

CAPITULO V. Modelación y Análisis Estructural de Edificios Altos

V.1 Modelación de Sistemas Estructurales

Por modelado definiremos al proceso mediante el cual se genera una idealización matemática que pretende representar la conducta real de la estructura a ser construida. Por ello este proceso conlleva a la toma de decisiones respecto a los siguiente aspectos: La geometría de la estructura, las propiedades de los materiales que la constituyen, la magnitud y ubicación de cargas permanentes y variables, los tipos de elementos que la pueden representar con mayor fidelidad (1, 2 ó 3 dimensiones), las conexiones internas entre estos elementos, los apoyos externos y la interacción de la estructura con el medio circundante (suelos, líquidos u otros materiales). Para el análisis, los elemento estructurales se clasifican en unidimensionales, cuando una de sus dimensiones es mucho mayor que las restantes, bidimensionales, cuando una de sus dimensiones es pequeña comparada con las otras dos, y tridimensionales cuan ninguna de sus dimensiones resulta ser mayor que las otras. El proyectista debe elegir, en cada, caso, el tipo de elemento más adecuado para que el modelo estructural reproduzca adecuadamente el comportamiento buscado de dicho elemento.

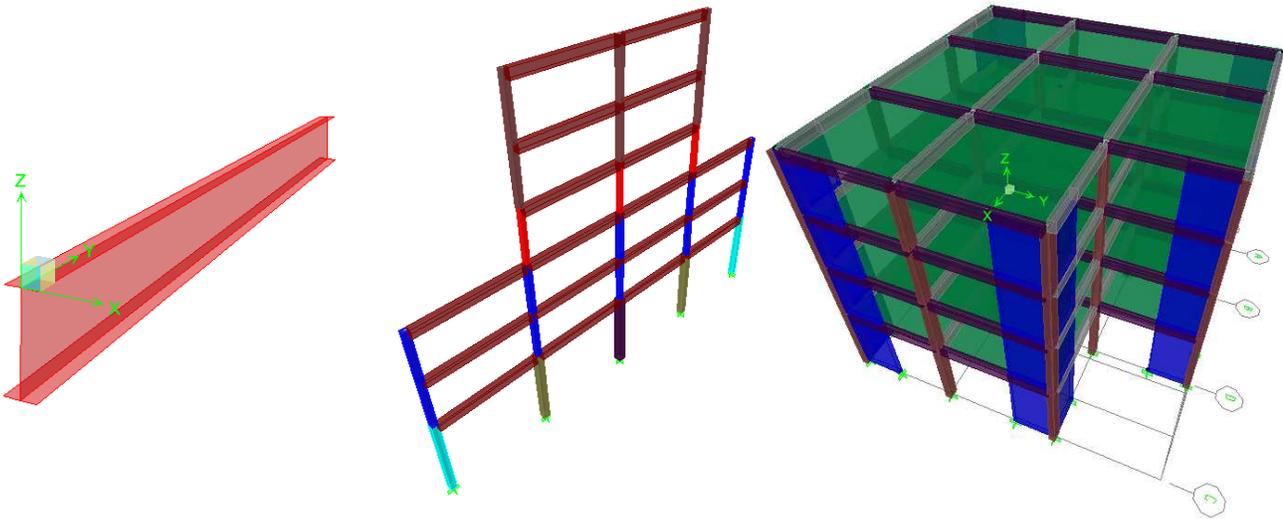


Fig. 29.- Ejemplo de tipos de gráficos empleados en los programas de modelación de estructuras

Para conseguir el mejor diseño estructural, tenemos que calcular las fuerzas actuantes, momentos de flexión y torsión que actúan sobre la estructura, por tanto, para realizar el análisis estructural, se idealiza tanto la geometría de la estructura, como las acciones y las condiciones de apoyo mediante un modelo matemático adecuado que debe, reflejar aproximadamente las condiciones de rigidez de las secciones transversales de los elementos, de sus uniones y de sus apoyos en el terreno.

Para tener una idea de cuán importante es el modelado y garantizar con ello el buen desempeño de la construcción, los requisitos que debe cumplir el modelo de análisis se enuncian en los siguientes puntos.

- ✚ Un modelado fiel de la estructura que incluya los componentes más significativos.
- ✚ Un análisis confiable que suministre la respuesta dinámica ante el sismo de diseño y los vientos de diseño.
- ✚ Un diseño y detallado cuidadoso que le permita a la estructura disipar energía, en congruencia con los factores de ductilidad o de reducción adoptados.
- ✚ Una construcción acorde con el proyecto estructural.

V.1.1 Elementos No-Estructurales

En el proceso de idealización del modelo, se debe observar la estructura ideal para el análisis, se deben tener presentes aquellos elementos comúnmente denominados no-estructurales, pero que pueden contribuir a modificar la rigidez, las masas o la capacidad de disipación de energía del sistema estructural. Algunos ejemplos podrían ser ciertas paredes de cerramientos o algunos elementos ornamentales, las fachadas pesadas, las tuberías de gran diámetro, etc. En particular debemos poner atención sobre la necesidad de identificar aquellos elementos que puedan dar origen a conductas reconocidamente inadecuadas en la estructura y sus reacciones, como pueden; ser las paredes confinadas parcialmente que pueden provocar una disminución en la longitud efectiva de las columnas confinantes dando pie a fallas frágiles por cortante; las paredes discontinuas en su plano vertical que dan lugar a entrepisos blandos con la subsiguiente concentración de energía inelástica; las paredes distribuidas asimétricamente en planta que pueden generar efectos imprevistos en el diseño, etc. La identificación de estos elementos y su consideración en el modelo matemático de la estructura es primordial para obtener resultados más confiables.

V.1.2 Propiedades de los Materiales

Probablemente el aspecto más difícil de modelar concierne a las propiedades de los materiales debido a las incursiones en el rango inelástico que se permiten en la respuesta a diferentes acciones accidentales como son el sismo y el viento, en las numerosas estructuras tales como edificios, puentes y diversas instalaciones industriales; se debe destacar el aprovechamiento de la capacidad de disipación de energía de los materiales en el rango inelástico de acuerdo a nuestras normas de diseño, las cuales tienen incorporado este como una manera de aprovechar mas la resistencia de los elementos estructurales.

Debido a las dificultades asociadas a la caracterización de los materiales, en este rango de deformaciones particularmente en elementos de concreto armado, y debido principalmente a la complejidad del análisis y de su respuesta dinámica no-lineal, las normas permiten un modelado en rango elástico y un análisis lineal de respuesta dinámica, en el cual se incorpora de forma muy simplificada los efectos de la respuesta inelástica esperada. Todo lo anterior se puede obtener mediante el empleo de espectros de diseño reducidos en función de la capacidad de ductilidad del sistema estructural.

Como consecuencia de lo anterior. La modelación del material elástico requiere únicamente de especificar sus módulos de elasticidad y de corte. No está de mas insistir en la conveniencia de incluir deformaciones por corte, fuerza axial y torsión, además de las de flexión en la elaboración de nuestro modelo matemático, lo cual no conduce mayor complicación en el cálculo automático. En casos especiales donde se requiera un análisis inelástico, debemos introducir por completo la curva esfuerzo-deformación del material, incluyendo la interacción entre las fuerzas concurrentes a una sección (cortantes, momentos, fuerza axial) lo cual incrementa notablemente el volumen de datos requeridos para definir el modelo.

V.1.3 Discretización de Masas

Una parte importante de la modelación consiste en discretizar las masas en un número suficiente de puntos de manera que se aproxime a la conducta dinámica de la estructura. Como criterio general se persigue que dicha discretización permita la existencia de todos los modos de vibración que pueden tener una contribución significativa en la respuesta dinámica. No existen recetas para ello, el proceso de discretización de estructuras irregulares puede exigir la aparición de un profesional con cierto entrenamiento en dinámica estructural, por ello una recomendación siempre valida es tratar con varios modelos, aumentando gradualmente el grado de discretización y evaluando la convergencia de los resultados.

V.1.4 Edificios de Varios Niveles

En el caso de edificios altos, la presencia de sistemas de piso de elevada rigidez en su propio plano (respecto a la rigidez de la estructura) permite la elaboración de modelos matemáticos con n grados dinámicos de libertad por losa. Entonces se hace mención en que el modelo se basara en las siguientes hipótesis:

1. La losa posee una rigidez infinita en su plano
2. Las masas están localizadas solo en las losas (se concentran allí las masas de columnas, muros, apéndices, etc.)

3. Solo se consideran las inercias de las masas asociadas al movimiento en su propio plano, lo cual equivale a despreciar la inercia vertical y las rotaciones del eje horizontal
4. Despreciamos la componente vertical de las acciones accidentales, sean un sismo o viento.

Es claro que esta idealización de los edificios, por cierto utilizada universalmente en el diseño, puede perder validez en el caso de poseer grandes aberturas en su sistema de piso, o con una excesiva relación de aspecto (largo/ ancho) en planta, o con sistemas de piso prefabricados con conexiones inadecuadas a la estructura que lo soporta que pueden dar lugar a distorsión de la forma de la planta. En estas situaciones es recomendable el uso de modelos más refinados que incorporen la flexibilidad en el plano del sistema de piso lo cual conlleva a la definición de un numero bastante mayor de grados de libertad.



Fig. 30.- Ejemplos de dos tipos de estructuras y su modelación en el Programa Etabs, se observar la rigidez de cada una de ellas y sus grados de libertad.

V.2 Métodos de Análisis Estructural Empleados en los Programas de Modelación Estructural

Representada la estructura por su modelo matemático y conocidas las acciones actuantes, el objetivo principal que se espera en el análisis es la determinación de valores confiables de su respuesta estática y dinámica a fin de proseguir con su diseño o con la verificación de las capacidades de sus elementos estructurales.

Las condiciones que en principio deben satisfacer todo análisis estructural son las de equilibrio y las de compatibilidad, teniendo en cuenta el comportamiento tenso-deformacional de los materiales.

Los métodos de cálculo para abordar el análisis global de una estructura se clasifican en:

- a) Análisis Lineales: Están basados en las hipótesis de comportamiento elástico-lineal de los materiales constitutivos y en la consideración del equilibrio en la estructura sin deformar (análisis en primer orden).
- b) Análisis no lineales, que tienen en cuenta la no linealidad mecánica, esto es, el comportamiento tenso-deformacional no lineal de los materiales, y la no linealidad geométrica, es decir, la consideración de las condiciones de equilibrio sobre la estructura deformada (análisis en segundo orden). Los análisis no lineales pueden considerar, a su vez, una sola o ambas de las causas de la no linealidad citadas.

V.2.1 Análisis Lineales

Los métodos prescritos en la gran mayoría de normas de diseño por viento y sísmico, son procedimientos de análisis lineales, congruentes con la hipótesis de sistemas elásticos adoptados en la idealización matemática. Conociendo el sistema estructural puede experimentar incursiones inelásticas significativas bajo la ocurrencia del sismo normativo o viento más frecuente, por tanto es de esperarse que estos métodos tienen un carácter aproximado y solo pueden suministrar una estimación de la respuesta dinámica real. Puesto que aceptamos la linealidad podemos en consecuencia hacer la superposición de los modos principales de vibración del sistema estructural, lo cual constituye la base de los métodos normativos.

Estos métodos ya fueron descritos con anterioridad en el Capítulo IV y por tanto se omite su explicación en este capítulo, sin embargo es frecuente que cada programa tenga también sus ligeras diferencias en la aplicación de sus hipótesis de análisis lineal, pero las cuales al final siempre coinciden o aproximan al resultado esperado.

V.2.2 Análisis No Lineales

El análisis no lineal requiere, para un nivel determinado de carga, un proceso iterativo, de sucesivos análisis lineales, hasta converger a una solución que satisfaga las condiciones de equilibrio, tenso deformaciones y de compatibilidad. Dichas condiciones se comprueban en un número determinado de secciones, dependiendo de la discretización, que deberá ser suficiente para garantizar una adecuada representación de la respuesta estructural. Las verificaciones correspondientes al estado límite de fatiga se realizan a partir de los resultados obtenidos a través de un análisis global lineal de la estructura.

V.2.3 Clasificación de los Métodos de Análisis

Para tener idea de cuándo debemos emplear un tipo de análisis dependiendo la estructura, se han elaborado métodos que van desde el más simple, hasta los más complejos, teniendo en cuenta su correspondencia al desarrollo histórico:

1. Análisis Estático
2. Análisis Dinámico Plano
3. Análisis Dinámico Espacial
4. Análisis Dinámico con Diafragma Flexible
5. Análisis Inelástico

Para poder utilizar los métodos simples, se requiere que la estructura cuente y satisfaga con los requisitos y condiciones de regularidad que se encuentran implícitamente definidas en las hipótesis que cada método sustentan en particular. Solo aquellos que si satisfacen los requisitos de uniformidad en la distribución de masas, rigideces, resistencias y capacidad dúctil, tanto en planta como en elevación, se puede aplicar el método más simple, de Análisis Estático.

Para aplicar el Análisis Dinámico Plano, se exige que la estructura posea irregularidades moderadas e sus plantas, especialmente aquellas irregularidades significativas en su elevación.

El análisis Dinámico Espacial, puede manejar todas las irregularidades tanto en planta como en elevación, y puesto que estos métodos son fáciles de manejar, su uso es más frecuente en este tipo de programas de modelación, ya que basan sus principios en que la rigidez del sistema de piso en su plano es infinita, pero cuando esto no es verdadero, se tienen que recurrir a un Análisis Dinámico con Diafragma Flexible.

En el análisis inelástico se resalta la necesidad en el caso de estructura de importancia vital, que posean irregularidades críticas que pueden dar origen a concentraciones de energía inelástica que puedan amenazar la seguridad global del sistema, como son los edificios con muros discontinuos en sus plantas inferiores.

V.3 Programas de Análisis y Modelación Estructural

V.3.1 Introducción

En la actualidad el ingeniero estructurista tiene la posibilidad de emplear y recurrir a varios programas de modelación y análisis de estructuras, cada uno de los cuales se define a partir de una hipótesis o teoría. La práctica del diseño estructural tiende en forma hacia una creciente automatización, impulsada aceleradamente por la popularización del empleo de las computadoras. Su empleo para el análisis

estructural se ha extendido a tal grado, que se ha llegado a la etapa de dimensionamiento y con ello se llega con algunos programas más sofisticados, a la elaboración de planos estructurales y sus especificaciones.

Este proceso sin duda alguna es muy benéfico y va a redundar con mayor eficiencia y precisión en el diseño, siempre y cuando se empleen con cordura y con conocimientos adecuados del programa. Buena parte del tiempo de un proyectista en una oficina de diseño estructural se dedica a la realización de cálculos rutinarios y a la preparación de detalles más o menos estandarizados. Al recurrir a procedimientos automatizados de cálculo se libera al proyectista de estas tareas y se le permite enfocar su atención a problemas fundamentales de la concepción de la estructura y de la solución de sus aspectos básicos, así como la revisión de resultados.

Es necesario mencionar una preocupación debida al empleo de estos paquetes en oficinas de proyectos, donde la implantación de estos programas de análisis y dimensionamiento dieron lugar a la aparición del llamado “codificador” un subprofesional, que tiene que preparar los datos de entrada de cargas y de la estructura de acuerdo a las reglas de sistema de cómputo. En estos casos no se busca eliminar las labores rutinarias sino eliminar al ingeniero y con ello en ocasiones se llega a obtener como resultado errores graves en el informe, pero que sin la interpretación de un conocedor del tema, pasan por desapercibido, lo que significaría en dado caso de construirse tal proyecto el riesgo de tener inseguridad en la estructura y daños o faltas de acuerdo a las normas que rigen los estados límites de servicio de tal región.

Por tal motivo siempre se debe de tener conocimientos previos, para revisar y tener una idea de cómo que características deben de obtenerse como respuesta de los análisis hechos por paquetes de cómputo. Los programas actualmente conocidos para la modelación y análisis de estructura son los siguientes:

- SAP 2000 (versión 14 al día de hoy)
- ETABS (versión 9.60 al día de hoy)
- STAAD
- TEKLA
- CADRE
- RESCOL

V.3.2 Introducción e información del Programa Etabs V9.60

En el caso de este trabajo, trabajare con el programa llamado ETABS V9.6, el cual es un programa de análisis y diseño de sistemas de Edificaciones que desde hace más de 30 años ha estado en un continuo desarrollo, para hacer de este una herramienta confiable, sofisticada y muy fácil de usar. Esta herramienta posee un

interfaz gráfico que permite hacer un modelaje, análisis y diseños únicos, integrando todo esto en una base de datos común. Esta herramienta contempla en sus métodos para el análisis de estructuras un amplio rango de comportamientos no lineales, haciendo una herramienta útil en la industria de la construcción.

ETABS es un sistema completamente integrado, detrás de una gran interfase intuitiva y simple, se encajan poderosos métodos numéricos, procedimientos de diseño y códigos internacionales de diseño, que funcionan juntos desde una base de datos comprensiva. Esta integración significa que uno crea solo un sistema de modelo de piso y sistema de barra verticales y laterales para analizar y diseñar el edificio completo. Las convenciones de entrada y de salida usadas corresponden a la terminología común de edificaciones. Con ETABS, los modelos se definen de forma lógica: piso por piso, viga por viga, columna por columna, tramo por tramo, muro por muro y no como corrientes de puntos y elementos no descritos como lo hacen la mayoría de los programas con el mismo fin, así la definición estructural es simple, ordenada y significativa.

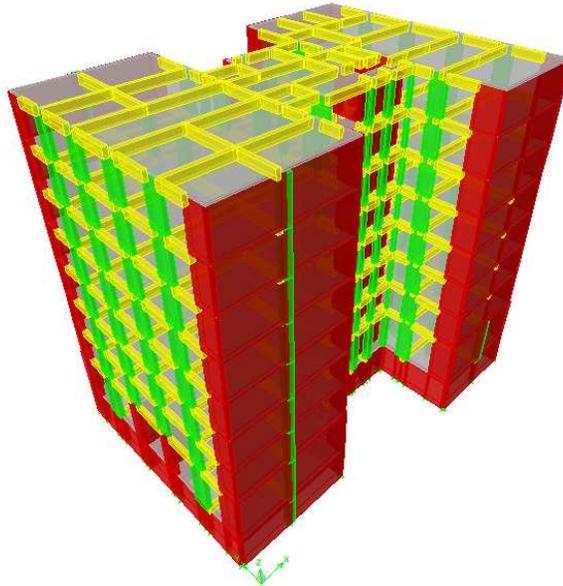


Fig. 31.- Ejemplo de un gráfico obtenido haciendo uso del programa Etabs V9.6, el cual representa un edificio de 8 niveles, con una sección en planta irregular

El programa de ETABS ofrece la mayor cantidad de herramientas de análisis y diseño disponible para el ingeniero estructural que trabaja con estructuras de edificios. La siguiente lista muestra los tipos de sistemas y análisis que este programa puede manejar:

- Facilidades en el modelaje de edificios comerciales, gubernamentales y de salud de múltiples pisos.
- Estacionamientos con rampas lineales y circulares.
- Edificios basados en sistemas de líneas de referencia (Grid Lines)

- Edificios de Acero, de Concreto y Mixtos.
- Muros, Rampas y Losas de concreto.
- Pisos con láminas de acero y de concreto, para estructuras metálicas.
- Edificios sujetos a cualquier cantidad de casos de carga y combinaciones, tanto lateral como vertical. Incluyendo carga automáticas por viento y sismo.
- Edificios con Amortiguadores y Aisladores en la Base.
- Uso de Diafragmas Rígidos y Flexibles.
- Posee un poderoso diseño en acero estructural y concreto armado, incluyendo muros de corte, completamente integrado, todos disponibles desde la misma interfaz usada para modelar y analizar el modelo.
- El diseño de miembros de acero permite el predimensionado inicial y una optimización interactiva, y el diseño de elementos de concretos incluye el cálculo de la cantidad de acero de refuerzo requerido.
- Transferencia automática de cargas verticales de pisos a vigas y muros.
- Múltiples casos de carga por funciones en el dominio del tiempo lineal y no lineal en cualquier dirección.
- Apoyo de fundación / soporte.
- Análisis de grandes desplazamientos.

El ETABS usa objetos para representar miembros estructurales físicos. Al crear un modelo, nosotros empezamos dibujando la geometría del objeto, y después asignamos lo que son propiedades y cargas para definir completamente la estructura del edificio.

De manera muy simple, el desarrollar un modelo requiere de tres pasos básicos:

1. Dibujar series de objetos puntos, líneas y área que representen el edificio usándolas diversas herramientas de dibujo que se encuentran disponibles en la interfase gráfica.
2. Asignar propiedades estructurales (secciones y materiales) y cargas a objetos usando las opciones del menú Asignar (Assign menu options).
3. Establecer y/o Asignar parámetros de división interna (meshing) en elementos de Área.

V.3.3 Cuidados Para el Buen Uso del Programa Etabs V 9.60

V.3.3.1 Unidades

ETABS trabaja con cuatro unidades básicas; fuerza, longitud, temperatura y tiempo (force, length, temperatura, and time). El programa ofrece diferentes sets de unidades compatibles de fuerza, longitud y temperatura para elegir, tales como “Kip, in, F” o “N, mm, C.” El tiempo siempre se mide en segundos. Se hace una importante

distinción entre masa y peso. Masa se usa para calcular la inercia dinámica y para todas las cargas causadas por la aceleración del suelo. El peso es la fuerza que se aplica como cualquier fuerza de carga. Se debe de usar las unidades de fuerza cuando especifique valores de peso, unidades de masa (fuerza-sec/longitud) al especificar valores de masa. Cuando iniciamos un modelo, se le requiere para que ajuste un set de unidades. Estas se convierten en las “unidades base”. Aunque después uno puede proporcionar nuevos datos y ver los resultados en cualquier set de unidades, esos valores son convertidos siempre y forman la base de las unidades del modelo.

V.3.3.2 Sistemas de Coordenadas y Cuadrícula

Todas las ubicaciones del modelos se definen respecto a un sistema de coordenadas Cartesiano (rectangular). Los tres ejes denominados X, Y, y Z, son mutuamente perpendiculares y satisfacen la regla de la mano derecha. Para cada sistema de coordenadas, se deberá definir una cuadrícula tridimensional y ellos consistirá en líneas de construcción, que son usadas para localizar objetos en el modelo. Cada objeto en el modelo tiene su propio sistema local de coordenadas usado para definir propiedades, cargas y respuestas.

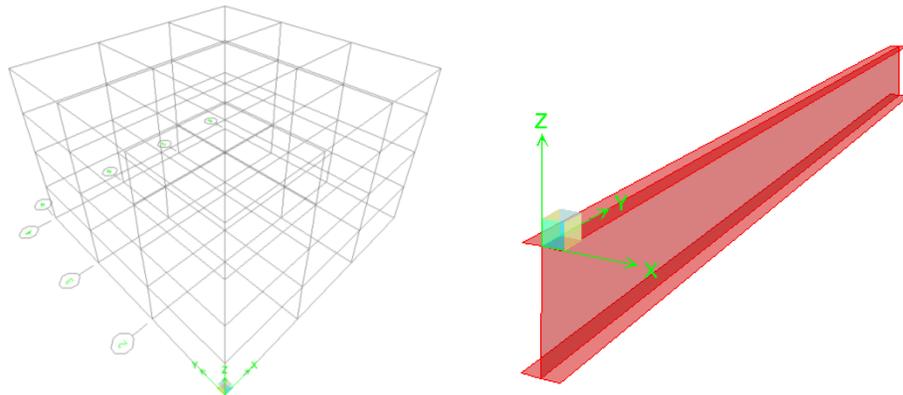


Fig. 32.- Ejemplo del sistema de coordenadas de acuerdo a la cuadrícula inicial y un objeto de viga, con sus ejes locales

V.3.3.3 Objetos Estructurales

Al crear el modelo, nosotros iniciamos dibujando la geometría del objeto y después asignamos propiedades y cargas para definir completamente la estructura del edificio, para ello nosotros usamos las herramientas que a continuación se mencionan.

- Objeto Punto (Point Objects): Se crean de forma automática en las esquinas o en las terminaciones de todos los tipos de objetos y pueden ser

adheridos explícitamente en cualquier lugar del modelo. Su utilizan para hacer la modelación de Juntas.

- Objeto Barra (Frame Object): Son utilizados para modelación de las vigas, columnas, arriostriamientos o diagonales y barras.
- Objetos Área (Area Object): Son utilizados para modelar losas, rampas y muros.

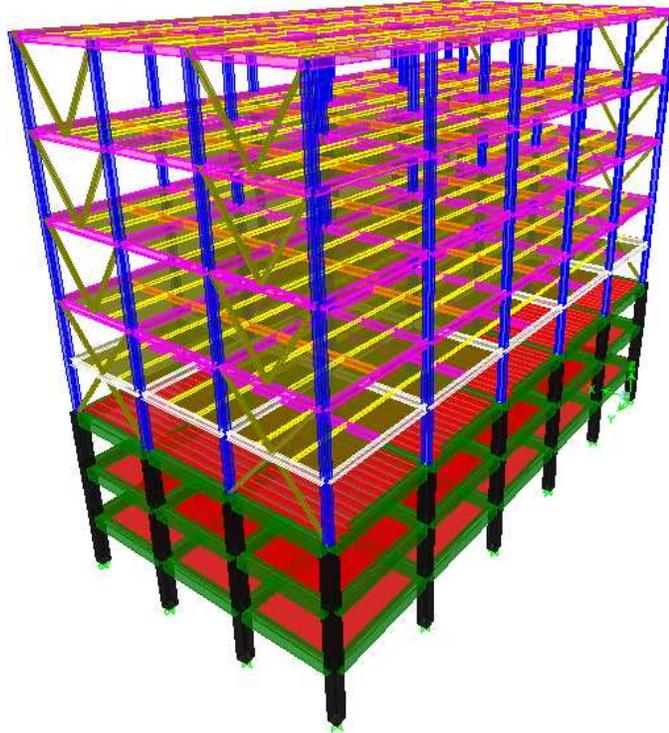


Fig. 33.- Ejemplo de sistemas estructurales empleados en el ETABS V9.60 en un edificio de 8 niveles

V.3.3.4 Definición de Propiedades

Las propiedades son “asignadas” a cada objeto para definir el comportamiento estructural de cada objeto en el modelo. Algunas propiedades como materiales y secciones, se denominan entidades y deben ser especificadas antes de asignarles objetos. Por ejemplo, un modelo debe tener:

- Un material propiamente llamado “CONCRETO”
- Una sección rectangular de la barra RECTÁNGULO, y una sección de la barra llamada CIRCULAR, ambas se forman del material llamado “CONCRETO”.
- Una sección muro/losa llamada propiamente SLAB o LOSA que solo usa material llamado CONCRETO.

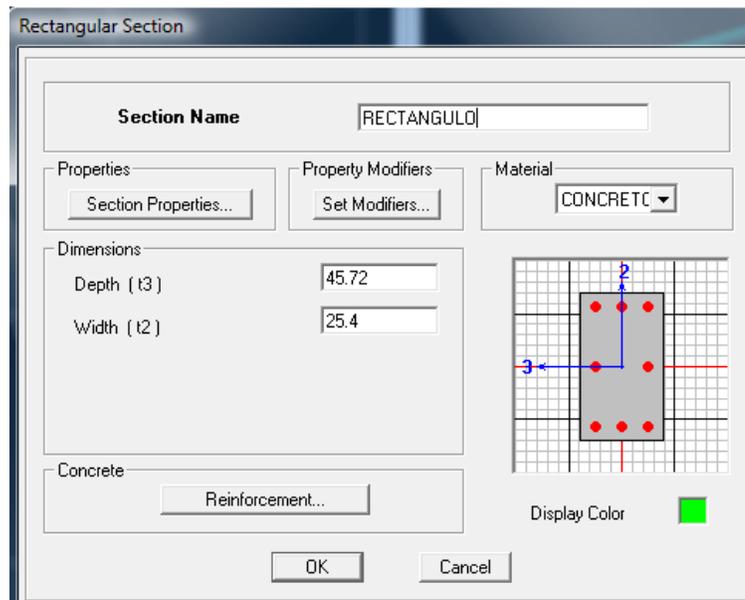
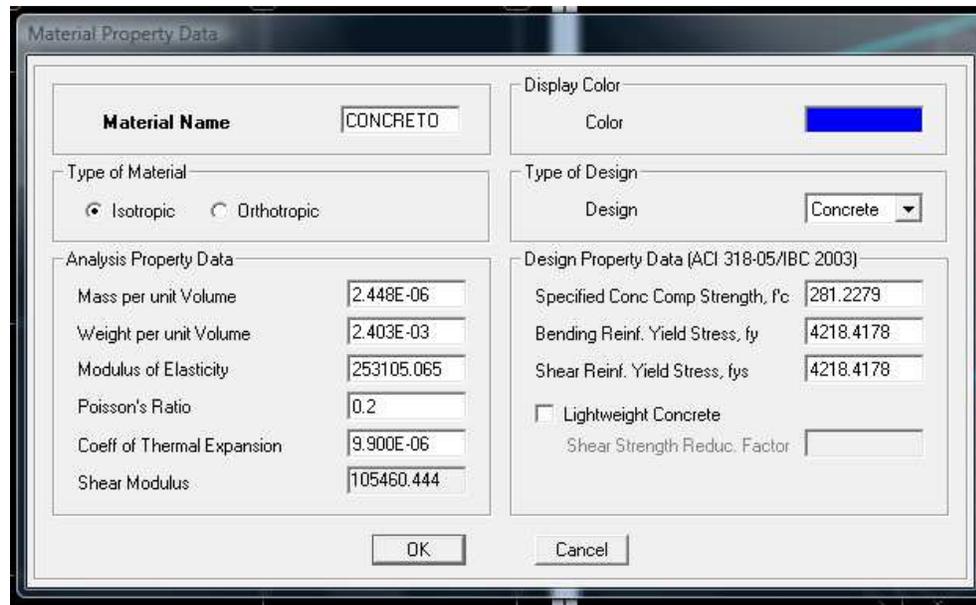


Fig. 34.- Ejemplos de asignación de propiedades del material y de una sección

V.3.3.5 Definición de Grupos

En este programa tenemos la posibilidad de crear y manejar Grupos, el cual se considera por definición una colección de objetos. Pueden contener cualquier número de objetos de cualquier tipo. Y sus usos pueden ser los siguientes.

- Selección rápida de objetos para editarlos o asignarlos
- Definir secciones de corte a través del modelo
- Agrupar objetos que comparten el mismo diseño

- Una salida efectiva

El usar este tipo de grupos suele ser una manera poderosa de analizar modelos grandes y complejos.

V.3.3.6 Cargas Estáticas

Podemos definir cargas gravitacionales y laterales. Las cargas gravitacionales se pueden aplicar a puntos, líneas y áreas. Las cuales son ingresadas típicamente con valores de gravedad, o en la dirección $-Z$. Los objetos pueden soportar fuerzas o momentos concentrados. Los objetos barras pueden tener aplicadas cualquier número de cargas puntuales (fuerzas o momentos) o cargas distribuidas (uniformes o trapecoidales). Y los objetos Área pueden tener cargas uniformes.

La generación de cargas estática laterales ya sea terremotos (Quake) o debidas a la acción del viento (Wind), se aplican de conformidad a numerosos códigos internacionales, incluyendo, pero no limitando los códigos de, UBC, BOCA, ASCE, NBCC, BS, JGJ, Mexicana (RCDF-04), IBC. Al igual que puede tenerse un patrón de cargas laterales definidas por el usuario de manera arbitraria.

V.3.3.7 Combinaciones de Cargas

ETABS permite generar múltiples combinaciones basadas en las cargas previamente definidas. Cuando una combinación de carga es desarrollada, se aplica a los resultados de cada objeto en el modelo. Los cuatro tipos de combinaciones son las siguientes:

- ADD (Additive): Se presenta una suma con el signo correspondiente de los resultados de cada una de las cargas establecidas, incluyendo los factores aplicados en cada caso.
- ENVE (Envelope): Se presenta la envolvente (valores máximos y mínimos) del conjunto de cargas establecidas, incluyendo los factores aplicados en cada caso.
- ABS (Absolute): Se presenta una suma de los resultados en valor absoluto de cada una de las cargas establecidas, incluyendo los factores aplicados en cada caso.
- SRSS: Se presenta la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados correspondientes al resultado de cada una de las cargas establecidas, incluyendo los factores aplicados en cada caso.

Para tener mayor aclaración sobre el uso de un programa de modelación y análisis estructural, en el Capítulo VII Ejemplo de Aplicación, se elaborará un

modelo el cual tendrá todos los elementos antes mencionados y se ejemplificará por medio de gráficos y dibujos, como hacer el ensamblado de un modelo y también construir todo lo necesario para obtener los resultados deseados para el diseño estructural del edificio.

V.4 Recomendaciones para el Uso de Programas de Modelación y Análisis Estructural

- ✚ Nunca se debe usar un equipo o alguna herramienta si no se conoce en que hipótesis o teoría se basa, que hipótesis tienen implícitas y que limitaciones existen para su uso.
- ✚ Después de asegurarse de que es aplicable el tipo de modelado de análisis estructural y que puede aplicarse a tu caso en particular, se debe poner mucho cuidado en que se obtengan los datos que se requieren y que estén empleándose las unidades correctas.
- ✚ Una vez obtenidos los resultados, se deben examinar, y ver si son coherentes a nuestro criterio y conocimiento; si es posible debe compararse con otro método analítico aproximado, hasta que uno esté convencido que no hay errores grandes en el proceso.
- ✚ Analizar cuidadosamente que aspectos no fueron tomados en cuenta y asegurar que no alteren el diseño, en caso contrario revisar que no haya concentraciones de esfuerzos en puntos de aplicación de cargas o en irregularidades locales; en caso que se den estas condiciones habrá que revisarlas por separado, hasta obtener el resultado deseado.