

Aplicaciones de XC en el proyecto de estructuras.

Luis C. Pérez Tato. XC Ingeniería Estructural



2 de abril de 2013

1. Introducción

En los párrafos siguientes se analizan brevemente las ventajas que presenta el uso de XC¹ en las tareas de cálculo que se llevan a cabo en una oficina de proyecto de estructuras.

El objetivo que se persigue con el desarrollo de XC es devolver al ingeniero² el **control sobre el proceso de diseño** haciéndolo tan independiente del software como sea posible. En nuestra opinión, el papel que deben jugar los programas de análisis en el diseño de estructuras es el mismo que el que corresponde a los editores de partituras³ en la composición musical; meras herramientas. Por tanto el software debe dotar al diseñador de herramientas que faciliten su tarea⁴, facilitando en lo posible que se les dé usos distintos al previsto inicialmente por el programador. Si además con ello se consigue que el cálculo pierda protagonismo en el proceso de diseño de la estructura (distriga menos al diseñador) cediendo protagonismo a otras tareas como la integración de la estructura en el paisaje, su adecuada concepción desde el punto de vista constructivo y económico, . . . el beneficio será doble.

¹XC es un programa de código abierto para el análisis de estructuras mediante elementos finitos.

²Aquí (y en lo que sigue) en lugar de ingeniero podría haber escrito «arquitecto» pero no parecía lógico excluir a los ingenieros. También habría podido utilizar «calculista» pero estoy de acuerdo con Juan C. Arroyo Portero en que este término resulta un tanto despectivo. Así que finalmente «ingeniero» parece la palabra menos inadecuada.

³Lilypond, Sibelius, Finale, . . .

⁴Sobre todo permitiéndole abordar problemas que resulta muy costoso resolver por otros medios (análisis experimental, . . .).

1.1. Principios de diseño

Las ideas en las que se basa el desarrollo de XC son las siguientes:

- El usuario es un **ingeniero**, por tanto, conoce cómo funciona un ordenador, está habituado a manejarlo y no le asusta emplear un lenguaje de programación.
- La **verificación** del código es tan importante como su desarrollo. Deben desarrollarse test de verificación para todos los materiales, elementos y procedimientos de cálculo implementados en el programa. Ello sin perjuicio de las verificaciones de los resultados del análisis obtenidos que deban realizarse en cada caso.
- La rueda ya está inventada. Como en cualquier otro software libre el desarrollo se basa en la **colaboración**. En concreto XC emplea, entre otras, las bibliotecas que se muestran en la figura 1.
- Paraphrasing Einstein; el software «será tan fácil de usar como sea posible, pero no más». Se preferirán los métodos basados en el **análisis del fenómeno físico** que los basados en fórmulas aproximadas.
- Todo el código está a **disposición** del ingeniero que, de este modo, puede modificarlo, agregar nuevas características (nuevos materiales, elementos, procedimientos de cálculo, . . .). Los únicos límites para estos desarrollos serán los que vengan impuestos por el estado del arte y por la técnica en la que se basa (lenguaje de programación, . . .).

- Las **decisiones sobre el diseño** de la estructura (normas a aplicar, materiales y tipos estructurales a emplear, procedimiento de cálculo más adecuado, ...) las toma el ingeniero. El software es sólo una colección de herramientas que hace más fácil la tarea.
- Es la máquina la que sirve al ingeniero, no al revés. Esto, que parece obvio, no siempre se cumple en la práctica. Es frecuente encontrarnos en la necesidad de trasladar datos «manualmente» entre unas aplicaciones y otras, en el mejor de los casos mediante «copiar y pegar». Se facilitará en lo posible el **intercambio de datos** con otras aplicaciones⁵.

1.2. Características del software

Las herramientas que forman el paquete de software pueden agruparse en las siguientes categorías:

- **Lenguaje de programación:** aunque hasta ahora el programa disponía de un lenguaje de programación propio, ya hemos iniciado la migración de la interfaz a Python. Este cambio supone una mayor robustez de la interfaz y facilita la reutilización de código ya disponible en este lenguaje.
- **Geometría:** estas herramientas permiten la definición de objetos geométricos (puntos, rectas, polígonos, poliedros, ...) en dos y tres dimensiones y expresar operaciones sobre ellos (unión, intersección, geometría de masas (áreas, volúmenes, tensores de inercia, ...)). Este código está basado en la biblioteca CGAL.
- **Combinación de acciones:** utilidades para obtener las combinaciones de acciones que definen las normas (eurocódigos, EAE, EHE, CTE, IAP, IAPF, ...) para su consideración en los distintos estados límite y situaciones de proyecto.
- **Motor de cálculo de elementos finitos:** rutinas que se encargan de procesar la malla de elementos finitos y ejecutar el análisis.

⁵Es muy frecuente que los resultados de un proceso sean datos para otro.

El motor de cálculo de XC está basado en el de OpenSees.

- **Visualización científica:** esta parte del código es la encargada de mostrar gráficos que representen adecuadamente diversos resultados del análisis. Para ello se emplea la biblioteca denominada «Visualization Toolkit» de la empresa Kitware Inc.
- **Conexión con bases de datos:** esto permite almacenar datos, resultados o pasos intermedios del cálculo en motores de base de datos como MySQL, SQLite o Berkeley DB.
- **Motor de modelado:** herramientas para facilitar la generación del modelo de elementos finitos. Estas herramientas permiten la definición de líneas, superficies y volúmenes que sirven de «esqueleto» para la generación de la malla de elementos finitos.
- **Conexión con Salome.** Salome es una herramienta para el pre y post procesamiento de simulaciones numéricas. Estas rutinas de conexión permiten generar archivos MED para su post-procesamiento en Salome e importar modelos de elementos finitos generados con dicha herramienta⁶.
- **Obtención de listados⁷.** Este grupo de rutinas es el que se encarga de generar archivos de L^AT_EX que posteriormente pueden incluirse en otros documentos (nota de cálculo, ...) o emplearse para generar archivos «Postscript» ó PDF.

2. Aplicaciones

En los apartados siguientes pasaremos revista a algunas aplicaciones de XC que, en nuestra opinión, resultan especialmente interesantes para el proyecto de estructuras.

2.1. Combinación de acciones

La obtención de las combinaciones a considerar en el cálculo de acuerdo con la mayor parte

⁶Esta característica está aún en periodo de pruebas.

⁷Aunque es una forma de representar los resultados que cada vez se usa menos por la dificultad de su interpretación a veces su empleo resulta conveniente.



Figura 1: El desarrollo de XC se basa en otros paquetes de software libre muy reconocidos.

de las normas europeas es una tarea trivial pero tediosa. Salvo en los casos más sencillos, en los que sólo intervienen tres o cuatro acciones, las expresiones prescritas por las normas obligan a considerar cientos, o a veces miles, de combinaciones.

Para facilitar esta tarea XC proporciona los algoritmos necesarios para, una vez definidas las acciones que intervienen en el cálculo y la norma que especifica los coeficientes de ponderación y simultaneidad a emplear (EAE, EHE, Eurocódigo, IAP,...) obtener las combinaciones para cada estado límite.

Estas combinaciones pueden emplearse posteriormente en el análisis del modelo de elementos finitos o bien, como cualquier otro dato, exportarse con otros fines (hojas de cálculo,...).

2.2. Comprobación de elementos de hormigón armado.

Los programas de análisis mediante elementos finitos son extraordinariamente eficaces a la hora de obtener esfuerzos en los distintos miembros de una estructura. Sin embargo estos resultados no son útiles por sí mismos ya que de lo que se trata es de comprobar que la estructura diseñada⁸ resiste esos esfuerzos. A veces se opta por obtener una envolvente de momentos y comprobar sólo para los extremos que marca dicha envolvente. Este procedimiento es adecuado sólo cuando no se produce interacción entre los esfuerzos lo que no es muy frecuente.

El procedimiento que se emplea en XC consiste en verificar la resistencia en cada uno de los elementos del modelo y para cada una de las combinaciones⁹. Esta proceso se realiza para cada una de las comprobaciones que establece la norma (tensiones normales, cortante, fisuración,...). Los resultados obtenidos se expresan, para cada comprobación, mediante un índice que denominamos «factor de capacidad» y que indica si la resistencia es suficiente (valores menores que 1) o insuficiente (valores mayores que 1) en la combinación que ha resultado pésima. Este campo escalar se representa sobre la malla de elementos finitos de modo que se

⁸No se considera aquí el dimensionamiento de la estructura que se habrá realizado con anterioridad.

⁹Aunque el procedimiento es relativamente caro desde el punto de vista computacional es perfectamente «tratable» por cualquier estación de trabajo modesta.

obtiene un gráfico en el que puede verse el grado de sollicitación en cada uno de los puntos de la pieza.

La comprobación de las secciones de hormigón armado se basa en el empleo de modelos de fibras que permiten expresar de forma muy rigurosa las condiciones indicadas por las normas para la verificación de la resistencia.

2.3. Comprobación de estructuras de acero

A la hora de calcular estructuras de acero mediante modelos de elementos finitos, las principales dificultades son las siguientes:

- Mayor número de piezas (elementos de arriostramiento, elementos de unión,...) que cuando se emplean materiales más monolíticos.
- Mayor importancia de los fenómenos de inestabilidad (pandeo,...).
- Presencia de tirantes y otros elementos diseñados para trabajar en un sólo sentido (tracción).
- Obtención de esfuerzos y análisis de las uniones.

Para facilitar la modelización y el post-proceso de estructuras con multitud de piezas (correas, tirantes, puntales, diversos elementos de arriostramiento) XC ofrece el uso de «rejillas» de puntos en dos y tres dimensiones que nos permiten definir un «esqueleto» de la estructura a cuyas posiciones se puede acceder mediante índices (i,j,k) y también asignar nombres como «cumbreira», «arranques» y «hombro de pórtico» a dichas posiciones de manera que resulten indicativos de la posición que ocupan en el modelo. Por otra parte los nodos y elementos de la estructura pueden agruparse en un número arbitrario de conjuntos («pilares», «jácenas», «tirantes») que facilite el post-proceso y la interpretación de sus resultados.

Aunque es posible realizar un tratamiento riguroso del pandeo mediante análisis no lineal que contemple la no linealidad geométrica y la de los materiales raramente será aconsejable plantear dicho análisis directamente. Por lo

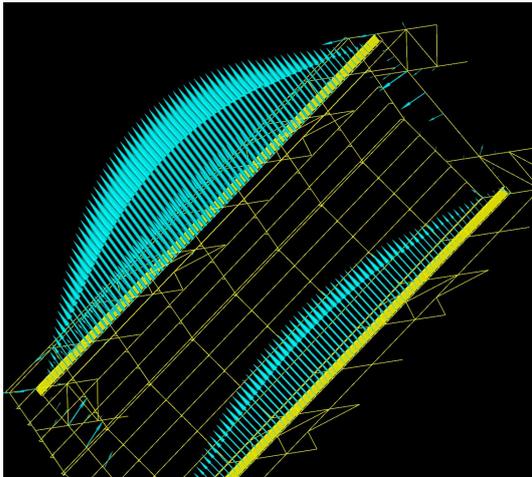


Figura 2: Cargas modales equivalentes obtenidas en una estructura metálica.

general será recomendable realizar análisis lineales que permitan predimensionar los distintos elementos de la estructura e ir «familiarizándonos» con su comportamiento frente a las diferentes cargas. Sin embargo es necesario introducir en dicho análisis el efecto del pandeo y el de los tirantes u otras piezas que no trabajan a compresión. Para ello el análisis se divide (sin la intervención del usuario) en dos etapas, en la primera se obtiene la respuesta lineal de la estructura a partir de la cual se desactivan elementos correspondientes a tirantes en compresión y se evalúa el efecto del pandeo mediante el método «P-Delta», de modo que los resultados de esta segunda fase incorporan los efectos antes citados.

Por último, en cuanto al análisis de las uniones, todas las estructuras de datos que emplea el software son accesibles al usuario, lo que simplifica la tarea de establecer conjuntos de elementos de los que extraer los esfuerzos a los que estarán sometidas las barras que llegan a la unión. Estos esfuerzos pueden servir a continuación como datos para algoritmos de comprobación de uniones como los que propone el Eurocódigo o para modelos de elementos finitos «de detalle» de las uniones.

2.4. Estructuras pretensadas

El efecto del pretensado sobre una estructura suele modelizarse mediante dos procedimientos;

el primero consiste en introducir sobre la estructura un conjunto de acciones equivalentes a dicho efecto y el segundo consiste en modelizar los tendones y su vinculación con la estructura. Aunque no existe ningún impedimento para emplear el primero¹⁰ de los métodos en XC éste tiene el inconveniente de que no tiene en cuenta la hiperestaticidad del problema. En consecuencia para disponer de una simulación adecuada del problema se modelizan los tendones mediante elementos unidimensionales sometidos a una tensión inicial (en el caso de elementos postesados pueden «activarse» los elementos en el momento oportuno).

2.5. Estructuras atirantadas

Para el cálculo de estructuras atirantadas es frecuente emplear métodos como el propuesto en la referencia [2] en el que el tirante se representa mediante una barra a tracción cuya rigidez se obtiene mediante fórmulas aproximadas. Como en el caso anterior, este procedimiento ignora la hiperestaticidad del problema, lo que obliga a proceder por iteraciones en cada una de las cuales el ingeniero debe evaluar la situación de cada tirante y modificar su respuesta de acuerdo con las indicaciones del método. Además este proceso deberá repetirse para cada una de las combinaciones de cálculo. Estas dificultades pueden evitarse modelizando los cables mediante elementos de barra con material «no tracción» y teniendo en cuenta la no linealidad de tipo geométrico que presenta el problema. Aunque este procedimiento no está exento de dificultades (será necesario prestar atención al orden en que se introducen las cargas e introducir éstas paulatinamente) una vez que se consigue la convergencia del método para el problema concreto resulta muy cómodo de aplicar.

2.6. Estructuras construidas por fases

Cierto tipo de estructuras como las mixtas o las de hormigón prefabricado se construyen por fases de modo que cuando se vierte el hormigón «in situ» las piezas de acero u hormigón prefabricado a las que se une este hormigón ya tienen

¹⁰Este método de las acciones equivalentes será incluso más adecuado para las labores de predimensionamiento de la estructura.

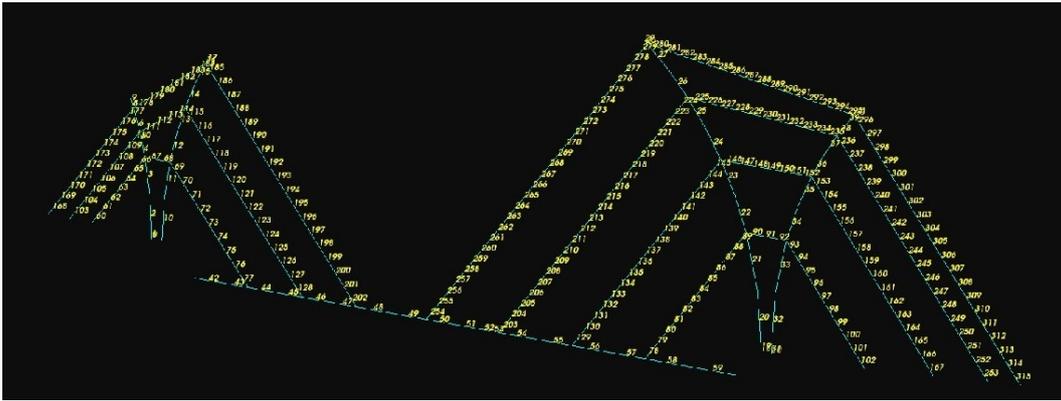


Figura 3: Modelo de estructura atirantada.

un estado tensional previo. Aunque la importancia de este hecho varía dependiendo del tipo de estructura y de los materiales implicados (tiene mayor importancia en estructuras mixtas acero-hormigón) es relativamente sencillo introducir en el modelo el efecto de las fases. Para ello emplearemos la «activación» o «desactivación» de los elementos del modelo que representen el material colocado in situ. También es posible «activar» o «desactivar» fibras de una sección cuando, por ejemplo, se trata de modelizar un pilar o una viga mixta.

Referencias

- [1] Fabio F. Taucer et al., *A fiber beam-column element for seismic response analysis of reinforced concrete structures*. (EERC University of California, Berkeley. 1991).
- [2] ACHE, *Manual de Tirantes*. (Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 2007).