

USO RESPONSABLE DEL SOFTWARE EN EL CÁLCULO DE ESTRUCTURAS

Ing. Hugo Donini¹– Ing. Rodolfo Orler²

1. Resumen

El presente trabajo plantea aspectos básicos para el uso responsable del software en el cálculo de estructuras, centrándose particularmente en las de hormigón armado.

Como metodología, se enumeran las previsiones que el proyectista debe tener en el uso de programas de cálculo en las distintas etapas del proyecto, se ejemplifican situaciones en las que la modelación no se ajusta al comportamiento “real” del elemento estructural y se indican las omisiones usuales de los programas en el detalle de las armaduras. Asimismo, se da una serie de recomendaciones a la hora de adquirir un software de cálculo estructural y se destaca la relevancia de la memoria de cálculo *confeccionada por el proyectista* como parte esencial de la documentación de un proyecto.

Se concluye en que los programas de computadora no pueden ni deben reemplazar el criterio, la experiencia y el razonamiento del proyectista estructural.

2. Abstract

This work raises basic aspects for the responsible use of the software in the calculus of structures, focusing particularly on reinforced concrete.

As a methodology, forecasts that the designer should have in the use of calculation programs at different stages of the project are listed illustrate situations in which the modeling does not conform to the "real" behavior of the structural element and indicates the usual shortcomings of programs in the detail of the armor. Also gives a number of recommendations when purchasing a structural calculation software and highlights the relevance of the memory of calculation made by the designer as an essential part of the documentation of a project.

It concludes that computer programs can not nor should replace the criterion, the experience and the reasoning of the structural Designer.

¹ Ingeniero Civil e Hidráulico. Jefe de Trabajos Prácticos de las Cátedras de Hormigón I, Hormigón II y Puertos y Vías Navegables, y Auxiliar de la Cátedra Programación Básica y Métodos Numéricos de la Carrera de Ingeniería Civil de la U.N.P.S.J.B. (Sede Trelew). Miembro Plenario de la Asociación de Ingenieros Estructurales. E-mail: hugo.donini@gmail.com.

² Ingeniero en Construcciones. Director de la Unidad Ejecutora Provincial – S.C.O.M.C. Chubut. Profesor Adjunto de la Cátedra de Hormigón I y Hormigón II, y Jefe de Trabajos Prácticos de la Cátedra de Construcciones Metálicas y en Madera de la Carrera de Ingeniería Civil de la U.N.P.S.J.B. (Sede Trelew). Ex – Docente Jefe de Trabajos Prácticos Cátedras de Hormigón I y Hormigón II. Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Comahue – Neuquén. Miembro Plenario de la Asociación de Ingenieros Estructurales. Autores del libro “Introducción al Cálculo de Hormigón Estructural” Ed. Nobuko – ISBN 978-987-584-245-8.

3. Etapas de un proyecto estructural

En general, al encarar el proyecto y cálculo de una estructura, es necesario evaluar ciertas cuestiones fundamentales:

- La tipología estructural.
- La definición del material a utilizar.
- El sistema constructivo.
- Impacto ambiental de la obra.
- Costos asociados con el proyecto.

La tarea del ingeniero será con base a dichos aspectos, la optimización de la solución entre las posibles de ejecutar en donde se suele utilizar programas de cálculo. Podríamos establecer las siguientes etapas de avance en la concreción del proyecto:

1.1. Etapa I: “Obtener datos del problema”

- Medio donde se va a materializar la obra.
- Servicios que debe prestar la obra.
- Materiales disponibles, mano de obra local.
- Tecnología disponible en el marco de la obra.
- Vida útil requerida para el proyecto.
- "Restricciones" de todo tipo que se imponen: condiciones de fundación, accesos, clima, normas reglamentarias, etc.

1.2. Etapa II: “Anteproyecto estructural”

Esta es una etapa importante. Es necesario tener previamente una idea clara de la forma de comportamiento de la estructura. Al respecto, citamos un párrafo del Ing. Schlaich, del texto Método Práctico para el Dimensionamiento y Construcción de Estructuras de Hormigón Armado, “... El conocimiento del flujo de tensiones es la base del dimensionamiento integral y coherente... Dicho conocimiento del flujo de tensiones dará por resultados estructuras eficientes y bellas que respondan a la tecnología del material empleado”.

1.3. Etapa III: “Cálculo Estructural”

Esta etapa es la que confirma o da origen a ajustes en lo previsto como anteproyecto estructural. El aspecto más importante está dado por el planteo de las

hipótesis de cálculo. De la correcta definición de las mismas dependerá el grado de aproximación entre el comportamiento real y el teórico de la estructura. El grado de aproximación de las diferentes hipótesis de cálculo debe ser compatible con:

- ✓ Conocimiento del valor de las cargas.
- ✓ Comportamiento de la fundación e idealización de la misma (no existen los empotramientos perfectos ni los apoyos simples).
- ✓ Predicción del comportamiento mecánico de los materiales (relación: tensión-deformación).
- ✓ Rigideces a considerar para los elementos de hormigón que en general en servicio trabajan en estado II. Por ejemplo al pasar al estado II, disminuye mucho más la rigidez a torsión que la de flexión (vigas - emparrillado).

1.4. Etapa IV: Dimensionado

Se aplican los criterios establecidos por la norma de aplicación que especifique el Comitente. Debe tenerse presente el no combinar criterios de distintas normas para una estructura dada porque puede conducir a errores graves. Este aspecto es relevante en software que permite efectuar cálculos con diversas normativas aún en una misma estructura. Lo que sí es factible es el dimensionado por una norma y la contrastación por otra.

Deben evaluarse los efectos de segundo orden en elementos comprimidos y tener mucho cuidado con los detalles de armado. Estos son fundamentales para asegurar que la estructura pueda ser correctamente hormigonada y funcionar adecuadamente. Según las condiciones del medio debe analizarse la fisuración para los elementos sometidos principalmente a flexión o tracción. Este aspecto es importante en aquellas estructuras donde prevalezca el peso propio, verificando si las deformaciones son compatibles con las condiciones de uso.

De utilizarse un programa de dimensionado debe ser adecuadamente chequeado, conocer sus limitaciones y prestaciones y analizar con juicio crítico los resultados obtenidos. Asimismo debe considerarse que, en general, dichos programas no evalúan efectos localizados tales como: introducción de cargas, apeos de una viga en otra, armado de nudos, zonas con huecos en losas, etc. En ocasiones presentan detalles de armaduras que en afán de su optimización, generan dificultades con las longitudes de anclaje, las que permiten un trabajo pleno de las armaduras. Debe evaluarse con criterio si la etapa constructiva puede ocasionar solicitaciones más desfavorables que las derivadas de la situación final de servicio. En tales casos, el proyecto debe incluir las indicaciones respecto de la forma de llevar adelante la construcción, tales errores son fuente frecuente del origen de patologías en estructuras de edificios. Un ejemplo de ello, es el del colapso progresivo tanto vertical como horizontal del Skyline Plaza Apartments en 1973 en Estados Unidos. El hecho ocurrió durante la construcción del piso 24º y se produjo sobre el nivel 23º por punzonamiento ante una remoción prematura del encofrado (Figura 1).



Figura 1: Colapso progresivo vertical y horizontal del Skyline Plaza Apartments en EE.UU.

1.5. Etapa V: Detallado de las armaduras y confección de la documentación ejecutiva

Esta etapa es de fundamental importancia, según lo expresan textualmente los profesores R. Park y T. Paulay en su obra Estructuras de Concreto Reforzado: ... “un análisis complejo se hace inútil si los cálculos no se pueden traducir a estructuras exitosas. Esto puede suceder cuando la estructura queda representada por un conjunto de dibujos no muy bien detallados”. A fin de lograr esto, se deben compatibilizar las secciones de acero necesarias con el elemento integral (por ej. viga). Ello a los efectos de definir diámetros de armaduras, cantidades, separaciones y recubrimientos.

Se verifican las zonas congestionadas para evaluar si puede realizarse un correcto hormigonado y se chequean las longitudes disponibles de anclaje para verificar si son suficientes. Se detallan adecuadamente los tipos y ubicación de los empalmes. Se elaboran los planos de encofrado, planos de armadura, planos de detalles constructivos y planillas de armaduras. Se desarrollan las especificaciones técnicas correspondientes y se confecciona la memoria de cálculo.

4. El uso de software en el cálculo de estructuras de hormigón armado

En la actualidad se cuenta en forma accesible, cada vez con más frecuencia, con poderosos sistemas de cálculo que realizan el dimensionado y detallado de armaduras. Con base en un determinado modelo, pueden brindar una peligrosa sensación de que están resueltos todos los aspectos principales. Estos programas de cálculo, entregan una abundante información que resulta difícil de evaluar por un proyectista con reducida experiencia en diseño estructural, pudiendo pasar inadvertidos algunos problemas conceptuales. No debe olvidarse, tal como lo expresa el profesor Meli Piralla en su libro Diseño Estructural, que “cualquiera sea el modelo adoptado, no es más que una idealización matemática de la estructura real, de las acciones a las que está sometida y de los materiales de los cuales está

compuesta, idealización que puede representar adecuadamente o no el fenómeno físico en estudio” (Figura 2).

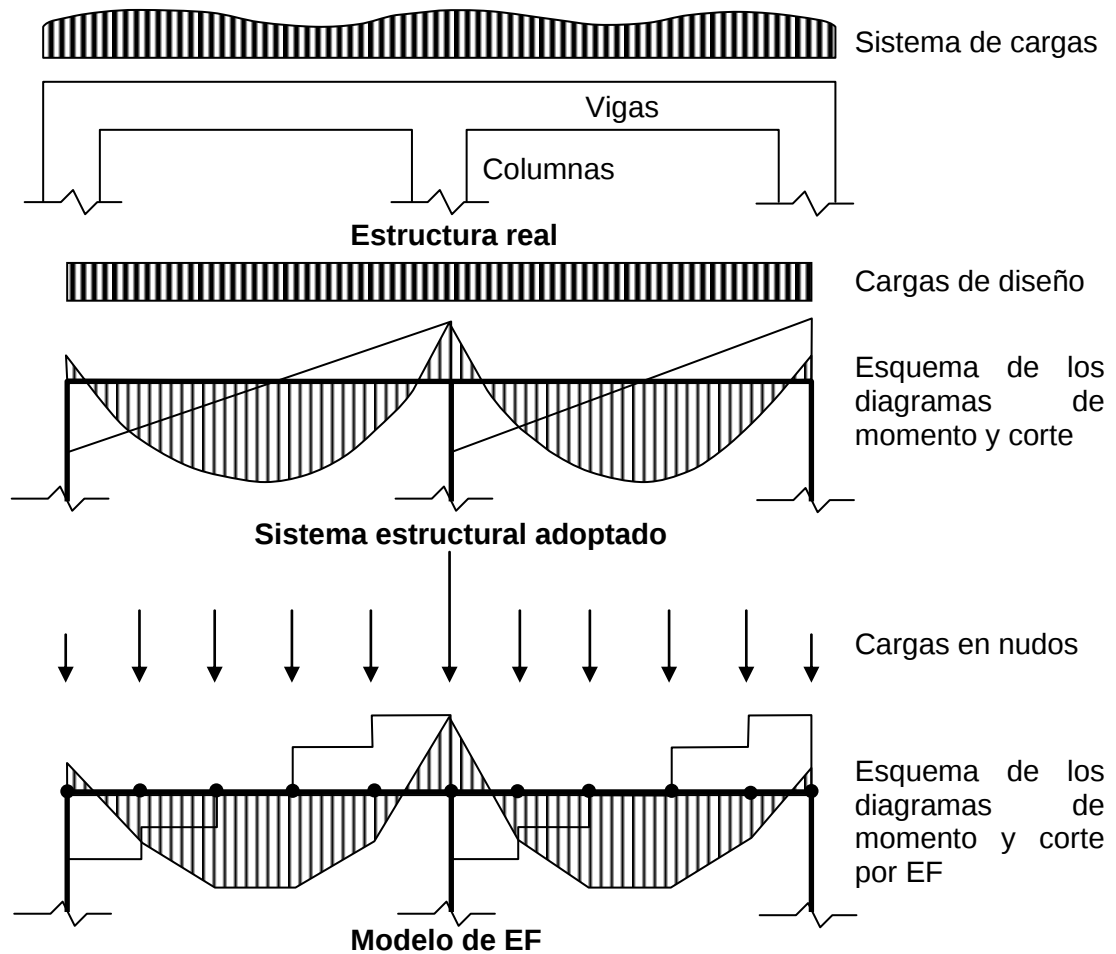


Figura 2: Esquema de las simplificaciones efectuadas en la modelación de una estructura

Respecto del uso de programas de cálculo en el diseño de estructuras de hormigón armado, podemos indicar las siguientes ventajas:

- Hacen posible el cálculo de estructuras que ya sea por el número de operaciones para su solución o por lo tedioso de las mismas, hacían inabordable su concreción.
- Permiten el cálculo de estructuras a nivel espacial y ejecutan el dibujo de planos.
- Hacen posible calcular estructuras que mediante el cálculo normal serían laboriosas.
- Ante la aplicación de operaciones matemáticas repetitivas, reducen la probabilidad de errores.

Sin embargo, es importante tener en cuenta una serie de recomendaciones referidas a su uso en nuestra profesión:

1) No utilizar un software si el usuario no sabe en qué teoría se basa y qué hipótesis tiene implícitas, y por supuesto, que limitaciones tiene para su uso.

2) Los diferentes programas son herramientas valiosas que no reemplazan al ingeniero, sino que, evitan las tareas rutinarias del proyectista, utilizarlos de otra forma, implica perder el control del proyecto, con los riesgos que ello conlleva.

3) Tener en cuenta lo indicado en el libro Diseño Estructural [11 respecto que “La persona que revisa los resultados de un cálculo de computadora debe ser capaz de estimar los órdenes de magnitud y los signos de los resultados esperables. De ahí el interés de los métodos aproximados y de los métodos de predimensionamiento, no sólo por su valor formativo, sino también como métodos de comprobación”.

4) Contar con programas acordes a las características de la computadora utilizada y al problema que se encara con ellos. Al respecto, es bueno rescatar la célebre frase de Confucio: “No utilices un cañón para matar un mosquito”.

5) Tener en cuenta que los resultados obtenidos de un software nunca tendrán más precisión que los datos de ingreso. El propio software de cálculo, como los programas que se utilizan para procesar sus datos (planillas de cálculo, calculadoras, etc.) no se encuentran ajenos a errores. Los resultados se ven afectados por:

- Errores de programa: ningún software se encuentra libre de errores de redondeo causados por la representación binaria del sistema decimal. Sólo a modo de ejemplo (Figura 3), si se suma 1000 veces 0,01 en una planilla de cálculo el resultado no es 10, sino un valor aproximado a 10.

	0.01		
	0.01		
	0.01		
	0.01		
	0.01		
	0.01		
	0.01		
	0.01		
	0.01		
	0.01		
	0.01		
	0.01		
	0.01		
	9.999999999998E+00	Error =	1.6875389974302E-13
		Error porcentual =	1.6875389974302E-12

Figura 3: Error de redondeo en una planilla de cálculo debido a la representación binaria del sistema decimal

- Errores de modelación: surgen principalmente por la idealización de la estructura real, sea por limitaciones del software o por el propio usuario.

- Limitaciones en la modelación del material: muchos resultados se basan en un comportamiento elástico del hormigón, cuando en realidad, resulta inelástico.

- Sistema de cargas: los elementos finitos (EF) se basan en un sistema de fuerzas y desplazamientos nodales, por lo que es importante definir adecuadamente las mallas en las que se divide al elemento estructural.

- Determinación de la armadura requerida: tener en cuenta las limitaciones de interpretación del modelo y del comportamiento “real” de la estructura, en especial, de aquellas zonas en donde no se comprueba la aplicación de las hipótesis de Bernoulli (Figura 4 y Figura 6). Existen elementos, como las vigas de gran altura en las que los programas no pueden, en general, detallar adecuadamente el armado. Debe hacerse la salvedad de aquellos especialmente creados para ello.

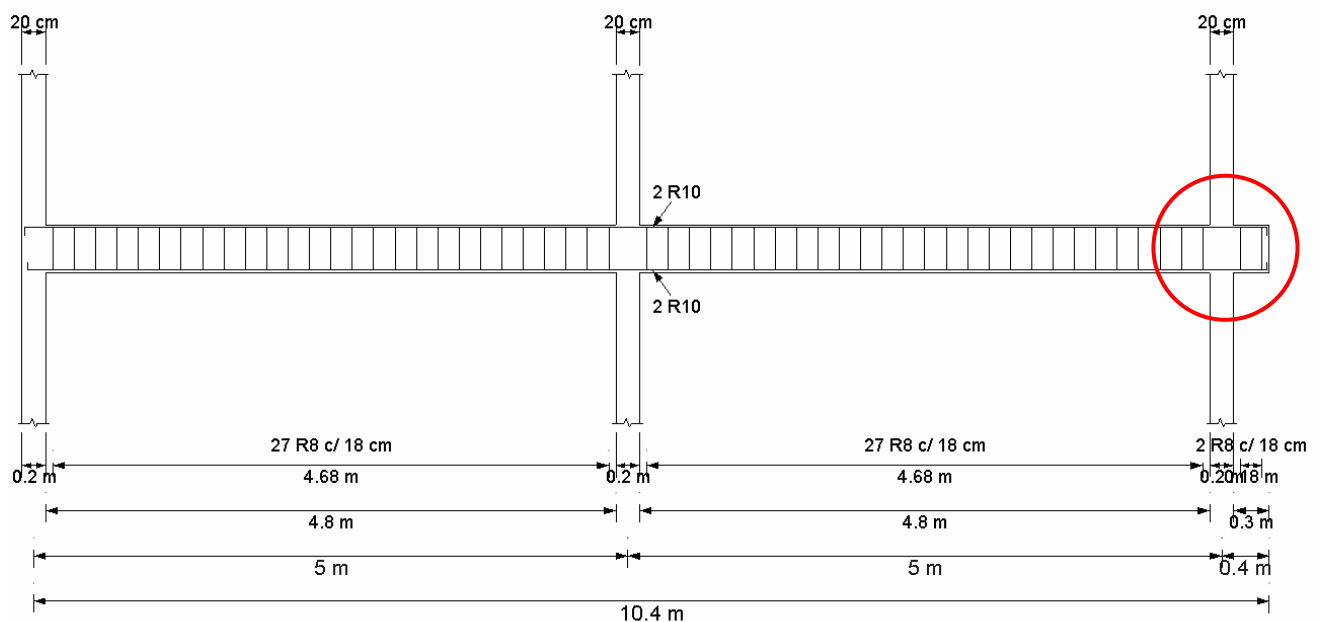
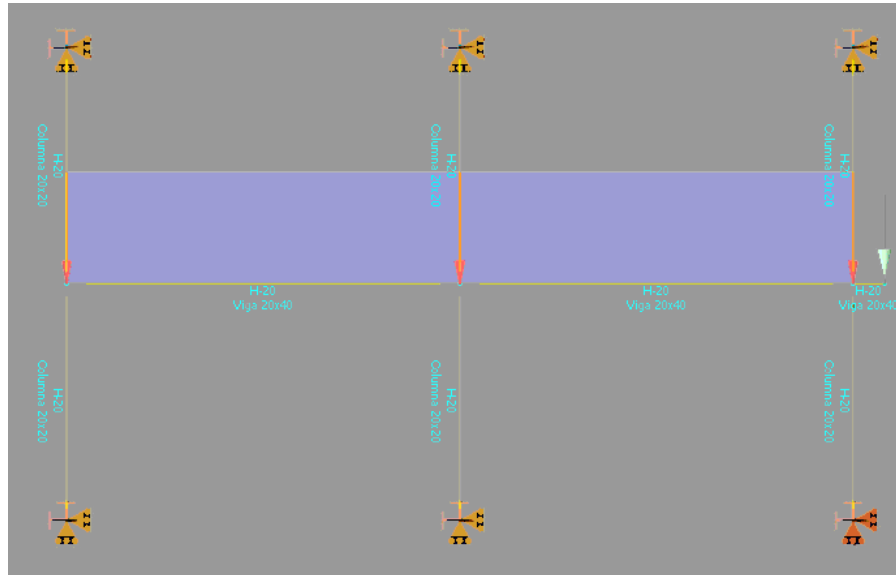


Figura 4: Armado de una viga de hormigón y falta de detalle en la zona donde no se verifican las hipótesis de Bernoulli

- Discretización: resulta en la mayoría de los errores, ya que la estructura se discretiza en una cantidad finita de elementos. Ello depende del tamaño de los elementos, los apoyos y las singularidades (Figura 5).

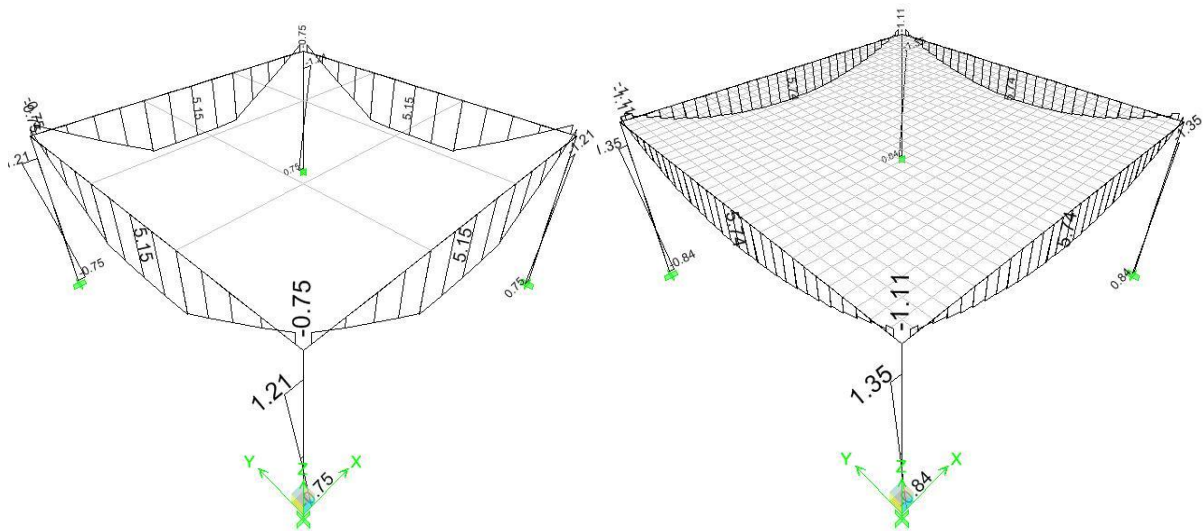


Figura 5: Resultados de un sistema compuesto por una losa de 12 cm de espesor con carga de 700 kg/m^2 , vigas de $20 \times 40 \text{ cm}$ y columnas de $20 \times 20 \text{ cm}$. La superficie es de $6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ y la altura de 3 m . El primer modelo fue resuelto con un mallado de 3×3 y el segundo de 30×30 .

6) Si bien el uso de modelos de cálculo en el plano es una práctica aceptable en ciertos casos, es necesario tener precaución en otros en los que existe, por ejemplo, grandes asimetrías de luces en pórticos o efectos torsionales.

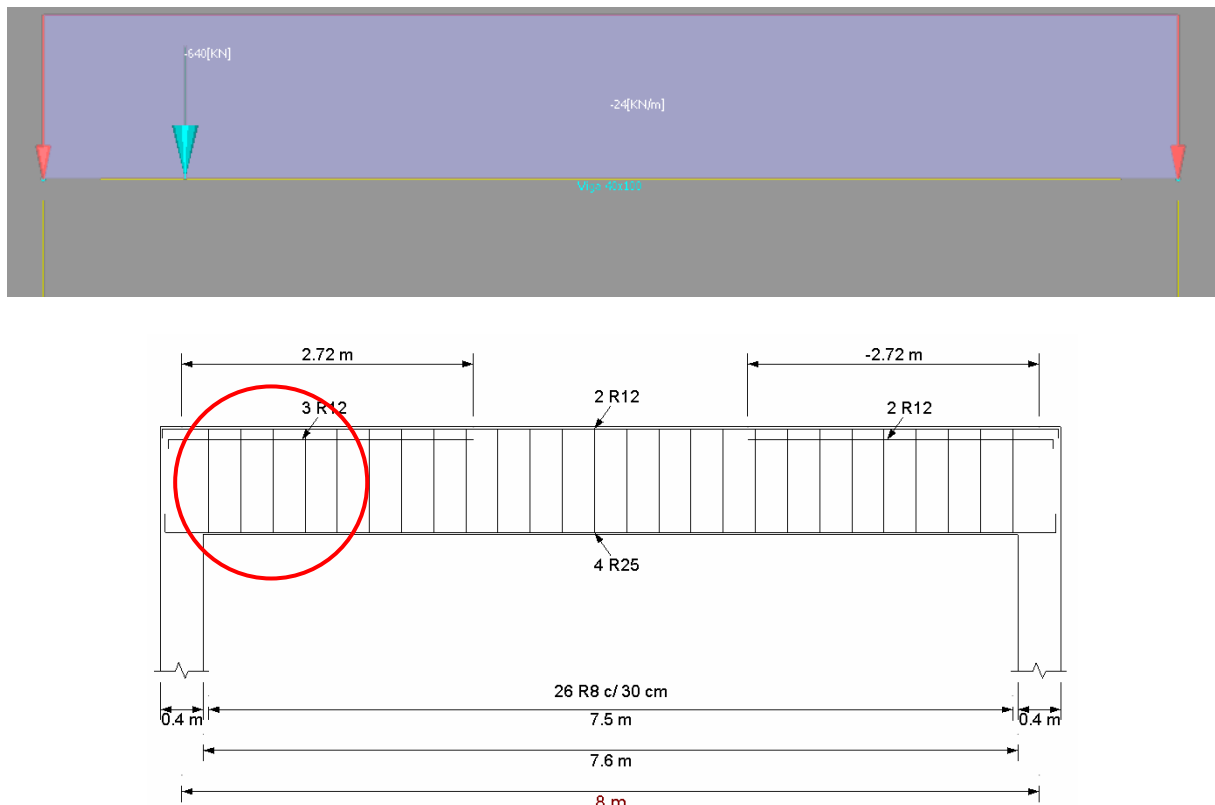


Figura 6: Modelo simplificado de una viga con el apeo de otra secundaria y falta de densificación de estribos para suspender las cargas (no atribuibles al programa)

7) Adoptar recaudos en el detalle de armaduras de vigas de alma ancha. Estos casos ocurren en plateas de fundación (Figura 7) para edificios de altura, pórticos de

grandes luces o vigas con apeo de columnas. Algunos programas de detallado de armaduras no señalan la necesidad de colocar estribos de más de dos ramas. Con estribos de dos ramas, las diagonales comprimidas apoyan sobre las barras longitudinales ubicadas en las esquinas, concentrando esfuerzos.

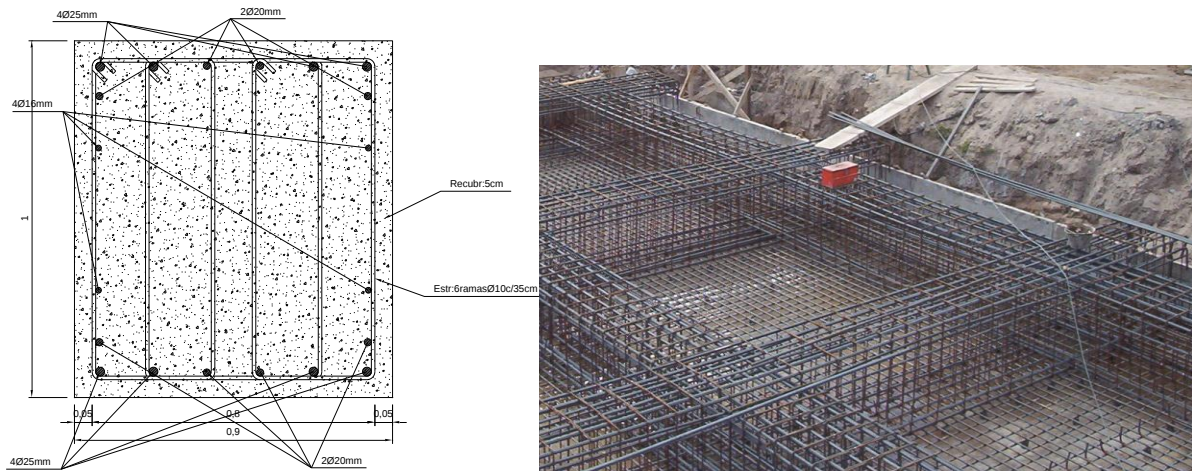


Figura 7: Corte y armado de vigas de alma ancha en una platea de fundación

8) La precisión del cálculo no depende del número de decimales en los resultados arrojados por el software.

9) Previo a la adquisición de un software, verificar la concordancia entre lo que el programa realmente hace y lo que dice que hace en su manual. Es de suma importancia la distribución de versiones de prueba. Se detallará este aspecto en el inciso 5.

10) Algunos programas de cálculo desarrollan una economía aparente de las armaduras. Por ejemplo, en las zonas de armado suelen emplear armados de barras de distintos diámetros para escalonar estrictamente el diagrama de momentos, ahorrando acero. Dicha economía es teórica, ya que conduce a un costo constructivo elevado y a un desarrollo poco ejecutable. Otra situación es el uso inadecuado de las posibilidades del detallado de armaduras.

11) Tener especial precaución en los datos de ingreso para el detalle de las armaduras, ya que de colocarse diámetros máximos excesivos para el problema tratado, se obtienen planos poco factibles de ejecutar (Figura 8).

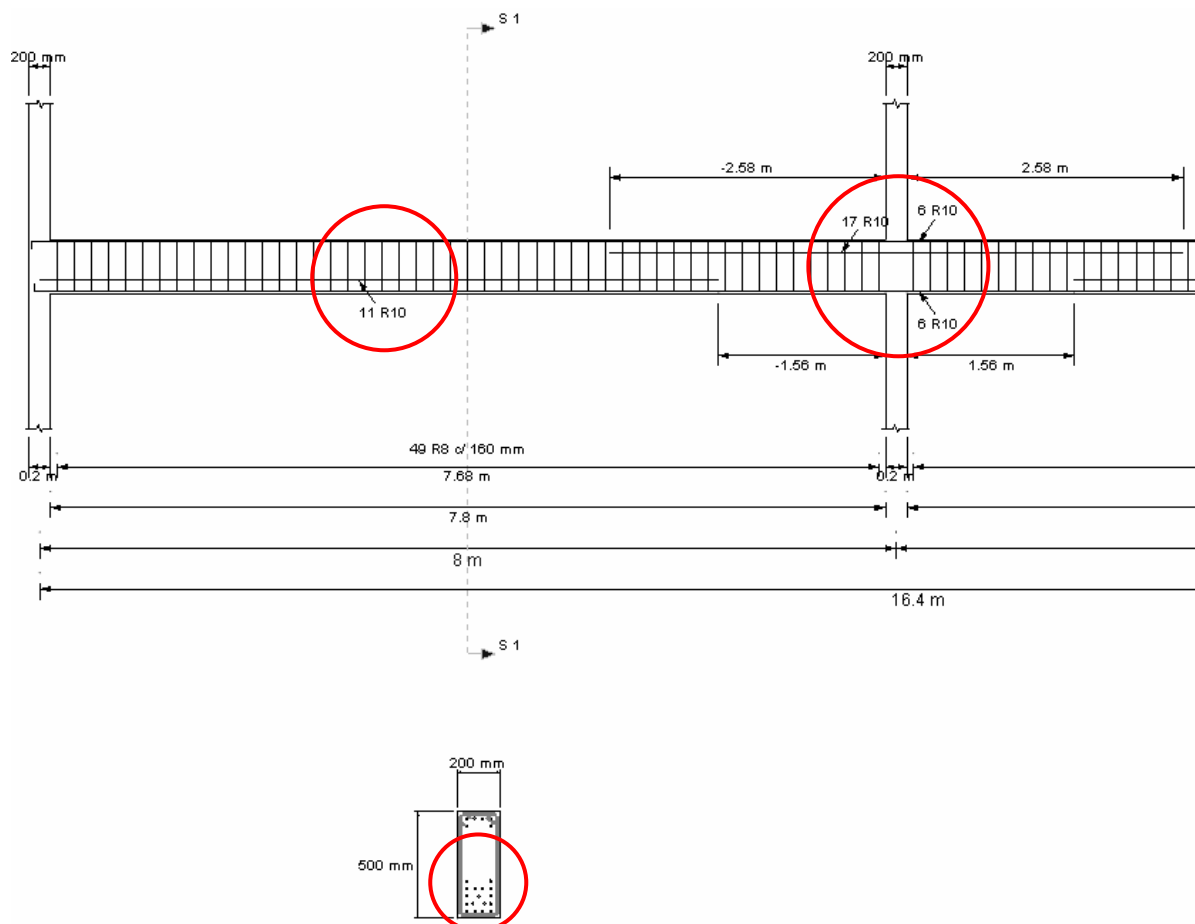


Figura 8: Armado automático de una viga de hormigón con ejecución poco viable sin una adecuada intervención del usuario

12) Es importante observar las convenciones de esfuerzos que poseen los programas de cálculo, las unidades de ingreso de los datos, egreso de los resultados y las referencias que utilizan para indicar los armados de las piezas de hormigón (ver ejemplo de la Figura 9).

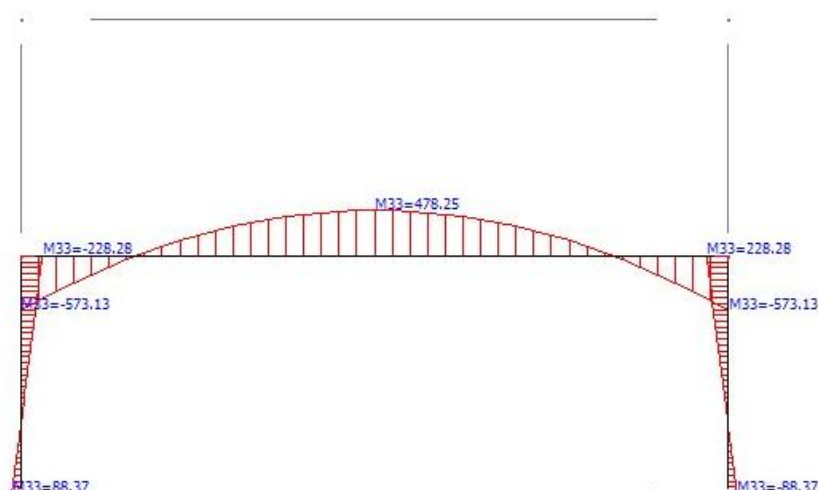


Figura 9: Diagrama de momentos en KNm de una viga con cargas distribuidas cuya convención de signos no es usual

13) En caso de utilizar armados generados por software, a la revisión en pantalla, sumar aquellas hechas sobre papel, imprimiendo versiones preliminares a la definitiva.

14) De presentarse elementos similares, prestar especial atención cuando se haga uso de las opciones “copiar” y “pegar” en planos y planillas de armaduras, ya que es común que se omitan barras, se agreguen armaduras innecesarias o se repitan errores.

15) Utilizar un mallado por EF adecuado a las dimensiones del elemento estructural que se desea modelar y al tipo de cargas aplicadas.

16) Verificar mediante métodos aproximados los resultados arrojados por modelaciones con EF.

17) En las modelaciones por EF de la mayoría de los programas, los centros de gravedad de la placa no suelen coincidir con los de la viga, lo que afecta la transferencia de cargas en el modelo, o bien, no tienen en cuenta fenómenos como el de suspensión de cargas (caso de vigas invertidas) o la discontinuidad en la transferencia de esfuerzos en sistemas de losas por la presencia de losas descendidas.

Existen, por cierto, soluciones a tal inconveniente utilizando barras rígidas. Sin embargo, deberá ejercerse el criterio del proyectista para su uso, ya que el mismo en algunos casos no suele ser del todo apropiado, o genera resultados poco aceptables.

18) Procurar que las divisiones de placas en modelos de EF no produzcan que elementos de gran tamaño se encuentren cercanos a otros pequeños. Para ello, lograr que los segmentos de placa sean similares, adecuándolos a las longitudes de las mismas. Existen recomendaciones al respecto, por las que el lado mayor sea menor al doble del lado menor de los segmentos de placa (Figura 10).

Algunos programas cuentan con opciones que unifican distintos mallados de EF, y permiten transferir las tensiones y los esfuerzos a través de sus nodos (ver Figura 11).

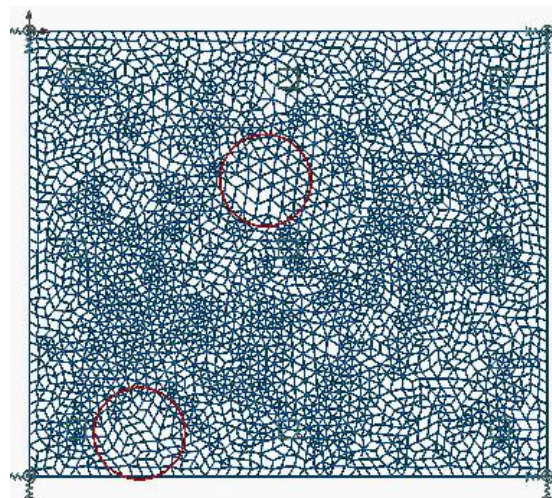


Figura 10: Mallado inadecuado de EF para una platea de fundación por diferencia en el tamaño de los elementos de la malla

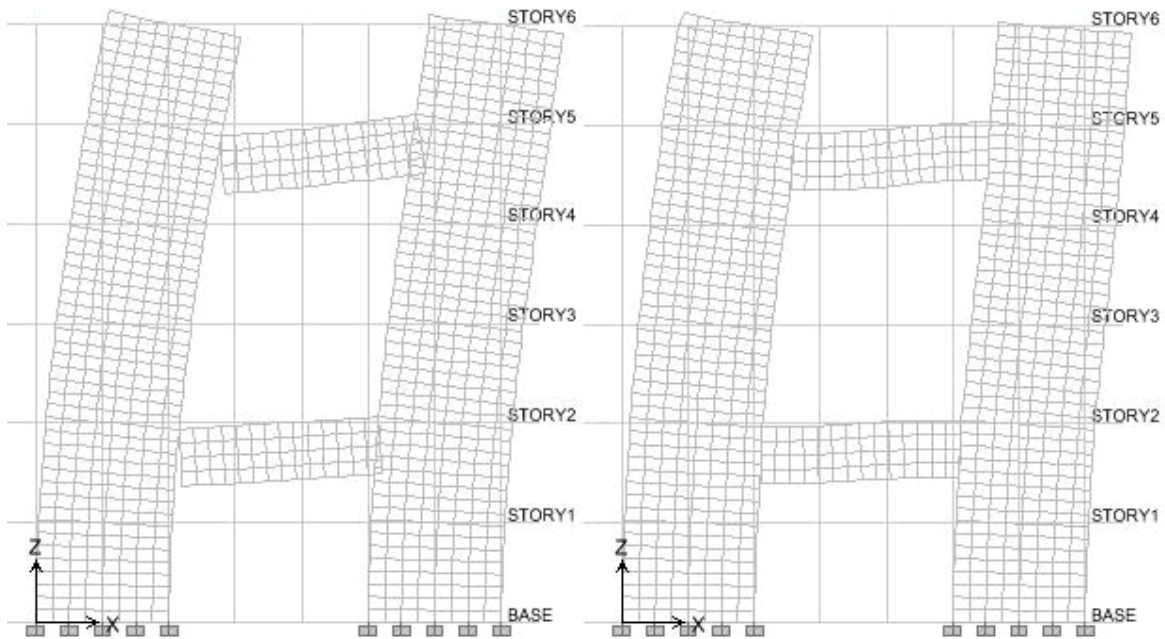


Figura 11: Modelo de un tabique de hormigón armado sin la compatibilización de mallas de EF y con la compatibilización efectuada

19) Buscar coincidencia entre la precisión lograda en un modelo de EF y la de los datos de ingreso al mismo. Por ejemplo, un estudio de suelos que proporcione datos de poca precisión no merece una fundación con una malla con pequeñas divisiones, o a la inversa.

5. Aspectos a tener en cuenta al momento de elegir un software de cálculo estructural

1) Definir precisamente el producto buscado para el desarrollo de las modelaciones.

2) Analizar la viabilidad del hardware disponible y el necesario para el programa que se ofrece en el mercado. Algunos parámetros que nos permiten evaluar este aspecto son:

- a) Velocidad y tipo de procesador.
- b) Sistema operativo necesario.
- c) Memoria RAM requerida adicional a la solicitada por el sistema operativo.
- d) Tamaño en disco ocupado por el programa una vez instalado y espacio que ocupan los archivos que se generan producto de las modelaciones.
- e) Especificaciones de la placa de video mínima requerida, ya que hoy en día muchos programas de cálculo estructural cuentan con opciones de renderizado y visualizaciones 3D.

3) Consultar por referencias a otros proyectistas conocidos y fiables.

4) Lograr que el distribuidor presente diversos ejemplos de estructuras modeladas en el programa previo a su compra o bien versiones limitadas (una buena ayuda son los demos, trials, videos tutoriales, versiones educativas y estudiantiles). De todos ellos, el de mayor valor resulta la versión limitada por tiempo, de la que disponemos de todo su potencial para evaluar a pleno su alcance.

5) Evitar software con formato “caja negra”, procurando que desarrolle explicaciones de cómo y por qué hace lo que hace.

6) Buena definición de la documentación que acompaña al programa:

- a) Campo de aplicación.
- b) Bases de cálculo, métodos y simplificaciones usados en el análisis estructural.
- c) Criterios, métodos, aproximaciones y simplificaciones usadas en el armado.
- d) Título, versión y fecha del programa.
- e) Nombre y titulación de los autores.
- f) Nombre y datos del fabricante.
- g) Ejemplos de estructuras resueltas.
- h) Comparaciones de los resultados del programa con aquellos que surgen de procedimientos matemáticos demostrados y conocidos.

7) Buscar que el software cuente con una interfaz amigable con el usuario, tanto para el ingreso del modelo como para la presentación de los resultados.

8) Es recomendable que el programa importe y exporte una amplia variedad de formatos de otros programas, en particular de aquellos de diseño asistido por computadora (CAD).

9) Observar el número y periodicidad de actualizaciones que el fabricante provee.

10) Evaluar las normas y códigos que el programa incluye para el desarrollo de los cálculos estructurales. Al respecto, es importante lo indicado en los párrafos anteriores referido a la precaución en la combinación de normativas de cálculo.

6. Relevancia de la memoria de cálculo en el proyecto de estructuras de hormigón armado

La memoria de cálculo es un documento elaborado por el proyectista estructural en el cual figuran los estudios previos, los materiales, las acciones, condiciones de durabilidad, los modelos estructurales, el cálculo de esfuerzos, el dimensionado de las estructuras, las verificaciones, y todo aquel procedimiento que permita confeccionar la documentación gráfica de un proyecto.

La memoria de cálculo debe estar desarrollada de tal forma que otro profesional que necesita verificarla, pueda interpretar sus contenidos y planteos sin inconvenientes. Lo anterior es de suma importancia, dado que es frecuente que durante el período de ejecución de la obra surjan cambios, los que deben ser correctamente evaluados por el Director de Obra en cuanto a su incidencia en la seguridad estructural. Es necesario remarcar que los extensos resultados de computadora de los programas de cálculo, no deberían ser considerados por sí solos como “memoria de cálculo”. En las oficinas de control de proyectos podemos observar cada vez con más frecuencia la confusión sobre este importante tema.

La memoria de cálculo debe incluir como mínimo la siguiente información:

- Memoria descriptiva de la obra.
- Referencia del reglamento utilizado.
- Tipo y calidad de los materiales a utilizar.
- Condición de exposición y aspectos de durabilidad de la estructura.

- Detallado análisis de cargas y sus respectivas combinaciones.
- Modelo estructural e hipótesis simplificativas adoptados.
- Cálculo de los esfuerzos.
- Verificación de las condiciones de estabilidad (cuando corresponda: deslizamiento, volcamiento, tensiones admisibles).
- Dimensionado de las secciones.
- Verificación de las condiciones de servicio (cuando corresponda: verificación de flechas y fisuración), recubrimientos.
- Diseño de las fundaciones, acompañado de un estudio de suelos que justifique los parámetros utilizados para el diseño de las mismas.
- Detallado y diseño de las zonas particulares tales como apeo de vigas en vigas, zonas de orificios en losas, zonas de congestión de armaduras en nudos.
- Precauciones a adoptar durante el proceso constructivo (excavaciones, encofrados de losas, etc.).

Es conveniente que las “salidas” de los programas de importante volumen se presenten como anexos a la memoria.

Como observación final, podemos mencionar que resulta importante para lograr un proyecto acorde con el estándar de calidad previsto, la visita periódica a obra del proyectista estructural, a fin de resolver en conjunto con la dirección de obra las eventuales dificultades constructivas que pudieran surgir.

7. Algunas referencias al cálculo mediante software en distintos Códigos y Reglamentos

A continuación efectuamos una recopilación de referencias de distintos Códigos, Proyectos de Reglamento, Recomendaciones y Reglamentos en relación con el tema tratado.

7.1. CIRSOC 201/82

Si bien por el momento de su redacción el CIRSOC 201/82 no posee referencias expresas al uso de software en el cálculo de estructuras, sí expresa en el Art. 3.2.4, inciso a), que la memoria de cálculo debe describir el proceso de análisis estructural adoptado, en forma tal que el mismo resulte fácilmente verificable.

7.2. CIRSOC 201/05

El Art. 1.3.1.4 indica entre sus incisos que “cuando el cálculo se efectúe asistido por computadora, se debe adjuntar en unidades completas y ordenadas las diferentes etapas resueltas con programas distintos. El listado de datos debe contener tanto los datos introducidos por el Proyectista o Diseñador Estructural como los generados por el programa. La documentación entregada debe contener indicaciones precisas sobre la nomenclatura, unidades y criterios de signos de las magnitudes, utilizados en la resolución. De cada programa empleado se debe indicar su identificación, su objeto y su campo de aplicación.”

7.3. ACI 318S-08

El ACI 318S-08 establece en el Comentario R1.2.2 que “los resultados computacionales son aceptables en vez de los cálculos manuales. (...) Sin embargo,

cuando el diseñador haya utilizado un programa de computación, normalmente sólo se requieren los datos básicos. Estos deben contener la suficiente información acerca de los datos de entrada y los resultados, así como cualquier otra información necesaria, con el fin de permitir a la autoridad competente efectuar una revisión detallada y hacer comparaciones utilizando otro programa o cálculos manuales. Los datos de entrada deben contener una designación del elemento, las cargas aplicadas y las longitudes de los vanos. Los resultados correspondientes deben incluir la designación del elemento y los momentos, cortantes y reacciones en puntos relevantes del vano. Para el diseño de columnas se sugiere incluir los factores de amplificación de momentos en los datos de salida, cuando sean aplicables. (...). El análisis de modelos debe ser llevado a cabo por una persona con experiencia en esta técnica”.

7.4.CSA A23.3-04

La CSA A23.3-04, hace una mención especial al análisis por elementos finitos en el Art. 9.5, indicando expresamente:

“9.5.1

Finite element analysis or other numerical techniques may be used to determine load effects, provided that the differences between the behavior of the structure and the behavior assumed in the analysis are accounted for.

Note: The analysis should account for the effects of cracking. If the effects of cracking are not included, the redistribution of stresses due to the anticipated cracking and the effects of this redistribution on the reinforcement layout should be explicitly considered in the design of the reinforcement.

9.5.2

Mesh patterns and boundary conditions shall be consistent with geometry, loading, and restraint conditions. Alternative loading cases shall be considered where applicable. Care shall be taken to ensure realistic modeling of the size and stiffness of supporting elements.

9.5.3

Principal reinforcement may be concentrated in bands or tension ties. Anchorage of the reinforcement shall be explicitly considered.

9.5.4

The analysis shall be checked using independent techniques satisfying equilibrium.

9.5.5

Crack control and deflections shall be considered”.

Es de destacar el inciso 9.5.4 en el que se insta a utilizar técnicas de análisis independientes que verifiquen los resultados obtenidos por elementos finitos.

7.5.EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural

El Art. 18 señala que “para la realización del análisis, se idealizará tanto la geometría de la estructura como las acciones y las condiciones de apoyo mediante un modelo matemático capaz de reproducir adecuadamente el comportamiento estructural dominante.

El proyecto y la disposición de armaduras deberán ser coherentes con las hipótesis del modelo de cálculo con las que se han obtenido los esfuerzos”.

Adicionalmente, en el Anejo 20 correspondiente a la Lista de comprobación para el control de proyecto, se estipula respecto de los modelos estructurales verificar que:

- a) son correctos y congruentes con los criterios de dimensionamiento en lo que respecta a la estructura terminada; y
- b) son correctos y congruentes con el dimensionamiento en lo que respecta a las fases del proceso constructivo”.

Específicamente “Se comprobará si los programas o métodos de calculo empleados:

- a) están correctamente especificados de acuerdo con lo establecido por las normas; y
- b) están sancionados como aceptables”.

7.6. Eurocódigo EC-2 2004 – Design of Concrete Structures

En la Sección 5 establece que el propósito del análisis estructural es establecer la distribución de fuerzas internas y momentos, o tensiones, restricciones y desplazamientos, sobre el todo o una parte de la estructura. Para ello indica que cuando se requiera deben efectuarse análisis adicionales. Indica, por otra parte, que las idealizaciones deben ser adecuadas al problema considerado.

8. Conclusión

Adams escribió en un libro de ciencia ficción cómo una raza de superseres construye una computadora a la que se le pregunta “El sentido de la vida, el universo y todo lo demás” (Answer to life the universe and everything).

Su respuesta luego de 7,5 millones de años fue: 42.

Este ejemplo que surge en numerosos trabajos sobre patologías estructurales, nos indica que los programas de computadora no pueden ni deben reemplazar el criterio, la experiencia y el razonamiento del proyectista estructural.

9. Bibliografía

1. ACI 318S-08.
2. Calavera, J. - Patología de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado - INTEMAC – 2º Edición – Año 2005.
3. CIRSOC 201/05 – INTI.
4. CIRSOC 201/82 – INTI.
5. CSA A23.3-04.
6. EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural.
7. Eurocódigo EC-2 2004 – Design of Concrete Structures.
8. Orlor, R. y Donini, H. – Introducción al Cálculo de Hormigón Estructural – 1º Edición - Ed. Nobuko – Año 2009.
9. Orlor, R. y Donini, H. – Publicaciones del Curso “Acciones sobre las estructuras y modelaciones mediante software” – Año 2012.
10. Park, R. y Paulay, T. - Estructuras de Concreto Reforzado – Octava Reimpresión – Editorial Limusa – Año 1996.
11. Piralla, Meli - Diseño Estructural. Ed. Limusa – Año 1994.
12. Rombach, G. A. – Finite Element Design of Concrete Structures – Ed. Thomas Telford – ISBN 0727732749 – Año 2004.
13. Schlaich y Weischede - Método Práctico para el Dimensionamiento y Construcción de Estructuras de Hormigón Armado – Traducción Ing. Muller – ATEC – Año 1982.