

4 Estructuras

SITUACIÓN DE APRENDIZAJE



Estructuras y sostenibilidad

El reto del nuevo milenio para el ámbito de la arquitectura y de la construcción es la sostenibilidad, aplicada tanto al proceso constructivo y los materiales empleados como a reducir la dependencia energética de los edificios del futuro.

La construcción (y concretamente las estructuras de hormigón) es una de las industrias más contaminantes del mundo debido al empleo del cemento.

Si hacemos un simil en el cual la industria del cemento fuera un país sería, con el 8 % del total, el tercer emisor más grande del mundo de CO_2 , detrás de China y Estados Unidos. Esto es debido a que su ingrediente principal es el clinker, material que se forma calcinando arcilla y piedra caliza a $1\ 400\ ^\circ\text{C}$, lo que requiere el empleo de combustibles fósiles e implica la liberación de carbono y la formación de CO_2 como residuo del proceso químico realizado.

La solución a este problema pasa por reducir las nuevas construcciones reutilizando las existentes, diseñar empleando tipologías estructurales más eficientes y utilizar nuevos materiales menos contaminantes, como la madera, o cementos con menos contenido en clinker, obtenidos a partir de residuos o, mejor aún, biocementos.

Pero, sobre todo, en nuestras manos está el diseño de estructuras eficaces, que cumplan su misión con el mínimo material posible.

- 1 ¿Por qué la industria de la construcción produce tanto CO_2 ?
- 2 ¿Qué porcentaje de las emisiones de CO_2 que se producen corresponden a la industria del cemento?
- 3 ¿Qué proceso es el que resulta más contaminante en ella?
- 4 ¿Cómo podemos paliar este problema? Debatirlo en clase.

3 Tipos de esfuerzos

2 Fuerzas, cargas y esfuerzos

1 ¿Qué es una estructura?



5 Evolución de las estructuras y sus materiales

4 Condiciones que debe cumplir una estructura

Análisis de objetos
Análisis tipológico de estructuras
Análisis funcional de estructuras

Procedimientos informáticos
Simulador de puentes

Procedimientos técnicos
Construcción de estructuras de papel y cartón

Consolidación y síntesis

Producto final

Construcción de estructuras eficaces

Os proponemos **diseñar** y **construir** un puente de barras trianguladas de papel de 60 cm de luz y que soporte un peso de 3 kg en el punto central del vano empleando un diseño eficiente y bello.

Tecnologías emergentes y sostenibilidad
Innovación en el mundo de la construcción

1 ¿Qué es una estructura?

¿Qué función crees que cumple el esqueleto de los animales vertebrados? ¿Y el chasis de un automóvil o el armazón de un barco? ¿Encuentras alguna similitud? ¿Por qué se fabrican vasos de plástico con estrías? ¿Qué función desempeña el caparazón de un cangrejo?



Todos los cuerpos y objetos poseen algún tipo de estructura. Esta proporciona sostén a los cuerpos y evita que se deformen en exceso bajo el efecto de las fuerzas que actúan sobre ellos.

A veces, la estructura es un elemento identificable dentro del propio cuerpo, como los huesos de los animales vertebrados, el armazón de un barco o las vigas y pilares de un edificio. En otras ocasiones, sin embargo, no es sencillo distinguirla, puesto que la totalidad del objeto conforma su estructura.

Una **estructura** es el conjunto de elementos de un cuerpo destinados a soportar las acciones externas para evitar que se rompa o se deforme en exceso.

1.1. Estructuras naturales y artificiales

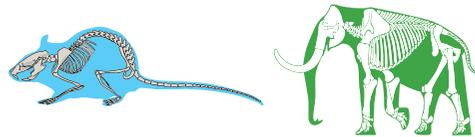
Las **estructuras naturales** son aquellas que se han formado sin intervención del ser humano. Están presentes en los seres vivos y en sus construcciones o son el resultado de procesos geológicos. Así, la concha de un molusco, el nido de un pájaro o una cueva son estructuras naturales.

Las **estructuras artificiales** son las elaboradas por los seres humanos. Las patas de una mesa, la carcasa de una cámara de fotos o los arcos de un puente son ejemplos de estructuras artificiales.

Cuanto mayor es el cuerpo, más importancia relativa tiene su estructura en su composición. En objetos de grandes dimensiones la estructura salta a la vista, como ocurre con la Torre Eiffel o con cualquier rascacielos, mientras que en los seres y objetos de pequeño tamaño la estructura es apenas perceptible.

Actividades

1 Observa las imágenes. Fíjate en el grosor relativo de los huesos de las patas. ¿Qué le pasaría al ratón si su tamaño se agrandase hasta tener las dimensiones del elefante?



2 Enumera cinco estructuras naturales y cinco artificiales.

3 Identifica la estructura de los siguientes objetos: un bolígrafo, un vaso de plástico, una cámara de fotos, un balancín y una bicicleta.



4 Busca la imagen de un puente romano y de uno colgante. Analiza: ¿qué partes de cada puente constituyen su estructura?

2 Fuerzas, cargas y esfuerzos

- ¿Qué pasaría si no tuviéramos esqueleto? ¿Por qué ocurriría?
- ¿Qué pasa si le das una patada a un balón? ¿Y si lo aprietas con las manos? ¿El efecto es el mismo si el balón está desinflado?

La razón por la que los cuerpos necesitan estructuras reside en las fuerzas: la de la gravedad, que origina el peso; la del viento, que empuja árboles y edificios; las presiones de los gases encerrados, las que desarrollan nuestros músculos o las originadas por efecto del calor.

Una **fuerza** es todo aquello capaz de **deformar** un cuerpo (efecto estático) o **alterar su estado de movimiento o reposo** (efecto dinámico).



Efecto estático.



Efecto dinámico.

2.1. Cargas

Las fuerzas que actúan sobre una determinada estructura se denominan **cargas** y pueden ser de dos tipos:

- **Cargas fijas o permanentes.** No varían a lo largo del tiempo. En el caso de un puente, por ejemplo, son el peso de la propia estructura o el de los elementos que forman parte de ella de modo permanente, como el asfalto o la barandilla.
- **Cargas variables.** A veces afectan al cuerpo y otras no. El peso de las personas y vehículos que atraviesan un puente en un momento determinado o el viento que lo empuja sirven para ilustrar este punto.

2.2. Esfuerzos

Imagina que una persona se tumba en una hamaca y, después, en un banco.

- ¿Se deforman estas estructuras de la misma manera? ¿Será distinta la carga en el banco si esa persona se sienta o si se tumba?
- ¿Le afectará de igual manera al banco?

Según el punto de aplicación de las fuerzas, su dirección y sentido, así como la geometría de las propias estructuras, las cargas producirán en ellas distintos tipos de **tensiones** que reciben la denominación de **esfuerzos**.

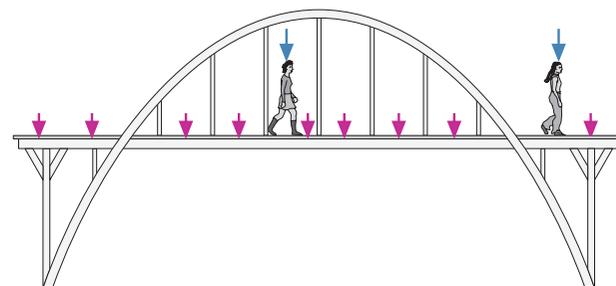
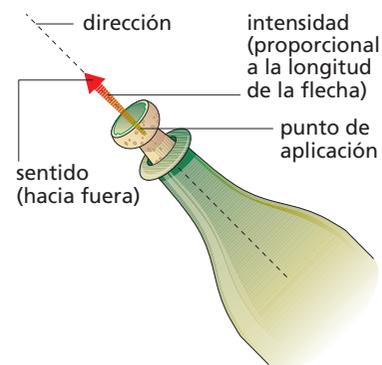
Un **esfuerzo** es, por tanto, la tensión interna que se manifiesta en un cuerpo sometido a la acción de una o varias fuerzas.

Actividades

- 5  Enumera tres cargas fijas y tres variables que actúen sobre el edificio en el que te encuentras.

Fuerzas

Para definir una fuerza, es preciso especificar su intensidad, su dirección, el sentido en el que actúa y su punto de aplicación.



Ejemplo de carga fija es el peso del tablero del puente, y de carga variable, el peso de la persona que lo atraviesa.

3 Tipos de esfuerzos

Observa las imágenes del margen. La nube está siendo sometida a la acción de fuerzas que actúan sobre ella de distinta manera. ¿Cómo crees que se deformará la estructura de la nube en cada caso?



La nube que observas en las fotografías se deforma fácilmente cuando se aplica una fuerza sobre ella porque es de un material deformable. Sin embargo, en una estructura de materiales más rígidos la deformación no es tan apreciable. Para saber a qué tipo de esfuerzo está sometida dicha estructura, hay que imaginar la deformación que se produciría si fuese de un material más moldeable.

Aplica distintas fuerzas sobre tus dedos: tira con una de tus manos del dedo índice de la otra, retuércelo o aprieta las palmas de tus manos una contra otra. Notarás en todos los casos una tensión que crece al aumentar la fuerza que ejerces. Sin embargo, el tipo de sensación (esfuerzo) es diferente en cada caso al haber aplicado fuerzas distintas y de varias maneras. Podemos deducir, por tanto, que las cargas producen distintos tipos de esfuerzos en los objetos sobre los que actúan.

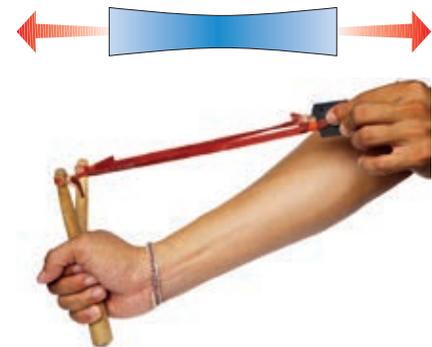
Estos esfuerzos se clasifican según la deformación que producen: tracción, compresión, torsión, flexión y cortante.

Tracción

Se produce cuando las fuerzas tienden a **estirar** el cuerpo sobre el que operan.

Estas fuerzas son opuestas y actúan en la misma dirección y sentido contrario, hacia el exterior del cuerpo.

Algunos objetos sometidos al esfuerzo de tracción son, por ejemplo, las gomas de un tirachinas, **los tirantes de un puente**, la cuerda de una persiana o la cadena de la que cuelga una lámpara.

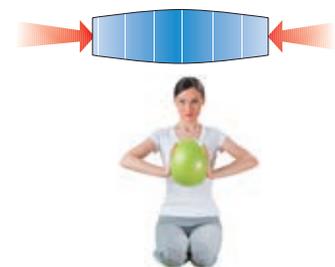


Compresión

Aparece cuando las fuerzas tratan de aplastar o **comprimir** un cuerpo.

Son fuerzas opuestas, enfrentadas y que operan hacia el interior del objeto.

Las patas de una mesa, los **pilares de un puente** o las piernas de una persona de pie soportan este tipo de esfuerzo.



Flexión

Aparece cuando las fuerzas intentan **doblar** el elemento sobre el que actúan.

Son fuerzas que no están enfrentadas. Actúan en sentido contrario y están bastante separadas la una de la otra.

La carga puede ser puntual o estar repartida a lo largo de todo el elemento, como en la fotografía.

El **dintel de una puerta**, las baldas de una estantería o la barra de un armario ropero son ejemplos de flexión.

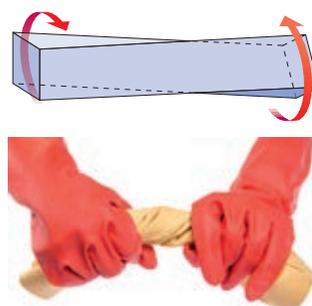


Torsión

En este caso, las fuerzas intentan **retorcer** el elemento sobre el que actúan.

Tratan de hacer girar el cuerpo y actúan en sentido contrario.

La torsión se manifiesta en un lápiz al sacarle punta, en una llave al girarla para abrir la puerta o en un destornillador al apretar un tornillo. También se observa en las **vigas perimetrales** de los edificios.

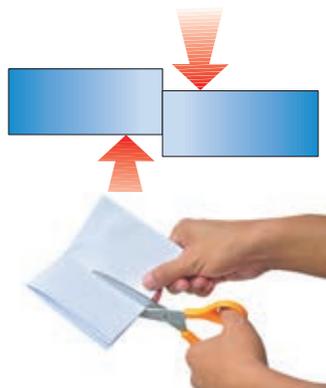


Cizalladura o cortante

Este esfuerzo trata de **seccionar** el objeto en un punto determinado.

Aparece cuando las fuerzas se aplican muy juntas, sin llegar a estar enfrentadas, una hacia arriba y otra hacia abajo, intentando deslizar una parte del objeto sobre la otra.

Este tipo de esfuerzo se produce, por ejemplo, cuando se corta una chapa metálica con una guillotina o en la alcayata clavada en la pared de la que cuelga un cuadro, así como en las **uniones de pilares y vigas**.

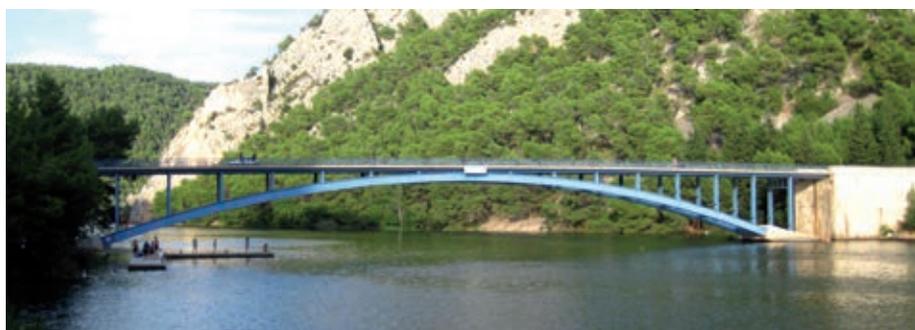


Te interesa saber...

Los materiales presentan una resistencia distinta a cada tipo de esfuerzo, por eso es muy importante identificar los esfuerzos que aparecen en una estructura al cargarla; aunque hay programas que calculan el esfuerzo y las deformaciones de las estructuras, debemos ser capaces de intuirlos para contrastar los resultados de esos cálculos.

Actividades

- 6 Observa las imágenes que aparecen en el margen de la página anterior y responde:
 - a) ¿Cómo son las fuerzas que actúan sobre la nube en cada caso?
 - b) ¿Qué deformación producen? Relaciona cada imagen con el tipo de esfuerzo que le corresponde.
- 7 Observa la imagen del margen que representa un columpio infantil, trata de imaginar el recorrido de la carga de un niño al columpiarse a través de sus distintos elementos e identifica a qué esfuerzo estará sometido cada uno de ellos.
- 8 ¿Podrías romper un alambre estirándolo? ¿Y retorciéndolo? Justifica tu respuesta.
- 9 Elabora una tabla con cada tipo de esfuerzo y el esquema de las fuerzas que lo producen. Complétala con dos ejemplos distintos de los enumerados en el texto para cada tipo de esfuerzo.
- 10 Analiza los esfuerzos que aparecen en los distintos elementos del puente de la imagen. Para ello, imagina una carga en su centro y visualiza cómo se deformaría cada parte.
- 11 ¿A qué tipo de esfuerzo se verá sometido principalmente el puente que debes diseñar en el proyecto, de esta unidad, al cargarlo?



4 Condiciones que debe cumplir una estructura

Hay tres condiciones básicas que una estructura debe cumplir para funcionar adecuadamente:

1. **Estabilidad.** Ha de mantenerse erguida y no volcar. Para ello, es necesario que su **centro de gravedad** esté centrado sobre su base. Cuanto más centrado y cercano al suelo se encuentre, más estable será la estructura.
2. **Resistencia.** Tiene que resistir las tensiones a las que esté sometida sin romperse. La resistencia de una estructura depende de su forma y del material con el que está construida.
3. **Rigidez o deformación controlada.** Aunque todos los cuerpos se deforman levemente al aplicarles una fuerza, esta deformación no debe impedirles cumplir su función.

Además de las tres condiciones básicas de toda estructura, es preciso tener en cuenta su viabilidad económica y adecuación estética.

4.1. ¿Cómo puede dotarse de estabilidad, resistencia y rigidez a una estructura?

Estabilidad

Para conseguir que una estructura sea estable, podemos recurrir a:



1. **Aumentar** el tamaño de la base.



2. **Empotrar** la parte inferior en el suelo y emplear una cimentación especial.



3. **Centrar** el peso del cuerpo en su parte más baja, incluso añadiendo peso de manera artificial.

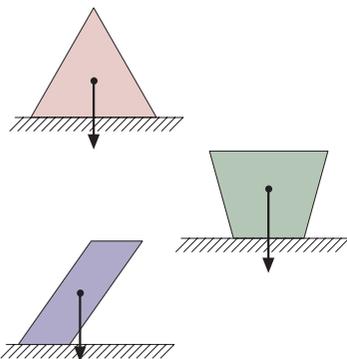


4. **Atirantar** la estructura para evitar que vuelque (con tirantes se aumenta el radio de la base).

Resistencia

Depende del material con el que se construya la estructura, de la cantidad que se emplee, de la forma que tenga cada parte y de su adecuación al esfuerzo al que esté sometida.

Todos los materiales poseen una **tensión de rotura** para cada tipo de esfuerzo. Esta tensión es la máxima **fuerza por unidad de superficie que pueden aguantar** sin romperse. El orden de estos materiales en función de su mayor o menor resistencia es: acero, piedra, hormigón, madera, plástico, hilo, cartón y papel.



Actividades

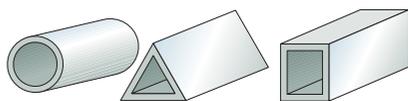
- 12 Observa las ilustraciones del margen y responde: ¿cuál de estos tres cuerpos te parece más estable? ¿Cuál menos? ¿Por qué? ¿Cuál de estas formas fue utilizada como estructura antes que las otras dos? ¿Por qué?
- 13 ¿Cómo afecta cada condición al diseño de tu puente? Propón al menos dos soluciones para asegurar su estabilidad, resistencia y rigidez.

Rigidez

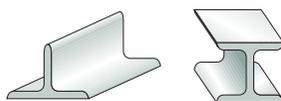
Para evitar deformaciones excesivas y proporcionar **rigidez** a las estructuras, es preciso tener en cuenta tres aspectos fundamentales: su forma, sus uniones y su triangulación.

La **forma** de los elementos se decide en función del esfuerzo que soportan:

- **Compresión.** Conviene emplear **elementos gruesos** y, con la misma cantidad de material, preferiblemente **huecos** para evitar el pandeo.
- **Tracción.** La rigidez y la resistencia se consiguen simplemente incrementando la cantidad de material (sección) del elemento.
- **Flexión.** Hay que aumentar el canto del elemento y acumular el material en las partes superior e inferior.



Los **perfiles huecos** se adaptan bien al esfuerzo de compresión.



Los **perfiles en T y en I** son óptimos para resistir los esfuerzos de flexión.

Para conseguir **uniones rígidas** entre los elementos de una estructura de hormigón armado, se **entrelaza la armadura** de acero. En el caso de una estructura metálica se utilizan elementos intermedios, como las **cartelas**. Estas aumentan la superficie de soldadura y, por tanto, de unión.

La **triangulación** evita deformaciones en las estructuras de barras. Es posible emplearla directamente o añadir **arriostramientos** posteriores mediante cables en forma de cruz.

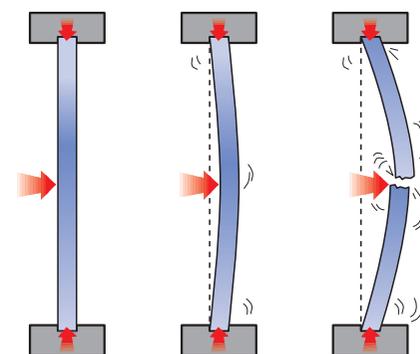


Perfiles metálicos.

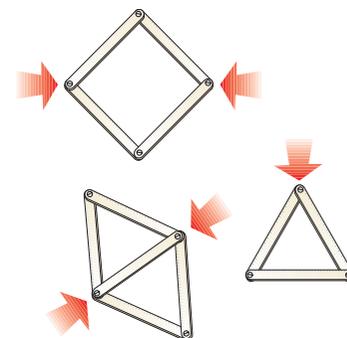


Arriostramiento en cruz de San Andrés.

Pandeo



Para evitar el pandeo, hay que procurar que los elementos comprimidos no sean demasiado delgados.



El triángulo es la única figura geométrica indeformable.

Actividades

- 14 ¿Por qué es peligroso el pandeo en una estructura?
- 15 Observa las imágenes de la página y responde:
 - a) ¿Cómo se llaman los elementos de refuerzo en las uniones metálicas? ¿Y el arriostramiento con dos cables cruzados?
 - b) En la estructura formada por cuatro palitos de helado, ¿qué ocurre al presionar dos vértices opuestos? ¿Y al añadirle un palito en diagonal? ¿Por qué?
- 16 Observa las estructuras de los puentes de las fotografías del margen. ¿Cómo han resuelto la cuestión de la estabilidad, la resistencia y la rigidez?
- 17 Revisa el diseño de tu puente del proyecto de esta unidad y haz un croquis de tu maqueta a escala 1:2 o 1:3.



5 Evolución de las estructuras y sus materiales

Piensa en los distintos tipos de puentes que conoces y trata de ordenarlos cronológicamente del más antiguo al más moderno: ¿cómo han variado los materiales de construcción? ¿Y su forma y longitud? ¿Crees que ahora son más ligeros?



Las estructuras artificiales han ido evolucionando a lo largo del tiempo haciéndose cada vez más ligeras y eficaces. Esta evolución está marcada por el descubrimiento de diferentes materiales (piedra, madera, acero, hormigón y materiales compuestos), sus técnicas de construcción asociadas y el avance en los cálculos estructurales.



Actividades

- 18 ■ Establece la diferencia entre pilar, columna y pilastra. Para ello, puedes buscar imágenes de estos elementos o su definición en Internet.
- 19 ■ Indica a qué clase de estructura crees que corresponde cada tipo de puente representado en las imágenes de esta página.

5.1. Estructuras masivas y adinteladas

En un primer momento, las estructuras se confeccionaban concentrando gran cantidad de material, sin dejar apenas huecos, apilando bloques de **piedra** o **arcilla** unos encima de otros (como en las pirámides) o excavando en la roca.

Para abrir ventanas y pasos libres, se utilizaban **dinteles** de piedra o madera de poca longitud. Son ejemplos de **estructuras masivas** las pirámides mayas o egipcias, y de **estructuras adinteladas** los templos griegos de piedra y madera.

Elementos típicos de estas estructuras:

- Elementos verticales que trabajan a compresión: muros de carga, contrafuertes, pilares, columnas y pilastras.
- Elementos horizontales para cubrir espacios entre los anteriores y sometidos a flexión: dinteles, vigas o jácenas y falsas bóvedas.



5.2. Estructuras abovedadas

El descubrimiento del **arco** y la **bóveda** permitió cubrir espacios mayores y agrandar las luces¹ en las estructuras construidas con **piedra**.

Las **estructuras abovedadas** emplean piedras cortadas y colocadas de forma que solo aparezcan en ellas esfuerzos de compresión.

La piedra ofrece mucha resistencia a este tipo de esfuerzo.

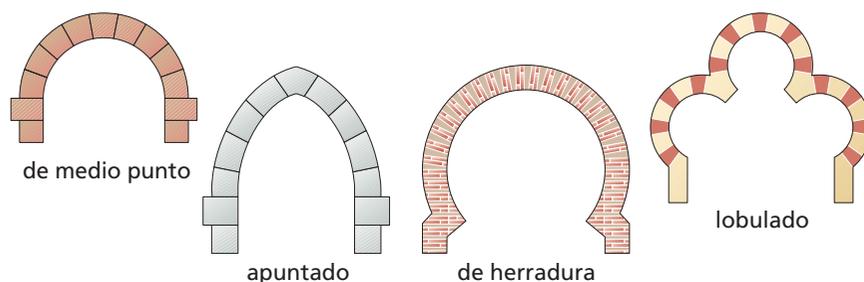


Arco de herradura.



Bóveda de crucería.

Los **arcos** se construyen mediante una estructura auxiliar llamada **cimbra**, que sustenta las piezas que lo forman (**dovelas**) durante el proceso. La colocación de la pieza superior, que se denomina **clave**, hace que el arco se sostenga por sí mismo. Hay varios tipos de arcos:



Las **bóvedas** se construyen a partir de una sucesión continua de arcos (bóveda de cañón) o entrecruzando varios (bóveda de crucería).

Los romanos emplearon el arco de medio punto en la construcción de puentes y acueductos, y la bóveda de cañón y la cúpula semiesférica para cubrir basílicas y panteones. Posteriormente, en la Edad Media se utilizaron **arcos apuntados** y **bóvedas de crucería** de distintos estilos en la construcción de mezquitas y catedrales.

Actividades

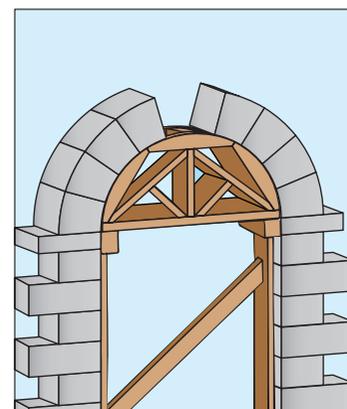
20 ■ Busca información y dibuja un arco carpanel, uno conopial y uno parabólico. ¿Cuál crees que funcionará mejor?

21 ■ A las estructuras de arcos y bóvedas pertenecen otros elementos de apoyo, como los pináculos, contrafuertes y arbotantes. Investiga y explica para qué sirve cada uno de ellos y realiza un dibujo explicativo de la circulación de las cargas por su interior.

¹**Luz:** espacio libre entre los apoyos de una estructura.

Actividades

22 ■ ¿Sabrías identificar la cimbra en la construcción del arco de bóveda que observas en la imagen?



23 ■ ¿Qué tipos de arcos puedes apreciar en la fachada del edificio de la siguiente imagen?



5.3. Estructuras trianguladas

Están formadas por barras, normalmente **metálicas** o de **madera**. La **triangulación** hace que la estructura sea indeformable, lo cual es una buena solución para la construcción de puentes (**vigas trianguladas**), cubiertas de grandes **luces (cerchas)** y estructuras verticales, como torres y andamios.



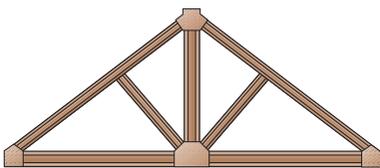
El descubrimiento de la **fundición** y el **acero** y su aplicación a este tipo de estructuras permitieron realizar grandes obras arquitectónicas y de ingeniería civil, como puentes para el ferrocarril o la Torre Eiffel.

5.4. Estructuras colgantes

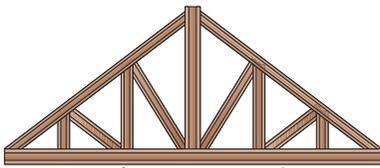
Para su construcción se utilizan cables de **acero**, de los que cuelga la estructura y que reciben el nombre de **tirantes**. Cuando se pueden regular, estirándolos más o menos, se denominan **tensores**. Los cables solo resisten esfuerzos de tracción, pero tienen la ventaja de poder adaptar su forma a las cargas que reciben en cada momento y de ser extremadamente ligeros.

Los tirantes se emplean para sujetar puentes, carpas, antenas y torres.

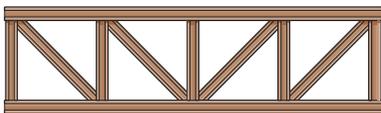
Existe una gran variedad de estructuras colgantes que permiten cubrir grandes espacios, como estadios o pabellones, sin utilizar pilares intermedios.



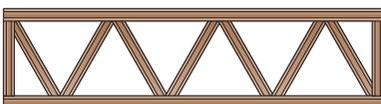
Cuchillo español



Armadura norteamericana



Viga Pratt



Viga Warren



Puente colgante de catenaria.



Puente colgante atirantado.

Actividades

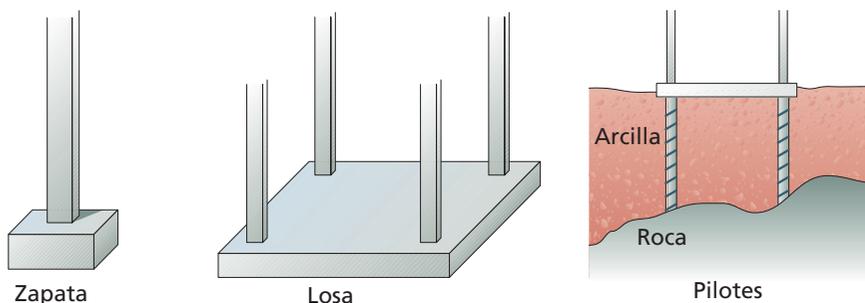
- 24 ■ Observa los puentes y explica cómo se transmiten las cargas a través de los distintos elementos estructurales que pueden verse en las fotografías. Para sostener un tramo de la misma longitud, ¿cuál de los dos tipos de puente requerirá tirantes más gruesos? ¿Por qué?
- 25 ■ Observa las estructuras trianguladas del margen. ¿Cuál de ellas es más adecuada para un puente? ¿Y para un tejado? Justifica tu respuesta.

5.5. Estructuras de hormigón armado

El **hormigón armado** supuso un gran adelanto en el campo de la construcción por su capacidad para adoptar cualquier forma. Al tratarse de una **piedra artificial**, presenta una buena resistencia a la compresión, mientras que las **barras de acero** que conforman su armadura le permiten soportar esfuerzos de tracción.

Las **estructuras entramadas** de hormigón presentan estos elementos:

- **Forjado.** Elemento horizontal que transmite las cargas de una planta del edificio a los pilares. Está formado por:
 - **Vigas.** Elementos horizontales entre pilares, sometidas a flexión.
 - **Viguetas.** Llevan el peso del forjado hasta las vigas.
 - **Bovedillas.** Cubren el espacio entre las viguetas. No soportan esfuerzos.
 - **Capa superior de hormigón armado.** Unifica todo, está comprimida.
- **Pilares.** Son los elementos verticales que reciben la carga del forjado y la transmiten hasta el suelo. Están **comprimidos** entre el forjado y la cimentación.
- **Cimentación.** Los pilares se apoyan en el terreno a través de la cimentación; un elemento intermedio que aumenta la superficie de apoyo a fin de repartir el peso del edificio y sus cargas. Existen diferentes tipos de cimentación:
 - **Zapatas.** Son prismas rectangulares de hormigón situados bajo los pilares.
 - **Losa de cimentación.** Este elemento ocupa toda la parte baja del edificio. Se emplea en terrenos blandos y está flexocomprimida².
 - **Pilotes.** Se trata de columnas que se emplean en suelos inestables o arcillosos con la finalidad de alcanzar un terreno más firme sobre el que apoyarse.

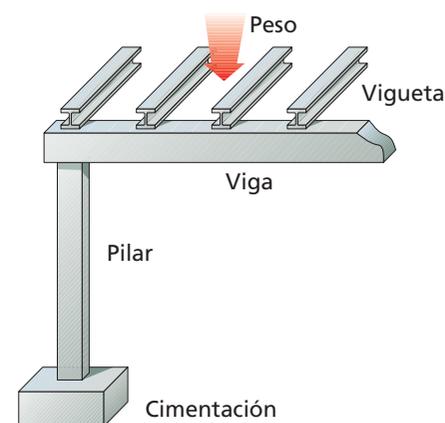
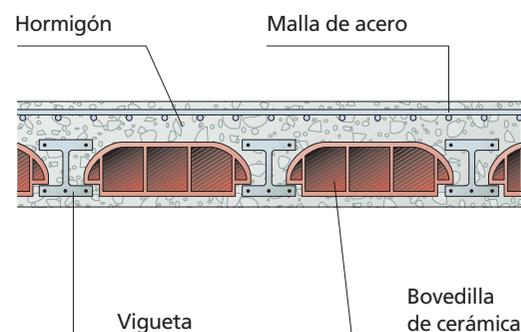


Al ir dejando esperas³ de metal entre unos elementos y otros, el resultado es una estructura continua y sólida, perfectamente entramada.

Además de estas estructuras entramadas, el hormigón armado se puede emplear para construir estructuras de arcos gigantes, vigas compactas y pilas-tras de puentes, láminas y bóvedas en edificios singulares.

Actividades

- 26 ■ Identifica en la imagen del margen los distintos elementos de estructuras entramadas e imagina el recorrido que haría el peso de tu cuerpo hasta llegar al suelo.



²**Flexocompresión:** esfuerzo combinado donde aparece flexión y compresión al mismo tiempo.

³**Esperas:** elementos metálicos que asoman al fraguar un hormigonado para enlazarlo con el siguiente.



5.6. Estructuras laminares

Están formadas por láminas finas de **metal**, **plástico** o **materiales compuestos**, como el hormigón armado. Deben su resistencia a la curvatura o pliegues que presentan.



En esta fotografía del chasis de un vehículo puedes apreciar que combina curvatura con pliegues para aumentar su rigidez y resistencia.



Oceanográfico de Félix Candela.



- La curvatura permite a las láminas resistir esfuerzos de tracción y compresión en su superficie.
- Los pliegues y nervaduras otorgan rigidez puntual a las zonas donde se sitúan. Así, por ejemplo, el reborde de un vaso de plástico evita que este se deforme cuando bebemos, y las estrías que presenta en la zona de agarre lo hacen más resistente a la compresión en esa zona.

5.7. Estructuras neumáticas

Las estructuras neumáticas son fácilmente **desmontables** y muy **ligeras**, de ahí que se empleen en construcciones que deben ser transportadas e instaladas de forma rápida y sencilla, como los hospitales de campaña o las atracciones de feria.

El aire que contienen está comprimido, mientras que la envoltura **plástica** se encuentra traccionada. La combinación de ambos esfuerzos permite a estas estructuras mantenerse erguidas.



Actividades

- 27 ■ Muchas estructuras están formadas por la combinación de varias de las categorías que hemos estudiado. Analiza los viaductos de las fotografías e indica qué tipos de estructuras y materiales incluyen. ¿Cuál es la relación entre la forma y el material de cada elemento y el esfuerzo que soporta?



Viaducto de Madrid.



Viaducto del Hacho, en Granada.

5.8. Estructuras geodésicas

Son estructuras tridimensionales de barras que combinan las propiedades de las bóvedas con las de las estructuras trianguladas. De esta forma pueden crear curvas y cubrir grandes luces.



Cúpula geodésica del Oceanográfico del Parque de las Ciencias de Valencia.



Detalle del nudo de una estructura geodésica.

Están constituidas por barras lineales (de **metal**, **plástico** o **madera**) y nudos entre ellas. Se basan en el empleo del triángulo y su equivalente tridimensional, el tetraedro, ambos indeformables.

Actividades

- 28** ■ Relaciona en tu cuaderno los tipos de elementos con la modalidad de estructura a la que pertenecen. Haz un glosario que contenga sus nombres, un dibujo descriptivo y el esfuerzo principal al que están sometidos.

Muros de carga y contención, dinteles, arcos, barras montantes, tirantes, forjado, láminas, tubos, barras, pilares, tensores, viga, zapata, falsas bóvedas, nudos, aire comprimido, pliegues, losa, nervaduras, arbotantes, pilotes, pilastras, pilones, vigueta, contrafuerte y columna.

- 29** ■ Identifica el tipo de estructura que presenta cada uno de estos objetos:



- 30** ■ Elabora una tabla con el dibujo de las distintas clases de puente según su modalidad estructural. ¿A cuál pertenece el tuyo del proyecto?
- 31** ■ En grupo poned en común vuestros diseños para el proyecto de esta unidad y acordad uno definitivo para realizar su despiece.
- 32** ■ Reflexionad sobre los materiales que podríais utilizar en la construcción del puente del proyecto: hilo, barra de papel, cartón, etc. ¿Cómo y con qué criterio utilizarías estos materiales para la construcción de los distintos elementos de la maqueta?

Recuerda

Los diferentes tipos de estructuras pueden clasificarse en las siguientes modalidades: masivas, adinteladas, abovedadas, trianguladas, colgantes, entramadas, laminadas, neumáticas y geodésicas.

Análisis tipológico de estructuras

En esta modalidad de análisis se determinará qué tipo de estructura se ha empleado en una construcción y qué elementos pueden reconocerse en ella.

A continuación, se realizará el análisis de las estructuras mostradas en dos fotografías distintas.

- a) En esta primera imagen se observan dos estructuras diferentes utilizadas para salvar una misma vaguada o desnivel.



- En primer plano se encuentra un puente antiguo construido en piedra y ladrillo que, a pesar de presentar un arco de medio punto, responde al tipo de estructura masiva.

En la construcción de estas estructuras se emplean muros de piedra y ladrillo en el exterior y relleno de otros materiales en el interior. En este caso, el arco es necesario para permitir el paso del agua.

- En la parte superior de la imagen se aprecia un viaducto moderno construido con pilares de hormigón prefabricado y vigas trianguladas metálicas, que sostienen un tablero también de hormigón.

Las vigas trianguladas aligeran la estructura y salvan luces mayores, lo que disminuye el número de pilares o apoyos necesarios. Estos elementos se suelen utilizar cuando los puentes son de gran altura ya que, el uso excesivo de pilares encarecería el presupuesto del proyecto.

- b) El siguiente análisis corresponde a la imagen inferior. En ella cabe distinguir dos tipos de estructuras:

- En primer plano, puede verse una estructura atirantada en la que se aprecian unos soportes verticales metálicos, dos tensores y una lona traccionada a modo de cubierta. Los tensores y la lona resisten esfuerzos de tracción, y los pilares, por su parte, de compresión; lo mismo ocurre en los puentes colgantes.
- Al fondo se puede reconocer una estructura laminar formada por ocho láminas curvadas con forma parabólica. Este tipo de curvatura confiere gran resistencia a las láminas, que pueden tener muy poco espesor y soportar su propio peso. Estas estructuras soportan esfuerzos de compresión.



Actividades

- 1  Observa la imagen:

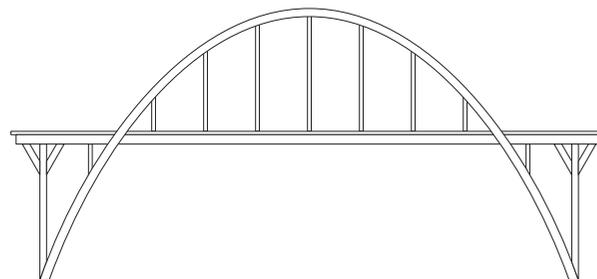


- a) ¿Qué dos tipos de estructuras se aprecian?
b) ¿Por qué crees que se han empleado dos estructuras de distinto tipo en la misma construcción?
c) ¿Qué elementos se identifican en cada una?
d) ¿Cómo se denominan las piezas que forman el arco? ¿Y la pieza central del mismo?

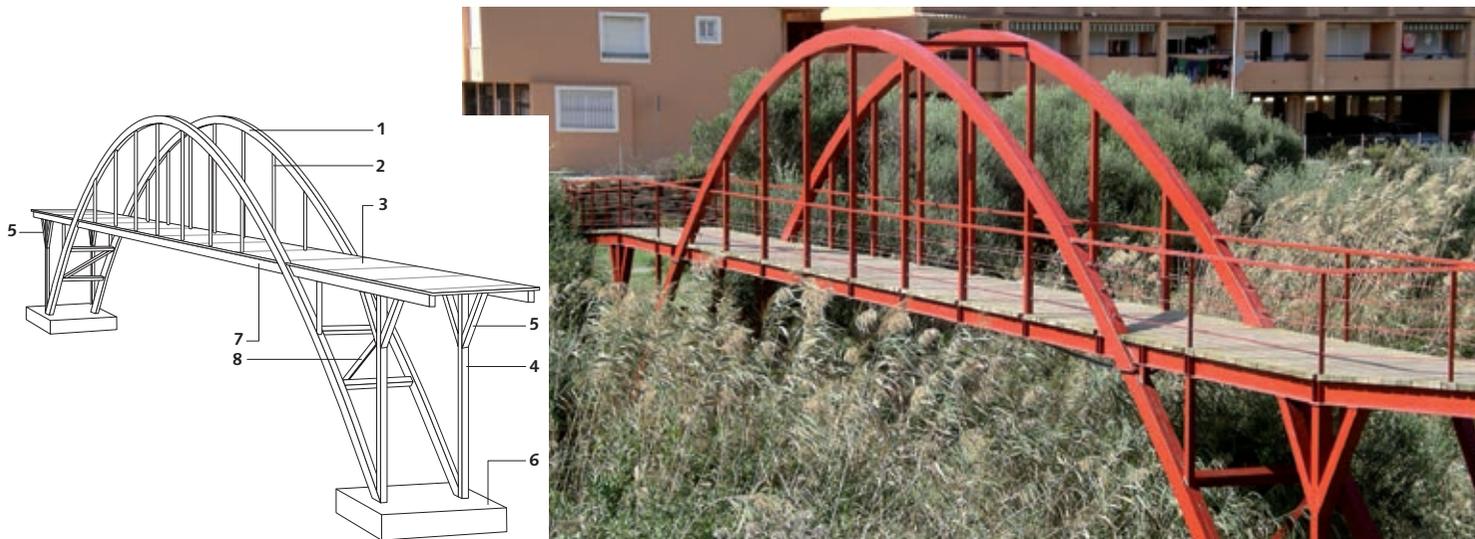
Análisis funcional de estructuras

En este tipo de análisis estudiaremos cómo funciona la estructura y sus elementos según las cargas que deban soportar.

Para analizar el funcionamiento de una estructura, hay que imaginar cómo se trasladan las cargas desde el punto en el que se aplican hasta el terreno donde se apoyan y qué esfuerzos provocan a su paso en el interior de cada elemento estructural.



Alzado del puente.



Actividades

- 2 ■ ¿Qué función crees que desempeña este puente? ¿Qué piensas que puede haber debajo de él? ¿Es peatonal o transitable para los vehículos?
- 3 ■ Identifica y nombra los elementos del puente numerados en el dibujo, indicando de qué material está hecho cada uno de ellos.
- 4 ■ Dibuja el alzado del puente y explica cómo se deformaría bajo el efecto de las cargas de su propio peso y las de las personas que caminan sobre él.
- 5 ■ Explica qué tipo de esfuerzo aparecería en cada elemento del puente bajo el efecto de las cargas mencionadas en la actividad anterior.
- 6 ■ ¿Se podrían intercambiar los materiales con los que están fabricados el tablero y el arco? Explica cuáles utilizarías.
- 7 ■ ¿Cómo se pueden unir a la viga los tirantes y el tablero? Diseña un tipo de unión para cada caso.
- 8 ■ Copia la siguiente tabla en tu cuaderno y complétala:

Elemento	Forma	Material	Función	Esfuerzo
Arco	Parabólica	...	Sostener el puente	Compresión
Tirantes	...	...	...	...
Tablas	Prisma alargado	...	...	...
Pilar	...	Acero	...	...
Escuadra	...	...	Disminuir la luz de la viga	...
Zapata	Prismática	...	...	...
Viga inferior	...	...	...	...
Arriostramiento	...	Acero	Evitar la deformación del acero	...

Simulador de puentes

El trabajo con simuladores permite ensayar de forma virtual el comportamiento que van a tener las estructuras y perfeccionar su diseño antes de construirlas. En esta actividad emplearemos el programa **Bridge Designer**, que puede descargarse en: <https://bridgedesigner.org/>.

La finalidad de estos simuladores es obtener la mejor estructura posible, es decir, aquella que cumpla las condiciones exigidas con un menor coste económico.



Práctica

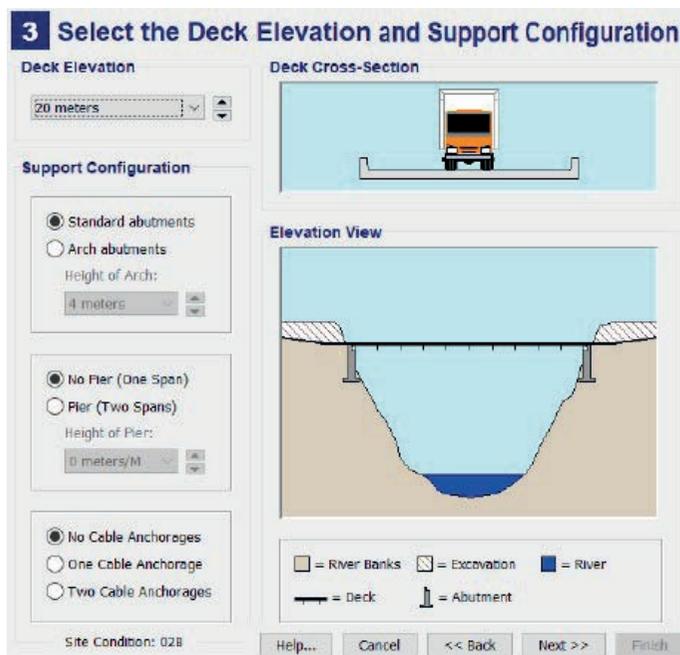
Diseño de un puente

Primera fase: condiciones de uso

Pantalla 1. Describe las características que ha de cumplir el puente. Léelas y pulsa **Next**.

Pantalla 2. En relación con la participación en el concurso, marca **No** y haz clic en **Next**.

Pantalla 3. Decide la elevación del tablero del puente sobre el terreno, la posibilidad de arco inferior y los anclajes según tu puente. Sería interesante que toda la clase partiese de las mismas condiciones iniciales.



Pantalla 4. Deja en estándar la calidad del hormigón, y en carga aplicada marca *permit*, que es la que más se parece a la del proyecto.

Pantalla 5. Permite elegir una cercha prediseñada, prueba los seis tipos para visualizarlos y marcar luego **none** para hacer un diseño libre.

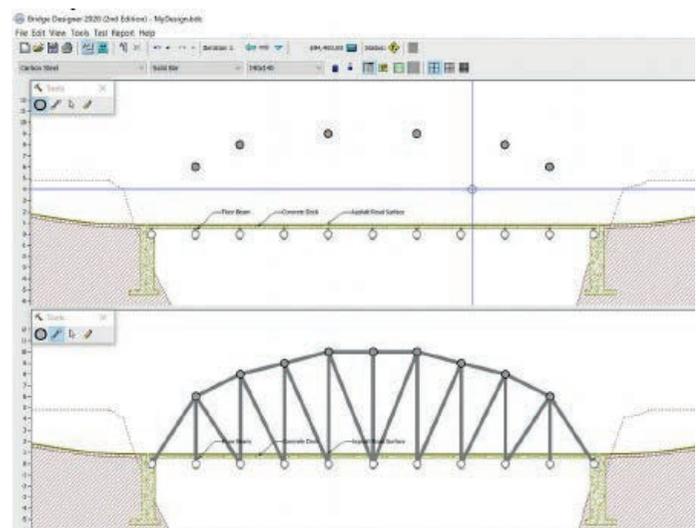
Pantalla 6. Puedes dar nombre a tu proyecto si lo deseas.

Pantalla 7. El simulador te explica el proceso de diseño que vas a seguir:

1. Pulsa *finish* para acceder a la pantalla de dibujo.
2. Dibuja los nodos o uniones de la estructura.
3. Traza las barras entre los nodos.
4. Realiza la prueba de carga para comprobar si tu diseño es estable y resistente (*Test/Load test*).
5. Añade o refuerza elementos según el test.
6. Optimiza el resultado reduciendo las barras para abaratar su coste.

Segunda fase: diseño del puente

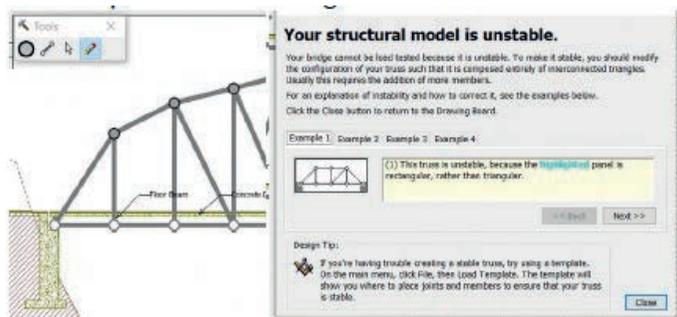
Dibuja primero todos los nodos de la estructura, pues los necesitas para trazar las barras que vas a situar entre ellos. Incorpora ahora las barras entre los nodos.



A medida que dibujas los elementos, podrás ir viendo en la pantalla una tabla con las barras numeradas, que indican los siguientes aspectos: tipo de material, forma y tamaño de la sección, longitud y esbeltez.

Práctica

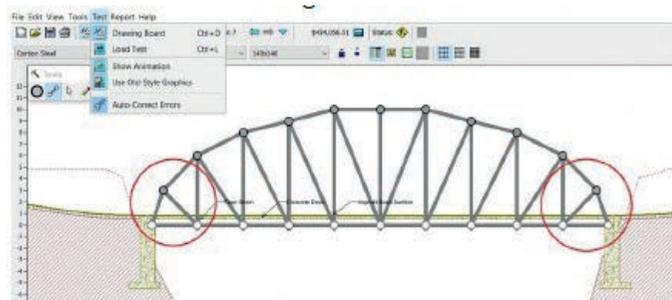
El programa asigna al diseño un tamaño de barra predeterminado y te advierte si el puente no es estable por falta de triangulaciones. En ese caso, añade las barras necesarias para corregirlo.



Durante la prueba verás tu diseño sometido, primero, al propio peso del puente y, después, al paso de un camión, indicando tensiones de rotura, deformaciones excesivas o el colapso de la estructura.



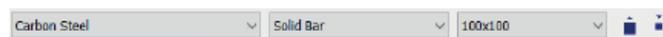
Tendrás que añadir nodos y barras hasta conseguir que tu modelo resista; en nuestro ejemplo, bastaba con reforzar las diagonales extremas.



Una vez que hayas conseguido un diseño estable y resistente, pasarás a la siguiente fase.

Tercera fase: optimización de la estructura

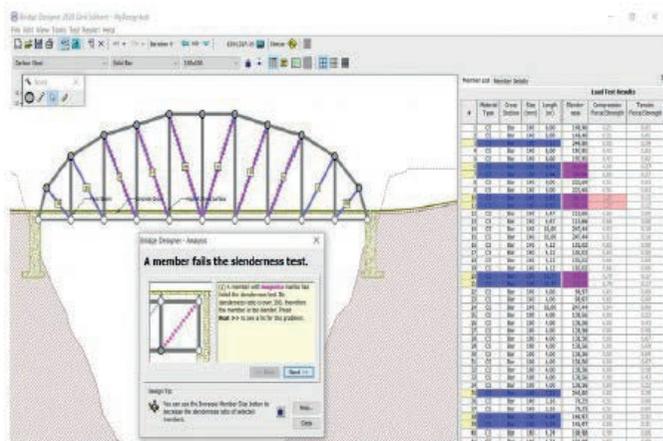
En la tabla con las tensiones de cada barra, el color azul significa tracción y el rojo compresión, con mayor intensidad cuanto más cerca estén de la tensión de rotura. Esto te guiará para disminuir la sección de los elementos menos tensionados.



Ideas para optimizar el diseño de la estructura

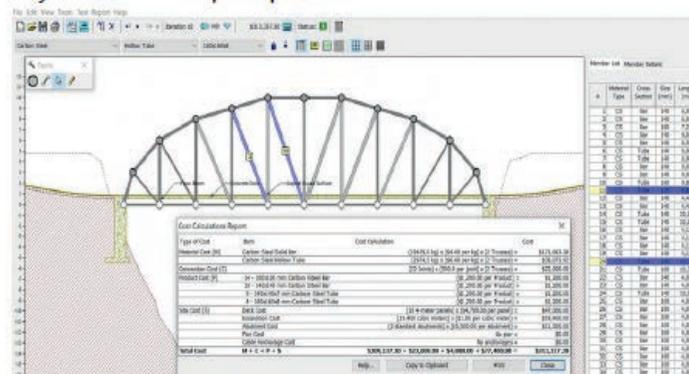
Podemos reducir directamente la sección de las barras traccionadas que tengan poca tensión. Las barras comprimidas levemente se pueden sustituir por otras huecas del mismo tamaño para no aumentar su esbeltez.

Cada vez que introduzcas un cambio, has de someterlo a una nueva prueba de carga para ver cómo se ven afectadas las tensiones en las barras.



La introducción de distintos tipos de barra en el diseño incrementará el coste del proyecto, por lo que debes trabajar con grupos de barras iguales.

Siempre que introduzcas una modificación, puedes comprobar el coste total y el presupuesto de ejecución.



Actividades

1 Con la ayuda del programa, dibuja el puente que hayas ideado para tu proyecto. Ensáyalo y comprueba que cumple las condiciones de estabilidad, rigidez y resistencia.

Tras ello, disminuye la sección en las barras que soportan menos tensión. Esto sirve para saber qué barras del puente deben ser más gruesas y cuáles tienen menos implicación en la resistencia del conjunto de la estructura y pueden, así, ser más finas.

Construcción de estructuras de papel y cartón

Convertir unas hojas de papel y unos cartones en una estructura resistente requiere de unas técnicas adecuadas. A continuación veremos diferentes maneras de conformar los materiales para poder utilizarlos en la construcción del puente.

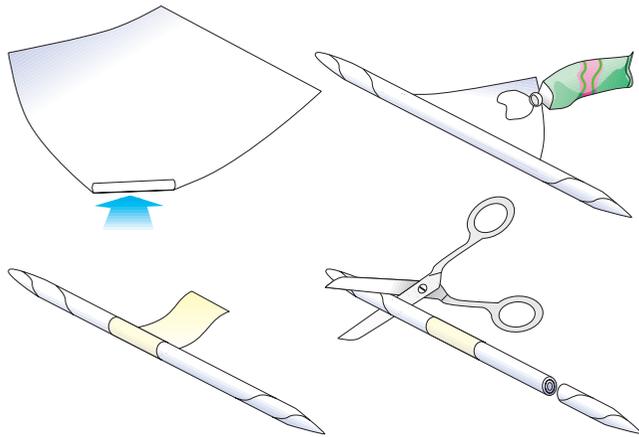
Es especialmente importante que prestes atención a la manera de hacer las uniones entre los distintos elementos y materiales, porque, como ya has aprendido, las uniones son uno de los puntos más débiles de las estructuras.

Práctica

Uniones con papel

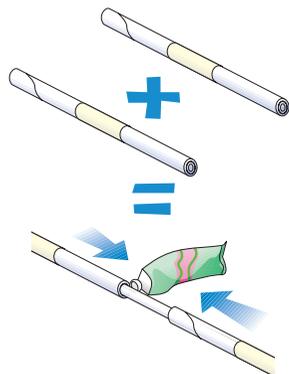
Con hojas de papel reciclado podemos construir barras resistentes. ¿Cómo?

1. Enrolla la hoja diagonalmente desde una de sus esquinas.
2. Fija el extremo a la barra con cola, pegamento de barra o una tira de cinta adhesiva.
3. Corta los extremos de las barras. ¿Por qué crees que debemos cortar los extremos?

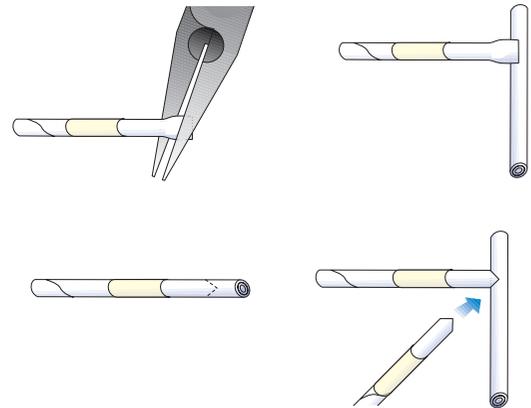


4. Para conseguir mayor grosor y resistencia puedes enrollar varias hojas, añadiéndolas sucesivamente. Cuanto más fino sea el papel más sencillo resultará enrollarlo.

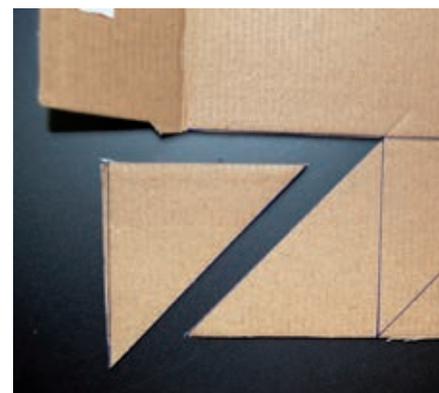
- Para conseguir barras más largas puedes introducir unas dentro de otras, buscando que encajen debido a su diferente grosor.
- También puedes unir las entre sí mediante otras barras más finas, que quedarán en el interior de ambas. Para reforzar la unión, emplea una tira de cinta adhesiva.



5. Si lo que quieres es unir dos barras perpendicularmente, aplana ambas en el punto de unión o corta en ángulo o bisel los extremos para que encajen perfectamente.



- A veces necesitarás reforzar las uniones, para ello recorta triángulos o semicírculos de cartón fino a modo de cartelas, que uniremos a las barras que coincidan en un nudo. Observa estos ejemplos:



Práctica

Uso del cartón

Para trabajar con el cartón debes tener en cuenta que su resistencia es mayor en una dirección que en otra, debido a los esfuerzos que posee en su interior. Observa cómo son los refuerzos que te mostramos en la fotografía.

Una vez que hayas comprendido como está formado el cartón, investiga en qué dirección es más resistente y deduce:

- a) ¿Cuál de estas dos piezas sería mejor para el tablero del puente?



- b) ¿Se te ocurre alguna manera de reforzar el cartón para que soporte mejor la flexión?

Práctica

Uniones con hilo

Un simple hilo puede convertirse en la clave de una estructura. A veces resulta complicado unirlo a otros materiales, puesto que resbala y es difícil fijarlo. Podemos hacerlo mediante nudos, con ranuras en donde encaje o enrollándolo y fijándolo con cola. Observa las siguientes uniones entre el hilo y otros elementos.



Unión mediante enrollado y pegamento.



Unión mediante dos ranuras, enrollado y pegamento.



Unión mediante una ranura y objeto anudado que hace de tope.

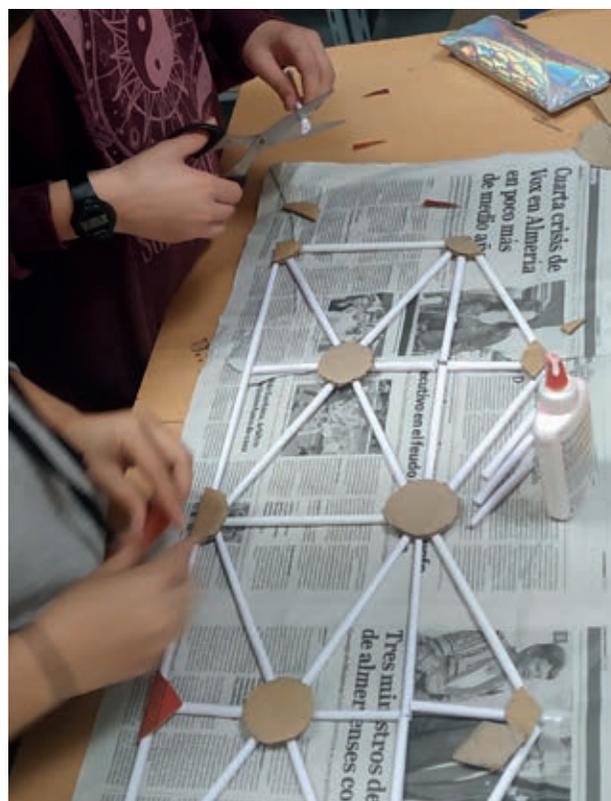
El hilo es muy útil para mantener uniones de barras que se cruzan entre sí. Una unión realizada con hilo y pegamento es sólida y resistente.

Montaje de la estructura del puente

A la hora de realizar el montaje de tu estructura ten en cuenta lo siguiente:

1. Numera todos los elementos del puente en los planos y agrupa los que sean similares para fabricarlos a la vez.
2. Divide el trabajo para que no haya nadie desocupado y construye primero los elementos de mayor tamaño para acoplar el resto después.
3. Procura encontrar aquellos elementos de la estructura que puedas construir en plano por separado. Por ejemplo, un lateral del puente o el tablero. Una vez que hayas construido todas las piezas, realiza el montaje espacial de la estructura.
4. Por último, une los elementos que has elaborado anteriormente y, después, añade las piezas auxiliares más pequeñas y los tirantes.

Una vez construida la estructura, estudia sus características finales, elementos, dimensiones, peso, etc., para ver cómo ha cambiado respecto al diseño inicial. Podrás comprobar que la construcción condiciona mucho el resultado.



Consolidación y síntesis

- 1 Enumera cinco cargas que puedan actuar sobre tu cuerpo. Di cuáles son fijas y cuáles son variables.
- 2 Explica cuándo se produce cada tipo de esfuerzo y pon un ejemplo de cada uno.
- 3 Indica si las siguientes afirmaciones son verdaderas o falsas. Razona tu respuesta en cada caso.
 - a) El esfuerzo cortante solo aparece cuando cortamos algo.
 - b) La tracción es un esfuerzo que tiende a estirar un objeto.
 - c) El esqueleto humano está sometido básicamente al esfuerzo de compresión.
 - d) Un vaso de plástico no tiene ningún tipo de estructura.
- 4 Indica a qué tipo de esfuerzo están sometidas estas estructuras naturales: un nido colgante, la pata de un elefante, las alas de un murciélago desplegadas, un termitero y el nido de una golondrina. Dibuja las fuerzas que actúan en cada caso.
- 5 Dibuja las siguientes estructuras y analiza los esfuerzos a los que está sometida cada una de sus partes:
 - a) Una barra de ejercicios gimnásticos.
 - b) Un columpio.
 - c) Una silla.
 - d) Un ventilador de techo.
- 6 ¿Por qué es más fácil que se partan las patas de una silla si nos echamos hacia atrás con ella?
- 7 ¿A qué esfuerzo están sometidas las cuerdas de tender cuando se cuelga la ropa? Ten en cuenta el material de que están hechas.
- 8 Indica qué materiales (madera, hormigón, piedra o acero) se emplean para fabricar los siguientes elementos estructurales: viga, tirante, zapata y contrafuerte. Ten en cuenta que, además de las puramente estructurales, puede haber otras razones que determinen su empleo. Justifica tu respuesta.
- 9 Enumera las ventajas del hormigón armado con respecto a la piedra.
- 10 ¿Cuál es la utilidad de la cimentación de un edificio? ¿Cuándo se emplean como cimentación losas o pilotes en lugar de zapatas? ¿Por qué?
- 11 Ordena los siguientes elementos estructurales según su función y su orden de aparición a lo largo de la historia: viga, arco, losa, bóveda, columna, dintel, triangulación, tirante, zapata, pilote.

- 12 ¿Qué elementos estructurales aparecen en las siguientes fotografías? ¿De qué tipo son?



- 13 Busca imágenes en Internet de los siguientes puentes y acueductos. Explica a qué tipo estructural pertenece cada uno y con qué materiales han sido fabricados:
 - a) Puente romano de Córdoba.
 - b) Puente de Rande, en Vigo.
 - c) Puente de Barqueta, en Sevilla.
 - d) Puente de San Pablo, en Cuenca.
 - e) Acueducto de Segovia.
 - f) Puente del Ángel Custodio de Valencia.
- 14 Indica si las siguientes afirmaciones son verdaderas o falsas. Razona tu respuesta en cada caso.
 - a) Las estructuras de barras trianguladas pueden ser de piedra.
 - b) El acero es un material estructural propio de las estructuras masivas.
 - c) Los tirantes solo se utilizan para dar estabilidad a las estructuras.
 - d) Los pilotes son pilares estrechos que se emplean en construcciones pequeñas.
- 15 Escoge algún elemento de mobiliario urbano que te sea familiar (un banco, una farola, una papelera, etc.) y realiza un análisis formal y estructural del mismo. Acompaña tu trabajo con fotografías y dibujos.

- 16 ■ ¿En qué se diferencian una viga y un pilar? ¿Qué función tiene cada uno de ellos? ¿A qué tipo de esfuerzos está sometido principalmente cada uno? Dibujalos y señala cómo actúan las cargas sobre ellos.
- 17 ■ Observa este puente. Como puedes ver, está formado por dos tipos de estructuras muy distintos. Identifícalos, nombra todos sus elementos e indica a qué tipo de esfuerzo está sometido cada uno de ellos. ¿Crees que las dos partes del puente funcionan de manera conjunta? ¿Por qué?



- 18 ■ Reúne 3 rectángulos de cartulina de 10×30 cm. Dóblalos longitudinalmente y construye con ellos tres perfiles: uno de sección circular, otro triangular y el último cuadrado.

- a) Si aplicamos a todos la misma carga en su parte superior, por ejemplo el peso de tu estuche, ¿a qué tipo de esfuerzo estarán sometidos? ¿Tendrá la misma intensidad en todos los casos?
- b) A pesar de estar hechos con la misma cantidad de material, ¿cuál de los tres perfiles te parece que resistirá mejor ese esfuerzo? ¿Por qué?

Repaso de la unidad

- 19 ■ Copia el esquema conceptual en tu cuaderno.
- 20 ■ Realiza un resumen de la unidad respondiendo a las siguientes preguntas:
- ¿Para qué sirven las estructuras?
 - ¿Qué son las fuerzas, cargas y los esfuerzos?
 - ¿Cuáles son los principales tipos de esfuerzos?
 - ¿Qué tres condiciones ha de cumplir una estructura?
 - ¿Cuáles son los tipos de estructuras y sus características?
- 21 ■ Crea tu propio diccionario técnico. Para ello, define estos términos y otros que consideres necesarios: estructura, fuerza, carga, esfuerzo, zapata, bóveda, dintel, arriostramiento, dovela...

Conocimientos básicos



Innovación en el mundo de la construcción

En el campo de las estructuras, actualmente, hay varios campos abiertos en investigación y desarrollo cuyas aplicaciones veremos en la próxima década y que contribuirán decisivamente a la eficacia y sostenibilidad de las estructuras.

Materiales de última generación

- **Bio-hormigón.** Se están desarrollando materiales que sintetizan hormigón a partir de calcio y carbono del mismo modo que, en la naturaleza, se construyen los arrecifes de coral. Una aplicación de estos biomateriales sería el hormigón autorreparable, que contendría cápsulas con bacterias y ácido láctico que se liberan al fisurarse el material y lo rellenan de nuevo. Estos biomateriales tendrían una huella de carbono muy reducida.
- **Hormigón ultra resistente (UHPC- Ultra High Performance Concrete).** Se basa en la adición de fibras de acetato y aditivos, que lo vuelven más fluido, a una masa con granulometría fina (sin áridos gruesos). Esto le otorga una resistencia a la compresión y a la flexión diez veces mayor que uno normal y permite la construcción de arcos con vanos mucho mayores en puentes y edificios aumentando la eficiencia de las estructuras.



Impresión 3D para elementos estructurales

- Se puede emplear la impresión 3D para crear **encofrados para hormigón** de geometría compleja con un gasto mínimo de material y personalizables en cada obra.
- Es posible también la **impresión directa con materiales como el hormigón en masa**, que se puede ir colocando en capas para levantar los cerramientos y particiones de edificios. Esto abarata bastante los costes de producción. La impresión 3D directa permite la realización de formas geométricas redondeadas.



Estructuras inteligentes

Uno de los campos a desarrollar en la mejora de las estructuras de edificación es la incorporación de sensores en su interior que puedan dar datos instantáneos de parámetros de seguridad como las tensiones que está soportando el material, la evolución de sus deformaciones, la existencia de fisuras o humedades en su interior, etc. Esto permitiría la realización de intervenciones de mantenimiento y prevención y evitaría su degeneración y eventualmente, su colapso.

Actividades

- 1 ¿Qué dos tipos de hormigón se están desarrollando como materiales de última generación?
- 2 ¿Con qué dos elementos químicos se sintetiza el bio-hormigón?
- 3 ¿En qué consiste el hormigón autorreparable?
- 4 ¿Cuántas veces es más resistente el hormigón ultra resistente que el normal? ¿Qué contiene para lograrlo? ¿Por qué es más fluido?
- 5 ¿Qué dos ventajas principales tiene el empleo de hormigón para impresión 3D de construcciones?
- 6 ¿Qué tipos de problemas pueden detectar los sensores incorporados a las estructuras?

Construcción de estructuras eficaces

El **objetivo** de este proyecto es diseñar y construir un puente que, respetando las condiciones dadas en cuanto a dimensiones y carga soportada, emplee la menor cantidad de material posible resultando así más eficaz y sostenible.

Necesidad e investigación

- 1 Analizad el problema teniendo en cuenta los condicionantes presentados a continuación:
 - a) Distancia entre apoyos 60 cm.
 - b) Resistencia en el centro del vano de 3 kg.
- 2 Estudiad soluciones previas investigando tipos de cerchas o vigas trianguladas que sirvan para construir puentes.

Análisis y simulación

- 3 Elaborad una lista con un boceto a mano alzada de cada uno de los tipos de puentes o vigas que encontréis para asegurar que comprendéis su funcionamiento.
- 4 Emplead algún programa de simulación de puentes para comprobar la idoneidad de cada ejemplo al aplicar vuestros condicionantes.

Diseño

- 5 Diseñad vuestra propia idea. Elaborad un boceto a mano alzada con las características que queréis que tenga el puente. Podéis basaros en la mejora de alguno ya existente o inventar uno completamente nuevo.

Expresión y comunicación

- 6 Elaborad los planos más precisos, indicando sus medidas, y una lista de los tipos de barras necesarias, su longitud y número.

Dibujad a escala también el resto de los elementos e indicad la cantidad necesaria de cada uno de ellos: uniones, tablero, etc.

Construcción

- 7 Construid el puente uniendo las distintas barras con cartelas de cartón.

Podéis dibujar una de las cerchas a su tamaño real para emplearla como base en la construcción de cada cercha lateral y así, para luego, unir las entre sí.

Creación y difusión digital

- 8 Grabad un vídeo mientras verificáis el puente construido someténdolo a la carga descrita en las condiciones iniciales.

En el mismo vídeo incluid primero la descripción del puente, seguido de sus elementos y características principales y, finalmente, su modo de funcionamiento.

