



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Escuela Politécnica Superior – Ferrol

TRABAJO FIN DE GRADO



GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Título:

**MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y
EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA
VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO**

Autor:

JOSÉ GÓMEZ ROIBÁS

Tutores:

**ALFREDO DEL CAÑO GOCHI
MARÍA PILAR DE LA CRUZ LÓPEZ**

Fecha:

JUNIO 2016



UNIVERSIDADE DA CORUÑA


EPS FERROL

MODELO INTEGRADO DE
DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA
SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE
HORMIGÓN ARMADO

Trabajo Fin de
Grado


Alumno:
José Gómez Roibás

MEMORIA

 <p>UNIVERSIDADE DA CORUÑA</p> <p>EPS FERROL</p>	<p align="center">MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO</p>	<p align="center"><u>Trabajo Fin de Grado</u></p> <p>Alumno: José Gómez Roibás</p>
--	---	---

Índice

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	3
2. DESCRIPCIÓN DEL CASO.....	4
3. DIMENSIONAMIENTO	6
3.1. ESTIMACIÓN DE LA CARGA	6
3.2. ESTIMACIÓN DE LA ESCUADRÍA DE LA VIGA.....	6
3.3. COEFICIENTES DE SEGURIDAD PARA LOS ELU	8
3.4. DIMENSIONAMIENTO A FLEXIÓN Y A CORTANTE	8
3.5. FISURACIÓN	8
3.6. FLECHA.....	9
4. DISPOSICIÓN DE LAS ARMADURAS.....	10
4.1. Armadura de flexión.....	12
4.2. Armadura de cortante	13
5. MATERIALES.....	14
6. DOSIFICACIONES	17
7. EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD. RESUMEN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS COMPARATIVO.....	18
8. HOJA ELECTRÓNICA.....	21
9. CASO PRÁCTICO DE APLICACIÓN	22
10. CONCLUSIONES	30
11. BIBLIOGRAFÍA	30

 <p>UNIVERSIDADE DA CORUÑA</p> <p>EPS FERROL</p>	<p align="center">MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO</p>	<p align="center"><u>Trabajo Fin de Grado</u></p> <p>Alumno: José Gómez Roibás</p>
--	---	---

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El objetivo genérico de este Trabajo de Fin de Grado (TFG) era abrir una línea de trabajo en la cual se establecieran modelos interconectados, integrados, de cálculo, dimensionamiento y evaluación de la sostenibilidad de estructuras de hormigón.

Parecía lógico escoger un elemento estructural sencillo para dicho comienzo, y por ello el objeto de este TFG ha sido generar un modelo de dicho tipo, para una viga isostática de hormigón armado sometida a una carga uniformemente distribuida. Dicho modelo se ha materializado en una aplicación informática que permite realizar dichas operaciones.


Siguiendo la misma línea de pensamiento, para evitar mayor complejidad en este primer acercamiento, se ha considerado que la viga forma parte de una estructura interior, como puede ser el caso de una plataforma de proceso interior a un edificio industrial. En consecuencia, la estructura a la que pertenece no tiene cargas de viento, nieve, u otras asociadas a exteriores.

En particular, se ha propuesto al alumno la realización de una hoja electrónica de cálculo que, a partir de unos datos base (cargas, luz estructural, dimensiones de la sección, entre otros), calcule y dimensione la viga y, simultáneamente, estime su índice de sostenibilidad de forma que, automáticamente, cada vez que se cambie cualquiera de los datos base, se estime su índice de sostenibilidad (IS) global, analizándose las consecuencias sobre la sostenibilidad de determinadas decisiones de proyecto.

La razón de usar una hoja electrónica en vez de generar un programa en MatLab o C++, que son los lenguajes que aprende el alumno en la carrera es, de nuevo, no hacer más complejo el TFG de lo que sería oportuno, por ser un primer trabajo de este tipo.

Para el dimensionamiento se han empleado métodos convencionales basados en la instrucción española EHE-08 y en el Eurocódigo 2 (Diseño de Estructuras de Hormigón).

Para el cálculo de la sostenibilidad se ha aplicado el método MIVES (Método Integrado de Valor para la Evaluación de la Sostenibilidad), incluyendo aspectos medioambientales, sociales y económicos.

 <p>UNIVERSIDADE DA CORUÑA</p> <p>EPS FERROL</p>	<p>MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO</p>	<p><u>Trabajo Fin de Grado</u></p> <p>Alumno: José Gómez Roibás</p>
--	--	--

2. DESCRIPCIÓN DEL CASO

Es raro el proyecto de vigas isostáticas simplemente apoyadas de hormigón armado (HA), ejecutadas in situ. Por el contrario, es frecuente el empleo de vigas prefabricadas de HA simplemente apoyadas.

Sin embargo, con cierta frecuencia se proyectan soportes de HA ejecutados in situ (además de poder proyectarse prefabricados), empotrados en su cimiento, y que sirven de base para el apoyo isostático de vigas de hormigón. Esto sucede más en la obra pública que en la obra industrial, pero aun así no es un caso raro en este último tipo de obra.

Por todo ello, con objeto de que el presente trabajo tuviese un alcance más amplio, aplicable posteriormente a estructuras de HA que pueden proyectarse tanto prefabricadas como para su ejecución in situ, se ha contemplado la posibilidad de que la viga que es objeto de este TFG pueda construirse de ambas maneras.


Vamos a suponer que la viga de hormigón armado se apoya sobre una estructura, sea metálica o de hormigón, por medio de los elementos oportunos, como pueda ser una lámina de neopreno y un conector para evitar su caída (y, con ello, posibles accidentes), todo lo cual se sale del alcance de este TFG. Vamos a suponer también que los apoyos suponen un comportamiento como viga isostática simplemente apoyada, al carecer dicho conector de una rigidez a flexión que pueda suponer una oposición relevante al giro de la viga en el apoyo.

Se supone que el apoyo ocupa los X últimos centímetros de cada extremo de la viga y, por tanto, que la luz de cálculo de la viga es $L-X$, siendo L la longitud total de la viga.

Se trata de una plataforma de paso que normalmente no va a soportar equipos de proceso, pero que momentáneamente puede alojar algunos equipos de este tipo, de gran peso, durante determinadas operaciones de mantenimiento o reparación.

El forjado que se apoya sobre la viga, que tampoco forma parte del alcance de este TFG, tendrá un determinado peso propio, al que se sumará el de las oportunas barandillas que rodean a la plataforma. El usuario deberá convertir todo ello en una carga uniformemente repartida sobre la viga, de valor PP.

Se va a considerar una determinada sobrecarga de uso (SU), sobre toda la superficie del forjado. Esta sobrecarga incluye el peso del personal que puede circular sobre la plataforma, así como del equipo ligero que puede llevar consigo dicho personal y,

 <p>UNIVERSIDADE DA CORUÑA</p> <p>EPS FERROL</p>	<p>MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO</p>	<p><u>Trabajo Fin de Grado</u></p> <p>Alumno: José Gómez Roibás</p>
--	--	--

finalmente, los ya mencionados equipos de proceso, de gran peso. El usuario deberá convertir todo ello en una carga uniformemente repartida sobre la viga, de valor SU.

No se prevé la posibilidad de que la estructura pueda sufrir daños causados por impactos o explosiones.


En general, se consideran permanentes (G) las cargas de peso propio de los elementos portantes (estructura, forjados) y no portantes (barandillas, en este caso). Por su parte, se consideran cargas variables (Q) las de personas, maquinaria, equipos, mobiliario y las relacionadas con la climatología (viento, nieve). En este caso no hay más cargas variables que la sobrecarga de uso ya referida.

Se llama cargas accidentales a las de impacto de vehículos, explosiones, incendio y sismo. En este caso no hay este tipo de cargas, como se ha dicho anteriormente.

Se llama **Estados Límite Últimos (ELU)** de la estructura a los que suponen el colapso de la misma. Normalmente a estos efectos se aplican, respectivamente, coeficientes de mayoración de cargas $\gamma_G = 1,35$ para las cargas permanentes, y $\gamma_Q = 1,5$ para la carga variable dominante, siempre que dichas cargas tengan efectos desfavorables, como es nuestro caso. Por otro lado, los coeficientes de minoración de las resistencias del hormigón y del acero que se usan son, respectivamente, $\gamma_c = 1,5$ y $\gamma_s = 1,15$.

De todas formas, la hoja electrónica creada dispone de casillas que permiten al usuario modificar estos datos.

Con respecto a los ELU, en un caso general de edificaciones es necesario realizar diferentes combinaciones de cargas, de acuerdo con lo que establecen el Código Técnico de Edificación (CTE) en su apartado de Seguridad Estructural, la EHE-08 o el Eurocódigo 1 (Acciones sobre las Estructuras). Sin embargo, en el caso que nos ocupa no hay cargas accidentales y no existe más que una carga variable y, en consecuencia, sólo es necesario contemplar una hipótesis de carga, en la cual se sumen las cargas permanentes y las variables, adecuadamente mayoradas. Es decir, la carga de ELU para la viga es $\gamma_G \cdot PP + \gamma_Q \cdot SU$. No se consideran aquí ELUs de pérdida de equilibrio, inestabilidad (pandeo) ni fatiga, por no ser aplicables al caso que se estudia. Por tanto, los ELUs que se han tenido en cuenta son los de agotamiento (rotura) y anclaje. A su vez, a efectos de agotamiento la viga se dimensiona a flexión y cortante.

 UNIVERSIDADE DA CORUÑA EPS FERROL	MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO	<u>Trabajo Fin de Grado</u> Alumno: José Gómez Roibás
--	--	--

Se llama **Estados Límite de Servicio (ELS)** de la estructura a los que suponen fallos que afectan al uso, apariencia o durabilidad, sin llevar al colapso estructural. Es decir, se trata de deformaciones, fisuraciones o vibraciones que provocan problemas. A estos efectos no se aplican coeficientes de mayoración de cargas ni de minoración de resistencia y, por tanto, la carga de ELS para la viga es, en el caso más desfavorable, PP + SU. En el Anejo 1 se indican las cargas que se consideran a efectos de ELS. Los ELS que se contemplan en este trabajo son los de fisuración y flecha, ya que en este caso no hay vibraciones transmitidas a la estructura.

3. DIMENSIONAMIENTO

3.1. ESTIMACIÓN DE LA CARGA

Lo oportuno es recurrir a la normativa vigente (CTE, EHE-08, Eurocódigo 1) para estimar las cargas e hipótesis de carga. Por lo regular, si se trata de una viga aislada, la carga total es la que soporta dicha viga. Cuando se trata de vigas de apoyo de un forjado unidireccional, una vez determinada la carga total que soporta el forjado q_f (en kN/m^2), se calculará el forjado y se usarán las reacciones en el mismo como carga sobre la viga. En caso de necesitarse un predimensionado rápido de la viga podemos estimar la carga actuante sobre cada viga con la fórmula:

$$q_{viga} = q_f \left(\frac{kN}{m^2} \right) \cdot (D_1 + D_2) / 2$$

Siendo D_1 y D_2 (en m) las distancias de las vigas a sus contiguas (área tributaria).


3.2. ESTIMACIÓN DE LA ESCUADRÍA DE LA VIGA

Si las dimensiones ancho por canto ($b \times h$) no están definidas, se puede tomar un canto:

- $L/20 \leq d \leq L/15$ para vigas biapoyadas de luz L , que es nuestro caso
- $L/24 \leq d \leq L/20$ para vigas continuas con vano de luz máxima L

Siendo d el canto útil. Como todavía no se conoce este canto, por no haberse calculado las armaduras en este momento, se puede tomar $d \approx h - \text{recubrimiento}$.

El ancho puede ser muy diferente en función de que se desee proyectar vigas planas o vigas de canto. En todo caso, lo normal va a ser utilizar vigas de canto, en

 <p>UNIVERSIDADE DA CORUÑA</p> <p>EPS FERROL</p>	<p align="center">MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO</p>	<p align="center"><u>Trabajo Fin de Grado</u></p> <p>Alumno: José Gómez Roibás</p>
--	---	---

las cuales b suele tomar valores habituales entre $h/2$ y $h/3$, con un mínimo de 25 cm.

Un procedimiento más completo y no demasiado complejo para estimar el canto es el siguiente:

1. Se fija el momento específico $\mu = M_d / U_c \cdot d = M_d / f_{cd} \cdot b \cdot d^2$ entre 0,18 y 0,375 (mejor si está entre 0,2 y 0,3), siendo M_d el momento flector de cálculo, U_c la capacidad mecánica del hormigón, f_{cd} la resistencia de cálculo del hormigón, b el ancho de la viga, y d el canto útil de la viga.
2. Se despeja d , fijando previamente para b un valor, que habitualmente estará en el orden de lo dicho (entre $h/2$ y $h/3$, con un mínimo de 25 cm).
3. Para evitar resolver ecuaciones cúbicas cuya resolución no es directa, se puede aproximar $d = \text{canto útil} \approx h$.

En zonas sísmicas debe respetarse:


- $b/d \geq 0,3$.
- $L \geq 4 \cdot d$
- En ductilidad alta o muy alta, las vigas deben presentar descuelgue respecto al canto de la losa. Este descuelgue debe ser superior a la profundidad de la fibra neutra en la zona de apoyo bajo el momento negativo de rotura. El ancho del descuelgue debe ser de al menos 20 cm (ductilidad alta) o 25 cm (ductilidad muy alta).

Para casos normales de vigas de HA, si se desea que no haya problemas de flecha y, por tanto, no tener que hacer comprobaciones a flecha, de acuerdo con la EHE-08 se debe tomar un canto:

- $d > L/6$ para voladizos (cuya luz está muy limitada)
- $d > L/14$ para vigas simplemente apoyadas, que es nuestro caso
- $d > L/18$ para vanos extremos de vigas continuas o de pórticos
- $d > L/20$ para vanos intermedios de vigas continuas o de pórticos

Con b en función de lo dicho con anterioridad.

Las antiguas Normas Tecnológicas de la Edificación (NTE), y en particular la norma NTE-EHV (Estructuras de Hormigón – Vigas), dispone de una tabla de predimensionado rápido de secciones en función del flector de cálculo, que también puede usarse para estimar la escurdría de la viga. Debe tenerse en cuenta, no obstante, que son normas antiguas que no se han actualizado y, habiendo

 <p>UNIVERSIDADE DA CORUÑA</p> <p>EPS FERROL</p>	<p align="center">MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO</p>	<p align="center"><u>Trabajo Fin de Grado</u></p> <p>Alumno: José Gómez Roibás</p>
--	---	---

habido un importante avance en materia de hormigones desde aquellos tiempos, la sección obtenida por medio de esta tabla podría reducirse.

3.3. COEFICIENTES DE SEGURIDAD PARA LOS ELU

De acuerdo con la normativa vigente (EHE-08), se contemplan los siguientes sub-coeficientes de seguridad:

- Coeficiente de mayoración de cargas permanentes: $\gamma_f = 1,35$.
- Coeficiente de mayoración de sobrecargas: $\gamma_f = 1,5$.
- Coeficiente de minoración resistencia del hormigón: $\gamma_c = 1,5$.
- Coeficiente de minoración resistencia del acero: $\gamma_c = 1,15$.

3.4. DIMENSIONAMIENTO A FLEXIÓN Y A CORTANTE

Para el dimensionamiento a flexión y a cortante se siguen los pasos descritos en el Anejo I, de dimensionamiento.


3.5. FISURACIÓN

Las fisuras en hormigón armado se pueden producir por causas diversas, relacionadas, bien con las acciones directas (cargas) o indirectas (asiento de apoyos, temperatura y la retracción de secado, que se producen en el hormigón endurecido), bien por otras razones que, más que con el proyecto, tienen que ver con la ejecución de la estructura o con la dosificación del hormigón.

La literatura existente aborda ampliamente los diferentes tipos de fisuras y sus causas.

Todas estas fisuras suelen ser superficiales y no se pueden controlar de forma totalmente eficaz por medio de la armadura, siendo frecuente su aparición en fases muy tempranas del proceso de endurecimiento del hormigón. Los diversos fenómenos causantes son muy complejos y tienen un tratamiento numérico inabordable actualmente, debiendo efectuarse el control de su anchura mediante fórmulas experimentales, normas de buena práctica constructiva y una dosificación correcta.

Conviene añadir que las fisuras, incluso las perceptibles a simple vista, no perjudican por lo general a la durabilidad de las obras. Su aparición es a menudo

 <p>UNIVERSIDADE DA CORUÑA</p> <p>EPS FERROL</p>	<p>MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO</p>	<p><u>Trabajo Fin de Grado</u></p> <p>Alumno: José Gómez Roibás</p>
--	--	--

inevitable y no suponen inconveniente para la normal utilización de las estructuras, siempre que se limite su anchura máxima a valores compatibles con los requisitos de funcionalidad, aspecto y estanquidad en su caso.

La anchura de fisura debe controlarse por razones de posible corrosión, impermeabilidad, funcionalidad y estética.

Los pasos seguidos para calcular los límites de fisuración se detallan en el Anejo I, de dimensionamiento.

3.6. FLECHA

La actuación de las cargas (de corta o larga duración) y otras acciones (tales como los asientos de apoyo, la retracción, la fluencia, las variaciones térmicas y las variaciones en contenido de humedad) provoca las correspondientes deformaciones en los elementos estructurales. Por efectos de las mismas, los puntos de la directriz de cada una de las piezas experimentan movimientos que, en una estructura plana, pueden ser de tres tipos:


- Un desplazamiento longitudinal en la dirección de la directriz (alargamiento o acortamiento).
- Un desplazamiento transversal a la directriz (flecha).
- Un giro (de la tangente a la directriz deformada).

De estas tres deformaciones la más importante es la flecha, y por ello, la comprobación del ELS de Deformación suele limitarse al cálculo de las flechas.

Los cálculos de deformaciones se efectúan a partir de los valores característicos de las acciones y de las resistencias de los materiales, puesto que se trata de conocer el comportamiento de la estructura en servicio. Por consiguiente se considera en ellos $\gamma_f = \gamma_s = \gamma_c = 1$.

Es conveniente diferenciar varios tipos de flechas en función de lo que se quiera evaluar:

- Flecha instantánea. Es la ocasionada por la actuación de una carga en el instante de su aplicación, es decir, sin considerar efectos diferidos.
- Flecha diferida. Debido a la reología del hormigón, la flecha instantánea producida por una carga permanente aumentará con el paso del tiempo una cierta magnitud que se denomina flecha diferida de esa carga permanente. Las flechas diferidas dependen de la magnitud de la carga permanente, del

 <p>UNIVERSIDADE DA CORUÑA</p> <p>EPS FERROL</p>	<p>MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO</p>	<p><u>Trabajo Fin de Grado</u></p> <p>Alumno: José Gómez Roibás</p>
--	--	--

instante de aplicación de la carga y del tiempo durante el cual la carga está actuando sobre la estructura.


- Flecha total a plazo infinito. Es la flecha formada por la flecha instantánea más la flecha diferida ocasionada por las cargas permanentes y casi permanentes a partir del momento de su aplicación.
- Flecha activa. Se define con respecto a un elemento dañable, como es el caso de un tabique. Es la producida a partir del momento en que se construye dicho elemento, el cual está sustentado por la pieza estructural en cuestión. En definitiva, es la parte de flecha del elemento estructural que afecta a un elemento susceptible de dañarse.

El cálculo de flechas en estructuras de hormigón depende en gran medida del tiempo durante el cual actúa la carga y de la edad del hormigón en el instante de su aplicación. En definitiva, depende del tiempo, cuya influencia es doble. Por un lado, porque el módulo de deformación del hormigón de la estructura aumenta con el tiempo, haciendo que la estructura sea más rígida. Por otro lado, la edad a la que se aplica la carga permanente influye en la fluencia provocada, lo que modifica la flecha diferida. Por tanto, el historial de cargas de una estructura es fundamental para poder determinar las flechas. De todo lo dicho se intuye ya que un cálculo afinado de flechas puede ser un proceso muy complejo. No obstante, como siempre, existen procedimientos simplificados que permiten un cálculo o comprobación suficientemente afinados, del lado de la seguridad

Los pasos seguidos para evaluar si se cumple la flecha en la hoja electrónica son los descritos en el Anejo I, de dimensionamiento.

4. DISPOSICIÓN DE LAS ARMADURAS

Uno de los propósitos de la aplicación informática generada es calcular y distribuir las armaduras de la viga. Hay diferentes formas de armar una viga. La forma en que se disponen las armaduras se explica detalladamente a continuación.

 <p>UNIVERSIDADE DA CORUÑA</p> <p>EPS FERROL</p>	<p>MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO</p>	<p><u>Trabajo Fin de Grado</u></p> <p>Alumno: José Gómez Roibás</p>
---	---	---

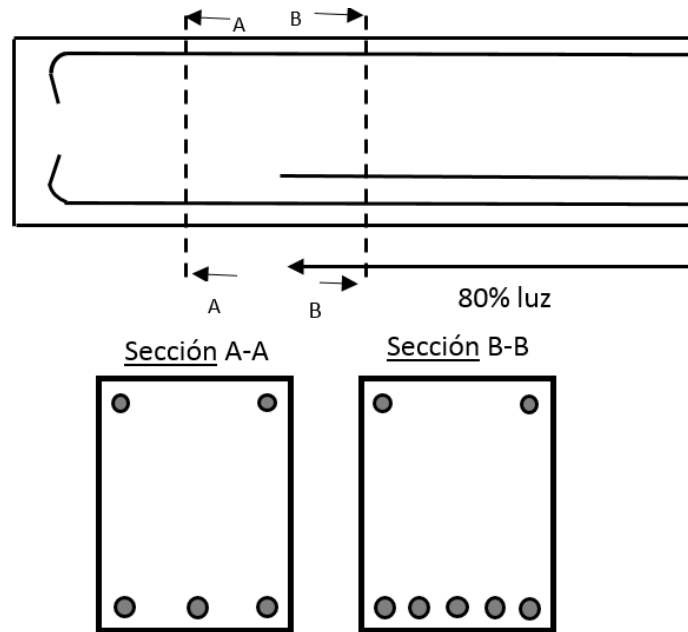


Figura 1. Distribución general de las armaduras a flexión.

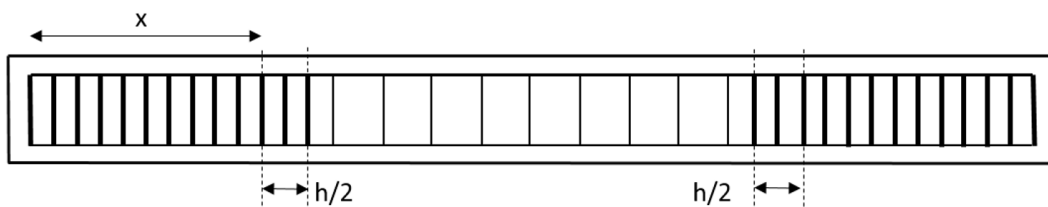



Figura 2. Distribución general de las armaduras a cortante

En las figura 1 y 2, se muestra la forma general de cómo se disponen las armaduras en la viga que nos ocupa. Tras el cálculo a flexión y cortante, incluido todo lo relativo a cuantías mínimas, la viga se arma de la forma convencional con armaduras longitudinales inferiores para las tracciones producidas por el flector, longitudinales superiores constructivas, para ductilizar y, si ha lugar, para el caso de su necesidad para resistir las oportunas compresiones cuando el momento flector es mayor que el momento límite, y estribos de cortante a 90°.

En los sub-epígrafes siguientes se explican los detalles de la distribución de las armaduras.

 <p>UNIVERSIDADE DA CORUÑA</p> <p>EPS FERROL</p>	<p align="center">MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO</p>	<p align="center"><u>Trabajo Fin de Grado</u></p> <p>Alumno: José Gómez Roibás</p>
--	---	---

4.1. Armadura de flexión

El armado de tracción se puede ir cortando, desde el centro a los extremos, conforme el momento flector de cálculo (M_d) va disminuyendo.

Para armar una viga bi-apoyada, que es la que nos ocupa en este estudio, se puede hacer lo siguiente:

· Abajo

- El área de acero necesaria para las tracciones que se producen en la zona inferior de la viga (A_{s1}) se dispone entera en la parte inferior central de la viga, en un total del 80% de la luz ($0,8 \cdot L$).
- En el 10% de la luz situado a cada extremo de la viga se dispone un mínimo del 30% de A_{s1} ($A_s > 0,3 A_{s1}$).
- Se dispone siempre la armadura mínima mecánica y geométrica que establece la EHE-08.

· Arriba


- El área de acero a disponer en la zona superior de la viga, por razones constructivas, estructurales (para ayudar al hormigón a resistir las compresiones generadas en la parte superior de la viga cuando $M_d \geq M_{lim}$ y, cuando ello no es necesario, para generar una mayor ductilidad de esa zona), o de ambos tipos (A_{s2}), se dispone en toda la luz.

Téngase en cuenta que si una viga es corta puede resultar mejor no cortar armaduras, y dejar el mismo armado en toda la viga. La hoja electrónica está pensada para piezas normales, en las cuales sí se realiza este corte de armaduras, pero cuando la luz es menor que 3m establece el mismo armado en toda la viga.

El anclaje de los extremos de las barras de HA puede hacerse en prolongación recta, en gancho o en patilla; también pueden anclarse las barras mediante ganchos en U o disponiendo barras transversales soldadas.

Por razones obvias, al ser una viga simplemente apoyada, en este caso se ha utilizado el anclaje de patilla, tal como se refleja en la Figura 3.

La longitud de la patilla debe ser como mínimo cinco veces el diámetro de la barra considerada.

 UNIVERSIDADE DA CORUÑA EPS FERROL	MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO	<u>Trabajo Fin de Grado</u> Alumno: José Gómez Roibás
--	--	--

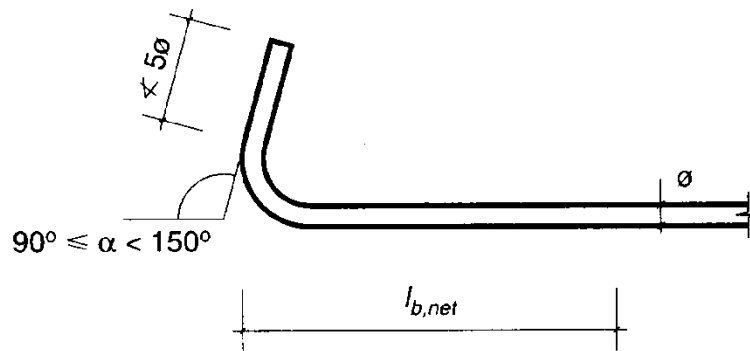


Figura 3. Anclaje de patilla


4.2. Armadura de cortante

Con una carga puntual en el centro de la viga las necesidades de armado a cortante son constantes, ya que el cortante tiene el mismo valor absoluto en toda la viga. Por el contrario, en nuestro caso, con una carga uniformemente distribuida se necesita menos armadura de cortante en la zona central que en las zonas extremas y, por tanto, se puede hacer que la disposición de las armaduras no sea uniforme a lo largo de la viga, disponiendo tres zonas de estribos:

- Dos extremas con la armadura de cortante (A_α), que resulte necesaria en función del cálculo realizado. A cada zona se le añade a mayores una zona igual a la mitad del canto.
- Una central, en la que el cortante de cálculo es menor que el cortante que puede soportar el hormigón sin la ayuda de acero ($V_d < V_{cu}$; no hay necesidad estricta de A_α), disponiendo en ella la A_α mínima.

Para esta zona central se puede aumentar la distancia entre estribos o también disminuir el diámetro de las barras, si bien lo más frecuente es hacer lo primero, que es lo que se hace la hoja electrónica que se ha preparado.

De nuevo, en vigas cortas puede resultar mejor no cambiar el armado. La hoja electrónica está pensada para piezas normales, en las cuales sí se realiza este cambio de armado, pero cuando la luz es menor que 3m establece el mismo armado en toda la viga.

 <p>UNIVERSIDADE DA CORUÑA</p> <p>EPS FERROL</p>	<p align="center">MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO</p>	<p align="center"><u>Trabajo Fin de Grado</u></p> <p>Alumno: José Gómez Roibás</p>
--	---	---

5. MATERIALES

El hormigón es un material compuesto empleado en construcción, formado esencialmente por un aglomerante hidráulico al que se añade un agregado (arena y grava: áridos), agua y aditivos específicos.

El aglomerante más habitual es el cemento Portland. La mezcla de cemento con una proporción adecuada de agua, denominada mortero de cemento, lleva a una reacción exotérmica por medio de la cual se produce el fraguado y endurecimiento de dicha mezcla, tanto en contacto el aire como con el agua. Los áridos economizan la estructura (disminución drástica del uso de cemento, que es el elemento más contaminante y caro), disminuyen el impacto ambiental (por lo ya dicho) y evitan determinados problemas (como es el de una fisuración excesiva).

Cemento

Existen diferentes tipos de cemento. En la Tabla 1 se incluye la clasificación básica de tipos de cemento.

Tipos de cemento	Denominaciones	Designaciones
I	Cemento Portland	CEM I
II	Cemento Portland con adiciones	CEM II
III	Cemento Portland con escorias de horno alto	CEM III
IV	Cemento puzolánico	CEM IV
V	Cemento compuesto	CEM V


Tabla 1. Tipos de cemento.

A continuación se incluye una descripción breve de dichos tipos de cemento.

Tipo I: Cemento Portland. Es el cemento Portland destinado a obras de hormigón en general, cuando en las mismas no se especifique la utilización de otro tipo. Libera más calor de hidratación que otros tipos de cemento.

Tipo II: Cemento Portland con adiciones. De moderada resistencia a los sulfatos, es el cemento destinado a obras de hormigón en general y obras expuestas a la acción moderada de sulfatos o donde se requiera moderado calor de hidratación, cuando así se especifique.

Tipo III: Cemento Portland con escorias de horno alto. De alta resistencia inicial, por ejemplo para el caso en que se necesite que la estructura de hormigón reciba

 <p>UNIVERSIDADE DA CORUÑA</p> <p>EPS FERROL</p>	<p align="center">MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO</p>	<p align="center"><u>Trabajo Fin de Grado</u></p> <p>Alumno: José Gómez Roibás</p>
--	---	---

carga lo antes posible, o cuando es necesario desencofrar a los pocos días del hormigonado.

Tipo IV: Cemento puzolánico. Para uso cuando se requiere bajo calor de hidratación, cuando no deben producirse dilataciones durante el fraguado.

Tipo V: Cemento compuesto. Usado donde se requiera una elevada resistencia a la acción concentrada de los sulfatos (canales, alcantarillas, obras portuarias).

Entre las adiciones que puede llevar el cemento podemos encontrar las que se incluyen en la Tabla 2. Cada una de estas adiciones tiene efectos y aplicaciones específicas. Así, por ejemplo, los cementos portland con escoria de alto horno son de moderado calor de hidratación, baja retracción y sensibles a las bajas temperaturas; los cementos con caliza, por el contrario, se pueden emplear en climas fríos pero no son aptos para terrenos agresivos.

Adiciones	
Denominaciones	Designaciones
Escoria de horno alto	S
Humo de sílice	D
Puzolana natural	P
Puzolana natural calcinada	Q
Ceniza volante silíceo	V
Ceniza volante calcárea	W
Esquisto calcinado	T
Caliza L	L
Caliza LL	LL

Tabla 2. Tipos de adiciones

En función del uso de estas adiciones, los tipos de cemento anteriormente referidos se subdividen de la forma que se recoge en la Figura 4.


Tipos	Denominación	Designación	Composición (proporción en masa)													
			Componentes principales									Componentes minoritarios				
			Clinker K	Escoria de horno alto S	Humo de sílice D	Puzolana		Cenizas volantes			Calizas					
			Natural P	Natural calcinada Q	Silíceas V	Calcáreas W	Esquistos calcinados T	L	LL							
CEM I	Cemento pòrtland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
	Cemento pòrtland en escoria	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM II/B-S		65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM II	Cemento pòrtland con humo de sílice	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Cemento pòrtland con puzolana	CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Cemento pòrtland con ceniza volante	CEM II/B-V	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5
	Cemento pòrtland con esquistos calcinados	CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5
CEM II/B-L		65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5	
CEM II/A-LL		80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5	
Cemento pòrtland con caliza	CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5	
	CEM II/A-M	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
Cemento pòrtland mixto	CEM II/B-M	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM III	Cemento con escorias de alto horno	CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM IV/A	65-89	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM IV	Cemento puzolánico	CEM IV/B	45-64	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM V/A	40-64	18-30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM V	Cemento compuesto	CEM V/B	20-38	31-50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	

Figura 4. Tipos y subtipos de cemento. Fuente: Ministerio de Fomento (2008a).

Por otro lado, hay cementos con tres clases de resistencia, tal como se refleja en la Figura 5. Sus aplicaciones son obvias tras contemplar lo que se refleja en dicha figura, de forma que se usa una mayor clase resistente cuanto mayor sea la resistencia deseada para el hormigón. Téngase en cuenta que en esta última resistencia también influye la de los áridos.

Clase de resistencia	Resistencia a compresión UNE-EN 196-1			Tiempo de fraguado UNE-EN196-3		Estabilidad de volumen según UNE-EN 196-3	Calor de hidratación	
	Resistencia inicial (N/mm ²)		Resistencia nominal (N/mm ²)	Inicio (min)	Final (h)	Expansión (mm)	UNE-EN 196-9 (J/g)	UNE-EN 196-8 (J/g)
	2 días	7 días					28 días	41 horas
32,5 N	—	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 12	≤ 10	≤ 270
32,5 R	≥ 10,0	—						
42,5 N	≥ 10,0	—	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60			
42,5 R	≥ 20,0	—						
52,5 N	≥ 20,0	—	≥ 52,5	—	≥ 45			
52,5 R	≥ 30,0	—						

Figura 5. Prescripciones físicas de cementos comunes. Ministerio de Fomento (2008a).

 <p>UNIVERSIDADE DA CORUÑA</p> <p>EPS FERROL</p>	<p>MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO</p>	<p><u>Trabajo Fin de Grado</u></p> <p>Alumno: José Gómez Roibás</p>
--	--	--

Debido a razones de disponibilidad de datos para el modelo de evaluación de la sostenibilidad, el presente trabajo sólo contempla el empleo de los tres primeros tipos de cemento de la Tabla 1, y en particular:

- CEM I 52,5R: cemento portland con resistencia inicial elevada.
- CEM I 52,5N: cemento portland con resistencia inicial ordinaria.
- CEM I 42,5R: cemento portland de menor resistencia que los anteriores con resistencia inicial elevada
- CEM II/B-S: cemento portland con escoria de horno alto.
- CEM II/B-M: cemento portland mixto con todas las adiciones.
- CEM II/A-LL: cemento portland con caliza LL.
- CEM III/A: cemento con escoria de horno alto.

Áridos

Grava, arena y humo de sílice son los agregados que se contemplan en este trabajo para la preparación del hormigón.

Líquidos


En este caso, como es habitual, se emplea agua y un aditivo plastificante (en muy pequeña cantidad).

6. DOSIFICACIONES

En función del tipo de hormigón que se desee se utilizará una dosificación u otra. Por ejemplo, no es lo mismo si se quiere un hormigón de mayor resistencia, que se pueda trabajar con mayor facilidad, o si queremos que endurezca pronto.

Por otro lado, el ingeniero o el arquitecto no suelen establecer la dosificación del hormigón en su proyecto. Sin embargo, para poder hacer un análisis de la sostenibilidad mínimamente detallado, resulta necesario conocer la dosificación.

Por ello se ha introducido un número amplio de dosificaciones estándar en la hoja electrónica, que permite proyectar una cierta variedad de hormigones, sin necesidad de hacer los cálculos necesarios para determinar su dosificación. De

 <p>UNIVERSIDADE DA CORUÑA</p> <p>EPS FERROL</p>	<p align="center">MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO</p>	<p align="center"><u>Trabajo Fin de Grado</u></p> <p>Alumno: José Gómez Roibás</p>
--	---	---

todas formas, la hoja permite también introducir dosificaciones diferentes a las estándar, calculadas previamente por el usuario.

En la hoja electrónica de datos de las dosificaciones se muestran características como la resistencia a la compresión, el tiempo de amasado, ratios de los componentes o el tipo de plastificante.

7. EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD. RESUMEN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS COMPARATIVO.


Para la evaluación de sostenibilidad se ha utilizado la herramienta informática MIVES (<http://www.etcg.upc.edu/prj/mives>), correspondiente al método del mismo nombre (Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible). Se trata de una metodología de soporte a la toma de decisiones. Permite trasladar las diferentes características de los objetos a evaluar a una serie de parámetros homogéneos y cuantificables, que faciliten la objetivización de la elección.

Tan solo se ha utilizado este programa para la realización de las funciones de valor.

El modelo de evaluación que se ha creado se explica con detalle en el Anejo 2 a esta memoria. A continuación se hace un resumen del trabajo realizado en materia de evaluación de la sostenibilidad.

El método MIVES se basa en la creación de un árbol de requerimientos que incluye los diferentes parámetros del modelo de evaluación. En la Tabla 3 se muestra el árbol que se ha generado para evaluar la sostenibilidad de la viga bi-apoyada motivo de este trabajo. Este árbol, al igual que el resto del modelo, es aplicable a otros elementos estructurales de hormigón armado. El árbol de requerimientos es un grafo jerárquico estructurado en varios niveles, que se suelen llamar requerimientos, criterios e indicadores de sostenibilidad.


Tras ello hay que establecer la importancia de cada uno de los indicadores, criterios y requerimientos; es decir, los pesos de cada uno de ellos. Cuando en un nodo del árbol hay cuatro o menos ramales, esto se puede hacer de manera directa. Este es el caso, por ejemplo, de los indicadores de costes. Cuando hay más de

 <p>UNIVERSIDADE DA CORUÑA</p> <p>EPS FERROL</p>	<p align="center">MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO</p>	<p align="right"><u>Trabajo Fin de Grado</u></p> <p>Alumno: José Gómez Roibás</p>
--	---	--

cuatro ramales colgando de un mismo nodo, las personas que intervienen en este proceso pueden perder la visión de conjunto y establecer pesos inadecuados. En estos casos se puede usar el Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process; AHP; Saaty 2006), que sirve para evitar este problema. En él se hacen comparaciones de la importancia o peso de los diferentes ramales, dos a dos, realizándose determinadas comprobaciones matemáticas para comprobar que a lo largo del proceso no ha habido incoherencias. En la Tabla 3 se pueden observar los diferentes indicadores empleados.

Requerims.	Criterios	Indicadores
Económico	Costes directos	(1) Coste de construcción
		(2) Coste de mantenimiento
Medio-ambiental	Consumo de recursos	(3) Consumo de energía primaria
		(4) Consumo de agua
		(5) Consumo de materias primas
		(6) Empleo de áridos reciclados
	Impactos sobre el medio	(7) Calentamiento global (CO ₂)
		(8) Potencial de acidificación (SO ₂)
		(9) Destrucción capa de ozono
	Medidas correctoras	(10) Reciclaje de residuos
		(11) Reducción de impactos en el entorno de la obra
		(12) Aprovechamiento del agua
	Certificaciones	(13) Certificaciones de materiales
	Social	Creación de empleo
(15) Temporalidad		
Seg&Salud		(16) Seguridad y Salud
Consumo local		(17) Consumo local
Estética		(18) Estética
Información al ciudadano	(19) Página Web de información al ciudadano	

Tabla 3. Árbol de requerimientos generado

 <p>UNIVERSIDADE DA CORUÑA</p> <p>EPS FERROL</p>	<p align="center">MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO</p>	<p align="center"><u>Trabajo Fin de Grado</u></p> <p>Alumno: José Gómez Roibás</p>
--	---	---

Tras ello hay que establecer las funciones de valor, que sirven para convertir las magnitudes de cada uno de los diferentes indicadores a un único tipo de parámetro adimensional, llamado valor, o índice de satisfacción. Esto permite, por un lado, poder realizar operaciones matemáticas con los valores de los indicadores, cosa que no sería factible sin este método, al estar cada indicador expresado en diferentes unidades y escalas. Por otro lado, las funciones de valor sirven para establecer posibles no linealidades en la evaluación. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de función de valor usada en este trabajo. Es la usada para el indicador de calentamiento global. Es un indicador que mide la concentración de gases de efecto invernadero, mediante un indicador de emisiones de CO₂. Aquí la función de valor elegida tiene una geometría no lineal, cóncava decreciente, que castiga valores altos de emisión. Para definir las funciones de valor hay que establecer los posibles valores mínimos y máximos que pueden tomar los diferentes indicadores, por encima y por debajo de los cuales el nivel o índice de satisfacción es nulo o máximo (normalmente, 1).

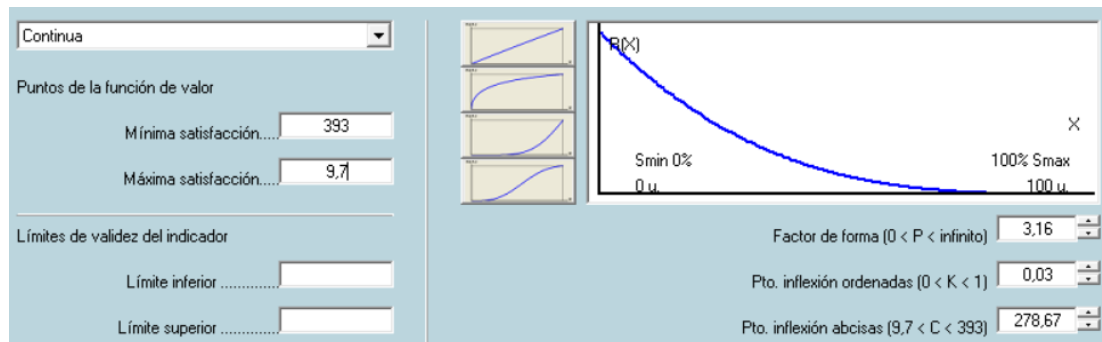


Figura 6: Función concentración gases efecto invernadero.

Aquí tan solo se ha utilizado el programa para establecer la forma de las funciones y obtener los parámetros necesarios para introducir en las fórmulas. Luego se ha utilizado la hoja electrónica en cuestión para establecer el índice de sostenibilidad como se muestra en la Figura 7.

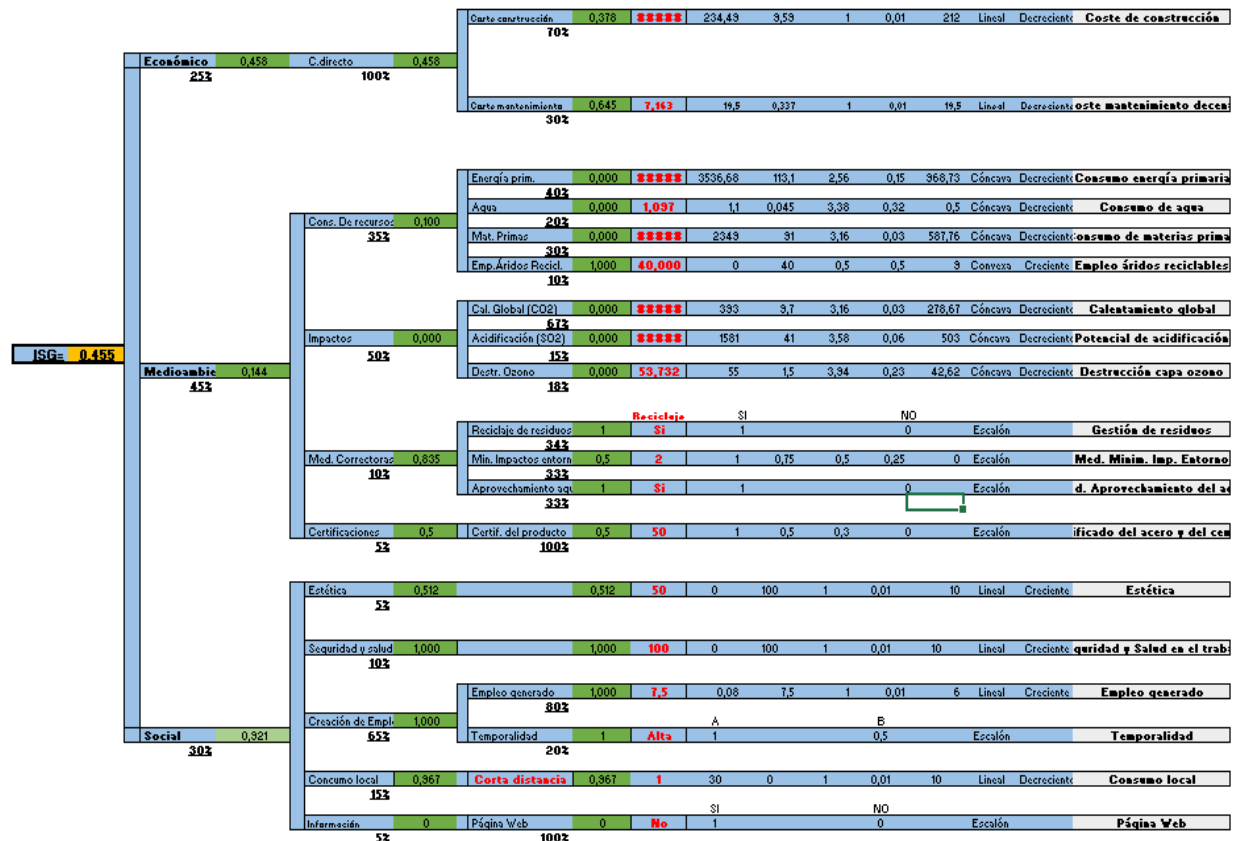



Figura 7: Esquema evaluación índice sostenibilidad

8. HOJA ELECTRÓNICA

Como ya se ha dicho anteriormente, la elaboración de esta hoja electrónica es el verdadero objetivo de este TFG, que nos permita evaluar la sostenibilidad de una viga de hormigón armado, de forma que se determine si una viga tiene un mayor o menor nivel de sostenibilidad que otra en función de posibles diferencias que haya entre ellas, relativas a las dimensiones de su sección, el tipo de ejecución o la dosificación del hormigón, entre otros aspectos. En el Anejo 3 a esta memoria se indica cómo utilizar dicha hoja electrónica.

 <p>UNIVERSIDADE DA CORUÑA</p> <p>EPS FERROL</p>	<p>MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO</p>	<p><u>Trabajo Fin de Grado</u></p> <p>Alumno: José Gómez Roibás</p>
--	--	--

9. CASO PRÁCTICO DE APLICACIÓN

Sea una nave industrial con estructura de hormigón prefabricado. En su interior hay diversas plataformas de proceso que también son de hormigón prefabricado. Una de dichas plataformas de proceso debe tener 5 x 5 m en planta; se trata de un forjado prefabricado de hormigón, unidireccional, que se apoya sobre dos vigas. Cada una de estas vigas se apoya sobre la coronación de dos pilares que hay bajo cada extremo de la viga. Entre la parte inferior del extremo de cada viga y su pilar de apoyo hay una lámina de neopreno. La anchura del apoyo es aproximadamente la misma que la anchura de la viga, y la longitud de apoyo es de 20 cm.

Se trata de una plataforma de paso que normalmente no va a soportar equipos de proceso, pero que puede alojar momentáneamente algunos equipos de proceso de gran peso, durante determinadas operaciones de mantenimiento o reparación.

El forjado ya ha sido calculado y pesa 13.500 kg, incluyendo las oportunas barandillas que rodean a la plataforma. A ello habrá que sumar el peso propio de las vigas que soportan dicho forjado.

Debe considerarse una sobrecarga de uso de 1.700 kg/m² sobre toda la superficie del forjado. Esta sobrecarga incluye el peso del personal que puede circular sobre la plataforma, así como del equipo que puede llevar consigo dicho personal, y los ya mencionados equipos de proceso de gran peso.


No se prevé la posibilidad de que la estructura pueda sufrir daños causados por impactos o explosiones.

Se consideran permanentes las cargas de peso propio de los elementos portantes (estructura, forjados) y no portantes (barandillas, en este caso).

En este caso se considera que las cargas variables existentes son las que corresponden a la sobrecarga de uso ya referida.

No hay posibles cargas accidentales por impactos, explosiones, incendio o sismo.

A efectos de Estados Límite Últimos (ELU) se usarán coeficientes de minoración de la resistencia del hormigón y del acero $\gamma_c = 1,5$ y $\gamma_s = 1,15$, respectivamente. Por otro lado, se aplicarán, respectivamente, coeficientes de mayoración de cargas $\gamma_G = 1,35$ para las cargas permanentes, y $\gamma_Q = 1,5$ para la carga variable dominante, siempre

 <p>UNIVERSIDADE DA CORUÑA</p> <p>EPS FERROL</p>	<p align="center">MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO</p>	<p align="center"><u>Trabajo Fin de Grado</u></p> <p>Alumno: José Gómez Roibás</p>
--	---	---

que dichas cargas tengan efectos desfavorables. En el caso que nos ocupa no hay cargas accidentales y no existe más que una carga variable y, en consecuencia, sólo es necesario contemplar una hipótesis de carga, en la cual se sumen las cargas permanentes y las variables, adecuadamente mayoradas.

A efectos de Estados Límite de Servicio (ELS) se usarán coeficientes $\gamma_c = \gamma_s = 1$, y, en el caso más desfavorable, $\gamma_G = \gamma_Q = 1$, comprobándose la estructura a fisuración y flecha, no habiendo posibles vibraciones que afecten a la estructura.

Proyéctese la viga de apoyo, con longitud total de 5 m, luz estructural en función de lo ya dicho con respecto a sus apoyos (luz estructural = $l = 5 - 2 \cdot 0,2/2 = 4,8\text{m}$). La viga debe ser una viga de canto (no plana).

Empléese hormigón H-40 y acero B-500-SD. Se empleará un árido de tamaño máximo de 15 mm. El recubrimiento ($r + \Delta r$) debe ser de 30 mm. Supóngase una dosificación con los siguientes componentes:


Cemento I /52,5R(kg)	390
Grava (kg)	710
Arena (kg)	1140
Agua (l)	158
Plastificante (l)	4,8
Humo de sílice (kg)	0

Tabla 4: Dosificación

Con respecto a la esquadría de la viga, podemos usar las tablas de la norma NTE-EHV para hacer un predimensionado preliminar, para lo cual necesitamos estimar el flector de cálculo. Si, por ahora, despreciamos el peso propio de la viga, la carga repartida que soporta la viga es $C_t = G \cdot \gamma_G + Q \cdot \gamma_Q = 8,20 \text{ t/m}$ de viga, siendo G y Q las cargas permanente y variable, que valen $G = 1,35 \text{ t/m}$ y $Q = 4,25 \text{ t/m}$. A la carga permanente hay que sumarle el peso propio de la viga.

Con ello, el momento de cálculo es $M_d = C_t \cdot l^2/8 = 23,6 \text{ t} \cdot \text{m} = 236 \text{ kN} \cdot \text{m}$.

Aplicando la tabla de predimensionado de la NTE-EHV, resulta una sección de 25x80 cm. Recordemos que estas tablas dan secciones sobredimensionadas para los hormigones actuales, como veremos más adelante. Ese sobredimensionado nos deja del lado de la seguridad, pero nada nos impide reducir la sección, como vamos a ver más tarde.

 <p>UNIVERSIDADE DA CORUÑA</p> <p>EPS FERROL</p>	<p align="center">MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO</p>	<p align="center"><u>Trabajo Fin de Grado</u></p> <p>Alumno: José Gómez Roibás</p>
--	---	---

Por otro lado, podemos hacer un predimensionado más fino, con mayor precisión, si hacemos que $\mu = M_d / U_c \cdot d = M_d / f_{cd} \cdot b \cdot d^2$ tome valores entre 0,2 y 0,3, para estimar con ello el canto de la viga, siendo M_d el momento flector de cálculo, U_c la capacidad mecánica del hormigón, f_{cd} la resistencia de cálculo del hormigón, b el ancho de la viga, y del canto útil de la misma.

En este caso, suponiendo una viga de 25x80 cm de sección, e incluyendo su peso propio, la carga repartida que soporta la viga es $C_t = G \cdot \gamma_G + Q \cdot \gamma_Q = 8,54$ t/m de viga, siendo G y Q las cargas permanente y variable, que valen $G = 1,60$ t/m y $Q = 4,25$ t/m.

El momento de cálculo es $M_d = C_t \cdot l^2 / 8 = 24,6$ t·m = 246 kN·m.

Por otro lado, $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c = 40 / 1,5 = 26,7$ MPa = 26.667 kN/m².

En consecuencia: $\mu = M_d / U_c \cdot d = M_d / f_{cd} \cdot b \cdot d^2 = 246$ kN·m / (26.667 kN/m² · $b \cdot d^2$).

Para poder despejar d necesitamos fijar previamente un valor para b , que habitualmente estará entre $h/2$ y $h/3$, con un mínimo de 25 cm. Hagamos $b = h/2,5$. Para determinar h en función de d , podemos aproximar de forma que $d =$ canto útil $\simeq h -$ recubrimiento, pero esto nos llevaría a una ecuación cúbica de resolución no directa. Para mayor simplicidad, podemos aproximar de forma que $d \simeq h$.

Con ello queda $b = d/2,5$ y, en base a ello, $\mu = 246$ kN·m / (26.667 kN/m² · $b \cdot d^2$) \simeq 246 kN·m / [26.667 kN/m² · $d^2 \cdot d/2,5$] = 246 kN·m / [26.667 kN/m² · $d^3 / 2,5$].

Si hacemos $0,2 = \mu = 246$ kN·m / [26.667 kN/m² · $d^3 / 2,5$] y despejamos d , resulta $d = 0,49$ m y $b = h/2,5 \simeq d/2,5 = 0,19$ cm. Redondeando: $h = 50$ cm y $b = 25$ cm (b debe ser mayor o igual que 25 cm).

Si hacemos $0,3 = \mu$ resulta $d = 0,43$ m y $b = h/2,5 \simeq d/2,5 = 0,17$ cm. Redondeando: $h = 45$ cm y $b = 25$ cm.


Si hacemos $b = h/2$ y $\mu = 0,2$, redondeando resulta $h = 45$ cm y $b = 25$ cm.

Si hacemos $b = h/2$ y $\mu = 0,3$, redondeando resulta $h = 40$ cm y $b = 25$ cm.

Si hacemos $b = h/3$ y $\mu = 0,2$, redondeando resulta $h = 55$ cm y $b = 25$ cm.

Si hacemos $b = h/3$ y $\mu = 0,3$, redondeando resulta $h = 45$ cm y $b = 25$ cm.

Por tanto, la sección debería tener un canto h entre 40 y 55 cm, con ancho $b = 25$ cm.

 UNIVERSIDADE DA CORUÑA EPS FERROL	MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO	<u>Trabajo Fin de Grado</u> Alumno: José Gómez Roibás
--	--	---

Por otro lado, para casos normales de vigas de HA, si se desea que no haya problemas de flecha y, por tanto, no tener que hacer comprobaciones a flecha, de acuerdo con la EHE-08, en el caso de vigas simplemente apoyadas se debe tomar un canto $d > L/14$. Por tanto $d > 4,8\text{m}/14 = 0,34 \text{ m}$. Con un recubrimiento de 3 cm queda $h=0,37 \text{ m}$. Redondeando, debe ser $h \geq 40 \text{ cm}$, lo cual se cumple con los predimensionados anteriores.

En consecuencia, se van a suponer las dos posibilidades extremas:


- Una con sección de 25 cm de ancho y 40 cm de canto (Caso 1).
- Otra con sección de 25 cm de ancho y 55 cm de canto (Caso 5).

Las condiciones que tienen que ver con la fabricación de la viga son las siguientes:

Prefabricado/In situ	Prefabricado
Encofrados especiales/convencionales	Convencionales
Hormigón autocompactante/convencional	Convencional
Con/Sin tratamientos superficiales	Sin tratamientos superficiales
Con/Sin bombeo	Sin bombeo
¿Se utiliza grúa?	No
Distancia en km	5
¿Existe página web de información?	No
Porcentaje de áridos reciclables (%)	30
¿Hay medidas de aprovechamiento del agua?	Si
Gestión de residuos (medidas más allá de la legislación vigente)	Si
¿Cemento con certificado?	Si
¿Acero con certificado?	Si
¿Dispositivos para minimizar impactos en el entorno?	Si
¿Aspersores?	No
¿Medidas para minimizar el ruido?	Si
¿Medidas para minimizar los olores?	No
¿Papeleras?	Si
¿Certificado OHSAS del contratista?	Si
¿Certificado OHSAS de la empresa de prefabricados?	Si

Tabla 5: Condiciones de aplicación

Después de establecer las condiciones anteriores para la fabricación de la viga se van a suponer diferentes opciones y así determinar cuál va a ser la que puede

 <p>UNIVERSIDADE DA CORUÑA</p> <p>EPS FERROL</p>	<p align="center">MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO</p>	<p align="center"><u>Trabajo Fin de Grado</u></p> <p>Alumno: José Gómez Roibás</p>
--	---	---

cumplir los requisitos y ser mejor en criterios de sostenibilidad. Las opciones propuestas son las siguientes:

CASO 1

Dimensiones: 25cm de ancho y 40cm de canto.

No se puede establecer una combinación válida para estas dimensiones de viga. Con las armaduras propuestas en la tabla 6, las armaduras a tracción no entrarían en el ancho de la viga. Por otro lado, tampoco se cumplen los requisitos de fisuración por compresión para la combinación poco frecuente y de flecha máxima.

Adoptando barras de 32mm entrarían a lo ancho de la viga pero se seguirán incumpliendo los requisitos de fisuración por compresión y de flecha y además, se tendría que aumentar el recubrimiento, ya que el considerado es de 30mm y tiene que ser mayor que el de la armadura de mayor dimensión.

Si se cumpliesen todos los requisitos sería la viga con mayor índice de sostenibilidad.

CASO 2

Dimensiones: 25cm de ancho y 48cm de canto.

Partiendo del ancho inicial, se buscan las dimensiones de canto que cumplen todos los requisitos. Con estas dimensiones y disponiendo las armaduras de la tabla 6 se cumplirán todos los criterios y además nos encontramos en dominio 3 (máximo aprovechamiento).

Con todo, en la fabricación de vigas las dimensiones van de 5 en 5 cm, y por tanto el canto no sería una dimensión de uso común.

CASO 3


Dimensiones: 37cm de ancho y 40cm de canto.

Ahora, se hace lo mismo pero manteniendo el canto inicial y aumentando el ancho. Las primeras dimensiones que cumplen son las propuestas y también nos encontramos en dominio 3.

Al igual que en el caso anterior, ahora el ancho no sería una dimensión de uso común.

CASO 4

Dimensiones: 30cm de ancho y 45cm de canto.

 UNIVERSIDADE DA CORUÑA EPS FERROL	MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO	<u>Trabajo Fin de Grado</u> Alumno: José Gómez Roibás
--	--	---

Se ha propuesto este caso, ya que cumple todos los requisitos y además la viga tiene dimensiones de uso común. Las armaduras utilizadas se muestran en la tabla 6. Para esta opción se sigue en dominio 3.

CASO 5

Dimensiones: 25 cm de ancho y 55cm de canto.

Al igual que en el caso anterior, son medidas totalmente válidas. Ahora, nos encontraríamos en dominio 2.

Comparando estos dos últimos casos, tenemos mayor índice de sostenibilidad en el caso 5 a pesar de encontrarnos en dominio 2. Esto es debido a que en el caso 4, se va a necesitar mayor cantidad de armaduras (una barra longitudinal más a tracción) y estribos menos separados. Por otro lado, las armaduras tienen mayores costes que el hormigón, y además más emisiones a la atmósfera.

- Armaduras

		Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4		Caso 5	
		Φ (mm)	Nº	Φ (mm)	Nº	Φ (mm)	Nº	Φ (mm)	Nº	Φ (mm)	Nº
Flexión	Compr. (Superior)	8	2	8	2	8	3	10	2	10	2
	Tracción (Inferior)	25	4	25	3	25	4	20	5	20	4
Cortante	Estribos	10	1 cada 10 cm	10	1 cada 15 cm	10	1 cada 10 cm	10	1 cada 15 cm	10	1 cada 20 cm


Tabla 6. Armaduras para los cinco casos

- Dominio

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Dominio	3	3	3	3	2

Tabla 7. Dominio de deformaciones para los cinco casos

Indicadores	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5

 UNIVERSIDADE DA CORUÑA EPS FERROL	MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO	Trabajo Fin de Grado Alumno: José Gómez Roibás
--	--	--

1. Coste de construcción	0,916	0,926	0,895	0,919	0,929
2. Coste de mantenimiento	0,968	0,958	0,944	0,951	0,949
3. Consumo de energía primaria	0,958	0,955	0,930	0,946	0,950
4. Consumo de agua	0,960	0,946	0,914	0,931	0,931
5. Consumo de materias primas	0,895	0,86	0,804	0,831	0,826
6. Empleo de áridos reciclados	0,919	0,919	0,919	0,919	0,919
7. Calentamiento global (CO2)	0,705	0,669	0,587	0,632	0,635
8. Potencial de acidificación (SO2)	0,906	0,904	0,855	0,888	0,897
9. Destrucción capa de ozono	0,630	0,629	0,528	0,595	0,615
10. Reciclaje de residuos	1	1	1	1	1
11. Reducción de impactos en el entorno de la obra	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
12. Aprovechamiento del agua	1	1	1	1	1
13. Certificaciones de acero y cemento	1	1	1	1	1
14. Empleo generado	0,057	0,070	0,089	0,081	0,082
15. Temporalidad	1	1	1	1	1
16. Seguridad y Salud	1	1	1	1	1
17. Consumo local	0,835	0,835	0,835	0,835	0,835
18. Estética	0,512	0,512	0,512	0,512	0,512
19. Página Web	0	0	0	0	0

Tabla 8. Valores de los indicadores para los cinco casos

Requerimiento	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Económico	0,932	0,936	0,910	0,929	0,935
Medioambiental	0,822	0,805	0,753	0,782	0,786
Social	0,411	0,418	0,427	0,423	0,424


Tabla 9. Valores de los requerimientos para los cinco casos

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Índ. Sostenibilidad Global (ISG)	0,724	0,721	0,694	0,711	0,715

Tabla 10. Valor del Índice de Sostenibilidad Global (ISG) para los cinco casos

En las tablas 8, 9 y 10 se presentan los resultados de la evaluación de la sostenibilidad. Tal y como se muestra, la viga del caso 1, que no cumple todos los requisitos, aunque muy leve, presenta un mayor índice de sostenibilidad global.

En la tabla 11 se muestran datos de las emisiones y consumos referentes a los indicadores medioambientales para los casos 4 y 5. Como se puede observar, aunque el caso 4 tiene menores dimensiones, necesita más cantidad de armaduras y los

 UNIVERSIDADE DA CORUÑA EPS FERROL	MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO	<u>Trabajo Fin de Grado</u> Alumno: José Gómez Roibás
--	--	---

consumos y emisiones, excepto el consumo de materias primas y el consumo de agua, van a ser superiores.

Consumos y emisiones	caso 4	caso 5
Cons. Materias primas (kg)	2036,40	2070,94
Consumo de agua (m ³)	0,931	0,936
Cons. Energía primaria (MJ)	2935,50	2843,08
Calentamiento global (kg _e CO ₂)	315,68	313,43
Potencial de acidificación (g _e SO _x)	1269,09	1214,08
Form. Fotoq. Ozono (g)	47,78	45,53


Tabla 11. Consumos y emisiones- Indicadores medioambientales para los casos 4 y 5

Aunque en vigas de hormigón armado no se utiliza acero primario se ha hecho un análisis manteniendo todas las condiciones anteriores excepto que ahora se utiliza acero de este tipo, y se ha visto que el índice de sostenibilidad global para la viga de mayor canto sigue siendo mayor, pero ahora con más diferencia debido a que a mayor cantidad de acero se hace más importante. Esto es debido a que la utilización de acero primario perjudica en gran medida el aspecto medioambiental.

Si ahora por ejemplo, utilizamos una sección de viga de 25x80cm propuesta por la tabla de predimensionado de la NTE-EHV, mismas condiciones que en el caso 5, y además mantenemos las mismas dimensiones de las armaduras tenemos un ISG=0,676. Como se ve en este caso, tenemos un índice de sostenibilidad inferior a los casos anteriores. Mayor coste de construcción y mayores emisiones a pesar de que ahora en las armaduras a tracción solo necesitamos tres barras. Por el contrario en las armaduras a compresión pasamos a necesitar tres barras.

Otro caso que se cree oportuno mostrar, es el caso de si la viga es construida in situ. Manteniendo las mismas condiciones que para el caso 5, pero in situ, ahora tenemos un ISG de 0,659. Como se puede observar, se reduce (antes era de 0,715).

Si ahora mantenemos las mismas condiciones que el caso 5 pero con la dosificación 3 en vez de la 15 tenemos un ISG=0,703, como se puede ver cambia pero poco.

 <p>UNIVERSIDADE DA CORUÑA</p> <p>EPS FERROL</p>	<p>MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO</p>	<p><u>Trabajo Fin de Grado</u></p> <p>Alumno: José Gómez Roibás</p>
--	--	--

10. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS


Este TFG cumple con el alcance establecido por los tutores, siendo acorde con la propuesta de TFG enviada por los tutores a la Comisión de TFGs. Dicho alcance sólo incluía la generación de la herramienta informática que se ha presentado aquí.

Tras desarrollar dicha herramienta y aplicarla a varios casos prácticos que se acaban de abordar, se concluye que no necesariamente proyectar en dominio 3 va a ser mejor que hacerlo en dominio 2, a efectos de sostenibilidad. En general, al aprovecharse al máximo los materiales, un dimensionado en dominio 3 debe ser más eficiente estructuralmente que uno en dominio 2. Por tanto, la intuición indica que un dimensionado en dominio 3 debería ser más sostenible. No obstante, como se ha visto, esto no siempre va a ser así. Como se ha explicado al principio de este epígrafe, el alcance de este TFG no incluía realizar análisis en los cuales se llegase a conclusiones sobre estos aspectos. Por tanto, un posterior desarrollo que debe hacerse es utilizar la herramienta para resolver muchos casos, con objeto de llegar a conclusiones acerca del grado de sostenibilidad de diferentes dosificaciones, escuadrías y dimensionamientos, entre otros aspectos que se pueden hacer variar.


Una posible manera de hacerlo es mediante simulación tipo Monte Carlo, o empleando otras técnicas más sofisticadas de simulación. Con ellas, para una luz y carga dadas, se pueden simular de forma rápida y automática cientos o miles de posibilidades, empleando diferentes dosificaciones, resistencias de hormigón y acero, escuadrías y dimensionamientos, entre otras posibilidades, para buscar la solución que conlleva una mayor sostenibilidad.

11. BIBLIOGRAFÍA

- AENOR (1992). Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Norma EN1992-1-1. Reglas generales y reglas para edificación.
- “Base de costes de la construcción de Andalucía (2014)”, Consejería de Fomento y Vivienda.,
<http://www.juntadeandalucia.es/fomentoyvivienda/portal-web/web/areas/vivienda/texto/7a0899c8-0038-11e4-8cc4-27ee69a25823>.

 UNIVERSIDADE DA CORUÑA EPS FERROL	MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO	<u>Trabajo Fin de Grado</u> Alumno: José Gómez Roibás
--	--	---

- “Base de precios de la construcción de la comunidad de Madrid (2015)”, Área de Normativa Técnica, Supervisión y Control, www.madrid.org/bdccm/.
- FIB (2012). “Guidelines for Green concrete structures”. Bulletin N° 67. Prepared by the Task group 3.8. Federation Internationale du Beton (FIB).
- FIB (2013). “Integrated life cycle assessment of concrete structures”. Bulletin N° 71. Prepared by the Task group 3.7. Federation Internationale du Beton (FIB).
- FYM Italcementi group, (2013), “Tarifa de precios 2013”, www.fym.es.
- Generador de precios de la construcción. España. CYPE Ingenieros, S.A. www.generadordeprecios.info.
- Gómez, D., del Caño, A., de la Cruz, MP (2016), “Dimensionamiento de vigas de hormigón armado sometidas a flexión simple y a cortante” Apuntes. Departamento de Ingeniería Industrial II. Escuela Politécnica Superior. Universidade da Coruña.
- Gómez, D., del Caño, A., de la Cruz, MP., Josa, A. (2012) “Metodología genérica para la evaluación de la sostenibilidad de sistemas constructivos. El método MIVES”. En: Sostenibilidad y construcción. Editor: A. Aguado. Asociación Científico-Técnica del Hormigón (ACHE). Cap. 18, pp. 385-411.
- Mel, J., del Caño, A., de la Cruz, M.P. (2014a). Sostenibilidad en la fabricación de cemento en España: análisis del consumo energético y de las emisiones de CO2. Proceedings of the AEIPRO-IPMA 18th International Congress on Project Management and Engineering, Alcañiz (Spain), 16-18 July, 2014, pp. 02-001-1/16.
- Mel, J., del Caño, A., de la Cruz, M.P. (2014b). Sostenibilidad en la producción de árido granítico en el noroeste de España: consumo energético y emisiones de CO2. Proceedings of the AEIPRO-IPMA 18th International Congress on Project Management and Engineering, Alcañiz (Spain), 16-18 July, 2014, pp. 02-002-1/12.
- Mel, J., del Caño, A., de la Cruz, M.P. (2014c). Sostenibilidad en la fabricación de armaduras de acero en España: análisis del consumo energético y de las emisiones de CO2. Proceedings of the AEIPRO-IPMA 18th International Congress on Project Management and Engineering, Alcañiz (Spain), 16-18 July, 2014, pp. 02-003-1/9.
- Mel, J., del Caño, A., de la Cruz, M.P. (2014d). Sostenibilidad en la preparación y puesta en obra de hormigón en España: análisis de consumo

 <p>UNIVERSIDADE DA CORUÑA</p> <p>EPS FERROL</p>	<p>MODELO INTEGRADO DE DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE UNA VIGA ISOSTÁTICA DE HORMIGÓN ARMADO</p>	<p><u>Trabajo Fin de Grado</u></p> <p>Alumno: José Gómez Roibás</p>
--	--	--

energético y emisiones de CO₂. Proceedings of the AEIPRO-IPMA 18th International Congress on Project Management and Engineering, Alcañiz (Spain), 16-18 July, 2014, pp. 02-004-1/12.

- Mel, J., del Caño, A., de la Cruz, M.P. (2013). Análisis del consumo energético y de las emisiones de CO₂ en la construcción de estructuras de hormigón en España. Dyna, nº 88(1) (febrero 2013), pp. 59-67.
- Mel, J., Gómez, D., de la Cruz, P., del Caño, A. (2015). Análisis de sensibilidad y estudio crítico del modelo de evaluación de la sostenibilidad de la Instrucción Española de Hormigón Estructural. Informes de la Construcción (CSIC), 67(539): e106, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.126>.
- Meseguer, A., Morán, F., Arroyo, J.C. (2009), "Jiménez Montoya. Hormigón armado", Gustavo Gili (Barcelona).
- Ministerio de Fomento (2008a). Instrucción para la recepción de cementos RC-08. Ministerio de Fomento.
- Ministerio de Fomento (2008b). Instrucción de hormigón estructural EHE-08. Ministerio de Fomento.
- Montero, J., Galletero, P. (1999). Estado Límite Último de agotamiento por cortante. Universidad de Castilla-La Mancha. ETS de Ingenieros Agrónomos.
- Patrick Bonnel, Martin Lee-Gosselin, Johanna Zmud, Jean-Loup Madre, (2009), "Transport Survey Methods", Emerald.
- Saaty, T.L. (2006), "Fundamentals of decision making and priority theory with the Analytic Hierarchy Process" (Vol. VI of AHP Series), RWS Publications, Pittsburg, PA, USA.