



## Puentes tipo arco

---

Los puentes en arco son una tipología donde el elemento principal es el arco que sustenta al tablero. La directriz del arco debe aproximarse lo más posible a la curva antifunicular de las cargas permanentes que actúan sobre la estructura, para así eliminar casi todas las flexiones que solicitan el arco bajo la acción más importante.

La esencia en el funcionamiento del puente arco radica por ende en la **forma** del mismo, por lo que cualquier acción que pueda alterar esta forma condiciona las sollicitaciones.

### Características a considerar

- Para las sobrecargas de uso, se pueden desarrollar tracciones y flexiones en dicho arco, compensadas total o parcialmente por las compresiones producto de las cargas permanentes.
- En función de la acometida del arco en la cimentación, pueden aparecer reacciones horizontales altas que pueden conducir a un eventual cambio de forma.
- Los acortamientos (o dilataciones) por fluencia, retracción o variaciones térmicas pueden condicionar la forma del arco.



## Puentes tipo arco

### Épocas históricas



*Mesopotamia, etruscos y griegos*



*Imperio Romano*



*Edad Media*



*Renacimiento*



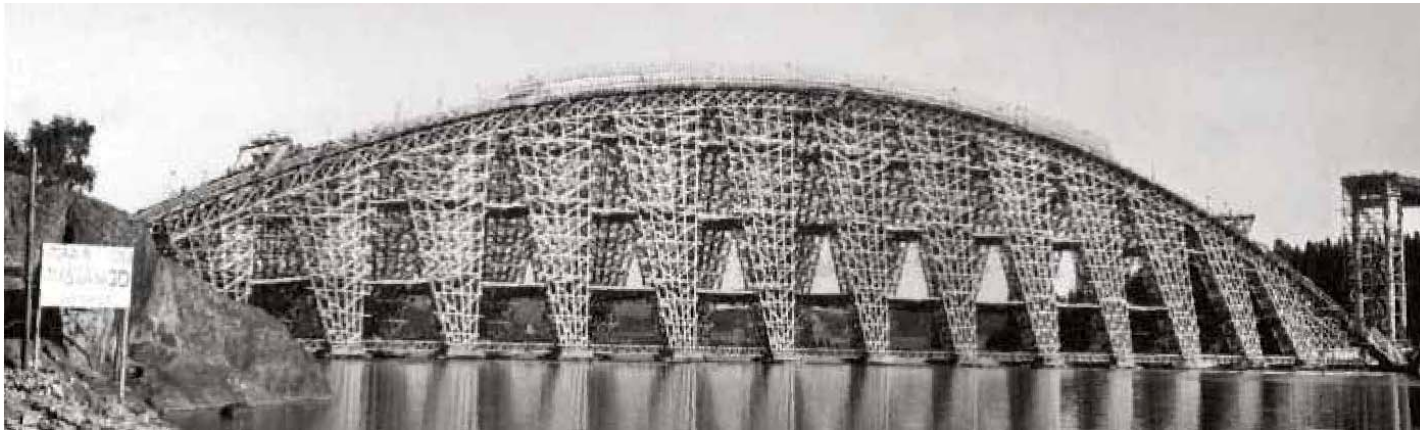
*Revolución Industrial*

## Puentes tipo arco

---

Desde la aparición del pretensado, que posibilita la construcción de puentes rectos de gran luz, y del puente atirantado, que cubre con enorme facilidad las luces de 200 m a 1000 m, el puente arco ha experimentado un parón prolongado.

En sí, el uso de grandes cimbras constituía la dificultad más importante que presentaba la ejecución de estos puentes.



*Cimbrado del puente de Sando en Suecia.*

Con el empleo de nuevos métodos de construcción, se relanzó de nuevo la presencia de este tipo de puentes en un ámbito de luces que oscila entre los 100 y los 400 m para el caso del hormigón o hasta los 530 m en el caso de los metálicos.

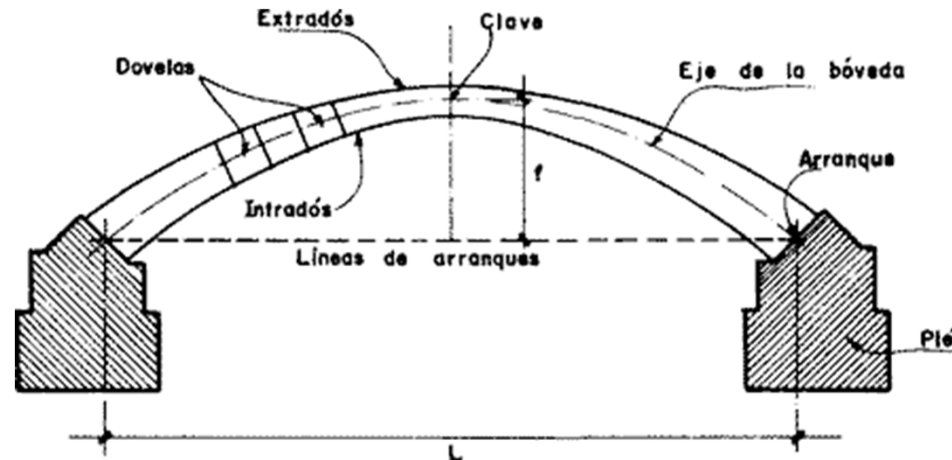
## Puentes tipo arco

### Clasificación

Desde el punto de vista de su morfología:

- Puente arco con tablero superior.
- Puente arco con tablero intermedio.
- Puente arco con tablero inferior.

La situación relativa entre arco y tablero viene establecida por la **relación flecha-luz**. A partir de valores de esta relación inferiores a  $1/10$ , los problemas derivados de las deformaciones de temperatura, fluencia y retracción, en los arcos de hormigón, o de los asentos de los apoyos, son cada vez mayores. En esas situaciones, la solución es un arco con tablero intermedio o tablero inferior.



## Puentes arco con tablero superior

### Condiciones de borde

Generalmente un puente arco con tablero superior es un puente arco biempotrado.

Las articulaciones son elementos costosos y de conservación dudosa por lo que deben evitarse siempre que se pueda. Introducen una gran deformabilidad en el arco y sólo son obligatorias en el caso de que se esperen grandes giros en la cimentación. Los métodos constructivos y de cálculo ya no son condicionantes para su empleo.



**ARCO BIARTICULADO**



**ARCO BIEMPOTRADO**



**ARCO TRIARTICULADO**



## Puentes arco con tablero superior

---

### Directriz y flecha del arco

La directriz del arco debe seguir la curva antifunicular de las cargas permanentes del conjunto del puente, lo que conduce a curvas próximas a la parábola de segundo grado.

Sobre cursos de agua, normalmente, la distancia entre la rasante y la orilla no es muy grande, por lo que la flecha recomendada a utilizar debería ser la mayor posible, con el fin de minimizar los esfuerzos sobre el hormigón y las cargas sobre el cimiento, además de controlar los efectos producidos por las deformaciones impuestas y los asentamientos de los apoyos.



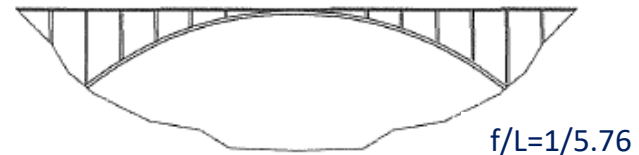
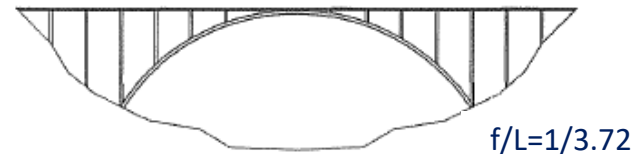
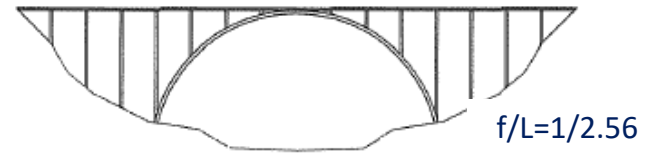
*Puente sobre  
río Almonte,  
España.*

## Puentes arco con tablero superior

### Directriz y flecha del arco

En valles, no hay limitación de flecha, pero su definición viene dada por otros factores.

- Evitar relaciones  $f/L$  menores a  $1/10$ . Aunque sean más estéticas, son más costosas y vulnerables a movimientos horizontales.
- Evitar relaciones  $f/L$  muy altas debido a que el arco es demasiado corto y sirve para poco.
- **Recomendación:**  $f/L$  en el entorno a  $1/4$ .



*Puente de Bloukrans, Sudáfrica.*



## Puentes arco con tablero superior

### Directriz y flecha del arco

E	L	f/L	Ec/L	Ea/L	
Krk I (1980)	390	1/6,5	1/60	1/60	A.V.A.
Parramata (1964)	304,79	1/7,46	1/71	1/43,5	Cimbrado
Foz Iguazu (1965)	290	1/5,47	1/90	1/60	Cimbrado
Bloukrans (1983)	272	1/4,4	1/75	1/48	A.V.A.
Arrabida (1963)	270	1/5,19	1/90	1/60	Cimbrado
Sando (1943)	264	1/6,6	1/91	1/52,8	Cimbrado
Chateaubriand (1991)	261	1/8,1	1/62		A.V.A.
Shibenik (1966)	246,1	1/8	1/84,0	1/66,6	A.V.A.
Krk II (1980)	244	1/5,14	1/61	1/61	A.V.A.
Fiumarella (1961)	231	1/3,5	1/115	1/35	Cimbrado
Martin Gil (1942)	200,00	1/3,35			Cimbrado
Regenta (1996)	194	1/3,8	1/80	1/46	A.V.A. y D.
Plougastel (1930)	3x186	1/6,5	1/37,9		Cimbrado
Traneberg (1934)	181	1/6,8	1/61	1/36,2	Cimbrado
Valle Grosse Muhl (1991)	170	1/3,43	1/68	1/56	A.V.A.
Hokawazu (1974) *	170	1/6,4	1/70	1/56	A.V.A. y D.
Neckarburg	154	1/3,1	1/51	1/51	A.V.A.
Podalsko	150,8	1/3,5	1/56	1/32	
Puddelford	150,1	1/6	1/108	1/61	
La Guaira (1952)	150	1/4,75	1/50	1/50	A.V.A.
Argentobel (1987)	143	1/4,8	1/55	1/34	Girado
Berna	150	1/46	1/46	1/30	
Viaducto La Peña (1995)	148,5	1/3,28	1/70	1/41	A.V.A. y D
Tenfekstal (1938)	138	1/5,3	1/106	1/49	
Echelsbach (1930)	130	1/4,1	1/61	1/40	Autocimbra
G. Westinghause	125	1/2,61	1/62	1/41	

\* Arco biarticulado.

L: Luz del arco.

F: Flecha en clave.

Ec: Espesor en clave.

Ea: Espesor en arranque.

A.V.A.: Avance en voladizo arco.

A.V.A.D.: Avance en voladizo arco y dintel.

## Puentes arco con tablero superior

---

### Relación tablero – arco

El tablero se apoya en el arco a través de los pilares y le acompaña en su deformación, por lo que arco y tablero se reparten el efecto de las cargas asimétricas en dirección longitudinal, en función de las rigideces relativas. Cuanto mayor es la luz, la inercia del arco predomina, por lo que éste recibe prácticamente todo el efecto de las cargas asimétricas mientras que el tablero recibe el efecto directo de las cargas y la flexión producto de los asientos diferenciales del arco.

Los pilares se ubican como mínimo dividiendo el arco en 8 partes iguales, siendo más frecuente 10 o 12 partes, o los impares intermedios, que se producen cuando no se dispone un pilar en la clave del arco.



*Puente de Ricobayo en Zamora, España.*



*Puente de Arrábida en Oporto, Portugal.*

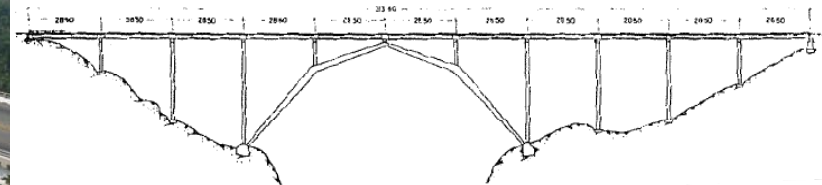
## Puente arco con tablero superior

### Relación tablero – arco

En el viaducto de acceso pueden hacerse dos cosas:

- Mantener la separación de columnas del arco.
- Cambiar de ritmo, pasando a una luz mayor. Se establece una transición entre ambos tramos del dintel, resuelto colocando una gran pila de separación.

Esta última ha sido la más utilizada a lo largo de toda la época del hormigón armado. Actualmente parece imponerse la primera, donde una separación entre pilas adecuada para el viaducto de acceso produce un número de pilares dentro del arco pequeño, por lo cual el antifunicular de la carga permanente se poligonaliza.



*Puente de Bacunayagua, Cuba.*

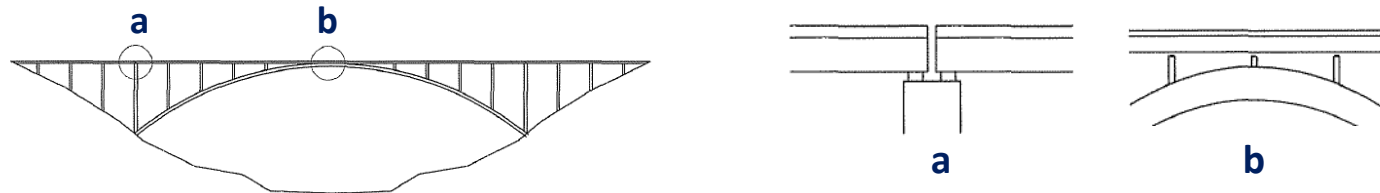


## Puentes arco con tablero superior

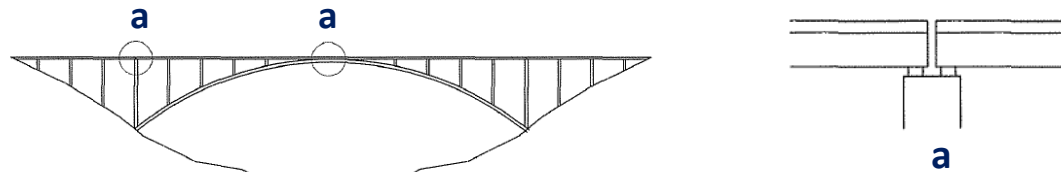
### Relación tablero – arco

En cuanto a las vinculaciones de los pilares con el arco y el tablero pueden establecerse varios procedimientos.

- El tablero es continuo y “flota” sobre los pilares, apoyándose en ellos por medio de apoyos deslizantes. Los pilares siempre están empotrados en el arco y se dispone una junta en el tablero, sobre el pilar extremo del arco.



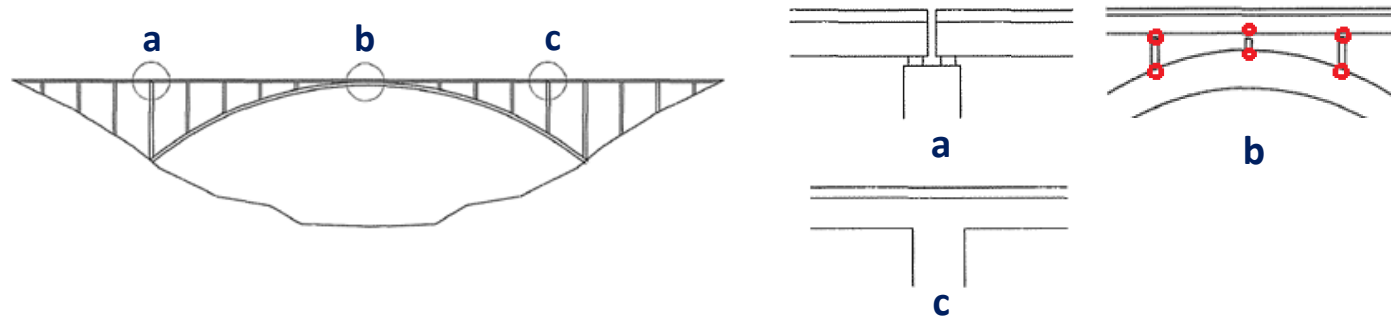
- El tablero está formado por vanos simplemente apoyados en los pilares. El tablero no colabora con el arco en el trabajo conjunto. Los pilares se empotran en el arco y disponen de dos apoyos para cada uno de los vanos del tablero.



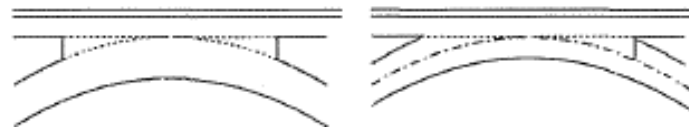
## Puentes arco con tablero superior

### Relación tablero – arco

- Los pilares quedan empotrados en el arco y el tablero, salvo los próximos a la clave, muy cortos de longitud, que pueden experimentar flexiones importantes por las deformaciones diferentes de temperatura, fluencia y retracción en arco y tablero y por los giros debidos a la sobrecarga. En estos casos, los pilares cortos, se deben convertir en bielas o estar provistos de apoyos deslizantes.



- El tablero se vincula al arco en la clave, formando un “todo uno”. El centro de contracción del tablero estará en la clave dado que los pilares altos de la zona de junta no coaccionan la deformación.



## Puentes arco con tablero superior

---

### Secciones transversales

#### Arco

La sección transversal más frecuente es la sección cajón, de una, dos o tres células. Estas secciones pesan poco y tienen un radio de giro excelente. La compresión tiene una gran capacidad para eliminar las tracciones producidas por las flexiones debidas a la sobrecarga.

Cuando la luz del arco no es muy grande ( $L < 150$  m), la sección en cajón único (mono o pluricelular) puede pasar a dos cajones, a secciones en "U", o a dos simples secciones rectangulares macizas.

#### Tablero

Su forma va a depender del proceso constructivo utilizado, según se trate de construcción "in situ" sobre cimbra, si se utiliza una cimbra autoportante y autolanzable o si se utiliza la tipología de puentes empujados.





## Puentes arco con tablero superior

### Arcos especiales

#### Puente tímpano

La unión con fábrica del arco y tablero es permanente a lo largo de toda la historia de los puentes y resurge en el primer cuarto del siglo XX. Se busca cubrir los tímpanos de hormigón con sillares de piedra con el fin de ocultar la exposición del hormigón visto.



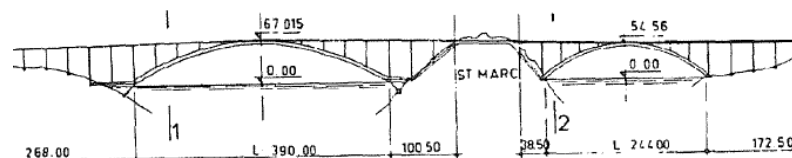
#### Arcos delgados – Tableros gruesos (Maillart)

El tablero pasa a tener toda la rigidez de la estructura. Bajo la carga permanente, el comportamiento del puente es normal. Con las sobrecargas asimétricas, el tablero resuelve el papel de centrar y convertir en antifunicular la parte de carga que va a transmitir al arco. Las flexiones, cuyo valor es importante en este tipo de estructuras, las debe resistir él.

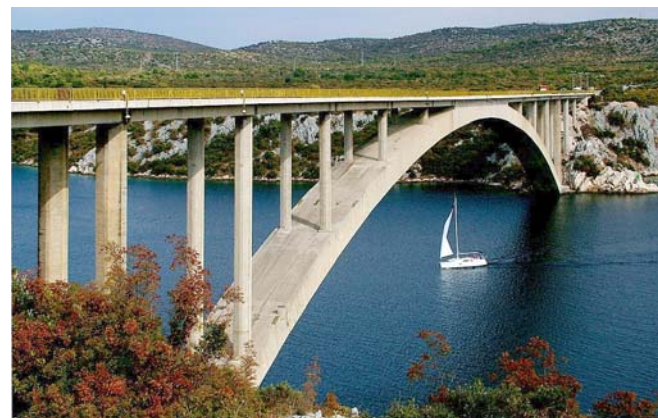
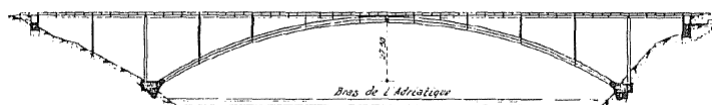


## Puentes arco con tablero superior

### Puentes significativos con arcos de hormigón armado



*Puente de Krk, Croacia.*

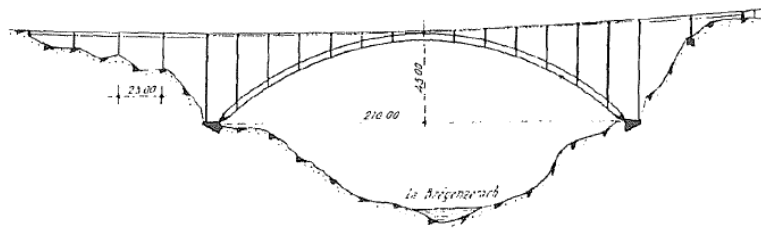


*Puente de Sibenik, Croacia.*

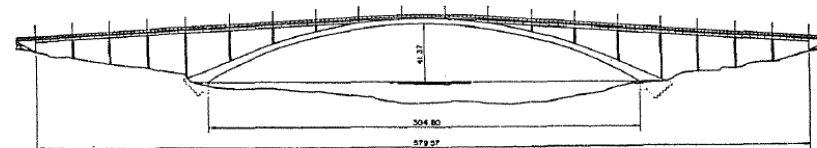
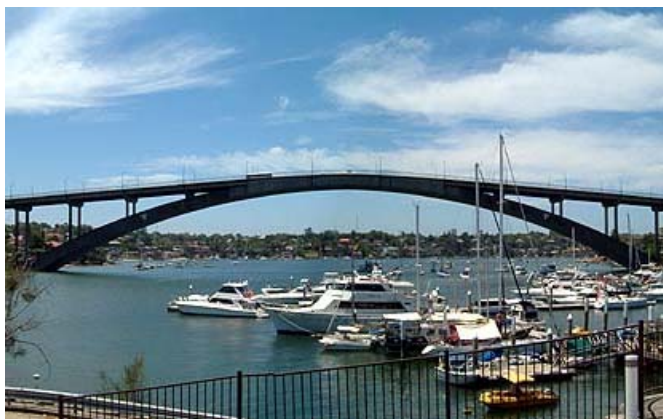


## Puentes arco con tablero superior

### Puentes significativos con arcos de hormigón armado



*Puente de Lingenau, Austria.*

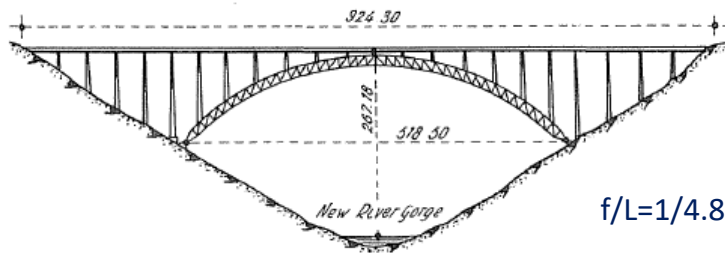


*Puente de Parramata, Australia.*

## Puentes arco con tablero superior

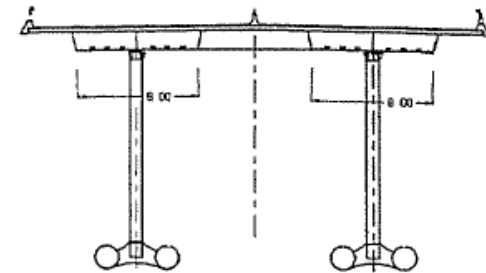
### Puentes significativos con arcos metálicos

#### Arco en celosía



*Puente New River George, Estados Unidos.*

#### Arco en sección tubular



*Puente sobre río Escudo, España.*





## Puentes arco con tablero intermedio e inferior

Su morfología responde a evitar relaciones flecha/luz muy pequeñas que conviertan al puente en vulnerable ante los asentos de los apoyos y las deformaciones impuestas de temperatura, fluencia y retracción.



*Ponte Žeželj,  
Serbia.*

*Ponte de  
Nimega, Países  
Bajos.*



**¿CÓMO ESTÁN  
SOLICITADAS  
LAS DISTINTAS  
PARTES?**



## Puentes arco con tablero intermedio e inferior

---

### Relaciones flecha/luz

La flecha y la luz son valores independientes, a diferencia de los casos con tablero superior unidos en clave, por lo que establecer su relación depende exclusivamente de la eficacia resistente y el deseo del proyecto. Las relaciones  $f/L$  oscilan en casi todos estos casos alrededor de  $1/6$ .

### Dimensión del arco

- El área de un arco, depende de la cantidad de axil que transporte.
- La inercia vertical depende de su relación con la del tablero. Si toda la inercia está en el arco, entonces se aprovecha la compresión para resistir las tracciones por las flexiones de las cargas no funiculares. Si toda la inercia está en el tablero, el arco se convierte en membrana con flexiones mínimas.
- La inercia horizontal y su rigidez a torsión se enfrentan con el pandeo y el viento.
- El ancho es mayor a la altura, a diferencia de los arcos con tablero superior.
- Las esbelteces oscilan entre  $L/40$  a  $L/60$  en los arcos de hormigón y  $L/70$  a  $L/130$  en los arcos metálicos.

## Puentes arco con tablero intermedio e inferior

### Arco con tablero intermedio

	L(m)	f/L	e <sub>c</sub> /L	e <sub>p</sub> /L	b/L	D	n° sep	Juntas tablero
Novi Sad (1961)	235	1/6.5	1/47	1/66	1/94-1/50	16.5	23	En el centro
Das Antás	186	1/6.5	1/62	1/37,2	1/124	8.7	29	
La Roche-Guyon (1935)	161	1/7	1/60	1/111	1/115-1/53	9.4	20	En la unión con el arco
Canada-Treguier (1954)	153	1/5.8	1/66	1/43	1/72-1/43	12.3	23	En el centro
Castelmoron (1933)	143	1/6.4	1/119	1/102	1/143	7.0	12	En extremo tramo principal
V. sobre el Ródano (Ferrocarril-vía doble)	124	1/5	1/37	1/55	1/56	10.7	25	a cuartos de la luz.
P. Djurö (Estocolmo) (1962)	185	1/5.5						

*L: Luz.*

*f: Flecha.*

*ec: Canto en clave.*

*ea: Canto en arranque.*

*b: Ancho de arco.*

*d: Separación entre arcos.*

*n° sep: Número de divisiones del arco por las péndolas o puntales.*

### Arco con tablero inferior

	L(m)	f/L	e <sub>c</sub> /L	e <sub>p</sub> /L	n° sep	D	ancho arco
TISA	154	1/6.53	1/225	1/210	15	8.7	1.2
COUDETTE	111.28	1/6.75	1/89	1/89	13	8.25	1.1
ANGERMANALVEN	90.7	1/5.7	1/90	1/90	15	6.0	0.8
HAGEN	93.2	1/6.5	1/55	1/42	13	12.9	2.2 clave 1.2 arr.
	74	1/5.75	1/31	1/37	13	14.3	1.4
PEDRIDO	75	1/5.8	1/43	1/68	19	7	1.2
SALADO	80	1/5.3	1/52	1/52	11		
S. BERNARDINO	74	1/4.8	1/28	1/28	17	5.5	0.9
TUNEZ	92	1/5.9	1/35	1/35	23	6.9	0.9
TWENTLE	67		1/41	1/32,5	11		0.9
ALCANTARILLA	64	1/7.8	1/64	1/64	13		2x1.5

## Puentes arco con tablero intermedio e inferior

Las dimensiones del arco se pueden:

- Reducir al mínimo, adjudicando un aumento de inercia vertical al tablero, que controla a su vez el pandeo vertical. Esto es bastante común en arcos metálicos.

Otra alternativa es triangular los tirantes, ya que arco y tablero funcionan en conjunto como una viga de gran canto. Se debe cuidar la inclinación de las péndolas para que no entren en compresión y prever posibles problemas de fatiga en puentes de ferrocarril principalmente, rigidizándolas si es necesario.

- Aumentar, haciendo el arco muy rígido y el tablero a su mínima expresión.



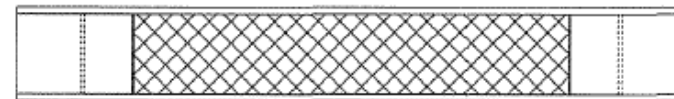
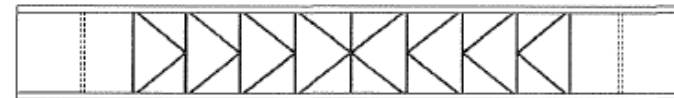
## Puentes arco con tablero intermedio e inferior

### Arriostramientos transversales

El pandeo fuera del plano se resuelve normalmente por la disposición de un arriostramiento transversal entre arcos o entre arco y tablero, aunque también está controlado por la componente transversal que producen las péndolas cuando el arco se sale del plano.

En el punto donde arco y tablero se unen, se suele disponer un arriostramiento más importante que recoge las fuerzas transversales de viento y las transporta al tablero.

En el caso de puentes muy anchos, que el arriostramiento entre arcos resulte visualmente excesivo, es conveniente eliminar el arriostramiento superior y estudiar el pandeo del arco fuera del plano para conferir la rigidez transversal correspondiente.





## Puentes arco con tablero intermedio e inferior

---

### Juntas de dilatación

En los puentes con tablero intermedio:

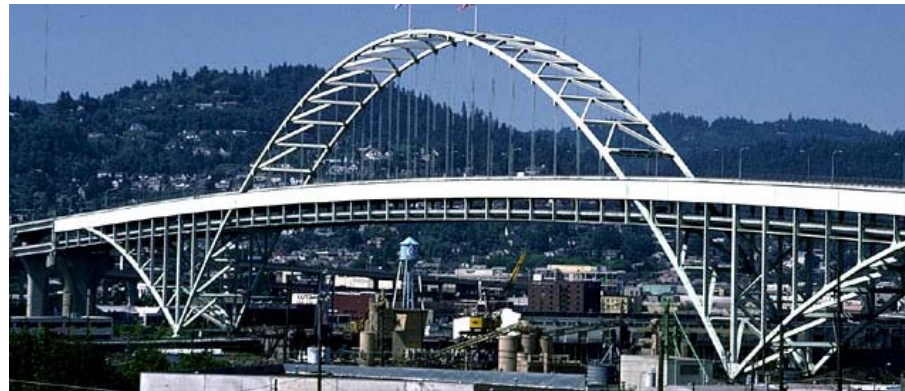
- Situada sobre la riostra transversal que se dispone en el punto de contacto entre arco y tablero. Tiene la ventaja de situarse en un punto claro y de cambio de tipo de sustentación, pero tiene el inconveniente de que los movimientos horizontales diferenciales máximos entre arco y dintel, se produce en la zona donde las péndolas son más cortas.
- En el centro de la luz, allí donde las péndolas son más altas.
- A los cuartos de la luz, donde las péndolas no son tan cortas y allí se disponen llaves transversales.

En puentes con tablero inferior, no se disponen juntas intermedias. El arco y el tablero se mueven en conjunto y es el conjunto el que debe moverse con respecto a los estribos.

## Puentes arco con tablero intermedio e inferior

---

En el caso de tablero intermedio, cuando se tiene buena cimentación, el arco se apoya en el terreno. Cuando la cimentación es mala, el empuje del arco se compensa, en parte por el semiarco trasero y, en parte, se conduce al dintel. El semiarco trasero debe tener la forma antifunicular de su peso propio y la gran carga horizontal que le transmite el arco principal.



*Puente Fremont, Estados Unidos.*

El arco metálico con tablero inferior, se ha desarrollado mucho, tanto en cantidad como en diversidad formal, y esto debido a su independencia de las características resistentes del terreno.

## Puentes arco con tablero intermedio e inferior



Se pueden mover los arcos, cerrarlos o abrirlos, obteniendo resultados distintos si los miramos desde un punto de vista resistente o visual.



La disposición de volcar un arco contra el otro, mejora el arriostramiento transversal de los arcos y confiere un muy logrado espacio interno.



Tumbar los arcos hacia afuera resulta más problemático. La estructura tiende a abrirse y el atirantamiento transversal resulta mucho más evidente. Eliminar este atirantamiento es posible, pero entonces los arcos se ven sometidos a una flexión de eje horizontal correspondiente a su propio peso.

## Procedimientos constructivos

### Cimbrado

- Único sistema hasta fines del siglo XIX.
- El coste de la cimbra puede constituir el coste principal de la obra.
- En caso de puentes de grandes luces, las condiciones de apoyo en el centro del vano son complicadas.
- Las operaciones de descimbrado pueden requerir la interposición de gatos hidráulicos para el despegue de la cimbra con facilidad.





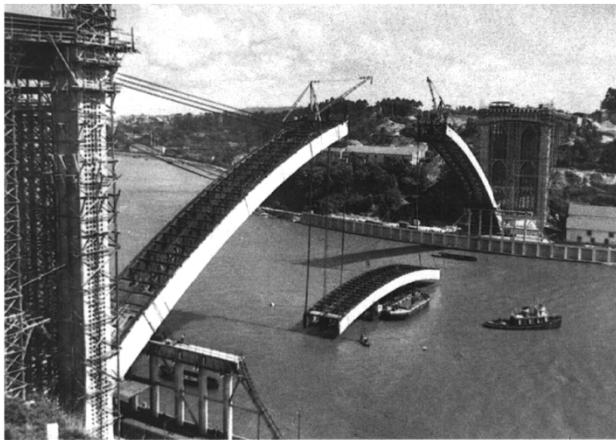
## Procedimientos constructivos

### Autocimbra



Consiste en construir en primer lugar un arco metálico ligero con capacidad para soportar su peso propio y el del hormigón del arco definitivo, que queda luego embebido en el arco como armadura (Sistema Melan).

Hoy en día, se ha evolucionado hacia una solución donde se dejan los tubulares metálicos vistos y se inyecta hormigón en su interior.



## Procedimientos constructivos

### Avance en voladizo

Consiste en avanzar el arco por medio de un carro de avance o dovelas prefabricadas, atirantando desde el tablero o desde torres provisionales dejadas al efecto en las pilas próximas, con el fin de controlar los esfuerzos producidos durante la construcción.



**VER VIDEO**



## Procedimientos constructivos

### Abatimiento de semiarcos

El arco dividido en dos mitades, se construye en posición vertical o inclinado y se gira, ayudado por tirantes hasta que se acodala uno contra otro. El arco, construido en posición vertical, se empuja con un elemento rígido y un control por atirantamiento, hasta que el arco pasa claramente su centro de gravedad de la vertical, a partir de la cual el movimiento es controlado por atirantamiento.

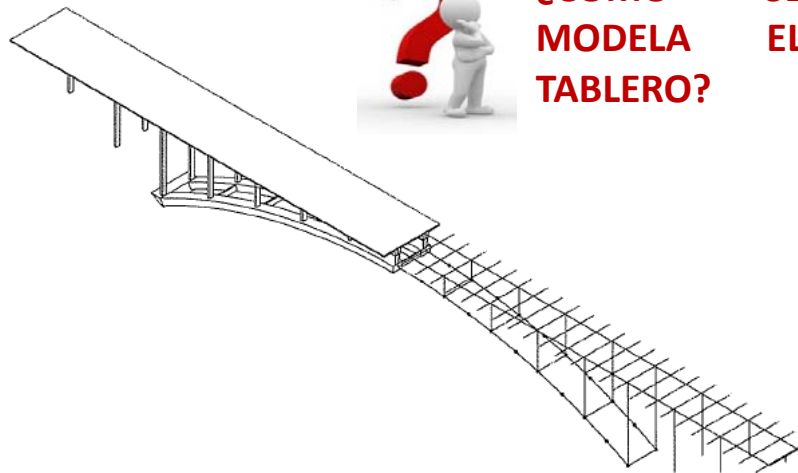
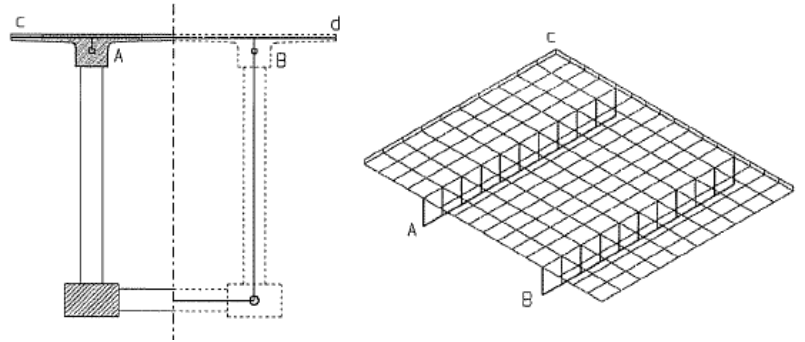


**VER VIDEO**



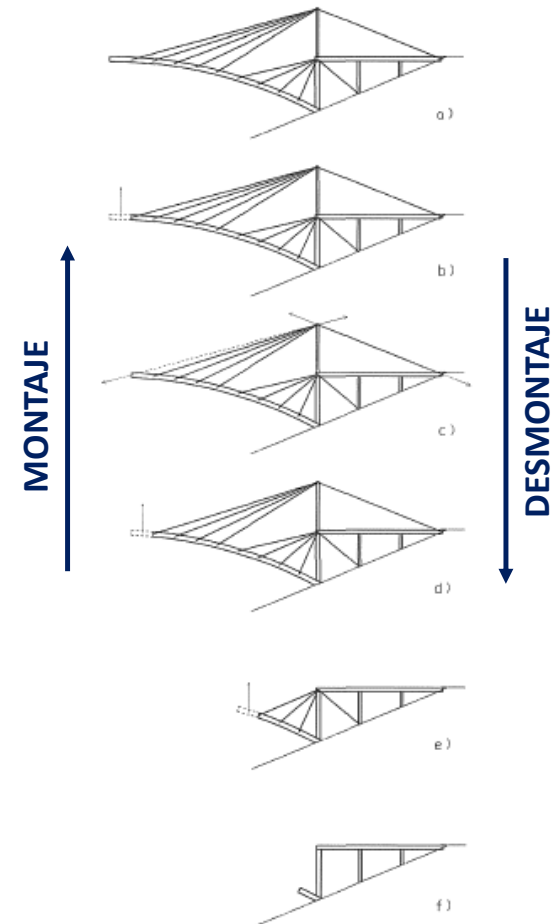
# Cálculo

## Situación final



**¿CÓMO SE  
MODELA EL  
TABLERO?**

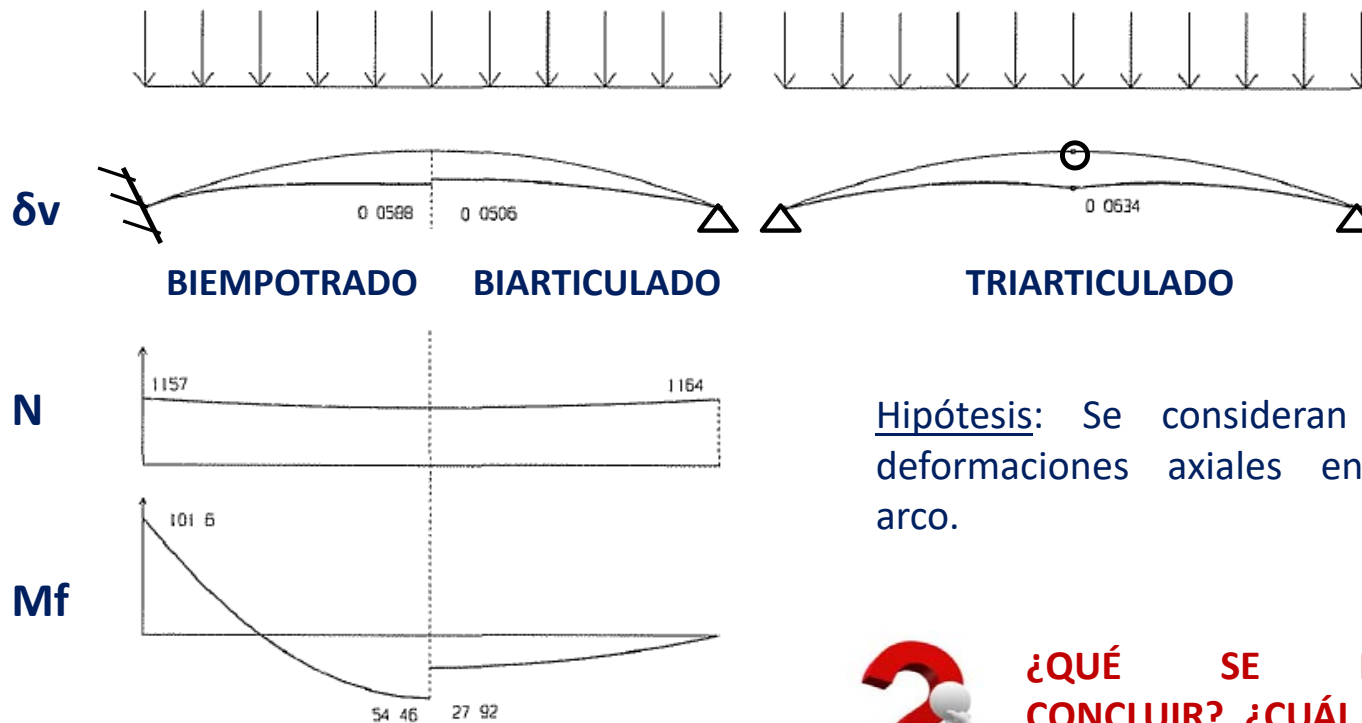
## Situación constructiva





## Comportamiento de puentes arco

### Efecto sobre el arco de las vinculaciones externas



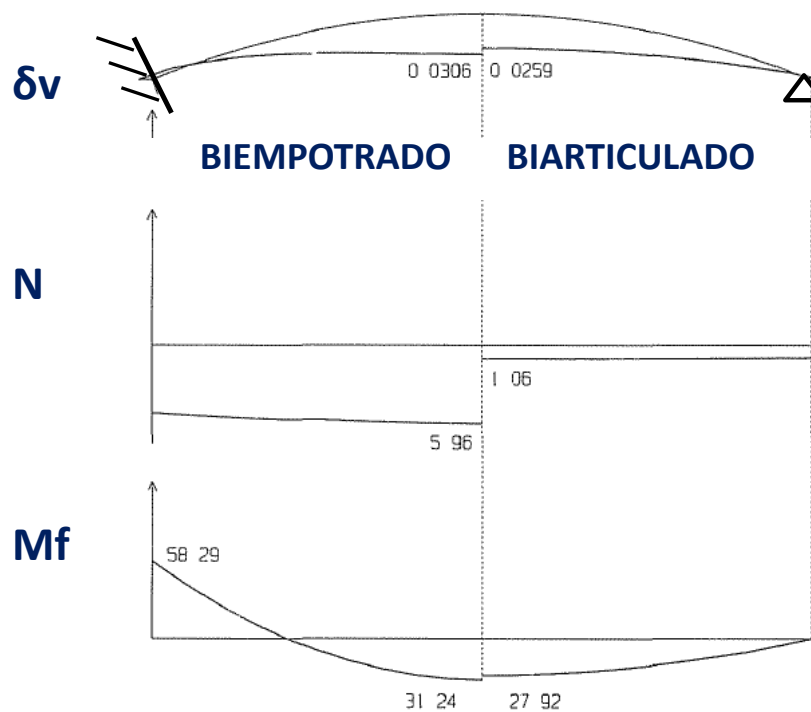
Hipótesis: Se consideran las deformaciones axiales en el arco.



**¿QUÉ SE PUEDE CONCLUIR? ¿CUÁL SERÍA LA MEJOR OPCIÓN?**

## Comportamiento de puentes arco

### Efecto sobre el arco de las vinculaciones externas



Se considera un desplazamiento horizontal de 1 cm en los apoyos.

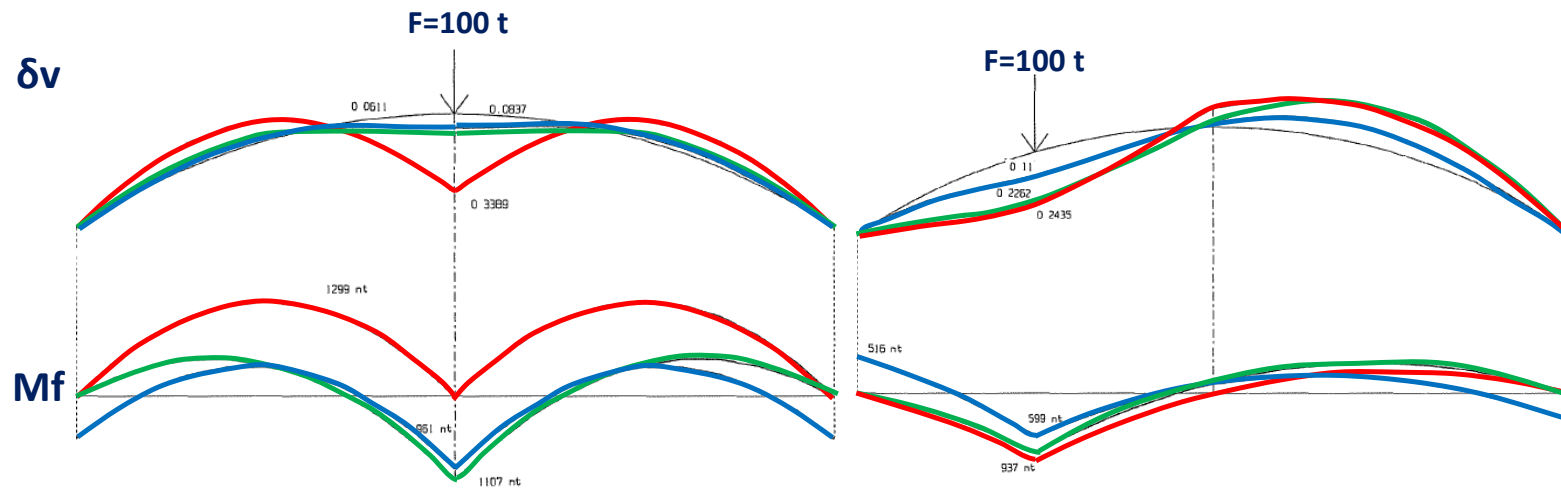
Hipótesis: Se consideran las deformaciones axiales en el arco.



**¿CÓMO SE PUEDE EVITAR LA APARICIÓN DE ESTOS MOMENTOS FLECTORES?**

## Comportamiento de puentes arco

### Efecto sobre el arco de las vinculaciones externas



- ARCO BIEMPROTRADO
- ARCO BIARTICULADO
- ARCO TRIARTICULADO

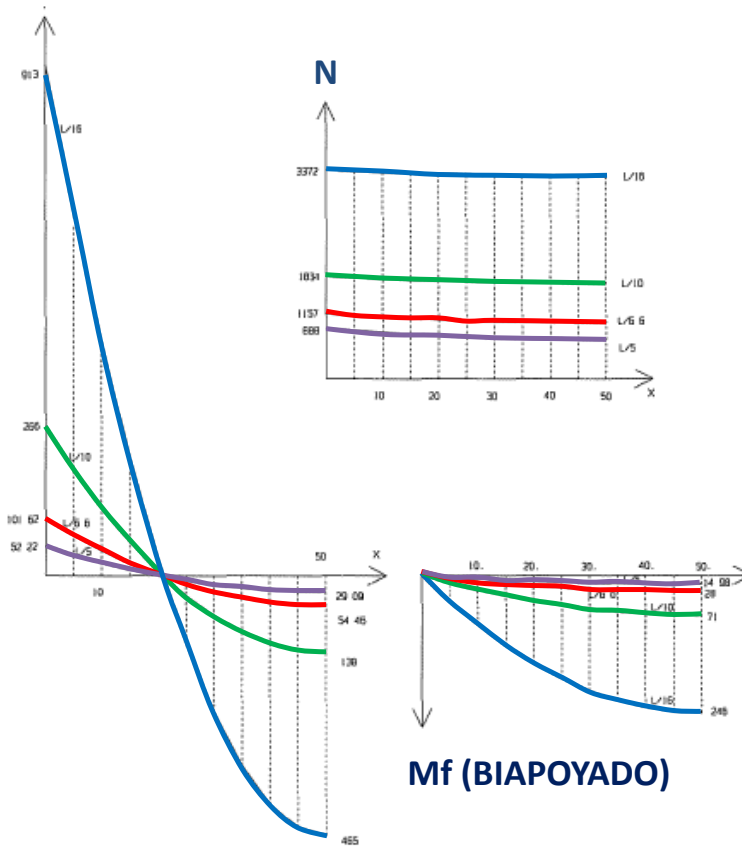


¿QUÉ OCURRE CUANDO SE CONSIDERAN CARGAS PUNTUALES?

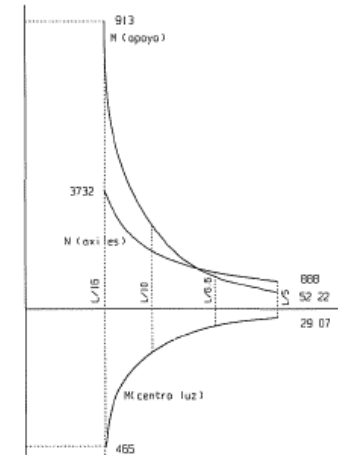
## Comportamiento de puentes arco

### Efecto de relación flecha-luz

#### Mf (BIEMPOTRADO)



#### Mf (BIAPOYADO)



#### ARCO BIEMPOTRADO

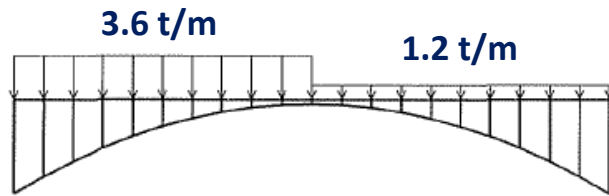
Arco con  $L=100$  m y flechas tal que:

- $f = L/16$
- $f = L/10$
- $f = L/6.6$
- $f = L/5$

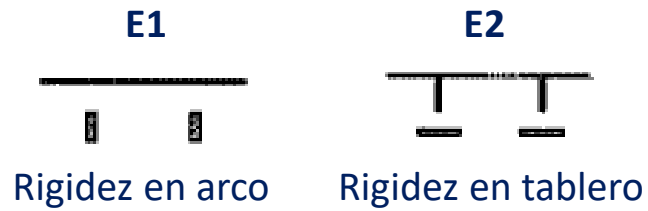


## Comportamiento de puentes arco

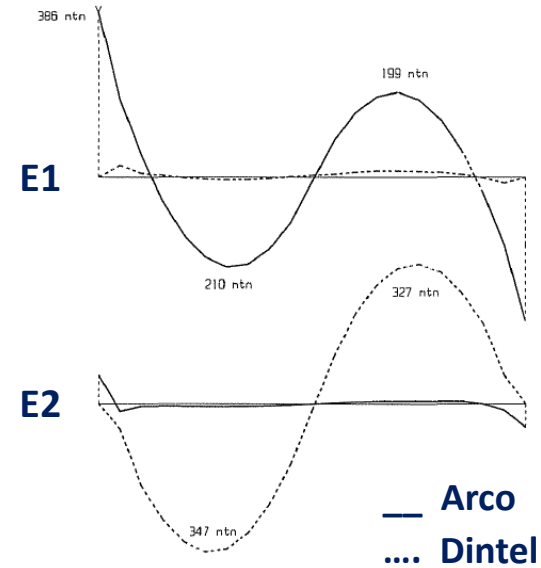
### Relación arco-tablero bajo acciones verticales



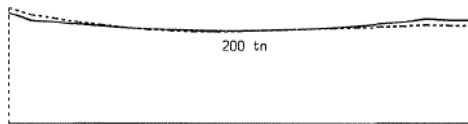
Arco con  $L=100$  m, pilares biarticulados y secciones:



Mf

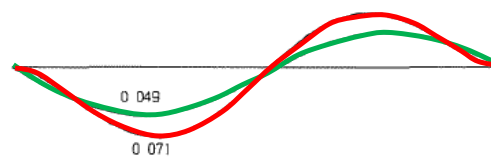


N (arco)



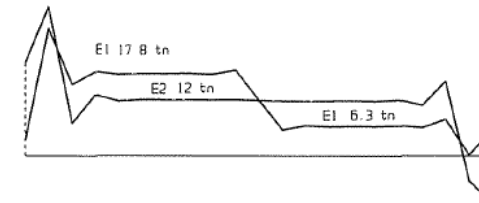
..... E1  
— E2

$\delta v$



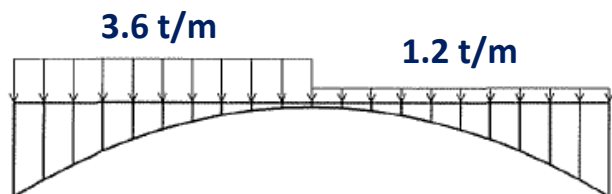
--- E1  
--- E2

N (pilares)



## Comportamiento de puentes arco

### Relación arco-tablero bajo acciones verticales



Arco con  $L=100$  m, pilares biempotrados y secciones:

**E1**



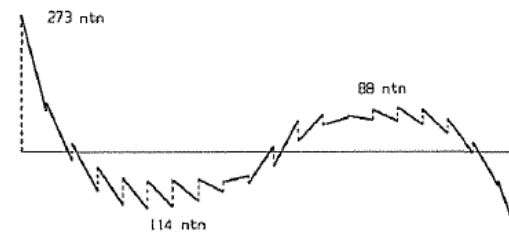
Rigidez en arco

**E2**

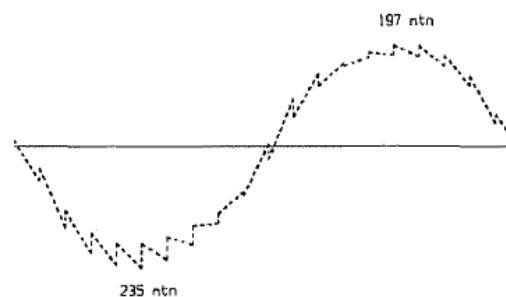


Rigidez en tablero

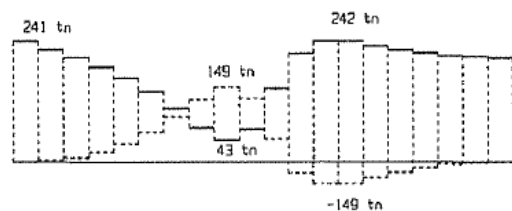
**Mf arco  
(E1)**



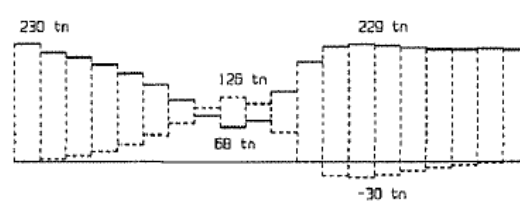
**Mf dintel  
(E2)**



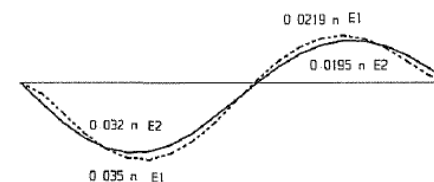
**N (E1)**



**N (E2)**



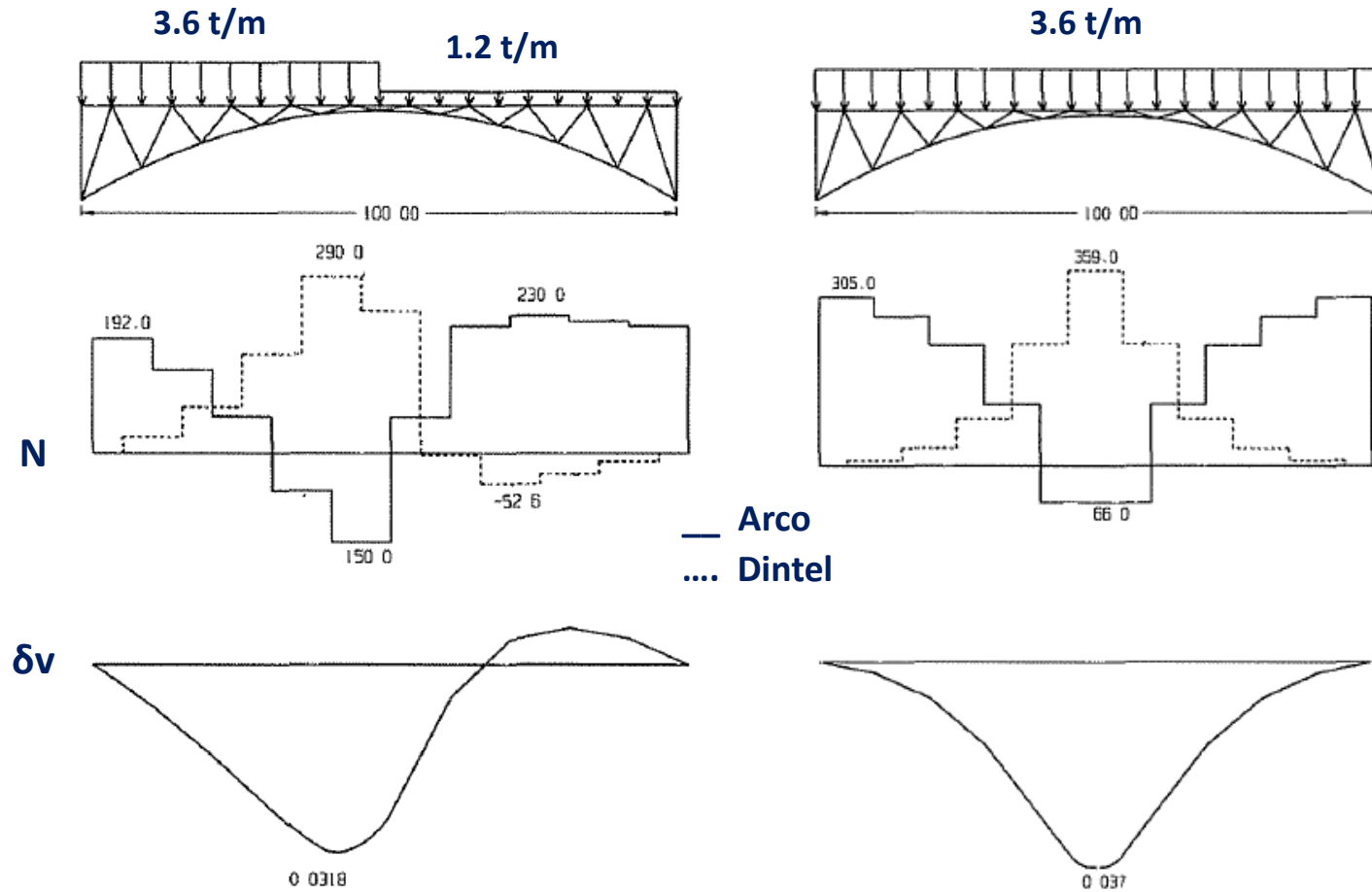
**$\delta v$**



— Arco  
... Dintel

## Comportamiento de puentes arco

### Relación arco-tablero bajo acciones verticales



## Bibliografía

---

- Abrir caminos... Tendiendo puentes. Ángel González.
- Material de Fernando Sima de la materia Puentes de la Universidad de la República Oriental del Uruguay. Año 2014.
- Puentes – Apuntes para su diseño, cálculo y construcción. Primera Edición. Javier Manterola.
- Los puentes arco en la actualidad - Construcción de puentes arco. Artículo de Luis M. Viartola Laborda.