

## SOFTWARE PARA DIMENSIONADO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES AISLADOS DE ACERO Y MADERA LAMINADA

José Luis Gutiérrez-López

*Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de La Rioja*

Oscar Sandín-Romano

*RIOGLASS, S.A.*

Ana González-Marcos

Álvaro Guerra-Sánchez-de-la-Nieta

*Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de La Rioja*

### Abstract

Technical Control Bodies (OCT) appeared as a result of the compulsory decennial insurance for buildings introduced by the Law of Construction Planning (LOE). They are responsible for verifying the structural safety conditions of a building, by controlling both the project documents and the work execution. During the revision phase of the project, the practice of many OCT is usually limited to request calculations in order to justify the adequacy of some structural elements. Hence, there is a need for analysis tools to verify these structural elements. Although the commercial software used in structural calculation in Spain provides "complete and integrated computing solutions", it presents significant gaps, especially in the verification of serviceability. For this reason, a new software for design of simple structural elements made of steel or wood has been implemented. The aim of this software is to automate the design of these elements taking into account their geometry, boundary conditions and loads. This tool is free, easy to use and can be used on any computer. Since it can be carried to the construction site -through a Netbook or Tablet PC-, it is also useful for quick checks or as a decision making support tool in situ.

**Keywords:** *simple structural elements; steel; wood*

### Resumen

Los Organismos de Control Técnico (OCT), aparecidos como consecuencia del Seguro Decenal obligatorio para los edificios –introducido por la Ley de Ordenación de la Edificación–, son los encargados de verificar la seguridad estructural del edificio, controlando tanto los documentos del proyecto como la ejecución de las obras. Gran parte de los OCT limitan su trabajo, en fase de revisión de proyecto, a solicitar justificaciones de cálculo de los elementos estructurales que consideran oportuno. Ello implica la necesidad de disponer de herramientas de análisis que permitan verificar dichos elementos estructurales. Puesto que los programas comerciales de cálculo de estructuras más utilizados en España, con vocación de "solución completa e integrada de cálculo", presentan carencias considerables especialmente en la comprobación a aptitud al servicio, se ha implementado un software de libre distribución que permite automatizar el dimensionado de elementos simples, de acero o de madera, partiendo únicamente de su geometría, condiciones de contorno y esfuerzos a los que está sometido. Dicha herramienta es sencilla de manejar y

puede usarse en cualquier ordenador, tanto en oficina como en obra -mediante un Netbook o Tablet PC-, pudiendo emplearse también para comprobaciones rápidas in situ o como apoyo para la toma de decisiones en obra.

**Palabras clave:** *elementos estructurales simples; acero; madera laminada*

## 1. Introducción

La aprobación mediante el Real Decreto 314/2006, en fecha 17 de marzo de 2006, del Código Técnico de la Edificación supone un importante punto de inflexión en el proyecto de edificios en general y de las estructuras de los mismos en particular.

Si bien no se modifica ni la norma de hormigón estructural vigente en ese momento, Instrucción de Hormigón Estructural (EHE/98), ni la normativa de forjados unidireccionales Instrucción para el proyecto y la ejecución de forjados unidireccionales de hormigón estructural realizados con elementos prefabricados (EFHE), las modificaciones que incluye el Código Técnico, principalmente en coeficientes parciales de seguridad y combinaciones de cálculo, obligan a la revisión de la normativa de hormigón estructural. Esto tiene como consecuencia la publicación de la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE/08), que aúna y actualiza las dos normativas anteriormente citadas.

Dentro del ámbito de las estructuras de edificación, el mayor cambio corresponde al resto de tipologías, esto es, a las estructuras de acero, madera y fábrica.

### 1.1 Situación normativa en España previa a la aprobación del Código Técnico de Edificación

Desde 1957, la preparación de la normativa técnica de la edificación -normas MV- fue responsabilidad del Ministerio de la Vivienda, tarea que antes desarrollaba la Dirección General de Arquitectura del Ministerio de Gobernación, creada en 1937.

En 1977 el Gobierno aprobó un marco unificado para la normativa de la edificación compuesto por:

- Normas Básicas de la Edificación (NBE), de obligado cumplimiento, dando rango de NBE a las entonces vigentes normas básicas MV.
  - Norma básica de la Edificación. Acciones en la Edificación (NBE AE-88). Real Decreto 1370/1988, 25 de julio.
  - Norma Básica de la Edificación NBE EA-95 "Estructuras de acero en edificación". Real Decreto 1829/1995, 10 de noviembre.
  - Norma Básica de la Edificación NBE FL-90 "Muros resistentes de fábrica de ladrillos". Real Decreto 1723/1990, 20 de diciembre.
- Normas Tecnológicas de la Edificación (NTE), sin carácter obligatorio, aprobadas en esa misma década, que servían como el desarrollo operativo de las NBE.
  - NTE-ECG: Estructuras. Cargas Gravitatorias. (15 y 19 junio 1976 /revisión 1 agosto 1988).
  - NTE-ECT: Estructuras. Cargas por Retracción. (21 abril 1973 /revisión 1 agosto 1988).
  - NTE-ECS: Estructuras. Cargas Sísmicas. (24 febrero 1973 /revisión 1 agosto 1988).
  - NTE-ECT: Estructuras. Cargas Térmicas. (7 abril 1973 /revisión 1 agosto 1988).
  - NTE-ECV: Estructuras. Cargas de Viento. (7 julio 1973 /revisión 1 agosto 1988).

- NTE-EAE: Estructuras. Espaciales. (6 septiembre 1986)
- NTE-EAF: Estructuras. Forjados. (24 noviembre 1973)
- NTE-EAS: Estructuras. Soportes. (8 enero 1983)
- NTE-EAV: Estructuras. Vigas. (18 y 25 enero 1975)
- NTE-EAZ: Estructuras. Zancas. (17 marzo 1982)
- NTE-EFB: Estructuras. Bloques. (3 y 10 agosto 1974).
- NTE-EFL: Estructuras.Ladrillo. (11 julio 1977).
- NTE-EFP: Estructuras. Piedra. (21 mayo 1980).
- Soluciones Homologadas de la Edificación (SHE), cuyo desarrollo no ha tenido lugar, que hubieran complementado, en el campo de las soluciones constructivas convencionales o tradicionales, a los Documentos de Idoneidad Técnica (DIT), evaluaciones técnicas favorables para las soluciones innovadoras otorgadas por el Instituto Eduardo Torroja.

Antes de la publicación del Código Técnico no existía ninguna Norma Básica en España que abarcara el cálculo de estructuras de madera

## 1.2 Eurocódigos estructurales

Con objeto de facilitar un mercado único europeo en el sector de la construcción, comenzó el desarrollo de los Eurocódigos en el año 1975.

Los Eurocódigos estructurales son una serie de normativas que pretenden eliminar las barreras técnicas que dificultan la comercialización de los productos de construcción entre los estados miembros. Están aprobadas por el Comité Europeo de Normalización (CEN) y tienen como ámbito de aplicación las estructuras de hormigón, de acero, mixtas, de fábrica, de madera y de aluminio, incluyendo Eurocódigos sobre acciones y estructuras sismorresistentes.

En el preámbulo de los Eurocódigos se especifica que esos documentos sirven para los siguientes propósitos:

- Constituirse en medio para demostrar el cumplimiento de las obras de edificación y de ingeniería civil con los requisitos esenciales de la Directiva del Consejo 89/106/CEE.
- Ser la base para especificar los contratos de las construcciones y de sus correspondientes servicios de ingeniería.
- Ser el marco para redactar las especificaciones técnicas armonizadas de productos de construcción, es decir las normas europeas y los documentos de idoneidad técnica europea.

Están publicados desde mediados de 2007. La Unión Europea dictaminó que en el año 2010 los diferentes países europeos no podrían tener normas en vigor que entraran en conflicto con los Eurocódigos. En este sentido, al contrario que otros países, España ha optado por una estrategia de convergencia consistente en actualizar (y no suprimir) su normativa nacional, basándola en los códigos europeos. El Código Técnico de la Edificación es un ejemplo claro de esta estrategia. Los enfoques del CTE y los Eurocódigos son prácticamente idénticos, con la salvedad de que el ámbito de aplicación del Eurocódigo incluye la ingeniería civil mientras que el Código Técnico se limita únicamente a la edificación. De hecho, una de las críticas más recurrentes al Código Técnico se ha basado en la idea de que era más conveniente adoptar directamente los Eurocódigos como única normativa nacional.

En el preámbulo de la publicación de la Norma NBE-EA95 se especificaba:

*“Esta agrupación constituye un paso previo al estudio y adaptación de esta norma al «Eurocódigo para las estructuras de acero», norma europea con carácter aún experimental, que habrá de realizarse con la participación de los sectores públicos y privados afectados.”*

Teóricamente, los Eurocódigos deben ser publicados por la organización de normalización nacional de cada país junto con los Documentos Nacionales de Aplicación (DNA), uno por cada parte del programa de los Eurocódigos. Los DNA definen una serie de parámetros que dependen de las condiciones particulares de cada país.

Actualmente en España, y consecuencia de la estrategia anteriormente mencionada, no hay publicado ningún Documento Nacional de Aplicación, lo que hace complicado el empleo de los Eurocódigos. Es práctica relativamente habitual el empleo de los Eurocódigos en aquellos ámbitos que la normativa española no cubre, obteniendo los datos particulares necesarios de la norma española (por ejemplo: acciones de viento, nieve, etc).

Como curiosa excepción se publicó junto con la EHE-98 y como Anejo nº13 el Documento Nacional de Aplicación de la norma UNE ENV 1992-1-1. Este interesante camino se abandonó en la siguiente edición de la instrucción de hormigón EHE-08.

### **1.3 Código Técnico de la Edificación. Seguridad Estructural**

En 1999 se publica la Ley 38/1999 de 5 de noviembre de Ordenación de la Edificación, LOE, que tiene como principal objetivo el de regular el sector de la edificación. La Ley fija los Requisitos Básicos de los edificios y actualiza y completa la configuración legal de los agentes que intervienen en el proceso de la edificación, fija sus obligaciones y establece las responsabilidades y las garantías de protección a los usuarios.

La Ley insta y autoriza al Gobierno para la aprobación de un Código Técnico de la Edificación mediante Real Decreto que establezca las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad.

El Código Técnico de la Edificación, CTE, es el marco normativo que establece y desarrolla las exigencias básicas de calidad de los edificios y sus instalaciones, y que permiten demostrar que se satisfacen los requisitos básicos de la edificación de la Ley.

El CTE da entrada a otros documentos que completan el marco reglamentario, los Documentos Reconocidos. Con el fin de facilitar el cumplimiento de las exigencias básicas del CTE, se establecen los denominados Documentos Reconocidos del CTE, definidos como documentos sin carácter reglamentario, que cuentan con el reconocimiento del Ministerio de Vivienda que mantendrá un registro público de los mismos.

Los Documentos Reconocidos pueden ser:

- Especificaciones y guías técnicas o códigos de buena práctica que incluyan procedimientos de diseño, cálculo, ejecución, mantenimiento y conservación de productos, elementos y sistemas constructivos;
- Métodos de evaluación y soluciones constructivas, programas informáticos, datos estadísticos sobre la siniestralidad en la edificación u otras bases de datos;
- Comentarios sobre la aplicación del CTE; o
- Cualquier otro documento que facilite la aplicación del CTE, excluidos los que se refieran a la utilización de un producto o sistema constructivo particular o bajo patente.

Los Documentos Reconocidos por definición son voluntarios y ayudan a la aplicación del CTE y a cumplir sus objetivos.

En el marco reglamentario de la edificación son de obligado cumplimiento otras reglamentaciones técnicas de carácter básico, como las Instrucciones de Hormigón EHE, la Norma de Construcción Sismorresistente, el Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios, RITE, otras normativas reglamentarias de seguridad industrial etc., que coexisten con el CTE y que en principio son referencias externas al mismo.

El CTE, tal como establece la LOE, puede completarse con las exigencias de otras normativas dictadas por las Administraciones competentes. Es decir, la normativa autonómica y local de aplicación en cada caso. Una de las principales novedades que introduce CTE respecto a la legislación anterior de la edificación en España es el enfoque por objetivos o prestaciones, que son el conjunto de características objetivas de un edificio que contribuyen a determinar su aptitud para responder a las diferentes funciones para las que fue diseñado.

Anteriormente, la regulación de la edificación había sido de carácter prescriptivo, es decir, establecía los procedimientos aceptados o las guías técnicas que debían seguirse a la hora de construir un edificio.

La intención del CTE, en la línea de la mayor parte de los países de nuestro entorno, es enunciar los criterios que deben cumplir los edificios pero dejando abierta la forma en que deben cumplirse estas reglas.

Se pretende con ello favorecer el desarrollo de tareas de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), así como un aumento del uso de las nuevas tecnologías en el sector de la construcción, al integrar de forma más directa los avances logrados gracias a estas actividades.

En el caso de las estructuras metálicas, es importante destacar que, en el momento de publicación de las normativas españolas anteriores al Código Técnico, no se dispone de las herramientas de cálculo que disponemos en la actualidad. Son normas concebidas para "cálculo manual", con métodos sencillos de cálculo y de fácil aplicación, sin las complejidades y refinamientos de las normativas actuales.

En cualquier caso, la larga vigencia de esta normativa, con la que se han calculado infinidad de estructuras en España, revela que fue una magnífica norma.

En el caso de la madera, la publicación del Código Técnico de estructuras de madera viene a cubrir un vacío normativo en un campo que, en contra de lo que podría pensarse, está en continuo crecimiento desde hace algunos años. Anteriormente era práctica muy extendida calcular las estructuras de madera, tanto aserrada como laminada, siguiendo las prescripciones del Eurocódigo 5. Es conveniente señalar que el CTE-SE-Madera es una transcripción casi literal del citado Eurocódigo 5, incluyendo las características de las clases de madera utilizadas en España.

#### **1.4 Consecuencias del cambio normativo en el cálculo de estructuras de edificación**

La aprobación de la Ley de Ordenación de la Edificación y del Código Técnico ha supuesto un cambio muy importante en todos los sectores de la edificación en general y en el sector de los técnicos proyectistas en particular.

En el caso concreto del diseño y cálculo de estructuras de edificación se modifica gran parte de la normativa aplicable, introduciendo exigencias y métodos de cálculo acorde con las herramientas informáticas disponibles en la actualidad. Los nuevos planteamientos requieren, por lo general, de un sistema de cálculo automático apropiado para poder dimensionar y verificar los elementos estructurales de manera eficiente.

Como consecuencia del Seguro Decenal obligatorio para los edificios, introducido por la Ley de Ordenación de la Edificación, aparece una nueva figura que modifica considerablemente

la metodología de trabajo: los Organismos de Control Técnico (OCT). Estos Organismos, teóricamente independientes, son los encargados de verificar la seguridad estructural del edificio, controlando tanto los documentos del Proyecto como la ejecución de las obras. Gran parte de los OCTs limitan su trabajo, en fase de revisión de proyecto, a solicitar justificaciones de cálculo de los elementos estructurales que consideran oportuno. Ello implica que es necesario disponer de herramientas de análisis que permitan verificar, de manera precisa y rigurosamente adaptadas a normativa, los elementos estructurales.

## **2. Análisis de los programas de cálculo de estructuras más empleados en España**

En este apartado se analiza la situación de las herramientas de cálculo más empleadas, estimando su grado de adecuación a la normativa vigente en España, en este caso al Código Técnico de la Edificación.

Se divide el análisis, por un lado en el sistema de introducción de datos y obtención de resultados, y por otro, en las dos exigencias básicas habituales: capacidad portante y aptitud al servicio.

### **2.1 Sistemas de introducción de datos y obtención de resultados. Interfaz de usuario**

Los programas de cálculo de estructuras de edificación en España se dividen básicamente en programas con la intencionalidad de dimensionado completo de estructuras en tres dimensiones y en programas sencillos de cálculo de elementos de un determinado material. Los dos programas comerciales más empleados, CypeCad y Tricalc, tienen como objetivo que el usuario introduzca todos los datos necesarios para la definición completa del edificio y obtenga, tras un proceso de cálculo bastante opaco, unos planos que sirvan para ejecutar la estructura. El otro tipo de programa suele ser de libre distribución, con alcance limitado, pero de gran utilidad práctica al permitir análisis simplificados de piezas con los datos de partida estrictos, lo que les confiere una gran rapidez de manejo. No es viable con ellos dimensionar una estructura de una obra de cierta entidad, pero tienen su utilidad para pequeñas intervenciones, muy frecuentes en la práctica profesional.

### **2.2 Cálculo de solicitaciones**

Los programas comerciales de cálculo de estructuras más extendidos realizan un análisis elástico de solicitaciones. Mediante el análisis elástico se obtienen unos diagramas de momentos flectores y de cortantes, y con estas solicitaciones se procede al dimensionado de las secciones resistentes necesarias.

Es conveniente destacar que las solicitaciones obtenidas mediante cálculo elástico deben destinarse fundamentalmente a estimar deformaciones y comportamientos asociados, que han de ser estudiados para cargas de servicio, estado en el que no se ha producido ninguna plastificación.

El caso habitual de realizar el dimensionado a capacidad portante a partir de estas solicitaciones, sin incorporar la reserva plástica de la directriz, conduce a un sobredimensionado de la misma. La mínima sección necesaria debe obtenerse mediante el estado límite último, es decir, a partir de las cargas mayoradas y aprovechando todas las posibilidades del material. En vigas isostáticas no es posible la redistribución de momentos flectores debido a la plastificación de las secciones más solicitadas, por lo que en este caso, el resultado de dimensionar a partir de los esfuerzos obtenidos mediante análisis elástico es realmente el perfil mínimo necesario por resistencia. No ocurre esto en el caso de vigas hiperestáticas (con continuidad), en las cuales, la consideración de la redistribución tiene como consecuencia el aprovechamiento óptimo de la pieza.

En el caso de un tramo de viga apoyada - empotrada con carga uniforme, el valor del momento elástico máximo es de  $-qL^2/8$  en los extremos y de  $9qL^2/128$  en el vano. Considerando un análisis plástico el valor absoluto del momento en los extremos y en el vano coincidirían, con un valor de  $qL^2/11,65$ . Dimensionar la sección mediante cálculo elástico supone, en este caso, un incremento del 46% de las solicitaciones y por tanto del módulo resistente necesario.

En el caso de un tramo de viga empotrada - empotrada con carga uniforme, el valor del momento elástico máximo es de  $-qL^2/12$  en el extremo y de  $qL^2/24$  en el vano. Considerando un análisis plástico el valor absoluto del momento en los extremos y en el vano coincidirían, con un valor de  $qL^2/16$ . Dimensionar la sección mediante cálculo elástico supone, en este caso, un incremento del 33% de las solicitaciones y por tanto del módulo resistente necesario.

Para elementos de acero, el Código Técnico permite la rotación suficiente para la redistribución total de momentos en secciones de clase 1 (plástica), y una capacidad de rotación limitada para secciones de clase 2 (compactas). Todos los perfiles de las series IPE, HEB, UPN, HEM y Tubo cuadrado son de clase 1 a flexión simple. Algunos perfiles de la serie HEM son de clase 2 ó 3. Según esto, puede decirse que gran parte de las secciones metálicas empleadas habitualmente como vigas permiten un método plástico para la determinación de las solicitaciones.

**Figura 1: Métodos de cálculo. CTE-SE-Acero**

Tabla 5.2 Métodos de cálculo

Clase de sección	Método para la determinación de las solicitaciones	Método para la determinación de la resistencia de las secciones
Plástica	Plástico o Elástico	Plástico o Elástico
Compacta	Elástico	Plástico o Elástico
Semicompacta	Elástico	Elástico
Esbelta	Elástico con posible reducción de rigidez	Elástico con resistencia reducida

Para elementos de madera, sólo se permite análisis lineal en primer orden, con verificación de la estabilidad a través del método de la longitud de pandeo equivalente o verificación de estabilidad mediante análisis de segundo orden.

Puede concluirse que los programas comerciales no contemplan la posibilidad de obtención de esfuerzos mediante métodos plásticos, lo que conduce a un sobredimensionado de las piezas metálicas a capacidad portante cuando éstas tienen coartado el giro en alguno de sus extremos (vigas apoyadas-empotradas o vigas biempotradas). Esta coacción al giro reduce sensiblemente la deformación de la viga, lo que provoca que sea la capacidad portante de la viga y no su rigidez el factor dominante en el dimensionado. Esto ocurre frecuentemente en vigas continuas de acero, muy habituales en edificación.

### 2.3 Dimensionado de secciones a capacidad portante

En general, los programas evaluados realizan un correcto dimensionado de las secciones a partir de las solicitaciones obtenidas, contemplando todas las prescripciones establecidas en el Código Técnico de la Edificación.

## 2.4 Dimensionado a Aptitud al Servicio

Tras el análisis de cada uno de los programas seleccionados se concluye que es en este punto donde se encuentran mayores deficiencias y carencias, con un mayor alejamiento del cálculo y dimensionado automático de las prescripciones normativas. Ningún programa de los analizados es capaz de realizar un correcto y estricto dimensionado a aptitud al servicio (deformaciones). El principal problema estriba en que no es posible definir, en la entrada de datos, el valor de los distintos tipos de carga (peso propio, solado, tabiquería, uso, etc.). Sin conocer el valor de carga que corresponde a cada una de ellas es imposible obtener el valor de las deformaciones que limita la normativa. Los programas analizados tienden a simplificaciones más o menos afortunadas, pero que en ningún caso permiten afinar el resultado obtenido, con el consecuente sobredimensionado de las secciones. Esta consideración llama la atención debido a que la limitación de las deformaciones tiene un papel preponderante en el dimensionado de estructuras metálicas y de madera, y suele ser el factor determinante a partir de 4,00-4,50 metros de luz.

### 2.4.1 Nuevo Metal 3D de Cype Ingenieros

Las limitaciones de deformación que permite el programa son:

1. Flecha máxima absoluta.
2. Flecha máxima relativa.
3. Flecha activa absoluta. Flecha
4. activa relativa.

Debe recordarse que las limitaciones de deformación establecidas en el Código Técnico son:

1. Limitación por integridad de elementos constructivos (flecha activa)
2. Limitación por confort de los usuarios.
3. Limitación por apariencia de la obra

La deformación que pone en riesgo la integridad de los elementos constructivos es la que se produce después de la puesta en obra del elemento. En el manual de Cype NM3d se dice:

la 'flecha activa' es la máxima diferencia en valor absoluto entre la flecha máxima y la flecha mínima de todas las combinaciones definidas en el estado de desplazamientos.

Esta definición de flecha activa es incorrecta, y lo que Cype hace es, para esta limitación, ver la máxima diferencia de deformación entre todas las combinaciones, lo cual sobreestima la deformación y lleva a sobredimensionados innecesarios.

Esta consideración incorrecta de flecha activa es consecuencia de que el programa no permite especificar cuál es el elemento dañable y cuando se pone en la obra. Sólo se permite distinguir entre cargas permanentes y de uso. Esto trae como consecuencia que es imposible conocer con exactitud la flecha activa respecto a un elemento constructivo

### 2.4.2 Tricalc 7.1 de Arktec

En el "Manual de Normativas" de Tricalc (página 163) se especifica:

- *Para la Integridad, para las combinaciones características, para deformaciones después de la puesta en obra del elemento, la flecha será no mayor de:*
  - *1/500 en pisos con tabiques frágiles (de gran formato, rasillones, placas, ...) o pavimentos rígidos sin juntas;*

- $1/400$  en pisos con tabiques ordinarios o pavimentos rígidos con juntas;
- $1/300$  en el resto de casos.
- Para el Confort, para las combinaciones características, acciones de corta duración, la flecha será no mayor de:
  - $1/350$ .
- Para la Apariencia, para las combinaciones casi permanentes, la flecha relativa será no mayor de:
  - $1/300$ .
- Las condiciones anteriores deben verificarse entre dos puntos cualesquiera de la planta, tomando como luz el doble de la distancia entre ellos. En general, será suficiente realizar dicha comprobación en dos direcciones ortogonales.
- En el programa el primer caso corresponde a la Flecha Activa, el segundo, a la Flecha Instantánea de las Sobrecargas, y el tercero, a la Flecha Total. El primer caso no se contempla para el acero (no se tiene en cuenta la fluencia), mientras que para la madera se tienen en cuenta los tres casos. En además es posible definir la flecha admisible no sólo como flecha relativa sino también como flecha absoluta o como flecha combinada.

En la pantalla correspondiente a “Opciones de Comprobación de Barras de Acero”, en la pestaña “Flecha” se dan cuatro opciones posibles de comprobación (ver “Manual de Instrucciones” de Tricalc, página 505):

- Flecha instantánea de las sobrecargas (vanos)
- Flecha instantánea de las sobrecargas (voladizos)
- Flecha total (vanos)
- Flecha total (voladizos)

En el “Manual de Instrucciones” de Tricalc (página 255), para los “Tipos de Hipótesis de carga”, se especifica:

- *Peso Propio.* En esta hipótesis se almacenará la carga correspondiente al peso propio de la estructura (que es calculado automáticamente por el programa). En combinaciones automáticas, la hipótesis 0 es de este tipo.
- *Permanente.* Para las cargas permanentes de la estructura.

Se observa, por tanto, que las posibilidades de comprobación de flecha se reducen a la instantánea y a la total. De hecho, se recomienda que no se haga distinción entre las distintas cargas permanentes, de manera que es imposible realizar una evaluación correcta de la flecha activa.

En el caso del acero, llama la atención la afirmación de que, al no tener deformación por fluencia, ni siquiera se considera la limitación de flecha activa especificada por el Código Técnico.

En el caso de la madera, aunque sí es posible considerar la combinación de acciones característica, empleada para la evaluación de flecha activa, luego no es posible ni conocer ni limitar su valor.

### **2.4.3 Prontuario Informático de Estructuras Metálicas o mixtas**

Debemos ir obteniendo la deformación para cada tipo de carga (peso propio, solado, tabiquería, uso, etc), combinarlas según la Norma que deseemos aplicar y comparar los resultados obtenidos de flecha con los límites establecidos.

En el caso de que el perfil no cumpla alguna condición, hay que volver a repetir el proceso.

Por lo anteriormente expuesto, la aplicación no es eficaz como herramienta para el dimensionado y optimización de vigas metálicas.

### **2.4.4 Sem-Cal**

En el manual se indica: “La comprobación consiste en comparar, en cada uno de los tramos, la deformación total  $U_{fin}$  con el valor de la flecha relativa máxima admisible,....”

Como puede comprobarse sólo realiza la comprobación de flecha total, omitiendo dos de las tres comprobaciones que prescribe el Código Técnico. No realiza la comprobación de flecha que considera la integridad de los elementos constructivos (activa) ni la que considera el confort de los usuarios. La comprobación que realiza debe realizarse con la combinación de acciones “casi permanente”, mientras que aquí se emplea la deformación total producida por todas las cargas. Para este valor de flecha el Código Técnico no prescribe limitación alguna, por lo que no disponemos de valores de referencia que nos permitan verificar la validez de la pieza.

### **2.4.5 Otros (Sap 2000, Ansys ...)**

Este tipo de programas, de elementos finitos, tienen como utilidad práctica el análisis de estructuras complejas.

Sap 2000 es un programa que se emplea con cierta frecuencia en el análisis de estructuras de edificios, pero no tiene implementada la Normativa española, por lo que queda fuera del ámbito de análisis de este trabajo.

Ansys es un programa con una potencia enorme. Suele emplearse para investigación o para cálculos mucho más complejos y complicados de lo que es usual en edificación.

## **2.5 Dimensionado de pilares**

Respecto al dimensionado de elementos sometidos a compresión o a flexocompresión, los programas analizados realizan un dimensionado correcto, pero es necesario introducir la definición completa de la estructura para poder realizar alguna comprobación o cálculo individual de un elemento.

## **3. Propuesta de software de dimensionado**

El proyectista dispone básicamente de dos tipos de herramientas de cálculo, programas comerciales con vocación de “sistemas completos” de cálculo de estructuras o aplicaciones sencillas, por lo general de libre distribución, para el dimensionado y/o verificación de elementos de un material concreto.

El constante aumento de las luces de proyecto, debido a las exigencias del mercado inmobiliario que busca espacios más diáfanos y versátiles, ha provocado que la condición que domine en el dimensionado de los elementos a flexión sea la de aptitud al servicio, en detrimento de la condición de capacidad portante.

Es precisamente en la condición de aptitud al servicio donde se ha producido un avance más significativo en las exigencias normativas. Se ha pasado de limitar únicamente la flecha

total a plazo infinito, considerando todas las acciones características, a establecer tres limitaciones de deformación, considerando combinaciones en las que entran en juego los valores de combinación de las acciones. Esto trae como consecuencia que se aumenta considerablemente el número de verificaciones a realizar.

Es conveniente destacar la importancia de la limitación cuando se considera la integridad de los elementos constructivos, es decir, la flecha activa. Esta deformación es la que se produce tras la puesta en obra del elemento para el que se quiere controlar la deformación y es necesario estimarla para cada uno de los elementos constructivos susceptibles de sufrir daños, si tienen limitaciones de deformación diferentes, como ocurriría, por ejemplo, en el caso de un edificio con tabique ordinario ( $L/400$ ) y pavimento rígido sin juntas ( $L/500$ ).

Prácticamente la totalidad de reclamaciones judiciales debidas a daños estructurales tiene que ver con fisuración de tabiques o solados consecuencia de una flecha activa superior a la admisible por dichos elementos constructivos.

Considerando la importancia de la correcta estimación de la flecha activa, llama la atención que, ni los programas comerciales ni los programas de libre distribución, nos permitan evaluarla de una manera rápida y precisa.

Respecto a los elementos donde los requisitos de capacidad portante son dominantes en el dimensionado, principalmente elementos de acero laminado trabajando a flexión, de luces reducidas, se obtienen un importante ahorro de material si se emplea el método plástico para la determinación de las solicitaciones (aproximadamente un 45% de sobredimensionado, de módulo resistente necesario, del método elástico respecto al plástico).

A día de hoy, es prácticamente imposible implementar el método plástico para el cálculo de una estructura completa, por lo que los programas comerciales ignoran este método. Es un método sencillo de aplicar en piezas sencillas, tal y como vigas continuas donde se consiguen un gran ahorro de material (es un método muy extendido en el cálculo de forjados unidireccionales).

Se propone e implementa un programa de cálculo de elementos aislados de madera y acero laminado, que permita solventar las carencias mencionadas dentro de las herramientas disponibles para el dimensionado estructural.

#### **4. Descripción de la herramienta de cálculo programada**

La herramienta de cálculo se divide en dos secciones principales: vigas sometidas a flexión y pilares sometidos a compresión simple, compuesta y esviada.

Cada una de estas dos secciones se compone de cuatro subsecciones: entrada de datos, optimizador de elementos de acero, optimizador de elementos de madera y resultados complementarios.

##### **4.1 Entrada de datos y resultados resumidos**

Los datos requeridos en el caso de vigas son: Categoría de edificio, geometría, condiciones de apoyo, materiales, clase de servicio en el caso de madera laminada, limitaciones de deformación y cargas sobre el elemento estructural. (Figura 2).

Los tipos de carga que pueden considerarse en el cálculo dependen de la categoría del edificio. Todas las cargas, tanto lineales como puntuales, son consideradas para el dimensionado de la estructura a resistencia y a rigidez.

Se permite la introducción de una carga repartida y una carga puntual para cada uno de los tipos de carga. También se permite la introducción de una carga puntual en el extremo de

los voladizos, que cubre la situación habitual en edificación, en la que se apoya el cerramiento en el extremo del vuelo. Este tipo de carga sólo está disponible dentro del peso propio y de la carga de tabiquería. Con ello puede introducirse el valor del peso del cerramiento considerando la flecha instantánea del mismo para el cálculo de flecha activa (en "carga tabiquería) o evitando su consideración (en "peso propio estructura).

Figura 2: Pantalla de entrada de datos. Vigas

En los casos de vigas con el giro impedido en alguno de sus extremos es posible la redistribución de momentos si se cumplen las condiciones especificadas para cada uno de los materiales.

Se consideran todas las limitaciones de deformación vertical que se especifican en el artículo 4.3.3.1 del CTE-SE Bases de cálculo.

**Figura 3: Vigas. Datos generales de luces, materiales y condiciones de apoyo**

<p><b>Tipo de edificio</b></p> <p><input checked="" type="radio"/> Zonas residenciales (Categoria A)</p> <p><input type="radio"/> Zonas administrativas (Categoria B)</p> <p><input type="radio"/> Zonas destinadas al público (Categoria C)</p> <p><input type="radio"/> Zonas comerciales (Categoria D)</p> <p><input type="radio"/> Tráfico y aparcamiento (Categoria F)</p> <p><input type="radio"/> Cubiertas transitables (Categoria G)</p> <p><input type="radio"/> Cubiertas mantenimiento (Categoria H) ?</p>	<p><b>Datos Generales</b></p> <p>Luz Viga: <input type="text" value="5,50"/> m</p> <p>Luz Vuelo izq: <input type="text" value="0,00"/> m</p> <p>Luz Vuelo der: <input type="text" value="0,00"/> m</p>	<p><b>Estudio de voladizo</b></p> <p><input type="radio"/> Vuelo Luz: <input type="text" value="0,00"/> m</p>	
	<p><b>Condiciones de apoyo</b></p> <p><input checked="" type="radio"/> Biapoyada</p> <p><input type="radio"/> Apoyada-Empotrada</p> <p><input type="radio"/> Biempotrada</p>	<p><b>Acero laminado</b></p> <p>Clase: <input type="text" value="S-275JR"/></p> <p>Serie: <input type="text" value="IPE"/></p>	<p><b>Madera</b></p> <p>Tipo: <input type="text" value="GL24h"/> ?</p> <p>C.Servicio: <input type="text" value="C.Serv 1"/> ?</p>

**Figura 4: Vigas. Datos de límites de deformación y cargas**

<p><b>Limitaciones de deformación</b></p> <p>Flecha activa: L/ <input type="text" value="500"/> L/ <input type="text" value="1000"/></p> <p>Corta Duración: L/ <input type="text" value="350"/> L/ <input type="text" value="1000"/></p> <p>C.casi permanente: L/ <input type="text" value="300"/> L/ <input type="text" value="1000"/></p> <p>Flecha total: L/ <input type="text" value="300"/> L/ <input type="text" value="1000"/></p> <p style="text-align: center;">?</p>	<p><b>Cargas</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Q Repartida</th> <th>Cseg</th> <th>Q Puntual</th> <th>Dist origen</th> <th>Vol.Izdo.</th> <th>Vol.Dcho.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Ppropio estructura:</td> <td><input type="text" value="8,00"/> kN/ml</td> <td><input type="text" value="1,35"/></td> <td><input type="text" value="0,00"/> kN</td> <td><input type="text" value="0,00"/> m</td> <td><input type="text" value="0,00"/> kN</td> <td><input type="text" value="0,00"/> kN</td> </tr> <tr> <td>Carga solado:</td> <td><input type="text" value="5,00"/> kN/ml</td> <td><input type="text" value="1,35"/></td> <td><input type="text" value="0,00"/> kN</td> <td><input type="text" value="0,00"/> m</td> <td><input type="text" value="---"/></td> <td><input type="text" value="---"/></td> </tr> <tr> <td>Carga tabiquería:</td> <td><input type="text" value="4,00"/> kN/ml</td> <td><input type="text" value="1,35"/></td> <td><input type="text" value="0,00"/> kN</td> <td><input type="text" value="0,00"/> m</td> <td><input type="text" value="0,00"/> kN</td> <td><input type="text" value="0,00"/> kN</td> </tr> <tr> <td>Sobrecarga de uso:</td> <td><input type="text" value="8,00"/> kN/ml</td> <td><input type="text" value="1,50"/></td> <td><input type="text" value="0,00"/> kN</td> <td><input type="text" value="0,00"/> m</td> <td><input type="text" value="---"/></td> <td><input type="text" value="---"/></td> </tr> <tr> <td>Acción Accidental:</td> <td><input type="text" value="0,00"/> kN/ml</td> <td><input type="text" value="1,00"/></td> <td><input type="text" value="0,00"/> kN</td> <td><input type="text" value="0,00"/> m</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">Carga Puntual en extremo de voladizo</td> </tr> </tbody> </table>							Q Repartida	Cseg	Q Puntual	Dist origen	Vol.Izdo.	Vol.Dcho.	Ppropio estructura:	<input type="text" value="8,00"/> kN/ml	<input type="text" value="1,35"/>	<input type="text" value="0,00"/> kN	<input type="text" value="0,00"/> m	<input type="text" value="0,00"/> kN	<input type="text" value="0,00"/> kN	Carga solado:	<input type="text" value="5,00"/> kN/ml	<input type="text" value="1,35"/>	<input type="text" value="0,00"/> kN	<input type="text" value="0,00"/> m	<input type="text" value="---"/>	<input type="text" value="---"/>	Carga tabiquería:	<input type="text" value="4,00"/> kN/ml	<input type="text" value="1,35"/>	<input type="text" value="0,00"/> kN	<input type="text" value="0,00"/> m	<input type="text" value="0,00"/> kN	<input type="text" value="0,00"/> kN	Sobrecarga de uso:	<input type="text" value="8,00"/> kN/ml	<input type="text" value="1,50"/>	<input type="text" value="0,00"/> kN	<input type="text" value="0,00"/> m	<input type="text" value="---"/>	<input type="text" value="---"/>	Acción Accidental:	<input type="text" value="0,00"/> kN/ml	<input type="text" value="1,00"/>	<input type="text" value="0,00"/> kN	<input type="text" value="0,00"/> m	Carga Puntual en extremo de voladizo	
	Q Repartida	Cseg	Q Puntual	Dist origen	Vol.Izdo.	Vol.Dcho.																																										
Ppropio estructura:	<input type="text" value="8,00"/> kN/ml	<input type="text" value="1,35"/>	<input type="text" value="0,00"/> kN	<input type="text" value="0,00"/> m	<input type="text" value="0,00"/> kN	<input type="text" value="0,00"/> kN																																										
Carga solado:	<input type="text" value="5,00"/> kN/ml	<input type="text" value="1,35"/>	<input type="text" value="0,00"/> kN	<input type="text" value="0,00"/> m	<input type="text" value="---"/>	<input type="text" value="---"/>																																										
Carga tabiquería:	<input type="text" value="4,00"/> kN/ml	<input type="text" value="1,35"/>	<input type="text" value="0,00"/> kN	<input type="text" value="0,00"/> m	<input type="text" value="0,00"/> kN	<input type="text" value="0,00"/> kN																																										
Sobrecarga de uso:	<input type="text" value="8,00"/> kN/ml	<input type="text" value="1,50"/>	<input type="text" value="0,00"/> kN	<input type="text" value="0,00"/> m	<input type="text" value="---"/>	<input type="text" value="---"/>																																										
Acción Accidental:	<input type="text" value="0,00"/> kN/ml	<input type="text" value="1,00"/>	<input type="text" value="0,00"/> kN	<input type="text" value="0,00"/> m	Carga Puntual en extremo de voladizo																																											

Los datos requeridos en el caso de pilares son: Categoría de edificio, geometría, condiciones de extremo, coeficientes de pandeo, materiales, clase de servicio en el caso de madera laminada y cargas sobre el elemento estructural.

Figura 5: Pantalla de entrada de datos. Pilares

**Datos Generales**

Altura de pilar: 0,00 m

Beta "Y": 1,00 L.Pandeo "Y": 0,00 m

Beta "Z": 1,00 L.Pandeo "Z": 0,00 m

**Acero laminado**

Clase: S-275JR

Serie: 2xUPN

**Madera**

Tipo: GL24h

C.Servicio: C.Serv 1

**Tipo de edificio**

- Zonas residenciales (Categoria A)
- Zonas administrativas (Categoria B)
- Zonas destinadas al público (Categoria C)
- Zonas comerciales (Categoria D)
- Tráfico y aparcamiento (Categoria F)
- Cubiertas transitables (Categoria G)
- Cubiertas mantenimiento (Categoria H)

**Cargas**

	Axil	Cseg	Mom Eje Y	Mom Eje Z
Ppropio estructura:	0,00 kN	1,35	0,00 kNm	0,00 kNm
Carga solado:	0,00 kN	1,35	0,00 kNm	0,00 kNm
Carga tabiquería:	0,00 kN	1,35	0,00 kNm	0,00 kNm
Sobrecarga de uso:	0,00 kN	1,50	0,00 kNm	0,00 kNm
Acción Accidental:	0,00 kN	1,00	0,00 kNm	0,00 kNm

Axil  EjeY  Esviada

**Combinaciones de Cargas**

Ed,dst:

Axil persistente = kN

Mom Eje Y persistente = kNm

Mom Eje Z persistente = kNm

Axil extraordinaria = kN

Mom Eje Y extraordinaria = kNm

Mom Eje Z extraordinaria = kNm

**Combinaciones consideradas**

Combinación axiles:

Combinación Mom Eje Y:

Combinación Mom Eje Z:

**Dimensionado por resistencia**

Perfil metálico:

Sección madera: mm

**Dimensionado por estabilidad (pandeo)**

	Acero	Madera
Sección Eje Y:		mm
Sección Eje Z:		mm

Programa desarrollado por: José Luis Gutiérrez López, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de La Rioja

Se permite la introducción de una carga axil, un momento flector respecto al eje "Y" y un momento flector respecto al eje "Z" para cada uno de los tipos de carga.

Dependiendo del tipo de análisis que desee efectuarse se solicitan unos esfuerzos u otros, permitiendo dimensionado a compresión centrada (requerido el axil), dimensionado a flexocompresión (requerido axil + momento flector) y dimensionado a flexión esviada (requerido Axil + momento flector respecto a ambos ejes).

Figura 6: Pilares. Datos de geometría y cargas

<b>Datos Generales</b> Altura de pilar: 3,00 m [?]		<b>Acero laminado</b> Clase: S-275JR Serie: 2xUPN		<b>Madera</b> Tipo: GL24h C.Servicio: C.Serv 1																															
Beta "Y": 1,00 L.Pandeo "Y": 3,00 m Beta "Z": 1,00 L.Pandeo "Z": 3,00 m		<b>Cargas</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Axil</th> <th>Cseg</th> <th>Mom Eje Y</th> <th>Mom Eje Z</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Ppropio estructura:</td> <td>160 kN</td> <td>1,35</td> <td>0,00 kNm</td> <td>0,00 kNm</td> </tr> <tr> <td>Carga solado:</td> <td>100 kN</td> <td>1,35</td> <td>0,00 kNm</td> <td>0,00 kNm</td> </tr> <tr> <td>Carga tabiquería:</td> <td>80 kN</td> <td>1,35</td> <td>0,00 kNm</td> <td>0,00 kNm</td> </tr> <tr> <td>Sobrecarga de uso:</td> <td>160 kN</td> <td>1,50</td> <td>0,00 kNm</td> <td>0,00 kNm</td> </tr> <tr> <td>Acción Accidental:</td> <td>0,00 kN</td> <td>1,00</td> <td>0,00 kNm</td> <td>0,00 kNm</td> </tr> </tbody> </table>					Axil	Cseg	Mom Eje Y	Mom Eje Z	Ppropio estructura:	160 kN	1,35	0,00 kNm	0,00 kNm	Carga solado:	100 kN	1,35	0,00 kNm	0,00 kNm	Carga tabiquería:	80 kN	1,35	0,00 kNm	0,00 kNm	Sobrecarga de uso:	160 kN	1,50	0,00 kNm	0,00 kNm	Acción Accidental:	0,00 kN	1,00	0,00 kNm	0,00 kNm
	Axil	Cseg	Mom Eje Y	Mom Eje Z																															
Ppropio estructura:	160 kN	1,35	0,00 kNm	0,00 kNm																															
Carga solado:	100 kN	1,35	0,00 kNm	0,00 kNm																															
Carga tabiquería:	80 kN	1,35	0,00 kNm	0,00 kNm																															
Sobrecarga de uso:	160 kN	1,50	0,00 kNm	0,00 kNm																															
Acción Accidental:	0,00 kN	1,00	0,00 kNm	0,00 kNm																															
<b>Tipo de edificio</b> <input checked="" type="radio"/> Zonas residenciales (Categoria A) <input type="radio"/> Zonas administrativas (Categoria B) <input type="radio"/> Zonas destinadas al público (Categoria C) <input type="radio"/> Zonas comerciales (Categoria D) <input type="radio"/> Tráfico y aparcamiento (Categoria F) <input type="radio"/> Cubiertas transitables (Categoria G) <input type="radio"/> Cubiertas mantenimiento (Categoria H)		<input checked="" type="radio"/> Axil <input type="radio"/> EjeY <input type="radio"/> Esviada																																	
[Calcula] [Salir]																																			

Tanto para vigas como para pilares, tras introducir todos los datos necesarios y proceder al cálculo, se ofrecen en la parte inferior de la ventana los resultados resumidos del cálculo, tanto para acero como para madera.

Figura 7: Vigas. Resultados generales

[Calcula] [Salir]		<b>Resumen de resultados</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Izquierda</th> <th>Vano</th> <th>Derecha</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Momentos Elásticos:</td> <td>-88,1 kNm</td> <td>44,1 kNm</td> <td>-88,1 kNm</td> </tr> <tr> <td>Cortantes Elásticos:</td> <td>96,1 kN</td> <td></td> <td>-96,1 kN</td> </tr> <tr> <td>Mom.Redistribuido:</td> <td>-66,1 kNm</td> <td>66,1 kNm</td> <td>-66,1 kNm</td> </tr> <tr> <td>Cort.Redistribuido:</td> <td>96,1 kN</td> <td></td> <td>-96,1 kN</td> </tr> <tr> <td>Wy,elástico:</td> <td>336 cm<sup>3</sup></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Wy,redistribuido:</td> <td>252 cm<sup>3</sup></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Inercia:</td> <td>1.754 cm<sup>4</sup></td> </tr> </tbody> </table>				Izquierda	Vano	Derecha	Momentos Elásticos:	-88,1 kNm	44,1 kNm	-88,1 kNm	Cortantes Elásticos:	96,1 kN		-96,1 kN	Mom.Redistribuido:	-66,1 kNm	66,1 kNm	-66,1 kNm	Cort.Redistribuido:	96,1 kN		-96,1 kN	Wy,elástico:	336 cm <sup>3</sup>			Wy,redistribuido:	252 cm <sup>3</sup>					Inercia:	1.754 cm <sup>4</sup>	<b>Dimensionado por resistencia</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Acero</th> <th>Madera</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Análisis elástico:</td> <td>IPE-240</td> <td>0x0 cm</td> </tr> <tr> <td>A. Redistribuido:</td> <td>IPE-220</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Acero	Madera	Análisis elástico:	IPE-240	0x0 cm	A. Redistribuido:	IPE-220	
	Izquierda	Vano	Derecha																																												
Momentos Elásticos:	-88,1 kNm	44,1 kNm	-88,1 kNm																																												
Cortantes Elásticos:	96,1 kN		-96,1 kN																																												
Mom.Redistribuido:	-66,1 kNm	66,1 kNm	-66,1 kNm																																												
Cort.Redistribuido:	96,1 kN		-96,1 kN																																												
Wy,elástico:	336 cm <sup>3</sup>																																														
Wy,redistribuido:	252 cm <sup>3</sup>																																														
		Inercia:	1.754 cm <sup>4</sup>																																												
	Acero	Madera																																													
Análisis elástico:	IPE-240	0x0 cm																																													
A. Redistribuido:	IPE-220																																														
<b>Combinaciones de Cargas</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Ed,dst:</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Lineal persistente =</td> <td>34,95 kN/ml</td> </tr> <tr> <td>Puntual persistente =</td> <td>0,00 kN</td> </tr> <tr> <td>Lineal extraordinaria =</td> <td>21,00 kN/ml</td> </tr> <tr> <td>Puntual extraordinaria =</td> <td>0,00 kN</td> </tr> </tbody> </table>			Ed,dst:	Lineal persistente =	34,95 kN/ml	Puntual persistente =	0,00 kN	Lineal extraordinaria =	21,00 kN/ml	Puntual extraordinaria =	0,00 kN	<b>Dimensionado por rigidez</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Acero</th> <th>Madera</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sección:</td> <td>IPE-200</td> <td>12x40 cm</td> </tr> </tbody> </table>				Acero	Madera	Sección:	IPE-200	12x40 cm																											
	Ed,dst:																																														
Lineal persistente =	34,95 kN/ml																																														
Puntual persistente =	0,00 kN																																														
Lineal extraordinaria =	21,00 kN/ml																																														
Puntual extraordinaria =	0,00 kN																																														
	Acero	Madera																																													
Sección:	IPE-200	12x40 cm																																													

Figura 8: Pilares. Resultados generales

<b>Combinaciones de Cargas</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Ed,dst:</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Axil persistente =</td> <td>699 kN</td> </tr> <tr> <td>Mom Eje Y persistente =</td> <td>0,00 kNm</td> </tr> <tr> <td>Mom Eje Z persistente =</td> <td>0,00 kNm</td> </tr> <tr> <td>Axil extraordinaria =</td> <td>420 kN</td> </tr> <tr> <td>Mom Eje Y extraordinaria =</td> <td>0,00 kNm</td> </tr> <tr> <td>Mom Eje Z extraordinaria =</td> <td>0,00 kNm</td> </tr> </tbody> </table>			Ed,dst:	Axil persistente =	699 kN	Mom Eje Y persistente =	0,00 kNm	Mom Eje Z persistente =	0,00 kNm	Axil extraordinaria =	420 kN	Mom Eje Y extraordinaria =	0,00 kNm	Mom Eje Z extraordinaria =	0,00 kNm	<b>Combinaciones consideradas</b> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Combinación axiles:</td> <td><math>160 \times 1,35 + 100 \times 1,35 + 80 \times 1,35 + 160 \times 1,50</math></td> </tr> <tr> <td>Combinación Mom Eje Y:</td> <td><math>0,00 \times 1,35 + 0,00 \times 1,35 + 0,00 \times 1,35 + 0,00 \times 1,50</math></td> </tr> <tr> <td>Combinación Mom Eje Z:</td> <td><math>0,00 \times 1,35 + 0,00 \times 1,35 + 0,00 \times 1,35 + 0,00 \times 1,50</math></td> </tr> </tbody> </table>		Combinación axiles:	$160 \times 1,35 + 100 \times 1,35 + 80 \times 1,35 + 160 \times 1,50$	Combinación Mom Eje Y:	$0,00 \times 1,35 + 0,00 \times 1,35 + 0,00 \times 1,35 + 0,00 \times 1,50$	Combinación Mom Eje Z:	$0,00 \times 1,35 + 0,00 \times 1,35 + 0,00 \times 1,35 + 0,00 \times 1,50$
	Ed,dst:																						
Axil persistente =	699 kN																						
Mom Eje Y persistente =	0,00 kNm																						
Mom Eje Z persistente =	0,00 kNm																						
Axil extraordinaria =	420 kN																						
Mom Eje Y extraordinaria =	0,00 kNm																						
Mom Eje Z extraordinaria =	0,00 kNm																						
Combinación axiles:	$160 \times 1,35 + 100 \times 1,35 + 80 \times 1,35 + 160 \times 1,50$																						
Combinación Mom Eje Y:	$0,00 \times 1,35 + 0,00 \times 1,35 + 0,00 \times 1,35 + 0,00 \times 1,50$																						
Combinación Mom Eje Z:	$0,00 \times 1,35 + 0,00 \times 1,35 + 0,00 \times 1,35 + 0,00 \times 1,50$																						
<b>Dimensionado por resistencia</b> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Perfil metálico:</td> <td>2xUPN-100</td> </tr> <tr> <td>Sección madera:</td> <td>220x220 mm</td> </tr> </tbody> </table>		Perfil metálico:	2xUPN-100	Sección madera:	220x220 mm	<b>Dimensionado por estabilidad (pandeo)</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Acero</th> <th>Madera</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sección Eje Y:</td> <td>2xUPN-140</td> <td>230x230 mm</td> </tr> <tr> <td>Sección Eje Z:</td> <td>2xUPN-140</td> <td>230x230 mm</td> </tr> </tbody> </table>			Acero	Madera	Sección Eje Y:	2xUPN-140	230x230 mm	Sección Eje Z:	2xUPN-140	230x230 mm							
Perfil metálico:	2xUPN-100																						
Sección madera:	220x220 mm																						
	Acero	Madera																					
Sección Eje Y:	2xUPN-140	230x230 mm																					
Sección Eje Z:	2xUPN-140	230x230 mm																					

## 4.2 Optimizador de elementos de acero

En el caso de vigas metálicas, la pantalla de dimensionado en acero nos muestra la siguiente información:

La zona superior de la pantalla de dimensionado en acero nos muestra los datos generales que se han tenido en cuenta para el cálculo y un desarrollo de la combinación de cálculo más desfavorable.

Podemos, en este apartado, comprobar las cargas y los coeficientes de seguridad utilizados.

**Figura 9: Vigas. Optimizador elementos de acero. Datos considerados en el dimensionado**

Datos Generales		Cargas consideradas						
		C Seg.	Q Puntual	Dist origen	Vol.Izdo.	Vol.Dcho.		
Luz Viga:	5,50 m	Ppropio estructura:	8,00 kN/ml	1,35	0,00 kN	0,00 m	0,00 kN	0,00 kN
Luz Vuelo izq:	0,00 m	Carga solado:	5,00 kN/ml	1,35	0,00 kN	0,00 m		
Luz Vuelo der:	0,00 m	Carga tabiquería:	4,00 kN/ml	1,35	0,00 kN	0,00 m	0,00 kN	0,00 kN
Viga empotrada-empotrada Edificio categoría 'A'		Sobrecarga de uso:	8,00 kN/ml	1,50	0,00 kN	0,00 m		
		Acción Accidental:	0,00 kN/ml	1,00	0,00 kN	0,00 m	Carga Puntual en extremo de voladizo	
Salir		Combinación lineales:		8,00 x 1,35 + 5,00 x 1,35 + 4,00 x 1,35 + 8,00 x 1,50				
		Combinación puntuales:		0,00 x 1,35				

A continuación se muestra información sobre los esfuerzos máximos con los que se ha dimensionado a rigidez y los índices de resistencia a flexión y corte. Si el índice de resistencia a corte inferior a 0,50 no es necesario considerar flexión y corte combinados.

**Figura 10: Vigas. Optimizador elementos de acero. Esfuerzos máximos e índices de resistencia**

<b>Momentos máximos</b> My Elastico: -88,1 kNm My Redistrib.: -66,1 kNm	<b>Módulo plástico necesario</b> Wy,p Elastico: 336 cm <sup>3</sup> Wy,p Redistr.: 252 cm <sup>3</sup>	<b>Resistencia a Flexión</b> Indice Elastico: 0,92 I.Redistribuido: 0,69	<b>Res. Flexión y Corte</b> Indice Elastico: -- I.Redistribuido: --
<b>Cortantes máximos</b> Vy Elastico: 96,1 kN Vy Redistrib.: 96,1 kN	<b>Area corte necesaria</b> Ay,p Elastico: 6,36 cm <sup>2</sup> Ay,p Redistrib.: 6,36 cm <sup>2</sup>	<b>Resistencia a Corte</b> Indice Elastico: 0,33 I.Redistribuido: 0,33	?

Por último se muestran todos los valores correspondientes a deformación y una tabla con los valores geométricos del perfil seleccionado, del inmediatamente anterior y del inmediatamente posterior.

**Figura 11: Vigas. Optimizador elementos de acero. Comprobación de deformaciones**

Deformaciones

Limites de deformación	Inercia necesaria	Deformaciones con perfil seleccionado	Indices
500 <input type="button" value="v"/> L/ 1000	1.754 cm <sup>4</sup>	? Activa: 5 mm. L/ 1109	0,45
350 <input type="button" value="v"/> L/ 1000	578 cm <sup>4</sup>	Corta duración: 2 mm. L/ 2357	0,15
300 <input type="button" value="v"/> L/ 1000	1.201 cm <sup>4</sup>	Casi permanente: 6 mm. L/ 972	0,31
300 <input type="button" value="v"/> L/ 1000	1.547 cm <sup>4</sup>	Total (característica): 7 mm. L/ 754 (no limitada en CTE)	0,40
300 <input type="button" value="v"/> L/ 1000	1.547 cm <sup>4</sup>	Total (NBE-AE95): 7 mm. L/ 754	0,40

**Figura 12: Vigas. Optimizador elementos de acero. Datos de perfiles**

PERFIL	IPE220	IPE240	IPE270
Area	33,4	39,1	45,9
Peso	26,2	30,7	36,1
Wy	252	324	429
Wpl,y	286	366	484
Iy	2770	3890	5790

En el caso de pilares, la pantalla de dimensionado en acero nos muestra la siguiente información:

La zona superior de la pantalla de dimensionado en acero nos muestra los datos generales que se han tenido en cuenta para el cálculo y un desarrollo de la combinación de cálculo más desfavorable para cada uno de los esfuerzos

Figura 13: Pilares. Optimizador elementos de acero. Datos considerados en el dimensionado

**Datos Generales**

Altura de pilar:  m

Beta "Y":  L.Pandeo "Y":  m

Beta "Z":  L.Pandeo "Z":  m

Edificio categoría 'A'

**Cargas**

	Axil	Cseg	Mom Eje Y	Mom Eje Z
Ppropio estructura:	<input type="text" value="160"/> kN	<input type="text" value="1,35"/>	<input type="text" value="0,00"/> kNm	<input type="text" value="0,00"/> kNm
Carga solado:	<input type="text" value="100"/> kN	<input type="text" value="1,35"/>	<input type="text" value="0,00"/> kNm	<input type="text" value="0,00"/> kNm
Carga tabiquería:	<input type="text" value="80"/> kN	<input type="text" value="1,35"/>	<input type="text" value="0,00"/> kNm	<input type="text" value="0,00"/> kNm
Sobrecarga de uso:	<input type="text" value="160"/> kN	<input type="text" value="1,50"/>	<input type="text" value="0,00"/> kNm	<input type="text" value="0,00"/> kNm
Acción Accidental:	<input type="text" value="0"/> kN	<input type="text" value="1,00"/>	<input type="text" value="0,00"/> kNm	<input type="text" value="0,00"/> kNm

**Combinaciones consideradas**

Combinación axiles:

Combinación Mom Eje Y:

Combinación Mom Eje Z:

A continuación se muestra el perfil propuesto, sus datos geométricos y los del inmediatamente anterior y posterior, los valores considerados en el cálculo para pandeo y para pandeo lateral, los esfuerzos máximos de compresión que resiste el pilar, sin y con pandeo, y los índices resistentes. En este caso en el que se ha solicitado un perfil de la serie 2xUpn, aunque la longitud de pandeo es igual para ambos ejes, el resultado de esfuerzo resistido es diferente debido a la asimetría de la sección.

Figura 14: Pilares. Optimizador elementos de acero. Resultados

**Resultados pilar metálico**

**Perfil**

Clase:

Serie:

Perfil:

PERFIL	120	140	160
Area	34,0	40,8	48,0
Peso	26,8	32,0	37,6
Wy	121	173	232
Wpl,y	145	206	276
Wz	110	144	187
Wpl,z	133	173	224

**Valores Pandeo**

$N_{CR,Y} = 2.787$  N     $N_{CR,Z} = 1.985$  N

$\lambda_y = 0,635$      $\lambda_z = 0,752$

$\Phi_y = 0,808$      $\Phi_z = 0,918$

$\alpha_y = 0,490$      $\alpha_z = 0,490$

$\chi_y = 0,765$      $\chi_z = 0,692$

**Valores Pandeo Lateral**

$M_{LT,V} = 0,00$  E6 Nmm     $\lambda_{LT} = 0,000$

$M_{LT,W} = 0,00$  E6 Nmm     $\Phi_{LT} = 0,000$

$M_{CR} = 0,00$  E6 Nmm     $\alpha_{LT} = 0,000$

$k_y = 0,000$      $\chi_{LT} = 0,000$

$C_{m,y} = 0,000$

**Esfuerzos resistidos**

Npl,Rdt:  kN

NbRd Y:  kN

NbRd Z:  kN

**Indices**

FlexoCompresión:     Pandeo eje Y:

FlexoCompresión + pandeo eje Y:     Pandeo eje Z:

Una solución cada vez más extendida es la del tubo hueco cuadrado, ya que su gran variedad de tamaños y espesores permite afinar la cantidad de acero dispuesta. A esto hay que añadir su simetría respecto a los dos ejes.

### 4.3 Optimizador de elementos de madera

En el caso de vigas de madera, y al igual que ocurre con la pantalla de acero, la zona superior de la pantalla de dimensionado en madera nos facilita los datos generales que se

han tenido en cuenta para el cálculo y un desarrollo de la combinación de cálculo más desfavorable.

En el lateral izquierdo se muestran los datos correspondientes al material, las dimensiones de la sección propuesta y los parámetros de cálculo.

**Figura 15: Vigas. Optimizador elementos de madera. Datos de material y sección**

The screenshot shows a software interface for wood beam optimization. It is divided into four sections:

- Madera:** Tipo: GL24h (dropdown), C.Servicio: C.Serv 1 (dropdown).
- Dimensiones:** Ancho: 12 cm, Canto: 40 cm.
- Otros condicionantes:** Luz viga vuelco lateral (m): (empty input field).
- Parámetros cálculo:** gammaM: 1,25 (input field with '?' button), Kh: 1,04 (input field with '?' button), kmod: 0,8 (input field), kdef: 0,6 (input field).

A continuación se muestra información sobre los módulos resistentes de la sección, esfuerzos y tensiones máximas, las resistencias de cálculo del material y los índices de resistencia a flexión y corte.

**Figura 16: Vigas. Optimizador elementos de madera. Esfuerzos, resistencias e índices**

The screenshot displays the results of the optimization in four columns:

- Esfuerzos máximos:** My,d: -88,1 kNm, Vy,d: 96,1 kN.
- Tensiones máximas:** Sm,y,d: -27,53 N/mm2, Ty,d: 2,00 N/mm2.
- Resistencias de cálculo:** fm,y,d: 16,00 N/mm2, fv,y,d: 1,73 N/mm2.
- Índices (Km=0,7):** Índice flexión: -1,79, Índice Cortante: 1,16.

En último lugar se muestran los resultados correspondientes a deformación y resistencia al fuego.

Figura 17: Vigas. Optimizador elementos de madera. Deformaciones y resistencia a fuego

**Deformaciones**

?	Activa:	9,19 mm.	L/598
	Corta duración:	3,03 mm.	L/1815
	Casi permanente:	9,64 mm.	L/571
	Total (característica): (no limitada en CTE)	11,76 mm.	L/468

**Límites de deformación**

500	L/	1000
350	L/	1000
300	L/	1000
300	L/	1000

**Inercia**

53.486	cm <sup>4</sup>
12.341	cm <sup>4</sup>
33.651	cm <sup>4</sup>
41.056	cm <sup>4</sup>

**Índices**

0,84
0,19
0,53
0,64

**Flechas por hipótesis**

	P.propio:	Solado:	Tabiquería:	Uso:	Accidental:
Instantánea:	2,57	1,60	1,28	2,57	--
Diferida:	1,54	0,96	0,77	0,46	--
Total:	4,11	2,57	2,05	3,03	--

**Resistencia a fuego**

? 361 minutos

Sección reducida:

12 x 40 cm

En el caso de pilares de madera, y al igual que ocurre con la pantalla de acero, la zona superior de la pantalla de dimensionado en madera nos facilita los datos generales que se han tenido en cuenta para el cálculo y un desarrollo de la combinación de cálculo más desfavorable para cada uno de los esfuerzos.

A continuación se muestran las características de la madera, la sección propuesta, sus datos geométricos, las tensiones a las que está sometida, los valores de cálculo obtenidos, las resistencias del material y los índices resistentes.

También se muestra la resistencia al fuego y la sección reducida.

Figura 18: Pilares. Optimizador elementos de madera. Resultados

**Madera**

Tipo: GL24h ? C.Serv: C.Serv 1 ?	<b>Modulos Resistentes</b> Wy: 2.028 cm <sup>3</sup> Wz: 2.028 cm <sup>3</sup>	<b>Tensiones (N/mm<sup>2</sup>)</b> $\sigma_{c,d}$ = 1,32 $\sigma_{m,y,d}$ = 0,00 $\sigma_{m,z,d}$ = 0,00	<b>Índices (Km=0,7)</b> FlexoComp. Y: 0,74    PandeoY: 0,93 FlexoComp. Z: 0,74    PandeoZ: 0,93
-------------------------------------	--	---	---

**Dimensiones**

Ancho: 23 cm  
Canto: 23 cm

**Valores de cálculo**

$L_{k,y}$ = 300 cm	$i_y$ = 6,64 cm	$\lambda_y$ = 45,2	$\sigma_{c,rit,y}$ = 4,5
$L_{k,z}$ = 300 cm	$i_z$ = 6,64 cm	$\lambda_z$ = 45,2	$\sigma_{c,rit,z}$ = 4,5

**Resistencia a fuego**

? 24 minutos

Sección reducida:

18,2 x 18,2 cm

**Resistencias de cálculo**

$f_{c,0,d}$ = 1,54 N/mm <sup>2</sup>	$\lambda_{rel,y}$ = 0,73	$k_y$ = 0,79	$\beta_c$ = 0,10	$X_y$ = 0,92
$f_{m,d}$ = 1,54 N/mm <sup>2</sup>	$\lambda_{rel,z}$ = 0,73	$k_z$ = 0,79	.	$X_z$ = 0,92

## 5. Conclusiones

Tras proceder a la revisión de los programas de cálculo de estructuras más empleados en la práctica profesional, y que suelen utilizarse sin demasiado conocimiento de su “funcionamiento interno” por parte de los usuarios, se concluye que ninguno de ellos cubre las necesidades anteriormente descritas.

Por lo anteriormente expuesto, se opta por implementar un programa de cálculo de elementos aislados de madera y acero laminado, que permita solventar las carencias mencionadas dentro de las herramientas disponibles para el dimensionado estructural. Este programa tiene como propósito que puedan realizarse dimensionados rápidos, con posibilidad de comparar resultados entre madera y acero laminado, a la vez que obtenemos una referencia clara del grado de optimización de la sección elegida mediante índices de aprovechamiento.

Se pretende que el software ayude a tomar decisiones respecto al material a emplear y que nos permita dimensionar elementos de manera rápida y eficiente, ya sea en oficina o a pie de obra.

La metodología de cálculo que se empleado en el programa se corresponde con la prescrita en la normativa española de obligado cumplimiento: Código Técnico de la Edificación.

El programa de cálculo se implementa en lenguaje de programación C++ utilizando el entorno de desarrollo Embarcadero C++Builder 2010 para aplicaciones Windows.

## Referencias

- Código Técnico de la Edificación. Disposiciones generales, condiciones técnicas y administrativas, exigencias básicas y anejos. Ministerio de Vivienda.
- Código Técnico de la Edificación. Seguridad Estructural: Bases de Cálculo y Acciones en la Edificación. Ministerio de Vivienda.
- Código Técnico de la Edificación. Seguridad Estructural: Cimientos. Ministerio de Vivienda.
- Código Técnico de la Edificación. Seguridad Estructural: Acero. Ministerio de Vivienda.
- Código Técnico de la Edificación. Seguridad Estructural: Fábrica. Ministerio de Vivienda.
- Código Técnico de la Edificación. Seguridad Estructural: Madera. Ministerio de Vivienda.
- EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural. Real Decreto 1247/2008 de 18 de julio. Ministerio de Fomento.
- Eurocódigo 1: Acciones en estructuras.
- Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón.
- Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero.
- Eurocódigo 4: Proyecto de estructuras mixtas de hormigón y acero.
- Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera.
- Eurocódigo 6: Proyecto de estructuras de fábrica.
- Norma de Construcción Sismorresistente. Parte general y edificación. Real Decreto 997/2002 de 27 de septiembre de 2002.
- EHE-98. Instrucción de Hormigón Estructural. Real Decreto 2661/1998 de 11 de diciembre. Ministerio de Fomento.

- EH-88. Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado. Real Decreto 824/1988 de 15 de julio. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.
- EH-91. Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado. Real Decreto 1039/1991 de 28 de Junio de 1991.
- EF-88. Instrucción para el proyecto y la ejecución de forjados unidireccionales de hormigón armado o pretensado. Real Decreto 824/1988 de 15 de julio. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.
- EF-96. Instrucción para el proyecto y la ejecución de forjados unidireccionales de hormigón armado o pretensado. Real Decreto 2608/1996 de 20 de diciembre de 1996. Ministerio de Fomento.
- Instrucción para el proyecto y la ejecución de forjados unidireccionales de hormigón estructural realizados con elementos prefabricados (EFHE). Real Decreto 642/2002 de 5 de julio. Ministerio de Fomento.
- NBE AE-88. Acciones en la Edificación. Real Decreto 1370/1988 de 25 de julio de 1988.
- NBE EA-95. Estructuras de acero en edificación. Real Decreto 1829/1995 de 10 de noviembre de 1995.
- Normas Tecnológicas de la Edificación. Estructuras. Diseño, cálculo, construcción, valoración, control y mantenimiento. Ministerio de Fomento
- NBE MV 101-1962. Acciones en la Edificación. Decreto 195/1963 de 17 de enero de 1963.
- NBE MV 103-1972. Cálculo de estructuras de acero laminado en edificación. Decreto 1353/1973 de 12 de abril de 1973.
- Los Eurocódigos: unas Normas Europeas singulares. Preguntas básicas. Gonzalo Sotorrió. Artículo publicado en la revista UNE editada por AENOR
- Página web del Código Técnico. ([www.codigotecnico.org](http://www.codigotecnico.org))
- Página web del Ministerio de Fomento. ([www.fomento.es](http://www.fomento.es))
- Estructuras metálicas para edificación según criterios del Eurocódigo 3. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. José Monfort Lleó.
- Estructuras metálicas para edificación adaptado al CTE. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. José Monfort Lleó.
- Cálculo de la estructuras de acero frente al incendio. Publicaciones Apta. Jesús Ortiz Herrera y Julia Villa Celino. 2009.
- Estructuras de acero. Cálculo, Norma Básica y Eurocódigo. Bellisco Ediciones Técnicas y Científicas. Ramón Argüelles Álvarez, Ramón Argüelles Bustillo, Francisco Arriaga Martitegui y José Ramón Atienza Reales.
- Prontuario de Estructuras Metálicas. 5ª Edición. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Cedex). Ministerio de Fomento
- Estructuras de madera. Diseño y Cálculo. Publicaciones AITIM. Ramón Argüelles Álvarez y Francisco Arriaga Martitegui. 1996.
- Intervención en estructuras de madera. Publicaciones AITIM. Francisco Arriaga Martitegui. Fernando Peraza Sánchez, Miguel Esteban Herrero, Ignacio Bobadilla Maldonado y Francisco García Fernández.
- Memoria de cálculo. Nuevo Metal 3D v.2010. Cype Ingenieros.

Manual de Tricalc 7.1. Cálculo Espacial de Estructuras Tridimensionales. Arktec S.A.

Manual de Prontuario informáticos de estructuras metálicas y mixtas. Asociación para la Promoción Técnica del Acero (APTA).

Manual de SEM-cal. Aplicación Informática para la comprobación de vigas y pilares de madera. Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España.

**Correspondencia** (Para más información contacte con):

Ana González Marcos.  
Área de Proyectos de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica.  
Universidad de La Rioja  
C/ Luis de Ulloa 20, 26004 Logroño, La Rioja (España).  
Phone: +34 941 299 519  
E-mail: [ana.gonzalez@unirioja.es](mailto:ana.gonzalez@unirioja.es)