

11.70502/

Universidad Politécnica de Madrid  
Proyectos de Innovación para la Mejora de la Calidad de la Enseñanza

## Modelos físicos y virtuales de arcos de fábrica

DIRECTOR:

Santiago Huerta Fernández.  
Profesor Titular. Departamento de estructuras de la ETSAM

RESPONSABLE MODELOS FÍSICOS:

Santiago Huerta Fernández

RESPONSABLE MODELOS VIRTUALES:

José Ignacio Hernando García.  
Profesor Titular Interino. Departamento de estructuras de la ETSAM

COLABORADORA MODELOS FÍSICOS:

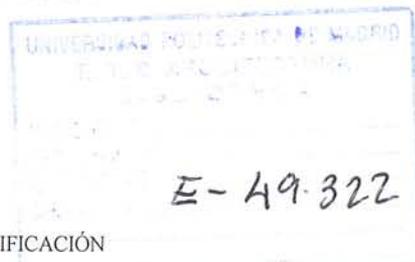
Gema López Manzanares.  
Doctor Arquitecto. Beca de Investigación de Postgrado

BECA MODELOS FÍSICOS:

Inmaculada Ruiz Salvador. Alumna de la ETSAM

BECA MODELOS VIRTUALES:

Rosa Senent Domínguez. Alumna de la ETSAM



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

Diciembre de 2000

La fábrica (de piedra, ladrillo, adobe) es hoy día un material inusual: se emplea sistemáticamente el acero, el hormigón armado o la madera. Las hipótesis habituales en el análisis de estructuras de estos últimos materiales (elasticidad, homogeneidad, isotropía, módulos de Young y Poisson, etc.) son irrelevantes a la hora de entender el funcionamiento básico de las fábricas. Además, la fábrica presente una buena resistencia a compresión y muy mala a tracción: es un material unilateral. Este hecho es de enorme importancia. Las estructuras de fábrica se agrietan, están agrietadas y estas grietas no son signo de ruina, sino una manifestación de la adaptación de la estructura a ciertos movimientos del entorno.

Para entender el funcionamiento estructural de las fábricas hace falta un enfoque específico que tenga en cuenta la naturaleza del material y de las estructuras bajo estudio. La teoría de las fábricas se desarrolló durante los siglos XVIII y XIX. Esta teoría se basaba en tres hipótesis: la fábrica resiste muy bien la compresión, la fábrica no resiste tracciones, y el deslizamiento entre piedras es muy raro. Estas tres hipótesis fueron elevadas al rango de principios por el profesor Heyman que ha tenido el mérito extraordinario de incorporar la antigua teoría de las fábricas dentro del marco más general del moderno Análisis Límite.

Subiste, sin embargo, el problema de que la enseñanza de la teoría de estructuras en las escuelas de Arquitectura e Ingeniería va dirigida a otros tipos, principalmente a estructuras porticadas con elementos resistentes a flexión. En consecuencia, los alumnos encuentran una enorme dificultad a la hora de entender las fábricas: deben antes “desaprender” las hipótesis que son de aplicación para el hormigón y el acero, pero no para la fábrica, y luego aprender la nueva teoría de estructuras de fábrica. Hay otra dificultad añadida: ya no se construyen estructuras abovedadas del tipo tradicional; se ha perdido la intuición que nace de la experiencia en obra.

Por todo lo anterior, si queremos que los futuros arquitectos e ingenieros entiendan el funcionamiento estructural de las fábricas, requisito imprescindible para intervenir en un puente o en una catedral, es preciso darles una formación específica sobre la teoría de estructuras de fábrica.

La teoría está recogida en dos libros publicados por el Instituto Juan de Herrera, asociado a la

Escuela Técnica Superior de Arquitectura:

Heyman, Jacques. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica. Colección de ensayos*. Ed. Por Santiago Huerta. Madrid : Instituto Juan de Herrera, 1995.

Heyman, Jacques. *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Ed. Por Santiago Huerta. Madrid : Instituto Juan de Herrera / CEHOPU, 1999.

Faltaba una ayuda que permitiera realizar prácticas sobre estructuras. El funcionamiento estructural de un sencillo arco de dovelas permite entender las características fundamentales del comportamiento de estructuras mucho más complejas. El presente proyecto Proyecto de Innovación para la Mejora de la Calidad de la Enseñanza: “Modelos físicos y virtuales para el estudio de arcos de fábrica” va encaminado a ese fin.

Se han establecido dos equipos que han trabajado coordinadamente para suministrar un conjunto de modelos físicos y virtuales (por ordenador) que abarcan todos los casos necesarios para comprender el comportamiento estructural del arco de fábrica.

Es preciso estudiar, en particular:

Líneas de empujes: El problema es de estabilidad y no de resistencia; lo que importa es garantizar una transmisión de esfuerzos dentro del volumen de la fábrica. El análisis consiste en el estudio de las posibles situaciones de equilibrio, esto es, de posibles líneas de empujes.

Movimientos y agrietamientos: Las estructuras de fábrica responden a los pequeños movimientos del entorno agrietándose. Es importante poder interpretar la relación entre grietas y movimientos, y entender que estos agrietamientos son naturales en un material unirresistente.

## **Modelos físicos (reales):**

Líneas de empujes: se han realizado «modelos catenarios» para visualizar las trayectorias de cargas. (Este tipo de modelos fueron usados, por ej., por Gaudí, etc.) Los modelos permiten verificar la forma correcta de arcos y bóvedas, y calcular de manera indirecta los empujes correspondientes en base a las inclinaciones de los cables. Es fácil ver, también, la influencia de las variaciones de carga.

Movimientos y agrietamientos: se han fabricado modelos a escala de arcos de dovelas de distintas formas, planos y tridimensionales. Moviendo los apoyos de los modelos se podrá observar la respuesta de la estructura en la forma de distintos agrietamientos. El que el modelo no se hunda por ellos, demostrará la misma cualidad básica en estructuras reales.

## **Modelos informáticos (virtuales):**

Líneas de empujes: Se han elaborado aplicaciones informáticas para el «dibujo asistido de líneas de empujes por ordenador». El usuario (alumno o profesor) decide las condiciones que fijan la posición de la línea de empujes. La aplicación dibuja la línea y el correspondiente diagrama de fuerzas, aspectos fundamentales a la hora de valorar la solución de equilibrio elegida y su coeficiente de seguridad.

Movimientos y agrietamientos: Se ha desarrollado un modelo informático de un sistema de bloques rígidos en contacto seco y directo (Moseley/Livesley). El usuario puede imponer distintos movimientos a los apoyos de la estructura (por ej. un arco) original y ve en la pantalla del ordenador los agrietamientos resultantes, así como, las líneas de empujes correspondientes. Se puede verificar, pues, la validez de los cálculos de seguridad realizados con la aplicación anterior.

Uso elemental y avanzado: Las aplicaciones pueden manejarse a simple nivel de usuario, como se ha descrito, pero estarán «abiertas» de manera que un usuario avanzado podrá entender el código y modificarlo para adaptarlo a sus investigaciones.

## **Impacto en la mejora de enseñanza**

Comprensión de la teoría: El empleo combinado de modelos físicos y virtuales facilitará el aprendizaje del comportamiento de las estructuras de fábrica. El alumno o profesor, liberado de las tediosas tareas del cálculo y representación gráfica, podrá concentrarse en la tarea de comprender el significado profundo de los principios básicos de la teoría de las fábricas. Además, es posible introducir la geometría de estructuras reales y verificar los resultados teóricos con la observación de las patologías en el monumento.

Banco de datos: Los ensayos físicos o virtuales se almacenarán en un banco de datos. Los ensayos físicos mediante fotografías y vídeos. Los ensayos virtuales en registros gráficos de ordenador. De esta manera se podrá ir creando un Banco de Datos de estructuras de fábrica que podrá ser consultado libremente por alumnos y profesores de ésta y otras Universidades, por ejemplo, a través de INTERNET.

Disciplinas relacionadas: Este conocimiento es básico para entender la arquitectura histórica y, en su caso, valorar los distintos enfoques de intervención, estos es, será de utilidad para Historiadores del Arte y de la Arquitectura, y para ingenieros y arquitectos implicados en la Restauración y Conservación de Monumentos.

Asignaturas de la ETSAM en que se han utilizado los modelos en el curso 1999-2000:

asignatura	curso	crédito	tipo	esp.	centro	nº grupos
PLAN ANTIGUO						
<b>Cálculo de Estructuras III</b>	6º	15	TRO	-	ETSAM	4
PLAN NUEVO						
<b>Mecánica de sólidos</b>	2º	10	TRO	-	ETSAM	7
<b>Análisis de estructuras</b>	3º	10	TRO	-	ETSAM	5
<b>Historia de la construcción I y II</b> -		5+5	LIB	-	ETSAM	2+2

DOCTORADO

Programa de Doctorado “Mecánica de las estructuras antiguas”. Coordinadores: R. Aroca, S.

Huerta y J. M. Ávila.

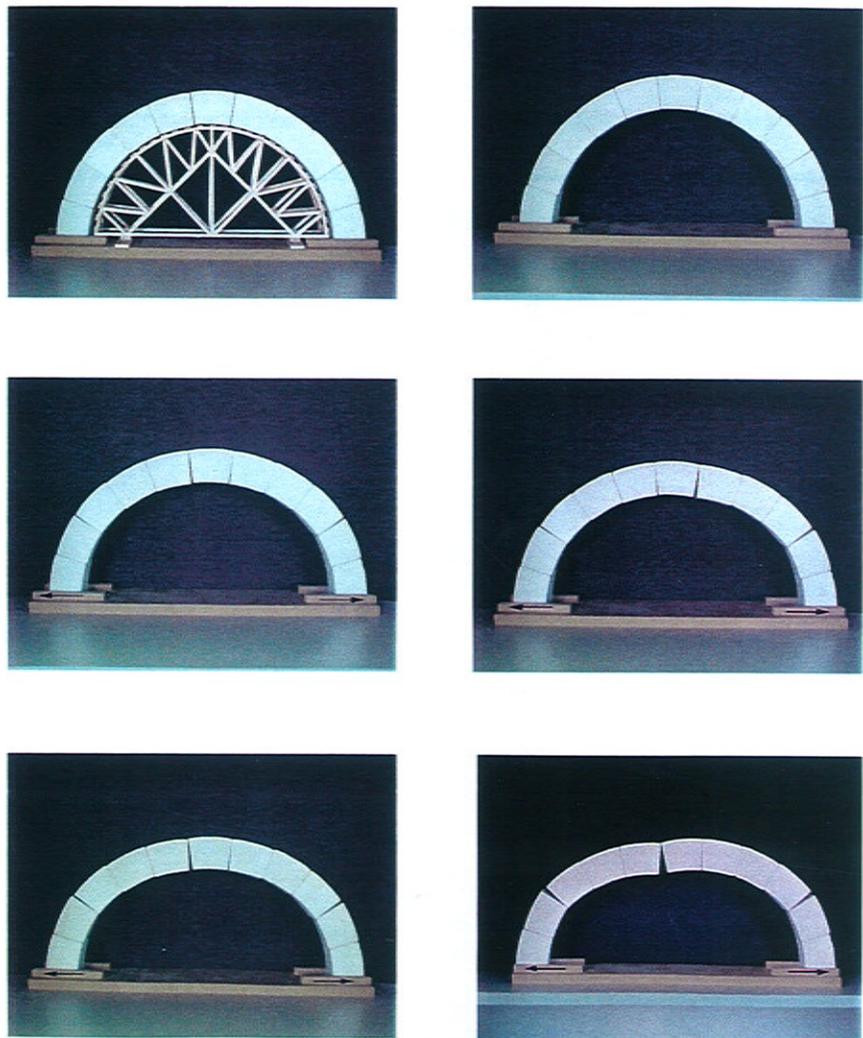
Además, las aplicaciones y modelos serían de interés en las asignaturas de Construcción e Historia del Arte.

## **Modelos físicos**

### FORMACIÓN DE RÓTULAS EN UN ARCO DE MEDIO PUNTO

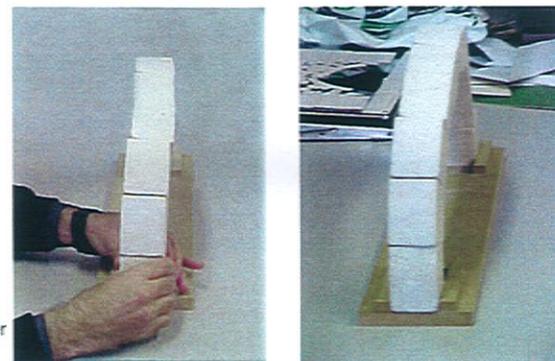
Inspirado en los experimentos sobre modelos de arcos de Danizy (1732), con el fin de representar el mecanismo correcto de colapso basado en la formación de rótulas.

Arco: dovelas de yeso e:5cm.; R:24cm.; r:19cm.; a:16.36°; e/L:1/8.  
Tablero de DM 54\*12\*1.5cm.  
Cimbra hecha con listones de madera de balsa.



### FORMACIÓN DE RÓTULAS EN UN ARCO DE MEDIO PUNTO DEBIDO A UN APOYO DIFERENCIAL.

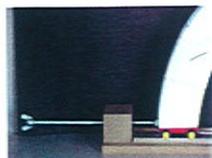
Asiento diferencial + empuje horizontal de un apoyo



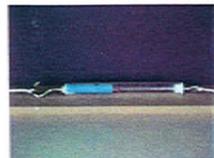
Modelo de yeso.  
Estado final de las dovelas al volver al estado inicial del arco.

# ENSAYO PARA LA MEDICIÓN DEL EMPUJE DEBIDO AL PESO PROPIO EN UN ARCO DE MEDIO PUNTO

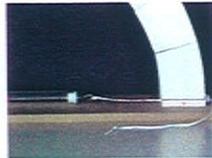
Arco de dovelas de yeso e:5cm.; R:24cm.; r:19cm.; a:16.36°; e/L:1/8.  
 Tablero de DM 54\*12\*1.5cm.  
 Cimbra hecha con listones de madera de balsa.



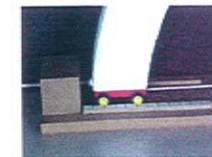
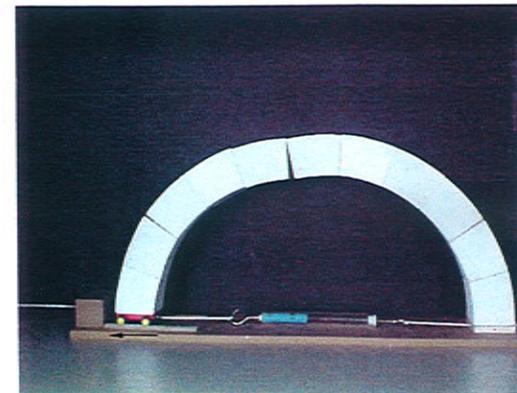
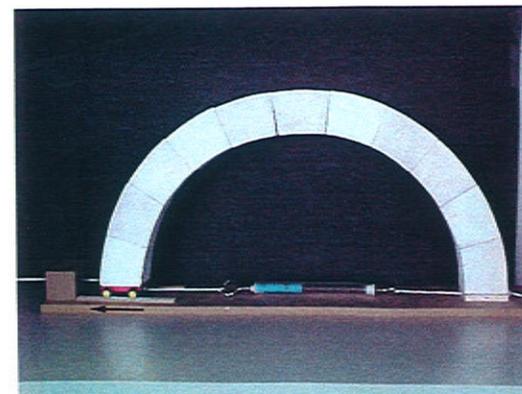
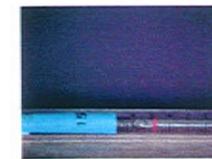
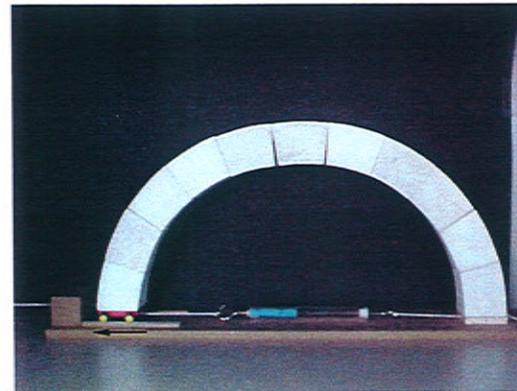
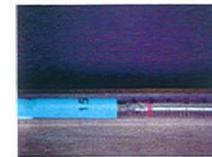
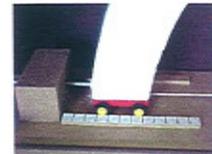
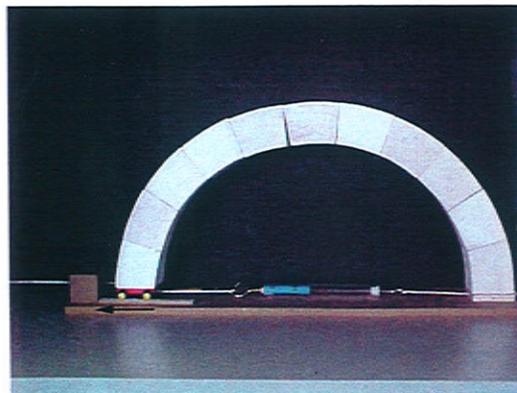
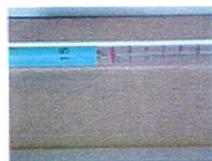
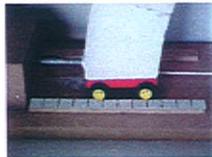
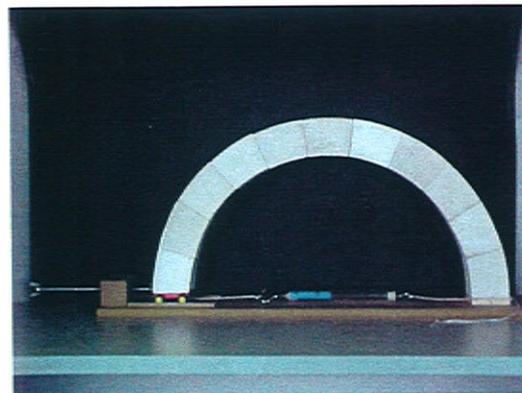
Apoyo con carrito (mat. de «lego»).  
 Varilla roscada.Rail graduado.



Dinamómetro de resistencia 1.5N.



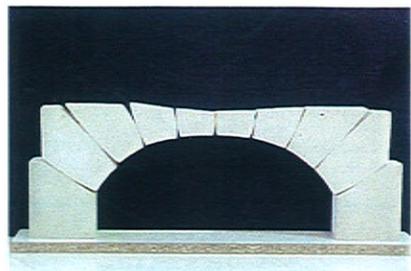
Pieza reguladora.



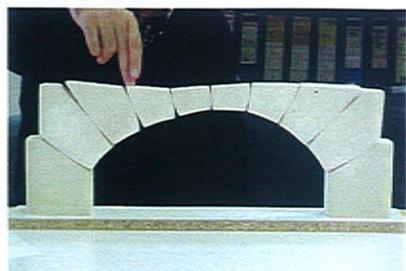
## DEMOSTRACIÓN EXPERIMENTAL QUE PERMITE DEFINIR ESTADOS DE CARGA.

Experimento para demostrar que un arco es estable si existe una posibilidad de equilibrio, diseñado por Jenkin en 1875.

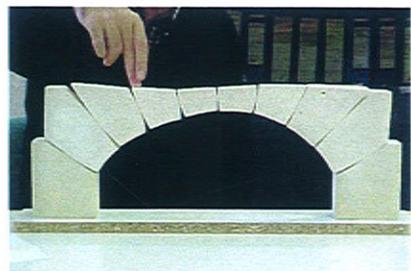
Dovelas de yeso de caras cóncavas e:5cm., sobre tablero conglomerado de dimensiones 57\*10\*1.5 cm. Apoyos empotrados.



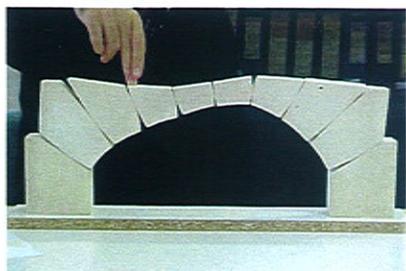
1



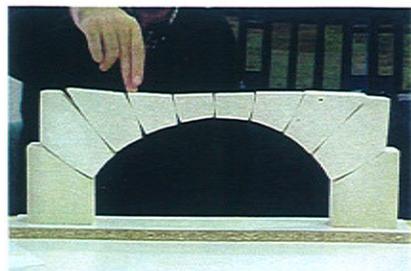
4



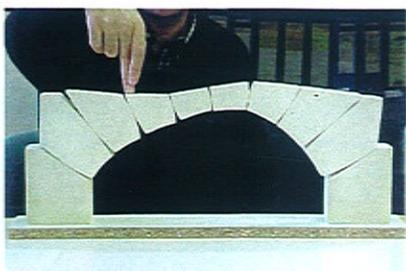
2



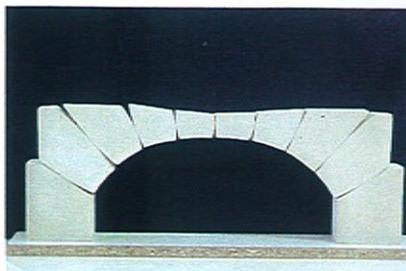
5



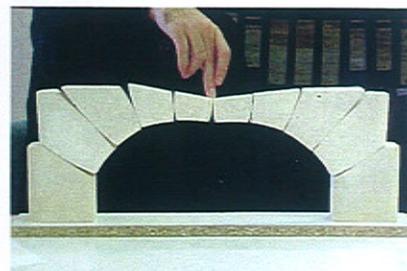
3



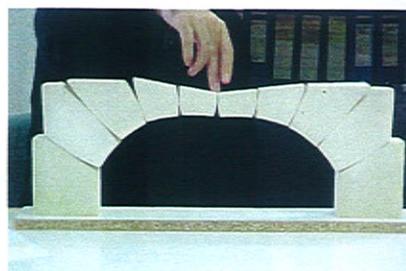
6



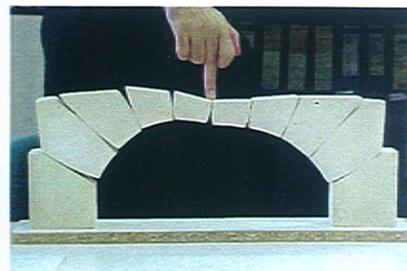
1



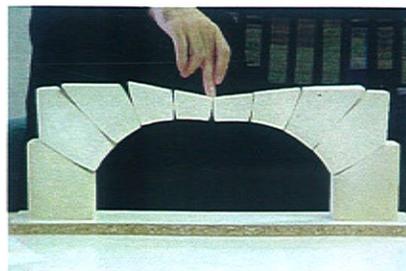
4



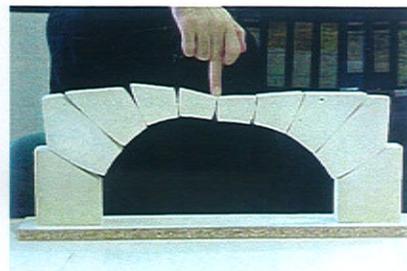
2



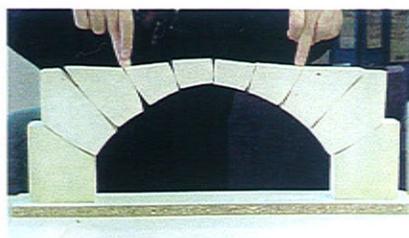
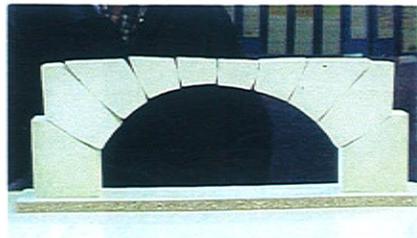
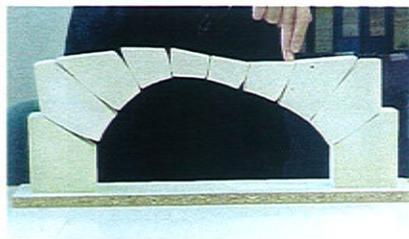
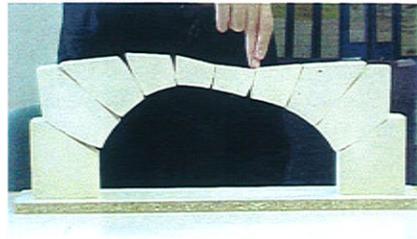
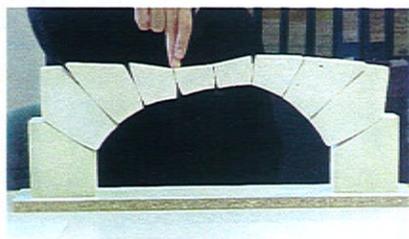
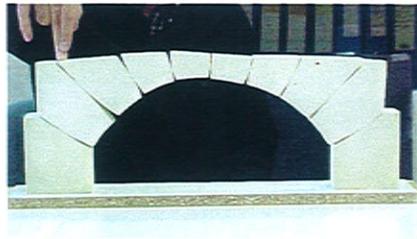
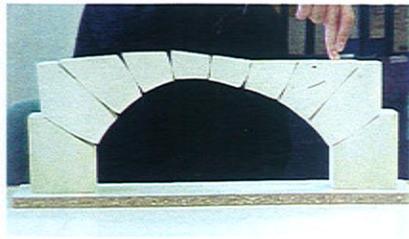
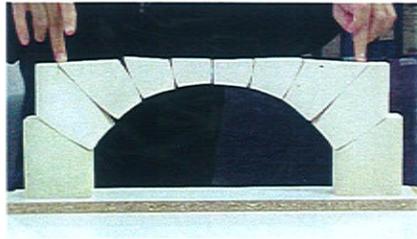
5



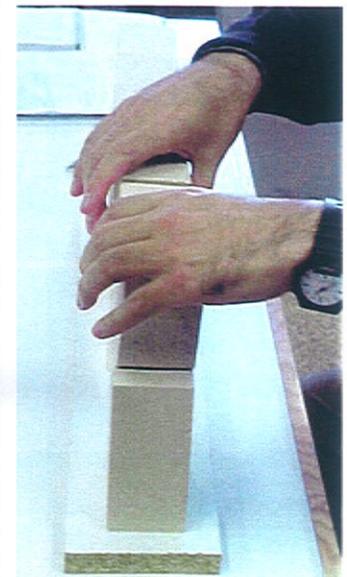
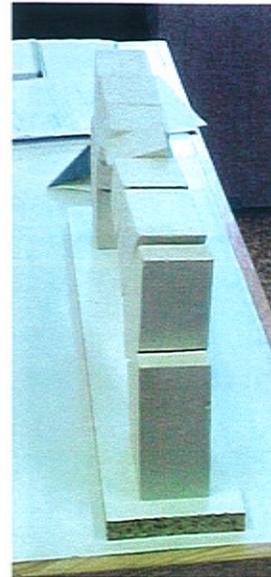
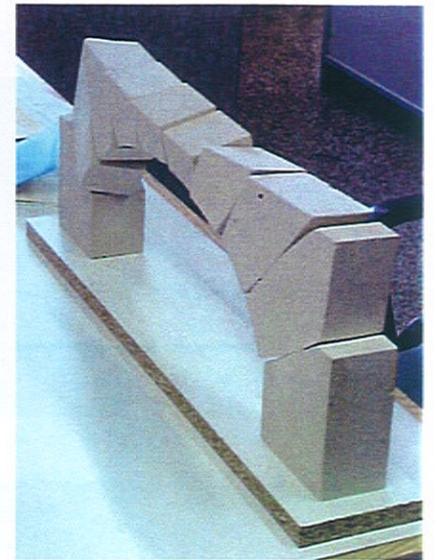
3



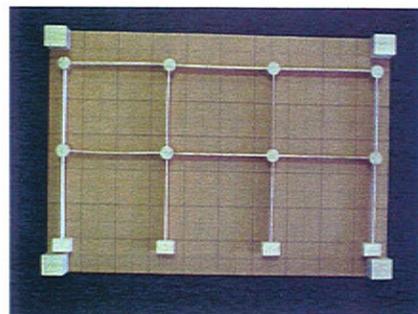
6



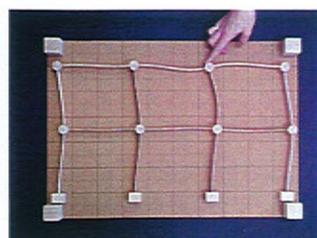
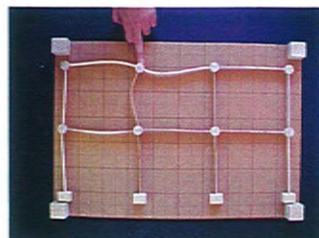
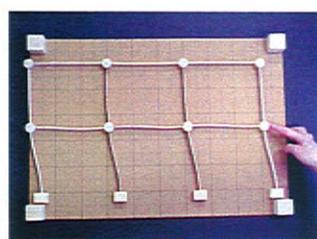
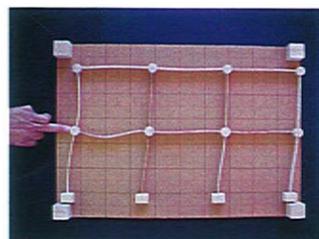
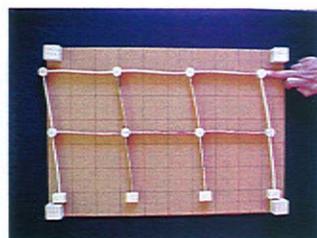
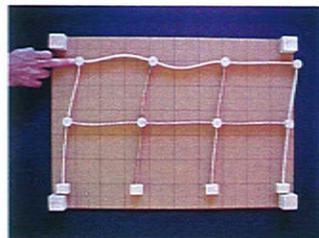
Pivotamiento de las dovelas.



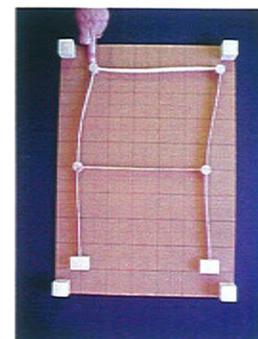
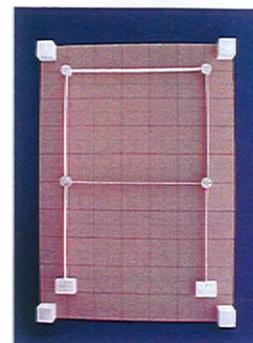
## PÓRTICO DE DOS VANOS Y DOBLE ALTURA



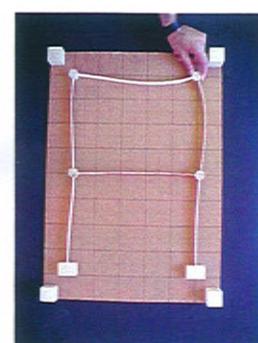
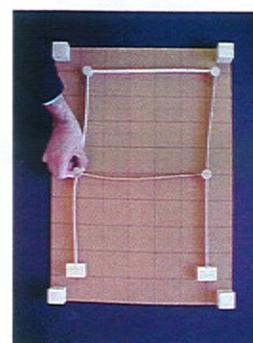
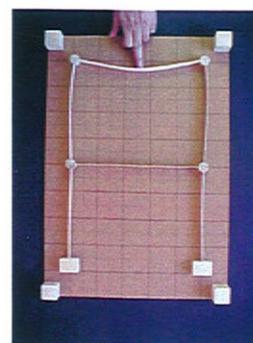
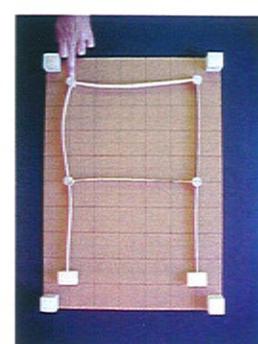
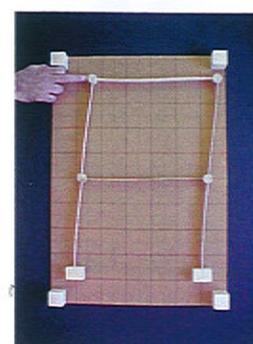
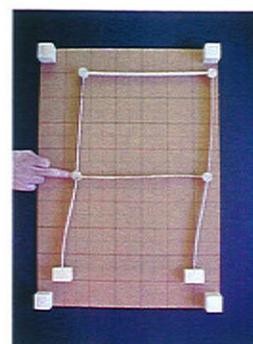
Nudos rígidos.  
Apoyos empotrados.  
Dimensiones: 60\*42cm.  
Materiales: tablero contrachapado,  
madera de balsa 1mm, listones de  
madera de samba.



## PÓRTICO DE UN VANO Y DOBLE ALTURA

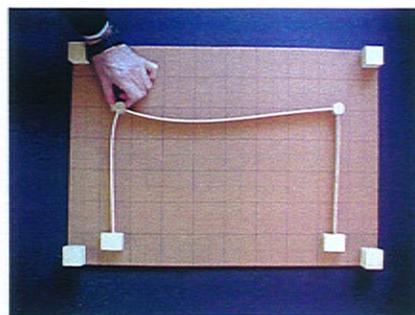
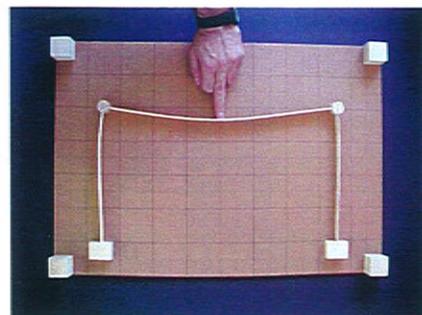
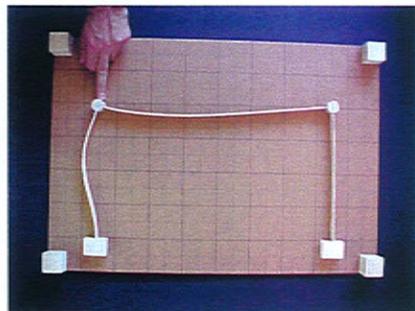
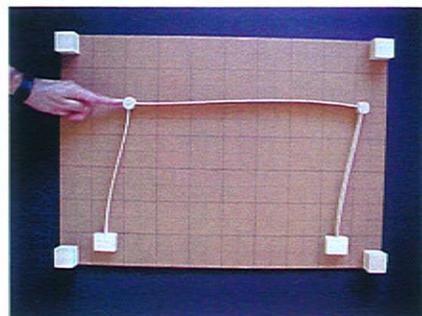
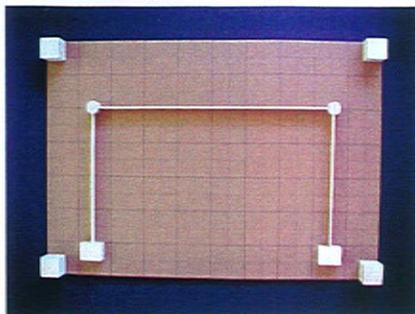


Nudos rígidos.  
Apoyos empotrados.  
Dimensiones: 60\*42cm.  
Materiales: tablero contracha-  
pado, madera de balsa 1mm,  
listones de madera de samba.



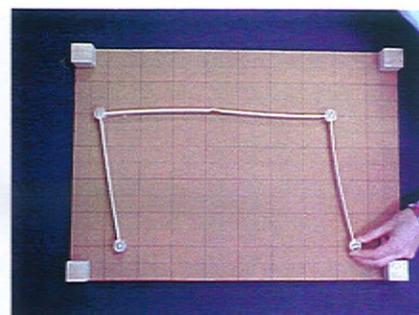
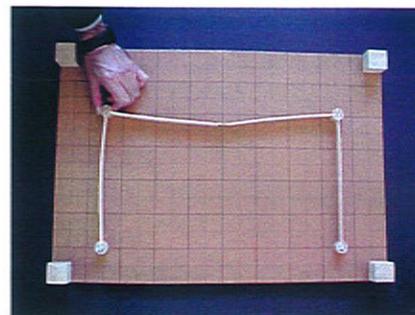
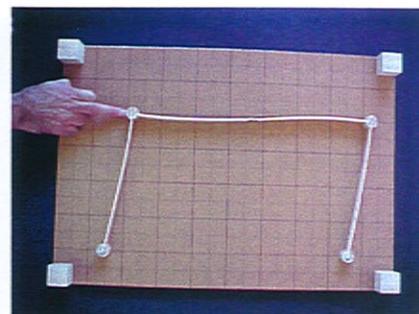
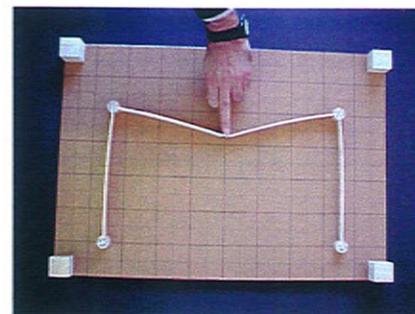
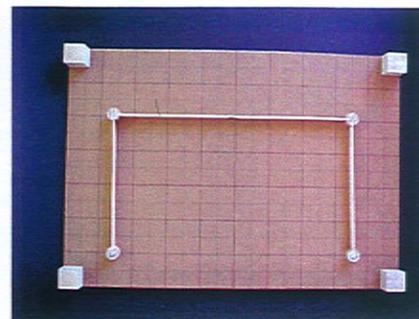
## PÓRTICO SIMPLE BIEMPOTRADO

Nudos rígidos.  
Apoyos empotrados.  
Dimensiones: 60\*42cm.  
Materiales: tablero contrachapado, madera de balsa 1mm, listones de madera de samba.



## PÓRTICO SIMPLE BIARTICULADO

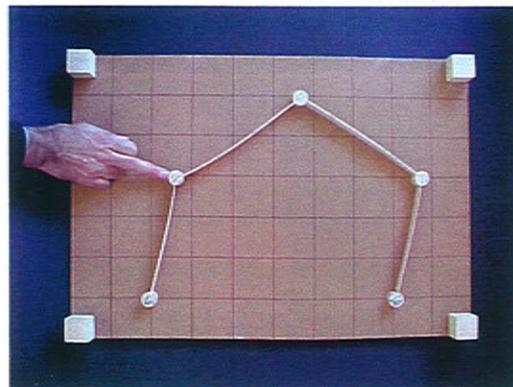
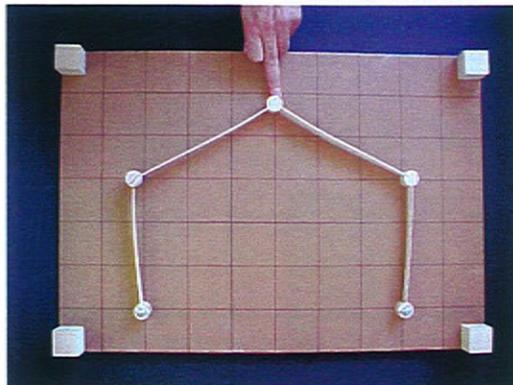
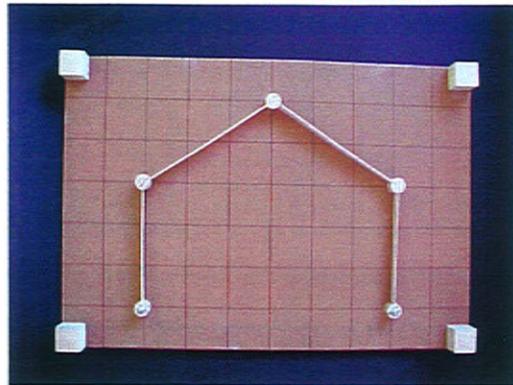
Articulación en el punto medio de la barra horizontal.  
Apoyos articulados.  
Materiales: tablero contrachapado, madera de balsa 1mm, de espesor, listones de madera de samba.  
Dimensiones: 60\*42cm.



## PÓRTICO A DOS AGUAS APOYOS ARTICULADOS

Nudos rígidos. Apoyos articulados. Dimensiones: 60\*42cm.

Materiales: tablero contrachapado, madera de balsa 1mm. de espesor, listones de madera de samba.



## PÓRTICO A DOS AGUAS APOYOS EMPOTRADOS

Nudos rígidos. Apoyos empotrados. Dimensiones: 60\*42cm.

Materiales: tablero contrachapado, madera de balsa 1mm. de espesor, listones de madera de samba.

