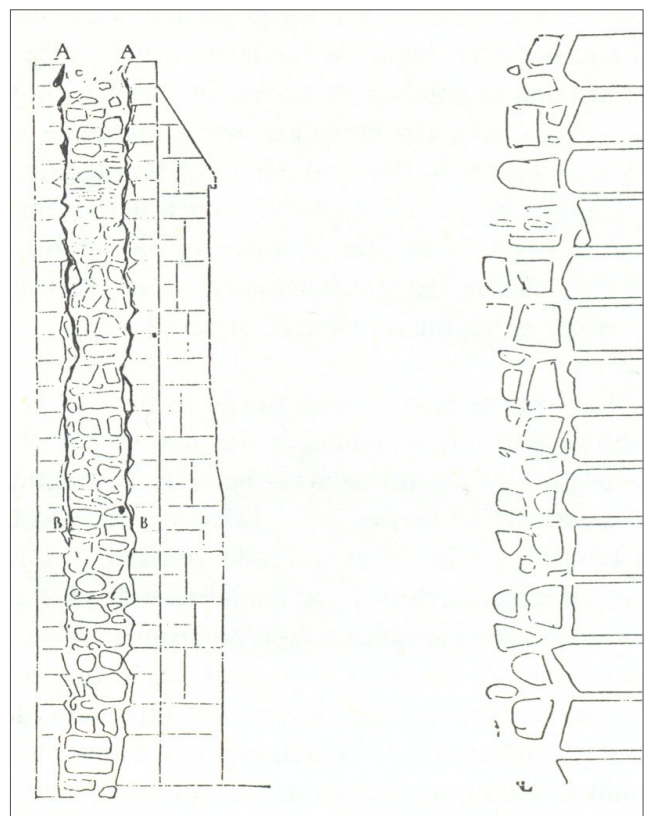
5.1.33



5.1.35



5.1.36



5.1.37

tenían cuidado de colocar las piedras de peor calidad en las condiciones menos favorables y realizaban techumbres voladas que protegían la piedra ubicada en dichas situaciones de las agresiones de la humedad y los efectos de las heladas (*figura 5.1.33*). Por último, empezaron a desarrollar arcos y bóvedas que descansaban en vigas de reparto y machones y contrafuertes interiores y exteriores.¹⁸

A pesar de las innovaciones aportadas, estos muros presentaban problemas de ligazón y asientos desiguales, apareciendo desgarros en las construcciones, y no fue hasta la llegada de las fábricas góticas de a partir del siglo XII cuando se consiguió un funcionamiento más efectivo y un modo de construir más homogéneo y resistente.

- Más adelante, y ante la necesidad de construir edificios más amplios y altos, se empezó a aligerar la sección de los muros evolucionando el sistema de grandes estructuras resistentes basadas en arcos y bóvedas de grandes dimensiones. La estabilidad del conjunto se conseguía mediante una **combinación de equilibrios** basada en el estudio de la geometría general y ya no se debe a la forma de los pequeños elementos componentes (*figura 5.1.34*). Se renunció al empleo de aparejos de sillares de gran tamaño (salvo en edificios excepcionales), y comenzaron a aparejar los muros con sillares pequeños y de un tamaño normalizado frente a la individualización.¹⁹

■ JUNTAS

Pese a no tener conocimientos teóricos sobre la resistencia de los materiales, a partir del siglo XIII se empezaron a incorporar modificaciones al muro, que introdujeron ventajas en la composición general del muro y la distribución de cargas entre los mampuestos o sillares.

Se utilizaban gruesas **juntas de mortero** de cal (de 1 a 2 cm), con el fin de que los lechos establecieran un enlace entre el macizo interior y los paramentos. Esta es la clave para garantizar el trabajo solidario del relleno y las hojas exteriores. De este modo las caras exteriores experimentan un asiento equivalente al del relleno interior (*figuras 5.1.35, 5.1.36, 5.1.37*). En muros de hasta 1 metro de espesor se introducían además perpiaños de cosido, lo cual era una práctica eficaz de incrementar la cohesión. Cuando el espesor aumentaba esto no era posible, al no existir bloques con el largo suficiente para actuar de perpiaños. En estos casos el muro exterior tendía a separarse del núcleo ante deformaciones térmicas, vibraciones y esfuerzos, provocando la aparición de fisuras en el muro. Por ello, la adecuada ejecución del muro y de las juntas, así como el tiempo de

5.1.32
Fábrica románica tipo. Este tipo de fábrica aparece en las grandes construcciones monásticas de Cluny. s. XI y XII.
E. Viollet-le-Duc (1996)

5.1.33
Separación de las caras exteriores de un muro de fábrica.
Beckmann (1985)

5.1.34
Bóveda de cañón y fábrica románica.
E. Viollet-le-Duc (1996)

5.1.35
Función estática del mortero en la transmisión de las cargas entre las piezas de un muro.
Achille Petrucci (1979)

5.1.36
Iglesia de San Agustín (actual Archivo Histórico Municipal). Detalle de las juntas. s. XVI-XVII.
Archivo fotográfico del autor

5.1.37
A la izquierda, agrietamiento de un muro de sillería y relleno. A la derecha, se evita el agrietamiento mediante gruesas juntas que permiten el trabajo conjunto del núcleo y el paramento exterior.
E. Viollet-le-Duc (1996)

¹⁸ Heyman, Jazques (1999). El esqueleto de piedra: mecánica de la arquitectura de fábrica. Tr. a cargo de Gema M. López Manzanares. Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid

¹⁹ Viollet-le-Duc, Eugène Emmanuel (1996). La construcción medieval. cit.

secado del mortero eran indispensables para su correcto funcionamiento.²⁰

5.1.6 CONCLUSIONES PARCIALES

- La tipología de muro compuesto se ha empleado a lo largo de muchos siglos con el fin de agilizar y abaratar la construcción. Por ello, construían muros compuestos por varias hojas en los que sólo era necesario trabajar las hojas exteriores de piedra, ya que la hoja interior consistía generalmente en un relleno de mampuestos o ripios y mortero.
- Los primeros aparejos regulares se pudieron llevar a cabo gracias a la aparición de las herramientas de hierro a partir del s. VII, que permitían trabajar la piedra con mayor facilidad.
- El muro griego o *emplecton* se convirtió, por otro lado, en la primera tipología desarrollada de muro compuesto trabado, ya que los anteriores muros egipcios no presentaban ningún tipo de trabazón.
- Los muros desarrollados en Roma mediante el sistema del “*opus emplectum*” supusieron un sistema muy desarrollado en el que la piedra empezó a tener funciones de acabado y no estructural. Sin embargo, este sistema se consiguió gracias a la utilización del hormigón romano, que al no seguir utilizándose en civilizaciones posteriores, no pudo tener un desarrollo posterior hasta la aparición del hormigón moderno. En cualquier caso se puede considerar este sistema como el antecesor a los muros mixtos de hormigón y piedra que aparecieron en el s. XIX.
- Durante el periodo egipcio, y especialmente durante el griego y el romano, al trabajar con sillares de grandes dimensiones, se hizo necesaria la utilización de llaves o grapas de unión entre sillares para conseguir una mayor estabilidad del muro.
- Conforme evolucionaban los conocimientos acerca del material y de la distribución de cargas entre las piezas el muro fue disminuyendo progresivamente de grosor y las piezas se redujeron de tamaño. A partir del siglo XII, la estabilidad del conjunto se conseguía mediante una combinación de equilibrios basada en el estudio de la estructura general y no de las piezas componentes. Más adelante, la incorporación de juntas de mortero entre los sillares proporcionaba un trabajo conjunto del núcleo con las hojas exteriores, permitiendo un mayor adelgazamiento del muro.

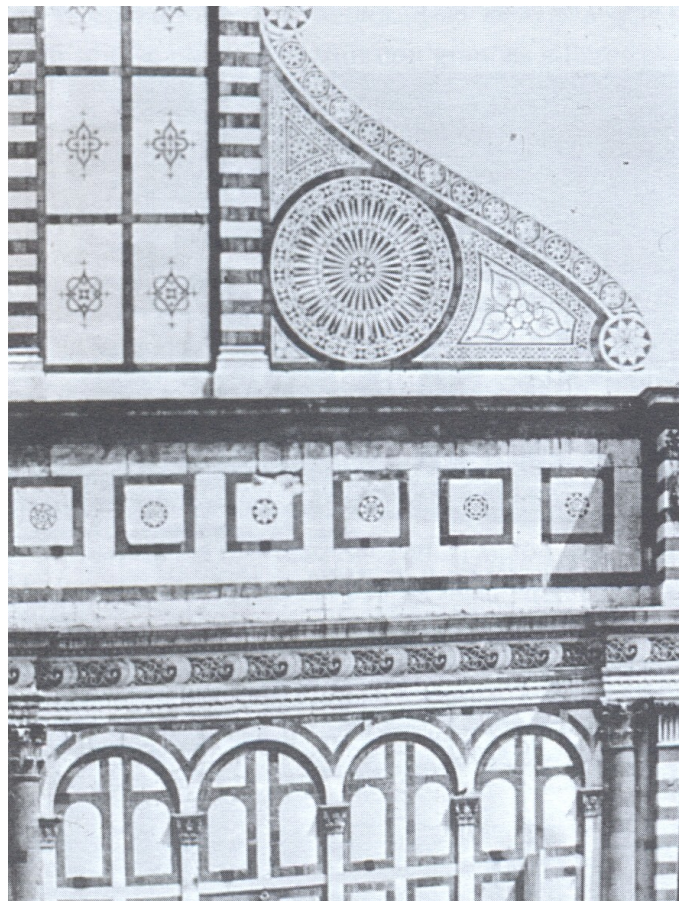
²⁰ *Ibíd.*



5.2.1



5.2.2



5.2.3

5.2 MURO MIXTO

5.2.1 MURO RENACENTISTA

Con la llegada del Renacimiento se buscaron influencias en los muros romanos revestidos. La concepción del muro dejó de ser una fábrica que resolviera problemas estructurales y pasó a ser un muro cada vez menos estructural y entendido como un elemento destinado a ser revestido.

■ SISTEMA CONSTRUCTIVO

Desde este momento empezó a desarrollarse la albañilería, y aunque todavía se realizaban algunos muros con núcleos de mampuestos lo común pasó a ser la construcción de un muro más económico y sencillo de ladrillo que posteriormente era revestido con piezas de piedra, de mayor o menor grosor según la época y el lugar. Los sistemas más ligeros consistían en prever en la hoja interior las formas necesarias para la posterior colocación de las piezas de revestimiento. Quizás los primeros ejemplos significativos de este sistema pueden encontrarse en numerosas iglesias construidas en Florencia entre los siglos XVIII y XV (*figuras 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3*). No obstante, en muchos edificios monumentales se utilizaba un sistema más pesado en el que se usaban sillares que actuaban como encofrados perdidos (*figura 5.2.4*).¹

En la construcción renacentista la estructura ocupa un segundo plano, al servicio siempre de los valores compositivos. Ante la gran demanda de construcción de edificios el núcleo de los muros pasó a ser secundario frente a un rico y cuidado revestimiento. Se sustituyó el núcleo de piedra por albañilería, debido tanto a razones técnicas como económicas. La utilización de la albañilería permitía que los elementos se compusieran in-situ, así como una menor preparación, tanto de medios auxiliares como de mano de obra, y es más ligera.²

La resistencia y estabilidad de estos muros se conseguía mediante el progresivo adelgazamiento del mismo en altura. Al no existir todavía conocimientos científicos sobre la resistencia de los materiales, la calidad de los morteros realizados y los adecuados tiempos de espera del fraguado eran indispensables para conseguir la calidad necesaria. Hasta finales del s.XVIII no se tenían conocimientos químicos sobre la resistencia de los morteros, por lo que se aconsejaba levantar el muro por tongadas horizontales para conseguir un reparto uniforme y progresivo de las cargas.³

5.2.1
Fachada con muro mixto en la iglesia de Santa María del Fiori, Florencia. S. XIII-XV.
Archivo fotográfico del autor

5.2.2
Fachada con muro mixto en la iglesia de la Santa Croce, Florencia. S. XIV.
Archivo fotográfico del autor

5.2.3
Despiece del muro mixto de mármol en Santa María Novella, Florencia. S. XV.
Antonio Castro Villalba (1999)

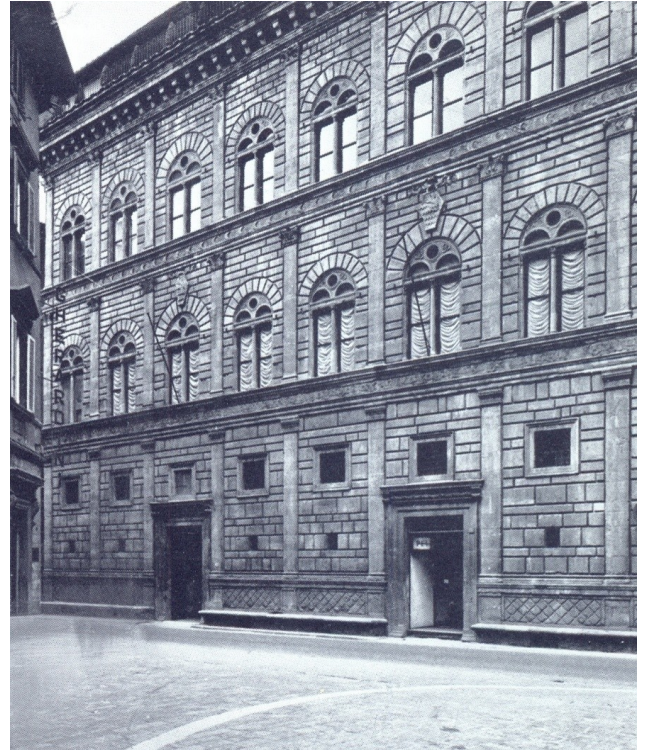
¹ Castro Villalba, Antonio (1999). Historia de la construcción arquitectónica. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona

² *Ibidem.*

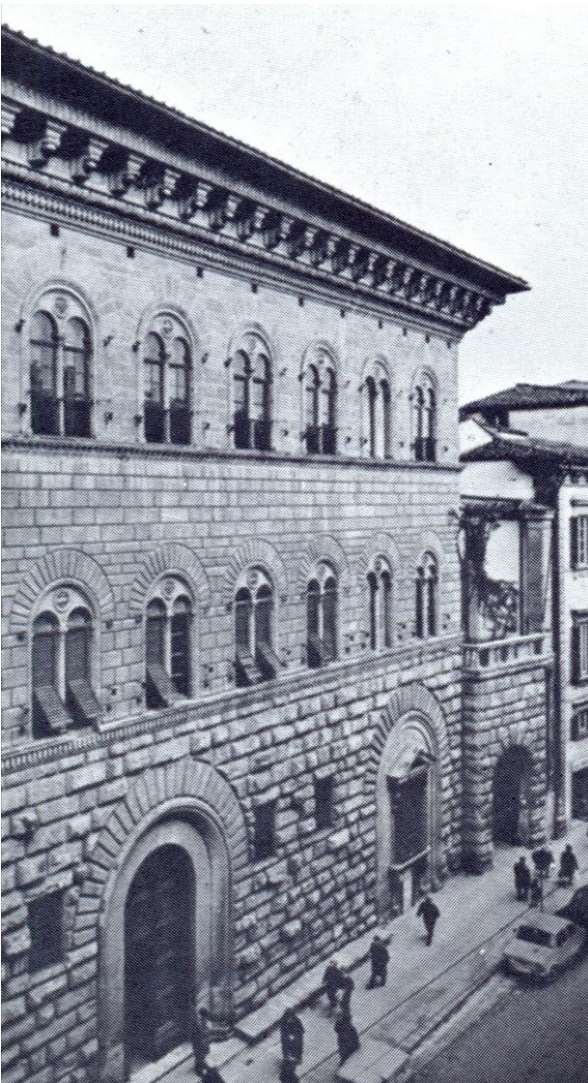
³ *Ibidem.*



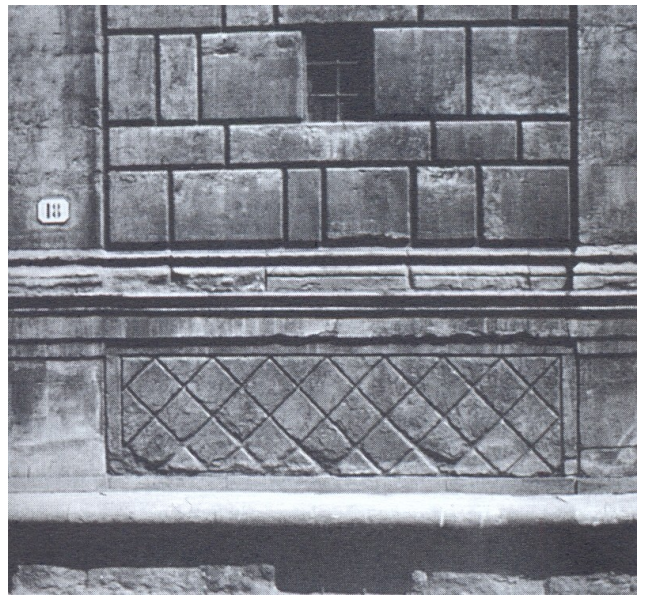
5.2.4



5.2.6



5.2.5



5.2.7



5.2.8

■ APAREJOS

Como consecuencia de la independencia entre el elemento resistente y el aplacado, éste evoluciona hasta la desaparición de los despieces que reflejan las leyes de la traba propias de los aparejos resistentes, y adquiere un lenguaje expresivo propio, más de acuerdo con una intención representativa, simbólica y compositiva (*figuras 5.2.5, 5.2.6, 5.2.7, 5.2.8*).

Este sistema se puede entender como una evolución del *opus mixtum* romano en el que se sustituyen los recursos constructivos para el aprovechamiento de los materiales por otros de lenguaje claramente compositivo y ornamental.

En cualquier caso, existe ya una clara diferencia entre lo que trabaja como muro resistente y lo que empieza a considerarse acabado. Tanto en el caso del ladrillo como del hormigón, todos estos sistemas basados en un muro que se reviste a base de piezas de piedra se pueden considerar como el origen de los chapados de piedra que aparecerán posteriormente con la llegada de la modernidad.

5.2.2 LA FACHADA EN LOS SIGLOS XVIII Y XIX

5.2.4
Muro mixto utilizado en la Iglesia de San Agustín (actual Archivo Histórico Municipal). S. XVI-XVII.
Archivo fotográfico del autor

5.2.5
Fachada Palacio de los Medici, Florencia. S. XIV.
Peter Murray (1989)

5.2.6
Fachada Palacio Rucellai, Florencia. S. XV.
Peter Murray (1989)

5.2.7
Detalle del revestimiento del zócalo del Palacio Rucellai, Florencia. S. XV.
Antonio Castro Villalba (1999)

5.2.8
Fachada palacio de Carlos V, Granada. S. XV.
Archivo fotográfico del autor

5.2.2-1 CONTEXTO

■ LA INDUSTRIALIZACIÓN

Durante los siglos XVII y principios del s. XVIII, la economía aún era principalmente agraria y la supervivencia dependía de que hubiera buenas o malas cosechas. La industria más extendida era la artesanal y de carácter familiar o gremial, y desde el punto de vista de la tecnología todavía había escasas máquinas, por lo que la producción era meramente manual.

Sin embargo, a partir de mediados del s. XVIII empezaron a sucederse una serie de cambios sociales y económicos que derivaron en la transición de una sociedad agrícola y tradicional a una sociedad moderna e industrial y supusieron lo que se consideró como una auténtica revolución denominada **revolución industrial**.

El primer historiador que analizó este fenómeno fue Arnold Toynbee, en unas conferencias impartidas en la Universidad de Oxford, en 1880. Señaló el año **1760** como punto de partida de este proceso. Aunque no todos los historiadores se han puesto de acuerdo con esa fecha, todos coinciden en señalar que a partir de mediados del s. XVIII ocurrieron importantes cambios de profundas consecuencias en la vida económica inglesa que representaron el cambio de una sociedad agrícola a una sociedad industrial. La revolución industrial se inició en Inglaterra en primer lugar aunque posteriormente también se produjo este proceso

⁴ Dean, Phyllis (1977). La primera revolución industrial. Península, Barcelona, 4ª edición.

en distintos países europeos y americanos.⁴

La revolución industrial se ha dividido históricamente en dos etapas:

□ PRIMERA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL (1765-1884)

Comenzó con una serie de cuestiones que fueron determinantes, y que tuvieron importantísimas consecuencias que afectaron a todos los ámbitos de la vida, tanto económicos, como políticos y productivos:

- Un gran **crecimiento demográfico**, caracterizado por una alta natalidad y una mortalidad más baja, motivado por la mejora en la vida diaria.⁵
- La **revolución agrícola** motivada por la adopción de nuevas técnicas de producción, así como la nueva actitud de los propietarios.⁶
- Profundas transformaciones en los **transportes**, tanto por tierra como por agua, mejorando en gran medida las comunicaciones. El ferrocarril se convirtió en el medio de transporte por excelencia.⁷
- Gran **desarrollo tecnológico**, que fue un factor determinante en este proceso, y dio lugar a la mecanización de la industria.

Tanto el desarrollo que se produjo en la industria textil, con ingenios entre los que destacaron la máquina *spinning-jenny*⁸ o la *water frame*⁹, como en la industria de la siderurgia, con la introducción de la máquina de vapor⁷, que provocó la sustitución de la madera por el carbón en la industria del hierro, supusieron un cambio radical en los procesos de producción.

Estas innovaciones estimularon la aparición de otras como el martillo a vapor de John Wilkinson, que podía dar 150 golpes por minuto, o la laminadora a vapor de Cort, que podía elaborar quince toneladas de hierro en el mismo tiempo que antes se necesitaba para fabricar una sola.¹⁰

□ SEGUNDA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL (1885-1960)

En el último tercio del s. XIX se produjo un desarrollo capitalista que derivó en la 2ª revolución industrial, liderada en este caso por Alemania y EEUU, y con una clara fundamentación en el desarrollo científico del s. XIX. Surgieron nuevas organizaciones empresariales, nuevas fuentes energéticas (electricidad, petróleo), y nuevos sistemas de financiación. En esta etapa se produjeron una serie de avances fundamentados en aspectos como la invención del motor de explosión en 1891, que dio lugar a la aparición de los primeros automóviles, la utilización de nuevos metales (aluminio) y del hormigón estructural y la utilización de nuevas fuentes de energía (el petróleo y la electricidad).¹¹

⁵ Ayala Carcedo, Francisco Javier (2001). Historia de la tecnología en España.1. Valatenea, Barcelona. pág. 14.

⁶ *Ibidem*. págs. 14-16.

⁷ *Ibidem*. págs. 16-17

⁸ La máquina *spining-jenny*, construida por James Hargreaves en 1764, fue la primera innovación de importancia en la industria algodonera. Reproducía mecánicamente los movimientos del hilador, pero podía trabajar con varios husos y tenía el efecto de multiplicar la cantidad de hilo que podía producir un solo operario.

Landes, David S. (1979). Progreso tecnológico y revolución industrial. Tr. Francisca Antolín Vargas, Tecnos D. L., Madrid.

⁹ La máquina *water frame*, presentada por Richard Arkwright en 1769, se accionaba mediante una rueda hidráulica. Conseguía producir un hilo de mejor calidad pero no podía ser movida por un solo hombre y era muy costosa. Unos años más tarde, Crompton inventó la *mule-jenny*, que combinaba las ventajas de la *spinning-jenny* y la *water frame*. *Ibidem*.

¹⁰ La más famosa fue la de James Watt, presentada en 1769, que permitía convertir la fuerza rectilínea en vapor circular. *Ibidem*.

¹¹ Ayala Carcedo, Francisco Javier (2001). Historia de la tecnología en España.1. Valatenea, Barcelona. págs. 17-18.

A partir de estas innovaciones se puso en marcha un proceso de mecanización de todas las etapas de la producción que se tradujeron en el cambio de artesanos a obreros y en la aparición de un nuevo espacio económico y laboral, la fábrica. Antes de la primera revolución industrial, las fuentes de energía básicas eran la humana y la animal. Gracias a los cambios introducidos en la industria surgió una nueva etapa, la era de la máquina, gracias a la cual se podían producir nuevos materiales de una manera mecanizada y rápida, así como modificar el proceso de producción de otros materiales tradicionales.

■ LA CONSTRUCCIÓN EN LOS SIGLOS XVIII Y XIX

□ NUEVAS CONSTRUCCIONES

Todos estos cambios y avances, derivados de la revolución industrial, impulsaron la realización de **nuevas construcciones** con unas tipologías y requerimientos específicos y nuevos.

- Las voluminosas máquinas, de gran peso y coste, debían alojarse en nuevas **fábricas** situadas en zonas de fácil acceso a las materias primas, los transportes y las fuentes de energía.¹²
- Con el aumento de la población y las migraciones se produjo un gran incremento en las construcciones de **viviendas**.¹³
- Se necesitaban nuevas tipologías de **equipamientos** en edificios mayores.¹⁴

□ NUEVOS MATERIALES

Los nuevos conocimientos científicos permitieron utilizar los distintos materiales al máximo de sus posibilidades, en función de los datos sobre resistencias y comportamiento que empezaron a obtener (*figura 5.2.9*). La investigación científica influyó en las técnicas de construcción, modificando los instrumentos de proyectar. Las dos principales modificaciones tuvieron su origen en Francia: la invención de la **geometría descriptiva** por Gaspard Monge y el **sistema métrico decimal**.¹⁵

• HIERRO

El hierro se convirtió en el material por excelencia para fabricar de una manera rápida las estructuras industriales de las numerosas fábricas que empezaron a construirse. El arquitecto y teórico Viollet-le Duc afirmó que la clave del progreso consistía en llegar a un acuerdo con los materiales industriales. El hierro se convirtió en “el material del futuro”, un material que permitía una construcción diferente y rápida.¹⁶

A pesar de su rápida difusión, para muchos la incorporación del hierro planteaba un serio problema estético. El arquitecto alemán Ludwig Bohn Stedt puso en duda que el uso del hierro desembocara en un nuevo estilo:

“Nuestras leyes tradicionales del estilo tienen sus raíces puestas precisamente en nuestra experiencia con un material sólido, la piedra, y han sido enunciadas para armonizar con él.”¹⁷

¹² Benévolo, Leonardo (1980). Historia de la arquitectura moderna. Gustavo Gili, Barcelona, 4ª edición.

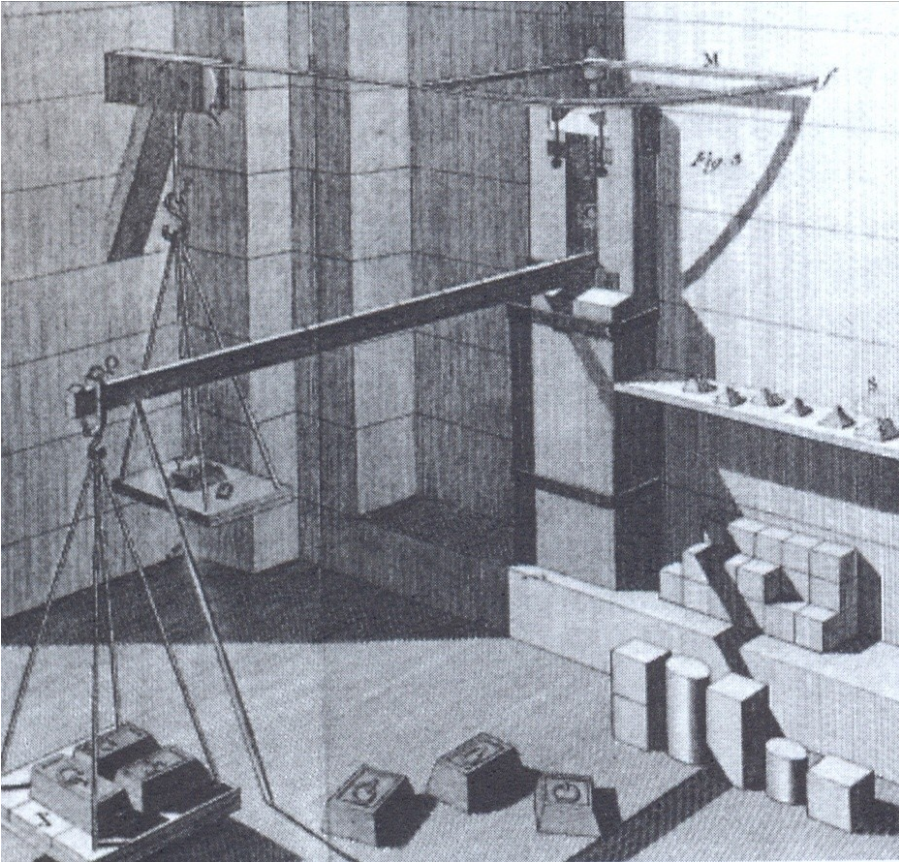
¹³ *Ibidem*.

¹⁴ *Ibidem*.

¹⁵ *Ibidem*. págs. 36-39.

¹⁶ Weston, Richard (2011). 100 ideas que cambiaron la arquitectura. Blume, Barcelona. pág. 90.

¹⁷ *Ibidem*.



5.2.9



5.2.10

La producción de hierro a gran escala comenzó en Inglaterra a principios del s. XVIII, aunque empezó a introducirse en como material de construcción a partir de la década de 1770. El proceso de pudelación para producir hierro forjado se inventó en 1784, llegándose a producir hasta 1 tonelada de este hierro al día.¹⁸

Pronto se introdujeron las técnicas de laminación que más tarde se aplicaron a la producción de acero. En 1855 el inglés sir Henry Bessemer patentó la idea, simple pero revolucionaria, de purificar bloques de hierro fundido inyectándoles aire. La primera estructura de acero apareció en 1891 en el Ludington Building de William Le Baron Jeney.¹⁹

Gracias a esta evolución el s. XVIII se caracterizó por el desarrollo de una nueva arquitectura con estructuras de hierro laminado y acero. Una construcción que representaba ser más limpia y lógica y se demostró en la construcción de numerosos invernaderos, vestíbulos y mercados.

- HORMIGÓN

El cemento Portland se patentó en 1824. En la década de 1890 se inventó el hormigón armado. Aunque no existe un único claro inventor, fue François Hennebique el que sentó las bases. Este material, que presentaba un comportamiento ante el fuego muy superior al acero, le sustituyó rápidamente y comenzó a utilizarse de manera generalizada para ejecutar las estructuras.²⁰

- LADRILLO

La construcción con piezas de ladrillo no es algo reciente, sino que se remonta a los orígenes de la civilización. Ya se vio como su uso se convirtió en generalizado en Roma, para desarrollar numerosos aparejos, como el *opus mixtum*, que combinaba ladrillo y piedra junto con el núcleo de hormigón hidráulico romano.

Sin embargo, fue a partir de mediados del s. XIX cuando aparecieron nuevos métodos de fabricación que permitían tanto una producción a gran escala, así como a la elaboración de múltiples formas y tamaños.²¹

La fabricación de ladrillo pasó de realizarse de manera artesanal en talleres o al aire libre a hacerlo industrialmente en fábricas destinadas a ello, mediante hornos que agilizaban el proceso y presentaba grandes ventajas.²²

5.2.9
Máquina para ensayos a compresión de piedras utilizadas durante la construcción de Santa Genoveva.
Antonio Castro Villalba (1999)

5.2.10
Palacio Real, Madrid. Años 1738-1755
Archivo fotográfico del autor.

5.2.2-2 LA CONSTRUCCIÓN EN PIEDRA

■ SISTEMA CONSTRUCTIVO

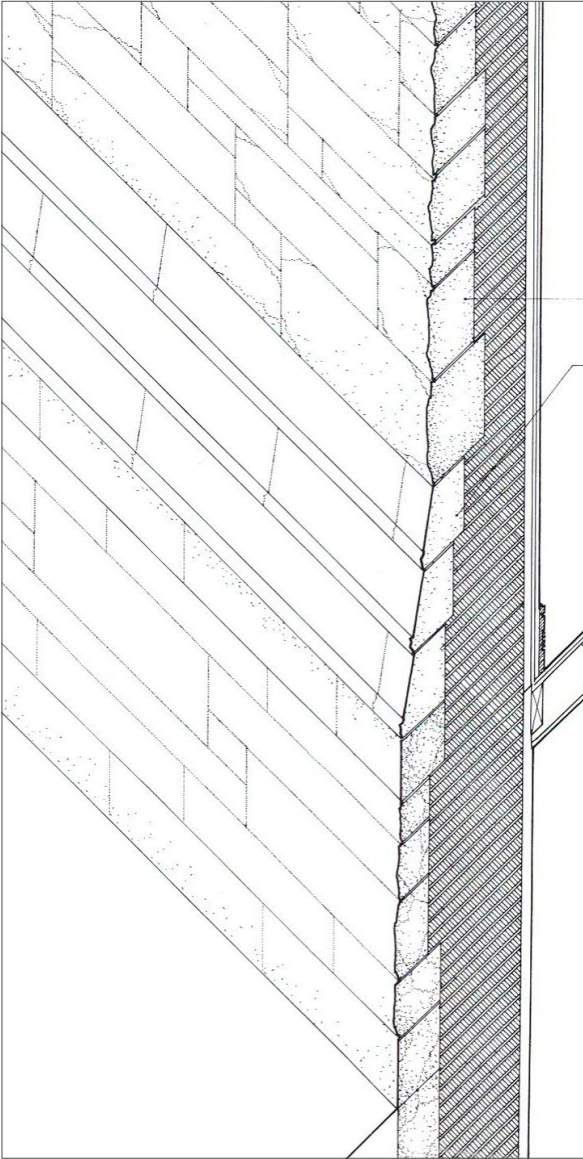
¹⁸ Landes, David S. (1979). Progreso tecnológico y revolución industrial. cit.

¹⁹ *Ibidem*.

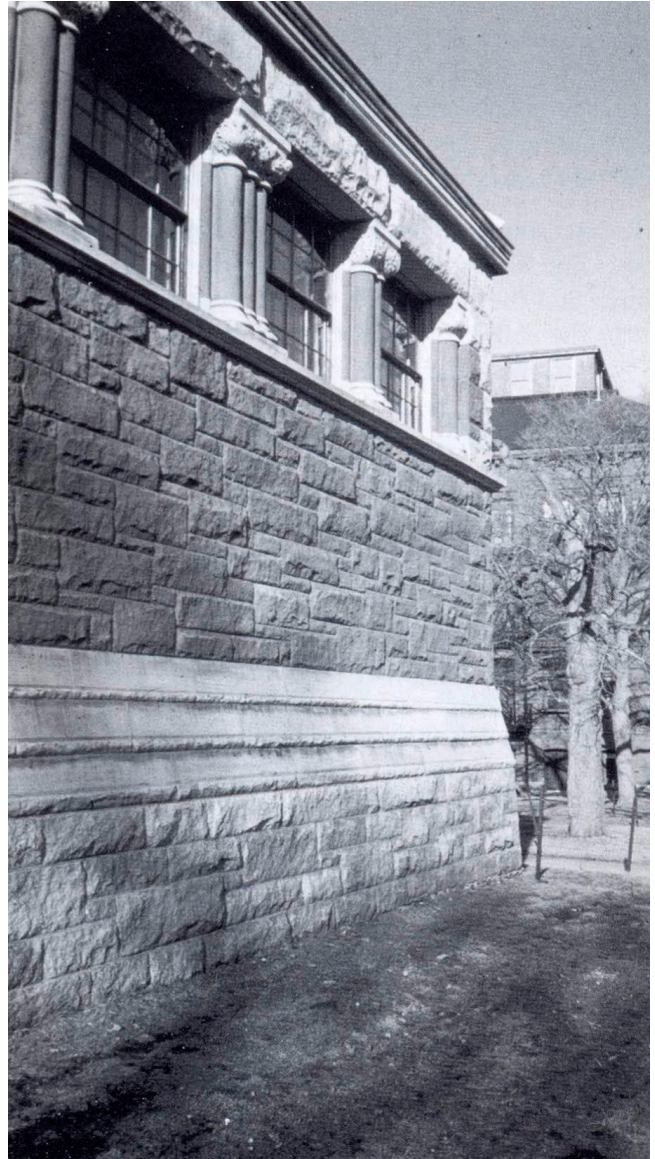
²⁰ Weston, Richard (2011). 100 ideas que cambiaron la arquitectura. cit pág. 107.

²¹ Rodríguez Esteban, María Ascensión. (2012). La arquitectura de ladrillo y su construcción en la ciudad de Zamora (1888-1931). Tesis doctoral. pág. 35.

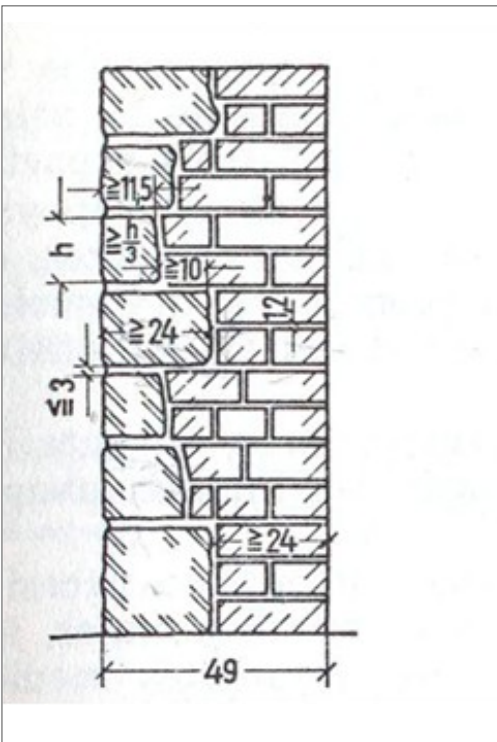
²² *Ibidem*.



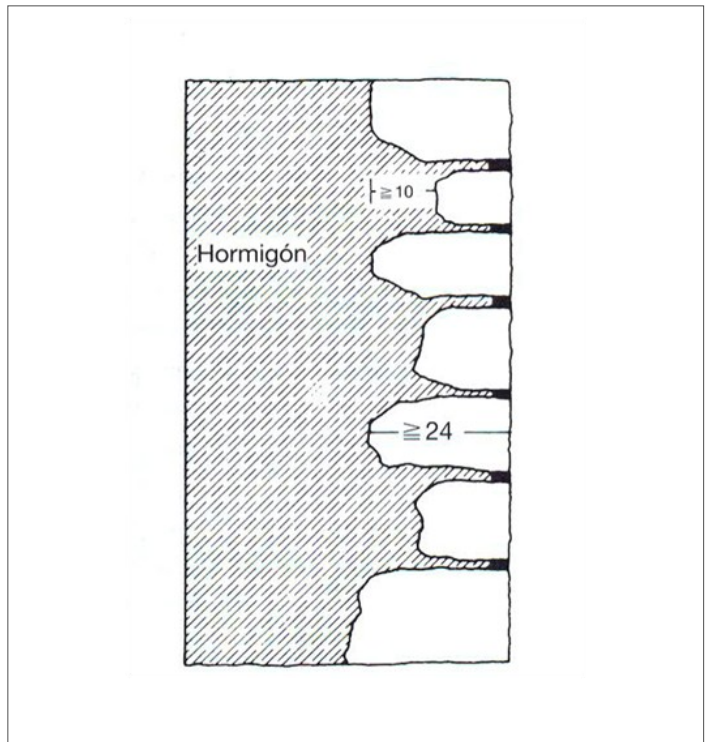
5.2.11



5.2.12



5.2.13



5.2.14

En cuanto a la construcción en piedra, durante todo el s. XVIII y casi hasta finales del s. XIX, se produjo un perfeccionamiento de la construcción en sillería, especialmente en Francia, y posteriormente en el resto de Europa, motivado por las numerosas construcciones de puentes que se realizaron con el desarrollo de las vías de comunicación.²³

Hasta finales del s. XIX existió una constante preferencia por el neoclasicismo y un espíritu de conservación y respeto hacia las tradiciones murarias (*figura 5.2.10*).

La piedra se trabajaba más racionalmente, y los progresos de la técnica se aprovecharon durante esta época para poner en práctica de modo más conveniente el material, pero no para modificar la técnica constructiva, puesto que se seguían realizando muros mixtos a base de piedra y hormigón y, en la mayoría de los casos de piedra y ladrillo (*figuras 5.2.11, 5.2.12*).

- Fábrica interior de hormigón

Cuando la fábrica interior es de hormigón el muro se realizaba conjuntamente. Las piedras de revestimiento se colocaban sobre una junta de 3cm de espesor y el hormigón se vertía hasta la altura de cada hilada, para que éste entrara en cada junta entre las piedras (*figura 5.2.13*).²⁴

- Fábrica interior de ladrillo

La construcción del muro se realizaba de una manera mucho más técnica, siguiendo una serie de indicaciones como que los tizones debían de ser de al menos un asta y penetrar 10cm. al menos, para que la trabazón funcionase adecuadamente. Las placas de paramento medían unos 11,5cm de grueso y la altura de hilada del revestimiento debía ser múltiplo de la hilada del ladrillo, teniendo siempre en cuenta el grosor de la junta (*figura 5.2.14*).²⁵

- **LLAVES**

En las últimas décadas del siglo XIX también se utilizó la práctica de ejecutar unas **muescas** en las piedras para asegurarse de que el mortero llenaba completamente el espacio que se formaba entre las mismas.²⁶

Aunque no era común, también se han encontrado referencias del año 1900 en las que los sillares de piedra no se trababan con la hoja de ladrillo, sino que la conexión se realizaba mediante la acción conjunta de una capa de **mortero y anclajes** que colaboraban en la estabilidad de los sillares y facilitaban la puesta

5.2.11, 5.2.12

Austin Hall, H.H. Richardson, 1884. El espesor del muro se va reduciendo en altura, al estilo de los renacentistas. La altura de las piezas de piedra también se reduce con la altura por razones compositivas, creando una sensación de mayor altura. Durante esta época todavía es común ver fachadas con elementos muy ornamentales.
Edward R. Ford (2003)

5.2.13

Muro de fábrica mixta con mampostería y trasdosado interior de ladrillo. Ambos colaboran estáticamente.
Friedrich Neumann (1967)

5.2.14

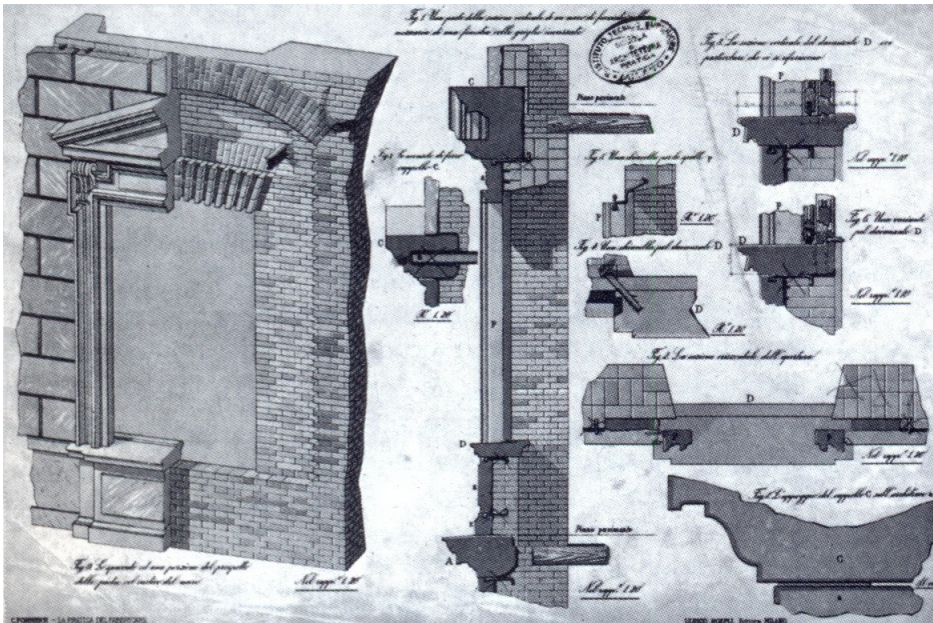
Muro de fábrica mixta con trasdosado interior de hormigón.
Heinrich Schmitt (2002)

²³ Benévolo, Leonardo (1980). Historia de la arquitectura moderna. Gustavo Gili, Barcelona, 4ª edición. págs. 35-70.

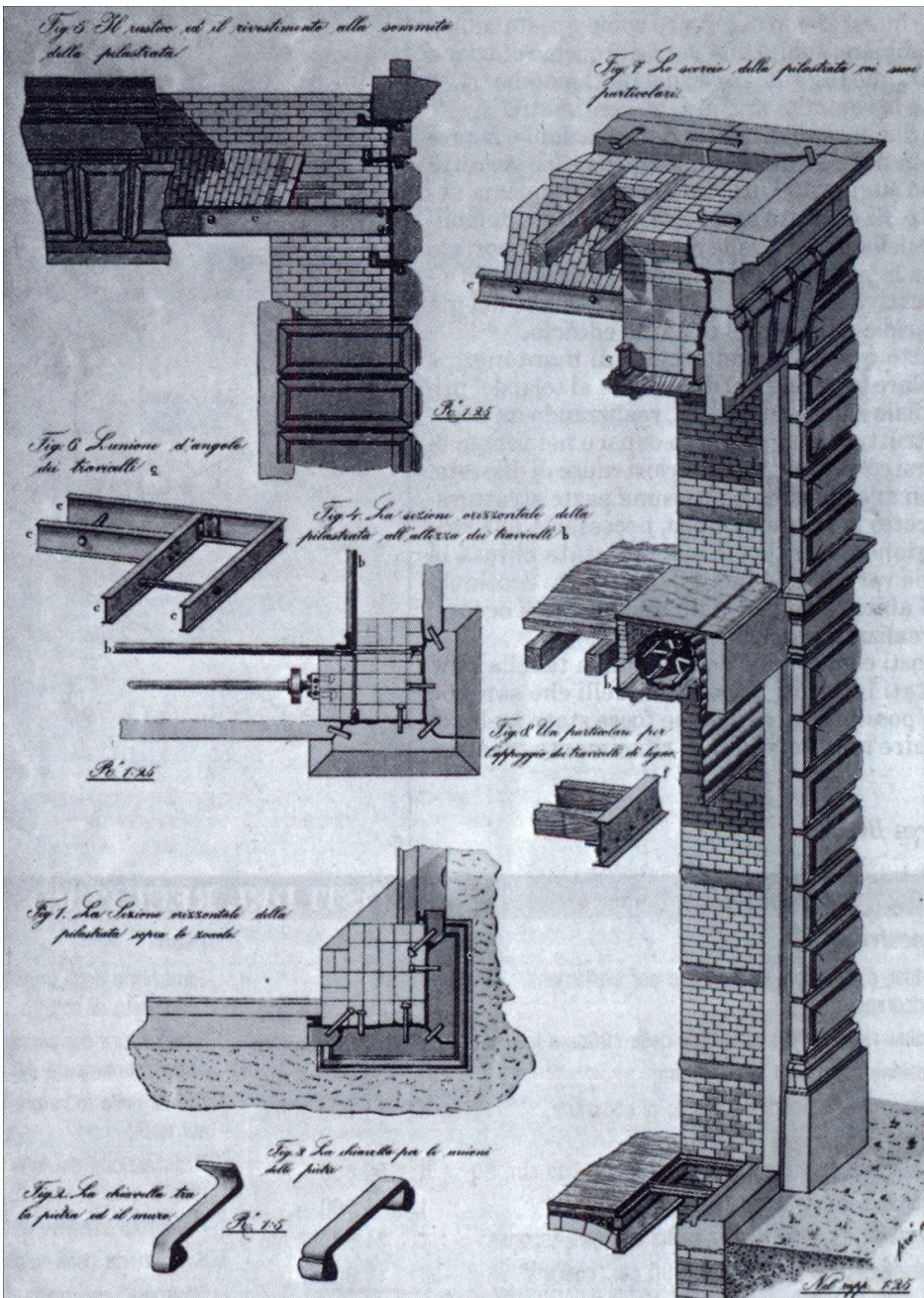
²⁴ Heinrich Schmitt (2002). Tratado de construcción. Gustavo Gili, Barcelona, 7ª edición.

²⁵ Neumann, Friedrich (1967). Tratado de edificación. Gustavo Gili, Barcelona.

²⁶ David Dernie (2003). Arquitectura en piedra. Blume, Barcelona.



5.2.15



5.2.16

en obra (*figura 5.2.15, 5.2.16*).²⁷

La primera referencia de este tipo de anclajes se podría atribuir a G.Breyman, que ya describía de modo detallado en el tratado “Construcción de piedra”, de **1885**, los sistemas de conexión. Recomendaba utilizar grapas para evitar los movimientos y el vuelco de los sillares. Breyman describía como el más adecuado un soporte simple y plano con la cabeza vuelta hacia arriba.²⁸

Estos ejemplos son muy significativos con respecto a los sistemas que se empezarían a desarrollar pocos años después, al entenderse como las primeras grapas en forma de uña que retenían las piezas de piedra, asegurándolas y permitiendo una unión más seguro con la hoja interior.

5.2.3 CONCLUSIONES PARCIALES

- El periodo del Renacimiento supo aunar los conocimientos heredados de la configuración de los muros góticos y la técnica y estética de los sistemas de aplacados romanos. Esto dio lugar al desarrollo de un muro de albañilería que posteriormente era revestido con piezas de piedra. Este sistema se puede considerar antecedente de los chapados modernos.
- La utilización de la piedra entendida como material de acabado independiente de la estructura dio lugar a la aparición del diseño de la fachada desde principios compositivos e independientes de la imagen de aparejos tradicionales.
- La revolución industrial fue un hecho de gran importancia en el desarrollo de las fachadas de piedra. La necesidad de construir nuevas tipologías de edificaciones, que debían ser más lógicas, limpias y económicas, unido al gusto que aún se mantenía por la utilización de la piedra, motivaron la búsqueda y el desarrollo de nuevas tipologías de muro. El aprovechamiento del hormigón y el ladrillo, materiales más baratos, permitió evolucionar el concepto del muro renacentista de muro mixto.
- En estos muros mixtos la piedra ha ido perdiendo progresivamente su función estructural y su grosor. Así, a finales del s. XIX se desarrollaron los primeros casos en los que los sillares se sujetaban con la acción conjunta de una capa de mortero en el trasdós de las piezas y una serie de grapas metálicas que retenían las piezas en su cara superior.

5.2.15, 5.2.16
Muro mixto a base de una fábrica interior de ladrillo y una hoja exterior de sillares. Éstos se aseguraban mediante llaves.
C. Formeti (1900)

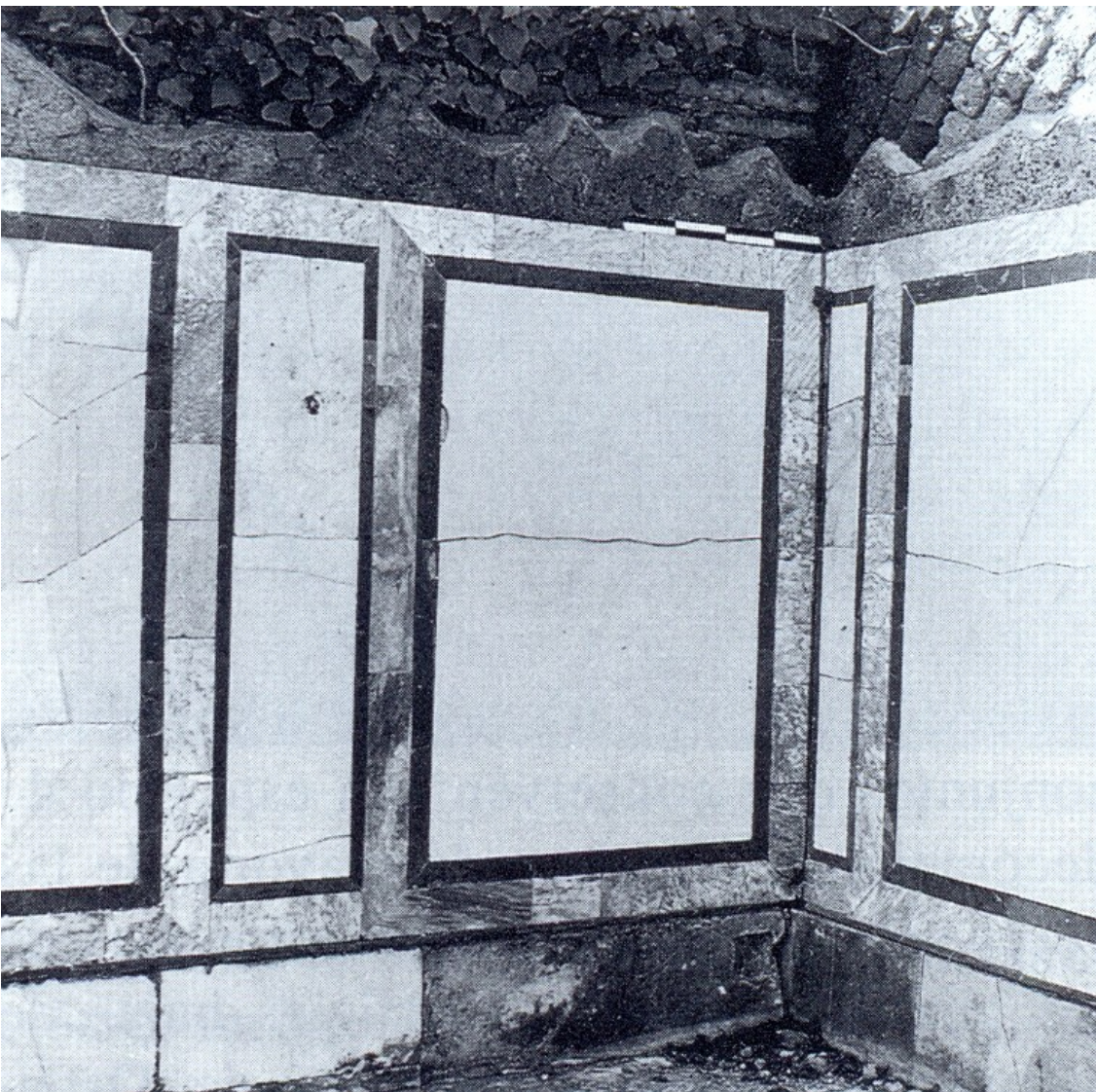
La utilización de estas grapas de retención constituyen una referencia directa a los chapados con varillas o anclajes de retención y trasdós relleno de mortero.

²⁷ Di Silvo, Michele (1993). *Facciate di pietra. Il marmo nell'architettura contemporanea: tecnologia dei paramenti esterni tra innovazione e tradizione*. Alinea, Firenze.

²⁸ *Ibidem*.



5.3.1



5.3.2

5.3 MURO CHAPADO

5.3.1 ANTECEDENTES. PRIMEROS CHAPADOS ROMANOS

A raíz de la aparición de la cantera de Carrara, puesta en explotación durante la época de Julio César en el s. I a.C, y funcionando a pleno rendimiento en la de Augusto, se hizo muy popular la utilización de este mármol, y los romanos empezaron a extraerla en grandes cantidades.¹

La belleza que esta piedra aportada por sus amplias cualidades estéticas dio lugar a que durante ese periodo se reconstruyeran numerosos edificios públicos, sustituyendo materiales de acabado como terracota, estuco o adobe por revestimientos de piedra. Se realizaban aplacados de losas de mármol pulidas y planas, recibidas sobre grandes gruesos de mortero de cal, y dando lugar por primera vez a la idea del principio de revestimiento con placas de poco espesor.²

■ FIJACIÓN MEDIANTE ANCLAJES METÁLICOS

En principio, las losas solían tener un grosor que permitía que el revestimiento fuera auto-portante, pero a veces inestable, teniendo que recurrir a la utilización de **grapas metálicas** además del mortero de cal. No se conservan ejemplos de estas prácticas, puesto que las grapas de fijación fueron saqueadas durante la Edad Media, quedando las placas de piedra con infinidad de agujeros.³

■ FIJACIÓN AMORTERADA

Gracias a los conocimientos adquiridos con la práctica en cuando al sistema de aserrado manual, y con el desarrollo de las primeras máquinas para serrar piedra se consiguió un gran adelgazamiento de las placas. Con el tiempo llegaron a conseguir placas muy delgadas, de incluso 1 centímetro de espesor, que permitían una mayor adaptación en cuanto a formas y tamaños y nuevos diseños de acabados más refinados.

Estas placas se colocaban ya sin grapas y adheridas únicamente mediante la capa de mortero de cal (*figura 5.3.1*). La perfección del acabado en este caso dependía de la habilidad del albañil para conseguir una yuxtaposición uniforme entre las placas y la adecuada nivelación de todas ellas (*figura 5.3.2*).⁴

5.3.1

Aplacado de mármol aplicado sobre un muro compuesto ya construido, en el caldarium de las termas del Foro de Ostia, Roma. S. II d.C. En la parte superior de la fotografía se pueden ver los tubos de drenaje dispuestos entre el muro y el aplacado. Jean-Pierre Adam (1984)

5.3.2

Revestimiento mural de grandes placas de mármol de recuadros policromos. Casa de Amor y de Psique, Ostia, Roma. Año 300 d.C. En la parte superior de la fotografía se puede la capa de mortero adherida al muro previamente realizado. Jean-Pierre Adam (1984)

¹ Castro Villalba, Antonio (1999). Historia de la construcción arquitectónica. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona

² Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. Picard, París.

³ Ibídem.

⁴ Ibídem



5.3.3



5.3.4



5.3.5



5.3.6



5.3.7

5.3.2 EL LEGADO DE ROMA. LOS CHAPADOS DURANTE EL IMPERIO BIZANTINO

El Imperio Bizantino recibió una gran cantidad de conocimientos heredados de la cultura romana. Incluso durante su etapa inicial fue comúnmente conocido como Imperio Romano de oriente, dado el gran número de referencias tomadas.

Uno de los elementos constructivos que tomaron de las construcciones romanas fue el uso de delgadas placas de piedra que se utilizaban para revestir los muros con el fin de embellecer el interior de los edificios de mayor relevancia.

■ FIJACIÓN MEDIANTE MORTERO Y ANCLAJES METÁLICOS

La obra arquitectónica cumbre del Imperio Bizantino, así como el ejemplo más claro de la utilización de revestimientos delgados de piedra es la **Basilica de Santa Sofía** (*figuras 5.3.3, 5.3.4, 5.3.5*).

Fue construida entre los años **523 y 537 d. C.**, durante el mandato de Justiniano en Constantinopla (actual Estambul), por los arquitectos y matemáticos Antemio de Tralles e Isidoro de Mileto.

En ella, las grandes placas de mármol se colocaban, al igual que se hacía en roma, mediante la acción conjunta de una capa de mortero de cal y una serie de anclajes a modo de grapas metálicas que retenían las piezas en su posición. Al contrario que en los edificios romanos, aquí sí se conserva una gran cantidad de dichos anclajes (*figuras 5.3.6, 5.3.7*).

Una vez desaparecidos el imperio romano y bizantino esta práctica de utilizar placas de piedra de poco espesor dejó de emplearse por el esfuerzo tanto físico como de tiempo y por tanto económico que suponía. Durante la época medieval y renacentista se recurrió al uso de muros compuestos y muros mixtos, respectivamente.

5.3.3 RECUPERACIÓN DEL APLACADO DELGADO EN EL S.XIX. CONTEXTO

Con la llegada de la modernidad se produjo un impulso en la recuperación de este estilo de revestimiento a base de placas de piedra de poco espesor.

Todos los ingenios de maquinaria que se desarrollaron a lo largo del periodo de la revolución industrial, y especialmente en el curso del s. XIX, hicieron progresar la técnica de las construcciones y pusieron a punto los medios de los que se servirá posteriormente el movimiento moderno.

Por otro lado, durante todo el s. XIX fueron apareciendo nuevas corrientes arquitectónicas que introdujeron una serie de cuestiones y teorías novedosas. La construcción en piedra, por tanto, tuvo que adaptarse a los **nuevos conceptos**

5.3.3, 5.3.4, 5.3.5
Basilica de Santa Sofía (523-537 d.C). Muros revestidos de placas de piedra. Archivo fotográfico del autor.

5.3.6, 5.3.7
Basilica de Santa Sofía (523-537 d.C). Anclajes metálicos para retener las piezas en su posición. Archivo fotográfico del autor.

constructivos que se venían debatiendo:

- **La distinción entre cerramiento y estructura, iniciada por primera vez durante el periodo gótico se fue haciendo más clara a lo largo del s. XIX. El muro, despojado de su función estructural sufrió un progresivo adelgazamiento. Durante este siglo surgió por primera vez el término tectónico para describir la relación entre la forma externa y la estructura interna de un edificio.** ⁵

- La fractura iniciada en el Renacimiento entre proyecto y ejecución se fue haciendo más evidente a partir de la primera mitad del s. XIX, generando una serie de cambios:

- Los constructores comenzaron a **especializarse** en un determinado estilo o a limitarse al trabajo mecánico de traducir un determinado diseño a piedra, sin posibilidad de participación personal en el trabajo. ⁶ En palabras de Benévolo:

“El arquitecto se reserva la parte artística y deja a los demás la parte constructiva y técnica. Nace así la dualidad de competencias.” ⁷

- El **ornamento** pasó a entenderse como un elemento secundario, aplicado al diseño, e independiente de los conceptos constructivos.

- El concepto de **estilo**, que hasta entonces estaba directamente relacionado con la estructura y el muro, comenzó a considerarse mediante un revestimiento delgado que cubría y decoraba un esqueleto estructural genérico. ⁸

- **Nikolaus Pevsner y Sigfried Giedion** se convirtieron en los principales promotores de la arquitectura moderna. En lo que Pevsner bautizó como Movimiento Moderno, el nuevo espíritu se encontraba en la eficiencia de la máquina y en la inevitable desaparición del trabajo artesanal para dejar paso a la **producción en serie.** ⁹

Con todas estas cuestiones en el aire se definieron dos grupos claramente diferenciados. Por un lado, los que aún defendían las construcciones de piedra tradicionales caracterizadas por la masa y los que empezaron a proponer un nuevo entendimiento basado en los principios de revestimientos delgados y ligeros y los avances de la técnica constructiva.

5.3.4 LA RUPTURA CON LA TRADICIÓN. VÍCTOR HORTA

El primer ejemplo claro de renovación de estilo se puede situar en la **casa Tassel**, de Víctor Horta, entre **1892 y 1893**. En esta casa, Horta realizó el ensayo de una nueva arquitectura y un nuevo estilo, totalmente antitradicional y separado de todas las connotaciones históricas en todos sus detalles. ¹⁰ La piedra del revestimiento, tanto en disposición como en detalles como el plegado en S que hace para formar la *bow-window*, representa una clara ruptura con la tradición constructiva.

⁵ Weston, Richard (2011). 100 ideas que cambiaron la arquitectura. Blume, Barcelona. pág. 110.

⁶ Benévolo, Leonardo (1980). Historia de la arquitectura moderna. Gustavo Gili, Barcelona, 4ª edición. págs. 26-29.

⁷ *Ibidem*. pág. 29.

⁸ Benévolo, Leonardo (1980). Historia de la arquitectura moderna. cit. págs. 26-29.

⁹ Weston, Richard (2011). 100 ideas que cambiaron la arquitectura. cit. pág. 123.

¹⁰ Benévolo, Leonardo (1980). Historia de la arquitectura moderna. cit. pág. 304.

5.3.5 LOS DEFENSORES DEL CONCEPTO DE REVESTIMIENTO

■ OTTO WAGNER

El primer arquitecto que unió las palabras arquitectura y moderna por escrito y que se convertiría en el máximo representante de la evolución en la utilización de la piedra natural fue el arquitecto austriaco Otto Wagner. Wagner afirmaba que la arquitectura debía reflejar el hecho de que las nuevas tareas y puntos de vista de la humanidad pedían un cambio, y defendía una nueva arquitectura renovada que según él era “la expresión honesta de las nuevas formas de construir a partir de una estructura”.¹¹

Wagner, cuyas teorías estaban influenciadas por las enunciadas anteriormente por Semper¹², se acercaba a los que creían que el futuro de la arquitectura pasaba por entenderla como el **arte de construir** y no por la reinterpretación de los estilos históricos o las innovaciones en los detalles ornamentales.

Fue pionero de nuevas técnicas constructivas que ya anticipaban conceptos que se desarrollarían un siglo después, y que permitían el uso de piezas de piedra de gran calidad y poco espesor, con el ahorro económico y de tiempo de ejecución que ello suponía.

En su libro *Moderne Architektur*, de **1895**, Wagner hablaba de *todas estas cuestiones* y defendía la utilización del aplacado delgado como el camino para poder utilizar piedras de alto coste:

“Todo nuevo estilo ha surgido paulatinamente a partir del estilo anterior, cuando las nuevas técnicas de construcción, los nuevos materiales, y las nuevas tareas e ideas de la sociedad han exigido modificar de nuevo las formas existentes.”¹³

“Es indudable que, para armonizar con la sociedad actual, todas las creaciones modernas han de responder a los nuevos materiales y a los requisitos del presente [...], y han de tener en cuenta los colosales logros técnicos y científicos, así como la actual tendencia hacia lo práctico.”¹⁴

“Toda forma arquitectónica ha surgido de la construcción y a continuación se ha convertido en forma artística. [...] Pero estas transformaciones, independientemente de que la forma tuviera que responder al ideal de belleza de la época correspondiente, han aparecido porque la técnica empleada, los materiales, las herramientas, los medios disponibles, la evolución de las necesidades que satisfacer, se han modificado.”¹⁵

“Para el revestimiento exterior del edificio se utilizan placas. Estas placas pueden tener un espesor mucho menor y, a cambio, pueden ser de un material más noble (por ejemplo, mármol). La fijación de estas placas se podría realizar con anclajes de bronce (rosetas).”¹⁶

■ ADOLF LOOS

Adolf Loos también defendía una arquitectura adaptada a los nuevos tiempos y más rápida y barata, liberada del ornamento innecesario, y en **1908** escribía:

“El enorme daño y las devastaciones que ocasiona el redespertar del ornamento en la evolución estética, podrían olvidarse con facilidad, ya que nadie, ni siquiera ninguna fuerza estatal, puede detener la evolución de la humanidad. Sólo es posible retrasarla.”¹⁷

¹¹ Wagner, Otto (1993). La arquitectura de nuestro tiempo: una guía para los jóvenes arquitectos. Reedición del libro *Moderne Architektur* de 1986, Tr. Jordi Siguan, El Croquis, Madrid.

¹² Gottfried Semper ya defendía en su libro *Die vier Elemente der Baukunst*, en 1850, una envoltura delimitadora del espacio, cuya característica es la ligereza y respecto a la cual la estructura se encuentra subordinada y es tan sólo soporte.

¹³ *Ibidem*. cit. pág. 52.

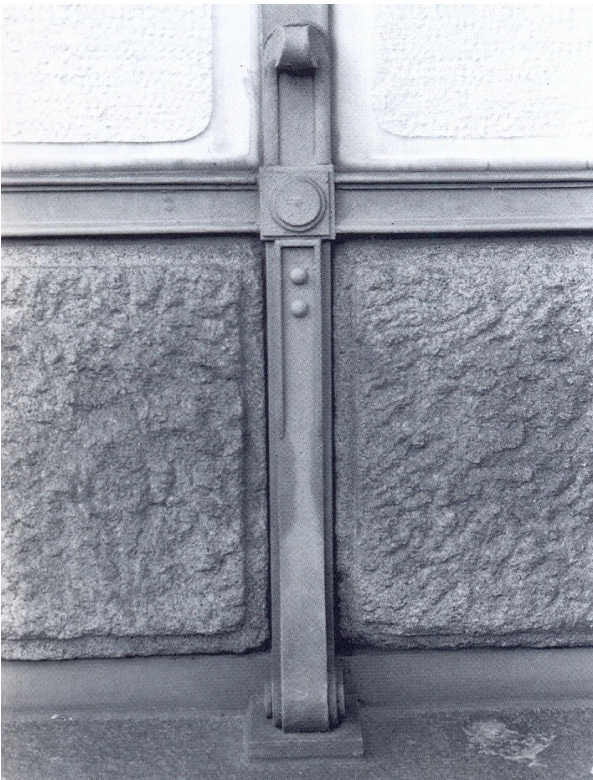
¹⁴ *Ibidem*. cit. pág. 60.

¹⁵ *Ibidem*. pág. 79

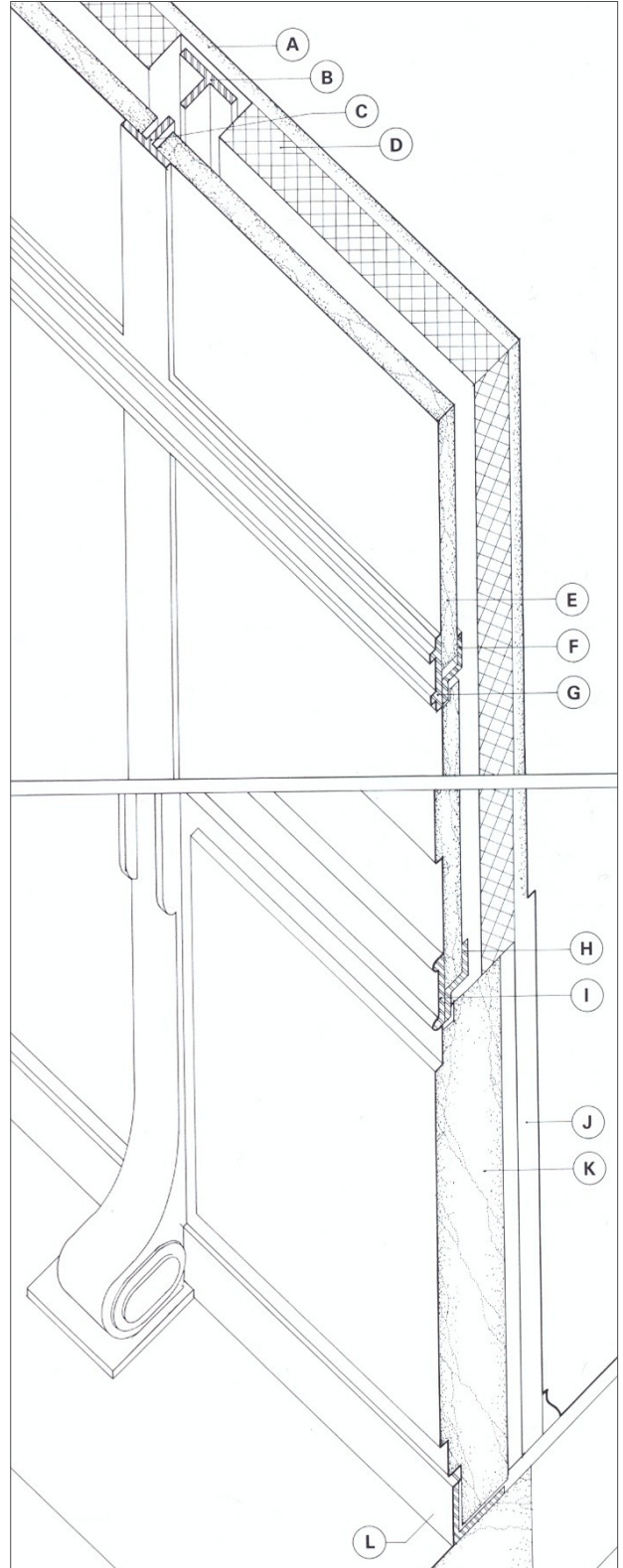
¹⁶ *Ibidem*. pág. 85.



5.3.8



5.3.9



5.3.10

“El ornamento no es un producto natural, de nuestra civilización, es decir, que representa un retroceso o una degeneración. El trabajo del ornamentista ya no se paga como es debido. [...] Ornamento es fuerza de trabajo desperdiciada y por ello salud desperdiciada. Así fue siempre. Hoy significa, además, material desperdiciado y ambas cosas significan material desperdiciado.”¹⁸

5.3.6 LA EXPRESIÓN DE LA FIJACIÓN A PRINCIPIOS DEL SIGLO XX

5.3.6-1 FIJACIÓN MEDIANTE PERFILERÍA VISTA

■ PROGRESIÓN TECNOLÓGICA

Este sistema se inició entre finales del siglo XIX y principios del siglo XX consistía en la sujeción de las placas de piedra a una subestructura de perfiles metálicos. Se ideó con la intención de agilizar la construcción de las fachadas y de demostrar las nuevas posibilidades de colocación y utilización de la piedra gracias al avance de la técnica. En este caso, además, se pretendía generar una imagen más “industrial” de la construcción, muy acorde con el pensamiento de la época.

□ OTTO WAGNER

El arquitecto que ideó y desarrolló este sistema constructivo fue el arquitecto Otto Wagner. Aunque fue la única obra que diseñó con estructura metálica, ésta se convirtió en una de las más representativas por el gran avance tecnológico que suponía.

• Estación del metro de Karlsplatz

La **estación del metro de Karlsplatz** (Viena, **1898-1899**) se convirtió en el ejemplo más claro y expresivo del sistema de anclaje visto de las placas (*figuras 5.3.8, 5.3.9*), y anticipaba el valor gráfico de las cabezas de los clavos de anclaje que se convertirán en el elemento más característico de las fachadas que desarrollaría con posterioridad.

En ella, aplicó un sistema de **paneles autoportantes** de cerramiento, formados por una placa de mármol de Carrara de 2cm de espesor y una plancha de yeso de 5cm, espaciadas 3 cm (*figura 5.3.10*), que se fijaban directamente a una **subestructura de hierro** (*figura 5.3.11*).¹⁹

□ ERIK GUNNAR ASPLUND

En el edificio **Bredereng Department Store** (Estocolmo, **1933-1935**) se prescindió del muro de ladrillo, por lo que las placas de mármol de 3 centímetros de espesor se colgaban de unos perfiles de acero. Éstos, a su vez, se fijaban a otros

5.3.8, 5.3.9
Otto Wagner, Estación del metro Karlsplatz. Detalle de la fachada. R. Gargiani (1993)

5.3.10
Otto Wagner, Estación del metro Karlsplatz. Axonométrica explicativa del sistema constructivo.

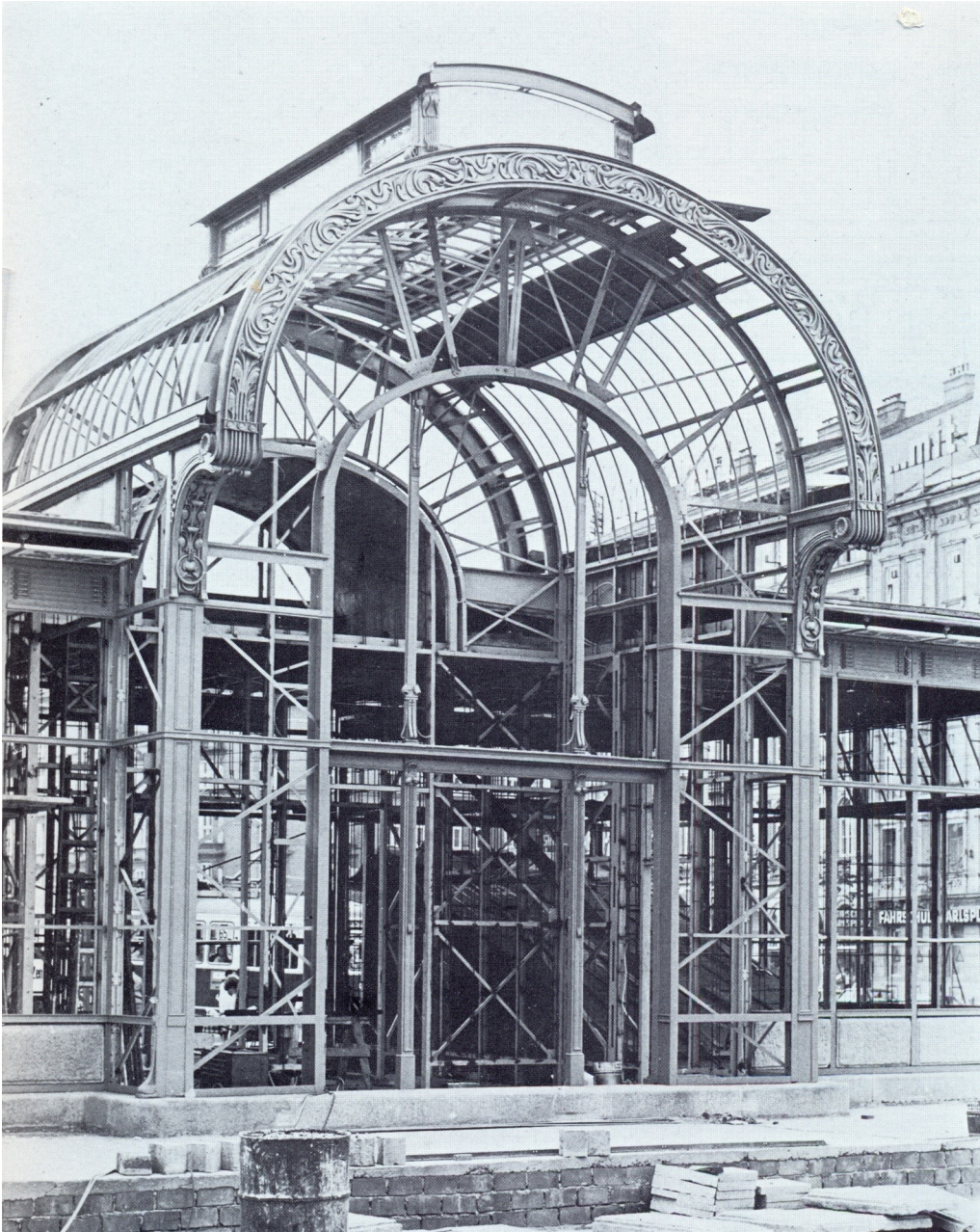
- A. Yeso
- B. Perfil estructural de hierro.
- C. Perfil de hierro visto exterior, en forma de T. Su función es retener el revestimiento en su sitio.
- D.
- E. Placa de mármol de 2 cm de espesor.
- F. Perfil de hierro sustentante del revestimiento en forma de Z.
- G. Banda de hierro moldeado.
- H. Ver F.
- I. Ver G.
- J. Acabado interior de yeso.
- K. Granito con acabado rústico de 10 cm de espesor.
- L. Perfil de hierro sustentante del revestimiento en forma de L.

Edward R. Ford (1996)

¹⁷ Loos, Adolf. (1972). Ornamento y delito y otros escritos. Tr. Lourdes Cirlot y Pau Pérez, Gustavo Gili, Barcelona. pág. 45.

¹⁸ *Ibidem* págs. 46-47.

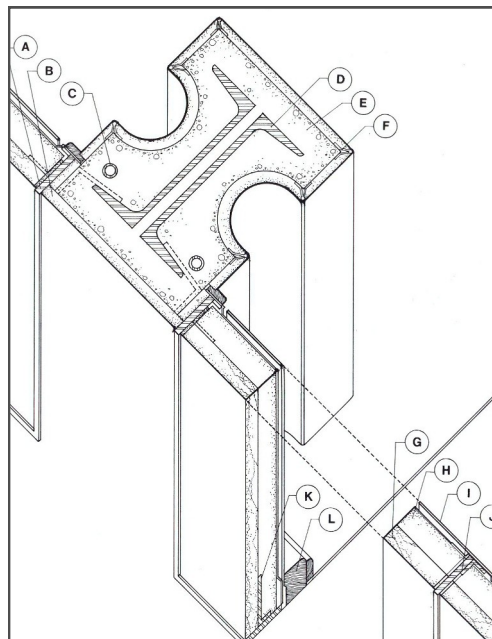
¹⁹ Patrón, Vicente (2001). El nacimiento de una técnica. Tectónica Nº2. Envolventes 2. Cerramientos pesados. pág. 10.



5.3.11



5.3.12



5.3.13

perfiles de acero que rodeaban cada placa de piedra a modo de bastidores vistos al exterior, y sujetos en cada forjado (*figuras 5.3.12, 5.3.13*).²⁰

■ TÉCNICA CONSTRUCTIVA

Este sistema constructivo consistía en la sujeción de delgadas placas de piedra a una subestructura metálica vista. La subestructura se fija a cada a cada forjado. De esta manera se evitaba la construcción del muro soporte interior, aligerando el conjunto y agilizando la construcción.

Esta solución, a pesar de verse en unos pocos ejemplos representativos, se convirtió en un claro reflejo de los sistemas que más adelante se utilizarían en las fachadas ventiladas ligeras, donde las placas de piedra se fijarán a una subestructura, anclada a su vez a la estructura del edificio, y donde las premisas básicas irán dirigidas a facilitar todo el proceso constructivo.

5.3.11

Otto Wagner, Estación del metro de Karlplatz (Viena, 1898-1899). Estructura. Se puede observar la retícula formada para fijar las placas de piedra. La fotografía se realizó durante la reconstrucción de 1977, y ya se pueden ver las placas del zócalo colocadas. Josef Schneider (1977)

5.3.12

Erik Gunnar Asplund, Bredereng Department Store
Edward R. Ford (1996)

5.3.13

Erik Gunnar Asplund, Bredereng Department Store. Axonométrica explicativa del sistema constructivo.
A. Perfil de acero de 9 x 85 mm.
B. 2 cm. de revoco.
C. Conductos eléctricos.
D. Estructura de acero.
E. Hormigón
F. Guías para el acabado.
G. Paneles de travertino de 3 cm. de espesor, ancladas a las barras de acero mediante clips.
H. 4 cm. de corcho para aislar la pared y barrera de vapor.
I. Acabado interior.
J. Perfiles de acero de 2 x 2 cm., a los que se fijan las placas de piedra.
K. Perfil de acero de 8 x 65 mm.

Edward R. Ford (1996)

5.3.6-2 REVESTIMIENTO DE PLACAS CLAVADAS

■ PROGRESIÓN TECNOLÓGICA

Tras estos primeros acercamientos al concepto de revestimiento de placas delgadas se definió un nuevo estilo constructivo que quedó definido como la clara expresión de la evolución de la técnica.

Este sistema de fijación vista a base de anclajes metálicos puntuales en forma de clavos pasantes, se convirtió al mismo tiempo solución técnica que colabora con el anclaje de las placas y elementos cualificadores del propio diseño y composición de las superficies de fachada. Unas soluciones similares se veían ya en iglesias, aplicadas al trabajo de la madera.

□ OTTO WAGNER

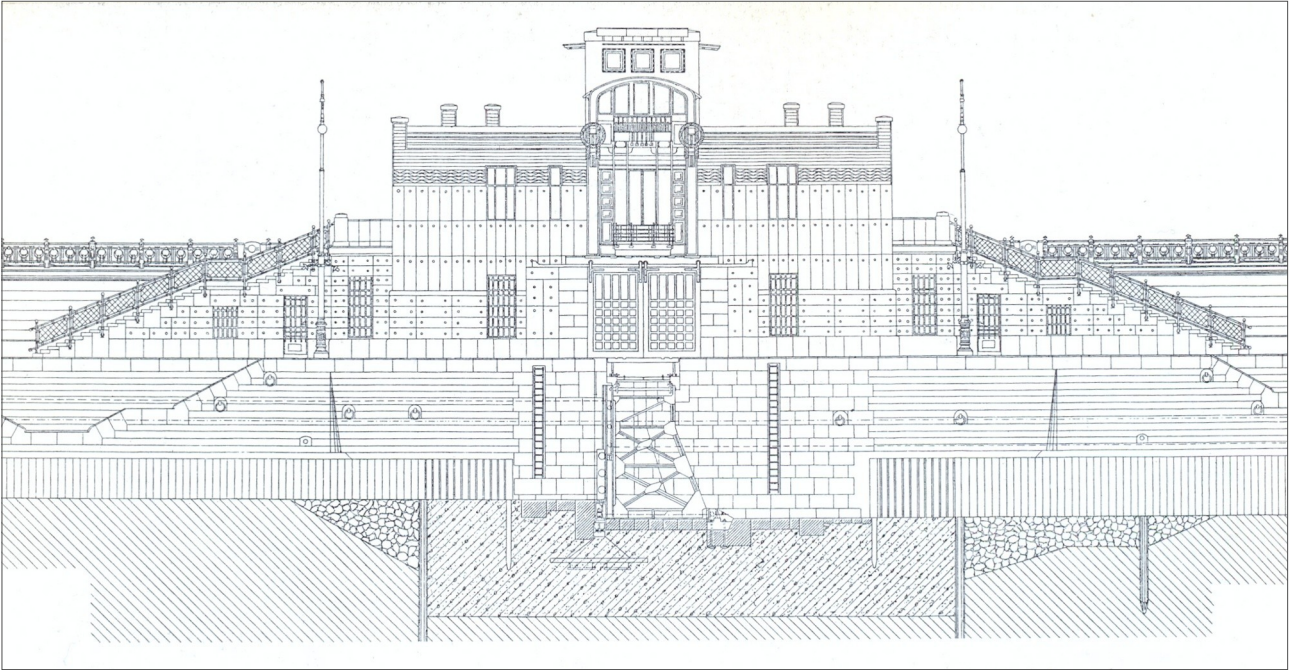
Desarrolló un sistema de fachada en el que la distinción entre estructura y revestimiento era muy clara, basada en placas de piedra de poco espesor que se fijan mediante tornillos a un muro de fábrica de ladrillo.

● Galería de arte moderno

Los primeros ejemplos de revestimiento de placas de revestimiento de mármol clavadas sobre estructuras murarias aparecen en croquis de estudio y proyectos para la galería de arte moderno (**Viena, 1899**). En una de las elaboraciones finales. Wagner coloca dos cabezas de perno en los extremos superiores de cada placa horizontal, dando el efecto de estar suspendidas.²¹

²⁰ Edward R. Ford (1996). The Details of Modern Architecture. 2, 1928 to 1988. Institute of technology, Massachusetts.

²¹ Fannelli, Giovanni; Gargiani, Roberto (1999). El principio del revestimiento. Tr. Juan



5.3.14



5.3.15

- Edificio de control de la presa Kaiserbad

En el **edificio de control de la presa Kaiserbad** (Viena, **1904-1906**), la búsqueda de la autonomía formal del revestimiento con respecto al aparejo murario llega a su expresión más coherente. En él utilizó piezas de granito en el basamento y piezas de mármol blanco en el cuerpo principal. Las placas de mármol blanco rectangulares alargadas están dispuestas en vertical y fijadas a la pared mediante un solo clavo en la parte superior. Las placas de granito del basamento están dispuestas en horizontal con juntas no rehundidas y fijadas con dos clavos en sus extremos (*figuras 5.3.14, 5.3.15*).²²

- Iglesia de San Leopoldo

En la **Iglesia de San Leopoldo** (**1905-1909**) (*figura 5.3.16*) las bandas horizontales están constituidas por placas clavadas de 4 centímetros de espesor que presentan en su parte superior una cara plana sobre la cual se apoyan las placas de verticales de 2 centímetros de espesor, y en su parte inferior un diente de 2 centímetros que fija las cabezas superiores de las placas verticales (*figuras 5.3.17, 5.3.18*).²³

- Edificio de la Caja Postal de Ahorros de Viena

Posteriormente, en el edificio de la **Caja Postal de Ahorros de Viena**, Postsparkasse, construido en dos fases, (Viena, **1904-1906; 1910-1912**), el clavo aparece en todas las placas.

La envolvente del edificio se diseñó en base a la **adición modular de piezas repetidas sistemáticamente** (*figura 5.3.19*). El sistema de anclaje de las losas de granito y mármol blanco de Sterzang que recubren la fachada caracteriza la imagen del edificio, al repetir sistemáticamente los pernos con cabezas revestidas de aluminio opaco, creando un ritmo con sutiles variaciones para marcar zócalos o esquinas. La técnica es el pretexto para crear efectos formales y una nueva percepción de los efectos vibrantes del dibujo sobre superficies planas.²⁴

En el **cuerpo superior**, los anclajes sobresalen del plano de piedra excepto en el paño central, que queda camuflados (*figura 5.3.20*). El revestimiento se ejecutó partiendo desde la parte superior del edificio, por sectores plantados sobre listones fijados en horizontal al muro en bruto, de manera que a partir de tal base fija las filas horizontales de placas que pudieran asentarse una sobre otra. Con este procedimiento constructivo, los clavos aseguran el mantenimiento en su posición de las placas durante el periodo en que el mortero terminara de endurecerse.²⁵

5.3.14

Otto Wagner, edificio de control de la presa Kaiserbad. Alzado. Josef Schneider

5.3.15

Otto Wagner, edificio de control de la presa Kaiserbad. Fotografía. Pierre Mardaga

²² *Ibidem*. págs. 86-87.

²³ *Ibidem*. pág. 82.

²⁴ Patrón, Vicente. (2001). El nacimiento de una técnica. cit. págs. 8-9.

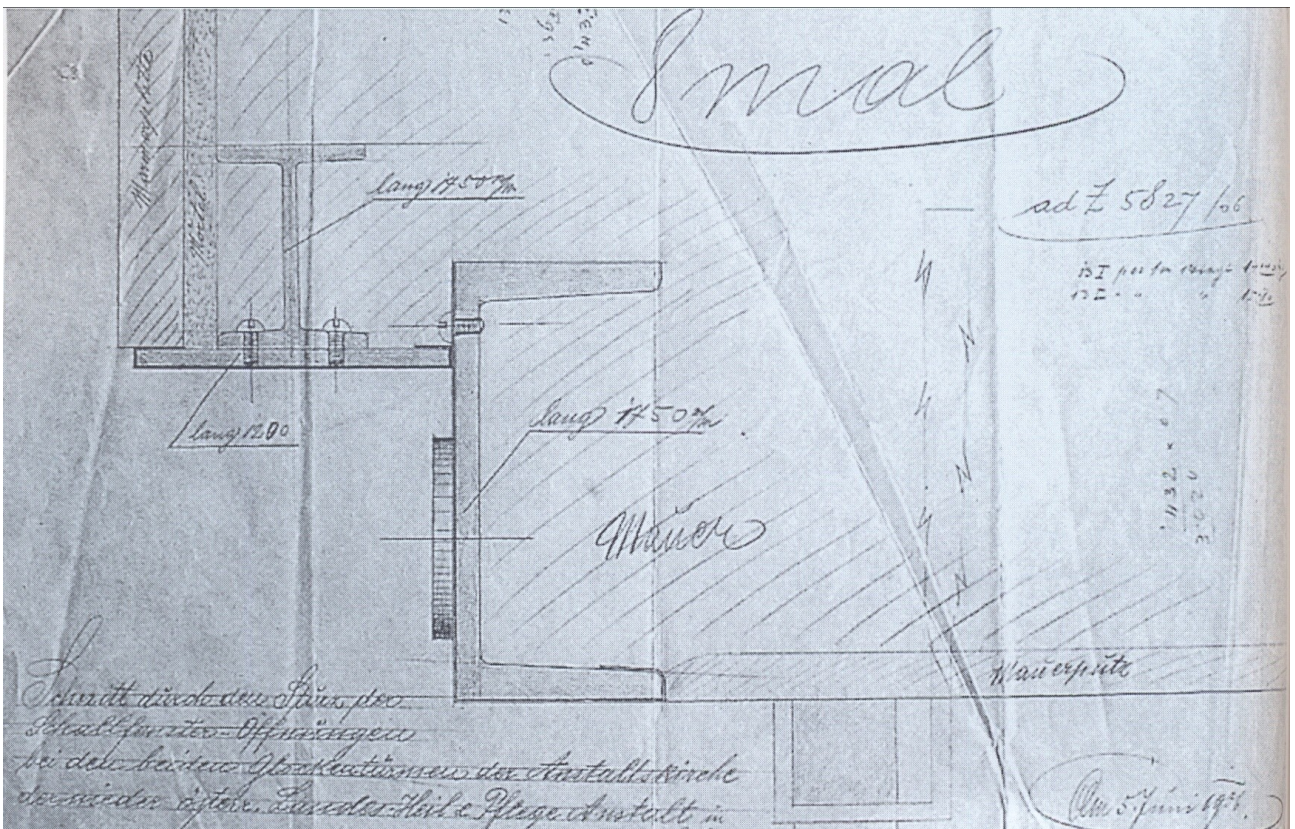
²⁵ Fannelli, Giovanni; Gargiani, Roberto (1999). El principio del revestimiento. cit. págs. 84-85.



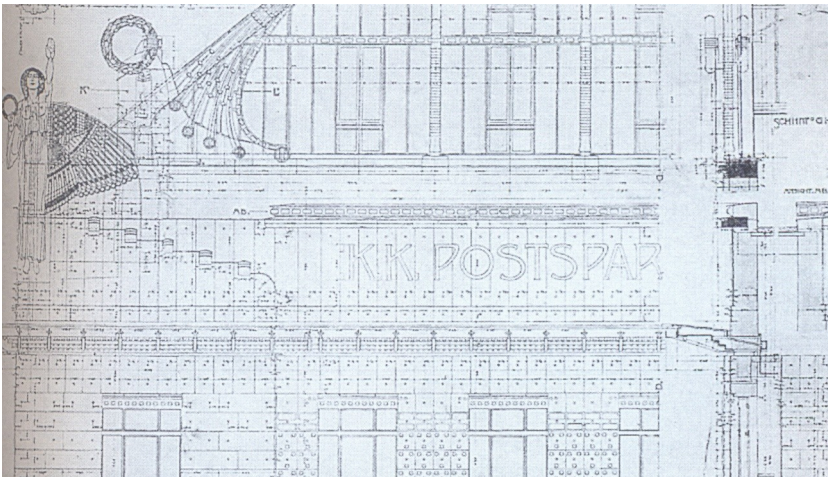
5.3.16



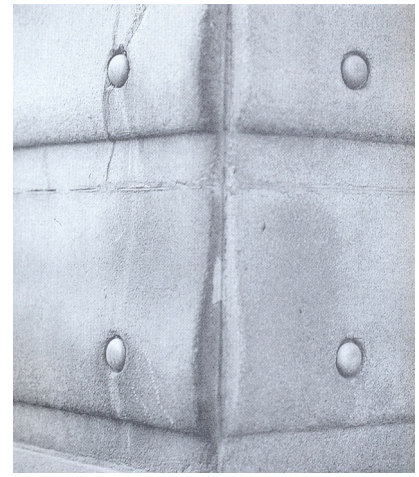
5.3.17



5.3.18



5.3.20



5.3.21

5.3.16
Otto Wagner, Iglesia
de San Leopoldo.
Y. Futagawa (1978)

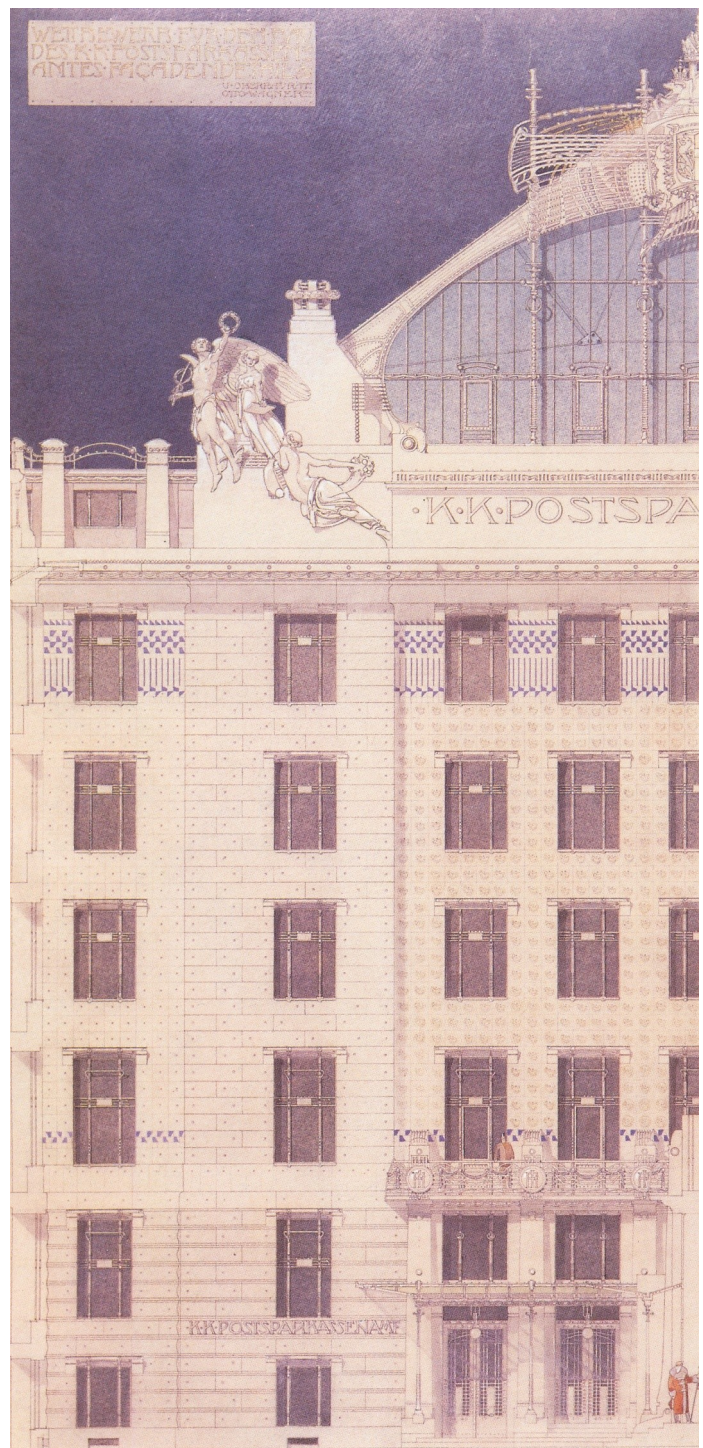
5.3.17
Otto Wagner, Iglesia
de San Leopoldo. De-
talle de la fachada.
R. Gargiani (1993)

5.3.18
Otto Wagner, Iglesia
de San Leopoldo. De-
talle de una tabla del
proyecto de ejecución.
*Am Steinhof, Techni-
sche Betriebsleitung*

5.3.19
Otto Wagner, edificio
de la Caja Postal de
Ahorros de Viena, .
Alzado.
*Museo de Historia de
Viena. Inventario nº
96017/1*

5.3.20
Otto Wagner, edificio
de la Caja Postal de
Ahorros de Viena, .
Alzado y sección cons-
tructiva.
*Österreichische Post-
parkasse*

5.3.21
Otto Wagner, edificio
de la Caja Postal de
Ahorros de Viena,
Postparkasse. Detalle
del la solución en es-
quina.
R. Gargiani (1993)



5.3.19



5.3.22



5.3.23

En el **basamento** las placas de granito de 6-9 centímetros de espesor se anclan mediante bulones de aluminio embebidos en la superficie de las mismas y presenta un almohadillado formado por placas de perfil ondulado (*figura 5.3.21*).²⁶

□ MAX FABIANI

En la misma línea que Wagner, podemos encontrar otros ejemplos de utilización singular de placas delgadas de piedra, sujetas mediante anclajes, que pese a no ser tan evidentes como los de Wagner, son también claros representantes de la evolución de la técnica.

Quizás el más singular sea Max Fabiani, que en la **Artaria-Haus** (Viena, **1900-1901**), utiliza un sistema de anclajes vistos de las finas placas de mármol de revestimiento. Esta fijación metálica, consistente en dos bulones por cada placa, únicamente se limita a la banda correspondiente a la primera planta, puesto que en los pisos superiores desaparece (*figura 5.3.22*).²⁷

■ **TÉCNICA CONSTRUCTIVA**

El sistema consistía en fijar las placas a base de anclajes metálicos puntuales vistos en forma de clavos pasantes.

Pese a que anticipaba sistemas que se utilizarán casi un siglo después, es en realidad una propuesta formal, puesto que la función estructural de los tornillos estaba pensada para asegurar únicamente la sujeción de las piezas durante el tiempo de fraguado del mortero y reducir el tiempo de puesta en obra.²⁸

Existen pocos ejemplos de la utilización de estos sistemas con posterioridad. Sin embargo se convirtió en un recurso de gran utilidad en la rehabilitación de fachadas existentes. Se utilizaba para anclar las placas que estaban perdiendo la adherencia, asegurándolas y evitando el desprendimiento de las mismas. En el edificio del **Banco de Salamanca**, de Lucas Espinosa y Adolfo Bobo (Zamora, **1965**), por ejemplo, se utilizó este sistema de anclaje, al estilo de los edificios de Wagner. En este caso, cada placa se aseguró con dos tornillos sujeta con dos tornillos, unos en la parte inferior y otro en la superior, y coincidentes en la línea vertical (*figura 5.3.23*).

5.3.22
Max Fabiani, Artariahaus. Vista de la fachada.
E. Godoli (1983)

5.3.23
Edificio del Banco de Salamanca, de Lucas Espinosa y Adolfo Bobo (Zamora, 1965).
Archivo fotográfico del autor

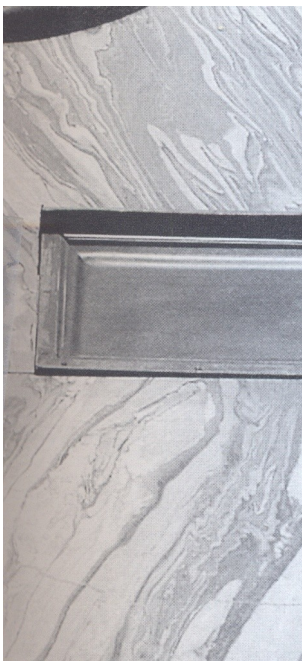
²⁶ ibídem. págs. 85.

²⁷ ibídem. págs. 74-75.

²⁸ Patrón, Vicente. (2001). El nacimiento de una técnica. cit.



5.3.24



5.3.25



5.3.26

5.3.7 CHAPADOS AMORTERADOS

5.3.7-1 PROGRESIÓN TECNOLÓGICA

■ LOS CHAPADOS DE PRINCIPIOS DEL S.XX

Paralelamente a estas primeras ingeniosas propuestas se generó un entusiasmo por el empleo de revestimientos de piedra que generaran superficies continuas y alejadas de la imagen tradicional muraría, y que consistían en la colocación de las placas pétreas por adherencia al soporte.

□ ADOLF LOOS

En el **edificio Golgman & Salatsch** de la Michaelerplatz (Viena, **1909-1911**) (*figura 5.3.24*), Loos desarrolló conceptos sobre la verdad del revestimiento y del material. Tiende a buscar superficies sin suturas y que no imiten ninguna estructura constructiva. Las placas de mármol griego de Cipollino, por tanto, se utilizaron en las dimensiones más grandes posibles y se adosaban de manera que se conseguían efectos de continuidad de los veteados (*figura 5.3.25*).²⁹

□ JOSEF HOFFMANN

Josef Hoffmann utilizó placas pétreas para el revestimiento del **palacio construido para Adolphe Stoclet** (Bruselas, **1905-1911**), abandonando el revoco que utilizaba generalmente. Se utilizaron placas de mármol, colocadas con juntas alineadas en vertical y en horizontal, y con un tamaño que hacía evidente la diferencia con respecto al bloque de piedra.³⁰ Las placas utilizadas por Hoffmann se colocaron amorteradas, sin hacer evidente el sistema de sujeción y generando un plano continuo (*figura 5.3.26*). Únicamente en las esquinas se utilizan elementos metálicos que fijaban las placas ubicadas en los ángulos para solucionar de una manera más sencilla los puntos de encuentro entre placas.³¹

5.3.24
Adolf Loos, Edificio
Golgman & Salatsch
de la Michaelerplatz,
(Viena, 1909-1911
*Lámina de presenta-
ción (1912)*

5.3.25
Adolf Loos, detalle de
la fachada del edificio
Golgman & Salatsch
de la Michaelerplatz,
R. Gargiani (1993)

5.3.26
Josef Hoffmann, pala-
cio para Adolphe Sto-
clet. Vista de la facha-
da.
E. Godoli (1978)

■ DIFUSIÓN DEL APLACADO EN LOS AÑOS 30

A partir de la década de 1930, la utilización del aplacado delgado de piedra se difundió por toda Europa. Se utilizaban placas de piedra sobre muros de albañilería, con escasos grosores y tamaños cada vez mayores, fruto de los avances constructivos y las posibilidades que permitían las máquinas. Estas soluciones permitían recortar los gastos de ejecución sin tener que recurrir a la utilización de la piedra. Además de ello, también suponían un ahorro de tiempo de ejecución al evitar los inconvenientes derivados de la manipulación de pesados bloques.

²⁹ Fannelli, Giovanni; Gargiani, Roberto (1999). El principio del revestimiento. cit. págs. 22-26

³⁰ La altura de las placas, por otra parte, varían en relación con la dimensión y la posición de las ventanas, de modo que las juntas horizontales coincidan con las líneas de antepecho y arquitrabe.

³¹ *ibídem.* págs. 96-98.



5.3.27



5.3.28



5.3.29



5.3.30



5.3.31

□ GIUSEPPI TERRAGNI

La **casa del Fascio**, de Giuseppe Terragni (Como, **1932-1936**) se forró con grandes placas de mármol de entre 2 y 6 centímetros de espesor, rectangulares, dispuestas en vertical, para crear una trama de juntas regular, persiguiendo todavía el ideal de la superficie continua revocada (figura 5.3.27).³²

■ **LOS APLACADOS DURANTE LAS DÉCADAS DE 1950 Y 1960**

Tras estos y otro ejemplos realizados especialmente durante los años 30 y 40 en numerosos países europeos, se fue abandonando la técnica basada únicamente en la unión amorterada y para la fijación de las placas comenzó anclajes metálicos, explicados más adelante.

La situación en España, sin embargo, era muy distinta, y la evolución en la colocación de chapados se produjo de una manera mucho menos evidente, ya que fue durante los años cincuenta y sesenta cuando se empezó a difundir en España la utilización de estos chapados de espesores reducidos.

De los numerosos ejemplos se podrían citar varios representativos como:

- Edificio Bancario, de Luis Gutierrez Soto (Palencia, 1957)
- Edificio de Viviendas Olmedo, de Alejandro de la Sota (Zamora, 1959) (*figura 5.3.28*).
- Edificio de la Delegación de Hacienda, de Ignacio Álvarez Castelao (Oviedo, 1960).
- Edificio del Banco Castellano, de salvador Álvarez Pardo (Zamora, 1964).
- Edificio de Viviendas y locales en la calle del Prior, de Alejandro de la Sota (Salamanca, 1965) (*figura 5.3.29*).

■ **LOS APLACADOS A PARTIR DE LOS AÑOS 70**

A pesar de todas las recomendaciones sobre la colocación de anclajes, durante los próximos años todavía era común en España la construcción de fachadas de piedra mediante chapados amorterados. Durante estos años se hizo común generar fachadas en las que se quería dar una imagen de fortaleza, de fábricas pétreas tradicionales. Algunos ejemplos representativos se pueden ver en edificios como:

- Ayuntamiento de Logroño, de Rafael Moneo (1973-1981).
- Edificio del Banco de España, de Rafael Moneo (Jaén, 1988) (*figuras 5.3.30, 5.3.31*).
- Centro Cultural y Museo Hidráulico de los Molinos del río Segura, de Juan Navarro Baldeweg (Murcia, 1988) (*figura 5.3.32*).
- Palacio de Congresos y Exposiciones de Salamanca, de Juan Navarro

5.3.27
Giuseppe Terragni.
Casa del Fascio
(Como, 1932-1936)
Guillermo Hevia
García (2014)

5.3.28
Alejandro de la Sota.
Edificio de Viviendas
Olmedo (Zamora,
1959).
Archivo fotográfico del
autor

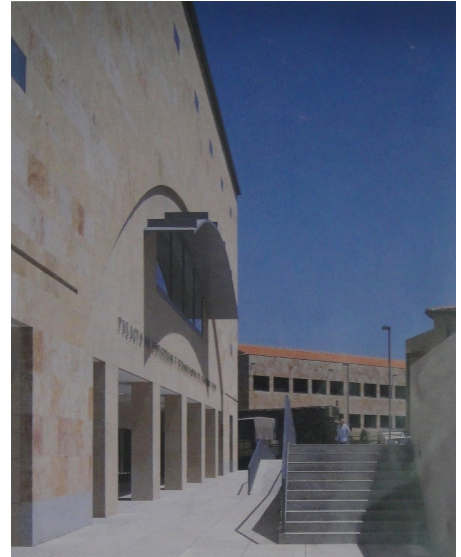
5.3.29
Alejandro de la Sota.
Edificio de Viviendas y
locales en la calle del
Prior (Salamanca,
1965).
Archivo fotográfico del
autor

5.3.30, 5.3.31
Rafael Moneo Edifi-
cio del Banco de
España (Jaén,
1988).
Hisao Suzuki (2004)

³² *Ibidem.* pág. 259.



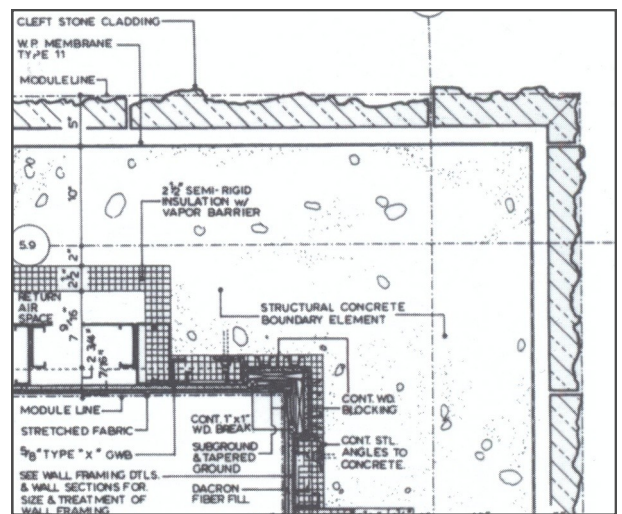
5.3.32



5.3.33



5.3.34



5.3.35



5.3.36

Baldeweg (1992) (figura 5.3.33).

- Edificio del Centro Getty Los Ángeles, de Richard Meier (California, 1985-1997) (figura 5.3.34, 5.3.35).
- Edificio oficial (Madrid) (figura 5.3.36).

Desde la aparición de la fachada trasventilada, la técnica del chapado se ha seguido utilizando, pero quedando en muchos casos relegada a los zócalos de los edificios o a su utilización en viviendas unifamiliares. Sus funciones pasaron a ser:

- Carácter ornamental
- Protección del paramento frente a salpicaduras
- Protección del paramento frente a impactos

5.3.7-2 TÉCNICA CONSTRUCTIVA

■ **COLOCACIÓN CON MORTERO DE CEMENTO**

□ SISTEMA CONSTRUCTIVO

La solución consiste en la aplicación directa de mortero adherido a ambas superficies. Para un correcto funcionamiento debía asegurarse una distribución equilibrada y uniforme de las cargas. Para mitigar los efectos de flotabilidad de la flotabilidad del mortero en las placas se procedía a la aplicación del revestimiento parcialmente.

□ INCONVENIENTES

Esta solución, sin embargo, planteaba una serie de problemas:

- Los principales problemas derivaban del hecho de poner en contacto dos materiales con un comportamiento térmico e higroscópico diferente. Los factores que influyen son:³³
 - **La absorción de la piedra para facilitar la adherencia**
 - **La retracción del mortero**
 - **Las deformaciones diferenciales de origen térmico**

5.3.32
Centro Cultural y Museo Hidráulico de los Molinos del río Segura, de Juan Navarro Baldeweg (Murcia, 1988).

5.3.33
Palacio de Congresos y Exposiciones de Salamanca, de Juan Navarro Baldeweg (1992).

5.3.34
Edificio del Centro Getty Los Ángeles, de Richard Meier (California, 1985-1997).
Scott Frances/Esto (2003)

5.3.35
Edificio del Centro Getty Los Ángeles, de Richard Meier (California, 1985-1997). Detalle de obra. Ignacio Paricio (2000)

5.3.36
Edificio oficial (Madrid) Archivo fotográfico del autor

Esto derivaba en una progresiva pérdida de adherencia que podía provocar **agrietamientos** e incluso el **desprendimiento** de la placa.

- Con el peso propio de las piezas superiores ejercido sobre las inferiores, se producía una **pérdida de adherencia** progresiva.³⁴

³³ Cerdeño del castillo, Francisco Javier (2007). La piedra natural en la arquitectura contemporánea. Aitemin, Centro Tecnológico, Toledo. pág. 124.

³⁴ Avellaneda, Jaume; Paricio, Ignacio. (2000). Los revestimientos de piedra. cit.

- Además, se colocaron en muchos casos sin tomar las **precauciones** necesarias, por lo que se produjeron numerosos accidentes por desprendimiento de las fachadas.³⁵

□ PUESTA EN OBRA

La ejecución teórica de este tipo de aplacados consistía en:³⁶

- En primer lugar se realizaba un relleno de mortero en la parte inferior de la placa, a una altura de unos 10 centímetros.
- Posteriormente se realizaba el resto del relleno en tiras horizontales de unos 20 centímetros de ancho.
- En la parte superior se preveían unos apoyos especialmente diseñados con el mortero para el apoyo de la hoja superior.
- De esta manera se formaban una serie de canales horizontales entre el revestimiento y la pared soporte para garantizar la adecuada evaporación de agua.
- El plano superior no debían colocarse hasta que el inferior no tuviese la solidez adecuada.

Sin embargo, era rara la realización de una ejecución tan técnica, y generalmente consistía en la aplicación del mortero en forma de pelladas.

■ **COLOCACIÓN CON ADHESIVO**

□ DESARROLLO

Con el tiempo se fueron incorporando morteros con distintos tipos de aditivos, así como materiales plásticos como **cauchos y resinas**. En EE.UU tomaron estas ideas del campo de la cerámica, y la incorporaron dando lugar a la técnica conocida como “masilla de unión”, que se basaba en la técnica del **encolado**.³⁷

□ VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL SISTEMA

Este sistema incorporaba ciertas **ventajas** respecto al sistema anterior mediante mortero como:

- Mayor impermeabilidad
- Mayor elasticidad
- Rapidez de instalación

Aunque también mantenía determinados **inconvenientes**, como se indica en la norma **UNE 22203:2011**:

- Utilización de placas de reducido tamaño.
 - Las masa de cada placa no debe superar los 40 Kg/m²
 - Ninguna dimensión en planta debe ser mayor de 60 cm.
 - La superficie de cada placa no debe ser mayor de 0,24 m².

³⁵ ibídem.

³⁶ Di Silvo, Michele (1993). Facciate di pietra. Il marmo nell'architettura contemporanea: tecnologia dei paramenti esterni tra innovazione e tradizione. Alinea, Firenze.

³⁷ ibídem.

- Dificultad de corrección de la planeidad
- Pérdida de adherencia ante mala ejecución

□ ELECCIÓN DEL ADHESIVO

La selección de un adhesivo depende del tipo de soporte y del grado de absorción de la piedra. Según el tipo de adhesión, los adhesivos se pueden clasificar en: ³⁸

- **Cementosos:** la adhesión es mecánica y química, siendo el endurecimiento básicamente también por hidratación, aunque en esa hidratación interviene el proceso de acoplamiento cohesivo de los polímeros.
- **No cementosos:** la adherencia es exclusivamente química, siendo el proceso de endurecimiento bien por evaporación del agua o del disolvente, o por reacción química de los componentes.

De acuerdo con la Norma **UNE-EN 12004**, los adhesivos se clasifican en los siguientes tipos:

- **Adhesivo cementoso C:** mezcla de conglomerantes hidráulicos, cargas minerales y aditivos orgánicos, que sólo tienen que mezclarse con agua o adición líquida justo antes de su uso.
- **Adhesivo en dispersión D:** mezcla de conglomerantes orgánicos en forma de polímero en dispersión acuosa, aditivos orgánicos y cargas minerales, que se presenta listo para su uso.
- **Adhesivo de resinas reactivas R:** mezcla de resinas sintéticas, aditivos orgánicos y cargas minerales cuyo endurecimiento resulta de una reacción química. Está disponible en forma de uno o más componentes.

□ JUNTAS

Como indica la norma **UNE 22203:2011**, Los tipos de juntas a tener en cuenta son:

- Juntas estructurales

Coinciden con las del edificio y tienen su misma anchura y posición. El sellado se puede hacer con masilla hasta una anchura de 2 cm. las juntas estructurales de mayor tamaño se deben cubrir con tapajuntas.

- Juntas verticales o de expansión

Aproximadamente cada 4 m y a 2 m de las esquinas. Su anchura debe ser se unos 10 mm.

- Juntas horizontales o de compresión

Son juntas horizontales que se colocan a nivel de forjado y en el encuentro de la coronación. Deben tener una anchura mínima de 15 mm.

- Juntas de unión o de contorno

³⁸ Instituto valenciano de la edificación, instituto tecnológico de la construcción (2010). Guía de la piedra natural. Generalitat Valenciana. págs. 67-68.

Constituyen las juntas entre las unidades del aplacado y de éstas con el contorno del aplacado. Su anchura debe ser al menos de 4 mm, aunque para piezas de grandes formatos pueden alcanzar valores superiores.

□ PUESTA EN OBRA

Todo el proceso de puesta en obra, así como los procedimientos de fijación posibles están regulados según la norma **UNE 22203:2011**, que indica:

PREPARACIÓN DEL SOPORTE

- **Limpieza previa** del soporte de polvo, aceites, pinturas,...
- **Estabilidad del soporte.** Si éste fuera una fábrica de ladrillo se debe esperar un mes para su aplicación. Si fuera de hormigón se debe esperar, al menos, 2 meses.
- **Grado de humedad del soporte**
- **Planicidad y tratamiento superficial.** La falta de planicidad del soporte medida con una regla de 2 m no debe superar los 3 mm. En caso contrario se debe aplicar una capa de regularización con mortero de enfoscado de tipo M8, de 3 mm a 5 mm de espesor, o mortero de regulación industrializado.

FIJACIÓN

- **Simple encolado**

El simple encolado únicamente se puede utilizar en placas de una tamaño máximo de 35 x 35 cm. El procedimiento consiste en:

1. El adhesivo se debe aplicar solamente sobre la superficie de colocación, con una llana o paleta de borde recto para obtener una capa uniforme.
2. Se peina con una llama dentada.
3. Las placas de piedra se colocan presionándolas por medio de ligeros golpes con una maza de goma y moviéndolos ligeramente para conseguir un contacto pleno. Se debe colocar dentro del tiempo abierto del adhesivo, antes de que forme una película seca en la superficie del mismo que evite la adherencia.
4. El espesor del adhesivo nunca debe ser inferior a 3mm.
5. Se debe dejar una junta entre las piezas de al menos 4 mm de anchura procurando que no queden rellenas de adhesivo.

- **Doble encolado**

Este sistema se utiliza para placas mayores de 35 x 35 cm. o que dispone de un relieve acusado. El adhesivo se aplica con capa fina de unos 3mm. El procedimiento consiste en:

1. El adhesivo se aplica sobre la superficie de colocación y también sobre el reverso de las placas, con una llana o paleta de borde recto para obtener una capa uniforme.
2. Se peina con una llana dentada.
3. Las placas de piedra se colocan presionándolas por medio de ligeros golpes con una maza de goma y moviéndolos ligeramente para conseguir un contacto pleno. Se debe colocar dentro del tiempo abierto del adhesivo, antes de que forme una película seca en la superficie del mismo que evite la adherencia.
4. El espesor del adhesivo nunca debe ser inferior a 3mm.
5. Se debe dejar una junta entre las piezas de al menos 4 mm de anchura procurando que no queden rellenas de adhesivo.

REJUNTADO

El rejuntado se debe realizar cuando el adhesivo haya endurecido completamente, siempre siguiendo las indicaciones del fabricante, y habitualmente después de 24 horas. Las juntas se rellenan con un material de rejuntado, que puede ser de los siguientes tipos:

- **Cementoso de tipo CG2.** Consiste en una mezcla de aglomerantes hidráulicos, cargas minerales y aditivos orgánicos e inorgánicos, que sólo tienen que mezclarse con agua o adición de líquida justo antes de su uso. Además, incluye las características adicionales de baja absorción de agua y alta resistencia a la abrasión.
- **Resinas reactivas.** Mezcla de resinas sintéticas, cargas minerales y aditivos orgánicos e inorgánicos, cuyo endurecimiento resulta de una reacción química.

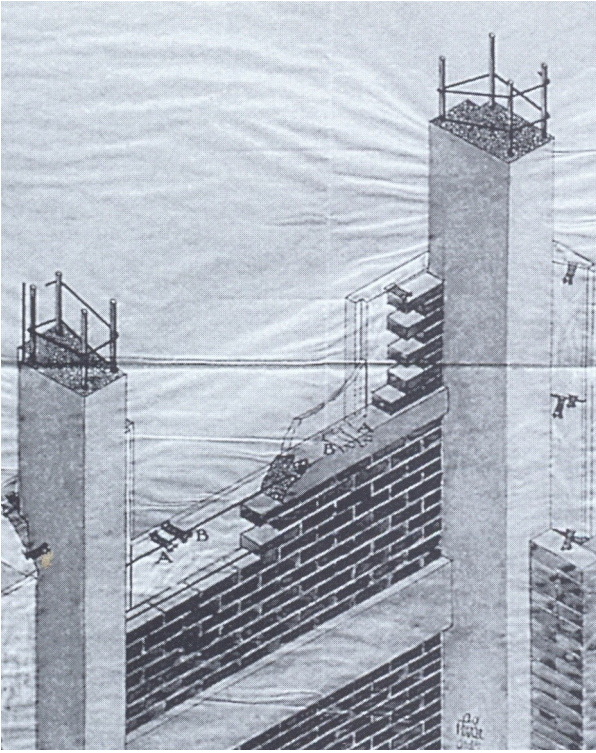
Deben cumplir las siguientes características:

- Desde el punto de vista estructural los materiales para rejuntado se caracterizan por el Factor de Acomodación del Sellante (FAS), que define la deformación del producto, y puede estar entre el 15% y el 35%.
- La vida útil debe ser de al menos 15 años
- Debe resistir temperaturas comprendidas entre los -20°C y los 80°C .

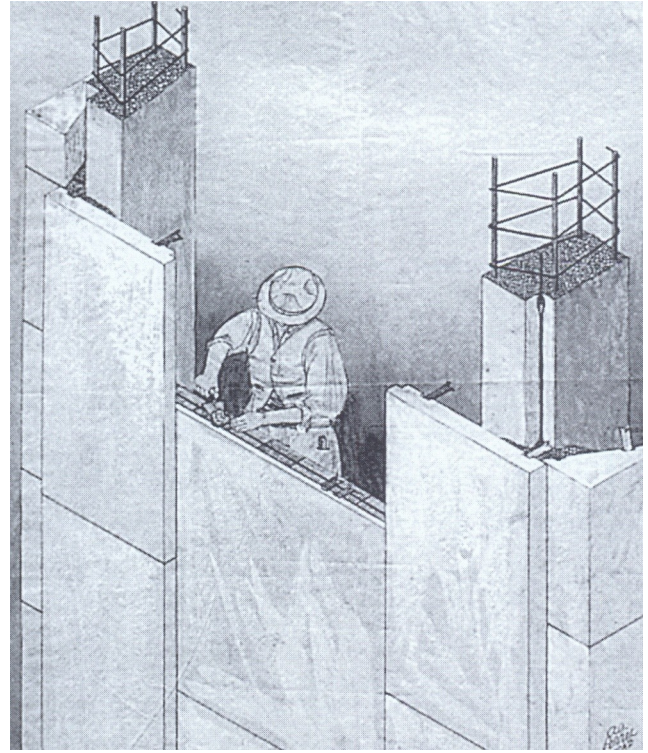
5.3.8 FIJACIÓN MEDIANTE ANCLAJES METÁLICOS

5.3.8-1 PROGRESIÓN TECNOLÓGICA

Aprovechando la evolución del hierro y la aparición de nuevos metales, se empezaron a utilizar anclajes metálicos para favorecer una unión de las placas con la pared portante más segura. Esta evolución del sistema de anclaje no se produjo de una manera genérica y universal, sino que se introdujo inicialmente en países europeos como Inglaterra, Italia o Alemania, y en Estados Unidos.



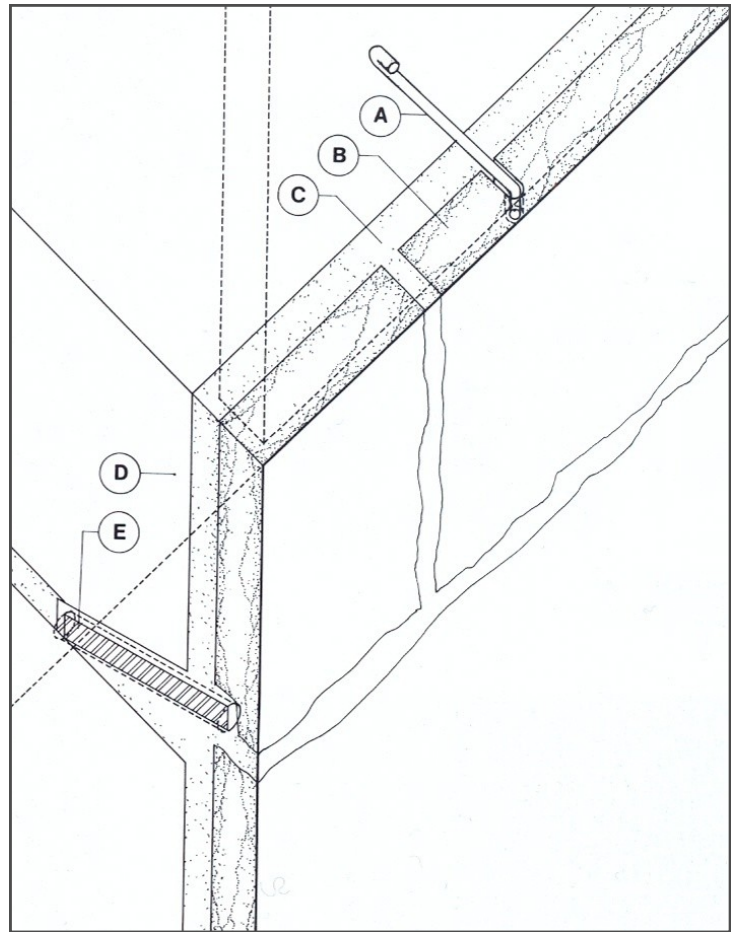
5.3.37



5.3.38



5.3.39



5.3.40

■ AUGUSTE PERRET

En el **teatro de los Champs-Élysées** (París, **1911-1913**), Auguste Perret juega hábilmente con la disposición de las placas de mármol blanco, ancladas mecánicamente a un muro de ladrillo interior y a la estructura de hormigón armado (*figuras 5.3.37, 5.3.38*). La ruptura con la tradición muraria en este caso se consigue con la disposición de las placas en posición vertical y el diseño de las juntas, que corresponden en vertical.³⁹

Este caso constituye el primer ejemplo de muro chapado del siglo XX encontrado en el que se emplean anclajes ocultos en el canto de las placas para colaborar con el mortero.

■ ERIK GUNNAR ASPLUND

En el edificio del **Crematorio del cementerio de Estocolmo**, (**1935-1940**), Asplund utilizó grandes piezas de mármol, con un espesor de 3 centímetros para facilitar el transporte (*figura 5.3.39*). La fijación de las piezas se hacía con unos redondos de bronce de 13 milímetros de diámetro que soportaban el peso de las placas y con unas fijaciones en forma de gancho que estabilizaban la parte superior (*figura 5.3.40*).⁴⁰

■ LOUIS I.KAHN

Otro ejemplo con un sistema más evolucionado es el **Kimbell Art Museum** de Louis Kahn (Fort Worth, Texas, **1972**). En él, Kahn desarrolló un sistema de sujeción de las placas que ya había empezado a investigar en otros proyectos.

Las placas de piedra de mármol travertino, con un espesor de una pulgada y cuarto, casi 4 centímetros,⁴¹ se colocaron revistiendo los paños no estructurales, mientras que la estructura era de hormigón visto al exterior (*figura 5.3.41*). De este modo, pretendía evidenciar el papel no estructural de la piedra. Sin embargo, los cantos de las placas no se dejan a la vista, y las juntas se asemejan a un aparejo tradicional, por lo que se crean un efecto contradictorio.

En su parte inferior cada pieza lleva pegada con resina unos tarugos, del mismo tipo de piedra y espesor que las placas, y de 10 por 20 centímetros. Éstos se apoyan sobre un angular, que a su vez está fijo al soporte interior con un taco de expansión, y al que se fija también un redondo para asegurar que la pieza no puede desplazarse hacia fuera (*figura 5.3.42*). Un alambre con una pequeña T al final estabiliza la parte superior del panel inferior (*figura 5.3.43*).⁴²

5.3.37, 5.3.38

Auguste Perret, teatro de los Champs-Élysées. Dibujos explicativos del sistema de anclaje de las placas. *Archivos Nacionales, París.*

5.3.39

Erik Gunnar Asplund, cementerio de Estocolmo. Detalle de la fachada. Edward R. Ford (1996)

5.3.40

Erik Gunnar Asplund, cementerio de Estocolmo. Axonométrica explicativa del sistema constructivo.

A. Varilla de retención en forma de Z de 6 mm. de diámetro.

B. Placas de mármol de 3 cm. de espesor.

C. Junta de 2 cm. rellena de mortero.

D. Muro soporte.

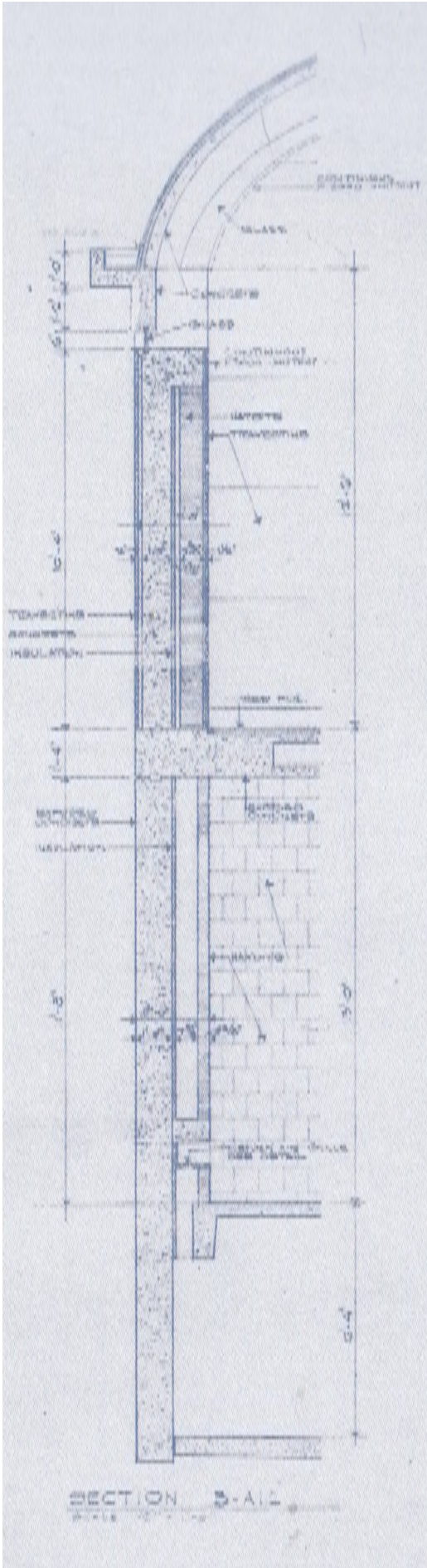
E. Barra de bronce de 13 mm., 2 por panel, para transferir el peso de las placas a la pared soporte. Edward R. Ford (1996)

³⁹ Fannelli, Giovanni; Gargiani, Roberto (1999). El principio del revestimiento. cit. págs. 196-197.

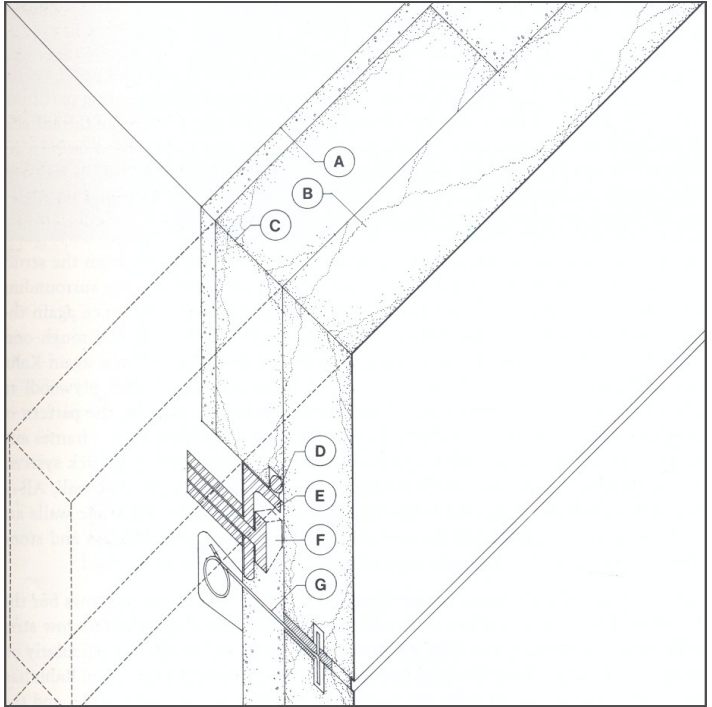
⁴⁰ *Ibidem*.

⁴¹ Ford, Edward, R. (1996). The details of modern architecture. 2, 1928 to 1988. Institute of technology, Massachusetts, págs. 327-333.

⁴² *Ibidem*.



5.3.41



5.3.42



5.3.43

■ SALVADOR GAYARRE

No existen muchos ejemplos de este tipo de sistemas en España ya que, como hemos visto en apartados anteriores, lo común era colocar el revestimiento amorterado sin ningún tipo de anclaje.

Los casos en los que se utilizaron anclajes metálicos para mejorar la fijación de los chapados suele coincidir con una época en la que las fijaciones metálicas ya estaban muy desarrolladas en otros países.

Como ejemplo se podría citar a **Salvador Gayarre**, con su proyecto para la **ampliación del Senado (Madrid, 1987-1991)** (*figuras 5.3.44, 5.2.45*). En él, se utilizaron anclajes dispuestos en las juntas verticales para colaborar con el efecto retenedor del mortero (*figura 5.3.46*).⁴⁹

5.3.8-2 TÉCNICA CONSTRUCTIVA

■ SISTEMA

El sistema consistía en la utilización anclajes metálicos para favorecer una unión más segura de las placas con la pared portante. En estas uniones la resistencia frente a la succión del viento se debe a la acción combinada de la adherencia piedra-mortero y al efecto retenedor de los anclajes situados en los bordes de las placas.⁵⁰

Durante las décadas de mediados de siglo se produjo un gran avance en el sistema de sujeción de placas mediante anclajes metálicos, que colaboraban con el mortero. El primer país donde se empezaron a utilizar estos anclajes de manera generalizada fue Inglaterra, seguido de Estados Unidos e Italia.⁵¹

En los tratados y libros de construcción de mediados de siglo que se veían en estos países, ya se recomendaba la utilización de anclajes por las principales **ventajas** que aportaban:⁵²

- **Mayor seguridad**
- **Aumento de la estabilidad**
- **Planeidad**

Como se ha visto en los edificios singulares expuestos, ya se utilizaban espesores de 5 centímetros e incluso llegando a 3 y a 2 centímetros. Estos espesores tan reducidos se podían conseguir gracias a la maquinaria de corte existente ya

5.3.41
Louis Kahn, Kimbell Art Museum. Sección constructiva.
Preston M. Geren

5.3.42
Louis Kahn, Kimbell Art Museum. Axonometría explicativa del sistema constructivo.
Edward R. Ford (1996)

5.3.43
Louis Kahn, Kimbell Art Museum. Fotografía realizada durante la colocación del revestimiento.
(Mayo, 1972)

⁴⁹ Otero Cifuentes, Antonio (1991). Nuevas soluciones para la fijación de aplacados de piedra natural en la edificación actual. Revista de la edificación, nº9, pp.9-16

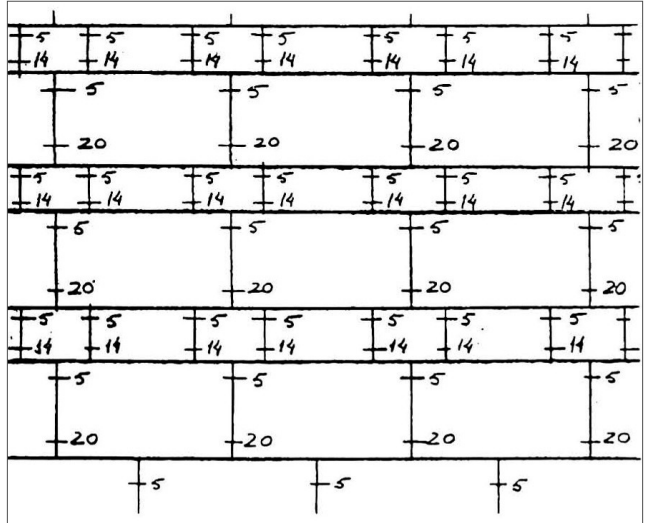
⁵⁰ Vielba Cuerpo, Carmen (2001). La arenisca de Villamayor en revestimientos de fachada. Departamento de construcción y tecnología arquitectónicas. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Tesis doctoral.

⁵¹ Di Silvo, Michele (1993). Facciate di pietra. Il marmo nell'architettura contemporanea: tecnologia dei paramenti esterni tra innovazione e tradizione . cit.

⁵² *Ibidem*.



5.3.44



5.3.46



5.3.45

en ese momento. No obstante, todavía era común utilizar placas de espesores mayores por varias razones:

- Para utilizar rocas blandas y porosas se recomendaba utilizar espesores entre 7 y 10 centímetros, puesto que tienen una resistencia al impacto y a las condiciones climatológicas mucho menor.
- Al empezar a emplear anclajes para la sujeción de las placas, éstas debían tener un grosor mínimo de 2,5 cm, y en la mayoría de los casos preferiblemente de 3 cm, para que la unión entre ambas partes sea adecuada y no se debilite la placa en esos puntos hasta el punto de romper.

■ RELLENO DEL TRASDÓS

Como indica la norma **UNE 22203:2011**, éste puede realizarse mediante:

- Morteros
- Adhesivos cementosos

■ ANCLAJES

□ MATERIALES

Inicialmente estaban constituidas por redondos de acero común, sin resistencia a la corrosión y que, por estar en contacto con la piedra, en lugares en los que se llegaba a altos contenidos de humedad era común que terminaran oxidándose, quedando inservibles.⁵³

Por ello, se empezó a aconsejar que debían ser de acero inoxidable, con la posibilidad de que fueran de bronce fosforado, acero galvanizado o aluminio, siempre y cuando se situaran en zonas protegidas, para evitar la corrosión.⁵⁴

□ APLACADO CLAVETEADO CON TRASDÓS RELLENO DE MORTERO

SISTEMA CONSTRUCTIVO

Ante los numerosos casos de desprendimiento que se produjeron al utilizar piedras que presentaban adherencias muy bajas con el mortero, como la arenisca, se buscó un método que permitiera crear una unión más segura entre la piedra y el mortero.

En España se empezó a utilizar este sistema, a base de una serie de puntos clavadas en el trasdós de la placa que, al ir levantando la fachada, quedaban embutidas en el mortero colocado entre el revestimiento y el muro interior (*figura 5.3.47*).

5.3.44, 5.3.45
Salvador Gayarre,
ampliación del Senado
(Madrid, 1987-1991).
Archivo fotográfico del autor

5.3.46
Salvador Gayarre,
ampliación del Senado
(Madrid, 1987-1991).
Antonio Otero Cifuentes (1991)

⁵³ *Ibídem.*

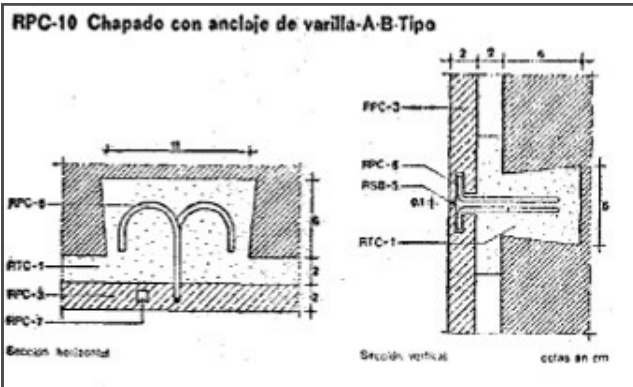
⁵⁴ *Ibídem.*



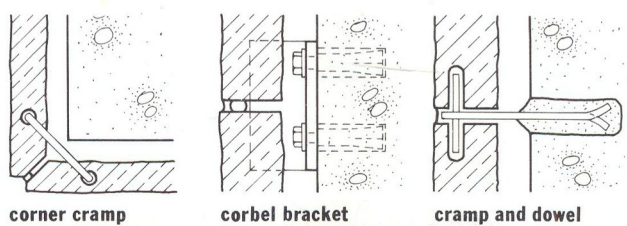
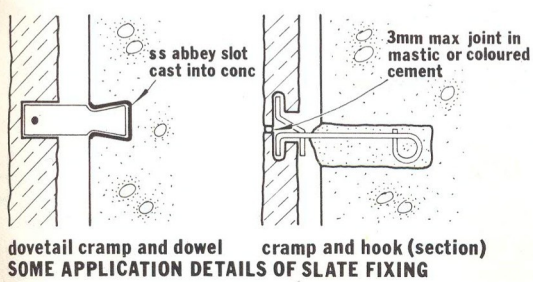
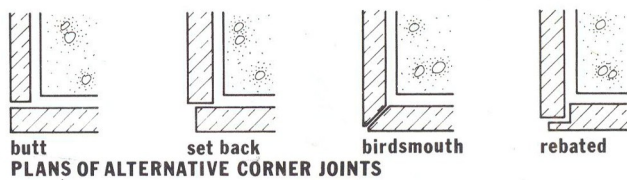
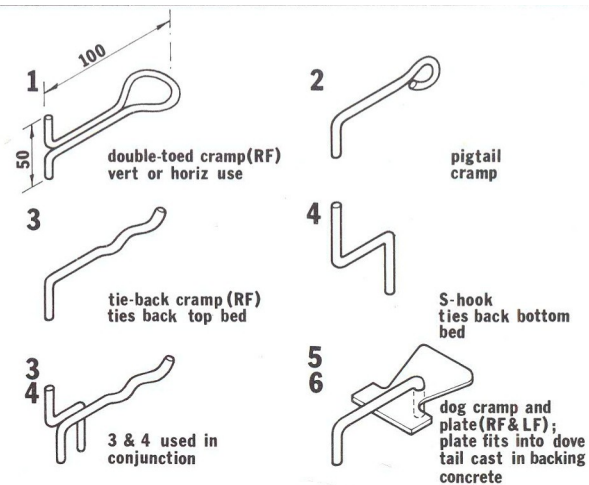
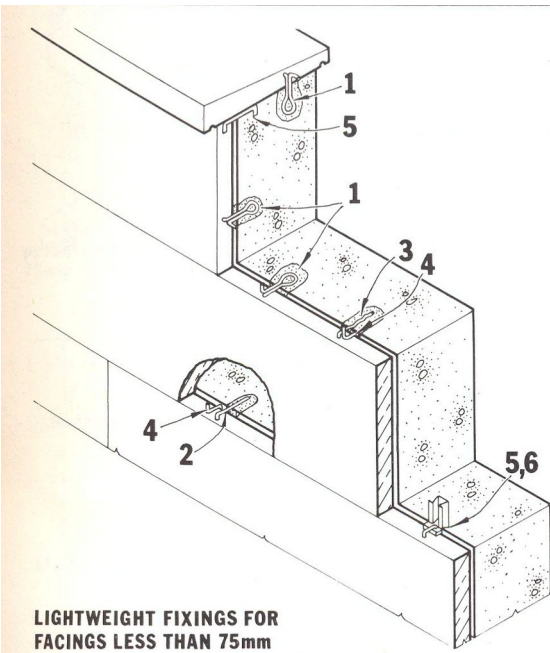
5.3.47



5.3.48



5.3.49



5.3.50

La transmisión de cargas se realizaba, en teoría, de la piedra a los clavos, de éstos al mortero y del mortero al muro interior, de modo que, al menos en teoría, la piedra trabajaba como si estuviese “colgada” del muro.⁵⁵

En la práctica, sin embargo, el aún considerable peso de estas placas (las placas de estas piedras, como la arenisca, tenían espesores de entre 7 y 10 centímetros) hacía que parte del peso propio de cada pieza se transmitiera a la pieza inferior.⁵⁶

Para evitar estas tensiones rasantes se procuraba el apoyo del revestimiento en los sucesivos forjados. Para ello, se utilizaban unas piezas especiales en forma de L con una de sus alas apoyadas en la parte superior del forjado. El borde de la otra ala quedaba igualmente apoyada sobre un perfil metálico sujeto al forjado (*figura 5.3.48*).⁵⁷

□ APLACADO CON VARILLA DE RETENCIÓN FIJADA A CAJEADO Y TRASDÓS RELLENO DE MORTERO

SISTEMA CONSTRUCTIVO

Este sistema sustituyó rápidamente a la colocación simplemente amorturada, por aportar una unión mucho más segura de las partes, en muchos países europeos. En España, no fue hasta el año **1973** cuando las normas tecnológicas difundieron una solución de este tipo para la colocación de los aplacados de piedra de bajos espesores (*figura 5.3.49*).

Consistía básicamente en una serie de anclajes consistentes en una varilla de metal de 5 o 6 milímetros de diámetro doblada en los extremos. En este sistema los anclajes se utilizaban únicamente para retener las placas, evitando su inclinación o desprendimiento.⁵⁸

TIPOLOGÍA

Existían distintos tipos de anclajes según el tipo de piedra utilizado, así como el lugar de procedencia (*figura 5.3.50*):

- Simple para uso en juntas horizontales
- Conjunto de dos anclajes simples para uso en juntas horizontales
- Simple de remate superior
- Simple de remate inferior
- Doble para uso en juntas horizontales o verticales

5.3.47
Piedra claveteada.
Carmen Vielba Cuerpo
(2001)

5.3.48
Solución para la colocación del aplacado en el encuentro con el forjado.
Carmen Vielba Cuerpo
(2001)

5.3.49
Soluciones constructivas propuestas por la Norma Tecnológica.
(1973)

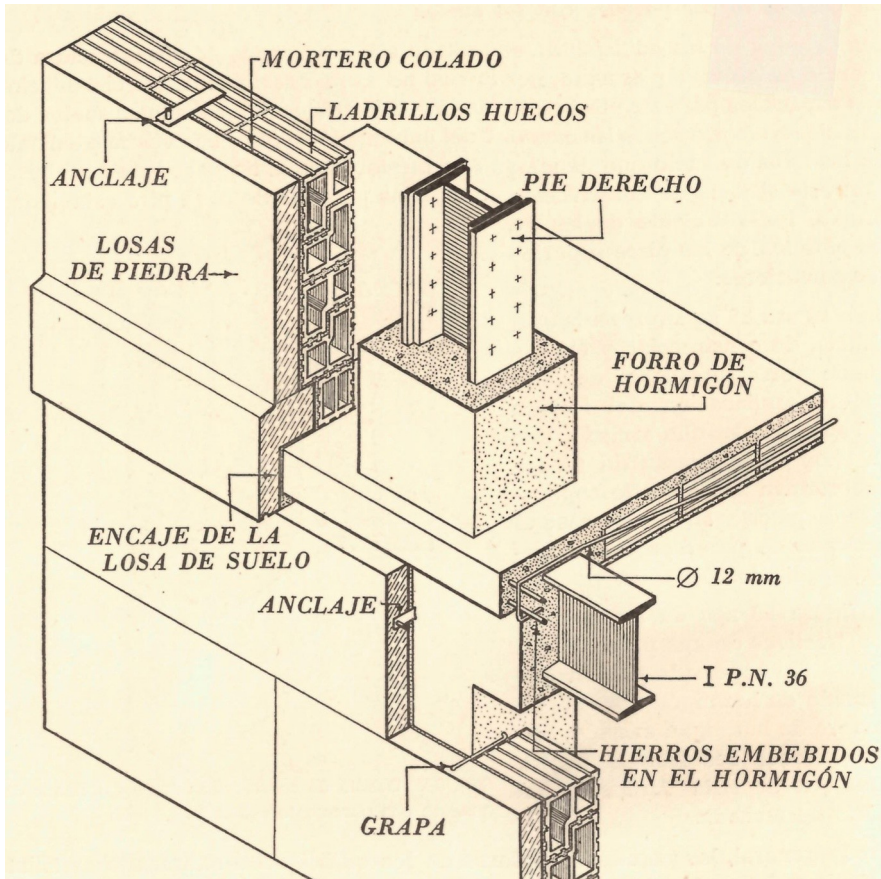
5.3.50
Soluciones constructivas para la sujeción de chapados mediante anclajes. Soluciones inglesas.
John Ashurst (1977)

⁵⁵ Vielba Cuerpo, Carmen (2001). La arenisca de Villamayor en revestimientos de fachada. cit.

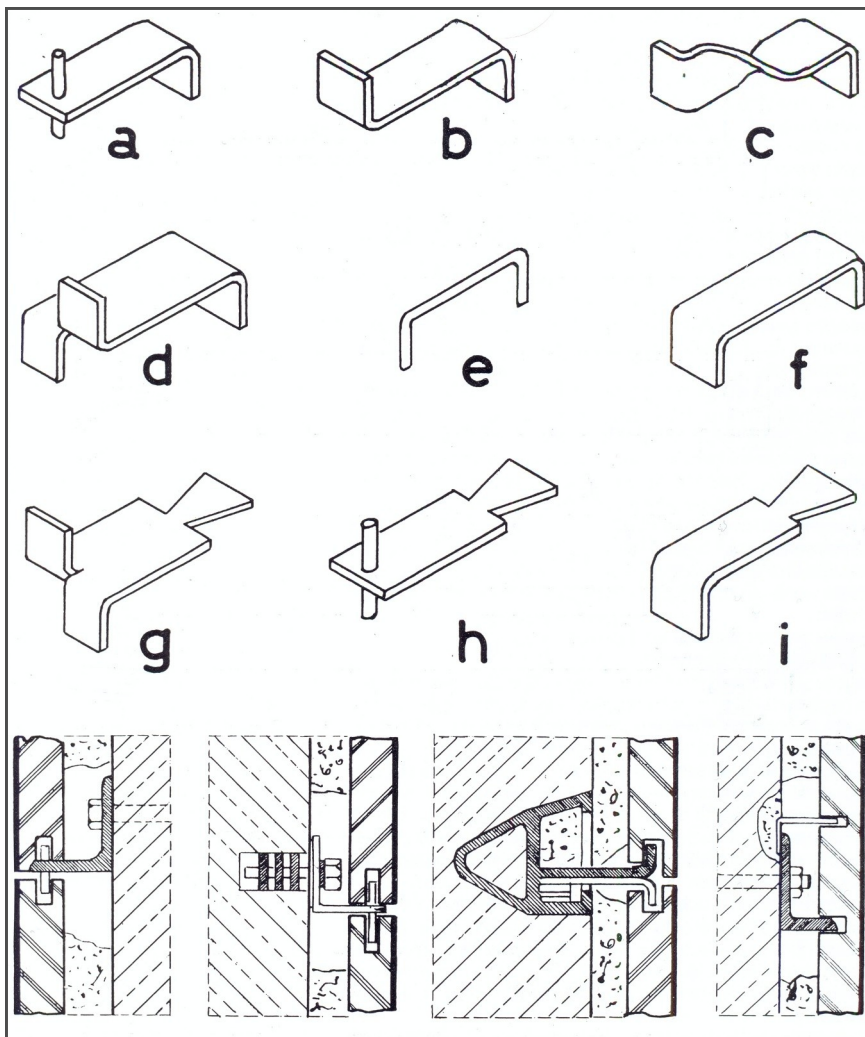
⁵⁶ Ibídem.

⁵⁷ Ibídem.

⁵⁸ Di Silvo, Michele (1993). Facciate di pietra. Il marmo nell'architettura contemporanea: tecnologia dei paramenti esterni tra innovazione e tradizione . cit.



5.3.51



5.3.52

SOPORTE

Para la adecuada utilización de este sistema, el soporte puede ser de los siguientes tipos:

- Macizo
- Ladrillos perforados siempre y cuando los orificios sean de un tamaño de tal manera que el cajeado no se vea afectado por un hueco.

JUNTAS

Como indica la norma **UNE 22203:2011**, Los tipos de juntas a tener en cuenta son:

- Juntas estructurales

Coinciden con las del edificio y tienen su misma anchura y posición. El sellado se puede hacer con masilla hasta una anchura de 2 cm. las juntas estructurales de mayor tamaño se deben cubrir con tapajuntas.

- Juntas verticales o de expansión

Se deben colocar juntas verticales aproximadamente cada 8 m. Su anchura debe ser de unos 10 mm.

- Juntas de unión o de contorno

Constituyen las juntas entre las unidades del aplacado y de éstas con el contorno del aplacado. Su anchura debe ser al menos de 4 mm, aunque para piezas de grandes formatos pueden alcanzar valores superiores.

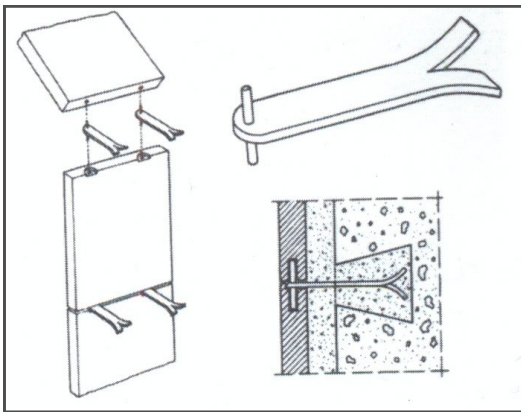
PUESTA EN OBRA

Todo el proceso de puesta en obra está regulado según la norma **UNE 22203:2011**, que indica:

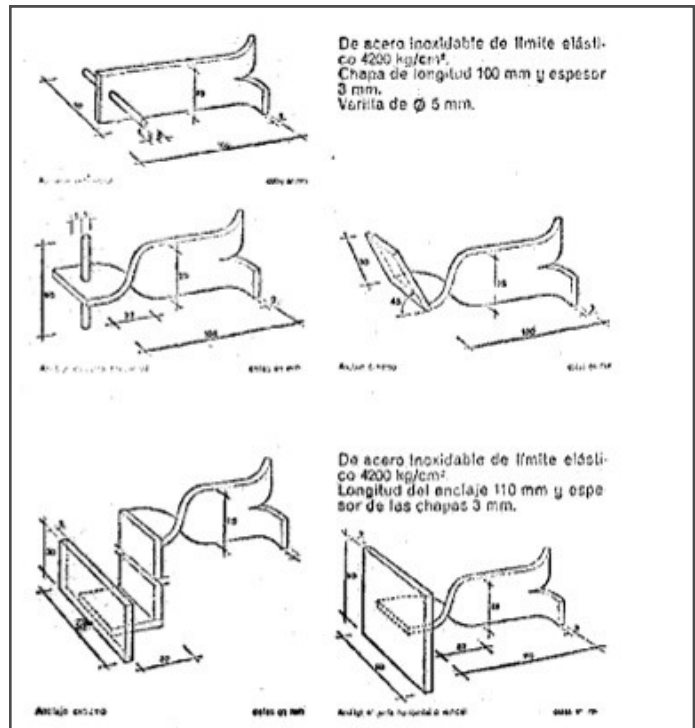
1. Cada placa dispone de, al menos, 4 varillas, generalmente dos en el canto superior y otras dos en el inferior, separadas 400 milímetros como máximo. Por ello, la dimensión de las placas en planta no podía ser nunca superior a 60 centímetros.
2. Las varillas de retención se enganchan, por uno de sus extremos a orificios perforados sobre el canto de las placas y por el otro se alojan en un cajeado, en forma de cola de milano, realizado a tal efecto sobre el soporte.
3. El cajeado, una vez recibida la varilla, se rellena con mortero de cemento.
4. Se deben disponer placas de PVC en las caras horizontales, para facilitar el contacto entre piezas contiguas y evitar su desportillado.
5. Rejuntado (ver subcapítulo rejuntado pág. 153)

5.3.51
Solución para la colocación del aplacado con anclajes metálicos.
E. G. Warland (1947)

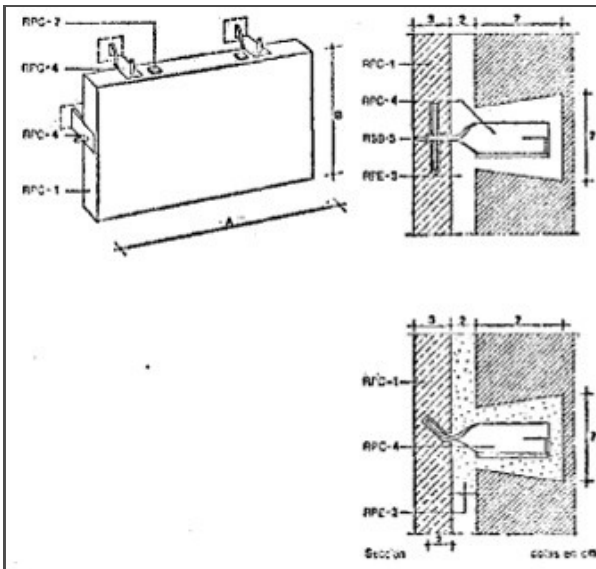
5.3.52
Tipologías de anclajes para la sujeción de chapados. Soluciones italianas.
Guía técnica del mármol (1972)



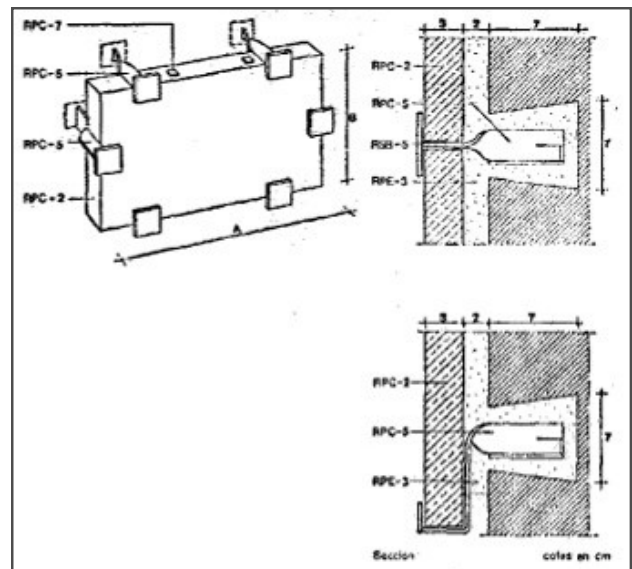
5.3.53



5.3.54



5.3.55



5.3.56

SISTEMA CONSTRUCTIVO

A partir de los años 40 ya se empezaron a difundir tratados de construcción en los que se recomendaba la utilización de este sistema por ser más fiable. En ellos se representaba de una manera más o menos detallada los distintos tipos de anclajes (*figuras 5.3.51, 5.3.52*).

En España, en cambio, la técnica de anclajes de conexión no estaba aún difundida, y los libros españoles sobre construcción moderna en los que se explicaban dichos anclajes eran traducciones o versiones de libros extranjeros.

Estos sistemas no empezaron a contemplarse hasta que la empresa Fopima, explotadora de las canteras de Montjuic en Barcelona, y una de las empresas líderes del sector en esa época, emprendió un estudio, con el que llegó a las siguientes conclusiones:

Los efectos expansivos del fraguado del cemento rápido o el yeso, la colocación sobre estructuras porticadas más deformables que el muro clásico, el uso de fijaciones susceptibles de oxidación y la pérdida de adherencia de la relación placa-mortero explicaban esos accidentes.⁵⁹

Por ello, la empresa propuso colocar las piezas con una junta mínima de 1mm y confiar la sujeción de la placa a unas grapas de acero inoxidable que resistían el peso de las placas en la parte inferior y las aseguraban en la superior (*figura 5.3.53*).⁶⁰

En el año 1973, las Normas tecnológicas recogieron estas propuestas y difundieron una serie de soluciones para la colocación de los aplacados de piedra en bajos espesores (*figuras 5.3.54, 5.3.55, 5.3.56*).

En estas uniones la resistencia frente a la succión de viento se debe a la acción combinada de la adherencia piedra-mortero y al efecto retenedor de los anclajes situados en el borde de la placa.

Pero si la piedra no presentaba una buena adherencia con el mortero, la resistencia quedaba únicamente confiada a los anclajes, sobre los que se producía una alta concentración de esfuerzos. Mientras tanto la piedra empezaba a trabajar a flexión comportándose como una placa sustentada en puntos aislados de su borde.⁶¹

Por tanto, los anclajes que fueron apareciendo posteriormente (*figuras 5.3.57, 5.3.58, 5.3.59*) presentaban unos diseños mas evolucionados con unas nociones

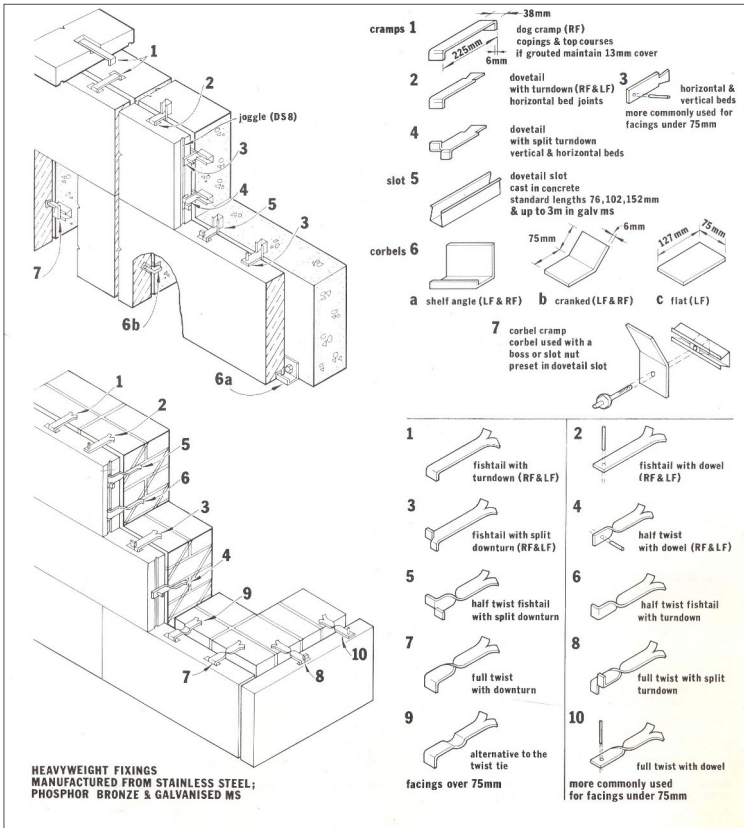
5.3.53
Soluciones constructiva propuesta por la empresa Fopima.

5.3.54, 5.3.55, 5.3.56
Soluciones constructivas propuestas por la Norma Tecnológica. (1973)

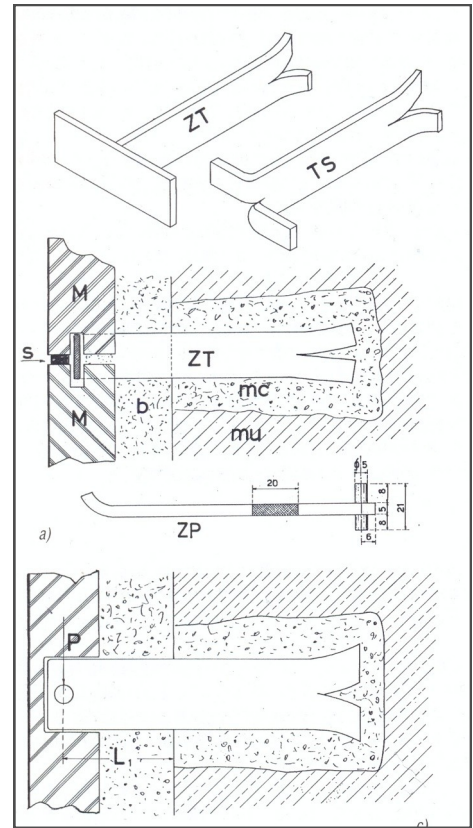
⁵⁹ Avellaneda, Jaume; Paricio, Ignacio. (2000). Los revestimientos de piedra. cit. pág. 7.

⁶⁰ *Ibidem*.

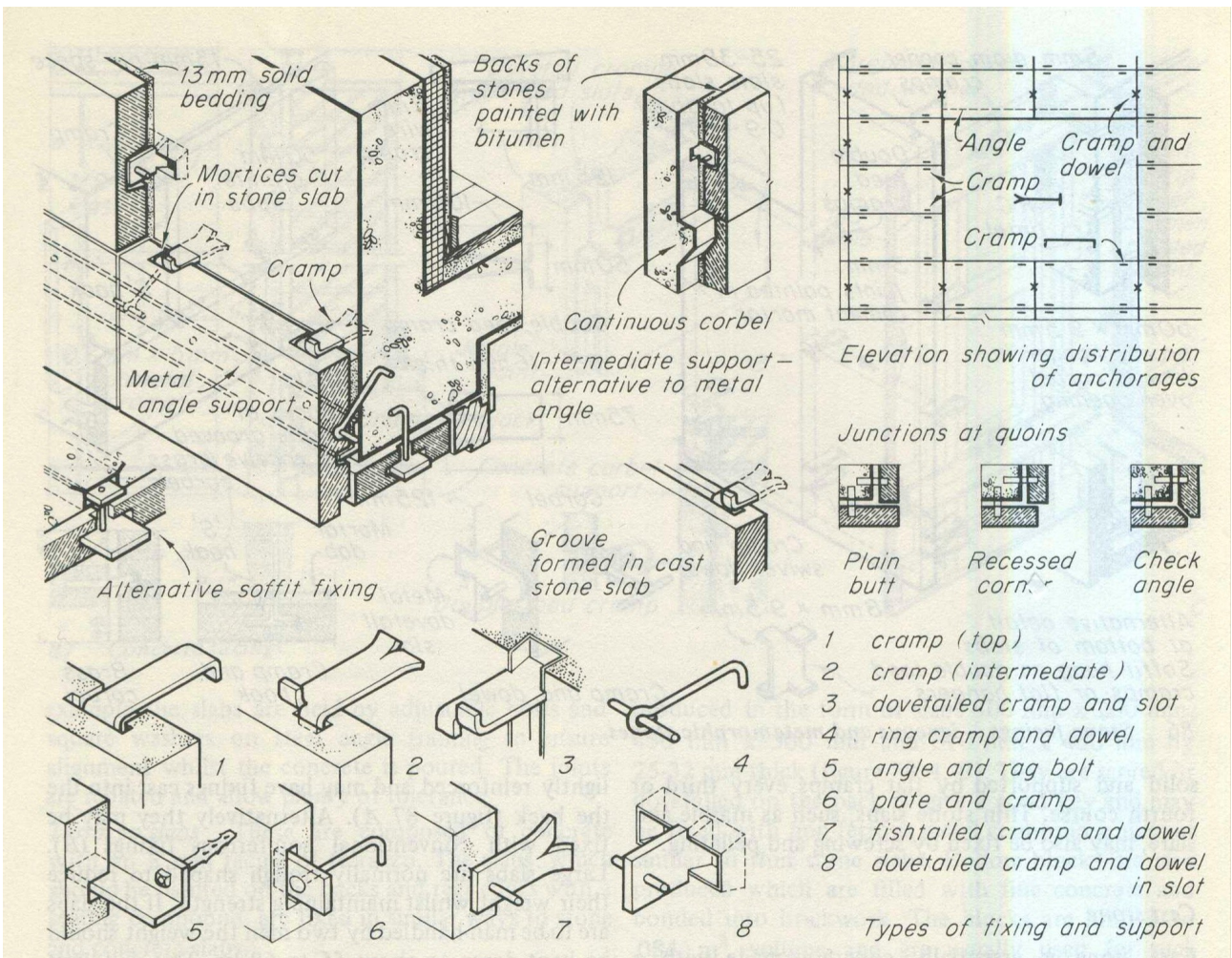
⁶¹ Vielba Cuerpo, Carmen (2001). La arenisca de Villamayor en revestimientos de fachada. cit.



5.3.57



5.3.58



5.3.59

de comportamiento estructural mucho más desarrolladas. Estos modelos empezaban a ser bastante cercanos a los anclajes puntuales utilizados en las primeras fachadas trasventiladas.

SOPORTE

Para la adecuada utilización de este sistema, el soporte puede ser de los siguientes tipos:

- Macizo
- Ladrillos perforados siempre y cuando los orificios sean de un tamaño de tal manera que el cajeadado no se vea afectado por un hueco

RELLENO DEL TRASDÓS

Puede realizarse mediante:

- Morteros
- Adhesivos cementosos

TIPOLOGÍA DE ANCLAJES

- Según su función
Anclaje de retención o antivuelco
Anclaje de carga o de sustentación
- Según su disposición
Anclaje dispuesto en juntas horizontales
Anclaje dispuesto en juntas verticales
- Según su forma
Anclaje de vástago
Anclaje de pestaña

5.3.57
Soluciones constructivas para la sujeción de chapados mediante anclajes. Soluciones inglesas.
John Ashurst (1977)

5.3.58
Soluciones constructivas para la sujeción de chapados mediante anclajes. Soluciones italianas.
Guía técnica del mármol (1972)

5.3.59
Soluciones constructivas para la sujeción de chapados mediante anclajes. Soluciones americanas.
Harington Foster (1979)

JUNTAS

Según indica la norma **UNE 22203:2011**, las juntas a tener en cuenta son:

- Juntas estructurales

Coinciden con las del edificio y tienen su misma anchura y posición. El sellado se puede hacer con masilla hasta una anchura de 2 cm. las juntas estructurales de mayor tamaño se deben cubrir con tapajuntas.

- Juntas verticales asociadas al soporte

Se corresponden con la posición y el ancho de las juntas del soporte. Su profundidad debe ser igual a la suma del espesor de la piedra más el del mortero.

- Juntas de perímetro de los plano de fachada

Situadas en el perímetro de contorno entre los paños de revestimiento y los elementos rígidos de fachada. Su anchura debe ser al menos de 10 mm y su profundidad igual al espesor de la placa más el del mortero.

- Juntas horizontales o de compresión

Son juntas horizontales que se colocan a nivel de forjado y en el encuentro de la coronación. Deben tener una anchura mínima de 15 mm. Su profundidad igual al espesor de la placa más el del mortero.

- Juntas de unión

Se deben colocar tanto en tendeles como en yagas, con una anchura mínima de 2 mm y con separadores que deben retirarse antes de colocar la hilada superior.

- Juntas verticales de dilatación

Se deben colocar juntas verticales aproximadamente cada 4 m con una anchura de unos 20 mm. Su profundidad debe ser la de la placa más la del mortero.

□ PUESTA EN OBRA

Todo el proceso de puesta en obra está regulado según la norma **UNE 22203:2011**, que indica:

1. Cada placa lleva 4 anclajes, bien dos en el canto inferior de la pieza y dos en la superior, bien dos en cada cara lateral.
2. Este debe rellenar completamente el espacio existente entre la placa y el soporte. No se debe colocar con pellas.
3. En este tipo de sujeción, resulta de gran importancia evitar que el agua no penetre a través de las juntas.
3. Se deben disponer separadores de PVC en las caras horizontales, para evitar el contacto entre piezas contiguas y evitar su desportillado.
4. Rejuntado (ver subcapítulo rejuntado, pág. 153)

5.3.9 CONCLUSIONES PARCIALES

- Los primeros revestimientos de placas delgadas de poco espesor se utilizaron en roma a partir del s. II d.C. Éstas placas, que llegaron a ser de espesores de hasta 1 mm, eran colocadas amorteradas sobre un paramento ya construido previamente, con una finalidad exclusivamente estética. En cualquier caso constituyen el primer caso de chapado conocido.
- Posteriormente los arquitectos bizantinos recuperaron esta técnica y desarrollaron durante el siglo VI los únicos ejemplos en los que se conservan aún las grapas de sujeción originales.
- Tras esta etapa se dejó temporalmente de producir placas delgadas, por falta de medios. Por tanto, los chapados no se volvieron a utilizar hasta que aparecieron de nuevo máquinas que lo hacían po-

sible.

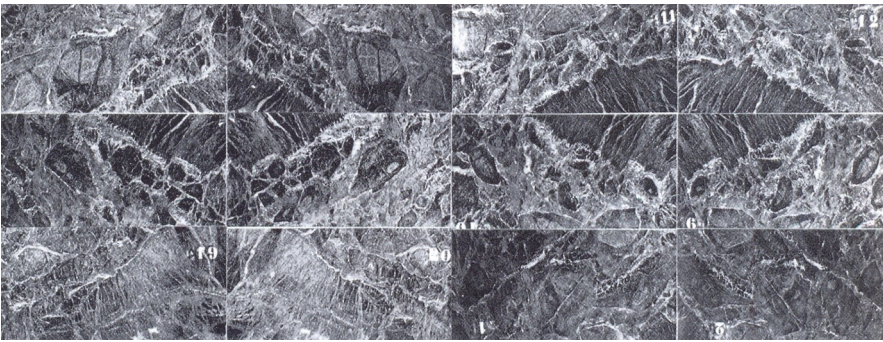
- Con la llegada de la modernidad se fueron desarrollando nuevos conceptos arquitectónicos y técnicas constructivas. La distinción entre estructura y cerramiento, y la evidencia del papel no estructural de la piedra motivaron en gran medida la utilización de revestimientos de piedra a modo de chapados.
- Los arquitectos de la modernidad, especialmente Otto Wagner y Adolf Loos, se posicionaron como los grandes impulsores de la utilización de placas delgadas de piedra. Otto Wagner ideó un sistema constructivo basado en la fijación de las placas de piedra mediante tornillos o perfilería vista. Estos sistemas, que pueden considerarse como los primeros chapados modernos, anticiparon los conceptos de estabilidad y fijación de placas que se desarrollarían con posterioridad. La idea de que la piedra era un material que podía adaptarse a los nuevos requerimientos constructivos y al concepto de revestimiento impulsó en gran medida su utilización a lo largo del siglo XX.
- La técnica de chapados sujetos mediante una capa de mortero en el trasdós de las piezas, junto al efecto retenedor de las grapas o anclajes, se desarrolló de una manera muy rápida en Italia, Inglaterra, Estados Unidos y Alemania, motivado en gran medida por el dominio que adquirieron con la utilización de estructuras de acero. Este sistema, rápidamente se asentó como el más efectivo y adecuado para la fijación de la piedra.

Sin embargo, en otros países como España estas técnicas de anclajes tardaron en llegar. Los chapados se colocaban únicamente amorterados, y al no ser ésta la técnica más adecuada de fijación se produjeron numerosos desprendimientos.

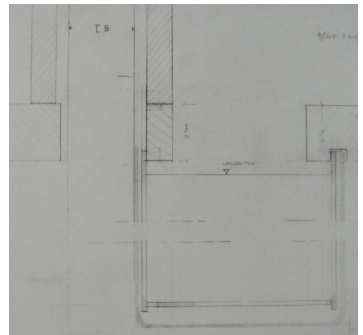
- Los sistemas de retención que sujetaban las placas de piedra pasaron de ser simples clavos o varillas a lo que podríamos considerar como anclajes propiamente dichos. Pese a no estar pensados para trabajar estructuralmente, existían anclajes desarrollados durante los años 70 que se comportaban de una manera muy similar a los anclajes simples que se utilizarían posteriormente en las fachadas trasventiladas, especialmente cuando, con el tiempo, la capa de mortero se iba desprendiendo y la placa empezaba a quedar “colgada” por el efecto de los anclajes.



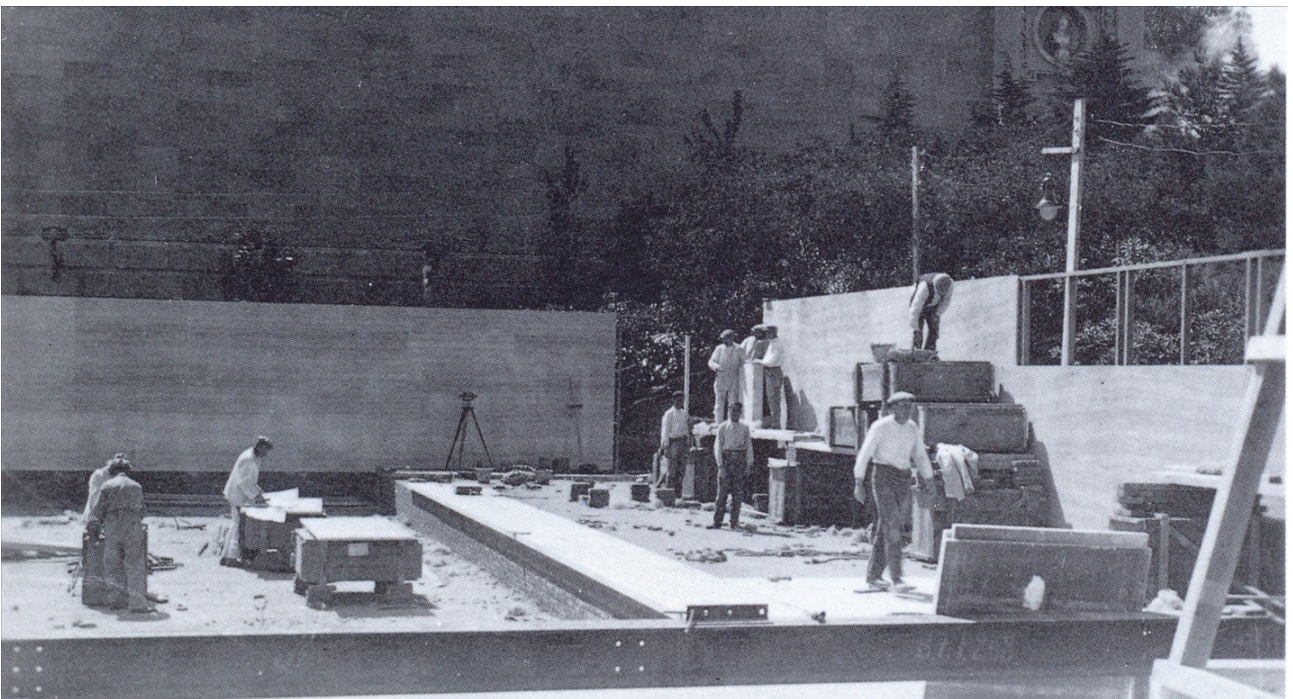
5.4.1



5.4.2



5.4.4



5.4.3

5.4 FACHADA TRASVENTILADA

5.4.1 PRIMERAS FACHADAS TRASVENTILADAS

5.4.1-1 ANTECEDENTES

Existen una serie de proyectos construidos en distintas décadas del siglo XX que, a pesar de no poder considerarse aún fachadas ventiladas propiamente dichas, poseían soluciones que ya anticipaban una serie de cuestiones muy cercanas a esta solución. En estos casos se eliminaban los morteros o adhesivos, de manera que las placas de piedra ya quedaban separadas de la pared soporte mediante una **cámara** donde se incluía una **perfilería** para la fijación de las mismas.

■ MIES VAN DER ROHE

Mies van der Rohe fue uno de los primeros representantes del movimiento moderno que recurrió al chapado de piedra para la ejecución de la fachada. En el **pabellón alemán de la Exposición Internacional de Barcelona (1928-1929)** (*figura 5.4.1*) utilizó placas de diferentes tipos de mármol según el muro, y de dimensiones 220 centímetros de largo por 110 centímetros de alto y 3 centímetros de espesor (*figura 5.4.2*).¹

En los muros exentos no portantes, la solución adoptada era muy novedosa para esa época. Consistía en un entramado de perfiles metálicos en los cuales se engarzaban las losas de mármol mediante un sistema de tornillería adecuado (*figura 5.4.3*). Mies ensayó este sistema en este proyecto para años después difundirlo en Estados Unidos.²

No se puede determinar con exactitud la tipología de la tornillería utilizada, puesto que los detalles constructivos encontrados sólo indicaban la posición del perfil metálico y de las placas, pero no dibujan la fijación (*figura 5.4.4*).

Para crear la sensación visual de que todo el muro era macizo, las testas de los muros tenían un grosor de 17 centímetros, equivalentes al grosor total de la fachada.³

Este sistema utilizado tiene una relación muy clara con el sistema de subestructura de perfiles a los que se fijan las placas de piedra, utilizado en las fachadas trasventiladas.

5.4.1
Mies Van der Rohe,
Pabellón alemán de la
Exposición Internacional
de Barcelona (1928
-1929).
Jean-Louis Cohen
(2007)

5.4.2
Mies Van der Rohe,
Pabellón de Barcelona.
Estudio para la dispo-
sición de las placas de
mármol.
AA.VV (1993)

5.4.3
Mies Van der Rohe,
Pabellón de Barcelona.
Fotografía de obra.
Colocando las placas
de mármol en la es-
tructura metálica del
muro.
*Mies van der Rohe
Archive, The Museum
of Modern Art, MOMA,
Nueva York*

5.4.4
Mies Van der Rohe,
Pabellón de Barcelona.
Sección.
Garland Publishing
(1992)

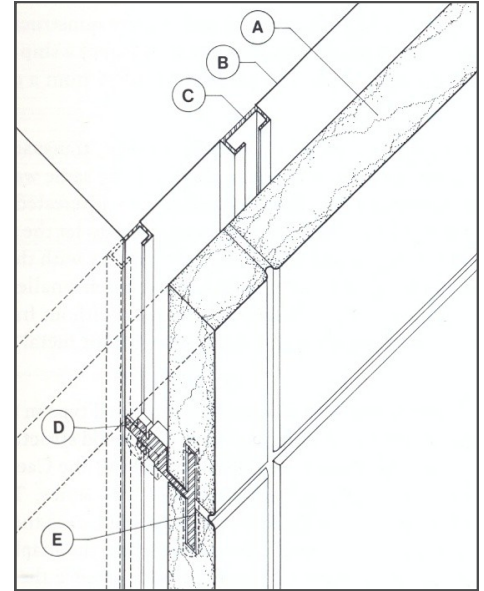
¹ Datos obtenidos de dibujos del archivo de Mies van der Rohe. The Mies van der Rohe Archive.2. (1986) Ed. Arthur Drexler, Garland Publishing, New York. págs. 235-244.

² De Solà-morales, Ignasi; et al...(1993). Mies Van der Rohe. El pabellón de Barcelona. Gustavo Gili, Barcelona. pág. 16.

³ Ford, Edward,R.(1996). The details of modern architecture. 2, 1928 to 1988. Institute of technology, Massachusetts.



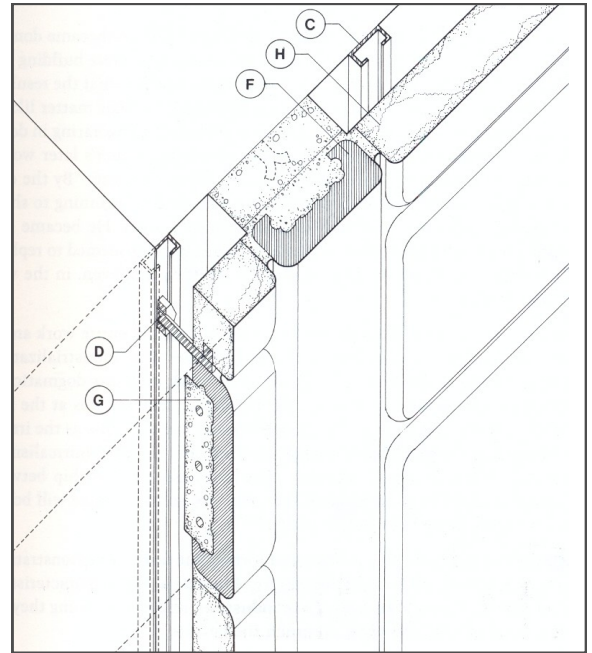
5.4.5



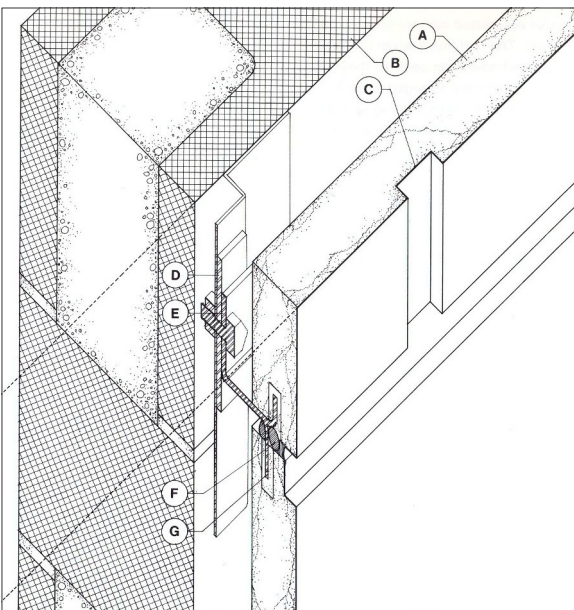
5.4.6



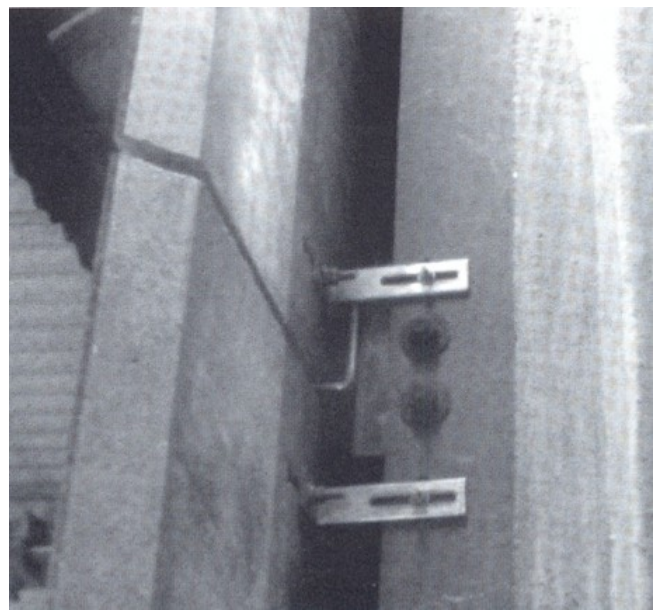
5.4.8



5.4.7



5.4.9



5.4.10

■ ALVAR AALTO

En el **Centro Cultural Wolfsburg**, de Alvar Aalto (Alemania, **1958–1962**) (*figura 5.4.1*) se utilizó un aplacado de granito de 4 centímetros de espesor, separado del soporte y fijado mediante anclajes puntuales ocultos a unas guías verticales (*figuras 5.4.5, 5.4.6*).⁴

■ MICHAEL GRAVES

En el edificio **Humana Building**, de Michael Graves (Louisville, Kentucky, **1982**) las placas se fijaron mediante anclajes puntuales ocultos a la pared soporte de hormigón (*figuras 5.4.8, 5.4.9*).⁵

Las esquinas se solucionaron cortando las placas a inglete y fijándolas de una forma muy singular. La fijación encargada de transmitir las cargas a la hoja interior se atornilló mediante una pieza metálica en un vaciado practicado en el reverso de las placas (*figura 5.4.10*).⁶

En los dos últimos ejemplos las juntas están selladas, por lo que la cámara que se forma entre el revestimiento y la hoja interior no está ventilada. Sin embargo, la disposición de todos los elementos está muy próxima a la de los modernos aplacados ventilados.

5.4.1-2 JAMES STIRLING. STAATSGALERIE

■ PROYECTO

En el año 1983 se terminó la construcción de la ampliación de la *Staatsgalerie* (Stuttgart, **1979-1983**), proyecto de los arquitectos James Stirling y Michael Wilford. Esta obra clave de la postmodernidad arquitectónica estuvo desde el principio muy unida a la polémica.

La piedra se coloca aludiendo a la construcción tradicional a base de sillares que forman un aparejo *pseudo isodomo*. Incluso se hacen constantes referencias a las construcciones romanas (*figura 5.4.11*).

La elección del tamaño de las piezas se realizó en función de la diferente dureza de las piedras elegidas, travertino y arenisca. El grosor siempre es de 4 centímetros pero la altura de la banda de travertino es más del doble que la de arenisca (*figuras 5.4.12, 5.4.13*).⁷

5.4.5
Alvar Aalto, Centro Cultural Wolfsburg (Alemania, 1958–1962).
Edward R. Ford (2003)

5.4.6, 5.4.7
Alvar Aalto, Centro Cultural Wolfsburg (Alemania, 1958–1962). Detalles constructivos de la fijación de las placas de piedra.
Edward R. Ford (2003)

5.4.8
Michael Graves, Humana Building (Louisville, Kentucky, 1982).
Y. Futagawa (1984)

5.4.9
Michael Graves, Humana Building (Louisville, Kentucky, 1982). Detalle constructivo de la fijación de las placas de piedra.
Edward R. Ford (2003)

5.4.10
Michael Graves, Humana Building (Louisville, Kentucky, 1982). Detalle de la solución en esquina.
Ignacio Paricio (2000)

⁴ Ford, Edward, R. (1996). The details of modern architecture. 2, 1928 to 1988. Institute of technology, Massachusetts.

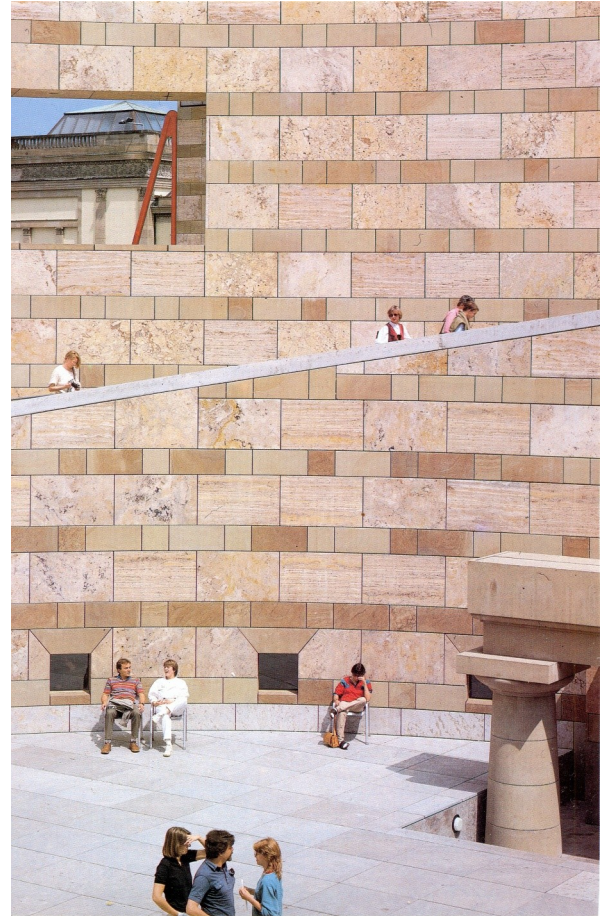
⁵ *Ibíd.*

⁶ *Ibíd.*

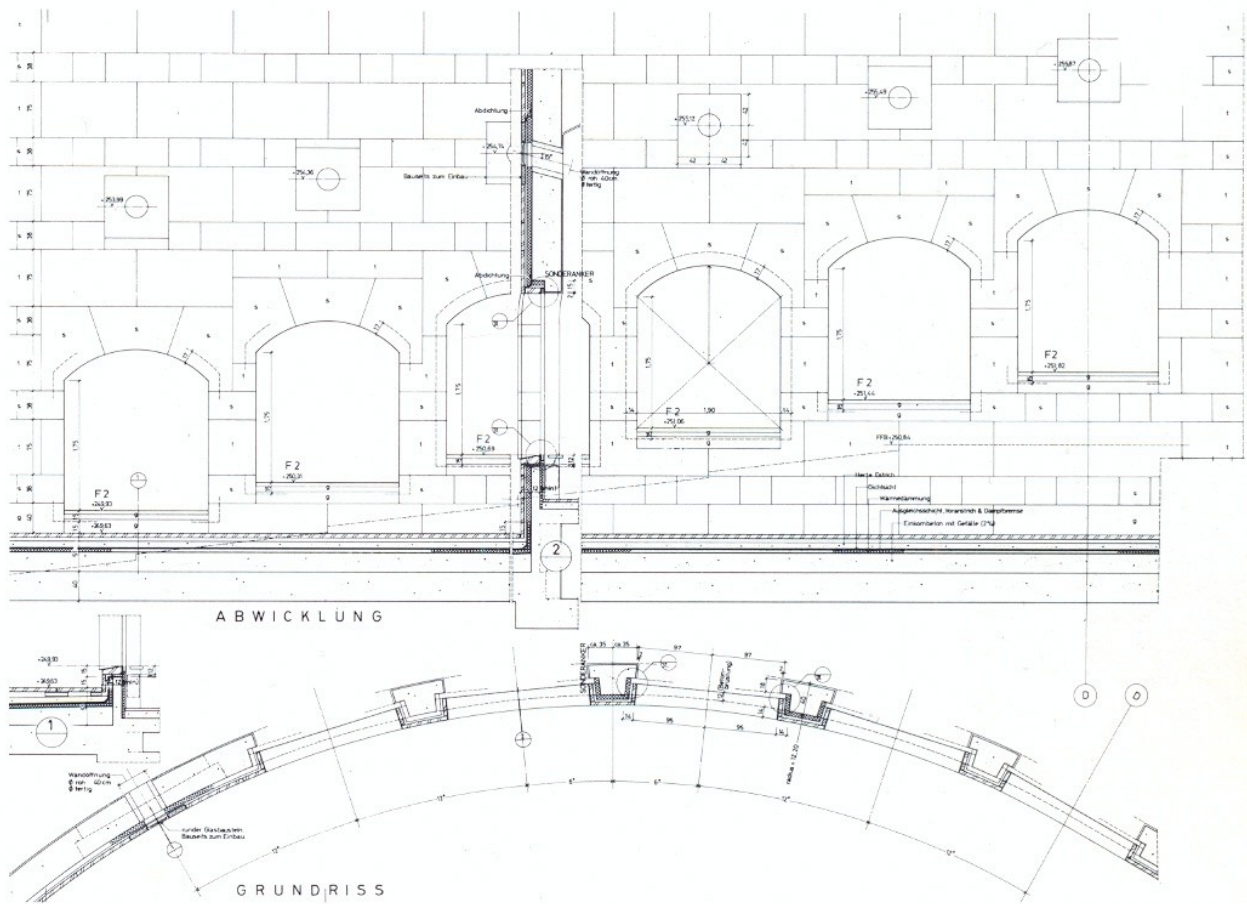
⁷ Avellaneda, Jaume; Paricio, Ignacio (2000). Los revestimientos de piedra. Bisagra, Barcelona, 2ª edición. pág. 24.



5.4.11



5.4.12



5.4.13

Son precisamente las gruesas y profundas juntas, que crean una línea muy marcada, así como los cantos vistos en las esquinas las que dan la pista del verdadero sistema constructivo.

■ TÉCNICA CONSTRUCTIVA

Las placas de piedra se sujetaban al muro interior de hormigón mediante **anclajes metálicos** ocultos puntuales, dejando una cámara de 10 centímetros entre ambos. En ella se incluyen 6 centímetros de aislamiento adosado al muro interior, formando los restantes 4 centímetros una **cámara de aire ventilada**. De esta forma, el edificio de Stirling se convirtió en uno de los primeros ejemplos en los que se utilizó este sistema denominado **fachada trasventilada**.⁸

5.4.1-3 ADOLFO NATALINI. EDIFICIO PARA LA BANCA DE ALZATE BRIANZA

■ PROYECTO

En los mismo años, Adolfo Natalini proyectó el **edificio para la Banca de Alzate Brianza** (Como, 1978-1983) (*figura 5.4.14*), un edificio en la misma línea de composición de fachada que el de Stirling, pero introduciendo ciertos elementos que requerían un estudio detallado de las soluciones adoptadas.

La construcción, en hormigón armado, está totalmente recubierta de placas de granito. Las listas se enfatizan con los diversos tonos de la piedra clara flameada y de la piedra gris oscura pulida.⁹

■ TÉCNICA CONSTRUCTIVA

Cada placa se sujeta mediante dos **anclajes inferiores de sustentación** y dos **anclajes superiores de retención**, dejando una cámara de aire ventilada entre ésta y la pared soporte (*figura 5.4.15*). Este sistema se utilizó a lo largo de toda la fachada, adaptándose en las esquinas para poder sostener las placas especiales que se diseñaron en cada una de ellas para eliminar uniones que dejaran ver el real grosor de las placas (*figuras 5.4.16, 5.4.17*).

5.4.11

James Stirling y Michael Wilford, ampliación de la *Staatsgalerie* (Stuttgart, 1979-1983). Alusión a las construcciones romanas. Peter Walser (1985)

5.4.12

James Stirling y Michael Wilford, ampliación de la *Staatsgalerie* (Stuttgart, 1979-1983). Iván Nemeč (1985)

5.3.13

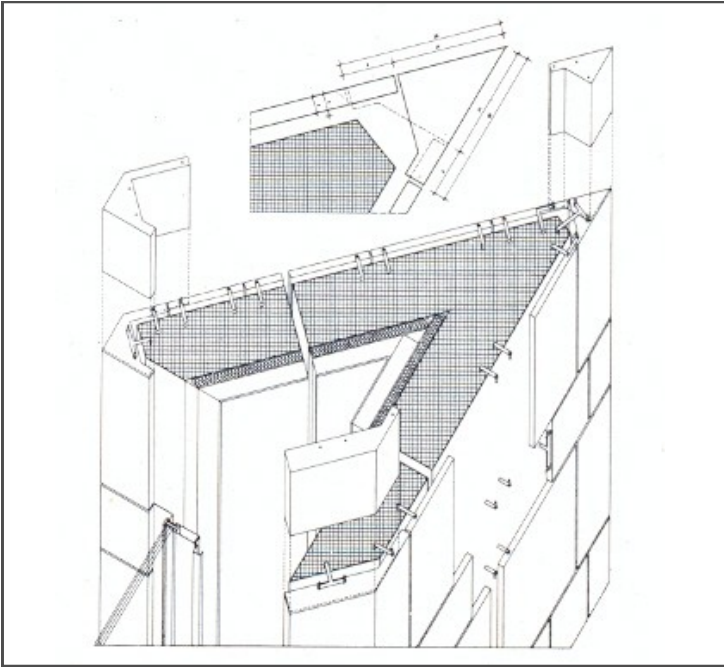
James Stirling y Michael Wilford, ampliación de la *Staatsgalerie* (Stuttgart, 1979-1983). Detalle del despiece. Francesco dal Co (1992)

5.4.1-4 FRANCISCO JAVIER SÁENZ DE OÍZA

Este estilo arquitectónico y constructivo desarrollado en los casos expuestos se hizo popular y no tardó en llegar a España. Uno de los primeros en adoptarlo fue Francisco Javier Sáenz de Oíza, que diseñó el **Palacio de Festivales de Santander** (1987-1991) con un despiece a base de placas de mármol de distinta co-

⁸ Ford, Edward,R.(1996). The details of modern architecture. 2, 1928 to 1988. Institute of technology, Massachusetts.

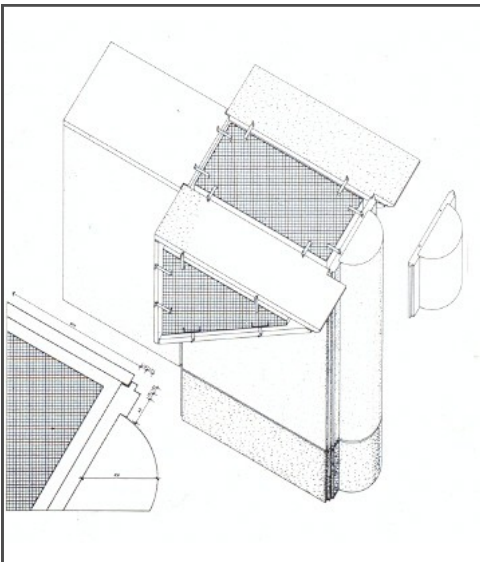
⁹ Datos obtenidos de la página web del arquitecto. <http://nataliniarchitetti.com/progetti/galleria.php?Categoria=lavoro&Progetto=7600> (Consulta: miércoles, 5 de febrero de 2014)



5.4.15



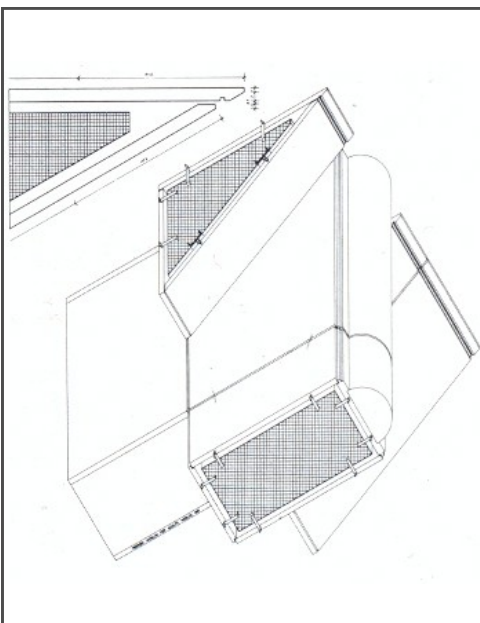
5.4.14



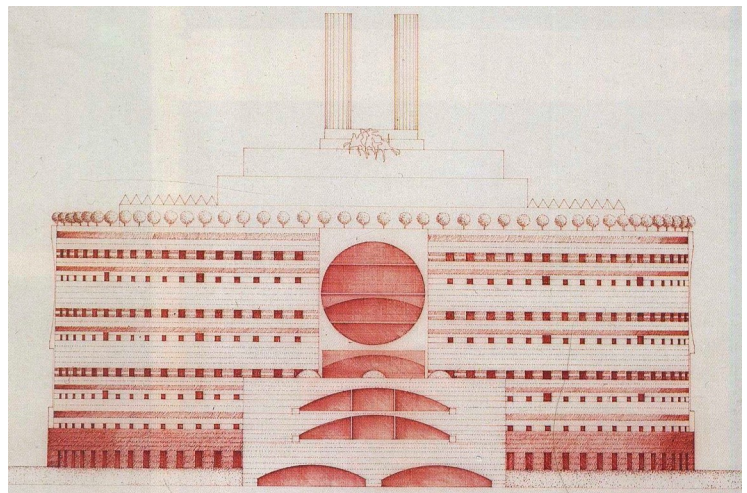
5.4.16



5.4.18



5.4.17



5.4.19

loración análogo a los desarrollados poco antes por James Stirling y Adolfo Natalini. Así, esta fachada se convirtió en una de las primeras fachadas trasventiladas de piedra construidas en España (*figura 5.4.18*).

Poco después generó un edificio circular para el **Pabellón de la Exposición Universal de Sevilla de 1992**, conocido como Torre Triana, donde empleó el mismo sistema constructivo de fachada trasventilada (*figura 5.4.19*).

5.4.2 FORMACIÓN DE LA FACHADA TRASVENTILADA

5.4.2-1 PRINCIPIOS PARA LA FORMACIÓN DE LA FACHADA TRASVENTILADA

Se sentaron así las bases fundamentales para la formación de la fachada trasventilada:

- Eliminación de la capa de mortero
- Separación de la placa respecto a la hoja interior creando una cámara
- Separación de las placas entre sí, formando una junta abierta que permitía ventilar la cámara.
- En este sistema los anclajes se convirtieron en elementos indispensables.

5.4.14

Adolfo Natalini, edificio para la Banca de Alzate Brianza (Como, 1978-1983)
Mario Ciampi, Gabriele Basilico (2010)

5.4.2-2 PRINCIPIOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO

A la hora de proyectar estas fachadas una serie de conceptos se hicieron fundamentales:¹⁰

- Elección de la piedra adecuada
- Elección del tamaño adecuado de las placas
- Elección del espesor de las placas
- Despiece de dichas placas
- Tratamiento de juntas entre placas
- Elección del sistema de fijación adecuado

5.4.15, 5.4.16, 5.4.17

Adolfo Natalini, edificio para la Banca de Alzate Brianza (Como, 1978-1983). Axonométricas explicativas del sistema constructivo empleado.
Estudio de arquitectura (2010)

5.4.18

Francisco Javier Sáenz de Oíza, Palacio de Festivales de Santander (1987-1991).
Hisao Suzuki (2012)

5.4.3 CONSTRUCCIÓN DE LA FACHADA TRASVENTILADA DE PIEDRA

El concepto de fachada trasventilada es, a grandes rasgos, una piel exterior de revestimiento separada mediante una cámara de aire, mediana o totalmente ventilada, del aislamiento térmico que se encuentra fijado a la hoja interior.

5.4.3-1 LA IMPORTANCIA DE LA CÁMARA DE AIRE

La introducción de la cámara de aire aportó un gran número de ventajas frente a los sistemas tradicionales, por las funciones tan específicas e importantes que

5.4.19

Francisco Javier Sáenz de Oíza, edificio para el Pabellón de la Exposición Universal de Sevilla de 1992, conocido como Torre Triana.
AA. VV (1989)

¹⁰ Otero Cifuentes, Antonio (1991). Nuevas soluciones para la fijación de aplcados de piedra natural en la edificación actual. Revista de edificación RE, nº9, págs. 9-15.

aportó para el buen funcionamiento de una fachada.

■ **DESDE EL PUNTO DE VISTA DEL COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO Y MEDIOAMBIENTAL:** ¹¹

- Evita que las **infiltraciones de agua** que pasen a través de las juntas del revestimiento exterior entren en contacto con el aislamiento térmico.
- En **invierno**, la circulación del aire en la cámara hace que el material aislante permanezca siempre aireado y por lo tanto seco, evitando que se produzcan condensaciones en la cara fría del aislamiento.
- En **verano**, el movimiento del aire en la cámara produce una evacuación de parte de del calor aportado por la radiación solar, gracias a la corriente ascendente de aire caliente que se expulsa permanentemente por los orificios previstos en la coronación.
- La interposición de la cámara favorece una relativa independencia de **movimientos** de los diferentes componentes del sistema.
- La disposición de la cámara impide que cualquier daño, **rotura o fisuración** producida en el revestimiento, redunde en una pérdida de la eficacia del aislamiento.
 - Se dispone de mayor **inercia térmica** cuando la hoja interior es pesada.

■ **DESDE EL PUNTO DE VISTA DEL PROCESO CONSTRUCTIVO:** ¹²

- La cámara permite corregir las **variaciones de espesor** de la hoja interior si ésta presenta una ejecución poco cuidada.
- Al estar el revestimiento exterior fijado mecánicamente, no se producen los problemas de **inestabilidad** de la hoja exterior que aparecían en la fachada tradicional.
- El empleo mayoritario de componentes industrializados, que se montan mediante uniones secas, produce una **ejecución más rápida**, que se traducirá en una **disminución de costes**.
- Se consigue una **mayor calidad** al utilizar productos industrializados que cuentan con certificaciones de calidad y con un mayor control en taller.

5.4.3-2 **EL AISLAMIENTO CONTINUO**

La posibilidad de la **colocación continua del aislamiento** por el exterior de la hoja interior, presenta otras ventajas adicionales: ¹³

- Se suprimen los **puentes térmicos** al quedar la estructura, así como la hoja interior, protegidas por el material aislante.

¹¹ Sánchez Ostiz-Gutierrez, Ana (2011). Fachadas: cerramientos de edificios. CIE Inversiones Editoriales Sossat 2000, Madrid. págs. 166-167.

¹² Ibídem. págs. 169-170.

¹³ Ibídem. pág. 168.

- Se evitan las **variaciones grandes de temperatura** en el grueso de la obra, producidas por el calentamiento por radiación solar y por las temperaturas extremas del ambiente exterior (día-noche, invierno-verano).
- Minimiza los **movimientos térmicos** (dilataciones y contracciones) entre los distintos puntos de los elementos constructivos del edificio.
- Mejora notablemente el funcionamiento de la fachada ante las **filtraciones** de lluvia entre las placas (que no son impermeables), que no son absorbidas por la masa del mortero de agarre y lo empan.

5.4.3-3 MATERIALES

5.4.3-3.1 PIEDRA NATURAL

■ DENOMINACIÓN DE LA PIEDRA NATURAL

El tipo de piedra viene definido por su **denominación comercial** y **petrográfica**, así como su composición mineralógica y características estructurales de su fábrica en relación con su comportamiento mecánico y riesgo de alterabilidad, de acuerdo a lo indicado en las normas **UNE-EN 12407**, **UNE-EN 12440** y **UNE-EN 12670**. Además, se debe declarar el color típico de la piedra, así como su lugar y cantera de origen.

Lo referente a estas cuestiones sobre denominación y clasificación puede verse explicado en el capítulo 1 del presente trabajo.

■ FUNCIONES

En este sistema la piedra natural pasa a ser una piel de acabado que desarrolla funciones diferentes a las anteriores, que fundamentalmente son: ¹⁴

- Constituye la **imagen exterior** de la fachada
- **Resistir las acciones** principales que actúan sobre ella: el peso propio, el viento y el sismo.
- Actuar como **barrera semi impermeable** del paramento.

Gracias a la evolución de la maquinaria es posible llegar a espesores de placas casi nulos. Sin embargo, el espesor mínimo para utilizar las placas en la fachada va a venir determinado teniendo en cuenta las siguientes solicitudes: ¹⁵

- Esfuerzos de **flexión** debidos a la presión del viento y acciones sísmicas.
- Esfuerzos **cortantes** en el anclaje, debido a la presión del viento, acciones sísmicas y peso propio de la placa.
- Solicitaciones de **impacto**.

Como norma general, los espesores mínimos se pueden determinar en función de la situación de uso y del

¹⁴ Avellaneda, Jaume; Paricio, Ignacio (2000). Los revestimientos de piedra. cit. págs. 10-13.

¹⁵ Norma UNE 22203:2011. Productos de piedra natural. Construcción de aplacados de fachadas con piedra natural. pág. 28

tipo de piedra utilizado.

■ INFLUENCIA DE LA PERMEABILIDAD

La permeabilidad de revestimiento de la fachada ventilada tiene efectos sobre la durabilidad del sistema de anclaje y del propio revestimiento, teniendo en cuenta la imposibilidad de acceder a tareas de mantenimiento tras el aplacado: ¹⁶

- No debe admitirse la capilaridad, ya que puede acarrear el deterioro de la resistencia de la piedra, por descohesión o pérdida de sección.
- Hay que tener en cuenta que el acceso de agua a la cámara se puede producir por varios factores:
 - Fenómenos de tensión superficial
 - Acción de la gravedad
 - Presión del viento
 - Corriente de aire con agua en suspensión
 - Presión diferencial
 - Energía cinética de la gota de agua
- El aplacado de piedra conlleva una acción de primera barrera al agua, pero una vez que penetre en la cámara debe tener libertad de evacuación en su recorrido descendente. De ahí que deba prestarse especial atención al drenaje en los puntos singulares de posible interceptación.
- Es de especial importancia asegurar la impermeabilización del trasdosado y, fundamentalmente, el buen comportamiento del aislamiento, para la durabilidad y las prestaciones para la totalidad del sistema de fachada.

■ JUNTAS

El aplacado del revestimiento de la fachada ventilada debe respetar el establecimiento de juntas destinadas a absorber los movimientos de toda clase y origen que puedan producirse en el mismo, con objeto de evitar tensiones importantes en los puntos de fijación de sus componentes.

Las juntas deben ser sencillas de modo que puedan absorber pequeñas tolerancias de corte de la piedra y facilitar la puesta en obra. Hay distintas clases de juntas establecidas según la norma **UNE 22203: 2011**:

• Juntas estructurales

Coinciden con las del edificio y tienen su misma anchura y posición. El sellado se puede hacer con masilla hasta una anchura de 2 cm. las juntas estructurales de mayor tamaño se deben cubrir con tapajuntas.

• Juntas de dilatación

Las piezas y la estructura a las que están ancladas son susceptibles de cambios dimensionales que lo más probable es que sean diferentes. Tales movimientos deben ser absorbidos mediante juntas de dilatación

¹⁶ Cerdeño del castillo, Francisco Javier (2007). La piedra natural en la arquitectura contemporánea. Aitemin, Centro Tecnológico, Toledo. pág. 124

de tal modo que el revestimiento no sufra alteraciones. Las juntas de compresión absorben cualquier movimiento en altura, pero los movimientos transversales son absorbidos por juntas de dilatación vertical.

- Juntas verticales asociadas al soporte

Cuando los anclajes se apoyen en un muro o cerramiento, las juntas deben coincidir en posición y anchura con las del soporte.

- Juntas horizontales o de compresión

Diseñadas específicamente para absorber la eventual aproximación entre placas o entre placas y elementos estructurales. Cuanto más tiempo transcurra entre la ejecución del soporte y la puesta en obra del revestimiento, la anchura podrá ser menor. Cuando se trate de poder absorber el acortamiento de una estructura debe ser, como mínimo, de 15 milímetros y deberá sellarse con cordón de sellador elástico de forma cóncava para que al ser comprimido no sobresalga del plano del aplacado.

- Juntas de perímetro de los plano de fachada

Situadas en el perímetro de contorno entre los paños de revestimiento y los elementos rígidos de fachada. Su anchura debe ser al menos de 10 mm. y su profundidad igual al espesor de la placa más el del mortero.

- Juntas de unión o de contorno

Son las juntas que se colocan en placas contiguas. Su anchura mínima debe ser de 2 mm, pudiendo alcanzarse los 6 mm cuando se utilizan grandes formatos.

- Junta seca

La establecida entre placas de piedra contiguas sin ninguna clase de material de unión.

5.4.3-3.2 EL SOPORTE

El soporte ha de ser de un material tal que permita resistir los esfuerzos habituales a los que se ve sometida una fachada y, asimismo, permitir la disposición correcta de los anclajes sobre él.

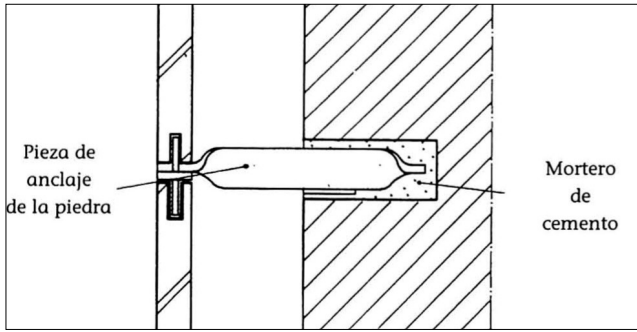
La norma **ASTM C 1242:2005** define al soporte como “la subestructura capaz de transmitir a la estructura del edificio las cargas que inciden sobre las placas de piedra, pudiendo ser la propia **estructura**, una **pared de fábrica**, **paneles de acero** o de **hormigón** in situ o prefabricado”.¹⁷

En España, desde la introducción de los anclajes metálicos, se ha utilizado como soporte cualquier tipo de fábrica, ya que no existía ninguna norma que se basase en criterios como deformaciones de origen térmico, acciones del viento, fragilidad,... o cualquier otra acción que pudiera producir movimientos diferenciales entre el aplacado y el soporte.¹⁸

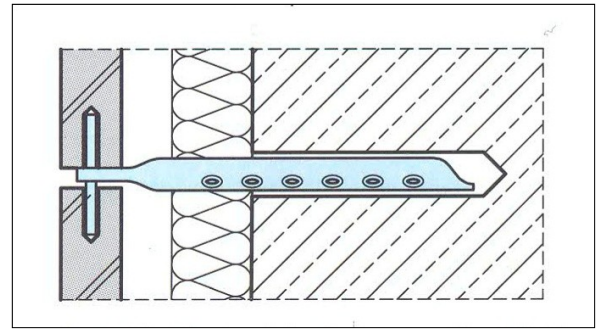
No fue hasta la publicación de la norma **UNE 41957-1:2000**, cuando se estableció:

¹⁷ Ibídem. pág. 151.

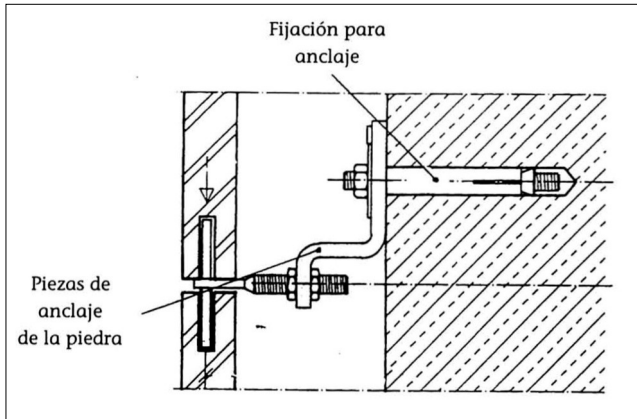
¹⁸ Ibídem.



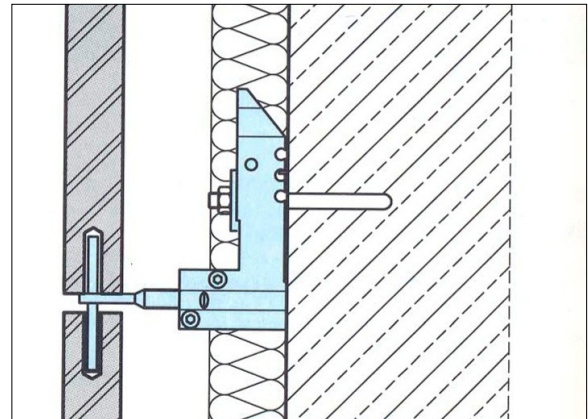
5.4.20



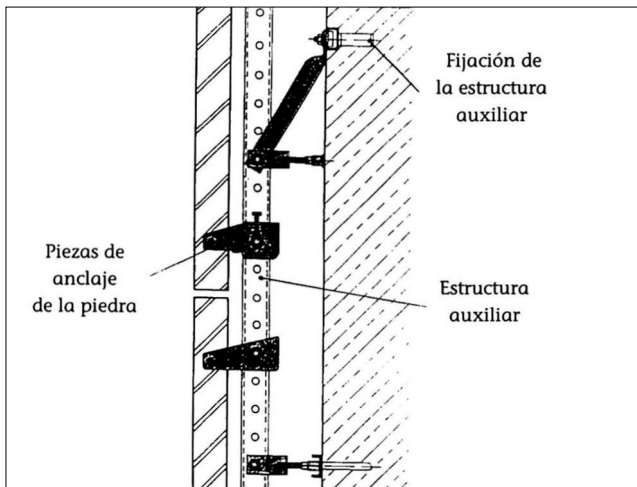
5.4.24



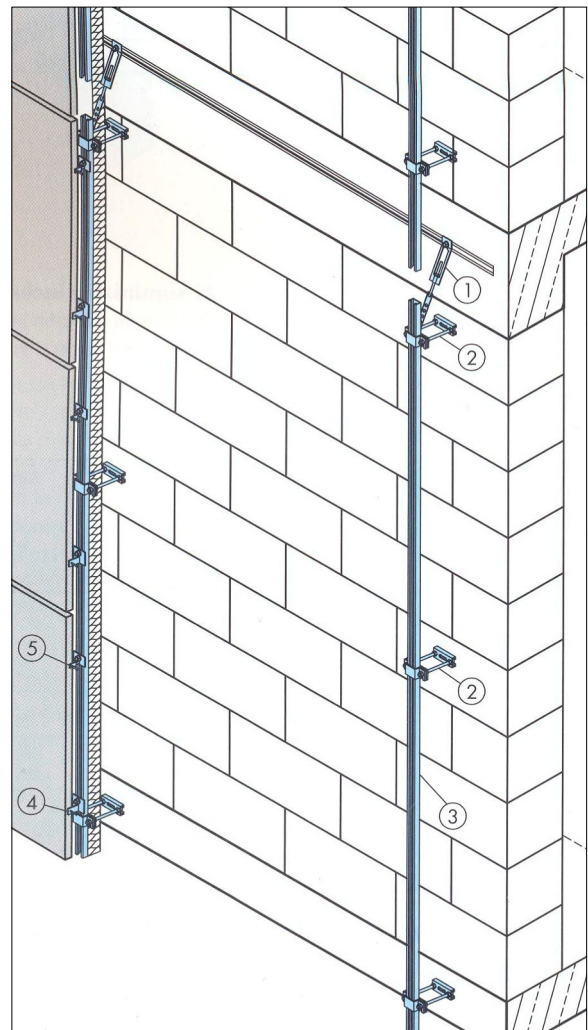
5.4.21



5.4.25



5.4.22



5.4.26

SISTEMA	SOPORTES			
	Fáb. Maciza	Fáb. Hueca	Hormigón	Acero
De Pletina Conformada	EMPOTRADO (mortero)	—	EMPOTRADO (grout)	SOLDADURA (inoxidable)
Directo regulable	PERNOS DE INYECCION DE MORTERO	PERNOS DE INYECCION DE MORTERO	PERNOS QUIMICOS O EXPANSON PERFILES EMPOTRADOS	TORNILLOS SOLDADURA (inoxidable)
De perfiles colgantes	PERNOS DE INYECCION DE MORTERO	—	PERNOS QUIMICOS O EXPANSON PERFILES EMPOTRADOS	TORNILLOS SOLDADURA (inoxidable)

5.4.23

Soportes para anclajes puntuales: ¹⁹

- Fábrica de ladrillo perforado o macizo
- Fábrica de bloque de hormigón vibro-comprimido de tabica no menor de 40 mm
- Hormigón en masa o armado

5.4.20

Sistema de anclaje simple, directo, fijo y empotrado.

Antonio Otero Cifuentes (1991)

5.4.21

Sistema de anclaje compuesto, directo y regulable.

Antonio Otero Cifuentes (1991)

5.4.22

Sistema de anclaje compuesto con estructura auxiliar.

Antonio Otero Cifuentes (1991)

5.4.23

Sistemas de anclajes en función del soporte y los métodos de fijación.

Antonio Otero Cifuentes (1991)

5.4.24

Sistema de anclaje simple, directo, fijo y empotrado.

Soluciones Halfen (1997)

5.4.25

Sistema de anclaje compuesto, directo y regulable

Soluciones Halfen (1997)

5.4.26

Sistema de anclaje compuesto con estructura auxiliar

1. Anclaje de fachada
 2. Soporte de separación
 3. Perfil dentado
 4. Anclaje de carga vertical
 5. Anclaje de retención vertical
- Soluciones Halfen (1997)*

Soportes para anclajes con estructura auxiliar: ²⁰

El soporte debe ser parte de la estructura principal del edificio capaz de soportar los esfuerzos que reciba y transmita el revestimiento.

- Cantos de forjado
- Jácenas de borde
- Pilares

En la práctica, debido a las deformaciones por flexión e incluso pandeo de la perfilería, es usual la fijación de los montantes a las paredes de cerramiento, además de la estructura.

5.4.3-3.3 LOS ANCLAJES

■ **INTRODUCCIÓN**

La colocación mediante anclajes metálicos permite unas soluciones arquitectónicas en fachadas que proporcionan una mayor estabilidad mecánica y seguridad en la colocación.

La fijación mecánica constituye el elemento fundamental de la sujeción de las placas de piedra. La disposición y capacidad mecánica de los elementos del sistema de fijación de la hoja exterior a la estructura portante es de suma importancia.

■ **EVOLUCIÓN**

La evolución en los sistemas de fijación mecánica se produjo inicialmente de una manera muy rápida. Según la norma **DIN 19516/86** y las correspondientes normas americanas, ya se indicaba que éstos debían ser de acero inoxidable, así como las tipologías básicas existentes. ²¹ Éstas quedaron definidas como:

- **Sistema de anclaje simple, directo, fijo y empotrado** (*figura 5.4.20*)
- **Sistema de anclaje compuesto, directo y regulable** (*figura 5.4.21*)
- **Sistema de anclaje compuesto con estructura auxiliar** (*figura 5.4.22*)

¹⁹ *Ibídem.*

²⁰ *Ibídem.* pág. 152.

²¹ Otero Cifuentes, Antonio (1991). Nuevas soluciones para la fijación de aplcados de piedra natural en la edificación actual. Revista de edificación RE, nº9, págs. 9-15.

En la tabla 5.4.23 se indican estos métodos de fijación así como el tipo de fijación al soporte adecuado recomendado en función del tipo de soporte.

Con el tiempo básicamente fueron apareciendo nuevos accesorios, así como ciertas modificaciones que permitieran mejorar el sistema (*figuras 5.4.24, 5.4.25, 5.4.26*). Las modificaciones más importantes se produjeron en el tipo de fijación al revestimiento, ya que sí se fueron comercializando nuevos modelos que permitían uniones diferentes adaptadas a nuevos diseños arquitectónicos.

Hoy en día existe una amplia oferta comercial de anclajes específicos y adaptados a las necesidades, dando lugar a múltiples combinaciones y clasificaciones.

■ REQUISITOS

Los anclajes son los únicos elementos de los componentes de la fachada que son específicamente diseñados para la construcción de las fachadas trasventiladas de piedra natural. Por ello, deben cumplir una serie de requisitos específicos para soportar y estabilizar adecuadamente las placas de piedra: ²²

- **Ajuste y reglaje.** Uno de los requerimientos más importantes de los anclajes es que puedan ajustarse dimensionalmente. Esto facilita la construcción de la fachada y asegura la planeidad de la misma.
- **Resistencia a la corrosión.** Los anclajes deben mantener sus propiedades sin necesidad de mantenimiento, deben ser resistentes a la corrosión.
 - Los anclajes de bulón deben ser de acero inoxidable.
 - Los anclajes de ranura o grapas, deben ser de aleación de aluminio o de acero inoxidable.
 - Los subsistemas de perfilera metálica deben ser de aluminio o de acero inoxidable.
 - Cuando exista contacto entre materiales de diferente naturaleza se debe analizar su compatibilidad para evitar que se forme par galvánico.
- **Resistencia mecánica.** Las acciones eólicas y gravitatorias que actúan sobre las placas se deben transmitir a través del anclaje al soporte de la fachada. Existen dos uniones que deben comprobarse: la unión placa-anclaje y la unión anclaje-soporte.

El bulón y las grapas de los anclajes de ranura deben estar revestidos con una camisa de teflón o material similar flexible y resistente a las acciones de la intemperie, que minimice los efectos de concentración de tensiones en el contacto, así como evitar sonidos indeseables por golpeo con la piedra.

- **Seguridad.** La estructura del edificio a medio plazo experimenta deformaciones de tipo reológico. Es imprescindible que cuando los anclajes experimenten por este motivo pequeños movimientos no provoquen tensiones en las placas, lo que implicaría la rotura de las mismas.
- **Resistencia al fuego.** Los anclajes están expuestos, en caso de propagación del fuego por la cámara, a la pérdida parcial de su capacidad portante al incrementarse la temperatura.

²² Montero Fernández de Bovadilla, Eduardo (2007). Manual básico. Fachadas ventiladas y aplacados. Requisitos constructivos y estanqueidad.. Conserjería de Obras Públicas, Vivienda y Transporte de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

- **Simplicidad.** La simplicidad del diseño del anclaje no debe servir solamente para abaratar la producción del mismo, sino que también debe garantizar una rápida y económica construcción de la fachada.

■ **SOLUCIONES PARA UNA FIJACIÓN ADECUADA**

- El hecho de que las placas de piedra sean elementos con unas características físicas y mecánicas diferentes a las del resto de elementos de la fachada obliga a que el anclaje sea un elemento lo más puntual posible. La continuidad placa-estructura se conseguirá pues con elementos suficientemente capaces y durables.²³
- Los anclajes deben evitar dañar dimensionalmente la placa (hecho frecuente con los sistemas tradicionales de anclajes con alambres).²⁴
- En cuanto a la libertad de diseño, los anclajes no impedirán que las placas puedan ser de gran tamaño, las juntas puedan ir separadas y no sea complicado combinar piedra con carpinterías de huecos.²⁵
- Los anclajes deben ser capaces de trasladar sin problemas las cargas propias y las sobrecargas de viento producidas sobre los aplacados a los elementos resistentes.²⁶

■ **TIPOLOGÍA ACTUAL**

Para la elección del sistema de anclaje influyen tanto el revestimiento exterior que va a soportar como la distancia de éste a la hoja soporte. Como indica la norma **UNE 22203: 2011**, los anclajes se pueden clasificar atendiendo a lo siguiente:

POR LA FORMA DE UNIÓN AL SOPORTE

- Directamente a la fábrica
- A través de un subsistema de perfilaría metálica

POR EL ASPECTO AL EXTERIOR

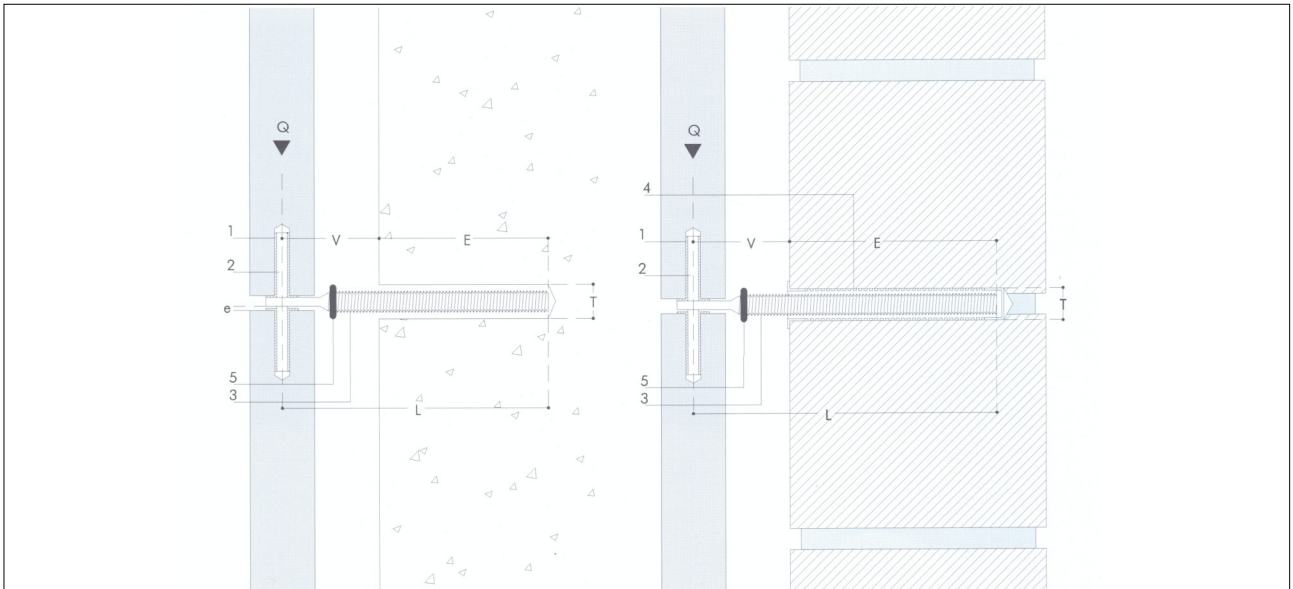
- Anclajes vistos
 - Anclajes de tornillo pasante
 - Anclaje de uñeta (semivisto)
- Anclajes ocultos
 - De bulón
 - De ranura aislada
 - De ranura continua
 - Taco de presión
 - Sistema tornillo/adhesivo

²³ Otero Cifuentes, Antonio (1991). Nuevas soluciones para la fijación de aplacados de piedra natural en la edificación actual. cit. pág.10.

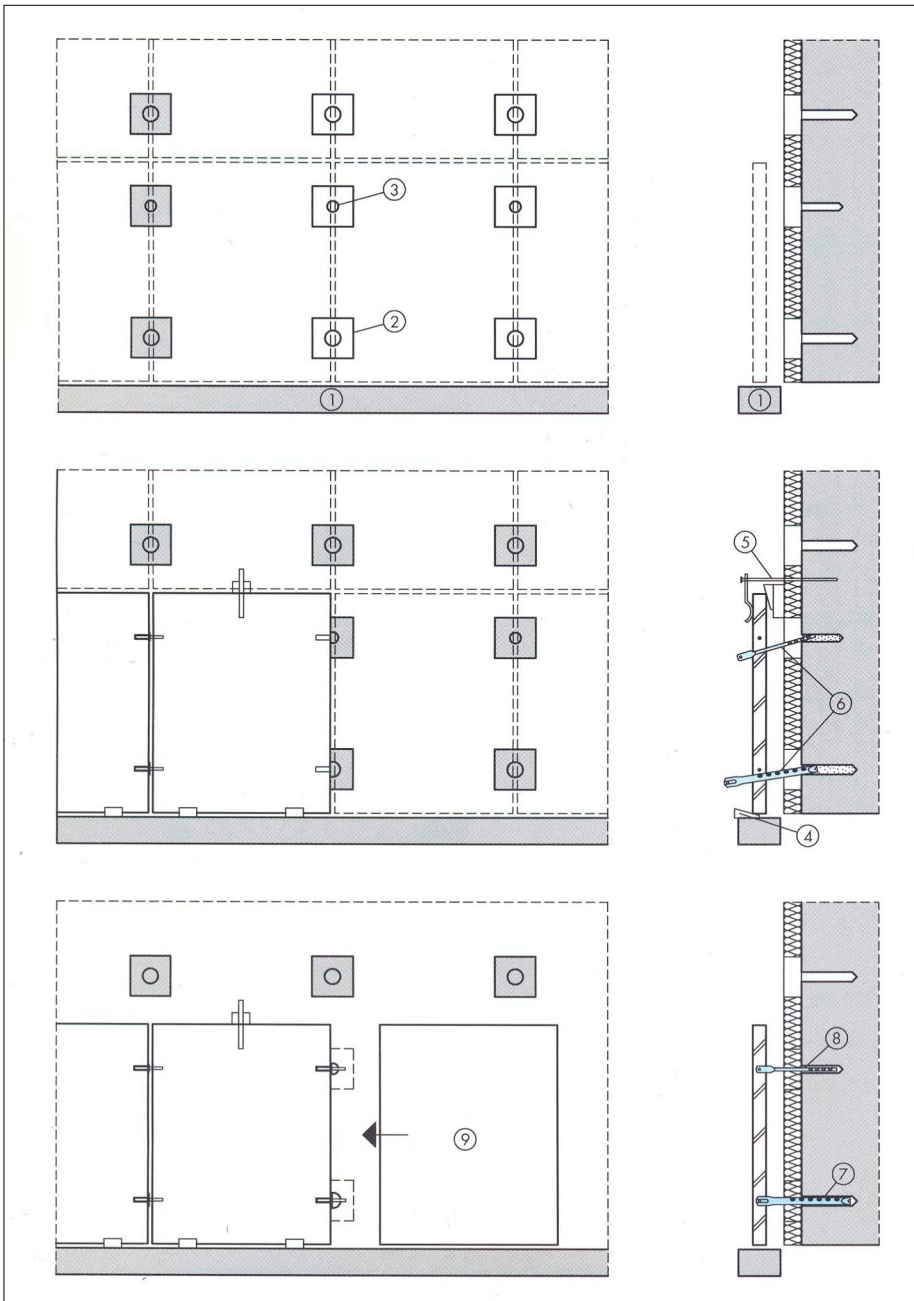
²⁴ Ibídem.

²⁵ Ibídem.

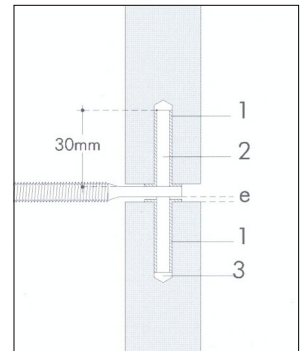
²⁶ Ibídem.



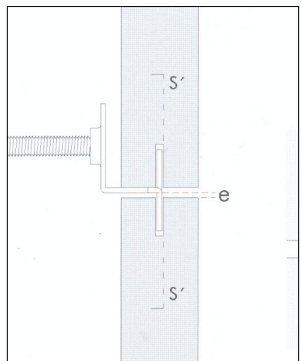
5.4.27



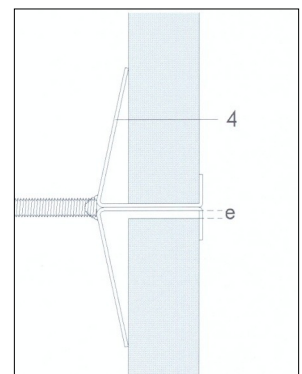
5.4.28



5.4.29



5.4.30



5.4.31

POR SU FUNCIÓN

- Anclaje de retención o antivuelco
- Anclaje de carga o de sustentación

Además de ellos, en la anterior norma **UNE 41957-1** se incluían otras variantes:

POR SU FORMA

- Anclajes puntuales o directos
- Anclajes con perfilera auxiliar

POR EL PROCEDIMIENTO DE FIJACIÓN AL SOPORTE

- Por morteros base cemento de retracción compensada
- Por mortero poliméricos
- Por tacos de diferente naturaleza y principio mecánico

POR EL PROCEDIMIENTO DE UNIÓN A ELEMENTOS METÁLICOS

- Atornillado
- Soldado

POR SU CAPACIDAD DE REGULACIÓN

- Regulables
- No regulables

5.4.27

Sistema de anclaje simple, directo, fijo y empotrado.

1. Casquillo de ajuste
2. Pivote de sujeción
3. Grapa
4. Tamiz
5. Goterón

Fabricante strow sistemas (2014)

5.4.28, 5.4.29, 5.4.30
Distintos tipos de anclajes anclajes simples, directos, fijos y empotrados. De arriba abajo:

- Pasador
- Ranura aislada
- Uña vista

Fabricante strow sistemas (2014)

5.4.31

Proceso de puesta en obra en el caso de anclajes de sujeción horizontal.

Fabricante halfen (2014)

■ **ANÁLISIS SEGÚN LA FORMA DE UNIÓN AL SOPORTE**

□ ANCLAJE PUNTUAL EMPOTRADO AL SOPORTE

SISTEMA CONSTRUCTIVO

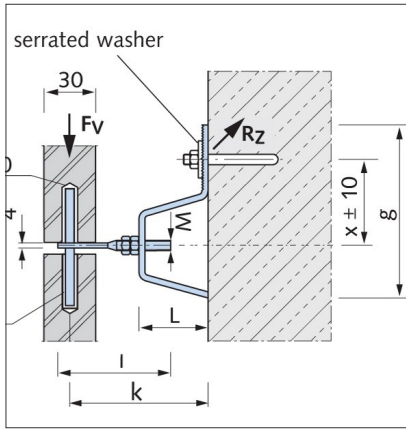
Este sistema es el que utiliza elementos más simples y más próximos a los métodos tradicionales de anclaje de chapados. Puede utilizarse en muros o paredes de hormigón, o de ladrillo macizo o semimacizo. No se recomienda en bloques huecos donde la tabica del mismo sea inferior a 40 milímetros de espesor.

Se basa en anclajes puntuales e individuales. Consiste en una barra embutida en taladros rellenos de mortero o resina, practicados en el muro base. Para conseguir una perfecta adherencia de la barra se dota a ésta de relieve (*figura 5.4.27*).

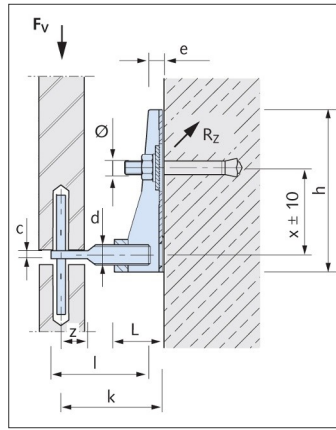
27

En el extremo libre de la barra se alojan pasadores, regletas o uñas, donde se insertan o sostienen las placas, que deben contar con las adecuadas perforacio-

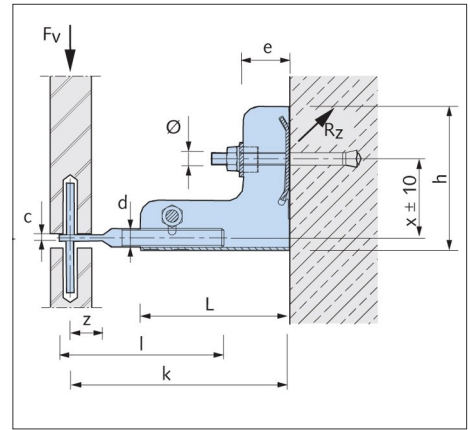
²⁷ Sánchez Ostiz-Gutierrez, Ana (2011). Fachadas: cerramientos de edificios. cit. pág. 218.



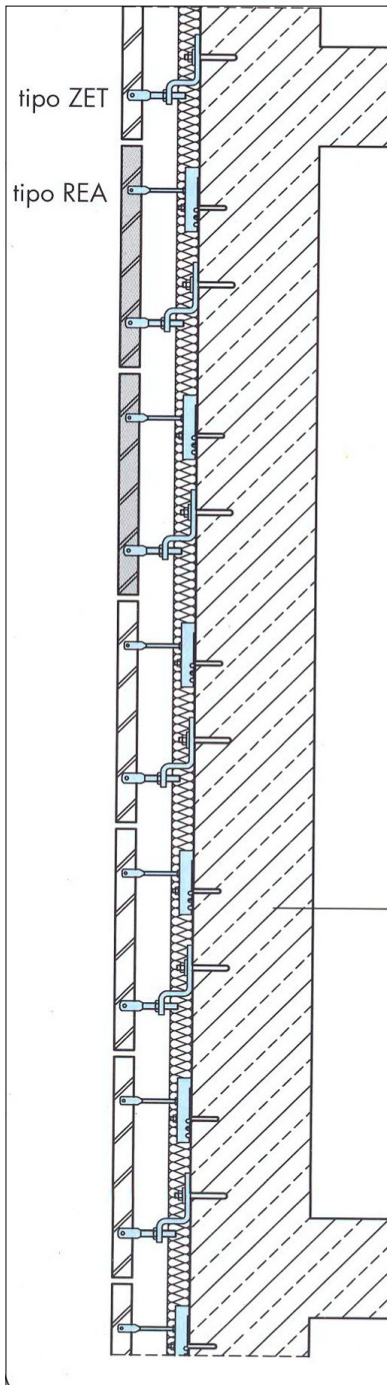
5.4.33



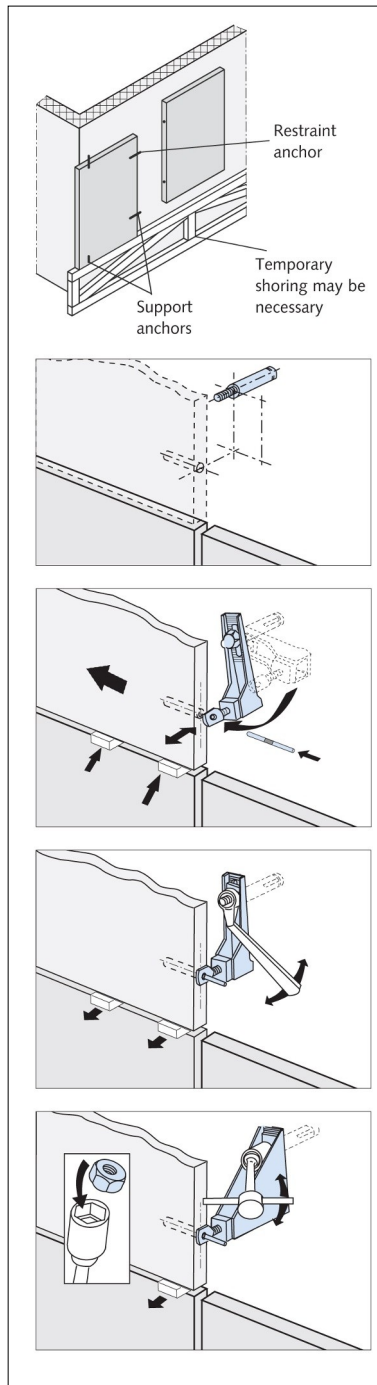
5.4.34



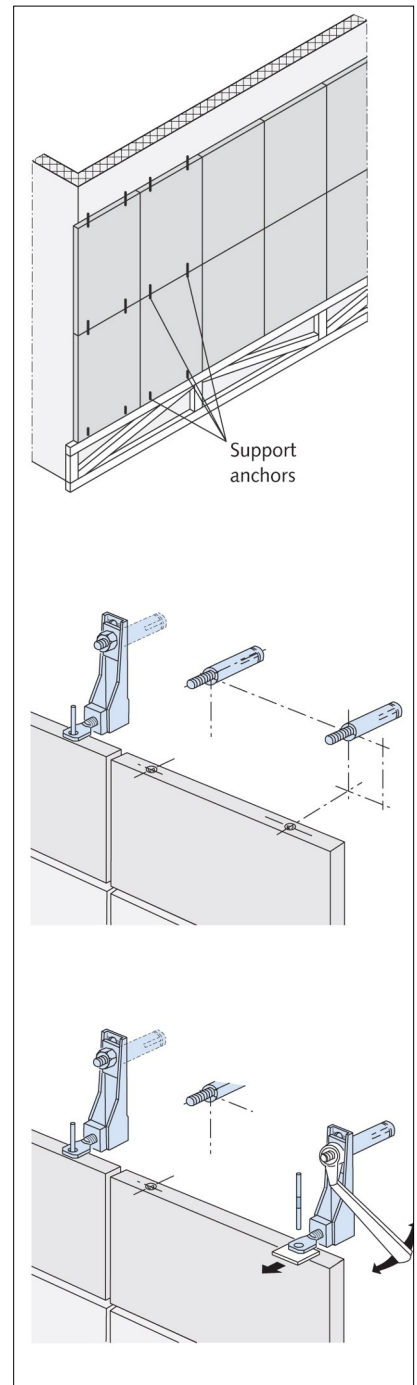
5.4.35



5.4.32



5.4.36



5.4.37

nes (*figura 5.4.28, 5.4.29, 5.4.30*).²⁸

La fijación se completa con siliconas, tubos de plástico o casquillos especialmente diseñados, que permiten ajustar la posición de la piedra actuando como distanciadores y sellantes al impedir las infiltraciones de agua dentro del taladro.²⁹

PUESTA EN OBRA

Para una correcta ejecución debe iniciarse el montaje de abajo a arriba, quedando definida la posición de los anclajes sustentantes de cada placa:

- Por la posición de las adyacentes en el caso de sujeción horizontal (*figura 5.4.27*)
- Por la posición de las inferiores en el caso de sujeción vertical.

Dado que el sistema no permite la inmediata entrada en carga de los anclajes, para acelerar los tiempos de ejecución, a los morteros utilizados, aparte de la resistencia y adherencia adecuadas, se les exige rapidez de fraguado y baja retracción.³⁰

El mayor inconveniente de estos sistemas consiste en la dificultad de corrección de la planeidad superficial, que debe realizarse empotrando más o menos la barra. Esta operación se efectúa mientras el mortero está fresco, por lo que no puede acelerarse su fraguado todo lo que sería deseable para reducir tiempos de ejecución.³¹

□ ANCLAJE DE FIJACIÓN MECÁNICA AL SOPORTE

SISTEMA CONSTRUCTIVO

5.4.33, 5.4.34, 5.4.35
Diferentes modelos de anclajes de carga vertical dispuestos en junta horizontal.
Fabricante halfen (2014)

Al igual que en el caso anterior, es un sistema constituido por anclajes puntuales e individuales (*figuras 5.4.32, 5.4.33, 5.4.34, 5.4.35*). Puede utilizarse en muros o paredes de hormigón, o de ladrillo macizo o semimacizo. No se recomienda en bloques huecos donde la tabica del mismo sea inferior a 40 milímetros de espesor.

5.4.36
Proceso de puesta en obra en el caso de anclajes en junta vertical.
Fabricante halfen (2014)

Este tipo de fijación presenta una serie de ventajas respecto al sistema anterior.³²

- En primer lugar pueden entrar en carga inmediatamente.
- En segundo lugar permiten regular la altura de la fijación. Ello es posible por presentar orificios ranurados que admiten variar la cota del anclaje, de forma sencilla y precisa, por el simple movimiento del soporte respecto del tornillo. El ajuste de la posición se realiza por apriete. Algunos sistemas

5.4.37
Proceso de puesta en obra en el caso de anclajes en junta horizontal.
Fabricante halfen (2014)

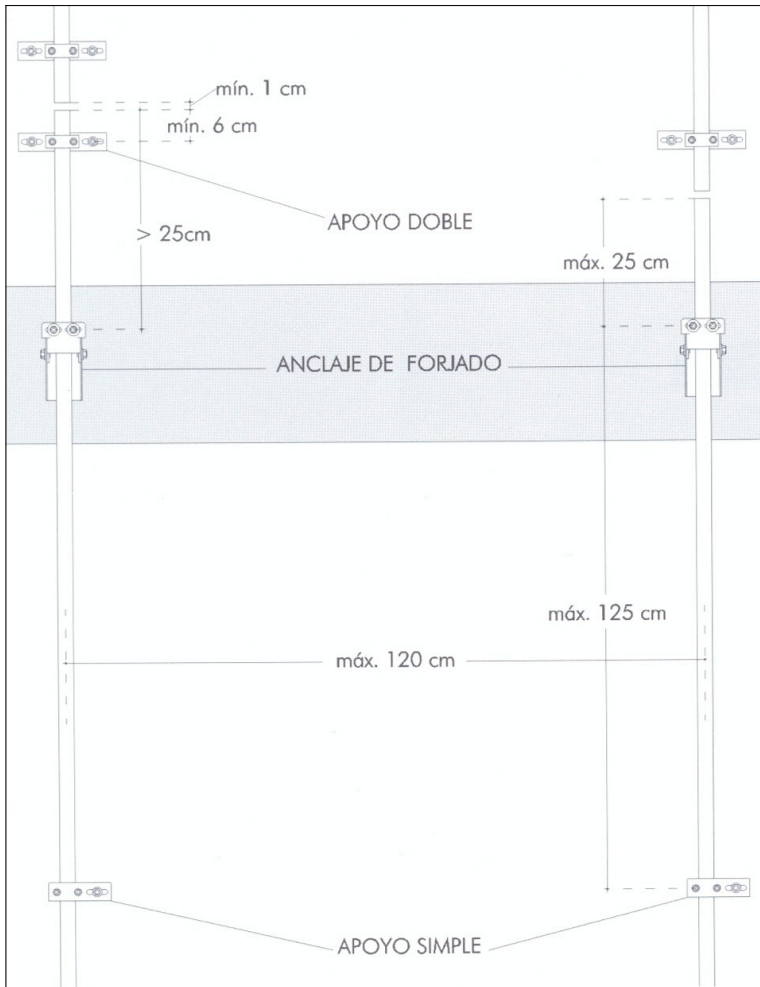
²⁸ *Ibídem.*

²⁹ *Ibídem.*

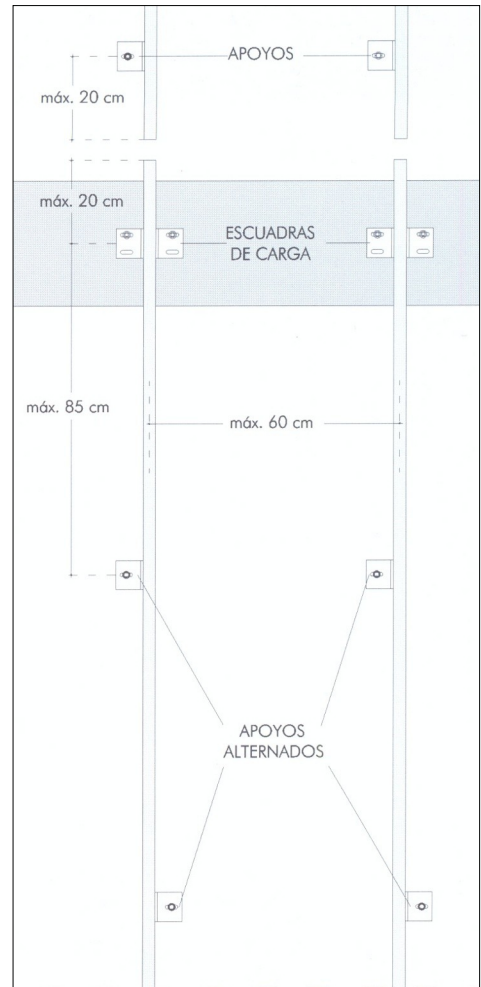
³⁰ *Ibídem.* pág. 221.

³¹ *Ibídem.* pág. 221.

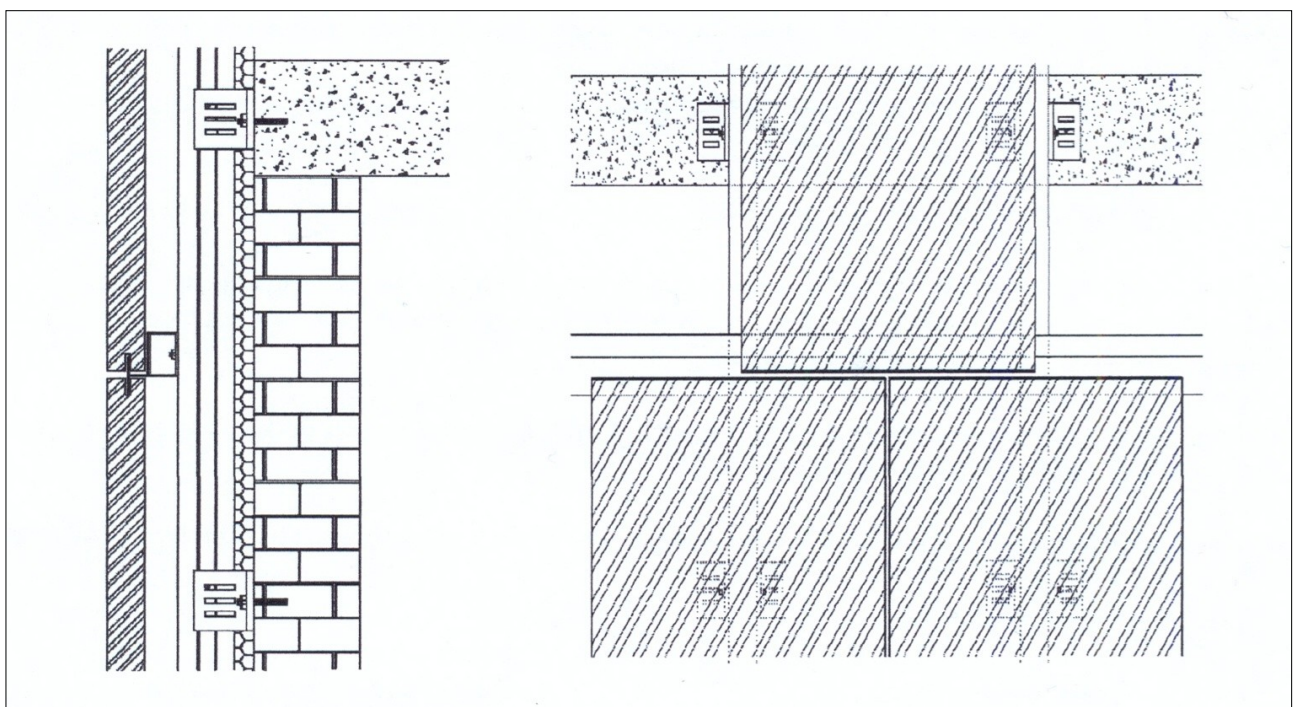
³² *Ibídem.* pág. 223.



5.4.38



5.4.39



5.4.40

incorporan sistemas de seguridad frente a eventuales aflojamientos.

PUESTA EN OBRA

Por lo general la colocación de las placas comienza en el lado izquierdo del edificio. La dirección de montaje en ese caso es de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba.

- Con anclajes dispuestos en juntas verticales (figura 5.4.36)³³
 1. Se coloca la primera placa sobre el primer anclaje de carga y se apuntala el lado derecho.
 2. Se fija el anclaje de carga y el de retención y se efectúa el ajuste de precisión.
 3. Se coloca el pasador a través del prolongador, introduciéndolo en el casquillo de deslizamiento. Se rellenan los agujeros de los pasadores de la segunda placa con mortero y se desplaza la segunda placa contra la primera.
 4. Se coloca el anclaje de carga y el de retención, y se hace el ajuste de precisión.
 5. La penúltima placa del borde derecho se fija con el borde derecho en la junta vertical con pasadores unilaterales.
 6. La última placa del borde derecho se coloca sobre dos anclajes de carga en la junta horizontal.
- Con anclajes dispuestos en juntas horizontales (figura 5.4.37)³⁴
 1. Se coloca la primera placa sobre el primer anclaje de carga y se apuntala el lado derecho.
 2. Se hacen los taladros para la primera y segunda fila de placas. Se alinean los anclajes de montaje rápido y se colocan los tacos.
 3. Se rellenan con mortero los orificios de los pasadores y se coloca la primera fila de placas sobre los anclajes de montaje rápido.
 4. Se colocan los tacos para la segunda fila de placas y se efectúa el ajuste de precisión de la primera fila.
 5. Se coloca el pasador a través del prolongador e introducirlo en el casquillo de deslizamiento situado debajo.

5.4.38, 5.4.39
Sistemas de colocación de la subestructura anclada a los forjados y asegurada en puntos intermedios.
Fabricante strow sistemas (2014)

5.4.40
Sistema de subestructura fijada mecánicamente al soporte.
UNE 22203 (2011)

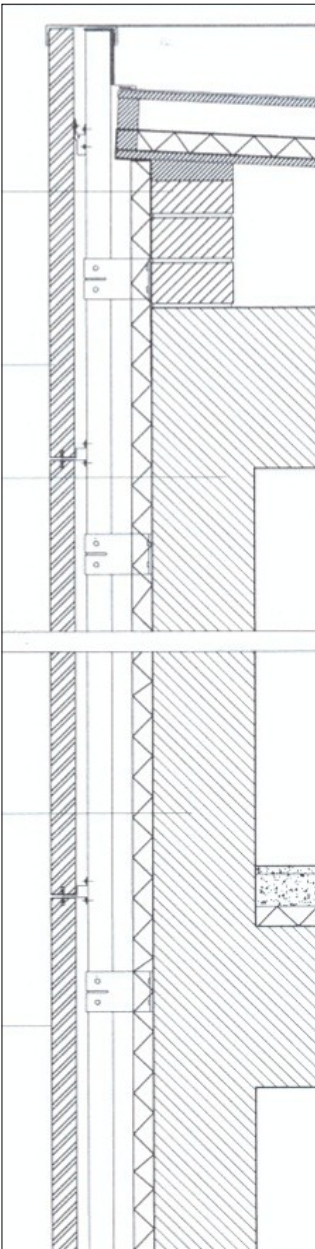
ANCLAJE DE SUBESTRUCTURA DE PERFILES FIJADOS MECÁNICAMENTE AL SO-

³³ Datos obtenidos del catálogo del fabricante halfen (2014).

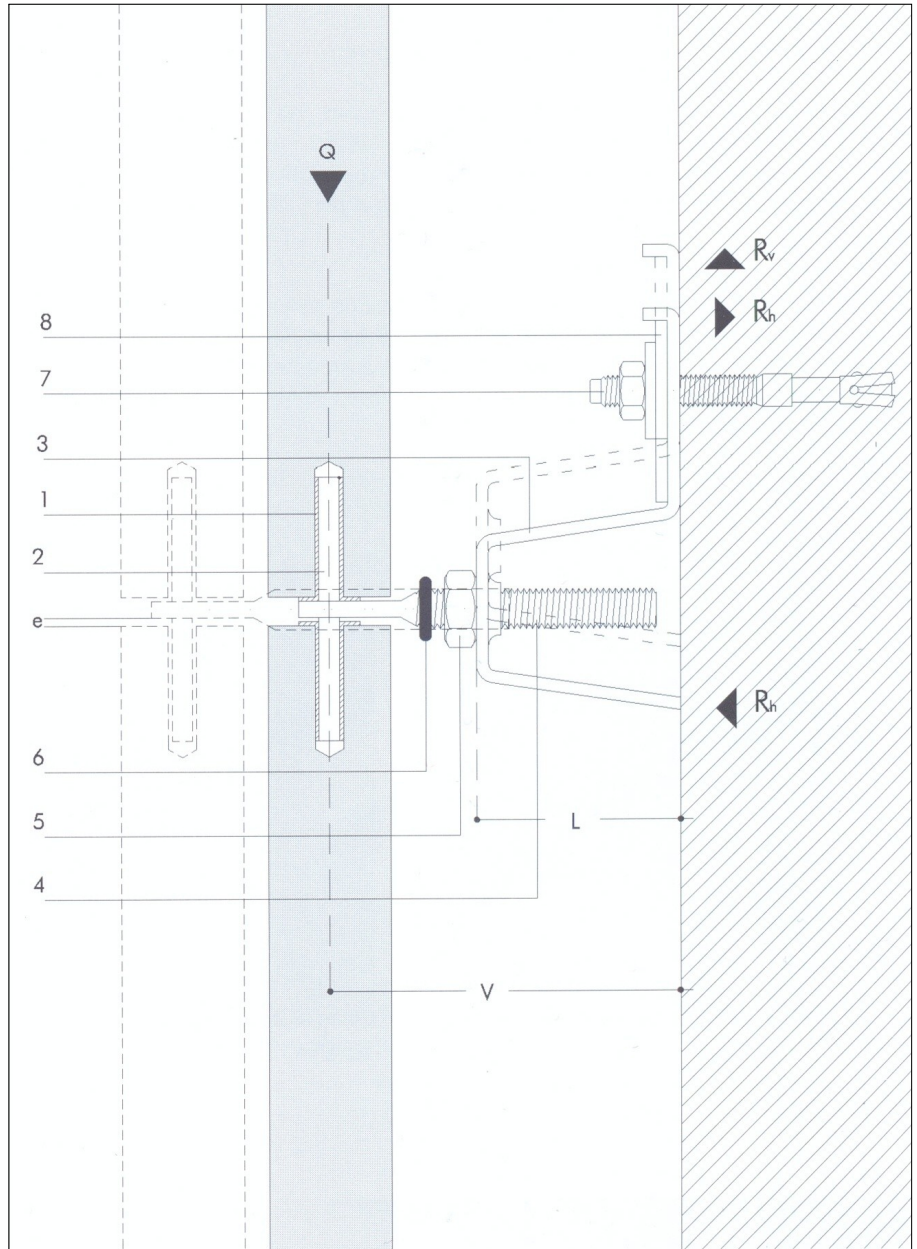
³⁴ *Ibidem.*



5.4.41



5.4.42



5.4.43

PORTE

En este sistema las piezas no se fijan a anclajes independientes, sino a un **entramado de perfiles metálicos** fijados, a su vez, bien al muro base, bien a la estructura del edificio. En este último caso el sistema puede exigir la utilización de elementos de retención anclados en el muro base (*figuras 5.4.38, 5.3.39, 5.3.40*).

Las **ventajas** que presentan estos sistemas con respecto a los anteriores son bastante notables y podrían resumirse en:³⁵

- La posibilidad de fijar los perfiles a los elementos estructurales permite **liberar al muro** de las **cargas** del aplacado, con lo que puede aligerarse notablemente.
- Por otra parte, el replanteo de la **planeidad** de la fachada se realiza sobre la subestructura reduciéndose el tiempo a invertir en la colocación de las placas.
- Estos sistemas presentan un **mayor** margen de **ajuste** de la posición del anclaje en las tres direcciones del espacio simplificando el replanteo general.

■ **ANÁLISIS SEGÚN LA FIJACIÓN AL REVESTIMIENTO**

A continuación se analizarán los anclajes más comúnmente utilizados:

5.4.41
Francisco Mangado (2004-2007). Centro de Formación en Nuevas Tecnologías, en Santiago de Compostela.
Roland Halbe (2008)

□ ANCLAJE DE BULÓN

Es el anclaje que apareció inicialmente, y el de mayor empleo en aplacado pétreos a lo largo de muchos años (*figuras 5.4.41, 5.4.42*). Se compone de (*figura 5.4.43*):

5.4.42
Francisco Mangado (2004-2007). Centro de Formación en Nuevas Tecnologías, en Santiago de Compostela. Sección constructiva.
Estudio de arquitectura Francisco Mangado (2008)

Cuerpo de anclaje

Formado generalmente por pletinas en forma de ángulo o U o redondos de acero cuya fijación al muro base se realiza por atornillado. Más o menos complejo en función del grado de libertad de regulación que pueda aportar. El cuerpo del anclaje debe ser capaz de soportar esfuerzos de compresión, tracción cortante y flexión, con deformaciones controladas antes las cargas previstas.³⁶

5.4.43
Anclaje de bulón
1. Casquillo de ajuste
2. Pivote de sujeción
3. Ménsula
4. Soporte roscado
5. Tuerca de fijación del soporte roscado
6. Goterón
7. Tornillo de fijación
8. Arandela regulable de seguridad
Fabricante strow sistemas (2014)

Elemento de unión al soporte

Este componente puede formar parte del mismo cuerpo de anclaje, caso de los simples. Sin embargo, lo más generalizado es que este componente sea un “taco” con características apropiadas para facilitar la inmovilización de un tornillo que sirve de vínculo entre el cuerpo de anclaje y el soporte.³⁷

³⁵ Vielba Cuerpo, Carmen (2001). La arenisca de Villamayor en revestimientos de fachada. Departamento de construcción y tecnología arquitectónicas. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Tesis doctoral.

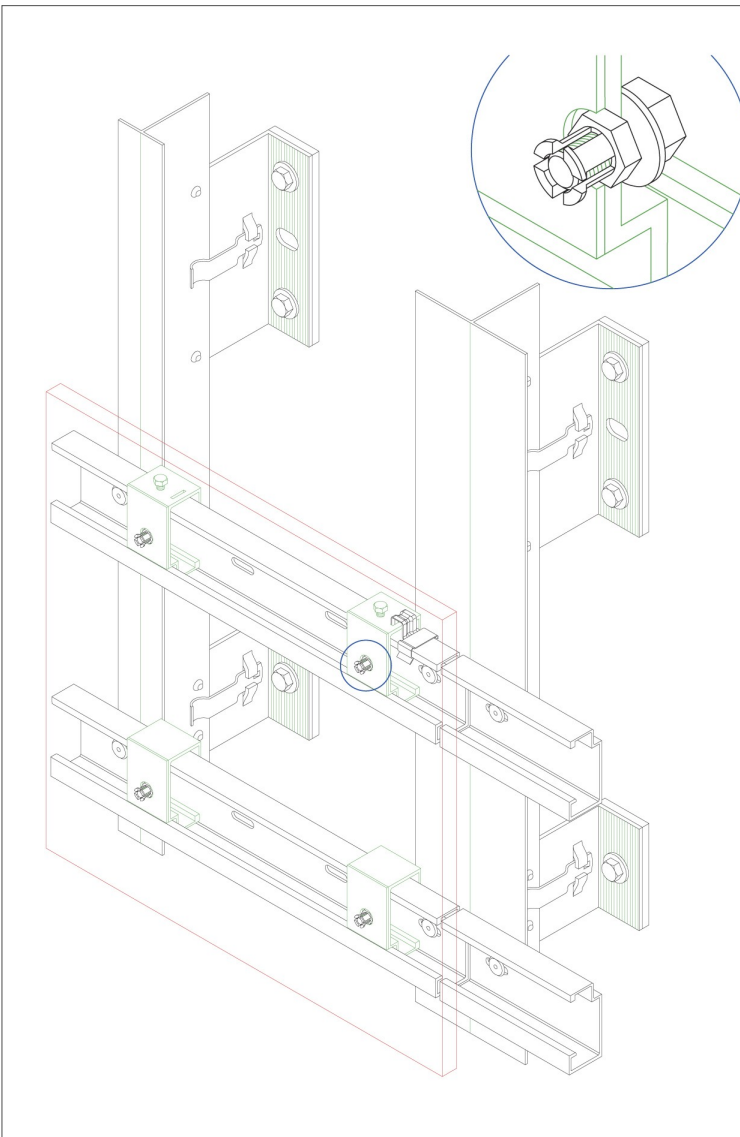
³⁶ Sánchez Ostiz-Gutierrez, Ana (2011). Fachadas: cerramientos de edificios. cit. pág. 218.



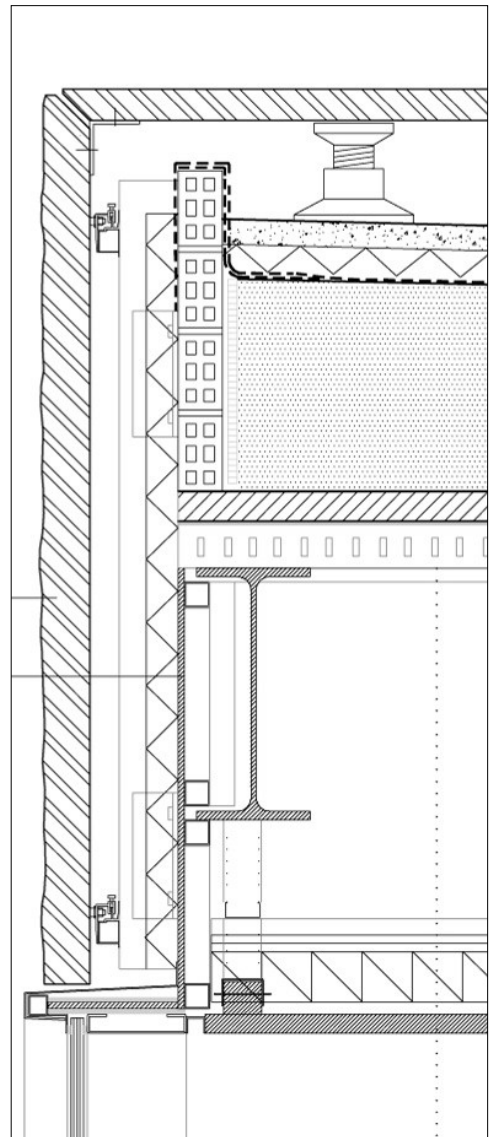
5.4.44



5.4.45



5.4.46



5.4.47

Elemento de apoyo y retención de la placa pétreo

En este caso, por definición, un *bulón o pasador*, es una varilla de acero entre 4 y 6 mm de diámetro que, penetrando en un orificio practicado en el canto de la piedra, y estando sujeto al cuerpo del anclaje, sostiene o retiene frente a toda clase de acciones a la placa en su posición, transmitiendo éstas al soporte de carácter estructural del propio edificio.³⁸

□ ANCLAJE DE RANURA

Varía únicamente en dos aspectos respecto al anclaje de bulón:

- El elemento de unión cuerpo de anclaje/placa es una pletina en lugar de una varilla de acero, que se aloja en una hendidura recta practicada en el canto de la piedra. Puede ser de dos tipos:

Ranura aislada, no mayor en longitud de 1/6 de la longitud del canto de la piedra.

Ranura continua (*figuras 5.4.44, 5.4.45*) Este anclaje apareció unos años más tarde que el bulón o ranura aislada.

- Reparte mejor la carga sobre la superficie del canto, aunque requiere mayor trabajo en taller de la piedra y hay más posibilidades de debilitamiento de las aristas.

■ **FIJACIÓN MEDIANTE TORNILLOS EN EL REVERSO DE LA PLACA**

Posteriormente apareció este anclaje, que será muy utilizado en los edificios singulares de los últimos años.

En este caso se practica un taladro con destalonado de fondo en la parte posterior de la placa, fijándose con un tornillo, que expansiona en la zona de ensanche de la perforación, un perfil especialmente diseñado para su encaje en las barras de la subestructura (*figura 5.4.46*).³⁹

De este modo la fijación queda absolutamente oculta y fuera de los borde de la placa. Se reducen los riesgos de desprendimiento y se facilita el replanteo (*figura 5.4.47*).

Las placas pueden llegar ya preparadas a obra consiguiéndose una reducción sustancial de tiempos de ejecución. El proceso de producción de anclajes se puede realizar en serie con un alto grado de automatización y control.

5.4.44, 5.4.45
Ejemplo de aplicación de fijación a subestructura mediante perfilera horizontal. Reforma del Parador de Salamanca, de JH Arquitectos. Archivo del estudio de arquitectura. Cedita.

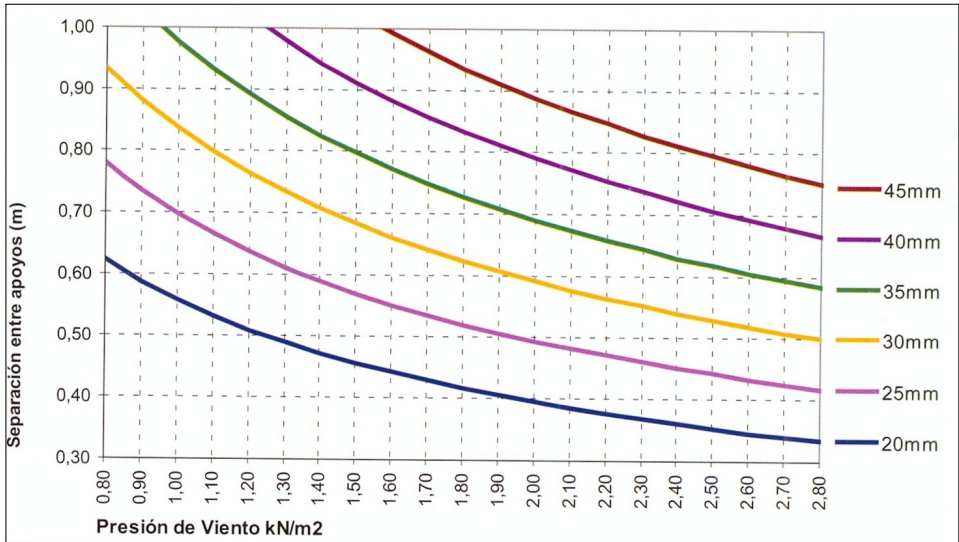
5.4.46
Esquema de fijación mediante tornillos en el reverso. Fabricante Keil (2014)

5.4.47
Ejemplo de aplicación de fijación mediante tornillos en el reverso. Centro Municipal de Exposiciones y Congresos de Ávila, de Francisco Mangado. Archivo del estudio de arquitectura. Cedita.

³⁷ *Ibíd.*

³⁸ *Ibíd.*

³⁹ Cerdeño del castillo, Francisco Javier (2007). La piedra natural en la arquitectura contemporánea. cit. pág. 144

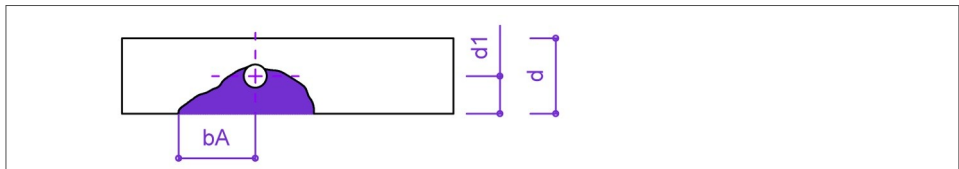


5.4.48

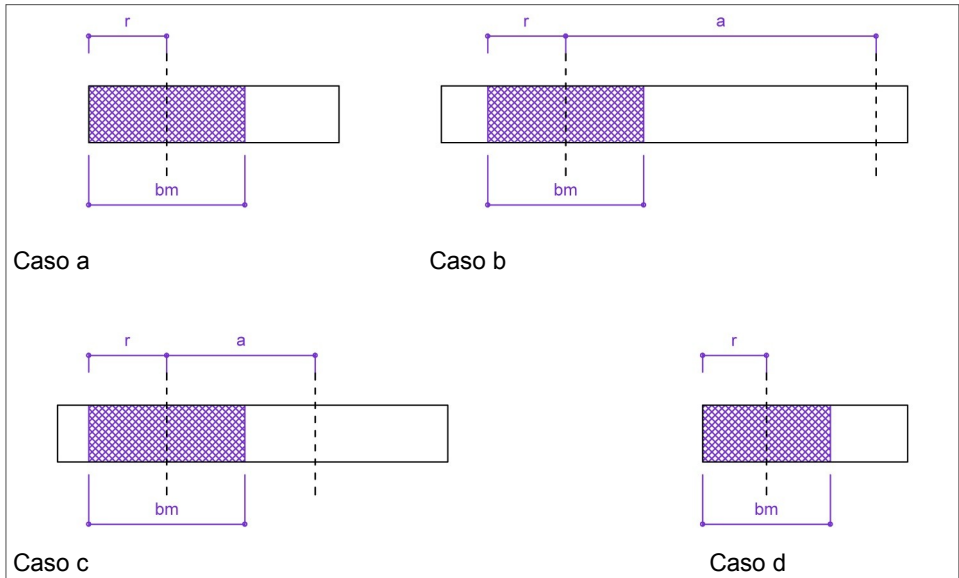
ESPEORES EQUIVALENTES PARA DISTINTOS MATERIALES O RESISTENCIAS A FLEXIÓN (Rf) EN FUNCIÓN DEL ESPESOR DE REFERENCIA

MATERIALES	Rf (N/mm²)	ESPEORES EQUIVALENTES (mm)					
Esesor de referencia (mm)		20	25	30	35	40	45
Pizarras P2 Ext. contra	62,1	7	8	10	12	14	15
Pizarras P1 Int. paralela	49,6	8	9	11	13	15	17
Cuarcitas	13,8	15	18	22	25	29	32
Granitos	10,3	20	21	25	29	33	37
Mármoles	7,1	20	25	30	35	40	45
Calizas densidad media	3,4	30	35	43	51	58	65
Calizas densidad baja	2,9	30	39	47	55	63	70
Areniscas	2,4	35	43	52	60	69	77

5.4.49



5.4.50



- Caso a: $r \geq b_A$
 $b_M = 2 b_A$
 $F_c = 1$
- Caso b: $r \geq b_A$ y $a \geq 2 b_A$
 $b_M = 2 b_A$
 $F_c = 1$
- Caso c: $r \geq b_A$ y $a < 2 b_A$
 $b_M = b_A + a/2$
 $F_c = (b_A + a/2) / 2 b_A$
- Caso d: $r > b_A$
 $b_M = 2 r$
 $F_c = r / b_A$

5.4.51

5.4.3-4 CÁLCULO

■ **ESPESOR DE LAS PLACAS**

□ SOLICITACIONES

El espesor del aplacado se determina tomando en consideración los tres tipos de solicitaciones siguientes:

- Esfuerzos de flexión debidos a la presión del viento y acciones sísmicas.
- Esfuerzos cortantes en el anclaje, debidos a la presión de viento, acciones sísmicas y peso propio de la placa.
- Solicitaciones de impacto.

Cada uno de ellos se calcula según lo indicado en la norma **UNE 22203: 2011**.

□ ESPESOR NECESARIO PARA SOPORTAR LOS ESFUERZOS DE FLEXIÓN DEBIDOS A LOS ESFUERZOS EÓLICOS Y SÍSMICOS

El proceso de dimensionado del espesor de la placa debe realizarse siguiendo los siguientes pasos:

5.4.48

Espesores de referencia en función de la presión de viento y la separación de apoyos de las placas.

Ángel Miguel Pitarch Roig (2010)

1. Elección del producto (material y formato).
2. Obtención de la presión de viento según lo indicado en el **CTE DB SE-AE**
3. Predimensionado. En la *figura 5.4.48* se obtiene un espesor de referencia en función de la presión del viento y de la separación máxima entre apoyos. Posteriormente se obtiene el espesor real a partir del de referencia según lo indicado en la *figura 5.4.49*.

5.4.49

Espesores equivalentes para distintos materiales en función del espesor de referencia.

Ángel Miguel Pitarch Roig (2010)

4. Obtención de la presión debida a la fuerza sísmica según la fórmula:

$$P_s = \frac{F_s}{L \times W}$$

Donde F_s es la fuerza horizontal en el centro de la placa en KN, obtenida mediante fórmulas y tablas según lo indicado en la norma **UNE 22203:2011**
 L y W es la longitud y anchura de la placa

5.4.50

Valoración del cráter originado durante el ensayo. Interpretación de lo indicado en la norma **UNE 22203:2011**.

Elaboración del autor

4. Cálculo. Obtener el espesor del aplacado mediante la siguiente ecuación:

$$e = \sqrt{\frac{0,75 \times F_p \times (P + P_s) \times L^2}{V_i E \times 10^3}}$$

donde

e es el espesor de la placa en mm

P es la presión de viento en KN/m^2

P_s es la presión debida a la acción sísmica en KN/m^2

5.4.51

Valores de la sección resistente b_M y del factor de corrección F_c para los cuatro posibles casos. Interpretación de lo indicado en la norma **UNE 22203:2011**.

Elaboración del autor

L es el máximo vano de la placa en m (separación entre bordes anclados)

ViE es el valor inferior esperado en MPa a la resistencia a la flexión

F_p=6 es el factor de seguridad frente a la resistencia a la flexión

Independientemente de los valores obtenidos, se recomienda utilizar como mínimo los siguientes espesores:

- Granitos, pizarras,...: 20 mm
- Mármoles: 25 mm
- Calizas, areniscas, travertinos: 30 mm

□ ESPESOR NECESARIO PARA SOPORTAR LOS CORTANTES EN EL ANCLAJE, DEBIDOS A ESFUERZOS EÓLICOS, AL PESO DE LA PLACA Y A LAS ACCIONES SÍSMICAS

- Anclajes de bulón

Se debe determinar la resistencia al anclaje de la piedra (R_A) en las condiciones definidas en norma **UNE-EN 13364**, mediante la realización del ensayo tecnológico, es decir, con el espesor de la pieza realmente utilizado.

En el ensayo es necesario obtener el valor de la resistencia a anclaje. Una vez obtenido éste, se debe minorar multiplicando el resultado del ensayo por un factor de corrección definido por:

$$F_c = \frac{b_M}{2b_A}$$

donde

b_A es la mayor dimensión del cráter producido en la probeta (*figura 5.4.50*).

b_M es la sección resistente al arrancamiento, que depende de b_A, de la distancia r del anclaje al borde de una placa, cuyo valor es r = 0,21 L y de la separación entre anclajes a (*figura 5.4.51*).

Los requisitos que se deben cumplir son:

- El valor de la resistencia al anclaje debe ser como mínimo de 0,5 KN
- El valor de la resistencia al anclaje debe superar en un 20% el peso de la placa.

- Otras tipologías de anclajes

Según lo indicado en la norma **UNE 22203:2011**, se debe realizar una prueba específica de carga sobre un dispositivo muy similar al realmente utilizado. Para ello, se aplican cargas estáticas uniformemente repartidas sobre la placa hasta alcanzar presiones 8 veces superiores a la presión del viento. Si el valor requerido no se alcanza con el espesor utilizado, se debe incrementar el espesor hasta obtener el resultado requerido.

□ ESPESOR NECESARIO DE LAS PLACAS PARA SOPORTAR IMPACTOS

Atendiendo a la norma UNE 22203:2011, el espesor del aplacado debe ser el necesario que pueda absorber las siguientes energías de impacto expresadas en Julios:

	Hasta 3 m de altura	De 3 a 6 m de altura	Más de 6 m de altura
Edificios	5	4	3
Viviendas unifamiliares	4	3	-

■ ANCLAJES

□ SOLICITACIONES

A diferencia de los chapados, en la fachadas trasventiladas los anclajes de fijación requieren desarrollar un cálculo estructural que garanticen su estabilidad mecánica así como de la eficacia de la unión al soporte (*figura 5.4.52*). Una vez puesto en carga, el anclaje no debe sufrir un desplazamiento vertical superior a 1mm. Se consideran dos tipos de solicitaciones (*figura 5.4.53*):

• Horizontales

Efecto de la presión/succión del viento
Efectos sísmicos

• Verticales

Peso propio de las placas
Peso propio (eventualmente) del aislamiento

□ REPARTO DE CARGAS EN LOS ANCLAJES

El reparto de cargas se asocia a la función del anclaje. A efectos de cálculo se distinguen dos tipos de anclajes:

• Anclaje de carga o de sustentación

Se calculan para que absorban el peso propio de la placa así como la fuerza ejercida por el viento tanto en presión como en succión.

• Anclaje de retención o antivuelco

Se calculan sólo para soportar la carga del viento.

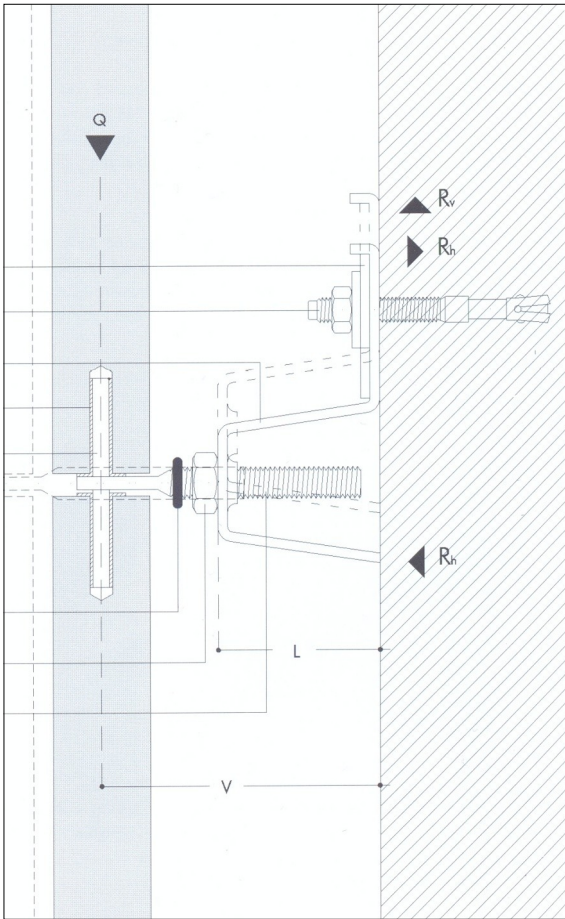
REPARTO DE CARGAS EN JUNTA HORIZONTAL

En este tipo de configuración, cada placa que no sea de borde, queda sujeta por cuatro anclajes de carga: dos en el borde superior y dos en el inferior. Cada anclaje de carga soporta 1/2 del peso de la placa W_p , además de 1/2 de la presión/succión (P/S) de viento: 1/4 de la placa superior y 1/4 de la inferior (*figura 5.4.54*).

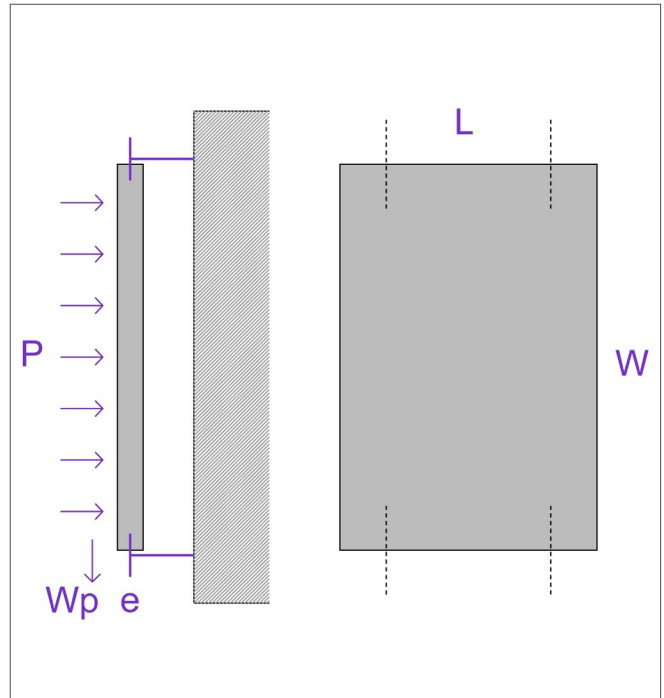
Las placas de borde quedan sujetas por dos anclajes de carga y dos de retención. Cada anclaje de carga soporta 1/2 del peso de la placa y soporta 1/2 de la P/S de viento. Los anclajes de borde, de retención, soportan únicamente 1/4 de la P/S de viento.

REPARTO DE CARGAS EN JUNTA VERTICAL

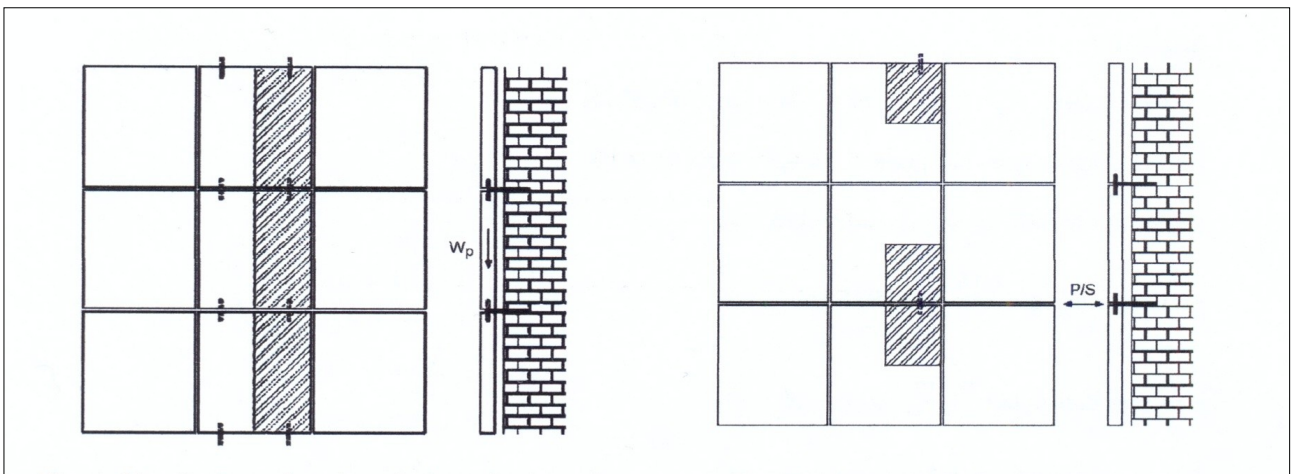
Cada placa se sujeta, en este caso, con cuatro anclajes en los cantos verticales: dos anclajes inferiores de



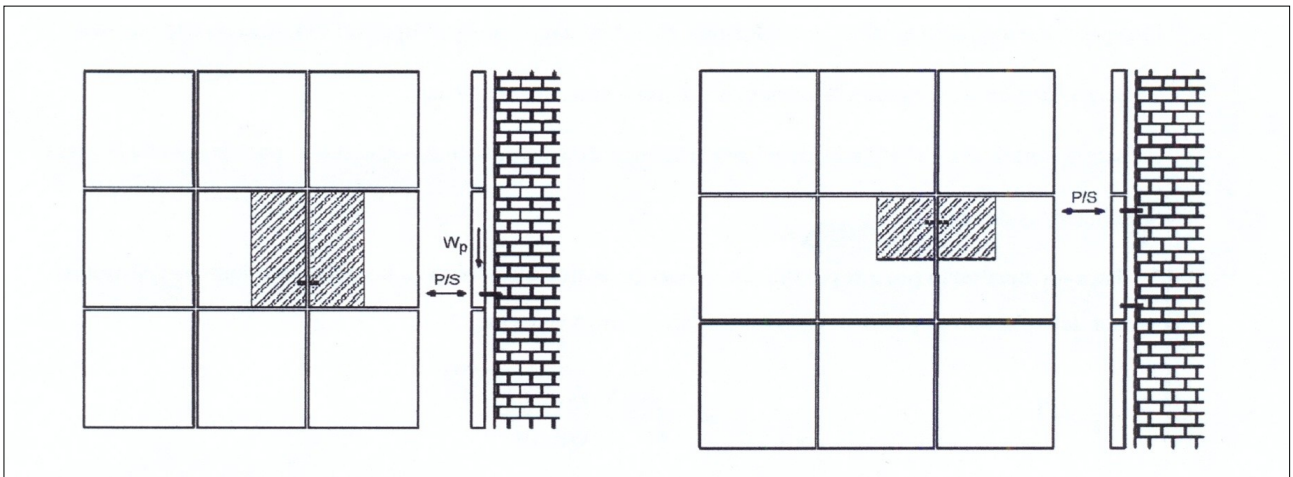
5.4.52



5.4.53



5.4.54



5.4.55

carga y dos superiores de retención.

Cada anclaje inferior de caga soporta el peso de dos medias placas, así como 1/2 de la P/S horizontal de viento. Cada anclaje superior de retención soporta 1/4 de la P/S de viento de cada una de las placas situadas a ambos lados en una misma hilada (*figura 5.4.55*).

□ POSICIONAMIENTO DE LOS ANCLAJES EN LA PLACA

Atendiendo a la norma **UNE 22203:2011**, desde el punto de vista de conseguir la igualdad de momentos negativos y positivos de la placa, la posición óptima de los puntos de anclajes en los cantos es $r = 0,21 L$. Siendo L la longitud del lado donde se alojan los anclajes.

- Cuando se utilicen anclajes de bulón dobles, (en grapa doble apoyada en perfilería), el posicionamiento de los mismos en el canto de las piezas puede diferir del criterio anterior, aunque no sustancialmente.
- Cuando se utilicen anclajes de bulón, y éstos se sitúen en el lado mayor de la placa, L_1 , el límite tolerable entre las dimensiones se recomienda que sea: $L_1 / L_2 \leq 2,41$

□ BULONES Y ORIFICIOS

Según indica la norma **UNE 22203:2011**, se debe tener en cuenta:

- El diámetro bulón debe ser como máximo 3mm menor que el del orificio en el que se aloja.
- La penetración del bulón en la piedra debe ser ≥ 25 mm.
- La profundidad del orificio debe superar, al menos en 5 mm, la longitud del bulón y ésta debe ser ≥ 30 mm.
- Los orificios sobre las placas deben realizarse por medios automatizados, nunca manualmente.
- Las perforaciones de los orificios en los anclajes pasantes, deben realizarse con broca de diamante o metal duro a rotación, sin percusión.

5.4.4 MODULACIÓN Y DISEÑO

A continuación se analizarán la modulación y el diseño y disposición de las placas en distintas fachadas trasventiladas a través de ejemplos singulares desde su aparición hasta la actualidad. De este modo será posible conocer si ha existido una evolución más o menos ordenada en cuanto a la tipología de fijación al muro o a la placa utilizadas, así como la manera en que se posicionan las piezas con respecto al plano de fachada y entre sí.

5.4.52
Parámetros del anclaje.
L salida en ménsula
V vuelo
Q carga máxima que soporta una grapa
E holgura mínima de 2 mm
 R_v reacción vertical
 R_h reacción horizontal
Fabricante Strow sistemas (2014)

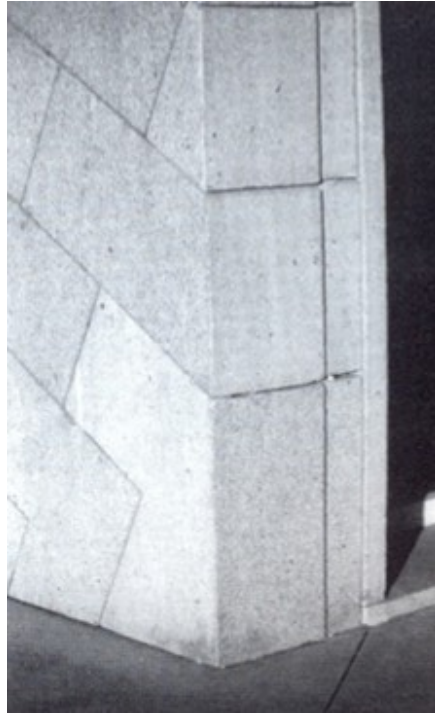
5.4.53
Solicitaciones a las que se ve sometido el anclaje.
Elaboración del autor

5.4.54
Reparto de cargas en junta horizontal:
A la izquierda, acciones de peso
A la derecha, acciones de presión/succión.
UNE 22203 (2011)

5.4.55
Reparto de cargas en junta vertical:
A la izquierda, acciones de peso
A la derecha, acciones de presión/succión.
UNE 22203 (2011)



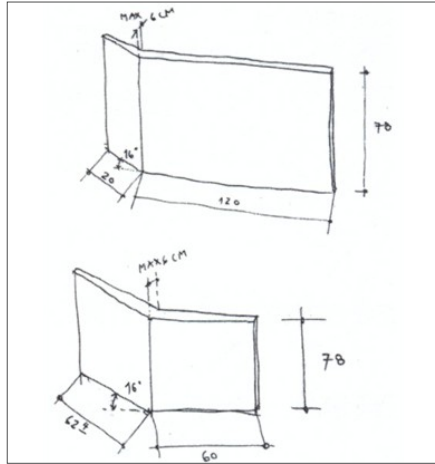
5.4.56



5.4.57



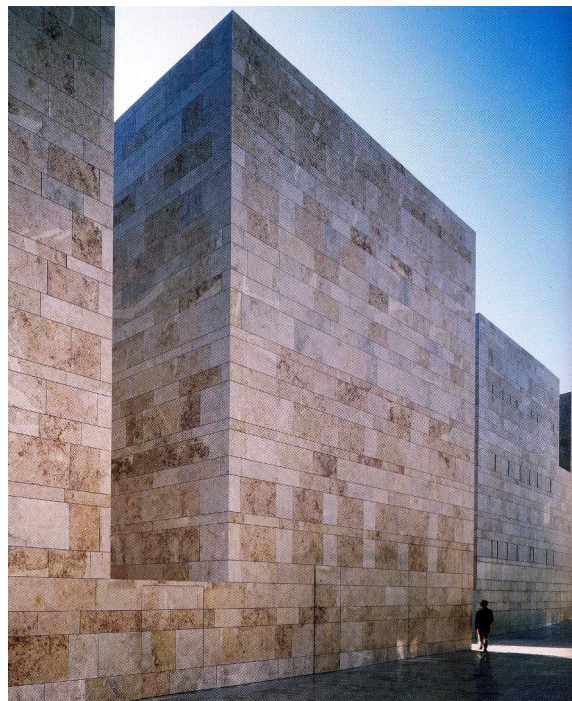
5.4.58



5.4.59



5.4.50



5.4.61

5.4.4-1 LA IMAGEN MASIVA

Ya se ha visto como las primeras fachadas trasventiladas utilizaban un despiece que recordaba la disposición de los sillares tradicionales. Generalmente las placas se ordenaban en hiladas horizontales con alturas de 40 o 50 centímetros de altura y longitudes algo superiores, y donde generalmente las juntas horizontales eran mucho más marcadas que las verticales.

5.4.56

Álvaro Siza, Centro Gallego de Arte Contemporáneo (Santiago de Compostela, 1988-1993).

Hisao Suzuki (1994)

Un aspecto de gran importancia en estos proyectos es la resolución de la esquina. La manera más sencilla de resolverla es alternar las testas de las placas, asomándose éstas alternativamente a ambas fachadas. De este modo, cada hilada de piedra muestra su canto al final de la hilada correspondiente. Sin embargo, estas testas vistas ponen en evidencia el verdadero espesor de la piedra, por lo que para enfatizar el aspecto de sillar de mayor grosor era común utilizar una serie de recursos.

5.4.57

Álvaro Siza, Centro Gallego de Arte Contemporáneo (Santiago de Compostela, 1988-1993). Solución en esquina mediante diedros realizados a partir de bloques.

Ignacio Paricio (2000)

- En el **Centro Gallego de Arte Contemporáneo**, Álvaro Siza, (Santiago de Compostela, 1988-1993) (*figura 5.4.56*), se utilizaron dos soluciones distintas.

Los giros se resolvieron vaciando grandes bloques de granito hasta formar unas piezas de planta angular y con el mismo espesor que el resto del aplacado, 5 centímetros, creando una sensación de edificio hermético (*figura 5.4.57*).⁴⁰

5.4.58

Juan Navarro Baldeweg, Sede de Conserjerías para la Junta de Extremadura (Mérida, 1995).

Hisao Suzuki (1992)

En algunos cambios de plano, sin embargo, se utilizó una solución más sencilla. Las piezas se resolvieron con un corte a inglete, que después se pegaban con una masilla de resina y polvo de la misma piedra, para crear el efecto visual de ser una pieza única.⁴¹

5.4.59

Juan Navarro Baldeweg, Sede de Conserjerías para la Junta de Extremadura (Mérida, 1995). Esquema de la pieza utilizada en esquina.

Ignacio Paricio (2000)

A pesar de haber escogido un espesor en principio suficiente, al utilizar un granito con un alto contenido en arcillas y una baja cohesión, los redondos de fijación despostillaron los 15 milímetros de separación que había entre el anclaje y el exterior.⁴²

5.4.60

Roberto Valle, Museo Etnográfico de Zamora (2003). Solución en esquina mediante diedros realizados a partir de bloques.

Archivo fotográfico del autor

- Siza desarrolló este tema en el **Pabellón de Portugal de la Expo 92**, dando a las esquinas una mayor importancia. En los planos de alzados el arquitecto indicó todas las piedras especiales que debían ser tratadas como diedros.

- En la **Sede de Conserjerías para la Junta de Extremadura** (Mérida, 1995), Juan Navarro Baldeweg utilizó una solución similar. Para evitar que se formara una junta vertical en los cambios de plano, se diseñaron unas piezas especiales de dimensiones mayores que las del resto de la fachada

5.4.61

Aires Mateus, Centro de Artes de Sines (2005).

DMF Fotografía (2009)

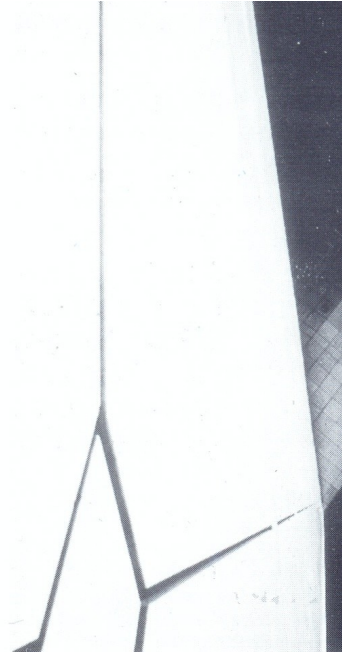
⁴⁰ Avellaneda, Jaume; Paricio, Ignacio (2000). Los revestimientos de piedra. cit. pág. 45

⁴¹ *Ibídem.*

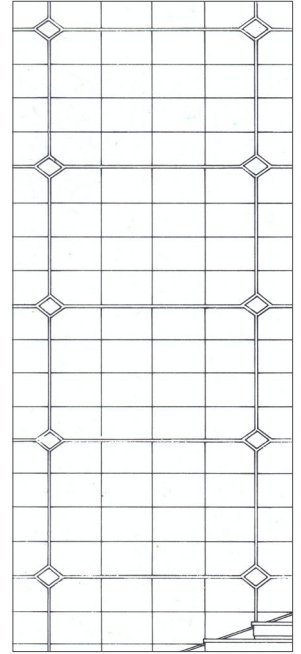
⁴² *Ibídem.*



5.4.62



5.4.63



5.4.64



5.4.65

(*figuras 5.4.58, 5.4.59*).

En este caso, el edificio presenta también una imagen de muro aparejado, aunque introduciendo un factor de confusión al elevarse la fachada de manera que la piedra no toca el suelo.

A pesar de que posteriormente se desarrollaron otro tipo de despieces que relegaron a éste en muchos casos, aún ha sido un recurso muy utilizado cuando se pretendía dar al edificio una imagen de fortaleza y de muros masivos. Algunos ejemplos más recientes son el Centro **cívico de Vitacura**, de Iglés Prat Arquitectos (Chile, 1999); el **Museo Etnográfico de Zamora**, de Roberto Valle (2003) (*figura 5.4.60*); el **Centro de Artes de Sines**, de Aires Mateus (2005) (*figura 5.4.61*); o el **Museo Ritter**, de Max Dudler (Waldenburch, Alemania, 2005), entre otros.

En estos casos era común revestir la cara interior del muro con el mismo tipo de piedra y despiece para enfatizar esa imagen de muro grueso de piedra.

5.4.4-2 NUEVOS DESPIECES

Pronto las fachadas de piedra empezaron a alejarse de esa imagen de muro tradicional, mostrando despieces diferentes que de alguna manera fueran el reflejo de las nuevas posibilidades de despieces que podían conseguirse gracias a los avances técnicos.

- En el **Arco de la Defensa**, diseñado por el arquitecto Otto von Spreckelsen (1985-1989) (*figura 5.4.62*) se utilizaron paneles de hormigón de grandes dimensiones sobre los que se montó una retícula de perfiles de acero inoxidable. Las placas de piedra se fijaron a esta retícula y posteriormente se colocó todo el conjunto con fijaciones puntuales a la estructura del edificio (*figuras 5.4.63, 5.4.64*).⁴³
- Un recurso muy utilizado fue la disposición de piedras con predominio de la dimensión vertical sobre la horizontal. Algunos ejemplos son el **Museo en Korbach**, de Berthold H. Penkhues (Alemania, 1999) o el **Museo de Arte Moderno**, Ortner and Ortner (Viena, 2001) (*figura 5.4.65*).
- Otro recurso consistió en la utilización de placas de reducido espesor, que evidenciaran su ligereza, como el **Centro de conservación de los túneles de Piedrafita**, de Arturo Franco Taboada (Lugo, 2002) (*figura 5.4.66*). En él, las piezas se fijaron mediante uñas atornilladas a varillas pasantes a una subestructura (*figura 5.4.67*).

5.4.62
Otto von Spreckelsen,
Arco de la Defensa
(1985-1989).
IMEG, Massarosa
(1993)

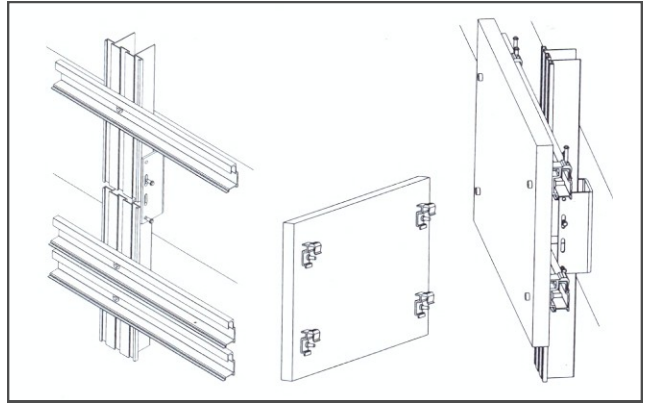
5.4.63, 5.4.64
Otto von Spreckelsen,
Arco de la Defensa
(1985-1989). Detalle
del despiece.
Michele di Silvo (1993)

5.4.65
Ortner and Ortner,
Museo de Arte Moderno,
(Viena, 2001).
Peter Cook (2003)

⁴³ Di Silvo, Michele (1993). *Facciate di pietra. Il marmo nell'architettura contemporanea: tecnologia dei paramenti esterni tra innovazione e tradizione*. Alinea editrice, Firenze



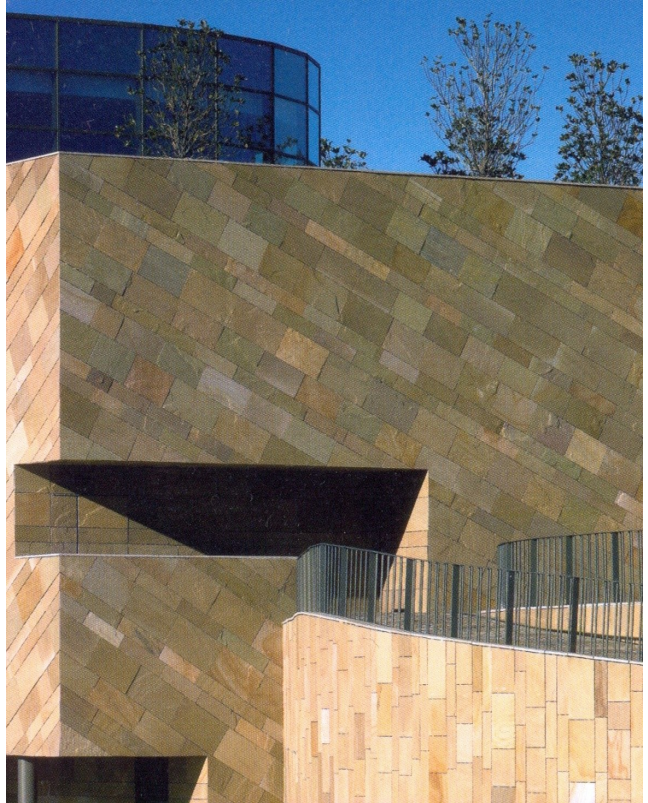
5.4.66



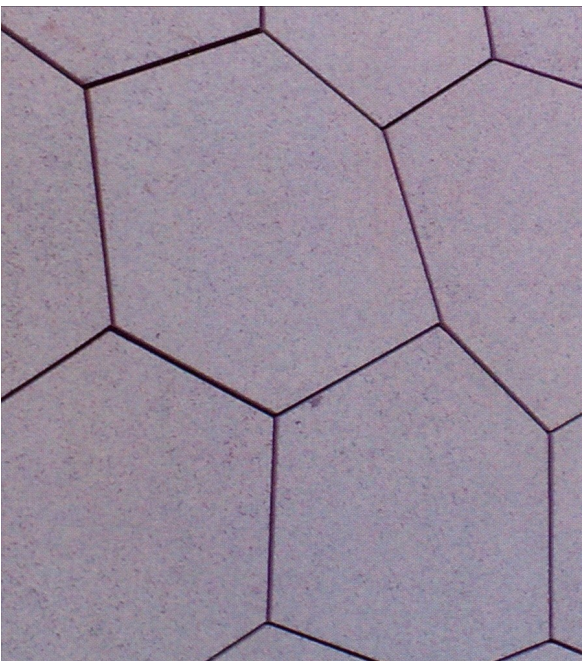
5.4.67



5.4.68



5.4.69



5.4.70



5.4.71

- En algunos casos se utilizó un aparejo en el que las hiladas dejan de ser horizontales para pasar a ser inclinadas. En este caso la disposición de la fijación se complica porque es conveniente que el plano de apoyo de la piedra sea siempre horizontal. Siza recurrió a esta disposición en algunos cuerpos del **Centro Gallego de Arte Contemporáneo** (*figuras 5.4.68*). También pueden verse en el **Gran teatro de Provenza**, de Gregotti Associati International (2007) (*figura 5.4.69*), o en el **Museo de la Evolución Humana**, de Juan Navarro Baldeweg (Burgos, 2010) (*figuras 5.4.70, 5.4.71*).

5.4.66

Arturo Franco Taboada, Centro de conservación de los túneles de Piedrafitá (Lugo, 2002).
C. F. Piñar (2008)

5.4.67

Arturo Franco Taboada, Centro de conservación de los túneles de Piedrafitá (Lugo, 2002).
Proesga (2008)

5.4.68

Siza, Centro Gallego de Arte Contemporáneo. Despiece inclinado.
Ignacio Paricio (2000)

5.4.69

Gregotti Associati International, Gran teatro de Provenza (2007).
Di Bello, Donato (2009)

5.4.70

Juan Navarro Baldeweg, Museo de la Evolución Humana (Burgos, 2010).
Archivo fotográfico Strow sistemas. Cedita.

5.4.71

Juan Navarro Baldeweg, Museo de la Evolución Humana (Burgos, 2010). Esquema del sistema de fijación utilizado.
Archivo fotográfico Strow sistemas. Cedita.

5.4.4-3 LA INDEPENDENCIA DE PLANOS

El siguiente paso hacia una imagen ligera consistió en la desvinculación de cada uno de los planos de la fachada, de modo que en vez de ser un plano único pasó a ser un lienzo independiente y ligero, enmarcado por elementos de otro material que evidencian su delgadez.

Los primeros ejemplos de estas soluciones se vieron en los huecos de las fachadas, que se recortaban con otro material distinto que no dejara ver los cantos de las placas.

- Más adelante surgieron ejemplos más evidentes, como la **Residencia de ancianos de Campdevàno**, de J. L. Mateo y Jaume Avellaneda (1996), donde esta desligazón de planos se produjo en las esquinas del edificio mediante la incorporación de chapas metálicas.
- En el edificio de la **Sede de la revista El Croquis**, proyecto de los arquitectos Fernando Márquez y Richard Levene (El Escorial, 2008), se utilizó este mismo recurso para enfatizar la apariencia de ligereza del paño de la fachada. En este ejemplo, además, se elevó el plano de fachada del suelo, y los perfiles que lo delimitaban presentaban una inclinación, produciéndose una sensación de ligereza y movilidad (*figura 5.4.72*).

5.4.4-4 REVESTIMIENTO DE GRANDES PIEZAS

La elección del tamaño de las placas de piedra se hacía en función de del tipo de piedra elegido. Las piedras más blandas requieren tamaños menores si se utilizan los grosores habituales. Existen una serie de edificios en los que se ha buscado el tipo de piedra que permitiese emplear formatos de grandes dimensiones sin tener que recurrir a grandes espesores.

- Con piedras muy duras y compactas los despieces pueden llegar a tamaños considerables como en los edificios para los **Institutos de Investigación de la Universidad de Santiago**, de Manuel Gallego. Las enormes



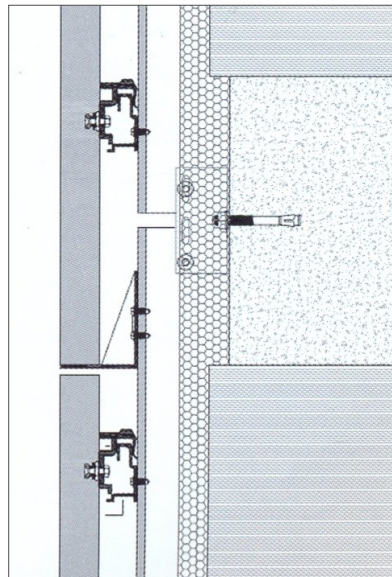
5.4.72



5.4.73



5.4.74



5.4.75

placas de granito extremeño forman un despiece a gran escala. Una sola placa salva tanto la altura de las ventanas como la separación entre ventana y ventana. El grosor de estas placas es de 4,5 centímetros, a excepción del zócalo, donde se incrementa a 12 centímetros por seguridad ante los impactos.⁴⁴

- Otro despiece similar se utilizó en el **Gran Teatro del Liceo de Barcelona**, de I. de Solà Morales, Ll. Dilme, X. Fabre (1999). Allí, las piezas llegaron a medir hasta 2,5 metros por 1,1 metros con 5 centímetros de grosor.⁴⁵
- En el **Edificio de oficinas de la calle Gran vía**, se utilizaron también grandes placas con una altura de una planta (*figuras 5.4.73*).
- En el **Edificio de viviendas** de Carlos de Riaño, Madrid (2005) (*figura 5.4.74*), se utilizaron placas de granito de Porriño de 4 centímetros de espesor en dimensiones de hasta 2,90 x 1,30 metros. Las placas se fijan mediante tacos alojados en el dorso de la placa, y descansan en un perfil inferior de apoyo (*figura 5.4.75*).⁴⁶

5.4.4-5 PLANOS INCLINADOS

Pese a no existir gran cantidad de ejemplos, sí se produjo una tendencia hacia la colocación de las placas de forma solapada, de tal manera que rompen la planeidad del aplacado, produciendo efectos de sombras.

- En el **edificio de oficinas de la Charlotenstrasse**, Berlín (1997), J. P. Kleihues (*figura 5.4.76*) se utilizaron piezas de travertino romano de 30 por 90 centímetros consiguiendo un efecto tridimensional. Las placas se solapan entre unas listones verticales de piedra que sujetan lateralmente las placas mediante pernos de acero inoxidable y resinas sintéticas (*figura 5.4.77*).⁴⁷
- En el **Parque Arqueológico del Arte Rupestre**, de RVR arquitectos (2009) (*figura 5.4.78*), las placas de granito gris se colocaron solapadas tanto en sentido horizontal como en vertical. Aunque esta disposición responde a la búsqueda de una superficie texturizada y su funcionamiento es el de una fachada trasventilada, para la disposición de los solapes se tuvo en cuenta la dirección predominante del viento en los días de lluvia. Las placas se sujetan a los muros estructurales de hormigón mediante anclajes puntuales de acero inoxidable. Para permitir el solape de ambas direcciones se realizó una modificación al modelo de anclaje estándar (*figuras 5.4.75, 5.4.76, 5.4.77*).⁴⁸

5.4.72

Fernando Márquez y Richard Levene, Sede de la revista El Croquis (El Escorial, 2008)
Archivo fotográfico del autor.

5.4.73

Edificio en calle Gran Vía, Madrid.
Archivo fotográfico del autor.

5.4.74

Carlos de Riaño, edificio de viviendas, Madrid (2005).
M de Guzmán (2008).

5.4.75

Carlos de Riaño, edificio de viviendas, Madrid (2005). Sección constructiva.
Proesga.

⁴⁴ Avellaneda, Jaume; Paricio, Ignacio (2000). Los revestimientos de piedra. cit. pág. 25

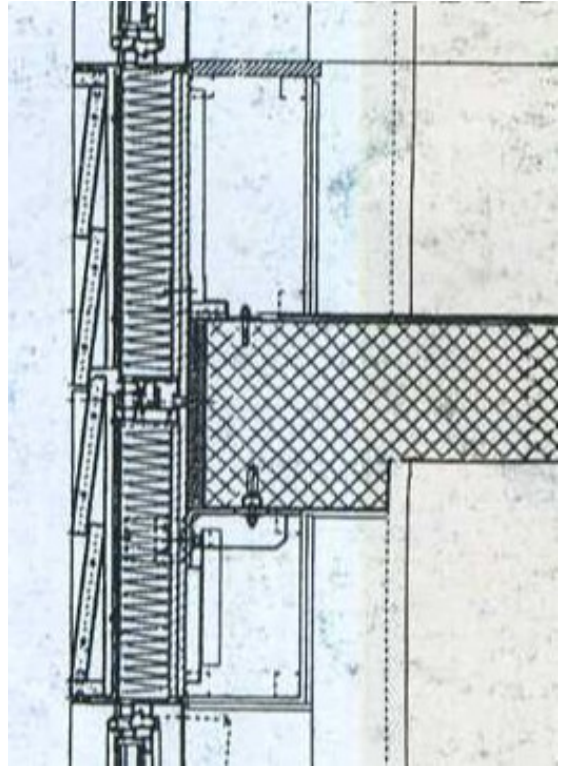
⁴⁵ *Ibidem.*

⁴⁶ Fernández Madrid, Joaquín (2008). Sistemas de construcción en piedra. Tectónica nº 27, pp. 4-27. pág. 23.

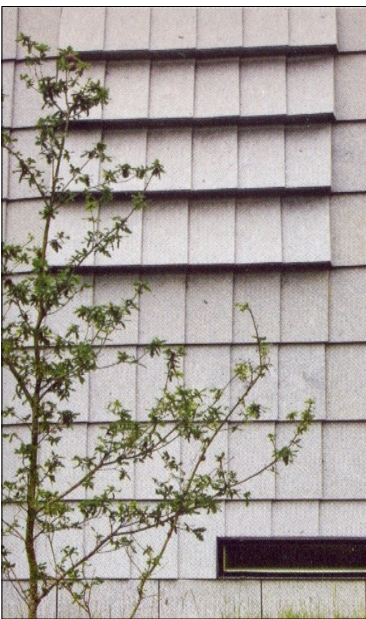
⁴⁷ AA.VV (1997). Arquitectura Viva 54. Arquitectura Viva S.L, Madrid. pág. 87.



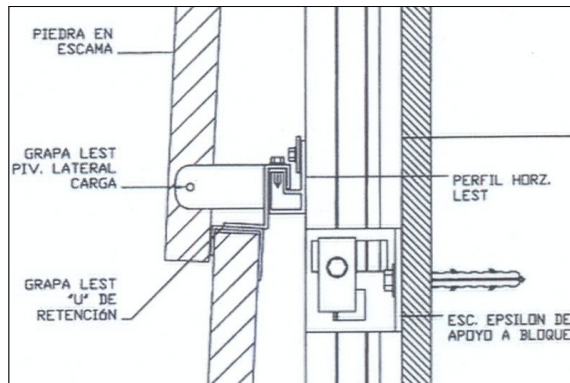
5.4.76



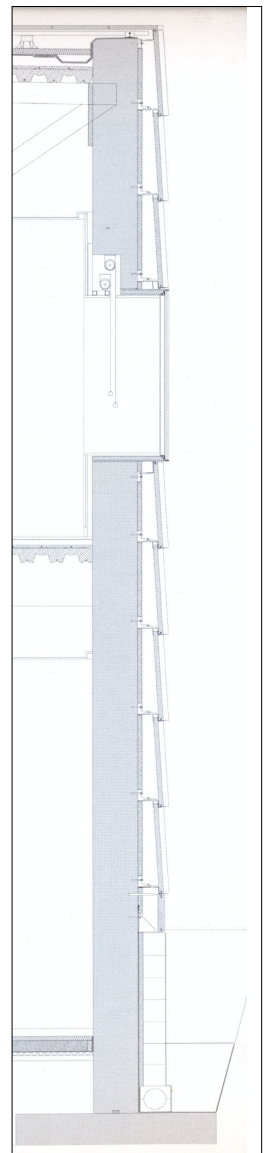
5.4.77



5.4.78



5.4.80



5.4.79



5.4.81

5.4.4-6 PLANOS CURVOS

Tras las primeras experiencias con placas solapadas se incorporó la curvatura del plano, pasándose de la forma inclinada a la generación de un plano curvo. En estos casos la fachada empieza a comportarse como una piel flexible que se adapta a la forma utilizada.

- El primer caso fue el edificio **Domus-Casa del Hombre**, de Arata Isozaki y César Portela (La Coruña, 1995). En él, el aplacado de granito se colocó con un sistema más típico de las cubiertas que de las fachadas. Las placas se solapan ligeramente formando una cáscara a base de escamas (*figuras 5.4.82, 5.4.83*).
- Quizás el ejemplo más representativo sea el **Museo Guggenheim**, de Frank Gehry (Bilbao, 1997), donde la curvatura es bastante más evidente (*figura 5.4.84*). En este caso, las placas se van adaptando a la forma curva generada por una estructura de perfiles metálicos principales verticales y secundarios horizontales. A ello hay que sumar que el despiece no es regular, sino que las juntas verticales se van desplazando en función de la altura.

5.4.76

J. P. Kleihues, edificio de oficinas de la Charlottenstrasse, Berlín (1997). AA.VV (1997)

5.4.77

J. P. Kleihues, edificio de oficinas de la Charlottenstrasse, Berlín (1997). Sección constructiva. AA.VV (1997)

5.4.78

RVR arquitectos, Parque Arqueológico del Arte Rupestre (2009). Héctor santos Díez, Tono Mejuto (2012)

5.4.79, 5.4.80

RVR arquitectos, Parque Arqueológico del Arte Rupestre (2009). Sección constructiva. Héctor santos Díez, Tono Mejuto (2012)

5.4.81

RVR arquitectos, Parque Arqueológico del Arte Rupestre (2009). Fotografía de obra. Héctor santos Díez, Tono Mejuto (2012)

Dado que las piezas eran demasiado finas para que los anclajes funcionasen adecuadamente, la solución para fijar las placas consistió en unas tiras de la misma piedra encoladas, de manera que la placa duplicaba su espesor en una banda superior y otra inferior, coincidiendo con las zonas de máxima tensión generada por la fijación. También se incorporaron unos cables de seguridad de acero inoxidable que evitaba el desprendimiento de la pieza en caso de fallo del anclaje (*figuras 5.4.85, 5.4.86*).⁴⁹

5.4.4-7 PLANOS DESPLEGADOS

Tras haber utilizado la piedra en grandes paños curvos, el siguiente paso fue su utilización en planos que se despliegan. En estos casos la piedra genera un volumen en el que se comporta como acabado de fachada y de cubierta al mismo tiempo.

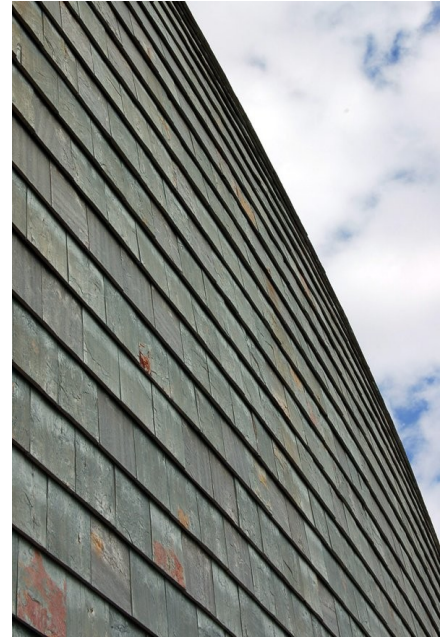
- En la sala de exposiciones del **Centro Municipal de Exposiciones y Congresos de Ávila**, de Francisco Mangado (2003-2004), al arquitecto generó un volumen topográfico irregular. Las placas de granito se colocan adaptándose a cada plano, formando planos inclinados de fachada, techos suspendidos y cubrición (*figura 5.4.87*). Cada placa se sujeta mediante 4 tornillos ocultos en el reverso de la placa a perfiles continuos horizontales

⁴⁸ Cluster del Granito (2012). Arquitectura en granito. Fundación Centro Tecnológico de Granito de Galicia. pág. 87.

⁴⁹ Avellaneda, Jaume; Paricio, Ignacio (2000). Los revestimientos de piedra. cit.



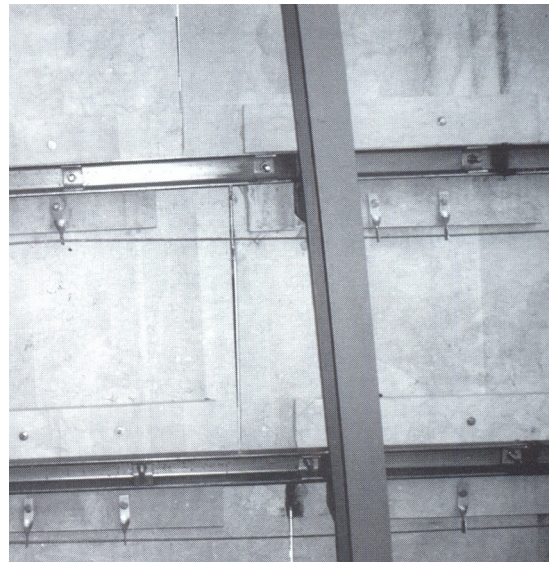
5.4.82



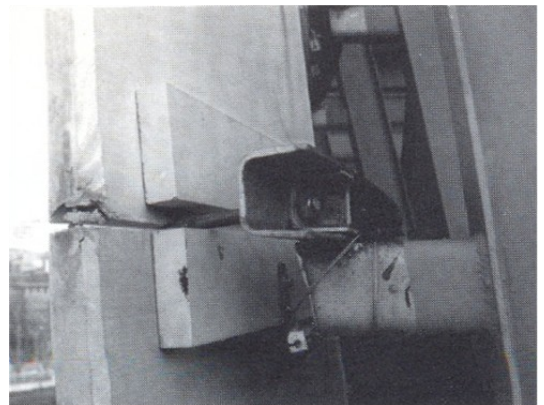
5.4.83



5.4.84



5.4.85



5.4.86

que a su vez se anclaban a una perfilera principal continua fijada mecánicamente a la estructura del edificio (*figura 5.4.88*).⁵⁰

Los cambios de plano se resolvieron mediante ángulos en los que la piedra se cortaba a inglete. Con este sistema se crea una junta marcada en cada arista, generando una imagen de poliedro pétreo.

- Quizás el ejemplo más radical de este sistema sería la **Biblioteca y archivo de Galicia**, de Peter Eisenman (Santiago, 2011), donde la piedra se colocó en grandes paños alabeados que representaban el monte con sus elevaciones y depresiones de revestimiento pétreo (*figura 5.4.89*).

El sistema de anclaje de las placas de cuarcita de 5 centímetros de espesor se realizó, al igual que en el caso anterior, mediante 4 tornillos ocultos en el reverso de cada pieza. La unión de ellos a la estructura se realizó mediante un complejo sistema de perfilera de aluminio que se iba adaptando a las formas del edificio (*figura 5.4.90*).⁵¹

5.4.4-7 VUELTA A LAS PLACAS DE GRAN ESPESOR

En los últimos años se ha ido desarrollando en España una tendencia que consiste en generar de nuevo un aspecto un aspecto de fachada masiva. Ello ha ido acompañado de un aumento del espesor de las placas de piedra, en unos casos para poder utilizar piezas de un determinado tamaño o aspecto y en otro para poder disponer de un determinado tipo de piedra.

- En el **Teatro Auditorio de San Lorenzo de El Escorial**, de los arquitectos Picado-de-Blas (2006), se utilizaron grandes losas de costeros de gran espesor (*figura 5.4.91*). Esta idea ha sido retomada en varios proyectos.
- En el **nuevo edificio de las Arcadas**, proyecto de María Antonia Fernández Nieto y Pilar Peña Tarancón (Zamora, 2011), se pretendía dar una imagen muraria de acuerdo al resto de edificios históricos que se encuentran en los alrededores.

5.4.82, 5.4.83
Arata Isozaki y César Portela, edificio Domus, Casa del Hombre (La Coruña, 1995).
César Portela

Para ello se recuperó la idea vista en el caso anterior, generando un zócalo de grandes piezas de costeros de arenisca de Zamora, de 10 centímetros de espesor (*figura 5.4.92*).⁵²

El cuerpo superior del edificio, sin embargo, se resolvió mediante placas, del mismo tipo de piedra, pero con un espesor de 6 centímetros. En este caso las piezas se dispusieron formando una composición de planos en los que se insertan las piezas de distintos tamaños según el plano en el que

5.4.84, 5.4.85, 5.4.86
Frank Gehry, Museo Guggenheim, (Bilbao, 1997).
Imágenes de la fijación utilizada.
Héctor Santos Díez, Ignacio Paricio (2000)

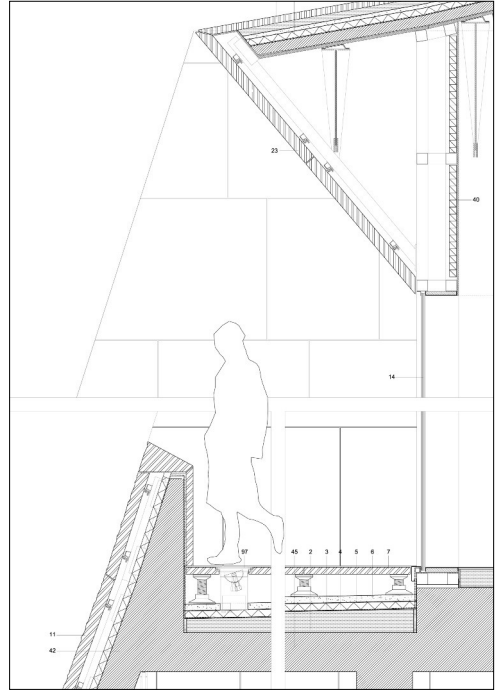
⁵⁰ Datos obtenidos de los planos de proyecto.

⁵¹ AA.VV (2011). AV Monografías 147-148 . Arquitectura Viva S.L, Madrid.

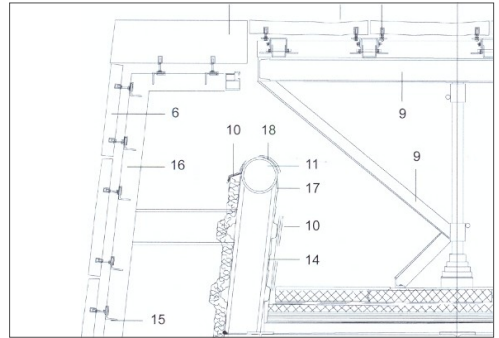
⁵² Datos obtenidos de la memoria del proyecto. Cedita.



5.4.87



5.4.88



5.4.90



5.4.89

se encuentren (*figura 5.4.93*).⁵³

Dada la gran cantidad de ejemplos singulares existentes, a lo largo de este recorrido se han mencionado sólo algunos que podrían considerarse representativos de cada grupo. Tras el análisis se ha podido ver que la piedra ha sido capaz de buscar soluciones novedosas que se adapten a los distintos gustos arquitectónicos y preferencia de cada arquitecto.

A pesar de no haber existido una clara evolución estricta sí ha podido observarse una serie de tendencias encaminadas a un objetivo común. Dicha evolución podría resumirse en:

1. **Imagen masiva con despieces que representan los aparejos tradicionales.**
2. **Generación de una imagen más ligera de la piedra.**
3. **Entendimiento de la fachada como un plano flexible que puede inclinarse y curvarse.**
4. **El plano se convierte en piel, en una superficie moldeable que define el volumen exterior completo del edificio.**

5.4.87

Francisco Mangado, Centro Municipal de Exposiciones y Congresos de Ávila, (2003-2004). *Archivo fotográfico del autor.*

5.4.88

Francisco Mangado, Centro Municipal de Exposiciones y Congresos de Ávila, (2003-2004). Sección constructiva. *Estudio de arquitectura Francisco Mangado. Cedida.*

5.4.89

Peter Eisenman, Biblioteca y archivo de Galicia (Santiago, 2011). *Manual González Vicente (2011)*

5.4.90

Peter Eisenman, Biblioteca y archivo de Galicia (Santiago, 2011). Sección constructiva. *Plano de proyecto (2011)*

5.4.5 CONCLUSIONES PARCIALES

- Casi un siglo antes de que apareciera la fachada trasventilada ya se tenían conocimientos sobre cómo sujetar las placas de piedra mediante fijaciones metálicas. Pese a no calcularse estructuralmente, éstas presentaban una forma y comportamiento muy intuitivos que ya empezaban a prever la disposición adecuada de los elementos para la formación de la fachada trasventilada.
- La introducción de una cámara de aire ventilada introdujo una serie de ventajas de gran importancia para el funcionamiento de la fachada, tanto en cuestiones higrotérmicas y medioambientales como en el proceso constructivo. Además, la posibilidad de la colocación continua del aislamiento aportó otras importantes mejoras, especialmente en cuanto a eliminación de puentes térmicos. Todas estas ventajas que presentaba el nuevo sistema constructivo propiciaron que su uso se difundiera muy rápido por todo el mundo.
- Las primeras fachadas realmente trasventiladas que aparecieron presentaban unos diseños arquitectónicos muy novedosos. Sin embargo, para el diseño de la disposición de las piezas de piedra se recurrió a despieces muy clásicos basados en los aparejos *isodomo* y *pseudo-isodomo* griegos.

⁵⁰ *Ibidem.*



5.4.91



5.4.92



5.4.93

- Tras la construcción de estas primeras fachadas trasventiladas quedaron ampliamente demostradas sus ventajas frente a los muros chapados. Ello, junto al hecho de que se había utilizado en edificios de relevancia arquitectónica, hizo que tanto el sistema constructivo como los diseños de despieces y formato de las piezas se exportaran rápidamente a otros países, incluido España.
- La tipología de anclajes que se podían emplear en este tipo de fachadas quedó definida ya en sus primeros años. Su evolución ha sido escasa en cuanto a la aparición de nuevos tipos de anclajes, pero constante en cuanto al diseño de nuevos accesorios o la definición de los existentes, y que mejoraban el montaje y funcionamiento de la fachada.
- Conforme se iban desarrollando nuevos diseños de fachada se fue haciendo más necesaria la realización de un cálculo estructural de los anclajes, a partir de las solicitaciones que debían soportar, que garantizara tanto su estabilidad mecánica como la eficacia de la unión al soporte.
- Pronto se fueron construyendo numerosos edificios que utilizaban las placas de piedra de una manera singular, explorando sus posibilidades. El conocimiento real de los cálculos estructurales de anclajes y del espesor mínimo necesario de las placas, regulado actualmente por la norma correspondiente, así como su correcta utilización, se hizo fundamental para poder innovar en estos diseños.
- Las fachadas en las que la piedra adquiere un nuevo significado por representar diferentes conceptos se convirtieron en las grandes impulsoras de la piedra. Representan la gran cantidad de arriesgados diseños que pueden conseguirse a través del conocimiento de los materiales y elementos (placas y anclajes), de sus requisitos, necesidades y posibilidades.
- La evolución de todos estos nuevos conceptos ha ido encaminada a la definición de una fachada de apariencia ligera y versátil, que pasa de ser matérica a epidérmica.
- La fijación utilizada en los ejemplos epidérmicos de fachadas tiende a realizarse mediante una subestructura de perfiles metálicos (que puede ser simple o doble según la complejidad de la forma) que se fijan a la estructura o al muro, adaptándose a su forma, y a la que se fijan las placas de piedra.

5.4.91

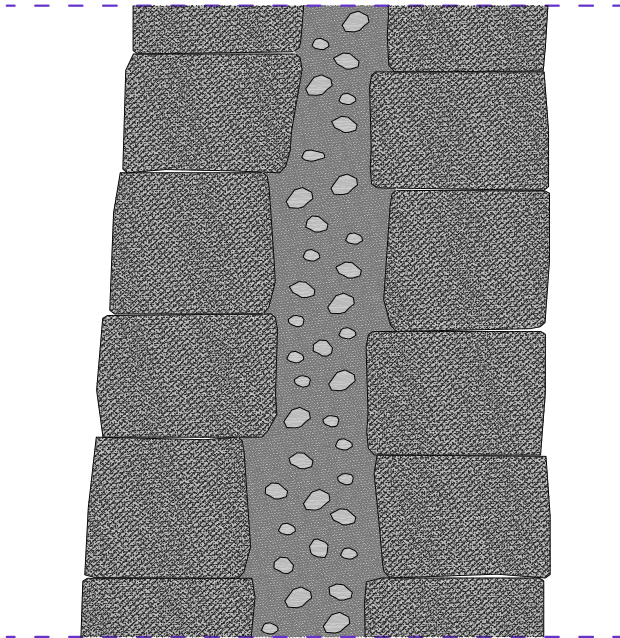
Arquitectos Picado-de-Blas, Teatro Auditorio de San Lorenzo de El Escorial (2006)
Archivo fotográfico del autor

5.4.92

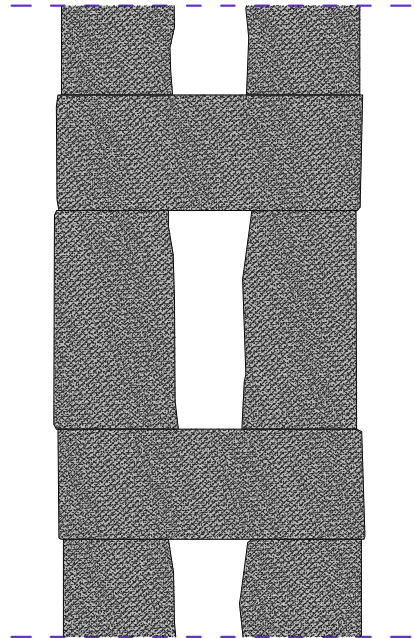
María Antonia Fernández Nieto y Pilar Peña Tarancón, Nuevo edificio de las Arcadas (Zamora, 2011).
Archivo fotográfico del autor

5.4.93

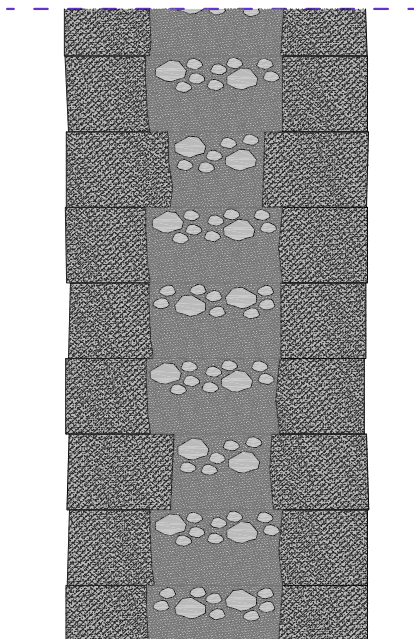
María Antonia Fernández Nieto y Pilar Peña Tarancón, Nuevo edificio de las Arcadas (Zamora, 2011). Detalle de la fachada.
Archivo fotográfico del autor



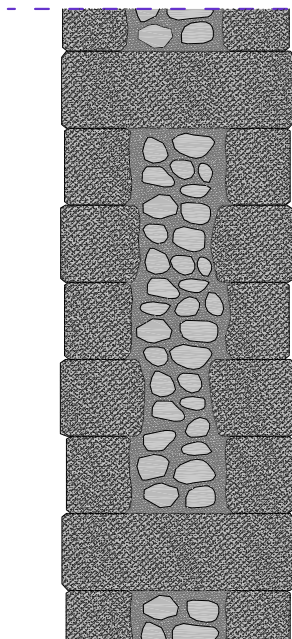
Muro compuesto egipcio (2600 a.C.)



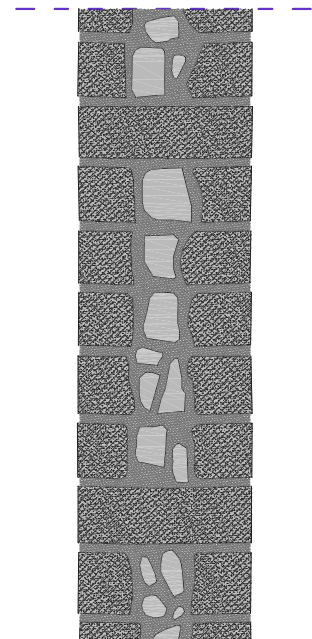
Muro compuesto griego (s.VI a.C.)



Muro compuesto romano (s. I d.C.)



Muro compuesto románico (s. XI)



Muro compuesto gótico (s. XIII)




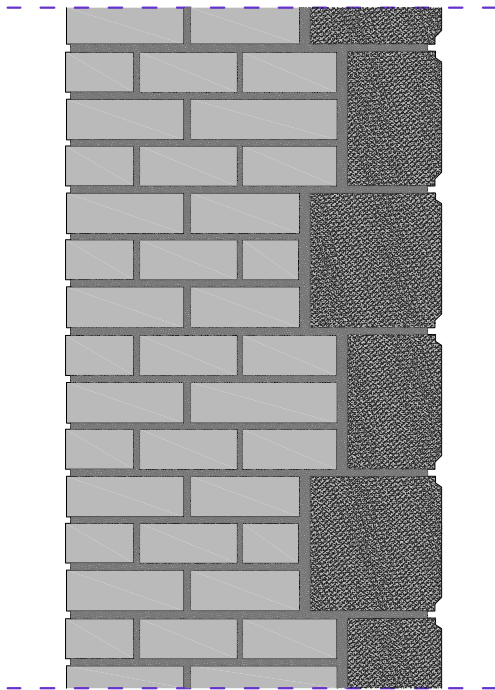
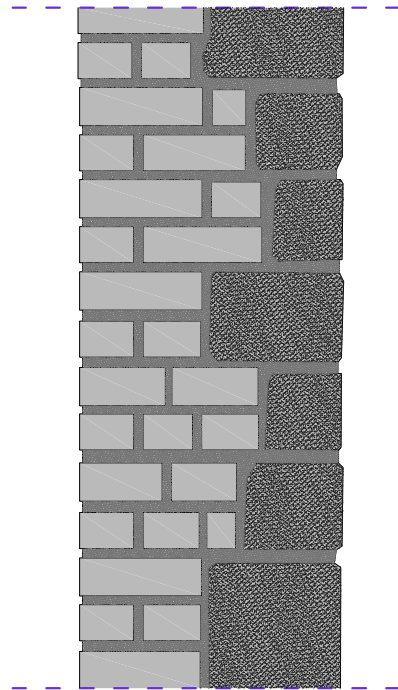
-  Piedra sillar
-  Piedra mampuesto
-  Mortero/hormigón

LÁMINA 1: MURO COMPUESTO

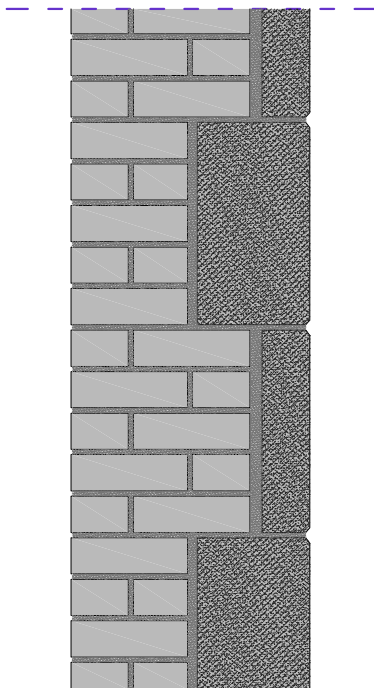




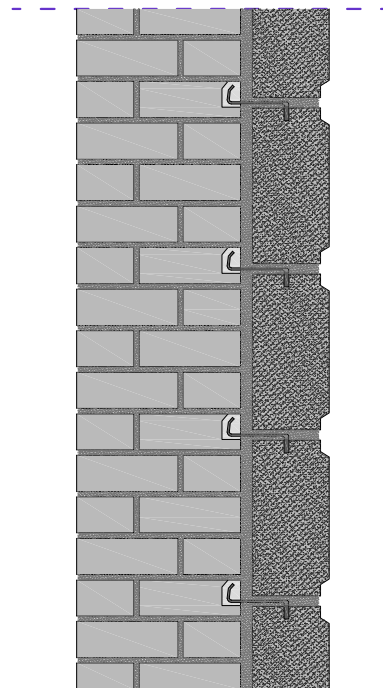
Muro mixto renacentista (s. XIV)






Muro mixto (s. XVIII-XIX)

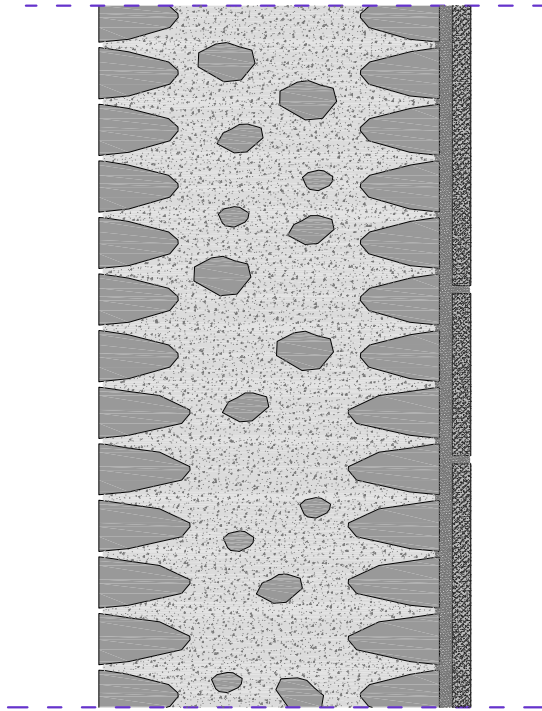


Muro mixto (finales s. XIX)

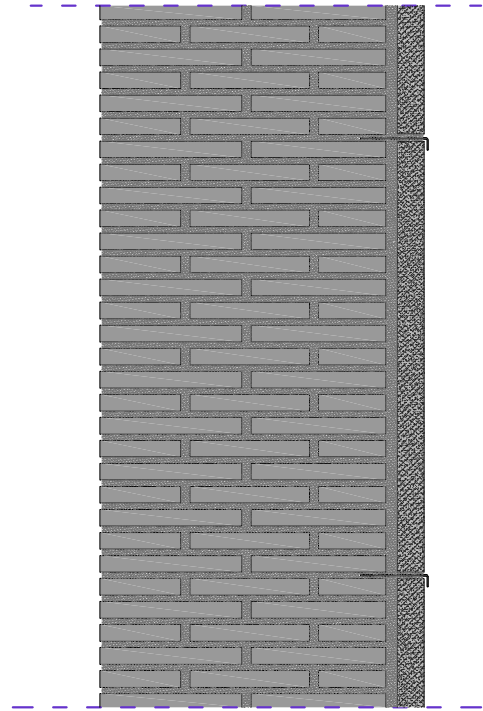


Muro mixto (1895)

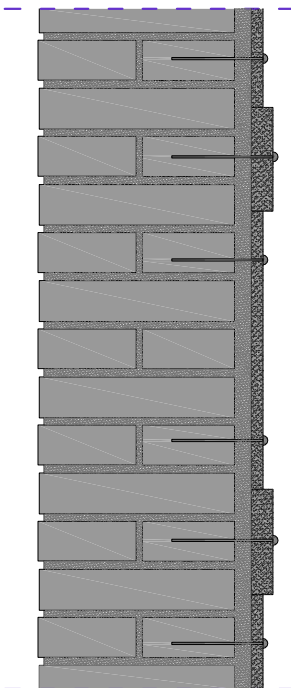
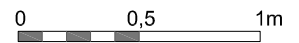
-  Piedra
-  Ladrillo
-  Mortero



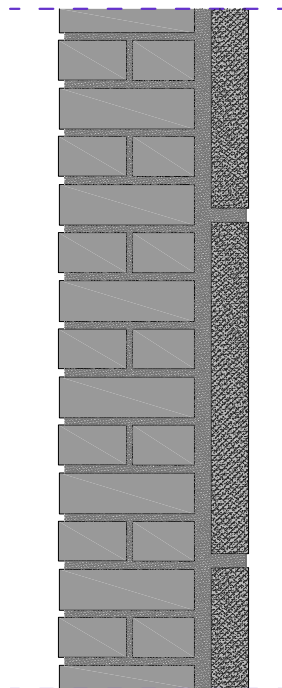
Muro chapado romano (s. II)



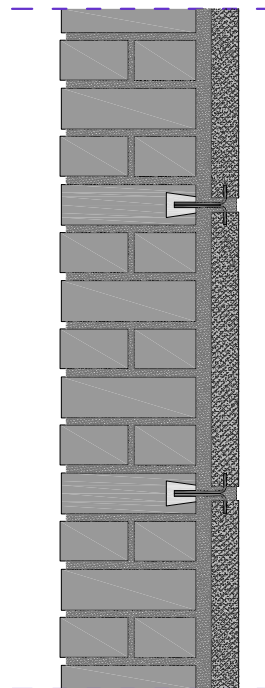
Muro chapado bizantino (s. VI)



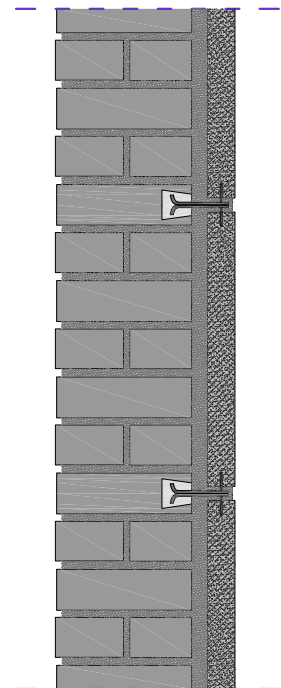
Muro chapado con placas claveteadas (1899)




Muro chapado (1930)



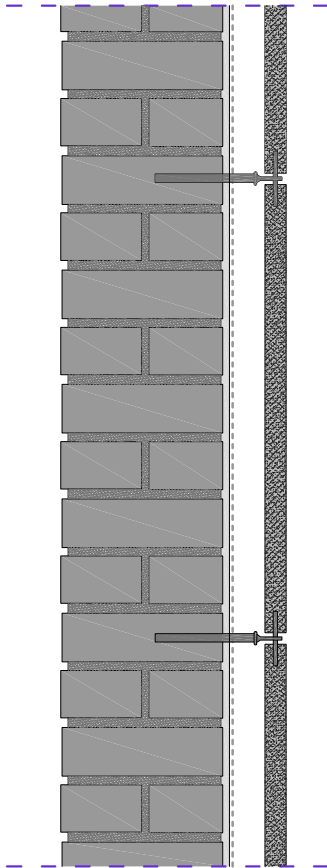
Muro chapado con aplacado y varillas de retención (1940)



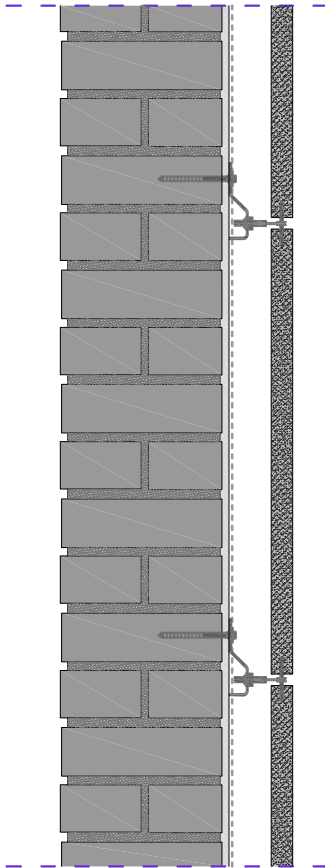
Muro chapado con aplacado y anclajes (1972)

-  Piedra
-  Ladrillo
-  Mortero
-  Hormigón

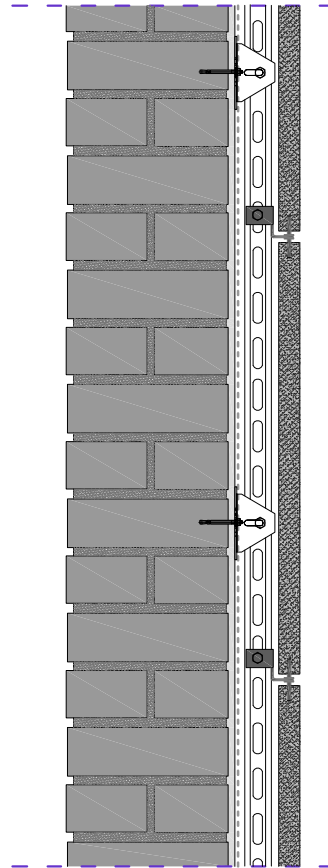




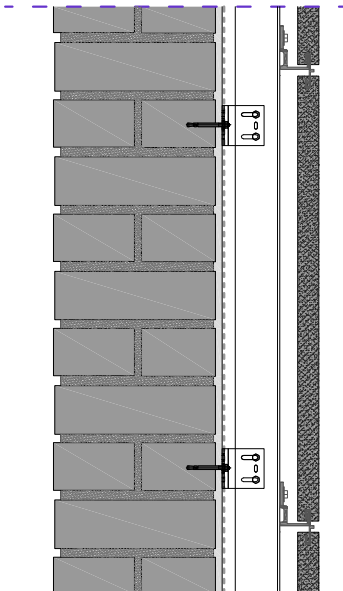
Fachada trasventilada con anclaje puntual empotrado (1991)



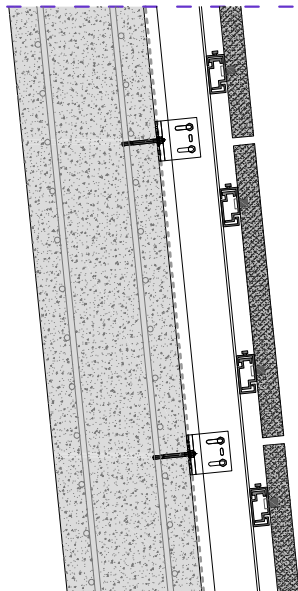
Fachada trasventilada con fijación mecánica puntual (1991)



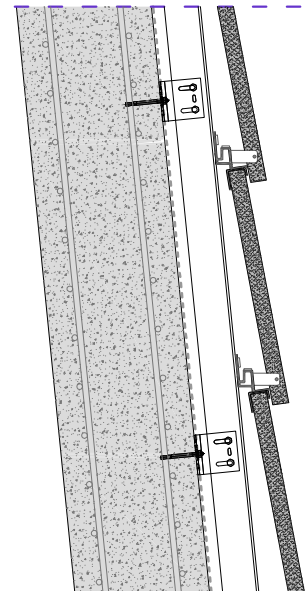
Fachada trasventilada con anclaje de subestructura fijado mecánicamente y fijación de placa mediante anclaje de ranura simple (1991)







Fachada trasventilada con anclaje de subestructura fijado mecánicamente y unión a placa mediante anclaje de ranura continua (2000)



Fachada trasventilada con anclaje de subestructura y unión a placa mediante tornillos en el reverso (2002)



Fachada trasventilada con anclaje de subestructura y unión a placa mediante anclaje lateral de carga en junta vertical y grapa de retención (2005)

-  Piedra
-  Mortero
-  Ladrillo
-  Hormigón

----- Barrera de vapor

Nota: el aislamiento térmico no se ha incluido en el dibujo para evitar confusión

LÁMINA 4: FACHADA TRASVENTILADA

0 0,5m

De lo analizado a lo largo del trabajo pueden extraerse las siguientes conclusiones:

1. La progresiva distinción entre estructura y cerramiento ha influido en el adelgazamiento del muro en general, que pasa de ser portante a soportado y, en especial, de las piezas de piedra, motivando su utilización en forma de placas delgadas, que da lugar a la aparición de las actuales fachadas trasventiladas.

Se podría considerar el comienzo de esta distinción durante el periodo gótico, tras la construcción de grandes estructuras resistentes basadas en arcos y bóvedas de grandes dimensiones. Esto, junto al conocimiento de la distribución de cargas entre sillares y la incorporación de gruesas juntas de mortero entre los mismos, permitió adelgazar las partes de muro no estructurales, así como el tamaño de los sillares.

Esta distinción se fue haciendo más clara a lo largo del s. XIX, cuando el muro, despojado de su función estructural, sufrió un evidente adelgazamiento. Durante este siglo surgió por primera vez el término tectónico para describir la relación entre la forma externa y la estructura interna de un edificio.

Ya a finales del s. XIX, con la llegada de la modernidad, se fueron desarrollando nuevas técnicas constructivas, donde la evidencia del papel no estructural de la piedra motivó en gran medida la utilización de revestimientos delgados de piedra.

2. La posibilidad de producir placas de piedra de poco espesor tiene una gran importancia, puesto que este hecho está íntimamente ligado a la evolución hacia una construcción más ligera, lo que a la postre daría lugar a la aparición de la fachada trasventilada de piedra.

El paso fundamental fue la evolución del corte con sierras de carpintero, que suponía un trabajo duro y lento hacia el desarrollo de las primeras máquinas hidráulicas que permitían serrar bloques de piedra con mayor facilidad y rapidez. Se encuentran referencias a estas primeras máquinas, que permitían producir placas de poco espesor, en la época del Imperio Romano. Así, la primera referencia directa de la aplicación de estos sistemas se encontró en un poema del año 371 a.C., y la primera referencia gráfica se encontró en un relieve del siglo III d.C.

Posteriormente, en el siglo VI se volvió a emplear la técnica de revestimiento en edificios bizantinos, y aunque no se puede determinar con exactitud si producían estas placas con ayuda de máquinas o por el método manual, el espesor de las mismas hace pensar que probablemente utilizaran máquinas muy similares a las anteriores romanas.

No fue hasta los años 1629 y 1718 cuando se vuelve a tener referencia de sierras mecánicas. Aportaban las ventajas de agilizar y acelerar el proceso, además del ahorro de mano de obra. Sin embargo, todavía eran máquinas escasas y bastante grandes y costosas, por no fueron bien aceptados hasta la llegada de la industrialización.

Con la llegada de la era de la máquina el número de patentes de máquinas para serrar piedra aumentó en gran medida. Los primeros privilegios de invención de sierras mecánicas registrados en España son del año 1830, y a pesar de presentar diseños muy acordes con los europeos aún tardaron unos años en ser utilizadas a gran escala.

A partir de finales del s. XIX, y coincidiendo con la construcción de los novedosos chapados de la modernidad, esta maquinaria comenzó a utilizarse, y países como Francia, Alemania, Inglaterra, y principalmente Italia comenzaron a exportar dicha tecnología, que permitía conseguir varias placas delgadas a la vez, con la vigilancia de un único operario.

Ya durante el siglo XX y especialmente durante la segunda mitad, la maquinaria ha sufrido una evolución muy rápida que permite realizar cortes precisos y automatizados en una línea de producción que convierte el bloque de piedra que viene de la cantera en un producto acabado listo para la puesta en obra.

De todo ello puede deducirse que la posibilidad de producir placas delgadas de piedra de una manera rápida, sencilla y poco costosa era fundamental para el desarrollo de la técnica constructiva en piedra. Todos los momentos en los que se ha podido utilizar la maquinaria para serrar piedra de una manera rentable han coincidido con el desarrollo de fachadas revestidas de delgadas placas de piedra.

3. La técnica de los anclajes siempre ha estado muy ligada a la construcción en piedra. El desarrollo de la fachada trasventilada está directamente unido a la propia evolución de los anclajes utilizados, especialmente en los muros chapados:

Se ha visto como en los primeros muros compuestos contruidos en Egipto ya se utilizaban grapas en cola de milano para unir los sillares en algunos muros, y posteriormente en Grecia y Roma se utilizaban muy a menudo grapas de hierro que trababan los sillares y estabilizaban el muro. Aunque su forma no tiene relación con los anclajes empleados en las fachadas trasventiladas, tiene interés el hecho de que ya por aquel entonces los utilizaran.

Los primeros muros chapados, desarrollados en Roma a partir del s. II ya utilizaban grapas metálicas de retención, como puede intuirse por las huellas dejadas en los paramentos, aunque no se puede determinar su forma exacta ya que no se conservan.

Los chapados bizantinos contruidos durante el siglo VI constituyen la primera referencia que se conserva en la que se utilizaban grapas metálicas cuya función era retener las placas en su posición.

Las siguientes referencias encontradas datan de finales del siglo XIX, de tratados donde se recomendaba utilizar este tipo de grapas en forma de L o Z para colaborar con la estabilidad de los sillares utilizados en la tipología de muro mixto.

La técnica de chapados sujetos mediante una capa de mortero en el trasdós de las piezas, junto al efecto retenedor de las grapas o anclajes, se desarrolló de una manera muy rápida en Inglaterra, Italia y Estados Unidos y Alemania desde principios del siglo XX, sistema que rápidamente se asentó como el más efectivo y adecuado para la fijación de la piedra. Los sistemas de retención de las placas de piedra que empezaron a desarrollarse a partir de la década de 1930 pasaron de ser simples clavos o varillas a lo que podríamos considerar como anclajes propiamente dichos. Pese a no estar pensados para trabajar estructuralmente,

existían anclajes desarrollados durante la década de 1970 que se comportaban de una manera muy similar a los anclajes simples que se utilizarían posteriormente en las fachadas trasventiladas.

Esta evolución, sin embargo, se produjo de manera desigual ya que, mientras que todos estos sistemas de anclajes adquirían especial importancia en los países indicados anteriormente, en otros países como España estas técnicas a penas se llegaron a utilizar. Generalmente, los chapados se colocaban únicamente amorterados dando como resultado importantes patologías, sobretodo en forma de desprendimientos.

4. Tras el análisis de los distintos sistemas constructivos y ejemplos estudiados se ha llegado a la conclusión de que ya existían nociones técnicas sobre la utilización de perfilería a la que se casi un siglo. La aparición de la fachada trasventilada de piedra no se produjo de una manera tan repentina y rápida como pudiera parecer en un principio.

El primer antecedente encontrado fue la Estación de metro de Karlsplatz, de Otto Wagner (Viena, 1898-1899), donde se construyó todo un entramado de perfiles de acero, a los que se fijaban los paneles de piedra, quedando los perfiles vistos al exterior.

También se ha encontrado otro caso en el que la solución empleada fue aún más avanzada. En el pabellón alemán de la Exposición Internacional de Barcelona, de Mies van der Rohe (1928-1929) se construyeron varios muros exentos no portantes revestidos de piedra. Las grandes placas de piedra se fijaron a un entramado de perfiles metálicos mediante un sistema de tornillería oculto.

Se han encontrado otros dos ejemplos con una solución bastante similar entre sí. En el Centro Cultural Wolfsburg, de Alvar Aalto (Alemania, 1958-1962) y en el Humana Building, de Michael Graves (Louisville, Kentucky, 1982) se utilizó una subestructura de perfiles (en forma de omega en el primer caso, y de Z en el segundo) dispuestos en vertical y anclados al muro soporte. Las placas de piedra se fijan a dicha estructura a través de anclajes dispuestos en la junta horizontal.

Estos ejemplos, que en definitiva constituyen un sistema a base de un entramado más o menos complejo de perfilería alojado en una cámara y al que se fijan las placas de piedra, está muy próximo a los sistemas trasventilados en cuanto a su planteamiento. Sin embargo, difieren de la solución actual en que la junta queda cerrada mediante un perfil o sellada, no permitiendo la entrada de aire a la cámara, como sucede en la fachada trasventilada.

De todo esto se deduce que casi un siglo antes de que llegara la fachada trasventilada ya se tenían conocimientos sobre cómo sujetar las placas de piedra mediante fijaciones metálicas que se encargaban de transmitir su peso a la estructura o a la pared portante. De la disponibilidad de los medios adecuados dependía la posibilidad de su desarrollo.

5. El desarrollo y la evolución de los medios que participaban en las distintas fases de procesamiento de la piedra desde su extracción hasta la colocación en la fachada están relacionados con el propio desarrollo de los nuevos sistemas constructivos.

La incorporación de la maquinaria de extracción, transformación, transporte y puesta en obra, tras la revolución industrial, cambió completamente la manera en que se realizaban, dando lugar al paso de los trabajos manuales de la piedra a la mecanización del trabajo.

Los primeros grandes avances se produjeron durante el siglo XIX, e iban encaminados a la posibilidad de limitar el esfuerzo físico del operario, dando la posibilidad de trabajar bloques de piedra más grandes, más rápidamente y con menos mano de obra:

- La incorporación del compresor de aire y de la neumática a la industria de la extracción de piedra.
- La construcción de numerosas máquinas para serrar bloques de piedra (comentado en el punto 4).
- La incorporación de las primeras herramientas neumáticas y posteriormente eléctricas en el campo de la labra de la piedra.

Sin embargo, el verdadero punto de inflexión se produjo durante las primeras décadas del siglo XX, cuando todo el proceso se fue convirtiendo en una línea de producción totalmente industrializada y controlada, encargada de extraer grandes bloques de piedra, dividirlos en bloques manipulables, y transportarlos a la serrería, donde se encargan de producir placas de piedra con sus respectivos biselados, perforaciones y acabados, listos para la puesta en obra. En definitiva, un proceso cuyo fin es el adecuado mecanizado de las placas de piedra en función del sistema de anclaje previsto en la construcción.

Parece que existe una clara relación entre la aparición de los distintos sistemas constructivos y la evolución de las distintas etapas de transformación. Coincidiendo con el desarrollo de cada nueva tipología de fachada, y especialmente con la trasventilada, los distintos medios implicados se han adaptado y mejorado con la intención de servir más eficazmente a los nuevos requerimientos constructivos.

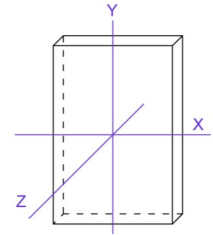
6. El sistema constructivo de fachada trasventilada introdujo una serie de ventajas de gran importancia para el funcionamiento de la fachada frente a los anteriores sistemas chapados, por lo que, desde su aparición, ha tenido una excelente acogida. Por otro lado, supuso un cambio en la forma de trabajar de la piedra con respecto a los chapados, ya que se encuentra sometida a nuevas solicitudes, convirtiendo en algo esencial el cálculo de las distintas partes.

Las principales ventajas que aportó la aparición de la fachada trasventilada podrían resumirse en:

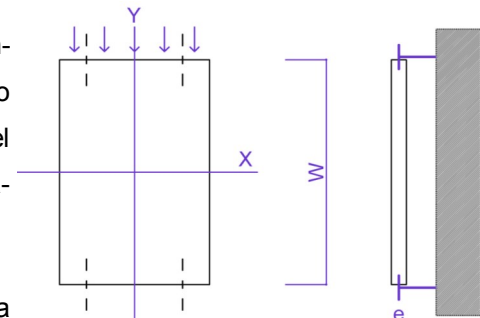
- Mayor rapidez de ejecución al incorporar sistemas de prefabricación.
- Facilitar el control de obra mediante sistemas que permiten un preciso ajuste y reglaje del revestimiento.
- Trabajo independiente de cada placa, que posibilita la reparación o sustitución de una pieza sin afectar al resto.
- Creación de una cámara de aire que mejora la condiciones del cerramiento en varios aspectos, fundamentalmente:
 - Posibilidad de la colocación continua del aislamiento, que permite suprimir los puentes térmicos, en conjunción con el desarrollo de los aislamientos, que adquieren progresivamente mejores comportamientos ante las inclemencias atmosféricas.
 - Ventilación de la cámara de aire, que mejora las condiciones higrotérmicas y medioambientales, y permite que se evapore más fácilmente la humedad de la parte trasera de las placas de piedra.

En cuanto a la manera en que trabajan los materiales, y en comparación con los sistemas anteriores, para comprender la importancia del cálculo adecuado, puede indicarse lo siguiente:

- Suponiendo una posición de los ejes de referencia tal y como se muestra en el esquema, en los sistemas tradicionales de chapados cada placa trabaja a compresión según el eje Y bajo el peso de las placas superiores, y según el eje Z por apoyo sobre el mortero de relleno, bajo la acción horizontal del viento.
- En cambio, en las fachadas trasventiladas las placas trabajan a flexión en las dos direcciones:

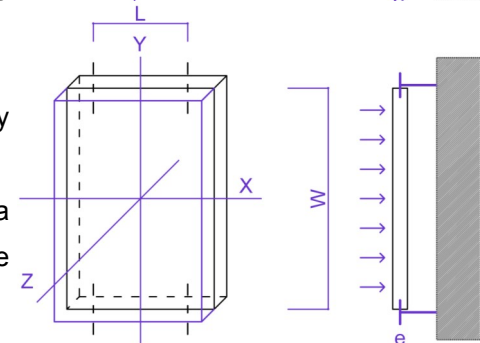


En primer lugar, bajo el peso propio (en las fachadas trasventiladas cada placa soporta únicamente su peso propio, no recibiendo el de las placas superiores) trabajan a flexión en el plano XY, pudiéndolo entender como la manera en que trabaja una viga pared, debido a su relación canto/luz.



En segundo lugar, bajo la acción del viento estará solicitada a flexión con apoyo en los anclajes.

- Si W y L son similares aparece flexión en el plano ZY y en el plano ZX.
- Si la altura de las placas (W) es superior a la distancia entre anclajes (L) la flexión aparece fundamentalmente en el plano ZY.



Por tanto, en la fachada trasventilada se hace imprescindible el cálculo de las distintas solicitaciones, ya que será un factor determinante en el diseño del revestimiento: dimensiones y espesor de las placas, puntos de fijación y características de los mismos.

7. Los arquitectos han tenido un papel importante en el desarrollo de nuevas tipologías constructivas en piedra y, especialmente, en promover la utilización de las placas delgadas de piedra, así como de los nuevos avances en cuanto a las fijaciones.

La idea de que la piedra es un material que podía adaptarse a los nuevos requerimientos constructivos y al concepto de revestimiento impulsó en gran medida su utilización a lo largo del siglo XX. Los arquitectos de la modernidad, especialmente Otto Wagner y Adolf Loos, se posicionaron como los grandes impulsores de la utilización de placas delgadas de piedra a principios de siglo.

Posteriormente, durante el movimiento moderno también se dieron numerosos ejemplos en los que el arquitecto adaptó la forma y posición de las placas para generar imágenes acordes con el gusto y la tendencia, al margen de las tendencia dominante hacia superficies de hormigón y revocos. Esto se ha podido ver en ejemplos como el Pabellón alemán de la Exposición Internacional de Barcelona, Mies van der Rohe (1928-1929), o el Kimbell Art Museum, Louis I. Kahn (Fort Worth, Texas, 1972).

Ya con la llegada propiamente de la fachada trasventilada, fueron arquitectos precursores, como James Stirling o Francisco Javier Sáenz de Oiza de los primeros en adoptar esta técnica en edificios singulares

como la ampliación de la Staatsgalerie (Stuttgart, 1979-1983) o el Pabellón de la Exposición Universal de Sevilla de 1992.

A partir de ese momento la rápida difusión del sistema de fachada trasventilada trajo como consecuencia un importante desarrollo de la tecnología tanto en la producción de placas como de anclajes, posibilitando a su vez su fácil incorporación a los diseños de la arquitectura contemporánea.

8. Desde que la piedra dejó de tener funciones estructurales para convertirse en material de acabado o revestimiento totalmente independiente de la estructura, se dio lugar a la aparición del diseño de la fachada desde principios compositivos. Tras los primeros ejemplos de fachada trasventiladas de piedra, la evolución de sus diseños ha ido encaminada a la pérdida de la rigidez y la búsqueda de una imagen de ligereza que evidenciara el cambio del entendimiento de la fachada como muro a su concepción como epidermis ligera que envuelve el edificio.

Los muros desarrollados en Roma mediante el sistema del "*opus emplectum*" a partir del siglo II a. C. constituyen los primeros ejemplos en los que la piedra empezó a tener meras funciones de acabado de un muro resistente, en este caso de hormigón hidráulico romano. Posteriormente, en el periodo del Renacimiento, los muros mixtos construidos a partir del s.XIII se basaban en un muro de albañilería, en el que generalmente se dejaban los huecos previstos, y que posteriormente era revestido con piezas de piedra con claros fines estéticos. Estos casos constituyen las primeras en las que la piedra se colocaba en despieces con fines compositivos y evitando los aparejos tradicionales fruto de la traba estructural.

Tras los primeros ejemplos de fachadas trasventiladas se generó una clara tendencia hacia la imagen de fachada ligera en la que la piedra podía colocarse en forma de nuevos despieces (grandes placas, nuevas formas, pérdida de la horizontalidad...). Con la incorporación de la normativa de cálculo en las fachadas trasventiladas, el espesor de las placas se encuentra limitado tanto por las características de la piedra utilizada, como las solicitaciones a las que están sometidas, como por la influencia de la introducción de anclajes en el canto de las mismas. Por ello, los diseños de fachadas trasventiladas no han ido encaminadas al propio adelgazamiento de las placas, sino a la búsqueda de una imagen que generara esa sensación de ligereza y flotabilidad.

La tipología de anclaje que ha presentado una mayor evolución es la de la fijación a través de una subestructura metálica. Es la que ha permitido la construcción de los diseños más singulares, ya que ha demostrado una mayor posibilidad de adaptación. Desde que se empezó a anclar la piedra en retículas de acero, como sucedía en el Arco de la Defensa, de Otto von Spreckelsen (1985-1989), donde se comprobó que la utilización de la subestructura permitía desarrollar un despiece más singular, se sucedió una rápida evolución hacia el nuevo concepto de piel. Piel que empezaron a curvarse en edificios como el Domus-Casa del Hombre, de Arata Isozaki y César Portela (La Coruña, 1995) para llegar a convertirse en pieles totalmente desplegadas que se adaptan a la forma del edificio, como sucedía en el Centro Municipal de Exposiciones y Congresos, de Francisco Mangado (2003-2004), y más evidentemente en la Biblioteca y Archivo de Galicia, de Peter Eisenman (Santiago, 2011).

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Las conclusiones de este trabajo sientan una serie de precedentes para futuras investigaciones. Una vez concluida la presente investigación se ha llegado a la conclusión de que existen una serie de puntos relevantes, que podrían ser analizados con mayor detalle.

- Realizar un estudio de los distintos tipos de piedra a utilizar en cuanto a sus características, propiedades, aspecto y posibilidades de diseño.
- Profundizar en el cálculo tanto del tamaño y espesor de las placas de piedra como de los anclajes y analizar la relación entre el cumplimiento de la norma y la posibilidad de desarrollo de fachadas singulares.
- Realizar un seguimiento de las fachadas trasventiladas construidas para comprobar la durabilidad de este tipo de sistema en función del tipo de piedra utilizado, tamaño y espesor de las placas, tipología de anclaje y material del mismo. Este tema tiene interés dado el aún escaso número de años que lleva en uso este sistema constructivo en comparación con su uso tradicional.

ÍNDICE DE FIGURAS

Portada. Detalle del despiece de la ampliación de la Staatsgalerie, James Stirling Richard Bryant (1985)

1. LA PIEDRA NATURAL

- 1.1 Montero Fernández de Bobadilla, Eduardo (2007). Manual básico. Fachadas ventiladas y aplacados. Requisitos constructivos y estanqueidad. Conserjería de Obras Públicas, Vivienda y Transporte de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Pág. 142.
- 1.2 *Ibidem*. Pág. 143.
- 1.3 *Ibidem*. Pág. 141.
- 1.4 *Ibidem*. Pág. 142.
- 1.5 *Ibidem*. Pág. 141.
- 1.6 *Ibidem*. Pág. 141.
- 1.7 Cerdeño del castillo, Francisco Javier (2007). La piedra natural en la arquitectura contemporánea. Aitemin, Centro Tecnológico, Toledo. Pág. 26.
- 1.8 Montero Fernández de Bobadilla, Eduardo (2007). Manual básico. Fachadas ventiladas y aplacados. Requisitos constructivos y estanqueidad. cit. Pág. 18.
- 1.9 *Ibidem*. Pág. 18.

2. EXTRACCIÓN

- 2.1 Choisy, Auguste (2006). El arte de construir en Egipto. Tr. Íntegra de la edición L'art de bâtir chez les Égyptiens, de 1904, por Gema López Manzanares, Instituto Juan de Herrera, Madrid. Lámina 24.
- 2.2 *Ibidem*. Pág. 50.
- 2.3 *Ibidem*.
- 2.4 Archivo fotográfico del autor.
- 2.5 Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. Picard, París. Pág. 25.
- 2.6 *Ibidem*. Pág. 28.
- 2.7 *Ibidem*. Pág. 25.
- 2.8 *Ibidem*. Pág. 25.
- 2.9 *Ibidem*. Pág. 29.
- 2.10 López Jimeno, Carlos (2012). Manual de rocas ornamentales. Prospección, explotación, elaboración y colocación. Gráficas Arias Montano, Madrid. Pág. 311.
- 2.11 Pardo, Manuel (1885). Materiales de construcción. Atlas. Imprenta y fundición de Manuel Tello, Madrid. Lámina. 1.
- 2.12 *Ibidem*. Lámina 1.
- 2.13 López Jimeno, Carlos (2012). Manual de rocas ornamentales. Prospección, explotación, elaboración y colocación. cit. Pág. 295.
- 2.14 *Ibidem*. Pág. 293.
- 2.15 *Ibidem*. Pág. 294.
- 2.16 Stanier, Peter (2009). Quarries and quarrying. Shire Classics, Oxford. Tercera edición. Pág. 9.
- 2.17 *Ibidem*. Pág. 2.
- 2.18 *Ibidem*. Pág. 15.
- 2.19 AA.VV (1982). Marmi italiani. ICE, Italian Institute for Foreign Trade, Roma. Pág. 15.
- 2.20 *Ibidem*. Pág. 15.
- 2.21 David Dernie (2003). Arquitectura en piedra. Blume, Barcelona. Pág. 43.
- 2.22 *Ibidem*. Pág. 43.
- 2.23 García de los ríos cobo, José I.; Báez Mezquita, Juan Manuel (2001). La piedra en Castilla y León. Junta de Castilla y León, 2ª edición. Pág. 42.
- 2.24 López Jimeno, Carlos (2012). Manual de rocas ornamentales. Prospección, explotación, elaboración y colocación. cit. Pág. 285.
- 2.25 *Ibidem*. Pág. 288.
- 2.26 García de los Ríos Cobo, José I; Báez Mezquita, Juan Manuel (2001). La piedra en Castilla y León. cit. Pág. 43.
- 2.27 Archivo fotográfico de Ángel Luis Gallego. Cedida.
- 2.28 García de los Ríos Cobo, José I; Báez Mezquita, Juan Manuel (2001). La piedra en Castilla y León. cit. Pág. 43.
- 2.29 *Ibidem*. Pág. 44.
- 2.30 Archivo fotográfico de Ángel Luis Gallego. Cedida.

3. TRANSFORMACIÓN: CORTE Y LABRA

3.1 CORTE

- 3.1.1 Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. cit. Pág. 33.
- 3.1.2 Ibídem. Pág. 32.
- 3.1.3 Ibídem. Pág. 41.
- 3.1.4 Archivo fotográfico del autor.
- 3.1.5 Azconegui Morán, Francisco; Castellanos Miguélez, Agustín (1993). El trabajo de la piedra. Guía práctica de cantería. Escuela Taller de Restauración 'Centro Histórico de León', León. Pág. 67.
- 3.1.6 Archivo fotográfico del autor.
- 3.1.7 Azconegui Morán, Francisco; Castellanos Miguélez, Agustín (1993). El trabajo de la piedra. Guía práctica de cantería. Escuela Taller de Restauración 'Centro Histórico de León', León. Pág. 67.
- 3.1.8 Gómez Canales, Francisco (2005). Manual de cantería. Speed Publicaciones, Aguilar de Campoo. Pág. 61.
- 3.1.9 Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. cit. Pág. 34.
- 3.1.10 Grewe, Klaus (2010). La máquina romana de serrar piedras. Las técnicas y las construcciones de la ingeniería romana. Tr. Miguel Ordoñez. págs 381-401. Pág. 381.
- 3.1.11 Grewe, Klaus (2010). La máquina romana de serrar piedras. cit. Pág. 384.
- 3.1.12 Branca, Giovanni (1629). Le machine. Lámina XXVII.
- 3.1.13 Grewe, Klaus (2010). La máquina romana de serrar piedras. cit. Pág. 394.
- 3.1.14 Archivo histórico de patentes. Privilegio de invención nº 62. Plano.
- 3.1.15 Archivo histórico de patentes. Privilegio de invención nº 69. Plano.
- 3.1.16 Archivo histórico de patentes. Privilegio de invención nº 1153. Plano.
- 3.1.17 Rovira y Rabasa, Antonio (1897). Estereotomía de la piedra. Lámina 1. figura 19.
- 3.1.18 Ger y Lober, Florencio (1898). Tratado de Construcción civil. Atlas. La Minerva Extremeña, Badajoz. Lámina 2. figura 24.
- 3.1.19 García de los Ríos Cobo, José I.; Báez Mezquita, Juan Manuel (2001). La piedra en Castilla y León. Junta de Castilla y León, 2ª edición. Pág. 49.
- 3.1.20 Archivo fotográfico de Ángel Luis Gallego. Cedida.
- 3.1.21 David Dernie (2003). Arquitectura en piedra. Blume, Barcelona. Pág. 46.
- 3.1.22 Archivo fotográfico del autor.
- 3.1.23 Archivo fotográfico de Ángel Luis Gallego. Cedida.
- 3.1.24 López Jimeno, Carlos (2012). Manual de rocas ornamentales. Prospección, explotación, elaboración y colocación. Gráficas Arias Montano, Madrid. Pág. 396.
- 3.1.25 Ibídem. Pág. 385.
- 3.1.26 Ibídem. Pág. 385.
- 3.1.27 Stanier, Peter (2009). Quarries and quarrying. Shire Classics, Oxford. Tercera edición. Pág. 28.
- 3.1.28 Archivo fotográfico de Ángel Luis Gallego. Cedida.

3.2 LABRA

- 3.2.1 Archivo fotográfico del autor.
- 3.2.2 Choisy, Auguste (2006). El arte de construir en Egipto. Tr. Íntegra de la edición L'art de bâtir chez les Égyptiens, de 1904, por Gema López Manzanares, Instituto Juan de Herrera, Madrid. Pág. 53.
- 3.2.3 López Jimeno, Carlos (2012). Manual de rocas ornamentales. Prospección, explotación, elaboración y colocación. Gráficas Arias Montano, Madrid. Pág. 43.
- 3.2.4 Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. Picard, París. Pág. 35.
- 3.2.5 Ibídem. Pág. 37.
- 3.2.6 Ibídem. Pág. 35.
- 3.2.7 Ibídem. Pág. 47.
- 3.2.8 Ibídem. Pág. 34.
- 3.2.9 Ibídem. Pág. 37.
- 3.2.10 Ibídem. Pág. 37.
- 3.2.11 Ibídem. Pág. 40.
- 3.2.12 Silva Suarez, Manuel (2004). Técnica e ingeniería en España. 1. El Renacimiento de la técnica imperial y la popular. Institución Fernando el Católico. Pág. 125.
- 3.2.13 Archivo fotográfico del autor
- 3.2.14 Rabasa Díaz, Enrique (2000). Forma y construcción en piedra: de la cantería medieval a la estereotomía del siglo XX. Akal, Madrid. Pág. 146.
- 3.2.15 Ibídem. Pág. 146.
- 3.2.16 Ibídem. Pág. 146.
- 3.2.17 García de los Ríos Cobo, José I.; Báez Mezquita, Juan Manuel (2001). La piedra en Castilla y León. Junta de Castilla y León, 2ª edición. Pág. 32.
- 3.2.18 Ibídem. Pág. 32.
- 3.2.19 De Honnecourt, Villard (1991). Cuaderno, siglo XIII. Tr. Yago Barja de Quiroga. Akal, Torrejón de Ardoz, Madrid. Fol. 20. Lámina 39.
- 3.2.20 Ibídem. Fol. 20v. Lámina 40.
- 3.2.21 Barbe Coqueline de Lisle, Genevieve (1977). El tratado de Alonso de Vandelvira, 2. Caja de ahorros de Albacete, Albacete. Fol. 21 r.
- 3.2.22 Palacio González, José Carlos (1987). La estereotomía como fundamento constructivo del Renacimiento espa-

ñol. Informes de la construcción, vol.39, nº 389, pp.73-86. pág. 78.

3.2.23 Rabasa Díaz, Enrique (2000). Forma y construcción en piedra: de la cantería medieval a la estereotomía del siglo XX. cit. Pág. 159.

3.2.24 Gómez Canales, Francisco (2005). Manual de cantería. Speed Publicaciones, Aguilar de Campoo. Pág. 80.

3.2.25 López Jimeno, Carlos (2012). Manual de rocas ornamentales. Prospección, explotación, elaboración y colocación. cit. Pág. 411.

3.2.26 Gómez Canales, Francisco (2005). Manual de cantería. cit. Pág. 29.

3.2.27 Azconegui Morán, Francisco; Castellanos Miguélez, Agustín (1993). El trabajo de la piedra. Guía práctica de cantería. Escuela Taller de Restauración 'Centro Histórico de León', León. Pág. 50.

3.2.28 Bessac, Jean-Claude (1986). L'outillage traditionnel du tailleur de pierre : de l'Antiquité à nos jours. CNRS, París. Pág. 76.

3.2.29 *Ibidem*. Pág. 220.

3.2.30 *Ibidem*. Pág. 78.

3.2.31 Rabasa Díaz, Enrique (2000). Forma y construcción en piedra: de la cantería medieval a la estereotomía del siglo XX. cit. Pág. 149.

3.2.32 Archivo histórico de patentes. Privilegio de invención nº 4747. Plano.

3.2.33 Stanier, Peter (2009). Quarries and quarrying. Shire Classics, Oxford. Pág. 21.

3.2.34 López Jimeno, Carlos (2012). Manual de rocas ornamentales. Prospección, explotación, elaboración y colocación. cit. Pág. 387.

3.2.25 AA.VV (1982). Marmi italiani. ICE, Italian Institute for Foreign Trade, Roma. Pág. 23.

3.2.26 *Ibidem*. Pág. 24.

4. TRANSPORTE Y COLOCACIÓN EN OBRA

4.1 TRANSPORTE

4.1.1 Choisy, Auguste (2006). El arte de construir en Egipto. Tr. Íntegra de la edición L'art de bâtir chez les Égyptiens, de 1904, por Gema López Manzanares, Instituto Juan de Herrera, Madrid. Pág. 68.

4.1.2 *Ibidem*. Pág. 69.

4.1.3 <http://www.egiptomania.com/piramides/transporte/>

4.1.4 Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. Picard, París. Pág. 32.

4.1.5 *Ibidem*. Pág. 79.

4.1.6 *Ibidem*. Pág. 78.

4.1.7 *Ibidem*. Pág. 30.

4.1.8 Exposición Ars Mechanicae. Archivo fotográfico del autor.

4.1.9 Turriano, Pseudo-Juanelo (1983). Los veintidós libros de los ingenios y de las máquinas.2. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid. Pág. 519.

4.1.10 *Ibidem*. Pág. 519.

4.1.11 *Ibidem*. Pág. 520.

4.1.12 Stanier, Peter (2009). Quarries and quarrying. Shire Classics, Oxford. Pág. 6.

4.1.13 <http://apedragasmeigas.com/historias-y-reportajes/>

4.1.14 Rovira y Rabasa, Antonio (1897). Estereotomía de la piedra. Lámina 3. Figura 38.

4.2 COLOCACIÓN EN OBRA

4.2.1 Choisy, Auguste (2006). El arte de construir en Egipto. Tr. Íntegra de la edición L'art de bâtir chez les Égyptiens, de 1904, por Gema López Manzanares, Instituto Juan de Herrera, Madrid. Pág. 71.

4.2.2 *Ibidem*. Pág. 73.

4.2.3 Marín Sánchez, Rafael (2000). La construcción griega y romana. Universidad Politécnica de Valencia, Servicio de Publicaciones, Valencia. Pág. 82.

4.2.4 *Ibidem*. Pág. 80.

4.2.5 *Ibidem*. Pág. 81.

4.2.6 *Ibidem*. Pág. 94.

4.2.7 Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. Picard, París. Pág. 52.

4.2.8 Archivo fotográfico del autor.

4.2.9 Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. cit. Pág. 52.

4.2.10 *Ibidem*. Pág. 55.

4.2.11 Archivo fotográfico del autor.

4.2.12 Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. cit. Pág. 47.

4.2.13 *Ibidem*. Pág. 48.

4.2.14 Vitrubio Polión, M (1787). Los Diez Libros de Arquitectura. Imprenta real, Madrid. Lámina LIII. Figura 1.

4.2.15 Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. cit. Pág. 49.

4.2.16 Exposición Ars Mechanicae. Archivo fotográfico del autor.

4.2.17 Turriano, Pseudo-Juanelo (1983). Los veintidós libros de los ingenios y de las máquinas.2. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid. Pág. 530.

4.2.18 García Tapia, Nicolás (1990). Ingeniería y arquitectura en el Renacimiento Español. Universidad de Valladolid. Secretariado de Publicaciones. Valladolid. Pág. 154.

4.2.19 Arciniega García, Luis. La representación de la arquitectura en construcción en torno al siglo XVI. Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Instituto Juan de Herrera, Madrid. Pág. 51.

- 4.2.20 Perronet, Jean-Rodolphe (2005). La construcción de puentes en el s. XVIII. Tr. Antonio de las Casas Gómez, et al..., Instituto Juan de Herrera, Madrid. Pág. 61.
- 4.2.21 *Ibidem*. Pág. 61.
- 4.2.22 Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. cit. Pág. 49.
- 4.2.23 Rovira y Rabasa, Antonio (1897). Estereotomía de la piedra. Lámina 2. Figuras 33, 34, 35.
- 4.2.24 AA.VV (1982). Marmi italiani. ICE, Italian Institute for Foreign Trade, Roma. Sin página.
- 4.2.25 *Ibidem*. Pág. 22.
- 4.2.26 Archivo fotográfico del estudio de arquitectura JH Arquitectos. Cedida.

5. CONSTRUCCIÓN DE LA FACHADA

5.1 MURO COMPUESTO

- 5.1.1 Choisy, Auguste (2006). El arte de construir en Egipto. Tr. Íntegra de la edición L'art de bâtir chez les Égyptiens, de 1904, por Gema López Manzanares, Instituto Juan de Herrera, Madrid. Pág. 58.
- 5.1.2 *Ibidem*. Pág. 58.
- 5.1.3 Archivo fotográfico del autor.
- 5.1.4 Archivo fotográfico del autor.
- 5.1.5 Choisy, Auguste (2006). El arte de construir en Egipto. cit. Pág. 57.
- 5.1.6 *Ibidem*. Pág. 57.
- 5.1.7 *Ibidem*. Pág. 65.
- 5.1.8 Archivo fotográfico del autor.
- 5.1.9 Choisy, Auguste (2006). El arte de construir en Egipto. Lámina XIX. Figura 2..
- 5.1.10 Marín Sánchez, Rafael (2000). La construcción griega y romana . Universidad Politécnica de Valencia, Servicio de Publicaciones, Valencia. Pág. 97.
- 5.1.11 *Ibidem*. Pág. 95.
- 5.1.12 *Ibidem*. Pág. 95.
- 5.1.13 *Ibidem*. Pág. 97.
- 5.1.14 *Ibidem*. Pág. 83.
- 5.1.15 Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. Picard, París. Pág. 54.
- 5.1.16 *Ibidem*. Pág. 90.
- 5.1.17 Castro Villalba, Antonio (1999). Historia de la construcción arquitectónica. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. Pág. 242.
- 5.1.18 Archivo fotográfico del autor.
- 5.1.19 Choisy, Auguste (2006). El arte de construir en Egipto. cit. Pág. 17.
- 5.1.20 Choisy, Auguste (2006). El arte de construir en Egipto. cit. Pág. 11.
- 5.1.21 Archivo fotográfico del autor.
- 5.1.22 Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. Picard, París. Pág. 140.
- 5.1.23 *Ibidem*. Pág. 144.
- 5.1.24 Archivo fotográfico del autor.
- 5.1.25 Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. cit. Pág. 57.
- 5.1.26 *Ibidem*. Pág. 57.
- 5.1.27 Archivo fotográfico del autor.
- 5.1.28 Archivo fotográfico de Ángel Luis Gallego. Cedida.
- 5.1.29 Archivo fotográfico del autor.
- 5.1.30 Archivo fotográfico de María Soledad Camino Olea. Cedida.
- 5.1.31 Archivo fotográfico del autor.
- 5.1.32 Viollet-le-Duc, Eugène Emmanuel (1996). La construcción medieval. cit. Pág. 12.
- 5.1.33 Heyman, Jazques (1999). El esqueleto de piedra: mecánica de la arquitectura de fábrica. Tr. a cargo de Gema M. López Manzanares. Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid. Pág. 99.
- 5.1.34 Viollet-le-Duc, Eugène Emmanuel (1996). La construcción medieval. cit. Pág. 15.
- 5.1.35 Petrucci, Achille (1979). Tecnologías de la arquitectura. Gustavo Gili, Barcelona. Pág. 171.
- 5.1.36 Archivo fotográfico del autor.
- 5.1.37 Viollet-le-Duc, Eugène Emmanuel (1996). La construcción medieval. cit. Pág. 126.

5.2 MURO MIXTO

- 5.2.1 Archivo fotográfico del autor.
- 5.2.2 Archivo fotográfico del autor.
- 5.2.3 Castro Villalba, Antonio (1999). Historia de la construcción arquitectónica. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. Pág. 258.
- 5.2.4 Archivo fotográfico del autor.
- 5.2.5 Murray, Peter (1989). Arquitectura del Renacimiento. Tr. Juan Novella Domingo, Aguilar, Madrid. Pág. 23.
- 5.2.6 Murray, Peter (1989). Arquitectura del Renacimiento. cit. Pág. 27.
- 5.2.7 Castro Villalba, Antonio (1999). Historia de la construcción arquitectónica. cit. Pág. 257.
- 5.2.8 Archivo fotográfico del autor.
- 5.2.9 Castro Villalba, Antonio (1999). Historia de la construcción arquitectónica. cit. Pág. 292.
- 5.2.10 Archivo fotográfico del autor.

- 5.2.11 Ford, Edward, R.(1996).The details of modern architecture. 1. Institute of technology, Massachusetts. Pág. 28.
- 5.2.12 *Ibidem*. Pág. 28.
- 5.2.13 Neumann, Friedrich (1967). Tratado de edificación . Gustavo Gili, Barcelona. Pág. 71.
- 5.2.14 Schmitt, Heinrich; Heene, Andreas (2002) . Tratado de construcción. Gustavo Gili, Barcelona, 7ª edición. Pág. 167.
- 5.2.15 Di Silvo, Michele (1993). Facciate di pietra. Il marmo nell'architettura contemporanea: tecnologia dei paramenti esterni tra innovazione e tradizione . Alinea, Firenze. Pág. 82.
- 5.2.16 *Ibidem*. Pág. 83.

5.3 MURO CHAPADO

- 5.3.1 Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. Picard, París. Pág. 247.
- 5.3.2 Adam, Jean-Pierre (1984). La construction romaine: matériaux et techniques. Picard, París. Pág. 247.
- 5.3.3 Archivo fotográfico del autor.
- 5.3.4 Archivo fotográfico del autor.
- 5.3.5 Archivo fotográfico del autor.
- 5.3.6 Archivo fotográfico del autor.
- 5.3.7 Archivo fotográfico del autor.
- 5.3.8 Fannelli, Giovanni; Gargiani, Roberto (1999). El principio del revestimiento. Tr. Juan Calatrava, Akal Arquitectu-
ra, Madrid. Pág. 119.
- 5.3.9 *Ibidem*. Pág. 119.
- 5.3.10 Ford, Edward,R.(1996).The details of modern architecture. 1. Institute of technology, Massachusetts. Pág. 210.
- 5.2.11 Geretsegger, Heinz (1985). Otto Wagner 1841-1918: la grande ville à croissancer ilimitée une origine de
l'architecture moderne. Tr. Marianne Brausch. Pierre Mardaga, Bruselas. Pág. 99.
- 5.3.12 Ford, Edward,R.(1996). The details of modern architecture. 2, 1928 to 1988. Institute of technology, Massachu-
setts. Pág. 60.
- 5.3.13 *Ibidem*. Pág. 60.
- 5.3.14 Geretsegger, Heinz (1985). Otto Wagner 1841-1918: la grande ville à croissancer ilimitée une origine de
l'architecture moderne.cit. Pág. 146.
- 5.3.15 *Ibidem*. Portada.
- 5.3.16 AA.VV (1984). GA Document nº47. Otto Wagner. Ada Edita, Tokio. Pág. 11.
- 5.3.17 Fannelli, Giovanni; Gargiani, Roberto (1999). El principio del revestimiento. cit. Pág. 136.
- 5.3.18 *Ibidem*. Pág. 136.
- 5.3.19 Geretsegger, Heinz (1985). Otto Wagner 1841-1918: la grande ville à croissancer ilimitée une origine de
l'architecture moderne.cit. Pág. 158.
- 5.3.20 Fannelli, Giovanni; Gargiani, Roberto (1999). El principio del revestimiento. cit. Pág. 123.
- 5.3.21 *Ibidem*. Pág. 130.
- 5.3.22 *Ibidem*. Pág. 120.
- 5.3.23 Archivo fotográfico del autor.
- 5.3.24 Rukschcio, Burkhardt (1987). La vie el l'oeuvre de Adolf Loos. Tr. Marianne Brausch. Pierre Mardaga, Bruselas.
Pág. 167.
- 5.3.25 Fannelli, Giovanni; Gargiani, Roberto (1999). El principio del revestimiento. cit. Pág. 39.
- 5.3.26 *Ibidem*. Pág. 167.
- 5.3.27 [http://www.plataformaarquitectura .cl/cl/02-223907/clasicos-de-arquitectura-casa-del-fascio-giuseppe-teragni](http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-223907/clasicos-de-arquitectura-casa-del-fascio-giuseppe-teragni)
- 5.3.28 Archivo fotográfico del autor.
- 5.3.29 Archivo fotográfico del autor.
- 5.3.30 AA.VV (2004). El Croquis. Rafael Moneo 1967-2004. El Croquis, El Escorial, Madrid. Pág. 203.
- 5.3.31 *Ibidem*. Pág. 204.
- 5.3.32 AA.VV (1992). El Croquis, nº54: 1982-1992 Juan Navarro Baldeweg. El Croquis. Pág. 63.
- 5.3.33 *Ibidem*. Pág. 117.
- 5.3.34 David Dernie (2003). Arquitectura en piedra. Blume, Barcelona. Pág. 209.
- 5.3.35 Avellaneda, Jaume; Paricio, Ignacio. (2000). Los revestimientos de piedra. . Bisagra, Barcelona, 2ª edición.
Pág. 30.
- 5.3.36 Archivo fotográfico del autor.
- 5.3.37 Fannelli, Giovanni; Gargiani, Roberto (1999). El principio del revestimiento. cit. Pág. 228.
- 5.3.38 *Ibidem*. Pág. 228.
- 5.3.39 Ford, Edward,R.(1996). The details of modern architecture. 2, 1928 to 1988. Institute of technology, Massachu-
setts. Pág. 77.
- 5.3.40 *Ibidem*. Pág. 83.
- 5.3.41 Kahn, Louis I. (1999). Louis I. Kahn: the construction of the Kimbell Art Museum. Skira, Milán. Lámina A12. Sec-
ción 3A12.
- 5.3.42 Ford, Edward,R.(1996). The details of modern architecture. 2, 1928 to 1988. Institute of technology, Massachu-
setts. Pág. 332.
- 5.3.43 Kahn, Louis I. (1999). Louis I. Kahn: the construction of the Kimbell Art Museum. cit. Pág. 42.
- 5.3.44 Archivo fotográfico del autor.
- 5.3.45 Archivo fotográfico del autor.
- 5.4.46 Otero Cifuentes, Antonio (1991). Nuevas soluciones para la fijación de aplacados de piedra natural en la edifica-
ción actual. Revista de la edificación, nº9, pp.9-16. Pág. 13.
- 5.3.47 Vielba Cuerpo, Carmen (2001). La arenisca de Villamayor en revestimientos de fachada. Departamento de

- construcción y tecnología arquitectónicas. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Tesis doctoral. Pág. 211.
- 5.3.48 *Ibidem*. Pág. 213.
- 5.3.49 Norma Tecnológica de la edificación. NTE-RPC (1973)
- 5.3.50 Ashurts, John (1977). *Stone in building: its use and potential today*. Architectural Press, London. Pág. 78.
- 5.3.51 Warland, E. G. (1947). *La construcción moderna*. Gustavo Gili. Pág. 50.
- 5.3.52 Di Silvo, Michele (1993). *Facciate di pietra. Il marmo nell'architettura contemporanea: tecnologia dei paramenti esterni tra innovazione e tradizione*. Alinea, Firenze. Pág. 91.
- 5.3.53 Avellaneda, Jaume; Paricio, Ignacio. (2000). *Los revestimientos de piedra*. cit. Pág. 7.
- 5.3.54 Norma Tecnológica de la edificación. NTE-RPC (1973)
- 5.3.55 Norma Tecnológica de la edificación. NTE-RPC (1973)
- 5.3.56 Norma Tecnológica de la edificación. NTE-RPC (1973)
- 5.3.57 Ashurts, John (1977). *Stone in building: its use and potential today*. cit. Pág. 77.
- 5.3.58 Di Silvo, Michele (1993). *Facciate di pietra. Il marmo nell'architettura contemporanea: tecnologia dei paramenti esterni tra innovazione e tradizione*. cit. Pág. 88.
- 5.3.59 Foster, Jack Stroud (1979). *Structure and fabric*. 2. Halsted Press, New York. Pág. 153.

5.4 FACHADA TRASVENTILADA

- 5.4.1 Cohen, Jean-Louis (2007). *Mies Van der Rohe*. Tr. Juan Calatrava. Akal, Torrejón de Ardoz, Madrid. Pág. 69.
- 5.4.2 De Solà-morales, Ignasi; et al... (1993). *Mies Van der Rohe. El pabellón de Barcelona*. Gustavo Gili, Barcelona. Pág. 16.
- 5.4.3 *Ibidem*. Pág. 16.
- 5.4.4 Garland Publishing (1986). *The Mies van der Rohe Archive*. 1. Garland Publishing, New York. Pág. 243. *Archive*: 14:14 *Neg*. A 149-12.
- 5.4.5 Ford, Edward, R. (1996). *The details of modern architecture*. 2, 1928 to 1988. Institute of technology, Massachusetts. Pág. 158.
- 5.4.6 *Ibidem*. Pág. 158.
- 5.4.7 *Ibidem*. Pág. 158.
- 5.4.8 AA.VV (1984). *GA Document nº10. Graves*. Ada Edita, Tokio. Pág. 13.
- 5.4.9 Ford, Edward, R. (1996). *The details of modern architecture*. 2, 1928 to 1988. cit. Pág. 362.
- 5.4.10 Avellaneda, Jaume; Paricio, Ignacio. (2000). *Los revestimientos de piedra*. Bisagra, Barcelona, 2ª edición. Pág. 46.
- 5.4.11 De Solà-Morales, Ignasi (1985). *Disyecta Membra: la Neue Staatsgalerie de Stuttgart*. *Arquitectura. Revista del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid*. Nº 254, pp. 43-58. Pág. 54.
- 5.4.12 *Ibidem*. Pág. 49.
- 5.4.13 Dal Co, Francesco (1992). *Los museos de James Stirling, Michel Wilford y asociados*. Electa, Madrid. Pág. 113.
- 5.4.14 <http://www.nataliniarchitetti.com/progetti/galleria.php?Categoria=lavoro&Progetto=7600> (Consulta: Miércoles, 5 de febrero de 2014)
- 5.4.15 *Ibidem*.
- 5.4.16 *Ibidem*.
- 5.4.17 *Ibidem*.
- 5.4.18 AA.VV (2002). *El Croquis, nº32/33: 1946-1988 Saénz de Oiza*. *El Croquis*. Pág. 139.
- 5.4.19 Sáenz de Oiza, Francisco Javier (1989). *La mole de la isla*. *AV nº 20*, pp. 18-23. Pág. 23.
- 5.4.20 Otero cifuentes, Antonio (1991). *Nuevas soluciones para la fijación de aplacados de piedra natural en la edificación actual*. *Revista de la edificación, nº9*, pp.9-16. Pág. 14.
- 5.4.21 *Ibidem*. Pág. 14.
- 5.4.22 *Ibidem*. Pág. 14.
- 5.4.23 *Ibidem*. Pág. 15.
- 5.4.24 *Catálogo de soluciones Halfen (1997)*. *Sistemas de anclajes para fachadas de piedra natural*. FS-97 ES. Pág. 5.
- 5.4.25 *Ibidem*. Pág. 14.
- 5.4.26 *Ibidem*. Pág. 22.
- 5.4.27 *Catálogo de soluciones Strow sistemas (2014)*. *Fachadas ventiladas. Anclajes y fijaciones*. Pág. 21.
- 5.4.28 *Ibidem*. Pág. 26.
- 5.4.29 *Ibidem*. Pág. 26
- 5.4.30 *Ibidem*. Pág. 26
- 5.4.31 *Catálogo de soluciones Halfen (2014)*. *Halfen natural Stone support systems*. FS-14 E. Pág. 31.
- 5.4.32 *Catálogo de soluciones Halfen (1997)*. *Sistemas de anclajes para fachadas de piedra natural*. FS-97 ES. Pág. 5.
- 5.4.33 *Ibidem*. Pág. 10.
- 5.4.34 *Ibidem*. Pág. 11.
- 5.4.35 *Ibidem*. Pág. 12.
- 5.4.36 *Ibidem*. Pág. 28.
- 5.4.37 *Ibidem*. Pág. 27.
- 5.4.38 *Catálogo de soluciones Strow sistemas (2014)*. *Fachadas ventiladas. Anclajes y fijaciones*. Pág. 7.
- 5.4.39 *Ibidem*. Pág. 8.
- 5.4.40 Norma UNE 22203-2011. *Productos de piedra natural. Construcción de aplacados de fachadas con piedra natural*. Pág. 21.
- 5.4.41 AA.VV (2008). *AV Monografías*. 133. Francisco Mangado 1999-2009. *Arquitectura Viva S.L*, Madrid. Pág. 88.
- 5.4.42 *Ibidem*. Pág. 89

- 5.4.43 Catálogo de soluciones Strow sistemas (2014). Fachadas ventiladas. Anclajes y fijaciones. Pág. 19.
- 5.4.44 Archivo del Estudio de Arquitectura JH Arquitectos. Cedida.
- 5.4.45 Archivo del Estudio de Arquitectura JH Arquitectos. Cedida.
- 5.4.46 Catálogo de soluciones Keil (2014). Sistemas de anclajes para fachadas ventiladas. Pág. 12.
- 5.4.47 Archivo del Estudio de Arquitectura Francisco Mangado. Cedida.
- 5.4.48 Instituto valenciano de la edificación, instituto tecnológico de la construcción (2010). Guía de la piedra natural.. Generalitat Valenciana. Pág. 85.
- 5.4.49 *Ibidem*. Pág. 85.
- 5.4.50 Elaboración del autor.
- 5.4.51 Elaboración del autor.
- 5.4.52 Catálogo de soluciones Strow sistemas (2014). Fachadas ventiladas. Anclajes y fijaciones. Pág. 19.
- 5.4.53 Elaboración del autor.
- 5.4.54 Norma UNE 22203-2011. Productos de piedra natural. Construcción de aplacados de fachadas con piedra natural. Pág. 27.
- 5.4.55 *Ibidem*. Pág. 27.
- 5.4.56 AA.VV (1992). El Croquis, nº54: 1982-1992 Juan Navarro Baldeweg. El Croquis. Pág 193.
- 5.4.57 Avellaneda, Jaume; Paricio, Ignacio. (2000). Los revestimientos de piedra. cit. Pág. 45.
- 5.4.58 AA.VV (1992). El Croquis, nº54: 1982-1992 Juan Navarro Baldeweg. El Croquis. Pág. 47.
- 5.4.59 Avellaneda, Jaume; Paricio, Ignacio. (2000). Los revestimientos de piedra. cit. Pág. 46.
- 5.4.60 Archivo fotográfico del autor.
- 5.4.61 Meyhöfer, Dirk (2009). Set in Stone. Rethinking a timeless material. Braun Publishing AG. Pág. 14.
- 5.4.62 Di Silvo, Michele (1993). Facciate di pietra. Il marmo nell'architettura contemporanea: tecnologia dei paramenti esterni tra innovazione e tradizione . Alinea, Firenze. Pág. 275.
- 5.4.63 *Ibidem*. Pág. 276.
- 5.4.64 *Ibidem*. Pág. 276.
- 5.4.65 David Dernie (2003). Arquitectura en piedra. Blume, Barcelona. Pág. 217.
- 5.4.66 Fernández Madrid, Joaquín (2008). Sistemas de construcción en piedra. Tectónica nº 27, pp. 4-27. Pág. 22.
- 5.4.67 *Ibidem*. Pág. 22.
- 5.4.68 Avellaneda, Jaume; Paricio, Ignacio. (2000). Los revestimientos de piedra. cit. Pág. 27.
- 5.4.69 Meyhöfer, Dirk (2009). Set in Stone. Rethinking a timeless material. Pág. 100.
- 5.4.70 Archivo fotográfico de Strow sistemas. Cedida.
- 5.4.71 Archivo fotográfico de Strow sistemas. Cedida.
- 5.4.72 Archivo fotográfico del autor.
- 5.4.73 Archivo fotográfico del autor.
- 5.4.74 Fernández Madrid, Joaquín (2008). Sistemas de construcción en piedra. Tectónica nº 27, pp. 4-27. Pág. 23.
- 5.4.75 *Ibidem*. Pág. 23.
- 5.4.76 AA.VV (1997). Arquitectura Viva. 54. Arquitectura Viva S.L, Madrid. Pág. 89.
- 5.4.77 *Ibidem*. Pág. 89.
- 5.4.78 Cluster del Granito (2012). Arquitectura en granito. Fundación Centro Tecnológico de Granito de Galicia. Pág. 99.
- 5.4.79 *Ibidem*. Pág. 99.
- 5.4.80 Archivo fotográfico de Strow sistemas. Cedida.
- 5.4.81 Cluster del Granito (2012). Arquitectura en granito. Pág. 98.
- 5.4.82 <http://www.césarportela.com/#/edificio-domus/> (Consulta: miércoles, 16 de julio de 2014)
- 5.4.83 *Ibidem*. (Consulta: miércoles, 16 de julio de 2014)
- 5.4.84 Avellaneda, Jaume; Paricio, Ignacio. (2000). Los revestimientos de piedra. cit. Pág. 40.
- 5.4.85 *Ibidem*. Pág. 40.
- 5.4.86 *Ibidem*. Pág. 40.
- 5.4.87 Archivo fotográfico del autor.
- 5.4.88 Archivo del Estudio de Arquitectura Francisco Mangado. Cedida.
- 5.4.89 AA.VV (2011). AV Monografías. 147-148. Arquitectura Viva S.L, Madrid. Pág. 36.
- 5.4.90 *Ibidem*. Pág. 39.
- 5.4.91 Archivo fotográfico del autor.
- 5.4.92 Archivo fotográfico del autor.
- 5.4.93 Archivo fotográfico del autor.

Lámina 1 Elaboración del autor.
 Lámina 2 Elaboración del autor.
 Lámina 3 Elaboración del autor.
 Lámina 4 Elaboración del autor.

Trasera arriba izquierda	Edificio de control de la presa Kaiserbad, Otto Wagner	Pierre Mardaga (1985)
Trasera arriba derecha	Ampliación de la Staatsgalerie, James Stirling	Iván Nemeč (1985)
Trasera abajo	Biblioteca y archivo de Galicia, Peter Eisenman	Manuel González Vicente (2009)

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

AA.VV (1982)
Marmi italiani
ICE, Italian Institute for Foreign Trade, Roma

AA.VV (1984)
GA Document nº10. Graves
Ada Edita, Tokio

AA.VV (1984)
GA Document nº47. Otto Wagner
Ada Edita, Tokio

AA.VV (1992)
El Croquis, nº54: 1982-1992 Juan Navarro Baldeweg
El Croquis, El Escorial, Madrid

AA.VV (1997)
Arquitectura Viva. 54
Arquitectura Viva S.L, Madrid

AA.VV (1999)
Twentieth century museums. II
Phaidon Press, London

AA.VV (2002)
El Croquis, nº32/33: 1946-1988 Saénz de Oiza
El Croquis, El Escorial, Madrid

AA.VV (2004)
El Croquis. Rafael Moneo 1967-2004
El Croquis, El Escorial, Madrid

AA.VV (2008)
AV Monografías. 133. Francisco Mangado 1999-2009
Arquitectura Viva S.L, Madrid

AA.VV (2008)
Ars mechanicae: ingeniería medieval en España
CEDEX, Ministerio de Fomento, Fundación Juanelo
Turiano, Madrid

AA.VV (2011)
AV Monografías. 147-148
Arquitectura Viva S.L, Madrid

Adam, Jean-Pierre (1984)
La construction romaine: matériaux et techniques
Picard, París

Algorri García, Eloy (2000)
León: caso histórico y ensanche: guía de arquitectura
Colegio Oficial de Arquitectos de León, León

Arnuncio Pastor, Juan Carlos (1996)
Guía de arquitectura de Valladolid
IV Centenario Ciudad de Valladolid, Valladolid

Arnuncio Pastor, Juan Carlos (2007)
Patrimonio arquitectónico de Castilla y León.6. La ar-
quitectura desde 1930 hasta el siglo XXI
Junta de Castilla y León, Valladolid

Ashurts, John (1977)
Stone in building: its use and potential today
Architectural Press, London

Avellaneda, Jaume; Paricio, Ignacio. (2000).
Los revestimientos de piedra.
Bisagra, Barcelona, 2ª edición.

Ayala Carcedo, Francisco Javier (2001).
Historia de la tecnología en España.1.
Valatenea, Barcelona.

Azconegui Morán, Francisco; Castellanos Miguélez,
Agustín (1993)
El trabajo de la piedra. Guía práctica de cantería
Escuela Taller de Restauración 'Centro Histórico de
León', León

Ballarín iribarren, alberto...et al (2007)
Fachadas y cubiertas (II)
Munilla-Leria, Madrid

Barbe Coqueline de Lisle, Genevieve (1977)
El tratado de Alonso de Vandelvira, 1.
Caja de ahorros de Albacete, Albacete

Barbe Coqueline de Lisle, Genevieve (1977)
El tratado de Alonso de Vandelvira, 2.
Caja de ahorros de Albacete, Albacete

Benévolo, Leonardo (1980).
Historia de la arquitectura moderna.
Gustavo Gili, Barcelona, 4ª edición.

Bessac, Jean-Claude (1986)
L'outillage traditionnel du tailleur de pierre : de l'Anti-
quité à nos jours
CNRS, París

Blyth, Alastair (1996)
Architects' working details.2
Architects' Journal, London

Branca, Giovanni (1629)
Le machine.

Calvo López, José (1999)
Cerramientos y trazas de montea, de Ginés Martínez de Aranda
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
Tesis doctoral

Castro Villalba, Antonio (1999)
Historia de la construcción arquitectónica
Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona

Cerdeño del castillo, Francisco Javier (2007)
La piedra natural en la arquitectura contemporánea
Aitemin, Centro Tecnológico, Toledo

Choisy, Auguste (1999)
El arte de construir en Roma
Ed. a cargo de Santiago Huerta Fernández y Francisco J. Girón Sierra. Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid

Choisy, Auguste (2006). El arte de construir en Egipto.
Tr. Íntegra de la edición L'art de bâtir chez les Égyptiens, de 1904, por Gema López Manzanares, Instituto Juan de Herrera, Madrid.

Charbonneaux, Jean; Martin, Roland; Villard, François (1971)
Grecia Helenística
Tr. Jose Antonio Miguez, Aguilar, Madrid

Cluster del Granito (2012)
Arquitectura en granito
Fundación Centro Tecnológico de Granito de Galicia

Cohen, Jean-Louis (2007)
Mies Van der Rohe
Tr. Juan Calatrava. Akal, Torrejón de Ardoz, Madrid

Czech, Hermann (1984)
Das Looshaus
Löcker, Viena

Dal Co, Francesco (1992)
Los museos de James Stirling, Michel Wilford y asociados
Electa, Madrid

David Dernie (2003)
Arquitectura en piedra
Blume, Barcelona

Dawson, Susan (1996)
Architects' working details.3
Architects' Journal, London

De Honnecourt, Villard (1991)
Cuaderno, siglo XIII. Tr. Yago Barja de Quiroga
Akal, Torrejón de Ardoz, Madrid

De Solà-morales, Ignasi; et al...(1993)
Mies Van der Rohe. El pabellón de Barcelona
Gustavo Gili, Barcelona

Dean, Phyllis (1977).
La primera revolución industrial.
Península, Barcelona, 4ª edición.

Di Silvo, Michele (1993)
Facciate di pietra. Il marmo nell'architettura contemporanea: tecnologia dei paramenti esterni tra innovazione e tradizione
Alinea, Firenze

Eric Kubach, Hans (1989)
Arquitectura románica
Aguilar, Madrid

Escrig Pallarés, Félix (1997)
Las grandes estructuras de los edificios históricos, desde la antigüedad hasta el Gótico
Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, Sevilla

Escrig Pallarés, Félix (2002)
Las grandes estructuras del Renacimiento y el Barroco
Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, Sevilla

Fannelli, Giovanni; Gargiani, Roberto (1999)
El principio del revestimiento.
Tr. Juan Calatrava, Akal Arquitectura, Madrid

Fontoira Surís, Rafael (2000)
Fábricas de cantería
Servicio de Publicaciones Diputación Provincial de Pontevedra, Vigo

Ford, Edward,R.(1996).
The details of modern architecture. 1.
Institute of technology, Massachusetts

Ford, Edward,R.(1996).
The details of modern architecture. 2, 1928 to 1988.
Institute of technology, Massachusetts

Foster, Jack Stroud (1979)
Structure and fabric. 2
Halsted Press, New York

Fundación Docomomo Ibérico (1996)
Registre d'arquitectura moderna a Catalunya. 1925-1965
Colegio Oficial de Arquitectos de Cataluña, Barcelona

García Braña, Celestino; et al... (1998)
Arquitectura moderna en Asturias, Galicia, Castilla y León: ortodoxia, márgenes y transgresiones
Colegio Oficial de Arquitectos de Asturias, Oviedo

García de los Ríos Cobo, José I.; Báez Mezquita, Juan Manuel (2001)
La piedra en Castilla y León
Junta de Castilla y León, 2ª edición

García Tapia, Nicolás (1987).
Pedro Juan de Lastanosa y Pseudo-Juanelo Turriano
Llul, Vol. 10.

García Tapia, Nicolás (1989).
Técnica y poder en Castilla durante los siglos XVI y XVII.
Universidad de Valladolid. Secretariado de Publicaciones. Valladolid.

García Tapia, Nicolás (1990).
Ingeniería y arquitectura en el Renacimiento Español.
Universidad de Valladolid. Secretariado de Publicaciones. Valladolid.

Garland Publishing (1986)
The Mies van der Rohe Archive. 1.
Garland Publishing, New York

Geretsegger, Heinz (1985)
Otto Wagner 1841-1918: la grande ville à croissancer illimitée une origine de l'architecture moderne
Tr. Marianne Brausch
Pierre Mardaga, Bruselas

Gómez Canales, Francisco (2005)
Manual de cantería
Speed Publicaciones, Aguilar de Campoo

González Delgado, José Antonio (2001)
Palencia: guía de arquitectura
Colegio Oficial de Arquitectos de León, León

Gössel, Peter; Leuthäuser, Gabriele (1991)
Arquitectura del siglo XX
Tr. Carlos Caramés, Benedikt Taschen, Köln

Graciani, Amparo (2002)
La técnica de la arquitectura medieval
Universidad de Sevilla. Secretariado de Publicaciones. Sevilla

Graf, Otto Antonia (1985)
Otto Wagner. 2, das Werk des Architekten 1903-1918
Böhlau, Wien

Heinz, Geretsegger (1985)
Otto Wagner 1841-1918: la grande villa à croissancer illimitée une origine de l'architecture moderne
Pierre Mardaga, Bruxelles

Heyman, Jazques (1999)
El esqueleto de piedra: mecánica de la arquitectura de fábrica
Tr. a cargo de Gema M. López Manzanares. Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid

Horvat Pintaric, Vera (1989)
Vienna 1900: the architecture of Otto Wagner
Studio Editions, London

Hugues, Theodor; Steiger, Ludwig; Weber, Johann (2008)
Piedra natural. Tipos de piedra. Detalles. Ejemplos-
Gustavo Gili, Barcelona

Iñigo Fernandez, Luis E. (2012)
Breve historia de la Revolución Industrial
Nowtilus, Madrid

Jenkins David; Deazart, Louis (1989)
Architects' working details. 1
EMAP. London

Jenkins David (1992)
Clare Gallery, Tate Gallery, London: James Stirling, Michael Wilford and associates
Phaidon Press, London

Kahn, Louis I. (1999)
Louis I. Kahn: the construction of the Kimbell Art Museum
Skira, Milán

Klingender, Francis Donald (1983)
Arte y revolución industrial
Tr. Pilar Salsó, Cátedra D. L., Madrid

Knobloch, Philip G. (1991)
Architectural details from the early twentieth century
American Institute of Architects, Washington

Landes, David S. (1979).
Progreso tecnológico y revolución industrial.
Tr. Francisca Antolín Vargas, Tecnos D. L., Madrid.

Loos, Adolf. (1972).
Ornamento y delito y otros escritos.
Tr. Lourdes Cirlot y Pau Pérez, Gustavo Gili, Barcelona. pág. 45.

López Jimeno, Carlos; et al... (2012).
Manual de rocas ornamentales. Prospección, explotación, elaboración y colocación.
Gráficas Arias Montano, Madrid.

Marín Sánchez, Rafael (2000)
La construcción griega y romana
Universidad Politécnica de Valencia, Servicio de Publicaciones, Valencia

Mark, Robert (2002)
Tecnología arquitectónica hasta la revolución científica
Tr. Josñe Miguel Gómez Acosta, Akal, Madrid

Marta, Roberto (1990)
Architettura romana: tecniche costruttive e forme architettoniche nel mondo romano
Kappa, Roma, 2ª edición

Martin, Roland (1989)
Arquitectura Griega
Aguilar, Madrid

Martínez de Aranda, Ginés (1986)
Cerramientos y trazas de montea
Servicio Histórico Militar, Madrid

Meyhöfer, Dirk (2009)
Set in Stone. Rethinking a timeless material
Braun Publishing AG

Middleton, Robin; Watkin, David (1989)
Arquitectura moderna. 1. La tradición racionalista en Francia y en Inglaterra
Aguilar, Madrid

Middleton, Robin; Watkin, David (1989)
Arquitectura moderna. 2. Difusión y desarrollo de la arquitectura clásica tardía y del neogótico
Aguilar, Madrid

Mignot, Claude (1994)
Architecture of the 19th Century
Taschen, Köln

Murray, Peter (1989)
Arquitectura del Renacimiento
Tr. Juan Novella Domingo, Aguilar, Madrid

Natalini, Adolfo (1985)
Adolfo Natalini: obras y proyectos, 1978-1984
Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, Madrid

Nuñez Paz, Pablo (2001)
Salamanca: guía de arquitectura
Colegio Oficial de Arquitectos de León, Delegación de Salamanca, Salamanca

Pardal, cristina; Paricio, ignacio (2006)
La fachada ventilada y ligera
Bisagra, Barcelona

Pardo, Manuel (1885)
Materiales de construcción. Atlas.
Imprenta y fundición de Manuel Tello, Madrid

Perronet, Jean-Rodolphe (2005)
La construcción de puentes en el s. XVIII
Tr. Antonio de las Casas Gómez, et al..., Instituto Juan de Herrera, Madrid

Peters, Tom Frank (1996)
Building the nineteenth century
MIT Press, Cambridge, Massachusetts

Oechslin, Werner (2002)
Otto Wagner, Adolf Loos, and the road to modern architecture
University Press Cambridge, Cambridge, New York

Quetglas, Josep (2001)
Fear of glass: Mies van der Rohe's pavilion in Barcelona
Birkhäuser, Basel

Rabasa Díaz, Enrique (2000)
Forma y construcción en piedra: de la cantería medieval a la estereotomía del siglo XX
Akal, Madrid

Rodríguez Esteban, María Ascención. (2012). La arquitectura de ladrillo y su construcción en la ciudad de Zamora (1888-1931).
Tesis doctoral.

Rodríguez Llera, Ramón (2006)
Breve historia de la arquitectura
Libsa, Madrid

Ruhschcio, Burkhardt (1987)
La vie el l'oeuvre de Adolf Loos
Tr. Marianne Brausch
Pierre Mardaga, Bruselas

San Juan Mesonada, Carlos (1993)
La revolución industrial
Akal, Torrejón de Ardoz, Madrid

Sánchez Ostiz-Gutierrez, Ana (2011).
Fachadas: cerramientos de edificios.
CIE Inversiones Editoriales Sossat 2000, Madrid.

Silva Suarez, Manuel (2004).
Técnica e ingeniería en España. 1. El Renacimiento de la técnica imperial y la popular.
Institución Fernando el Católico.

Stanier, Peter (2009)
Quarries and quarrying
Shire Classics, Oxford, 3ª edición

Stirling, James (1994)
James Stirling, Michael Wilford and associates: buildings and projects 1975-1992
Thames and Hudson, London

Taylor, Rabun (2006)
Los constructores romanos: un estudio sobre el proceso arquitectónico
Akal, Madrid

The Mies van der Rohe Archive.2. (1986)
Ed. Arthur Drexler, Garland Publishing, New York.

Tietz, Jürgen (2008)
Historia de la arquitectura moderna
Tr. Ambrosio Berasain Villanueva, h.f.ullmann, Barcelona

Turriano, Pseudo-Juanelo (1983).
Los veintiún libros de los ingenios y de las máquinas.1.
Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid

Turriano, Pseudo-Juanelo (1983).
Los veintiún libros de los ingenios y de las máquinas.2.
Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid

Vielba Cuerpo, Carmen (2001)
La arenisca de Villamayor en revestimientos de fachada
Departamento de construcción y tecnología arquitectónicas. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Tesis doctoral

Viollet-le-Duc, Eugène Emmanuel (1996)
Viollet le Duc: le dictionnaire d'architecture: relevés et observations
Pierre Mardaga, Bruselas

Viollet-le-Duc, Eugène Emmanuel (1996)
La construcción medieval
Ed. a cargo de Enrique Rabasa Díaz y Santiago Huerta Fernández. Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid

Wagner, Otto (1993)
La arquitectura de nuestro tiempo: una guía para los jóvenes arquitectos.
Reedición del libro Moderne Architektur de 1986, Tr. Jordi Siguan, El Croquis, Madrid

Warland, E. G. (1947)
La construcción moderna
Gustavo Gili

Weston, Richard (2011)
100 ideas que cambiaron la arquitectura
Blume, Barcelona

Weston, Richard (2003)
Materiales, forma y arquitectura
Blume, Barcelona

Wrede, Stuart (1992)
La arquitectura de Erik Gunnar Asplund
Tr. Ramón, Martínez Castellote. Júcar, Madrid

TRATADOS

Adhemar (1864)
Lecciones de Corte de Piedras
Memorial de Ingenieros, Madrid

Barberot, E (1927)
Tratado práctico de edificación
Gustavo Gili, Barcelona, 2ª edición

Esselborn, Carlos (1940)
Tratado general de construcción. Construcción de edificios. Tomo 1
Gustavo Gili, Barcelona

Ger y Iober, Florencio (1898)
Tratado de Construcción civil
La Minerva Extremeña, Badajoz,

Neumann, Friedrich (1967)
Tratado de edificación
Gustavo Gili, Barcelona

Novo de Miguel, Luciano (1949)
Tratado de construcción
Bosch, Barcelona

Petrignani, Achille (1979)
Tecnologías de la arquitectura
Gustavo Gili, Barcelona

Schmitt, Heinrich; Heene, Andreas (2002)
Tratado de construcción
Gustavo Gili, Barcelona, 7ª edición

Pardo, Manuel (1885). Materiales de construcción.
Atlas. Imprenta y fundición de Manuel Tello, Madrid.

Rovira y Rabasa, Antonio (1897)
Estereotomía de la piedra
Barcelona

Sánchez Pérez, Antonio (1884)
Manual del Cantero y Marmolista
Dirección y administración Doctor Fourquet, Madrid

Simonin (1797)
Tratado elemental de los Cortes de Cantería o Arte de la Montea
Tr. Fausto Martínez de la Torre. Madrid

Paladio, Andrea (1797)
Los Cuatro Libros de Arquitectura
Imprenta real, Madrid

Tratado de la Montea y Cortes de Cantería (1727)
Segunda edición, Antonio Marín, Madrid

Vitrubio Polión, M (1787)
Los Diez Libros de Arquitectura
Imprenta real, Madrid

MANUALES

Instituto valenciano de la edificación, instituto tecnológico de la construcción (2010)
Guía de la piedra natural
Generalitat Valenciana

Mingolarra, José Ignacio (2009)
Seguridad práctica en la construcción
Osalán, Instituto Vasco de Seguridad y Salud Laborales, Bizkaia

Monjo Carrió, Juan
Fichas técnicas editadas por Asemas
nº 6 Revestimientos

Montero Fernández de Bobadilla, Eduardo (2007).
Manual básico. Fachadas ventiladas y aplacados. Requisitos constructivos y estanqueidad.
Conserjería de Obras Públicas, Vivienda y Transporte de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia

rvc501 "Aplacados pétreos (chapados)"
Vera soriano, roberto
Fichas técnicas editadas por Asemas
nº 6 Revestimientos

rvc5 "Fachadas trasventiladas con revestimientos pétreos"
Guía para el diseño, construcción y mantenimiento de fachadas de piedra natural (2013)
vva, Ideaspropias editorial

ARTÍCULOS

Arciniega García, Luis
La representación de la arquitectura en construcción en torno al siglo XVI
Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Instituto Juan de Herrera, Madrid

Calvo López, José (2009)
El manuscrito cerramientos y trazas de montea, de Ginés Martínez de Aranda
Archivo Español de Arte, 82, 325, pp. 1-18

De Ignacio Vicens, Guillermo, et al... (2000)
Medios de elevación de materiales en la construcción medieval
Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción.

De la Torre Martín-Romo, Rodrigo
Técnicas pre-industriales de la talla en piedra

De Solá-Morales, Ignasi (1985)
Disyecta Membra: la Neue Staatsgalerie de Stuttgart
Arquitectura. Revista del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid. Nº 254, pp. 43-58

Esbert r.m., montoto, modesto y ordaz, jorge (1991)
La piedra como material de construcción: durabilidad, deterioros y conservación
Materiales de construcción, vol. 41, nº 221

Esbert, rosa maría, et al (1997)
Manual de diagnóstico y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos
Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Barcelona, Barcelona

Esposito, Daniela
Realidad de la arquitectura y técnicas constructivas de los muros medievales en Roma y en Lazio (Italia). Reflexiones sobre la recuperación del opus caementicium romano
Actas del Sexto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Instituto Juan de Herrera, Madrid

Fernández Madrid, Joaquín (2008)
Sistemas de construcción en piedra
Tectónica nº 27, pp. 4-27

Fernández París, José M. (1982). Valoración del estado de alteración de los materiales pétreos en los monumentos. Materiales de construcción nº185

Fernández Salas, José (2000)
El oficio de la construcción durante el Renacimiento compostelano
Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Sevilla.

Grewe, Klaus (2010). La máquina romana de serrar piedras. Las técnicas y las construcciones de la ingeniería romana. Tr. Miguel Ordoñez.

Graciani García, Amparo (1998). Aportaciones medievales a la maquinaria de construcción. Actas del Segundo Congreso Nacional de la Construcción.

Hèbert, ronan, et al... (2012)
Cracks and steins on facade-cladding made of carbonate rock thin panels
Structural Survey, vol.30, nº 2, pp130-144

Ivorra, s; et al... (2013)
Partial collapse of a ventilated stone façade: Diagnosis and analysis of the anchorage system
Engineering Failure Analysis 3, pp 290-301

Malaga, K; el al... (2008)
Combatura y dilatación de paneles de piedra natural: ensayo y evaluación de mármol y caliza
Materiales de Construcción, vol. 58, 289-290, pp.97-112

Millán, Ana (2004)
Leon Battista Alberti, la ingeniería y las matemáticas del Renacimiento
Suma, vol. 47, pp. 93-97

Monjo carrió, juan (2005)
La evolución de los sistemas constructivos en la edificación. Procedimientos para su industrialización
Informes de la Construcción, vol.57, nº 499-500, pp.37-54

Raya de blas, antonio; el al... (2012)
El pegado elástico en fachadas trasventiladas de piedra
Revista de investigación y arquitectura contemporánea, nº2, pp.36-45

Otero Cifuentes, Antonio (1991)
Nuevas soluciones para la fijación de aplacados de piedra natural en la edificación actual
Revista de la edificación, nº9, pp.9-16

Patrón, Vicente. (2001). El nacimiento de una técnica. Tectónica Nº2. Envoltentes 2. Cerramientos pesados. pág. 10.

Palacio González, José Carlos (1987)
La estereotomía como fundamento constructivo del Renacimiento español
Informes de la construcción, vol.39, nº 389, pp.73-86

Pavan, Vincenzo (1987)
Architettura di pietra
Arsenale, Venecia

Rabasa, E. (2013)
Estereotomía: teoría y práctica, justificación y alarde
Informes de la Construcción, vol. 65, nº extra-2, pp. 5-20

Rodríguez garcía, mª reyes, et al... (1993)
Estudio de la adherencia piedra-mortero
Materiales de construcción, vol.44, nº 234, pp.13-27

Rodríguez Durán, María Dolores (2008)
Evolución tecnológica de la maquinaria para el aserrado del mármol

Sáenz de Oiza, Francisco Javier (1989)
La mole de la isla
AV Monografías nº 20, pp. 18-23

VV.AA (1985)
Museo de Stuttgart. Stirling & Wilford
Arquitectura, nº254, pp.42-62

Vera soriano, roberto (2003)
Comportamiento de los aplacados de piedra reforzados
Informes de la Construcción, vol.54, nº484, pp.15-26

Vielba cuerpo, c (2009)
Método de análisis para determinar el contenido de humedad adecuado para la obtención de resistencias en fachadas trasventiladas de piedra natural sometidas al agua de lluvia
Materiales de construcción, vol. 59, nº 293, pp.63-83

NORMAS

Documento de Idoneidad Técnica Europeo DITE 09/0118
Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña

UNE 22190-3 (1998)
Productos de pizarra para tejados inclinados y revestimientos. Parte 3: Sistemas de colocación.

UNE-EN 12670 (2003)
Piedra natural. Terminología

UNE-EN 1469 (2005)
Piedra natural. Placas para revestimientos murales. Requisitos

UNE-EN 12057 (2005)
Productos de piedra natural. Plaquetas. Requisitos

UNE-EN 12326-1 (2005)
Productos de pizarra y piedra natural para tejados y revestimientos discontinuos. Parte 1: Especificación de producto.

UNE-EN 12440 (2008)
Piedra natural. Denominación de la piedra natural.

UNE-EN 13888 (2009)
Materiales de rejuntado para baldosas cerámicas

UNE 22203 (2011)
Productos de piedra natural. Construcción de aplacados de fachadas con piedra natural

UNE-EN 1468 (2012)
Piedra natural. Tableros en bruto. Requisitos.

UNE-EN 12326-2 (2012)
Productos de pizarra y piedra natural para tejados inclinados y revestimientos. Parte 2: Métodos de ensayo para pizarras y pizarras carbonatadas.

UNE-EN 998-2: (2012)
Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2. Morteros para albañilería

FUENTES

Archivo Histórico de Patentes

Archivos de particulares. Información cedida por arquitectos

Catálogos de fabricantes

Información cedida por fabricantes

