

## L'art de sostenir el buit

# Com funcionen els ponts en ménsula

Belén Ferrer

Departament d'Enginyeria Civil · Universitat d'Alacant

**Heu provat mai** de mantenir el braç estirat horitzontalment durant diversos minuts carregant un llibre? Al principi sembla fàcil, però aviat comences a sentir com el teu múscle i la teua esquena fan un esforç titànic per a evitar que el llibre caiga a terra. Sense saber-ho, acabes d'experimentar en el teu propi cos el principi físic que sosté a algunes de les estructures més colossals i sorprenents del planeta: els ponts en ménsula (o ponts *cantilever*).

A diferència dels ponts penjants, que semblen surar sostinguts per cables invisibles des de la distància, o els ponts d'arc, que transmeten el seu pes cap als extrems recolzant-se en el sòl, els ponts en ménsula desafien la gravetat projectant-se cap al buit. Són els equilibristes de l'enginyeria civil.

En aquest text ens endinsarem en els secrets d'aquestes megaestructures: com funcionen, per què no cauen i com es va provar experimentalment el seu funcionament.

Per a entendre un pont en ménsula, primer hem de definir què és una ménsula (o volada). En arquitectura i enginyeria, una ménsula és qualsevol biga o element estructural que sobresurt d'una paret o d'un pilar i que està recolzat en un únic extrem. L'exemple més quotidià és un trampolí de piscina. Un extrem està fermament ancorat al sòl de formigó; l'altre extrem vola lliure sobre l'aigua. Quan et poses en la punta del trampolí per a saltar, tot el teu pes intenta doblegar la taula cap avall.

Per què no es trenca ni es bolca? Perquè l'ancoratge de l'extrem terrestre exerceix unes forces que l'equilibren: una força igual i oposada al pes del saltador ( $P$ ) i un moment flector ( $M$ ) que evita que la taula gire. Amb tot i això, la taula estarà sotmesa a unes tensions internes que, depenent del material i del valor de les forces, faran trencar la taula o no i que aconseguirien el seu valor màxim prop del suport. Aquest suport ha de tenir un ancoratge al terreny prou resistent com per a resistir aquesta força vertical que tendeix a arrencar la taula del seu ancoratge (Fig. 1).

Les tensions internes fan que, en una biga en volada, les fibres superiors sempre estan sotmeses a tracció (s'estiren), mentre que les inferiors sofreixen compressió (s'aixafen). Això és exactament el contrari del que ocorre en una biga recolzada en tots dos extrems (com un pont de troncs tradicional), on l'esforç de tracció ocorre a la part de baix i la compressió a la de dalt.

De qualsevol manera, construir un sol voladís que travessés un riu ample seria inviable; la tensió en el punt de suport seria descomunal. Per això, els enginyers recorren a una genialitat del disseny: el pont de ménsula equilibrada.

Imagina un puja i baixa (balancí) en un parc infantil. Si col·loques dos xiquets d'identíc pes a banda i banda, el balancí es queda perfectament horitzontal i en equilibri sobre el seu eix central, que no estaria sotmés més al fet que tensions de compressió. En un pont, aquest eix central és una gran pila o pilar de formigó plantat en el llit del riu. Des d'aquest pilar, els enginyers construeixen dos braços idèntics que s'estenen en direccions oposades al mateix temps. En construir-se de manera simètrica, el pes d'un braç contraresta exactament el pes de l'altre de manera que no hi ha perill de trencament del pilar central per un desequilibri cap a algun dels costats.

En realitat, els trams a cobrir són tan grans, que amb un sol pilar i dues mènules tampoc seriem capaces de creuar des d'una riba a l'altra del riu. Això se soluciona replicant el sistema diverses vegades. Però llavors, si dues mènules s'estenen des de pilars oposats i es troben en el centre, com s'uneixen? Aquí ve el truc mestre. En molts ponts en ménsula, els dos braços no es toquen directament. En el seu lloc, deixen un espai en el centre que es cobreix amb una tercera estructura més petita i lleugera anomenada tram suspés. Aquest tram central simplement es "recolza" en els extrems de les dues mènules (Fig. 2). D'aquesta manera, el pont pot expandir-se i contreure's amb els canvis de temperatura sense acumular tensions internes que podrien

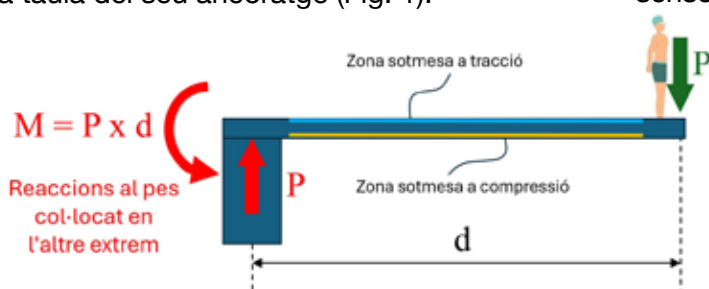


Fig. 1. Forces (verda), reaccions (vermell) i tensions (línies blava i taronja) al que es veu sotmés un trampolí, com a exemple de biga en ménsula.

trencar el material. Els extrems del pont hauran d'estar molt ben ancorats al terreny per a evitar les tensions internes en el pilar donades pel desequilibri de forces que provocaria tenir este extrem lliure mentre que en l'altre extrem se suporta el pes del tram suspès.

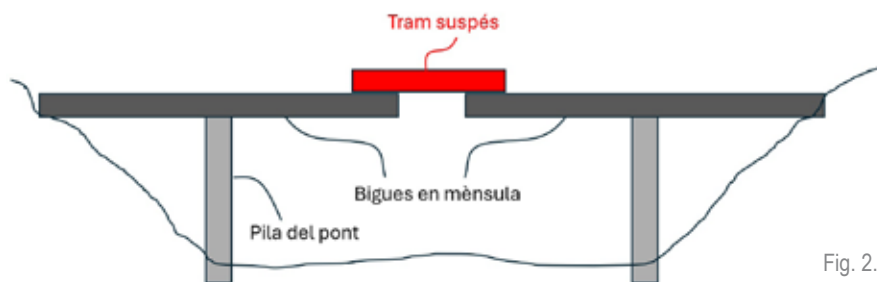


Fig. 2. Esquema simplificat d'un pont en mènsula.

Relacionat amb el funcionament d'aquesta mena de ponts, hi ha una història molt curiosa que va donar lloc a un experiment i una fotografia per a la posteritat.

A la fi del segle XIX, els enginyers britànics es van encarar a un repte colossal: creuar l'estuari de Forth a Escòcia per a donar pas a la línia ferroviària. Després del tràgic enfonsament del pont de Tay l'any 1879 (un pont de bigues tradicional que es va ensorrar per culpa del vent), el públic desconfiava profundament de les noves construccions.

Per tal de convèncer el Parlament i a l'opinió pública que el nou disseny en mènsula proposat era absolutament segur, l'enginyer **Sir Benjamin Baker** va idear una de les demostracions pràctiques més famoses de la història de la ciència en 1887.

Va reunir tres homes per recrear el pont amb els seus cossos:

1. Dos d'ells es van asseure en cadires, estenent els seus braços cap a l'exterior. Cadascun sostenia dos bats de beisbol que es recolzaven en la cadira en la qual s'asseien (els bats faran d'elements a compressió). A més, de la part alta de cadascun dels bats que estan en els extrems exteriors es va penjar una pila de maons (els ancoratges de terra) per tal d'evitar que els cossos dels homes giraren cap a la part central del pont.

2. Un tercer home (el japonès **Kaichi Watanabe**, un jove enginyer que estudiava a la Gran Bretanya) es va asseure en una petita taula penjada just en l'espai entre els braços estesos dels altres dos.

El pes de Watanabe en el centre era suportat per la tensió (tracció) als braços dels homes de les cadires i la compressió en els bats de beisbol que baixaven cap als seients (Fig. 3). L'estructura humana no es va moure ni un mil·límetre. La demostració va ser un èxit rotund i va donar llum verda a la construcció del majestuós Pont de Forth, que avui segueix en peus i és Patrimoni de la Humanitat (Fig. 4).

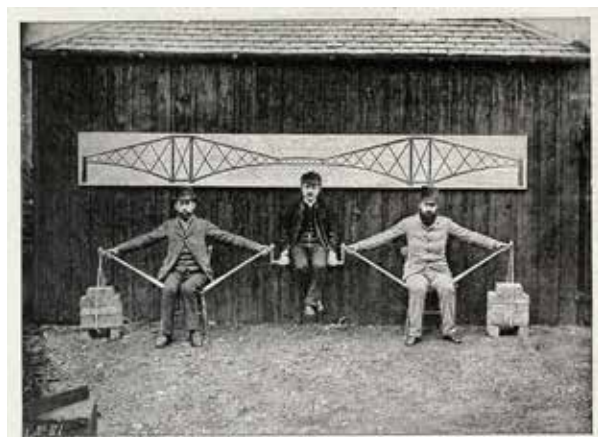


Fig. 3. Famosa fotografia il·lustrant el funcionament d'un pont en mènsula i amb persones actuant com a part de l'estructura. Imatge tretada de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cantilever\\_bridge\\_human\\_model.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cantilever_bridge_human_model.jpg)



Fig. 4. Pont ferroviari de Forth. Per Andrew Bell, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=37962>

La pròxima vegada que travesses un pont, fixa't bé en la seua estructura. Darrere del soroll dels motors i del vent, hi ha una coreografia silenciosa de forces invisibles que treballen sense descans. Els ponts en mènsula són el recordatori perfecte que, en la ciència i en la vida, l'equilibri no consisteix a evitar les tensions o les pressions, sinó a saber distribuir-les de manera intel·ligent per mantenir-nos fermes sobre l'abisme.