

Tecnologia, Infraestrutura e Território



Manual del Usuario Programa SAP2000

Scarlet Karina Montilla Barrios

coleção
manuAles

EDUNILA
Editora da
Universidade Federal da
Integração Latino-Americana

Coleção Manuales

**Manual del Usuario
Programa SAP2000**

Scarlet Karina Montilla Barrios



Scarlet Karina Montilla Barrios

Manual del Usuario
Programa SAP2000



UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA	
Gleisson Pereira de Brito	<i>Reitor</i>
Luis Evelio Garcia Acevedo	<i>Vice-reitor</i>
EDUNILA – EDITORA UNIVERSITÁRIA	
Antonio Rediver Guizzo	<i>Chefe da EDUNILA</i>
Ailda Santos dos Prazeres	<i>Assistente em administração</i>
Francieli Padilha Bras Costa	<i>Programadora visual</i>
Leonel Gandi dos Santos	<i>Bibliotecário-documentalista</i>
Natalia de Almeida Velozo	<i>Revisora de textos</i>
Ricardo Fernando da Silva Ramos	<i>Assistente em administração</i>
CONSELHO EDITORIAL	
Antonio Rediver Guizzo	<i>Presidente do Conselho</i>
Natalia de Almeida Velozo	<i>Representante do Órgão Executivo da EDUNILA</i>
Anderson Antonio Andreatta	<i>Representante dos técnico-administrativos em educação da UNILA</i>
Diego Moraes Flores	<i>Representante do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território (ILATIT – UNILA)</i>
Andrea Ciacchi	<i>Representante do Instituto Latino-Americano de Arte, Cultura e História (ILAACH – UNILA)</i>
Marcela Boroski	<i>Representante do Instituto Latino-Americano de Ciências da Vida e da Natureza (ILACVN – UNILA)</i>
Gilson Batista de Oliveira	<i>Representante do Instituto Latino-Americano de Economia, Sociedade e Política (ILAESP – UNILA)</i>
Laura Beatriz Tauro	<i>Representante da Universidade Nacional de Misiones – UNAM (Argentina)</i>
Raquel Quadros Velloso	<i>Representante da PUC – Rio de Janeiro (Brasil)</i>
Alai García Diniz	<i>Representante da UNIOESTE – Cascavel (Brasil)</i>
Paulínia García Rámirez	<i>Representante da Universidad CES (Colômbia)</i>
Luis Eduardo Aragon Vaca	<i>Representante da UFPA (Brasil)</i>
Joselaine Raquel da Silva Pereira	<i>Representante dos discentes de pós-graduação da UNILA</i>
Rafael Alexander Velasco Castillo	<i>Representante dos discentes de graduação da UNILA</i>
EQUIPE EDITORIAL	
Natalia de Almeida Velozo	<i>Revisão de textos</i>
Leonel Gandi dos Santos	<i>Normalização bibliográfica</i>
Francieli Padilha Bras Costa	<i>Capa, projeto gráfico e diagramação</i>
Luis Castro Quinteiro	<i>Supervisão de revisão de textos em espanhol</i>

© 2022 EDUNILA – Editora Universitária

Catálogo na Publicação (CIP)

B276 Barrios, Scarlet Karina Montilla.
m Manual del usuário programa SAPP 2000 / Scarlet Karina
Montilla Barrios. Foz do Iguaçu: EDUNILA, 2022.
PDF (118 p.) : il. Col. Manuales.

1 ISBN: 978-65-86342-36-9

1. Engenharia. 2. Software. 3. SAPP 2000. I. Barrios,
Scarlet Karina Montilla. II. Universidade Federal da
Integração Latino Americana - UNILA. III. Título.
CDU 62:004.4

Ficha catalográfica elaborada por Leonel Gandi dos Santos CRB11/753

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida, arquivada ou transmitida por qualquer meio ou forma sem prévia autorização por escrito da EDUNILA – Editora Universitária.

EDUNILA – Editora Universitária
Av. Silvio Américo Sasdelli, 1842
Térreo – Edifício Comercial Lorivo
Bairro Itaipu A | Foz do Iguaçu/PR
CEP: 85866-000 | Caixa Postal 2044
+55 (45) 3522-9832
+55 (45) 3522-9836
editora@unila.edu.br
<https://portal.unila.edu.br/editora>


Associação Brasileira
das Editoras Universitárias


Editora da
Universidade Federal da
Integração Latino-Americana

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ventana principal	24
Figura 2 – Barra de menú 1	25
Figura 3 – Barra de menú 2	26
Figura 4 – Barra de herramientas	27
Figura 5 – Barra de estado.....	28
Figura 6 – Tipos de elementos	30
Figura 7 – Elemento cuadrilateral y elemento triangular	32
Figura 8 – Conexión de mallas usando condiciones de borde.....	33
Figura 9 – Ejes locales.....	35
Figura 10 – Elemento de área de 4 nodos tipo cascarón	37
Figura 11 – Losa tipo cascarón con aplicación de carga distribuída.....	39
Figura 12 – Muro tipo cascarón.....	39
Figura 13 – Elemento tipo placa.....	40
Figura 14 – Losa tipo placa con aplicación de carga pontual.....	41
Figura 15 – Elemento tipo membrana	42
Figura 16 – Losa tipo membrana con aplicación de carga distribuída.....	43
Figura 17 – Cuadro comparativo para el uso de placas de Mindlin	45
Figura 18 – Ángulo del material.....	46
Figura 19 – Desplazamientos de las juntas y modificación de espesores para un elemento <i>shell</i> visto desde un extremo.....	48
Figura 20 – Convenciones de signos para esfuerzos y fuerzas	52
Figura 21 – Cuadro comparativo de teorías de vigas	57
Figura 22 – Ángulos de coordenadas	62
Figura 23 – Tipos de sección.....	65
Figura 24 – Secciones no prismáticas	66
Figura 25 – Punto de inseción	67
Figura 26 – Planta y elevación de un arreglo de vigas exteriores	68
Figura 27 – Desplazamiento de las juntas	69
Figura 28 – Liberación de restricciones	71
Figura 29 – Cargas concentradas en tramos	75

Figura 30 – Cargas distribuidas en los tramos.....	76
Figura 31 – Convención de signos para fuerza axial, torsión, momentos y cortes	79
Figura 32 – Vista en planta y corte de una escalera	80
Figura 33 – Armado del acero de refuerzo de la escalera	102
Figura 34 – Vista en planta de las vigas	103
Figura 35 – Vista en corte de las vigas.....	103
Figura 36 – Isometría de las vigas	103

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	10
2 EL MODELO ESTRUCTURAL	11
2.1 Sistemas de unidades	11
2.2 Objetos y elementos	12
2.2.1 Objetos puntuales	12
2.2.2 Objetos lineales	12
2.2.3 Objetos de área	13
2.2.4 Objetos sólidos	13
2.3 Grupos de elementos	14
2.4 Sistema de coordenadas y mallas	14
2.4.1 Sistema de coordenadas	15
2.4.2 Sistema de coordenadas global	15
2.4.3 Direcciones “hacia arriba” y horizontal	16
2.4.4 Sistemas de coordenadas locales	16
2.5 Propiedades	17
2.6 Funciones	18
2.7 Patrones de carga	18
2.7.1 Tipos de casos de carga	19
2.7.2 Combinaciones de carga	21
2.8 Configuraciones de diseño	21
2.9 Definiciones de salida	23
3 LA INTERFAZ GRÁFICA	24
3.1 Barra de menú	24
3.2 Barras de herramientas	27
3.3 Ventanas	27
3.4 Barra de estado	28
4 ELEMENTOS TIPO SHELL	29
4.1 Conectividad de los elementos finitos	31
4.2 Condiciones de borde	33

4.3 Grados de libertad	33
4.4 Sistema de coordenadas locales	34
4.5 Propiedades de la sección.....	36
4.5.1 Tipos de sección	36
4.5.2 Elemento tipo cascarón (<i>shell</i>)	37
4.5.3 Elemento tipo placa o lámina (<i>plate</i>).....	39
4.5.4 Elemento tipo membrana.....	41
4.6 Espesor.....	43
4.6.1 Formulación del espesor.....	44
4.7 Propiedades de los materiales.....	45
4.7.1 Ángulo del material	46
4.7.2 Masa	46
4.7.3 Modificadores de propiedades.....	47
4.7.4 Desplazamientos de las juntas	47
4.7.5 Modificación de espesores.....	48
4.8 Cargas	49
4.8.1 Cargas de peso propio	49
4.8.2 Cargas de gravedad.....	49
4.8.3 Cargas uniformes.....	49
4.8.4 Cargas de presión de superficie	50
4.8.5 Cargas de temperatura	50
4.9 Resultados: fuerzas internas y esfuerzos	51
5 ELEMENTOS TIPO <i>FRAME</i>	56
5.1 Conectividad de los elementos finitos	58
5.2 Desplazamiento de las juntas.....	59
5.3 Grados de libertad	59
5.4 Sistema de coordenadas local	60
5.4.1 Eje longitudinal 1	60
5.4.2 Orientación predeterminada	61
5.4.3 Ángulo de coordenadas	61
5.5 Propiedades de la sección.....	62
5.6 Propiedades de los materiales.....	63

5.7 Propiedades geométricas y rigideces de la sección	63
5.7.1 Tipos de sección	64
5.7.2 Secciones diseñadas.....	65
5.7.3 Masa y peso adicional.....	66
5.7.4 Secciones no prismáticas	66
5.7.5 Punto de inserción	67
5.7.6 Desplazamientos de las juntas	68
5.7.7 Factor de zona rígida	69
5.7.8 Liberación de restricciones	70
5.8 Propiedades no lineales	72
5.8.1 Límites de tracción/compresión.....	72
5.8.2 Articulaciones plásticas	73
5.9 Masas	73
5.10 Cargas	74
5.10.1 Carga por peso propio	74
5.10.2 Cargas de gravedad.....	74
5.10.3 Cargas concentradas en los tramos	74
5.10.4 Cargas distribuidas en los tramos	76
5.10.5 Cargas proyectadas	77
5.10.6 Cargas por temperatura.....	77
5.11 Resultados: fuerzas internas.....	78
6 EJEMPLO PRÁCTICO	80
6.1 Ejemplo 1: Diseño estructural de una escalera.....	80
6.2 Ejemplo 2: Diseño estructural de unas vigas. Vida útil nominal de la estructura: 50 años	103

1 INTRODUCCIÓN

La necesidad de automatizar los procesos es de gran importancia a la hora de hacer proyectos de diversa índole en el campo de la ingeniería civil, sobre todo en la ingeniería de estructuras. Una manera de que estos procesos ocurran de manera más rápida es con el uso de un software que permita realizar tareas con mayor eficacia y en menor tiempo.

La Ingeniería Estructural, como varias ramas de la ingeniería, utiliza métodos de cálculo basados en la teoría de los elementos finitos, que permite discretización espacial, aproximación mediante funciones de forma y minimización de los errores por medio de ajustes de mallas.

La Ingeniería Estructural permite asegurar la integridad de piezas mecánicas o edificaciones bajo la acción de solicitaciones termomecánicas que se divide en dos grupos:

- **Análisis estructural:** determina cómo se reparten las solicitaciones externas entre los diferentes componentes estructurales de una pieza mecánica o edificación, conocidas sus dimensiones y propiedades.
- **Diseño estructural:** determina las dimensiones y propiedades de los componentes estructurales de una pieza mecánica o edificación para que pueda soportar fuerzas externas dadas.

El presente manual tiene por objetivo servir de apoyo a los estudiantes de ingeniería para conocer más a fondo la teoría del software SAP2000, del cual se ha obtenido la información traducida al español, con ejemplos prácticos aportados por el autor.

Dentro de las aplicaciones para ingeniería presentamos a continuación las relacionadas al modelo estructural, definiciones y aplicaciones de los elementos tipo *shell* y elementos tipo *frame*.

2 EL MODELO ESTRUCTURAL

SAP2000 analiza y diseña la estructura usando un modelo definido mediante una interfaz gráfica. El modelo se constituye de los siguientes tipos de componentes, unidades, objetos, grupos, sistemas de coordenadas y malla, propiedades, patrones de carga, funciones, casos de carga, combinaciones, propiedades de diseño, definiciones de salida por pantalla e impresora.

2.1 Sistemas de unidades

SAP2000 trabaja con cuatro unidades básicas, a saber: fuerza, longitud, temperatura y tiempo. El programa ofrece diferentes conjuntos compatibles de unidades de fuerza, longitud y temperatura, como “Kip, inch, F” o “Kgf, m, C”. El tiempo siempre se mide en segundos (excepto en los casos de efectos de retracción, flujo plástico y envejecimiento, que se miden en días).

SAP2000 distingue entre masa y peso. La masa se usa solamente para calcular inercia dinámica y para cargas debidas a la aceleración del terreno. El peso es una fuerza que puede ser aplicada como cualquier otra carga. Hay que asegurarse de usar unidades de fuerza cuando se especifiquen pesos y unidades de masa (Fuerza-seg/Longitud) para valores de masa. Cuando se inicia un nuevo modelo, SAP2000 le pedirá al usuario que especifique un conjunto de unidades. Estas unidades son las “unidades básicas” del modelo. Aunque se pueden introducir los datos y ver los resultados en cualquier conjunto de unidades, estos valores son siempre convertidos a un conjunto de unidades básicas del modelo. Las medidas angulares siempre usan las siguientes unidades:

- Geometría, como la orientación de los ejes, siempre se mide en grados.
- Desplazamientos rotacionales siempre se miden en radianes
- La frecuencia siempre se mide en Hertz (ciclos por segundo)

2.2 Objetos y elementos

Los miembros estructurales del modelo se representan físicamente por objetos. A través de la interfaz se “dibuja” la geometría de un objeto, al que luego se le “asignan” propiedades y cargas para definir completamente el modelo del miembro. Los siguientes tipos de objetos están disponibles en SAP 2000:

2.2.1 Objetos puntuales

- a. Objetos junta: se crean automáticamente en las esquinas de otros tipos de objetos, y pueden agregarse explícitamente para modelar apoyos u otro comportamiento localizado.
- b. Objetos de conexión a una base (de una junta): usados para modelar tipos especiales de apoyos, como aisladores, juntas, amortiguadores, resortes multilineales, etc.

2.2.2 Objetos lineales

- a. Objetos lineales de varios tipos:
 - Objetos *frame*: usados para modelar vigas, columnas, arriostamientos y armaduras. Pueden ser rectos o curvos.
 - Objetos *cab*: usados para modelar cables flexibles.
 - Objetos tendón: usados como tendones de pretensado.
 - Dentro de otros objetos.

- b. Objetos *link* de conexión (dos juntas): usados para modelar comportamientos especiales de miembros, como aisladores, disipadores, juntas, resortes multilineales, etc. A diferencia de los elementos *frame*, *cable* y tendón este tipo de elementos debe tener longitud cero.

2.2.3 Objetos de área

Usados para moderar paredes, muros, losas y otros miembros de espesor delgado, así como también sólidos bidimensionales (esfuerzo plano, deformación plana y sólidos axisimétricos).

2.2.4 Objetos sólidos

Usados para modelar sólidos tridimensionales. Como una regla general, la geometría de los objetos debe corresponder a la del miembro físico; esto simplifica la visualización del modelo y ayuda al proceso de diseño. SAP200 utiliza el concepto de modelado basado en objetos.

Cuando se ejecuta un análisis, SAP2000 convierte automáticamente el modelo basado en objetos en un modelo basado en elementos. Este modelo se conoce como modelo de análisis y consiste en juntas y elementos finitos tradicionales. Los resultados del análisis se muestran en el modelo de análisis.

SAP2000 posee opciones para controlar la manera de realizar el remallado, como el grado de refinamiento del mismo y cómo manejar las conexiones entre objetos que se intersectan. Existe también una opción para subdividir el modelo manualmente.

2.3 Grupos de elementos

Un grupo es una colección de objetos a la que se le asigna un nombre, y que puede contener cualquier cantidad de objetos y de cualquier tipo. Los grupos tienen múltiples usos, como por ejemplo:

- Seleccionar rápidamente objetos para edición y asignación.
- Pasos de construcción incremental.
- Agrupar objetos que comparten el mismo diseño.
- Salida selectiva de resultados.

Se pueden definir tantos grupos como hagan falta. El uso de grupos es una manera muy útil para gestionar modelos grandes.

2.4 Sistema de coordenadas y mallas

Todas las ubicaciones del modelo se definen con respecto a un sistema de coordenadas global. Este es un sistema de coordenadas cartesianas tridimensional. Los tres ejes, llamados X, Y y Z son mutuamente perpendiculares y satisfacen la regla de la mano derecha. SAP2000 siempre considera la dirección vertical como Z. De forma predeterminada, la gravedad actúa en la dirección $-Z$.

Es posible definir sistemas de coordenadas adicionales, para ayudar al desarrollo y visualización del modelo. Estos sistemas se definen con un origen y orientación referidas al sistema global de coordenadas.

Para cada sistema de coordenadas se puede definir una malla tridimensional, que consiste en líneas de construcción que se intersectan, usadas para ubicar objetos en el modelo. Cada malla puede ser del tipo cartesiano, cilíndrico o general.

2.4.1 Sistema de coordenadas

Los sistemas de coordenadas se usan para ubicar diferentes partes del modelo estructural definir las direcciones de cargas, desplazamientos, fuerzas internas y esfuerzos.

Todos los sistemas de coordenadas del modelo se definen con respecto a un sistema de coordenadas global $X - Y - Z$. Cada parte del modelo (junta, elemento o restricción) tiene su propio sistema de coordenadas local $1 - 2 - 3$. Además, se pueden crear sistemas de coordenadas alternativos que se usan para definir ubicaciones y direcciones. Todos los sistemas de coordenadas son sistemas cartesianos tridimensionales, SAP2000 siempre asume que el eje vertical es $+Z$. Esta dirección se usa para ayudar a definir sistemas de coordenadas locales, aunque los sistemas locales no tienen una dirección “hacia arriba”.

2.4.2 Sistema de coordenadas global

El sistema de coordenadas global es un sistema rectangular tridimensional. Los tres ejes, llamados X , Y y Z , son mutuamente perpendiculares y satisfacen la regla de la mano derecha. Su ubicación y orientación es arbitraria.

Se pueden especificar ubicaciones en el sistema de coordenadas global usando las variables X , Y y Z . Se puede especificar un vector en el sistema de coordenadas global, por medio de la ubicación de dos puntos, un par de ángulos o especificando una dirección ($\pm X$, $\pm Y$ o $\pm Z$).

El resto de los sistemas de coordenadas del modelo se definen con respecto al sistema de coordenadas global.

2.4.3 Direcciones “hacia arriba” y horizontal

SAP2000 siempre asume que Z es el eje vertical, siendo +Z hacia arriba. Los sistemas de coordenadas locales para juntas, elementos y cargas de aceleración del terreno se definen con respecto a esta dirección “hacia arriba”. Las cargas de peso propio siempre actúan hacia abajo, en la dirección $-Z$. El plano X – Y es horizontal. La dirección horizontal primaria es +X.

Los ángulos, en el plano horizontal, se miden de la dirección positiva del eje X. Los ángulos positivos son antihorario al mirar desde arriba el plano horizontal.

2.4.4 Sistemas de coordenadas locales

Cada parte del modelo estructural (junta, miembro o restricción) tiene su propio sistema de coordenadas local, que se usa para definir propiedades, cargas y respuestas de esa parte. Los ejes del sistema de coordenadas locales se llaman 1, 2 y 3. En general, el sistema de coordenadas local puede variar de junta a junta, elemento a elemento, restricción a restricción.

En las juntas, el sistema de coordenadas local 1 – 2 – 3 es normalmente el mismo sistema de coordenadas global X – Y – Z.

Para los elementos *frame* y *shell*, uno de los ejes locales está determinado por la geometría del elemento individual. La orientación de los otros dos ejes se define especificando un simple ángulo de rotación.

Las operaciones de “dibujo” tienden a unirse a las intersecciones de las líneas de la grilla, a menos que esta característica se inhabilite. La misma facilita la construcción exacta del modelo. Cuando una línea de la grilla se mueve, se puede usar una opción para especificar que los puntos en el modelo se muevan con ella.

Cada objeto en el modelo, (puntos, líneas, áreas) tienen su propio sistema de coordenadas local, el que se usa para definir cargas, propiedades y respuestas para ese objeto. Los ejes de cada sistema local de coordenadas se denotan como 1, 2 y 3. Los sistemas de coordenadas locales no tienen una grilla asociada.

2.5 Propiedades

Las propiedades se asignan a cada objeto para determinar su comportamiento estructural en el modelo. Algunas propiedades, tales como materiales y secciones, son entidades con nombre que deben ser definidas antes de asignarlas a los objetos. A modo de ejemplo, un objeto puede tener las siguientes propiedades:

- Una propiedad de material llamada CONCRETO250, una propiedad de sección de viga llamada RECT, y una sección circular llamada CIRC, ambas de material CONCRETO250. Al asignar la sección de viga RECT a un objeto FRAME, cualquier cambio en la definición de la sección RECT o en el material CONCRETO, se aplicará automáticamente a ese objeto. Una propiedad no tiene efecto en el modelo a menos que esté asignada a un objeto.
- Otras propiedades, tales como liberación de grados de libertad en los extremos de los miembros o condiciones de apoyo, se asignan directamente a los objetos. Estas propiedades sólo se pueden cambiar haciendo otra asignación de la misma propiedad al objeto. Ellas no son entidades con nombre y no existen independientemente de los objetos.

2.6 Funciones

Existen opciones para definir funciones de manera de poder describir cómo varía la carga en función del tiempo o período. Estas funciones son necesarias para ciertos tipos de análisis, aunque no se usan en análisis estáticos. Una función es una serie de pares de datos digitalizados. SAP 2000 dispone de cuatro tipos de funciones:

- Espectros de respuesta: aceleración espectral vs. período para el análisis modal espectral.
- Funciones de historias en el tiempo: magnitud de carga vs. tiempo, para su uso en análisis de historias en el tiempo.
- Funciones de régimen constante (*steady-state*): magnitud de carga vs. frecuencia para el análisis de régimen constante.
- Funciones de densidad espectral de potencia: magnitud de carga en el cuadro por frecuencia/frecuencia para uso en el análisis de densidad espectral de potencia.

2.7 Patrones de carga

Las cargas representan acciones sobre la estructura, como fuerzas, presiones, desplazamientos de apoyos, efectos térmicos, aceleraciones del terreno, y otros. La distribución espacial de cargas sobre la estructura se conoce como patrón de carga o casos de carga. Se pueden definir tantos patrones de carga como sean necesarios.

En general, se deberían definir patrones de carga separados para carga muerta, viva, viento, sismo, etc. Las cargas que necesiten variar separadamente, ya sea con fines de diseño o por la forma cómo se aplican a la estructura, deben definirse como diferentes patrones de carga.

Después de definir un patrón de carga, se asignan valores específicos de carga como una parte del patrón de carga. Estos valores asignados a un objeto, especifican el tipo de carga (fuerza, desplazamiento, temperatura, etc.), su magnitud y dirección. Diferentes cargas se pueden asignar a diferentes objetos como parte de un simple patrón de carga.

Para calcular una respuesta de la estructura debido a casos de carga, se deben definir casos de carga, para especificar cómo se deben aplicar los patrones de carga (estática, dinámicamente, etc.) y cómo se debe analizar la estructura (lineal, no lineal, etc.). El mismo patrón de carga se puede aplicar en varios casos de carga.

Un caso de carga define cómo se aplican las cargas a la estructura y cómo se debe calcular su respuesta estructural. SAP2000 tiene varios casos de carga disponibles. Más ampliamente, los análisis se clasifican como lineales o no lineales, dependiendo de cómo la estructura responde a la carga. Los resultados de los casos de carga se pueden superponer, es decir, sumarlos después del análisis.

2.7.1 Tipos de casos de carga

- Estático: cargas aplicadas sin efectos dinámicos.
- Análisis modal: cálculo de modos dinámicos de la estructura por los métodos de vectores propios (eigenvectores) o vectores de Ritz.
- Análisis modal espectral: cálculo estadístico de la respuesta.
- Usando aceleraciones. Requiere de un espectro de respuesta.
- Análisis de historias en el tiempo: se aplican cargas variables en el tiempo. Requiere funciones de historias en el tiempo. La solución puede calcularse por los métodos de superposición modal o integración paso a paso.
- Análisis de pandeo: cálculo de los modos de pandeo por aplicación de cargas.
- Hiperestático: cálculo de fuerzas secundarias por fuerzas de pretensado u otro tipo de cargas autoequilibrantes.

- Análisis por cargas móviles: cálculo de la respuesta más desfavorable debido a cargas vehiculares moviéndose a lo largo de líneas de la estructura. Usa cargas vehiculares móviles y trochas definidas en lugar de patrones de carga.
- Análisis de régimen constante (*steady-state*): se aplican cargas que varían armónicamente a una o más frecuencias. Requiere funciones de régimen constante.
- Análisis de densidad espectral de potencia: se aplican cargas que varían armónicamente de acuerdo a una especificación probabilística de cargas sobre un rango de frecuencias, y se determina el valor esperado de la respuesta. Requiere una función de densidad espectral de potencia.

Los resultados de casos de carga no lineales, normalmente no se deben superponer. En su lugar, todas las cargas que actúan sobre la estructura deberían combinarse directamente dentro del caso de carga no lineal. Los casos de carga no lineales pueden concatenarse para representar secuencias complejas de carga:

- Estático no lineal: las cargas se aplican sin efectos dinámicos. Puede usarse para análisis de *pushover* (empujón).
- Construcción no lineal por etapas: cargas aplicadas sin efectos dinámicos añadiendo o quitando porciones de la estructura. Pueden incluirse efectos dependientes del tiempo como por ejemplo envejecimiento, retracción, etc.
- Análisis no lineal de historias en el tiempo: se aplican cargas que varían con el tiempo. Requiere funciones de historias en el tiempo.

Se pueden definir un número ilimitado de casos de carga. Cuando se analiza el modelo se deben escoger los casos de carga a analizar. Los resultados de un caso de carga pueden ser selectivamente eliminados. Los resultados del análisis, cuando están disponibles, pueden considerarse parte del modelo y son necesarios para realizar el diseño de la estructura.

2.7.2 Combinaciones de carga

En SAP 2000, una combinación llamada “combo” es una combinación de los resultados de uno o más casos de carga u otras combinaciones. Cuando se define una combinación, esta se aplica a los resultados de todos los objetos del modelo. SAP2000 dispone de cuatro tipos de combinaciones:

- Lineal: se suman linealmente los resultados de los casos de carga y combinaciones incluidas.
- Absoluto: se suman los valores absolutos de los casos de análisis y combinaciones incluidas.
- SRSS: se calcula la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los casos de análisis y combinaciones incluidas.
- Envolvente: se construye el envolvente de los casos de análisis y combinaciones incluidas para obtener los valores máximos y mínimos.

Excepto por el tipo envolvente, en general las combinaciones deberían aplicarse a los casos de carga lineal, ya que los resultados no lineales no se pueden superponer.

El diseño estructural siempre se basa en combinaciones y no en casos de carga. Se puede crear una combinación que contenga solamente un caso de carga. Cada algoritmo de diseño crea sus propias combinaciones de carga. Se pueden crear combinaciones adicionales para diseño u otro propósito.

2.8 Configuraciones de diseño

Las características de diseño que posee el programa se pueden usar en objetos *frame*, cuyas propiedades incluyan materiales de concreto, acero estructural, acero doblado en frío y aluminio. Se pueden hacer diversas configuraciones que afecten al diseño de una manera particular:

- La norma de diseño específica a ser usada para cada tipo de material.
- La configuración de preferencias de aplicación de códigos al modelo.
- Combinaciones en las que se debe revisar el diseño.
- Grupos de objetos que deben compartir el mismo diseño.
- Valores “sobrescritos” opcionales para cada objeto que especifiquen cambios en coeficientes y parámetros de las fórmulas de las normas.

Para diseño en acero estructural, acero doblado en frío y aluminio, el programa puede seleccionar automáticamente la sección óptima entre aquellas de una lista definida por el usuario. La sección también se puede cambiar manualmente durante el proceso de diseño. Como resultado de esto, un objeto puede tener dos propiedades de secciones diferentes asociadas a él, una “sección de análisis” usada en el análisis previo y una “sección de diseño” resultante del diseño actual.

La “sección de diseño” se convierte en la “sección de análisis” en el análisis siguiente, y el ciclo iterativo de análisis y diseño continuará hasta que las dos secciones sean iguales.

Aunque no existen configuraciones explícitas de diseño para elementos planos de concreto (*shells*), el programa mostrará los esfuerzos de diseño y los contornos de refuerzo necesarios para resistir la componente a tracción del par tracción-compresión obtenido, de acuerdo al esfuerzo de fluencia del refuerzo, especificado por el usuario. El área de refuerzo requerida se calcula usando el tipo de material de refuerzo (rebar) especificado por el usuario.

Los resultados del diseño para la sección, así como todas las configuraciones mencionadas anteriormente, se pueden considerar como parte del modelo.

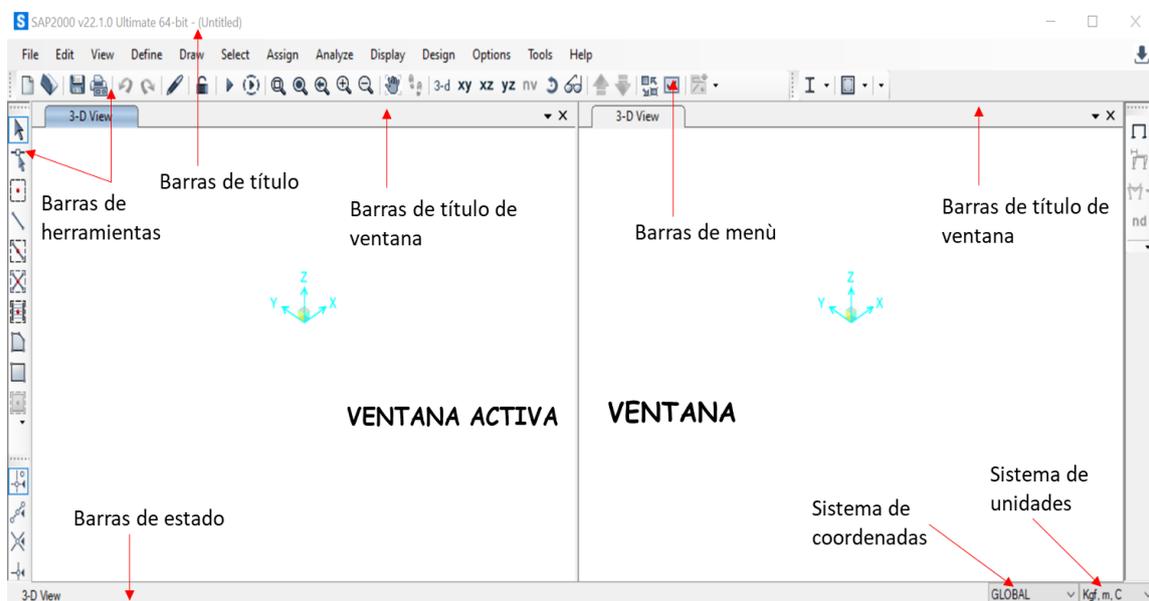
2.9 Definiciones de salida

La definición del modelo en SAP 2000 y los resultados del análisis y diseño se pueden mostrar de varias maneras, incluyendo vistas del modelo en dos y tres dimensiones, tablas de valores en texto y formato de hojas de cálculo o de base de datos, documentos formateados conteniendo tablas de valores en RTF y HTML, gráficos de funciones de resultados del análisis, creación de reportes de diseño con un único botón, o exportación a otros programas de dibujo y diseño.

3 LA INTERFAZ GRÁFICA

La interfaz gráfica de SAP2000 se usa para modelar, analizar, diseñar y mostrar los resultados de la estructura. Después de ejecutar el programa, la interfaz gráfica aparece en la pantalla exhibiendo una configuración similar a la que se presenta en la siguiente página. La figura 1 muestra la ventana principal de la interfaz gráfica del usuario. Esta ventana se puede mover, maximizar, minimizar o cerrar usando los comandos básicos de Windows. La barra principal de título, en la parte superior de la ventana principal, muestra el nombre del programa y el nombre del archivo del modelo.

Figura 1 – Ventana principal

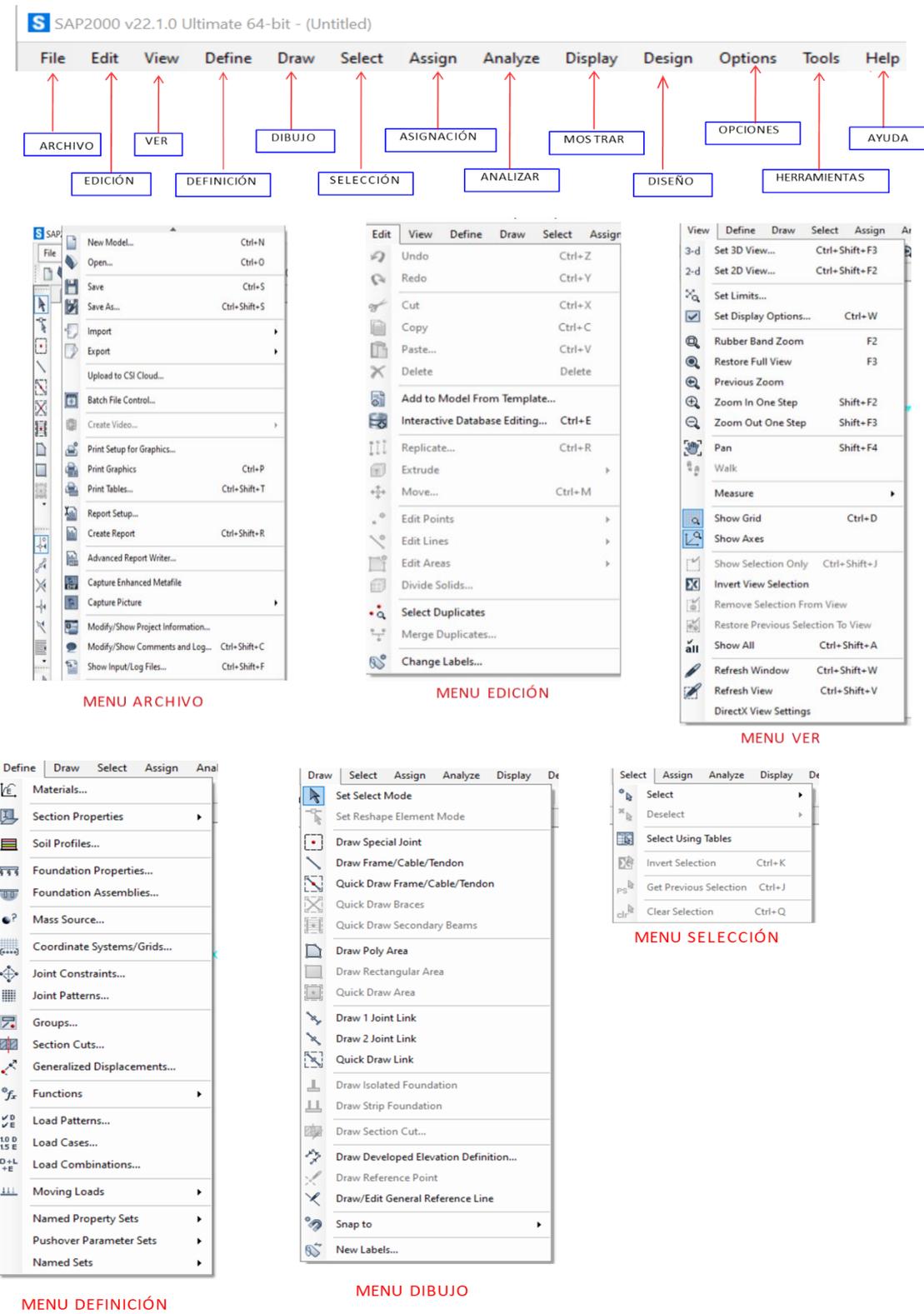


Fuente: Adaptada SAP2000 V22 (2021).

3.1 Barra de menú

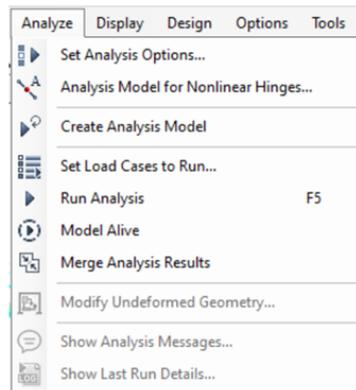
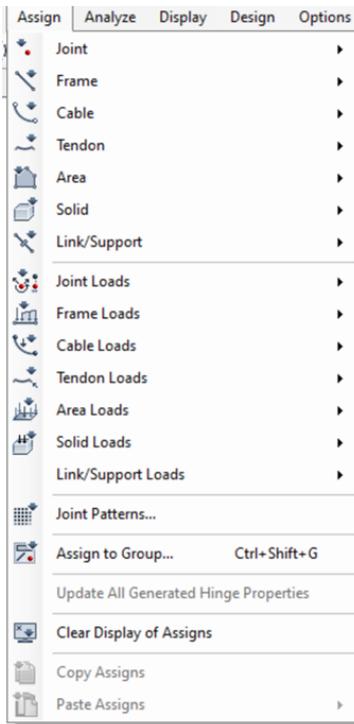
Los menús de la barra de menú contienen casi todas las operaciones que se pueden realizar en SAP2000. Estas operaciones se llaman comandos. Cada menú corresponde a un tipo básico de operación.

Figura 2 – Barra de menú 1

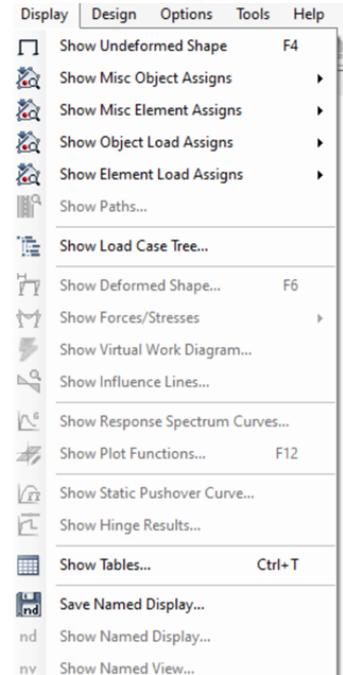


Fuente: Adaptada SAP2000 V22 (2021).

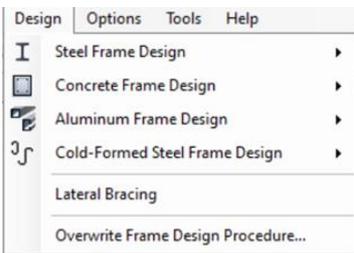
Figura 3 – Barra de menú 2



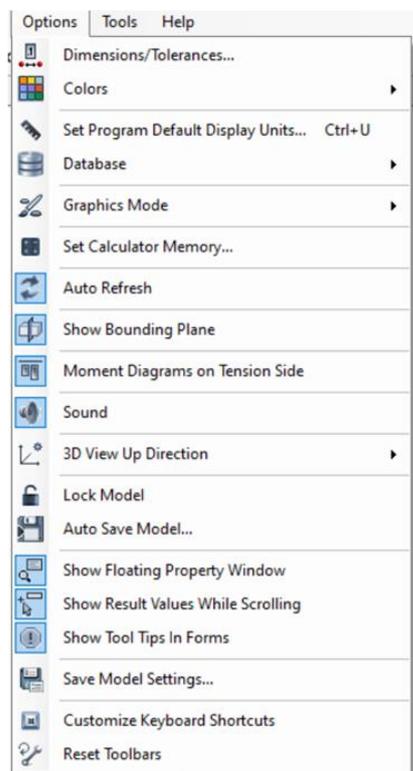
MENU ANALIZAR



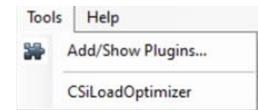
MENU ANÁLISIS



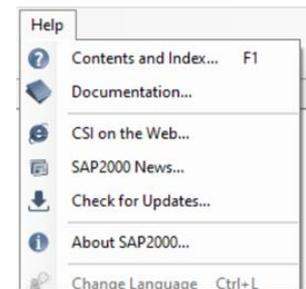
MENU DISEÑO



MENU OPCIONES



MENU HERRAMIENTAS



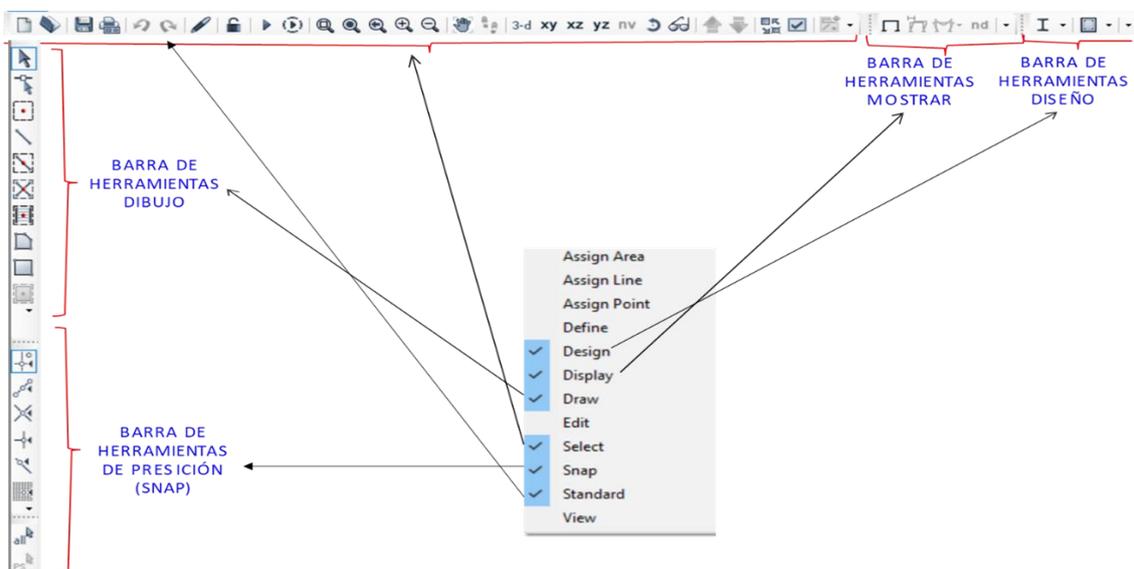
MENU AYUDA

Fuente: Adaptada SAP2000 V22 (2021).

3.2 Barras de herramientas

Los botones de la barra de herramientas proveen fácil acceso a muchas operaciones usadas comúnmente. Al colocar el cursor del mouse sobre uno de esos botones, se abrirá una ventana que muestra la función del botón. La mayoría de los botones corresponden a comandos del menú. Se puede controlar qué barras de herramientas están presentes presionando el botón derecho del mouse sobre la barra de menú y seleccionando qué barras de herramientas mostrar.

Figura 4 – Barra de herramientas



Fuente: Adaptada SAP2000 V22 (2021).

3.3 Ventanas

Las ventanas muestran la geometría del modelo y también pueden incluir propiedades, cargas, resultados de análisis y diseño. Se pueden mostrar de una a cuatro ventanas en cualquier momento. Cada ventana puede tener su propia orientación, tipo y opciones de la vista del modelo.

Sólo una ventana está “activa” en cada momento. Las operaciones de vista sólo afectan a la ventana activa. Se puede hacer que una ventana esté activa presionando el botón del mouse sobre ella.

3.4 Barra de estado

La barra de estado contiene los siguientes elementos:

- Información sobre lo que el programa está realizando.
- Información sobre el número de elementos seleccionados.
- Las coordenadas del cursor del mouse.
- Una caja para ver o cambiar las unidades actuales.
- Barras de desplazamiento cuando se muestran resultados de análisis de varios pasos.
- Controles de animación cuando se muestra la deformación de la estructura.

Figura 5 – Barra de estado



Fuente: Adaptada SAP2000 V22 (2021).

4 ELEMENTOS TIPO *SHELL*

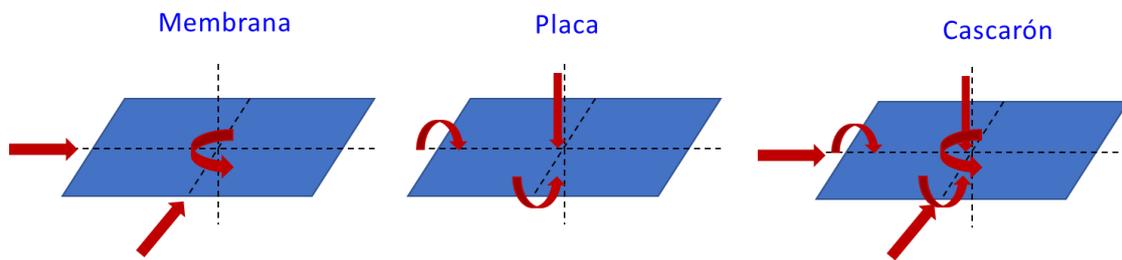
El elemento *shell* se usa para modelar el comportamiento de cascarón, placa y membrana en estructuras planas y tridimensionales. El elemento/objeto *shell* es un tipo de objeto de área. Dependiendo de las propiedades de la sección que se le asignen al área, el objeto se puede usar para modelar el comportamiento de esfuerzo/deformación plana y de sólidos axisimétricos.

El elemento *shell* es una formulación de 3 ó 4 nodos que combina comportamiento separado de membrana y flexión de placas. Los elementos de 3 y 4 nodos no tienen que ser planos. El comportamiento de membrana usa una formulación isoparamétrica que incluye componentes de rigidez traslacional en el plano y de rigidez rotacional en dirección perpendicular al plano del elemento.

El comportamiento de flexión de placa incluye componentes de rigidez en dos direcciones, fuera del plano y rotacional, y una componente de rigidez traslacional en dirección normal al plano del elemento. De forma predeterminada, se usa una formulación de placa delgada (Kirchoff) que desprecia la deformación cortante transversal. Opcionalmente, se puede escoger una placa gruesa (Mindlin/Reissner) que incluya los efectos de la deformación transversal por cortante. Entre las estructuras que pueden modelarse con este elemento se incluyen:

- Cascarones tridimensionales, como tanques y domos.
- Placas, como losas de piso y techo.
- Estructuras de membrana, como muros de cortante.

Figura 6 – Tipos de elementos



Fuente: Adaptada SAP2000 V22 (2021).

Para cada elemento *shell* de la estructura, se puede escoger modelar el comportamiento de membrana, placa o cascarón. Se recomienda usar el comportamiento total de cascarón, a menos que la estructura sea plana y esté adecuadamente restringida. Cada elemento *shell* tiene su propio sistema de coordenadas locales para definir las propiedades del material y cargas e interpretación de los resultados. Cada elemento se puede cargar por gravedad o con cargas distribuidas en cualquier dirección.

Para calcular la rigidez de los elementos *shell* se usa una formulación variable, de integración numérica de 4 a 8 puntos. Las fuerzas, momentos y esfuerzos internos, en el sistema de coordenadas local del elemento, se evalúan por integración de Gauss en 2 x 2 puntos y extrapolados a las juntas del elemento. Un error aproximado en los esfuerzos en los elementos puede estimarse de la diferencia de los valores calculados en los diferentes elementos unidos a una junta común. Esto indicará la precisión de una aproximación de elementos finitos dada y se puede usar como base de selección de una malla de elementos finitos nueva y más precisa.

La resolución numérica de Gauss trabaja con pesos ponderados, discretizando varios nodos o puntos de evaluación asociados a cada peso. Los pesos ya están estandarizados. Este método aproxima una integral definida para valores normalizados (-1, 1):

$$\int_{-1}^1 f(x)dx = w_0f(x_0) + w_1f(x_1) + w_2f(x_2) + \dots + w_nf(x_n) = \sum_{i=0}^n w_i \cdot f(x_i) \quad (1)$$

$f(x_i)$: son cada una de las primeras derivadas de funciones interpoladoras. He aquí la importancia de que una función interpolada sea al menos de 2° grado para garantizar la solución numérica durante el análisis.

x_i : es el valor longitudinal del elemento donde se evalúa la función, es decir, los puntos de evaluación dentro del subdominio de la función.

w_i : son los pesos ponderados predeterminados o estandarizados según este método numérico y que varían en función del número de puntos a integrar.

4.1 Conectividad de los elementos finitos

Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama malla.

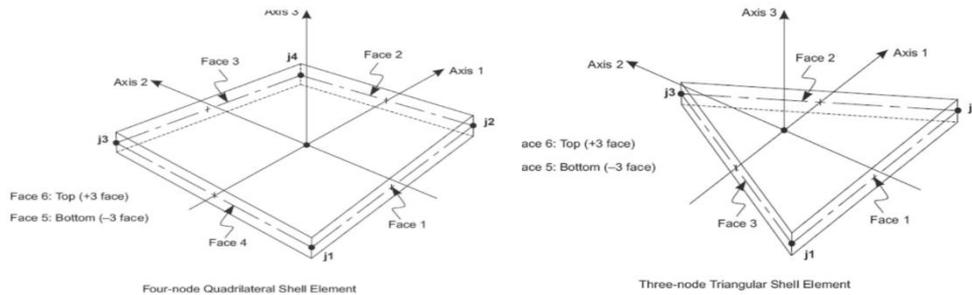
Las relaciones de adyacencia o conectividad se relacionan al valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo. El conjunto de relaciones entre los valores de una determinada variable entre los nodos se pueden escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales. La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos. Se relaciona al valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo.

Cada elemento puede tener cualquiera de las siguientes formas:

- Cuadrilateral, definido por cuatro juntas, j_1 , j_2 , j_3 y j_4 ; o
- Triangular, definido por tres juntas, j_1 , j_2 y j_3 .

La formulación cuadrilateral es la más exacta de las dos. El elemento triangular se recomienda únicamente para transiciones. La formulación de rigideces del elemento de tres nodos es razonable, pero la recuperación de los esfuerzos es deficiente.

Figura 7 – Elemento cuadrilateral y elemento triangular



Fuente: COMPUTERS AND STRUCTURES (2021).

Las ubicaciones de las juntas deben escogerse para satisfacer las siguientes condiciones geométricas: el ángulo interno en cada esquina debe ser menor que 180° . Los mejores resultados para un elemento cuadrilateral se obtendrán cuando estos ángulos estén cercanos a 90° o al menos en el rango de 45° a 135° .

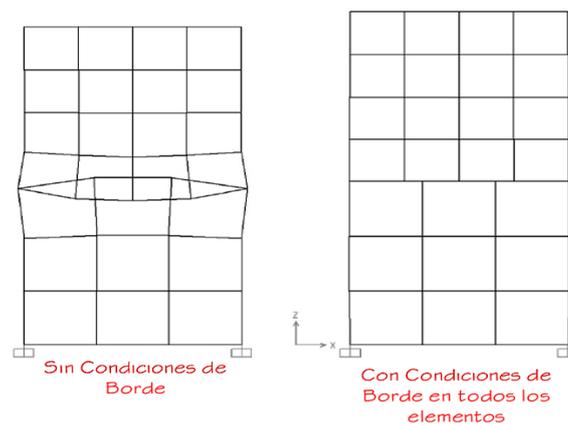
La relación de aspecto de un elemento no debe ser muy grande. Para el triángulo, ésta es la relación del lado más largo con el más corto. Para el cuadrilátero es la relación de la distancia mayor entre los puntos medios de lados opuestos a la distancia más corta. Los mejores resultados se obtienen para relaciones de aspecto cercanas a la unidad, o al menos menor que 4. La relación de aspecto no debe exceder de 10.

Para el elemento cuadrilateral, las cuatro juntas no tienen que ser coplanares. El programa toma en cuenta una pequeña cantidad de distorsión. El ángulo entre las perpendiculares en las esquinas da una medida del grado de distorsión. La normal en una esquina es perpendicular a los dos lados que llegan a esa esquina. Los mejores resultados se obtienen si el ángulo más grande entre cualquier par de esquinas es menor que 30° . Este ángulo no debe exceder de 45° . Estas condiciones se cumplen con un refinamiento adecuado de la malla.

4.2 Condiciones de borde

La ventaja de usar condiciones de borde en lugar de las transiciones de malla mostradas anteriormente, es que las condiciones de borde no requieren la creación de elementos distorsionados. Esto puede mejorar la exactitud de los resultados. Sin embargo, es importante entender que para cualquier transición el efecto de la malla más gruesa se propaga hacia la malla más fina en una distancia que está en el orden del tamaño del elemento más grande, ya que está gobernado por el efecto de Saint Venant. Por esta razón, es necesario asegurarse de crear las transiciones de malla lo bastante separadas de las áreas donde se necesitan resultados de esfuerzos detallados.

Figura 8 – Conexión de mallas usando condiciones de borde



Fuente: COMPUTERS AND STRUCTURES (2021).

4.3 Grados de libertad

El elemento *shell* siempre activa seis grados de libertad en cada una de sus juntas. Cuando el elemento se usa como sólo membrana se debe asegurar proveer restricciones u otros apoyos para los grados de libertad de traslación perpendicular y rotaciones por flexión. Cuando el elemento se usa sólo como placa, se deben proveer restricciones para los grados de libertad de traslaciones en el plano y rotación respecto a la normal.

Se recomienda el uso del comportamiento de cascarón (*shell*) para todas las estructuras tridimensionales (membrana + placa).

4.4 Sistema de coordenadas locales

Cada elemento *shell* tiene su propio sistema de coordenadas locales, y se usa para definir propiedades de los materiales, cargas y resultados. Los ejes de este sistema local se denotan como 1, 2 y 3. Los primeros dos ejes están contenidos en el plano del elemento en una orientación especificada por el usuario, y el tercero es normal al plano.

Es importante entender claramente la definición del sistema de coordenadas locales del elemento 1–2–3 y su relación con el sistema de coordenadas globales X–Y–Z. Ambos sistemas son sistemas cartesianos. Es importante definir sistemas de coordenadas locales que simplifiquen la entrada de datos e interpretación de resultados.

En la mayoría de las estructuras la definición del sistema de coordenadas local es simple, usando la orientación por defecto o el ángulo de coordenadas del elemento *shell*.

El eje 3 local siempre es normal al plano del elemento *shell*. Este eje se dirige hacia fuera cuando $j_1-j_2-j_3$ tiene sentido antihorario. Para elementos cuadrilaterales, el plano del elemento se define por los vectores que conectan los puntos medios de los dos pares de lados opuestos. Las orientaciones predeterminadas de los ejes locales 1 y 2 se definen por la relación entre el eje local 3 y el eje global Z:

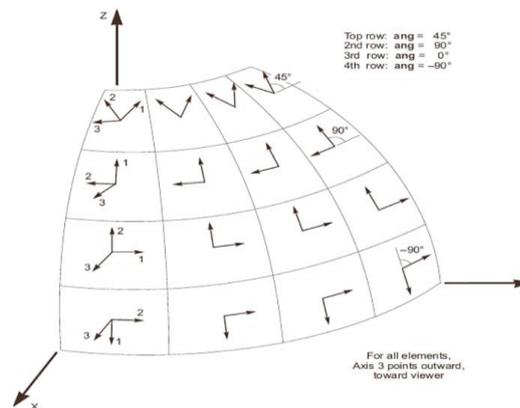
- El plano local 3–2 es paralelo al eje Z, es decir vertical.
- El eje local 2 tiene un sentido “hacia arriba” (+Z), a menos que el elemento sea horizontal, en cuyo caso el eje local 2 es horizontal, paralelo a la dirección +Y global.
- El eje local 1 siempre es horizontal y está contenido en el plano X–Y.

Se considera que el elemento es horizontal si el seno del ángulo entre el eje local 3 y el eje global Z es menor que 10^{-3} . El eje local 2 tiene el mismo ángulo con el eje vertical que el eje local 3 con el plano horizontal.

El ángulo de coordenadas del elemento *shell*, *ang*, se usa para definir la orientación de elementos que difieran de la orientación predeterminada. Es el ángulo de rotación de los ejes 1 y 2 respecto a la dirección positiva del eje local 3. La rotación para un valor positivo de ángulo es antihoraria cuando el eje local 3 apunta hacia afuera.

Para elementos horizontales, *ang* es el ángulo entre el eje local 2 y el eje +Y horizontal. En cualquier otro caso, *ang* es el ángulo entre el eje local 2 y el plano vertical que contiene al eje local 3.

Figura 9 – Ejes locales



Fuente: COMPUTERS AND STRUCTURES (2021).

4.5 Propiedades de la sección

Una sección *shell* es un conjunto de propiedades de materiales y geométricas que describen la sección transversal de uno o más elementos *shell*. Las propiedades de los elementos *shell* son del tipo de propiedad de sección de área. Las secciones se definen independientemente de los elementos y se asignan a los objetos.

4.5.1 Tipos de sección

Cuando se define una sección de área, se puede escoger entre tres tipos de elementos básicos:

- *Shell*, con grados de libertad traslacionales y rotacionales, capaz de soportar fuerzas y momentos.
- *Plane (stress or strain)*, un sólido bidimensional, con grados de libertad traslacionales, soporta cargas pero no momentos.
- *Asolid*, sólido axisimétrico con grados de libertad traslacionales, soporta fuerzas pero no momentos.

Para las secciones *shell*, se puede escoger uno de los siguientes subtipos de comportamiento:

- *Membrane*, puro comportamiento de membrana. Sólo soporta fuerzas en el plano y momento alrededor del eje normal. Material homogéneo lineal.
- *Plate*, puro comportamiento de placa. Sólo soporta momentos flectores y fuerza transversal. Material homogéneo. Permite formulaciones de placa delgada o gruesa.

- *Shell*, comportamiento total del cascarón, una combinación de los comportamientos de membrana y placa. Soporta todas las fuerzas y momentos. Material homogéneo. Permite formulaciones de placa delgada o gruesa.
- *Layered*, múltiples capas, cada una con diferente material, espesor y ubicación. Proporciona comportamiento completo del cascarón. Soporta todas las fuerzas y momentos.

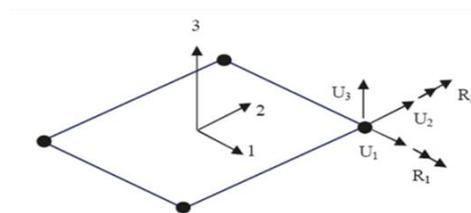
En general se recomienda utilizar el comportamiento completo del cascarón, a menos que la estructura completa sea plana y esté adecuadamente restringida.

4.5.2 Elemento tipo cascarón (*shell*)

Elemento de área de 3 ó 4 nodos. En cada nodo se obtienen 5 grados de libertad con deformaciones (tres traslaciones U_1, U_2, U_3 y dos rotaciones R_1, R_2). Son estables de forma independiente ante cargas perpendiculares y en el plano del elemento. Representan la suma de una membrana con un *plate*.

Se pueden utilizar para modelar, analizar y diseñar losas, muros o placas sometidas a flexión, corte y fuerza axial.

Figura 10 – Elemento de área de 4 nodos tipo cascarón



Fuente: COMPUTERS AND STRUCTURES (2021).

Para calcular la matriz de rigidez de la estructura, la matriz de rigidez del elemento debe ser transformada al sistema de coordenadas global. La transformación de la rigidez del elemento. La matriz del sistema de coordenadas local al global está dada por:

$$[K_s] = [T]^T [k_s] [T] \quad (2)$$

donde, K_s es la matriz de rigidez del elemento en el sistema de coordenadas global, k_s es la matriz de rigidez del elemento en el sistema de coordenadas local y T es la matriz de transformación.

La matriz de transformación para el elemento de capa cuadrilátero es:

$$[T] = \begin{bmatrix} [\lambda]^T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [\lambda]^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [\lambda]^T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [\lambda]^T \end{bmatrix} \quad (3)$$

donde, $[\lambda]$ se calcula a partir de la ecuación para un elemento cuadrilátero.

La dirección coseno λ_x para la dirección x local se obtiene normalizando el vector con respecto a su longitud:

$$\lambda_x = \frac{1}{l_{jl}} \begin{Bmatrix} x_{jl} \\ y_{jl} \\ z_{jl} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

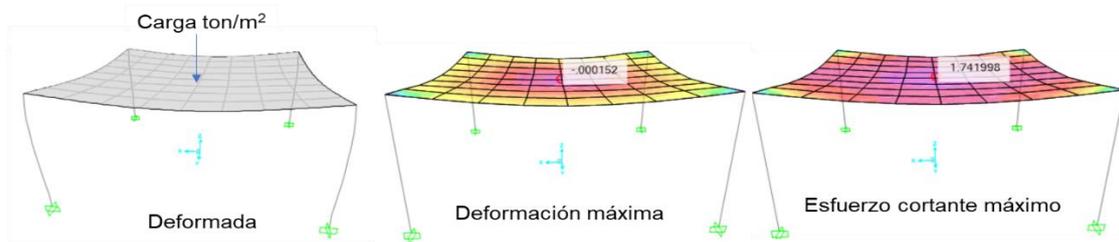
donde x_j , y_j , z_j representan las coordenadas globales del nodo j.

Donde la longitud del vector es:

$$l_{jl} = \sqrt{(x_{jl})^2 + (y_{jl})^2 + (z_{jl})^2} \quad (5)$$

En el siguiente ejemplo se muestra una losa en la que se pueden aplicar cargas distribuidas en el área (ton/m²) y las posibles salidas dadas por el programa.

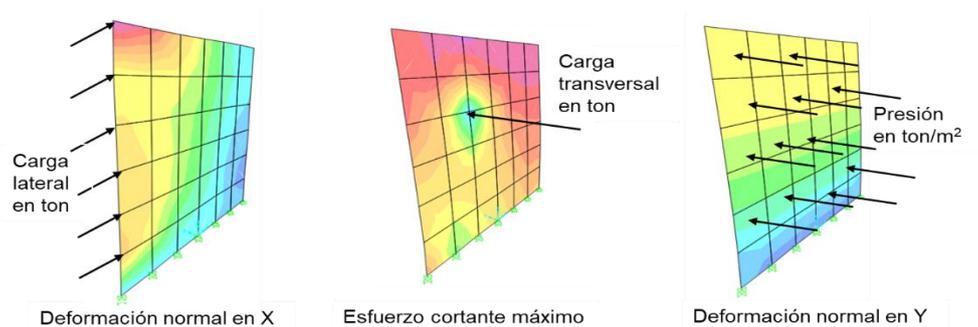
Figura 11 – Losa tipo cascarón con aplicación de carga distribuida



Fuente: PROPIA (2021).

En el caso de muros, se aplican cargas laterales, transversales o presiones, y se pueden obtener diferentes salidas.

Figura 12 – Muro tipo cascarón



Fuente: PROPIA (2021).

4.5.3 Elemento tipo placa o lámina (*plate*)

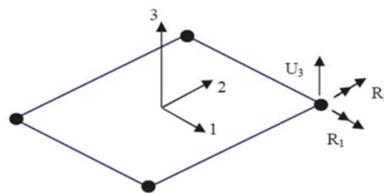
Elemento de área de tres o cuatro nodos. En cada nodo se obtienen 3 grados de libertad con deformación (traslación U_3 perpendicular al plano y dos rotaciones R_1 y R_2), es decir los desplazamientos en su plano U_1 y U_2 están liberados. La matriz de rigidez de un elemento tipo *plate* está en función del módulo de elasticidad y de las inercias.

Si se discretiza (*mesh*) un área de *plates* y se le aplican cargas que generen deformaciones en su plano, se forma un mecanismo. Debido a ello, en cada nodo generado de una discretización deberá existir un elemento de apoyo, a fin de limitar dichas deformaciones.

Si se discretiza (*mesh*) un área de *plates* y se le aplican cargas que generen deformaciones únicamente perpendiculares a su plano, las mismas son estables, debido a que se obtienen deformaciones en sus ejes locales U_3 , R_1 y R_2 donde hay una rigidez definida.

Se pueden utilizar para modelar, analizar y diseñar losas macizas bajo cargas perpendiculares a su plano, a través del método de los elementos finitos.

Figura 13 – Elemento tipo placa



Fuente: COMPUTERS AND STRUCTURES (2021).

La matriz de rigidez para el elemento de flexión de placa con las deformaciones cortantes se obtiene mediante integración numérica.

$$[K] = \int_{A^e} [B]^T [D_b] [B] dx dy \quad (6)$$

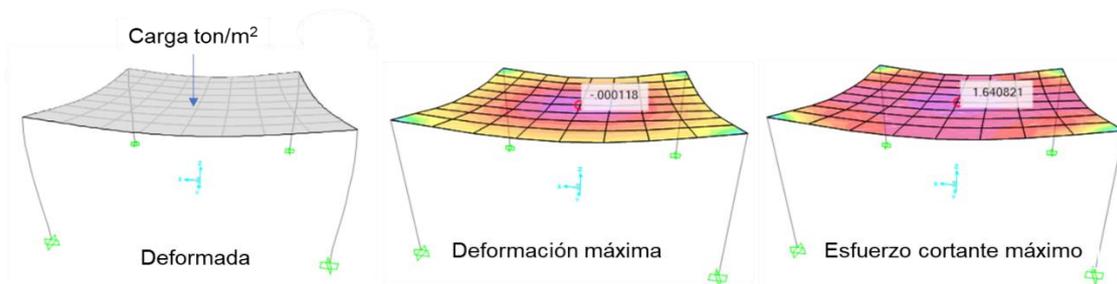
Donde K es la matriz de rigidez de la estructura, B es la matriz de transformación del elemento, D_b la matriz de elasticidad para un material isotrópico.

$$D_b = \frac{Et^3}{12(1-\nu)^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

donde ν es la relación de Poisson, t es el espesor de la placa y E es el módulo de elasticidad.

En el siguiente ejemplo se muestra una losa bajo cargas distribuidas en el área (ton/m^2) y las posibles salidas dadas por el programa.

Figura 14 – Losa tipo placa con aplicación de carga puntual



Fuente: PROPIA (2021).

4.5.4 Elemento tipo membrana

Elemento de área de tres o cuatro nodos. En cada nodo se obtienen 2 grados de libertad con deformaciones U_1 y U_2 en el plano del elemento, es decir, el desplazamiento perpendicular a su plano U_3 y las rotaciones R_1 y R_2 están liberadas (no hay momentos). La matriz de rigidez de un elemento tipo membrana está en función del módulo de elasticidad y de su área.

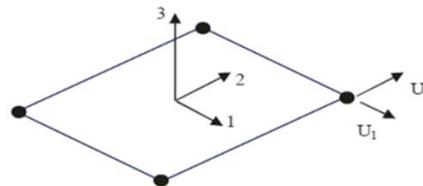
Si se discretiza (*mesh*) un área de membrana y se le aplican cargas que generen deformaciones perpendiculares a su plano, se obtiene un mecanismo. Debido a ello, en cada nodo generado de una discretización deberá existir un elemento de apoyo a fin de limitar dichas deformaciones.

Si se discretiza (*mesh*) un área de *plates* y se le aplican cargas que generen deformaciones únicamente perpendiculares a su plano, las mismas son estables debido a que se obtienen deformaciones en sus ejes locales U1 y U2, donde hay una rigidez definida.

Se pueden utilizar para modelar losas simplemente apoyadas sobre vigas y/o correas bajo cargas perpendiculares a su plano, donde la transmisión de dichas cargas a las mismas se hace a través del método de área tributaria.

Si las cargas (ton/m^2) perpendiculares al plano se distribuyen en un solo sentido se obtienen cargas uniformes en las vigas, pero si se distribuyen en dos sentidos se obtienen cargas en forma triangular y/o trapezoidal, dependiendo de la forma geométrica de la losa. Se pueden utilizar para analizar y diseñar muros de concreto armado o placas metálicas sometidas a un régimen de cargas en su plano. Los vínculos deben ser articulaciones.

Figura 15 – Elemento tipo membrana



Fuente: COMPUTERS AND STRUCTURES (2021).

La matriz de rigidez del elemento para el elemento cuadrilátero isoparamétrico de cuatro nodos para la condición de tensión plana está dada por

$$[K] = t \iint_A [B]^T [E] [B] dA \quad (8)$$

donde K es la matriz de rigidez de la estructura, B es la matriz de transformación del elemento, E es la matriz de elasticidad para un material isotrópico y T es el espesor del elemento.

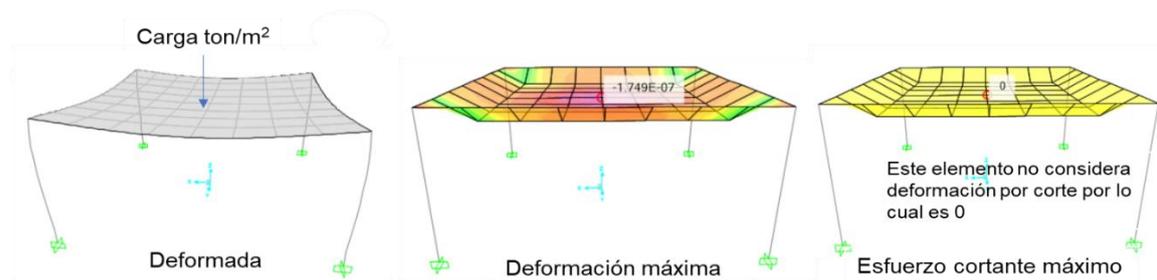
La matriz de material $[E]$, para la condición de deformación plana para un material isotrópico está dado por:

$$[E] = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & 0 & 0 \\ \nu & 1 - \nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

donde, ν es la relación de Poisson y E el módulo de elasticidad.

En el siguiente ejemplo, se muestra una losa con distribución de cargas en dos direcciones:

Figura 16 – Losa tipo membrana con aplicación de carga distribuída



Fuente: PROPIA (2021).

4.6 Espesor

Cada sección *shell* tiene un espesor constante de membrana y un espesor constante de flexión. El espesor de la membrana, t_h , se usa para calcular las rigideces de la membrana para secciones *shell* y membrane, y el volumen del elemento para calcular la masa y el peso propio del elemento.

El espesor de flexión, t_{hb} , se usa para calcular la rigidez de flexión de placa para secciones *shell* y *plate*. Normalmente, estos dos espesores son iguales. No obstante, para algunas aplicaciones como modelar superficies corrugadas, los comportamientos de membrana y flexión de placa no se pueden representar adecuadamente con un material homogéneo de espesor constante.

4.6.1 Formulación del espesor

Hay disponibles dos formulaciones para el espesor, que determinan si las deformaciones transversales por corte se incluyen en el comportamiento de flexión de placas en el elemento *plate* o *shell*:

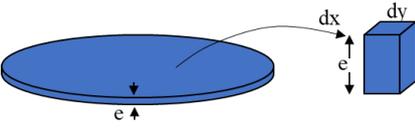
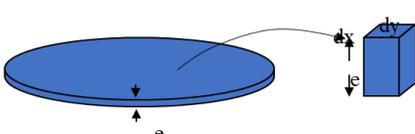
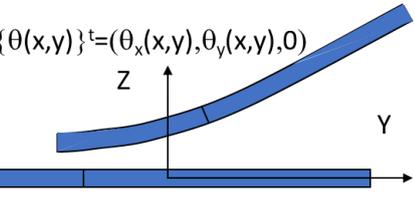
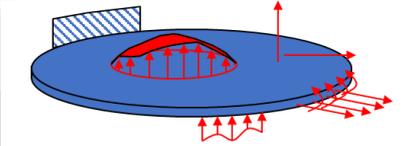
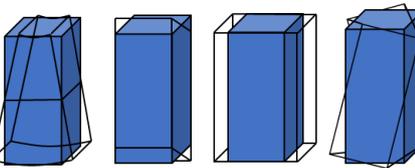
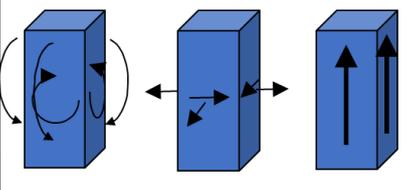
- La formulación de placa gruesa (Mindlin/Reissner), que incluye los efectos de la deformación transversal por cortante. Si $L/T > 20$, donde L es la longitud del elemento y T es el espesor del elemento. La formulación de placa delgada (Kirchoff), que desprecia la deformación transversal por cortante. Si $L/T < 20$, donde L es la longitud del elemento y T es el espesor del elemento.

Las deformaciones por cortante tienden a ser importantes cuando el espesor es mayor que un décimo a un quinto de la luz. También pueden ser significativas en las cercanías de concentraciones de esfuerzos de flexión, como cuando ocurren cambios súbitos de espesor o condiciones de apoyo y cerca de agujeros y esquinas reentrantes.

Aún para problemas de flexión de placas delgadas donde las deformaciones por cortante son verdaderamente despreciables, la formulación de placa gruesa tiende a ser más exacta, aunque algo rígida, en relación con la formulación de placa delgada; sin embargo la exactitud de la formulación de placa gruesa es más sensible a las relaciones de aspecto grandes y distorsión de la malla que la formulación de placa delgada.

En general, se recomienda usar la formulación de placa gruesa, a menos que se esté usando una malla distorsionada y se sepa que las deformaciones por cortante serán pequeñas, o que se trate de revisar una solución teórica de placa delgada.

Figura 17 – Cuadro comparativo para el uso de placas de Mindlin

Teoría de placas de Mindlin		Teoría de placas de Mindlin	
Unidad básica estructural			
Variables cinemáticas	Desplazamientos $\{\omega\}^t = (\omega_x(x,y), \omega_y(x,y), \omega_z(x,y))$ $\{\theta(x,y)\}^t = (\theta_x(x,y), \theta_y(x,y), 0)$ 	Fuerzas externas  Fuerzas por unidad de superficie, por unidad de longitud, concentradas. Momentos por unidad de longitud	
	Deformaciones $\{\chi(xy)\}^t = (\chi_{xx}, \chi_{yy}, \chi_{xy})$ $\{\gamma(xy)\}^t = (\gamma_{xz}, \gamma_{yz})$ $\{\epsilon^n(xy)\}^t = (\epsilon^n_{xx}, \epsilon^n_{yy}, \gamma^n_{xy})$ 	Esfuerzos 	

Fuente: PROPIA (2021).

4.7 Propiedades de los materiales

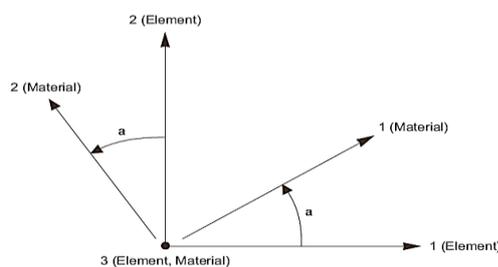
Para materiales isotrópicos, las propiedades a definir son:

- El módulo de elasticidad, E , y la relación de Poisson, ν , para calcular las rigideces de la membrana y flexión de placa.
- La masa unitaria (por unidad de volumen), m , para calcular la masa del elemento.
- El peso unitario (por unidad de volumen), w , para calcular las cargas por peso propio.

4.7.1 Ángulo del material

Los sistemas de coordenadas locales del material y del elemento no necesitan ser iguales. En ambas direcciones 3 locales siempre coinciden para los dos sistemas, pero el eje 1 del material y el eje 1 del elemento pueden diferir por un ángulo, α , como se muestra en la figura. Este ángulo no tiene efecto en las propiedades de materiales isotrópicos ya que éstas no dependen de la orientación.

Figura 18 – Ángulo del material



Fuente: COMPUTERS AND STRUCTURES (2021).

4.7.2 Masa

En un análisis dinámico, la masa de la estructura se usa para calcular fuerzas inerciales. La masa contribuida por los elementos *shell* se concentra en las juntas del elemento. No se consideran efectos inerciales dentro del elemento.

La masa total del elemento es igual a la integral sobre el plano del elemento de la densidad de masa, m , multiplicada por el espesor, t_h . La masa total se distribuye a las juntas de manera proporcional a los términos diagonales de la matriz consistente de masas. La masa total se aplica a cada uno de los grados de libertad traslacionales, UX , UY y UZ . No se calculan momentos de inercia de masa a los grados de libertad rotacionales.

4.7.3 Modificadores de propiedades

Se pueden especificar factores de escala para modificar las propiedades calculadas de la sección. Estas se pueden usar, por ejemplo, para tomar en cuenta el agrietamiento del concreto, la fabricación corrugada u ortotrópica u otros factores no fácilmente descritos en los valores de geometría y propiedades del material. Se dispone de modificadores individuales para los siguientes diez términos: rigidez de membrana correspondiente a la fuerza F11, rigidez de membrana correspondiente a la fuerza F22, rigidez de membrana correspondiente a la fuerza F12, rigidez de flexión de placa correspondiente al momento M11, rigidez de flexión de placa correspondiente al momento M22, rigidez de flexión de placa correspondiente al momento M12, rigidez cortante de placa correspondiente a la fuerza V12, rigidez cortante de placa correspondiente a la fuerza V13, masa y peso.

4.7.4 Desplazamientos de las juntas

Los desplazamientos de las juntas se miden desde la superficie referencia del elemento en dirección normal al plano de las juntas. Si las juntas definen una superficie curva, el plano se determina por medio de las dos líneas que conectan los puntos medios de lados opuestos. Un desplazamiento positivo ocurre en la misma dirección del eje local 3 del elemento. Sin embargo, ese desplazamiento puede no ser exactamente paralelo al eje local 3 si los desplazamientos no son todos iguales.

Los desplazamientos de las juntas ubican el plano de referencia del elemento, es decir, la superficie media del elemento. Cuando se le asignan desplazamientos de junta a los elementos *shell*, se pueden especificar explícitamente los desplazamientos en las juntas o se pueden referenciar a un patrón de juntas.

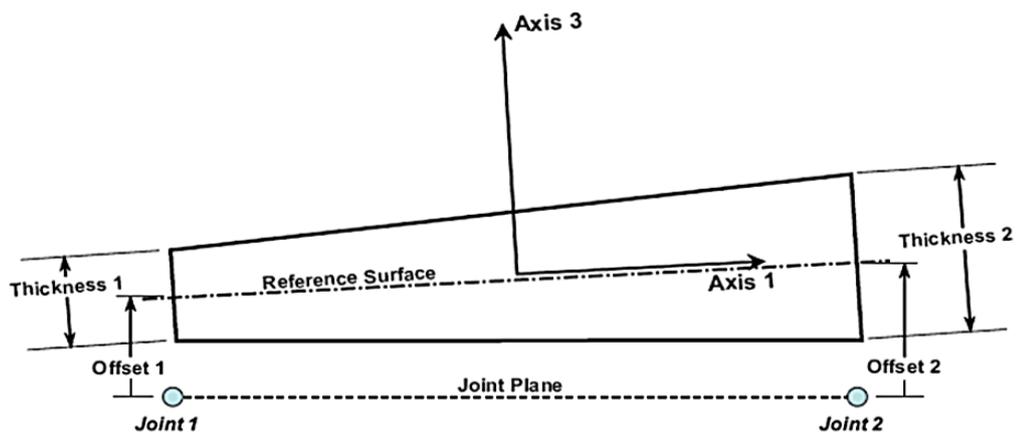
Si una vez asignados los desplazamientos de las juntas, la superficie neutra del elemento no está en el plano de las juntas, los comportamientos de membrana y flexión de placa se acoplan. Si se aplica una condición de diafragma a las juntas, ésta también se aplicará a la flexión.

4.7.5 Modificación de espesores

Normalmente el espesor del elemento *shell* se define por las propiedades de la sección asignada al elemento. Existe la opción de modificar ese espesor, incluyendo la posibilidad que el espesor varíe sobre el elemento.

Cuando se modifica el espesor, tanto el espesor de membrana como el de flexión toman el valor modificado.

Figura 19 – Desplazamientos de las juntas y modificación de espesores para un elemento *shell* visto desde un extremo



Fuente: COMPUTERS AND STRUCTURES (2021).

4.8 Cargas

4.8.1 Cargas de peso propio

Las cargas de peso propio pueden aplicarse en cualquier caso de carga para activar el peso propio de todos los elementos del modelo. Para un elemento *shell*, el peso propio es una fuerza uniformemente distribuida sobre el plano del elemento. La magnitud del peso propio es igual al peso unitario, w , multiplicado por el espesor, t_h , para secciones homogéneas.

El peso propio siempre actúa hacia abajo, en la dirección global $-Z$. El peso propio puede escalarse por un factor que aplica a la estructura completa.

4.8.2 Cargas de gravedad

Las cargas de gravedad pueden aplicarse a cada elemento *shell* para activar el peso propio del elemento. Usando cargas de gravedad, el peso propio puede escalarse y aplicarse en cualquier dirección. Diferentes direcciones y factores de escala pueden aplicarse a cada elemento.

Si todos los elementos se van a cargar de igual manera y en la dirección “hacia abajo” es más conveniente usar la carga de peso propio.

4.8.3 Cargas uniformes

La carga uniforme se usa para aplicar fuerzas uniformemente distribuidas a las superficies de los elementos *shell*. La dirección de la carga puede especificarse en el sistema de coordenadas global o en el sistema local del elemento.

Las intensidades de las cargas vienen dadas como fuerzas por unidad de área. La fuerza total que actúa sobre el elemento viene dada por la intensidad total de la carga multiplicada por el área del elemento. Esta fuerza se distribuye entre los nodos del elemento.

Las fuerzas dadas en coordenadas fijas pueden especificarse, opcionalmente, actuando en el área proyectada de la mitad de la superficie, es decir, el área que puede verse a lo largo de la dirección de la carga. La intensidad de carga especificada se multiplica automáticamente por el coseno del ángulo entre la dirección de la carga y la normal al elemento (dirección local 3). Esto puede usarse para aplicar cargas de viento.

4.8.4 Cargas de presión de superficie

Las cargas de presión de superficie se usan para aplicar presiones externas en cualquiera de las seis caras del elemento *shell*. Presiones positivas se dirigen hacia el interior del elemento.

Las presiones pueden ser constantes en una cara o interpoladas de valores dados en las juntas. Los valores dados en las juntas se obtienen de los patrones de juntas y no necesitan ser los mismos para cada cara. Los patrones de juntas pueden ser fácilmente usados para aplicar presiones hidrostáticas.

4.8.5 Cargas de temperatura

La carga de temperatura crea deformaciones térmicas en el elemento *shell*. Esta deformación viene dada por el producto del coeficiente de expansión térmica del material y el cambio de temperatura del elemento. Todas las cargas de temperatura especificadas representan un cambio de temperatura del estado sin esforzar, para un análisis lineal, o de una temperatura previa en un análisis no lineal. Se pueden especificar dos campos independientes de cargas de temperatura:

- temperatura, t , que es constante a través del espesor y produce deformaciones de membrana;
- gradiente de temperatura, t_3 , que es lineal en la dirección del espesor y produce deformaciones por flexión.

El gradiente de temperatura se especifica como el cambio en temperatura por unidad de longitud. El gradiente de temperatura es positivo si ésta se incrementa (linealmente) en la dirección positiva del eje local 3 del elemento. El gradiente de temperatura es cero en la mitad de la superficie, ya que no induce deformación de membrana.

Cada uno de los dos campos de cargas por temperatura puede ser constante sobre el plano del elemento o interpolado de valores dados en las juntas. El gradiente de temperatura referencial siempre se toma como cero, ya que el cambio de temperatura que produce la deformación por flexión es igual al gradiente de temperatura de carga.

4.9 Resultados: fuerzas internas y esfuerzos

Los esfuerzos en los elementos *shell* son las fuerzas por unidad de área que actúan dentro del volumen del elemento para resistir las cargas. Estos esfuerzos son:

- Esfuerzos directos en el plano, S_{11} y S_{22} .
- Esfuerzo cortante en el plano, S_{12} .
- Esfuerzos cortantes transversales, S_{13} y S_{23} .
- Esfuerzo directo transversal, S_{33} (siempre asumido como cero).

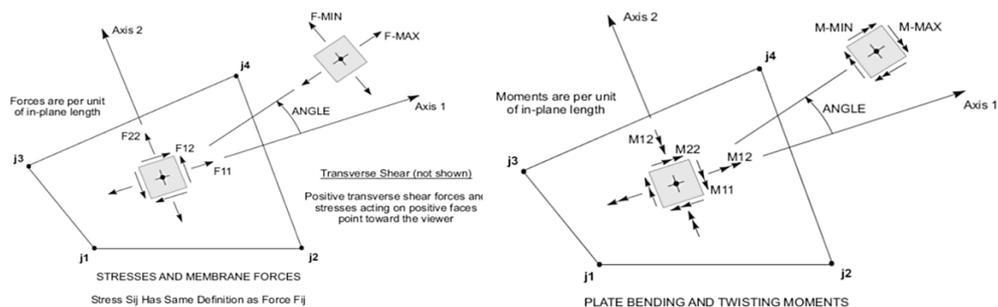
Se asume que los tres esfuerzos en el plano son constantes o varían linealmente a través del espesor del elemento. Se asume que los dos esfuerzos transversales de corte son constantes a través de su espesor. La distribución de esfuerzo cortante es parabólica, siendo cero en las superficies superior e inferior, tomando un valor máximo o mínimo en el centro del elemento.

Las fuerzas internas del elemento, llamadas también resultantes de esfuerzos, son las fuerzas y momentos que resultan de integrar los esfuerzos sobre el espesor del elemento. Estas fuerzas internas son:

- Fuerzas internas de membrana, $F11$ y $F22$.
- Fuerza cortante de membrana, $F12$.
- Momentos de flexión de placa, $M11$ y $M22$.
- Momento torsor de placa, $M12$.
- Fuerzas cortantes transversales de placa, $V13$ y $V23$.

Es importante resaltar que estas resultantes de esfuerzos son fuerzas y momentos por unidad de longitud en el plano. Están presentes en cada punto de la superficie media del elemento. Las convenciones de signos para los esfuerzos y fuerzas internas se muestran en la siguiente figura.

Figura 20 – Convenciones de signos para esfuerzos y fuerzas



Fuente: COMPUTERS AND STRUCTURES (2021).

Las fuerzas internas del elemento *shell* son las fuerzas y momentos que resultan de integrar los esfuerzos sobre el espesor del elemento. Estas fuerzas son:

Fuerzas directas de membrana:

$$F_{11} = \int_{-\frac{th}{2}}^{\frac{+th}{2}} \sigma_{11} dx_3 \quad (10)$$

$$F_{22} = \int_{-\frac{th}{2}}^{\frac{+th}{2}} \sigma_{22} dx_3 \quad (11)$$

Fuerzas cortantes de membrana:

$$F_{12} = \int_{-\frac{th}{2}}^{\frac{+th}{2}} \sigma_{12} dx_3 \quad (12)$$

Momentos de flexión de placa:

$$M_{11} = - \int_{-\frac{thb}{2}}^{\frac{+thb}{2}} t \sigma_{11} dx_3 \quad (13)$$

$$M_{22} = - \int_{-\frac{thb}{2}}^{\frac{+thb}{2}} t \sigma_{22} dx_3 \quad (14)$$

Momento de alabeo:

$$M_{12} = \int_{-\frac{thb}{2}}^{\frac{+thb}{2}} t\sigma_{12}dx_3 \quad (15)$$

Fuerzas cortantes transversales:

$$V_{13} = \int_{-\frac{thb}{2}}^{\frac{+thb}{2}} \sigma_{13}dx_3 \quad (16)$$

$$V_{23} = \int_{-\frac{thb}{2}}^{\frac{+thb}{2}} \sigma_{23}dx_3 \quad (17)$$

donde x_3 representa el espesor medido desde la superficie media del elemento.

Estas resultantes de esfuerzos son fuerzas y momentos por unidad de longitud en el plano. Están presentes en cada punto de la superficie media del elemento.

Las fuerzas cortantes transversales se calculan de los momentos usando las ecuaciones de equilibrio:

$$V_{13} = \frac{-dM_{11}}{dx_1} - \frac{dM_{12}}{dx_2} \quad (18)$$

$$V_{23} = \frac{-dM_{12}}{dx_1} - \frac{dM_{22}}{dx_2} \quad (19)$$

donde x_1 y x_2 son las coordenadas en el plano paralelas a los ejes locales 1 y 2.

Las fuerzas internas positivas corresponden a un estado de esfuerzos positivos que es constante a través del espesor. Momentos internos positivos corresponden a un estado de esfuerzo que varía linealmente a través del espesor y es positivo en la parte inferior. Por lo tanto:

$$\sigma_{11} = \frac{F_{11}}{th} - \frac{12M_{11}}{thb^3}x_3 \quad (20)$$

$$\sigma_{22} = \frac{F_{22}}{th} - \frac{12M_{22}}{thb^3}x_3 \quad (21)$$

$$\sigma_{13} = \frac{V_{13}}{thb} \quad (22)$$

$$\sigma_{23} = \frac{V_{23}}{thb} \quad (23)$$

$$\sigma_{33} = 0 \quad (24)$$

Los esfuerzos cortantes transversales anteriores son valores promedio. La distribución de esfuerzo cortante real es parabólica, siendo cero en la parte superior e inferior del elemento y tomando un valor máximo o mínimo en la superficie media.

5 ELEMENTOS TIPO *FRAME*

El elemento *frame* usa una formulación general, tridimensional de viga-columna que incluye los efectos de flexión biaxial, torsión, deformación axial y deformaciones biaxiales por corte. Con este elemento se pueden modelar pórticos tridimensionales, armaduras tridimensionales, pórticos planos, armaduras planas y parrillas planas.

Un elemento *frame* se modela como una línea recta que conecta dos puntos. En la interfaz gráfica se pueden dividir objetos curvos en múltiples objetos rectos de acuerdo a las especificaciones del usuario. Cada elemento tiene su propio sistema de coordenadas local para definir sus propiedades y cargas e interpretar los resultados.

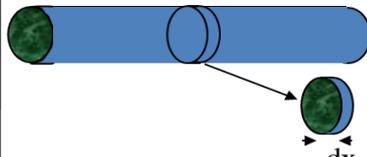
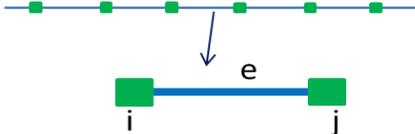
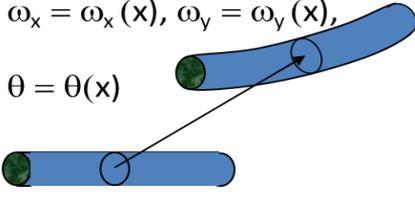
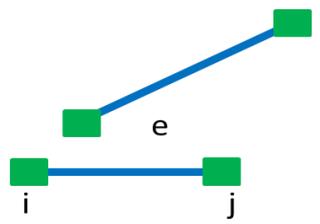
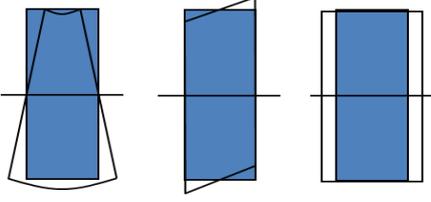
El elemento puede ser prismático o no prismático. La formulación no prismática permite que la longitud del elemento se divida en un número ilimitado de segmentos donde las propiedades pueden variar. La variación de la rigidez por flexión puede ser lineal parabólica o cúbica sobre cada segmento de longitud. Las propiedades axiales, cortantes, torsionales, de masa y de peso varían linealmente en cada segmento.

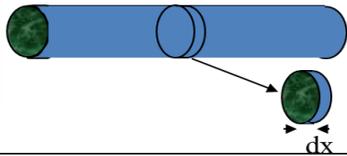
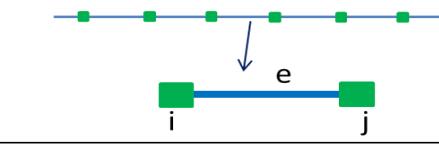
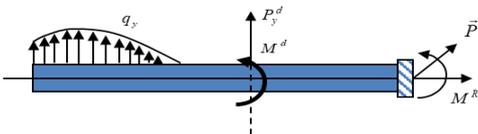
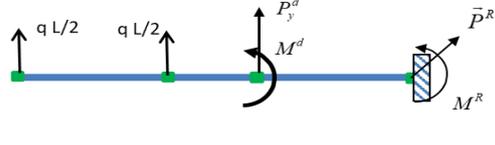
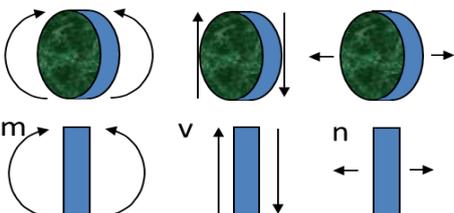
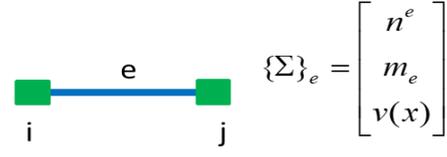
Cada elemento *frame* puede estar cargado con su peso propio y múltiples cargas concentradas y distribuidas. El programa dispone de desplazamientos de juntas y puntos de inserción para considerar el tamaño finito de las intersecciones entre las vigas y columnas. Los desplazamientos de extremo pueden tener un empotramiento total o parcial para modelar el efecto que puede ocurrir cuando los extremos de un elemento están embebidos en las intersecciones entre las vigas y columnas. También se pueden modelar liberaciones de restricciones para modelar diferentes condiciones de apoyo en los extremos de un elemento.

En el método de los elementos finitos sólo se calculan los desplazamientos de los nodos de la malla. El desplazamiento de cualquier otro elemento de viga se calcula utilizando una interpolación lineal a partir de los desplazamientos de los nodos.

A continuación se presenta un cuadro comparativo de las vigas de Timoshenko y los elementos finitos.

Figura 21 – Cuadro comparativo de teorías de vigas

	Teoría de vigas de Timoshenko	Teoría de elementos finitos en vigas
Unidad básica estructural		
Variables cinemáticas	Desplazamientos $\omega_x = \omega_x(x), \omega_y = \omega_y(x),$ $\theta = \theta(x)$ 	 $\{U\} = \begin{bmatrix} \omega_{x1} \\ \omega_{y1} \\ \theta_1 \\ \omega_{x2} \\ \vdots \\ \omega_{yn} \\ \theta_n \end{bmatrix}$
	Deformaciones $\chi = \chi(x), \gamma = \gamma(x), \varepsilon_n = \varepsilon_n(x)$ 	$\chi = \chi_e(\text{constante}), \gamma = \gamma(x)(\text{lineal}),$ $\varepsilon_n = \varepsilon_n^e(\text{constante})$  $\{E\}_e = \begin{bmatrix} \varepsilon_n^e \\ \chi_e \\ \gamma(x) \end{bmatrix}$

	Teoría de vigas de Timoshenko	Teoría de elementos finitos de viga
Unidad básica estructural		
Fuerzas externas	 Fuerzas distribuidas Fuerzas concentradas	 $\{F\}^t = (f_{\alpha x_1}, f_{\alpha y_1}, f_{\theta_1}, f_{\alpha x_2}, \dots, f_{\alpha y_n}, f_{\theta_n})$
Variables estáticas	$m=m(X)$ $v=v(X)$ $n=n(X)$	$m = m_e$ (constante), $v = v(x)$ (lineal), $n = n_e$ (constante)
Esfuerzos		 $\{\Sigma\}_e = \begin{bmatrix} n^e \\ m_e \\ v(x) \end{bmatrix}$

Fuente: PROPIA (2021).

5.1 Conectividad de los elementos finitos

Un elemento *frame* se representa por una línea recta que conecta dos juntas *i* y *j*, a menos que sea modificado por un desplazamiento de las juntas. Las dos juntas no deben compartir la misma ubicación en el espacio. Los dos extremos del elemento se conocen como *I* y *J*, respectivamente.

De forma predeterminada, el eje neutro del elemento se ubica a lo largo de la línea que une los dos puntos, sin embargo, esto se puede cambiar usando el punto de inserción que veremos más adelante.

5.2 Desplazamiento de las juntas

A veces, el eje del elemento no se puede especificar convenientemente por juntas que lo conectan a otros elementos de la estructura. El usuario tiene la opción de especificar desplazamientos de las juntas independientes en cada extremo del elemento. Estos desplazamientos se dan como tres componentes (X, Y y Z) paralelos a los ejes globales, medidas de la junta al extremo del elemento (en el punto de inserción).

Las dos ubicaciones dadas por las coordenadas de las juntas i y j , más los correspondientes desplazamientos, definen el eje del elemento. Estas dos ubicaciones no deben ser coincidentes.

Se recomienda que los desplazamientos sean perpendiculares al eje del elemento, aunque esto no es obligatorio. Los desplazamientos a lo largo del eje del elemento se especifican, en general, usando desplazamientos de los extremos del elemento en lugar de desplazamientos de las juntas. Los desplazamientos de los extremos forman parte de la longitud del elemento, tienen propiedades de elemento y cargas y pueden o no ser rígidos.

5.3 Grados de libertad

El elemento *frame* activa los seis (6) grados de libertad en ambos extremos. Si se quieren modelar elementos de cercha que no transmitan momentos en sus extremos, se puede: asignar las propiedades J, I22 e I33 como cero, o liberar ambas rotaciones, R2 y R3, en ambos extremos y liberar la rotación torsional R1 en cualquier extremo.

5.4 Sistema de coordenadas local

Cada elemento *frame* posee su propio sistema de coordenadas local, que se usa para definir propiedades, cargas y resultados.

Los ejes de este sistema local se denotan como 1, 2 y 3. La dirección del primer eje (1) es a lo largo de la longitud del elemento; los otros dos descansan en un plano perpendicular al elemento con una orientación especificada por el usuario. Es muy importante entender claramente la definición del sistema de coordenadas local del elemento 1–2–3, y su relación con el sistema de coordenadas global X–Y–Z. Ambos son sistemas cartesianos de coordenadas. El usuario debe definir sistemas que simplifiquen la entrada de datos e interpretación de resultados.

En la mayoría de las estructuras, la definición de los sistemas de coordenadas locales de los elementos es extremadamente simple usando la orientación predeterminada o el ángulo de coordenadas del elemento *frame*.

5.4.1 Eje longitudinal 1

El eje local 1 es siempre el eje longitudinal del elemento, con la dirección positiva desde el extremo I hacia el extremo J.

Específicamente, el extremo I es la junta *i* más sus desplazamientos (si existen), y el extremo J es la junta *j* más sus desplazamientos (si existen). El eje se determina independientemente del punto cardinal.

5.4.2 Orientación predeterminada

La orientación predeterminada de los ejes locales 2 y 3 se establece por la relación entre el eje local 1 y el eje global Z:

El plano local 1–2 es vertical, i es paralelo al eje Z.

El eje local 2 tiene sentido “hacia arriba” (+Z) a menos que el elemento sea vertical, en cuyo caso el eje 2 es horizontal en dirección global +X.

El eje 3 siempre es horizontal, es decir está contenido en el plano X–Y.

Se considera que un elemento es vertical si el seno del ángulo entre el eje 1 local y el eje Z es menor que 10^{-3} .

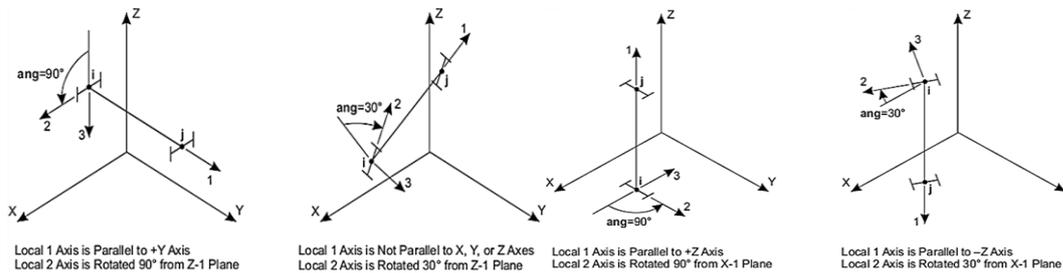
El eje local 2 tiene el mismo ángulo con respecto al eje vertical que el eje local 1 con el plano horizontal. Esto quiere decir que el eje local 2 apunta verticalmente hacia arriba para elementos horizontales.

5.4.3 Ángulo de coordenadas

El ángulo de coordenadas del elemento *frame* se usa para definir las orientaciones de los elementos cuando estas son diferentes a la orientación predeterminada. Se define como el ángulo de rotación de los ejes locales 2 y 3 respecto al eje longitudinal 1 del elemento. La rotación, para un valor positivo de ang, es antihoraria, cuando el eje local 1 apunta hacia delante.

Para los elementos verticales, ang es el ángulo entre el eje local 2 y el eje horizontal +X. De otro modo, ang es el ángulo entre el eje local 2 y el plano vertical que contiene al eje local 1.

Figura 22 – Ángulos de coordenadas



Fuente: COMPUTERS AND STRUCTURES (2021).

5.5 Propiedades de la sección

Una sección *frame* es un conjunto de materiales y propiedades geométricas que describen la sección transversal de uno o más elementos *frame*. Las secciones se definen independientemente de los elementos y luego se asignan a los mismos. Las propiedades de la sección son de dos tipos:

- Prismáticas: todas las propiedades son constantes a lo largo del elemento.
- No prismáticas: Las propiedades varían en la longitud del elemento.

Las secciones no prismáticas se definen haciendo referencia a dos o más secciones prismáticas previamente definidas. Las propiedades de la sección se definen con respecto al sistema de coordenadas local del elemento, de la siguiente manera:

- La dirección 1 va a lo largo del eje del elemento. Es perpendicular a la sección transversal y pasa por la intersección de los dos ejes principales de la sección.
- Las direcciones 2 y 3 definen el plano de la sección. En general, la dirección 2 es paralela a la altura de la sección y la dirección 3 a la base de la sección, aunque esto no es obligatorio.

5.6 Propiedades de los materiales

Las propiedades del material para la sección se especifican haciendo referencia a un material previamente definido. Las propiedades del material usadas para la sección son:

- El módulo de elasticidad, $E1$, para rigidez axial y rigidez por flexión.
- El módulo de corte, $G12$, para rigidez a torsión y rigidez a corte transversal. Se calcula con $e1$ y la relación de Poisson, $U12$.
- La densidad de masa (por unidad de volumen), m , para calcular la masa de los elementos.
- El peso unitario, w , para calcular cargas por el peso propio.
- El indicador de tipo de diseño, $ides$, que indica si los elementos que usan esta sección deberían diseñarse como acero, concreto, aluminio, acero doblado en frío o no diseñarse.

5.7 Propiedades geométricas y rigideces de la sección

Para generar las rigideces de la sección, se usan seis propiedades geométricas básicas, junto con las propiedades del material. Estas propiedades son:

- El área de la sección transversal, a .
- Los momentos de inercia, $I33$, respecto al eje 3, para flexión en el plano 1–2, y el momento de inercia $I22$, respecto al eje 2, para flexión en el plano 1–3.
- La constante torsional, J . Noten que la constante torsional no es igual al momento polar de inercia, excepto para las secciones circulares.
- Las áreas de corte, $AS2$ y $AS3$, para corte transversal en los planos 1–2 y 1–3, respectivamente.

Al dar valores de cero a A, I33, I22 y J, genera que las correspondientes rigideces de la sección vuelvan a cero. Por ejemplo, un miembro de cercha puede modelarse usando $J = I33 = I22 = 0$ y un miembro de un pórtico plano en el plano 1–2, se puede modelar usando $J = I22 = 0$.

5.7.1 Tipos de sección

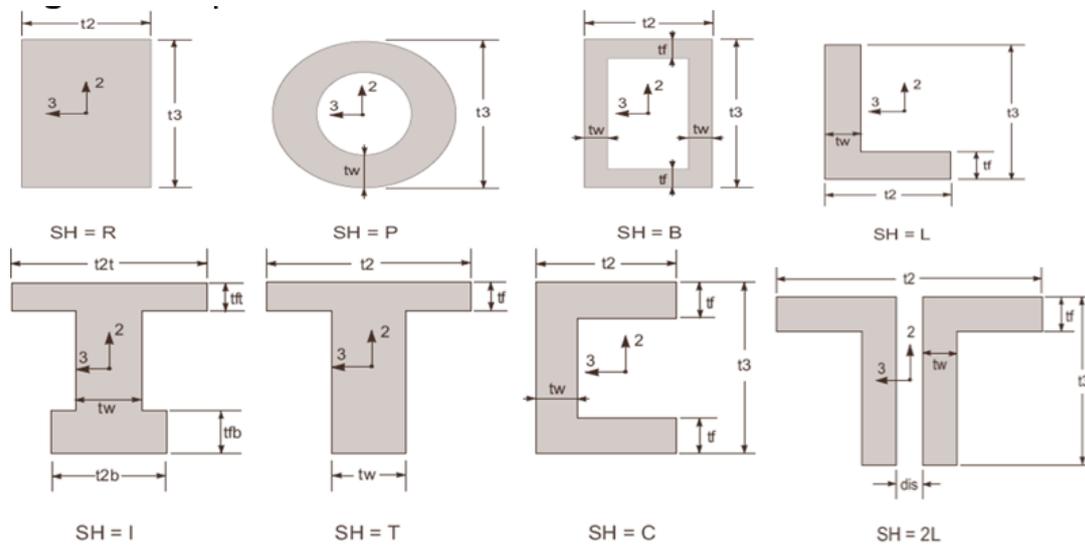
Para cada sección, las seis propiedades geométricas se pueden especificar directamente, calcular con dimensiones de sección especificadas o leer de un archivo de base de datos de propiedades. Esto se determina por el tipo de sección, sh, especificado por el usuario.

Si sh = G (sección general), las seis propiedades geométricas se deben especificar explícitamente. Si sh = R, P, B, I, C, T, L o 2L, las seis propiedades geométricas se calculan automáticamente con las dimensiones especificadas de la sección.

Si sh tiene otro valor, por ejemplo W12x120 (t, t2, tf, tw, t2b, tfb), las seis propiedades geométricas se obtienen de una base de datos de propiedades especificada. Las propiedades geométricas de la sección pueden obtenerse de uno o más archivos de bases de datos de propiedades de secciones.

SAP2000 incluye varias bases de datos, entre ellas: AA6061-T6.pro: Perfiles Americanos de aluminio, AISC3.pro: Perfiles de acero Americanos, BBSshapes.pro: Perfiles de acero Británicos, Chinese.pro: Perfiles de acero Chinos, CISC.pro: Perfiles de acero Canadienses, EURO.pro: Perfiles de acero Europeos, SECTIONS8.pro: Copia de AISC3.pro.

Figura 23 – Tipos de sección



Fuente: COMPUTERS AND STRUCTURES (2021).

Se pueden crear archivos adicionales de bases de datos usando la macro de EXCEL *proper.xls*, que está disponible solicitándola a Computers and Structures Inc. Las propiedades geométricas se almacenan en las unidades de longitud especificadas cuando se crea el archivo de base de datos.

5.7.2 Secciones diseñadas

SAP2000 tiene una utilidad incorporada que puede usarse para crear propiedades de sección para elementos *frame*. Se pueden construir secciones de geometría arbitraria y combinación de materiales. Las propiedades geométricas básicas (áreas, momentos de inercia y constante torsional) se calculan y usan en el análisis. Además esta utilidad (*Section Designer*) puede calcular las propiedades no lineales de las articulaciones.

5.7.3 Masa y peso adicional

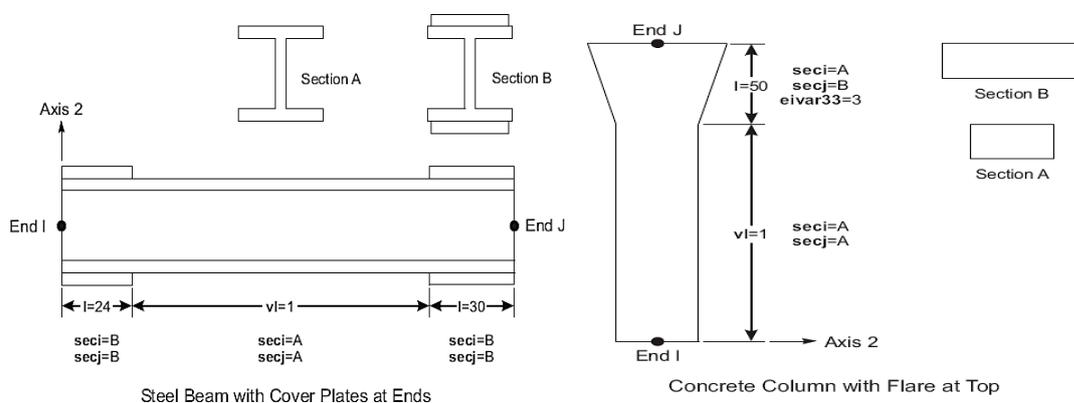
Se pueden especificar la masa y el peso para una sección que actúa adicional a la masa y el peso del material. Estas masa y peso adicionales se especifican por unidad de longitud. Se pueden usar, por ejemplo, para representar los efectos de materiales no estructurales que están unidos a los elementos *frame*. La masa y el peso adicionales actúan sin importar el área de la sección transversal de la sección. De forma predeterminada, la masa y el peso adicionales tienen valor cero.

5.7.4 Secciones no prismáticas

Se pueden definir secciones no prismáticas cuyas propiedades varían a lo largo de la longitud del elemento. Se puede especificar que el elemento se divida en un número finito de segmentos, los que no necesitan ser de igual longitud.

La variación de la rigidez por flexión puede ser lineal, parabólica o cúbica sobre cada segmento de longitud. El resto de las propiedades (axial, cortante, torsional, masa y peso) varían linealmente sobre cada segmento.

Figura 24 – Secciones no prismáticas

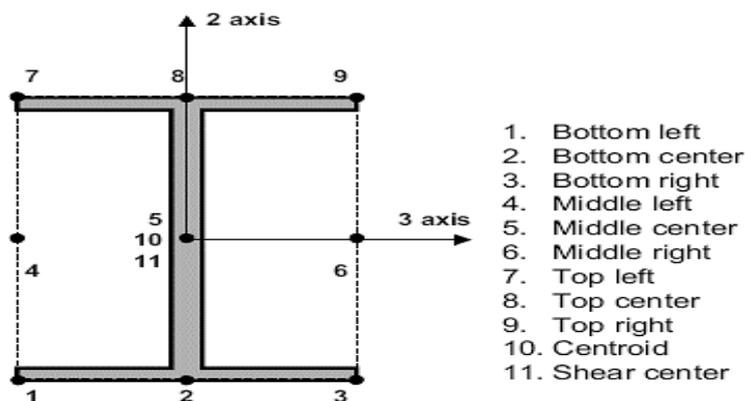


Fuente: COMPUTERS AND STRUCTURES (2021).

5.7.5 Punto de inserción

De forma predeterminada, el eje local 1 del elemento va a lo largo del centroide de la sección. A menudo, es conveniente especificar otra ubicación en la sección, como la parte superior de una viga o una esquina exterior de una columna. Esta ubicación se conoce como punto cardinal de la sección. Las elecciones de los puntos cardinales se muestran en la siguiente figura. La ubicación predeterminada es el punto 10.

Figura 25 – Punto de inserción



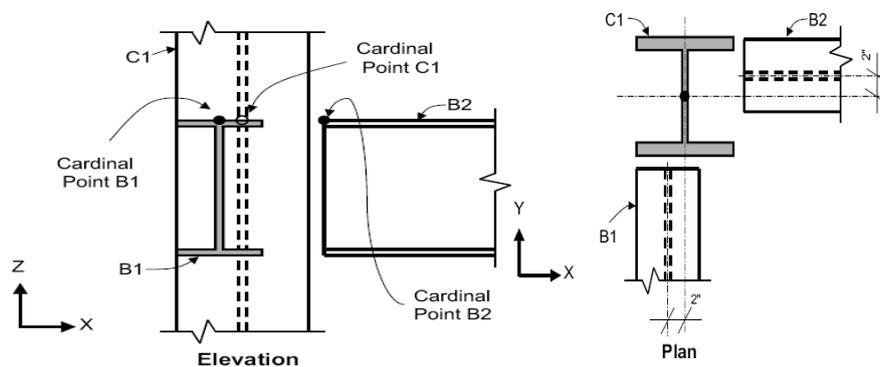
Note: For doubly symmetric members such as this one, cardinal points 5, 10, and 11 are the same.

Fuente: COMPUTERS AND STRUCTURES (2021).

Los desplazamientos de las juntas se especifican junto con los puntos cardinales como parte de la asignación de punto de inserción, aunque sean características independientes. Primero se usan los desplazamientos de las juntas para calcular el eje del elemento y, por lo tanto, el sistema de coordenadas local, y luego se ubica el punto cardinal en el plano local 2-3 resultante.

Esta característica es útil, por ejemplo, para modelar vigas y columnas cuando las vigas no llegan al centro de la columna. La siguiente figura muestra la planta y elevación de un arreglo donde las vigas exteriores están desplazadas del centro de las columnas para coincidir con el exterior del edificio. También se muestran los puntos cardinales de cada miembro y las dimensiones de los desplazamientos de las juntas.

Figura 26 – Planta y elevación de un arreglo de vigas exteriores



Fuente: COMPUTERS AND STRUCTURES (2021).

5.7.6 Desplazamientos de las juntas

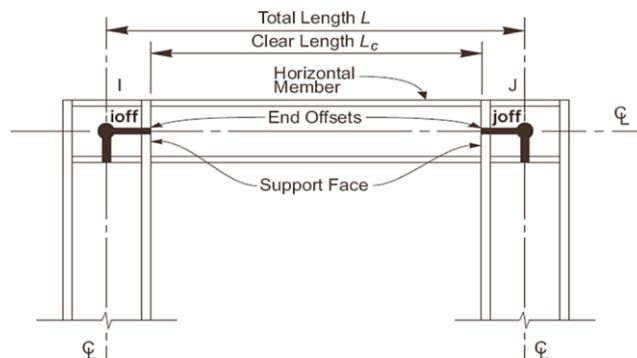
Los elementos *frame* se modelan como elementos lineales conectados en puntos (juntas). No obstante, la sección transversal de los miembros estructurales reales posee dimensiones finitas. Cuando dos elementos, como una viga y columna, se conectan en una junta, existe una superposición o solapado de las secciones transversales. En muchas estructuras, las dimensiones de los miembros son grandes y la longitud del solapado puede ser una fracción significativa de la longitud total de un elemento.

Se pueden especificar dos desplazamientos en los extremos de cada elemento usando los parámetros i_{off} y j_{off} correspondientes a los extremos I y J, respectivamente. El desplazamiento del extremo i_{off} es la longitud de solapado para un elemento dado con otro elemento que se conecta con el primero en la junta I.

La longitud libre, L_c , es la longitud entre los desplazamientos de las juntas (caras de los apoyos): $L_c = L - (i_{off} + j_{off})$, donde L es la longitud total del elemento.

Si los desplazamientos de las juntas se especifican de tal manera que la longitud libre es menor del 1% de la longitud total del elemento, el programa mostrará una advertencia y reducirá los desplazamientos de los extremos hasta que la longitud libre sea igual al 1% de la longitud del elemento.

Figura 27 – Desplazamiento de las juntas



Fuente: COMPUTERS AND STRUCTURES (2021).

5.7.7 Factor de zona rígida

Un análisis basado en una geometría de elementos *frame* centro a centro (junta a junta) puede sobreestimar las deflexiones en algunas estructuras. Esto se debe al efecto rigidizador causado por la superposición de las secciones transversales en una conexión. Este efecto es más importante en las estructuras de concreto que en las de acero.

Se puede especificar un factor de extremo rígido para cada elemento usando el parámetro *rigid* que da la fracción de cada desplazamiento del extremo que se asume rígido para deformaciones por flexión y corte. Los desplazamientos de zona rígida nunca afectan las deformaciones axial y torsional. Se asume que la longitud completa del elemento es flexible para estas deformaciones.

El valor predeterminado de *rigid* es cero. El máximo valor es la unidad, que indica que los desplazamientos del extremo son completamente rígidos. Se debe usar un criterio de ingeniería para seleccionar el valor apropiado para este parámetro. Este dependerá de la geometría de la conexión, y puede ser diferente para los distintos elementos que se conectan.

En general, este valor no debería exceder de 0,5. En cada extremo de los elementos no prismáticos se asume que las propiedades de la sección son constantes dentro de la longitud del desplazamiento del extremo. Las propiedades de la sección varían solamente en la luz libre del elemento entre las caras de los apoyos. Esto no se ve afectado por el valor del factor de extremo rígido.

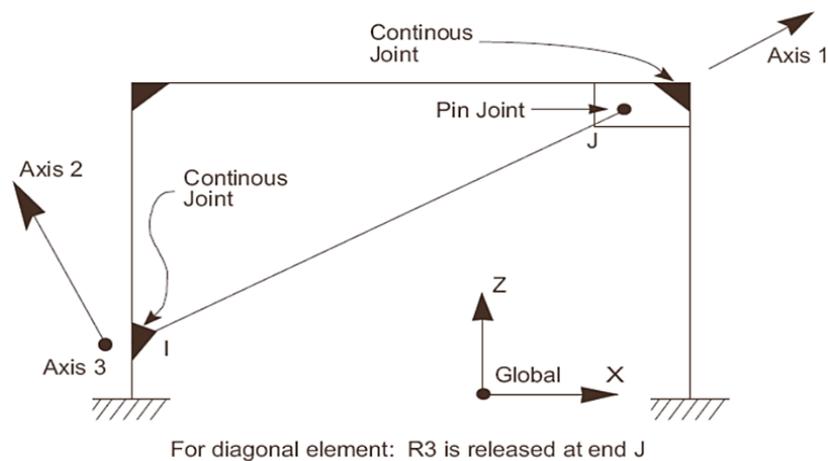
Todas las fuerzas y momentos internos se calculan en la cara de los apoyos y en otros puntos igualmente espaciados en la longitud libre del elemento. No se producen resultados dentro de los desplazamientos del extremo (*end offset*), incluyendo las juntas.

5.7.8 Liberación de restricciones

Normalmente, los tres grados de libertad traslacionales y los tres rotacionales, en cada extremo del elemento *frame* son continuos con los de la junta y, por lo tanto, con los de los otros elementos conectados a esa junta. Sin embargo, es posible liberar (desconectar) uno o más de los grados de libertad del elemento de la junta, donde se conoce que la fuerza o el momento en el elemento es cero. Las liberaciones siempre se especifican en el sistema de coordenadas local del elemento y no afectan a ningún otro elemento conectado a la junta.

En el ejemplo que se presenta en la figura, el elemento diagonal tiene una conexión rígida en el extremo I, y una conexión articulada en el extremo J. Los otros dos elementos conectados a la junta son continuos. Por lo tanto, para modelar la condición articulada, la rotación R3 del extremo J del elemento diagonal debe ser liberada. Esto asegura que el momento sea cero en la articulación.

Figura 28 – Liberación de restricciones



Fuente: COMPUTERS AND STRUCTURES (2021).

Se puede especificar cualquier combinación de liberaciones del extremo para un elemento *frame*, siempre y cuando el elemento permanezca estable. Esto garantiza que todas las cargas aplicadas al elemento se transfieran al resto de la estructura. Los siguientes conjuntos de liberaciones del extremo son inestables: liberar U1 en ambos extremos, liberar U2 en ambos extremos, liberar U3 en ambos extremos, liberar R2 en ambos extremos y U3 en cualquier extremo, liberar R3 en ambos extremos y U2 en cualquier extremo.

Las liberaciones del extremo siempre se aplican en las caras de los apoyos, al final de la longitud libre del elemento. La presencia de una liberación de Momento o Corte causará que los desplazamientos del extremo sean rígidos en el plano de flexión correspondiente en ese extremo del elemento.

5.8 Propiedades no lineales

Dos tipos de propiedades no lineales están disponibles para el elemento *frame/cable*, límites de tracción/compresión y articulaciones plásticas. Cuando las propiedades no lineales están presentes en el elemento, sólo afectan a los análisis no lineales.

Los análisis lineales se inician desde una condición cero (estado no esforzado) y se comportan como si las propiedades no lineales no estuvieran presentes. Los análisis lineales que usan la rigidez de un análisis no lineal previo usan la rigidez de la propiedad no lineal como si ella existiera al final del caso no lineal.

5.8.1 Límites de tracción/compresión

Se puede especificar una máxima tracción y/o una máxima compresión que un elemento *frame/cable* puede tomar. En los casos más comunes, se puede definir un *cable* sin compresión o un arriostramiento especificando el límite de compresión en cero.

Si se especifica un límite de tracción, éste debe ser un número positivo o cero. Si se especifica un límite de compresión, este debe ser un valor cero o negativo. Si se especifican ambos límites en cero, el elemento no soportará carga axial.

Los límites de tracción/compresión son elásticos. Cualquier extensión axial más allá del límite de tracción y acortamiento axial más allá del límite de compresión ocurrirán con rigidez axial cero. Estas deformaciones se recuperan elásticamente a la rigidez cero. Los comportamientos de flexión, corte y torsional no se ven afectados por la no linealidad axial.

5.8.2 Articulaciones plásticas

Se pueden insertar articulaciones plásticas en un número ilimitado de ubicaciones en la longitud libre del elemento. Posteriormente se explicará detalladamente el uso de las articulaciones plásticas.

5.9 Masas

En un análisis dinámico, la masa de la estructura se usa para calcular las fuerzas inerciales. La masa aportada por el elemento *frame* se concentra en las juntas *i* y *j*. No se consideran efectos inerciales dentro del elemento. La masa total del elemento es igual a la integral a lo largo de la longitud de la densidad de masa, m , multiplicada por el área de su sección transversal, a .

Para los elementos no prismáticos la masa varía linealmente sobre cada segmento no prismático del elemento, y es constante en los extremos desplazados.

La masa total se distribuye entre las dos juntas, de la misma manera que una carga distribuida generará reacciones en los apoyos de una viga simplemente apoyada. Los efectos de las liberaciones se ignoran cuando se reparte la masa. La masa total se aplica en cada uno de los tres grados de libertad traslacional, UX , UY y UZ .

5.10 Cargas

5.10.1 Carga por peso propio

La carga por peso propio activa el peso propio de todos los elementos en el modelo. Para un elemento *frame*, el peso propio es una carga distribuida sobre la longitud del elemento. La magnitud del peso propio es igual al peso unitario, w , multiplicado por el área de la sección transversal, a , más el peso adicional por unidad de longitud, wpl .

Para los elementos no prismáticos, el peso propio varía linealmente sobre el segmento no prismático del elemento, y es constante dentro de los desplazamientos del apoyo. El peso propio siempre actúa “hacia abajo”, en la dirección $-Z$. Se puede escalar el peso propio por un factor de escala que aplica igualmente a todos los elementos de la estructura.

5.10.2 Cargas de gravedad

La carga de gravedad puede aplicarse a cada elemento *frame* para activar el peso propio del elemento. Usando la carga de gravedad, el peso propio se puede escalar y aplicar en cualquier dirección. Se pueden asignar diferentes direcciones y factores de escala a cada elemento. Si todos los elementos van a cargarse en la dirección $-Z$ es más conveniente usar la carga de peso propio.

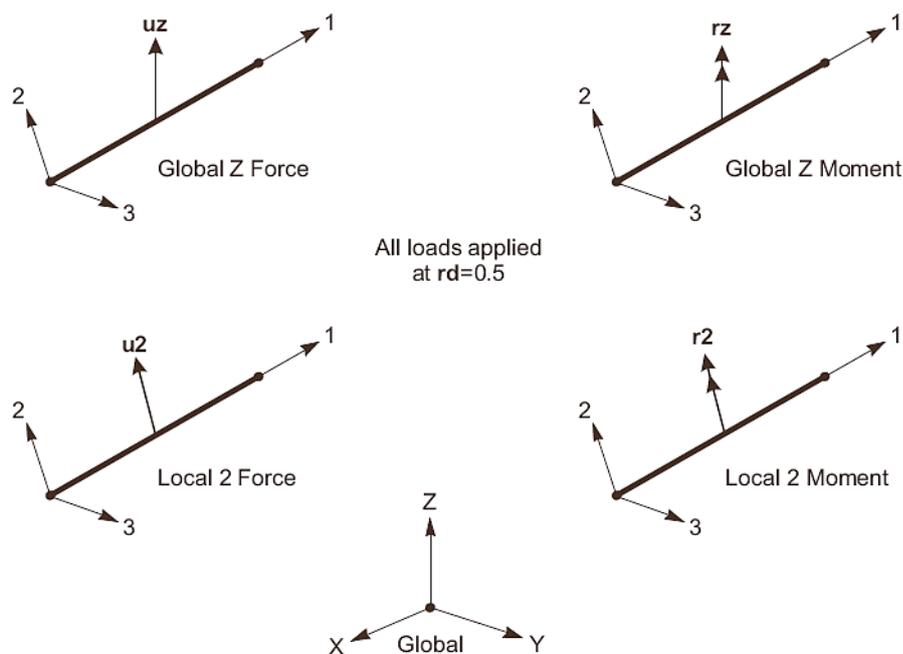
5.10.3 Cargas concentradas en los tramos

Las cargas concentradas en los tramos se usan para aplicar fuerzas y momentos concentrados en ubicaciones arbitrarias de los elementos *frame*. La dirección de la carga puede especificarse en el sistema de coordenadas global o local del elemento. La ubicación de la carga puede especificarse de dos maneras:

- Especificando una distancia relativa, rd , medida desde la junta i . La distancia relativa es una fracción de la longitud del elemento. ($0 \leq rd \leq 1$).
- Especificando una distancia absoluta, d , medida desde la junta i . Esta debe satisfacer $0 \leq d \leq L$.

Se puede aplicar un número ilimitado de cargas concentradas a cada elemento. Las cargas dadas en el sistema de coordenadas global se transforman en el sistema de coordenadas local del elemento.

Figura 29 – Cargas concentradas en tramos



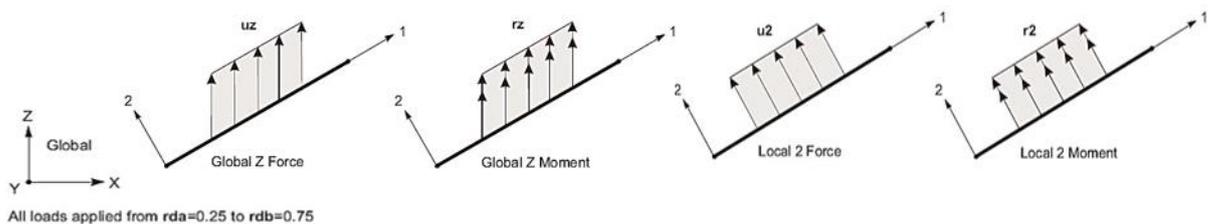
Fuente: COMPUTERS AND STRUCTURES (2021).

5.10.4 Cargas distribuidas en los tramos

Las cargas distribuidas en los tramos se usan para aplicar fuerzas y momentos distribuidos en los elementos *frame*. La intensidad de la carga puede ser uniforme o trapezoidal. La dirección de la carga puede especificarse en el sistema de coordenadas global o local del elemento.

Las cargas pueden aplicarse en longitudes totales o parciales del elemento. Se pueden aplicar múltiples cargas a un elemento. Las longitudes de las cargas pueden solaparse, en cuyo caso las cargas aplicadas son aditivas.

Figura 30 – Cargas distribuidas en los tramos



Fuente: COMPUTERS AND STRUCTURES (2021).

La longitud cargada se puede especificar de alguna de las siguientes maneras:

- Especificando dos distancias relativas, rda y rdb , medidas desde la junta i . Deben satisfacer que $0 \leq rda < rdb \leq 1$. La distancia relativa es una fracción de la longitud del elemento.
- Especificando dos distancias absolutas, da y db , medidas desde la junta i . Ellas deben satisfacer $0 \leq da < db \leq L$, donde L es la longitud del elemento.
- Sin especificar distancias, lo que significa la longitud total del elemento.

La intensidad de la carga es una fuerza o un momento por unidad de longitud. Por cada componente de fuerza o momento aplicado, se debe dar un único valor de carga, si ésta se distribuye uniformemente. Se necesitan dos valores de carga si la intensidad de la carga varía linealmente sobre su rango de aplicación (trapezoidal).

5.10.5 Cargas proyectadas

Una carga distribuida de viento produce una intensidad de carga (fuerza por unidad de longitud) que es proporcional al seno del ángulo entre el elemento y la dirección de la carga. Es equivalente a usar una intensidad de carga fija que se mide por unidad de longitud proyectada del elemento. La intensidad se basa en la velocidad del viento; la longitud proyectada del elemento se mide en un plano perpendicular a la dirección de la carga.

5.10.6 Cargas por temperatura

La carga por temperatura crea deformaciones térmicas en el elemento *frame*. Esta deformación se genera por el producto del coeficiente de expansión térmica del material y el cambio de temperatura del elemento. Ese cambio de temperatura se mide desde la temperatura referencia del elemento hasta la temperatura de carga del elemento.

Se pueden especificar tres campos de temperatura:

- Temperatura, T , constante sobre la sección transversal produciendo deformaciones axiales.
- Gradiente de temperatura, T_2 , que es lineal en la dirección local 2 y produce deformaciones por flexión en el plano 1–2.
- Gradiente de temperatura, T_3 , que es lineal en la dirección local 3 y produce deformaciones por flexión en el plano 1–3.

Los gradientes de temperatura se especifican como el cambio de temperatura por unidad de longitud. Los gradientes de temperatura son positivos si la temperatura se incrementa (linealmente) en la dirección positiva del eje local del elemento. Los gradientes de temperatura son cero en los ejes neutros; por lo tanto, no se induce deformación axial. Cada uno de los tres campos de temperatura pueden ser constantes en todo el elemento o interpolados de valores dados en las juntas.

5.11 Resultados: fuerzas internas

Las fuerzas internas en el elemento *frame* son las fuerzas y momentos que resultan de integrar los esfuerzos sobre la sección transversal del elemento. Estas fuerzas internas son:

P, la fuerza axial

V2, la fuerza cortante en el plano 1–2

V3, la fuerza cortante en el plano 1–3

T, el momento torsor (torque axial)

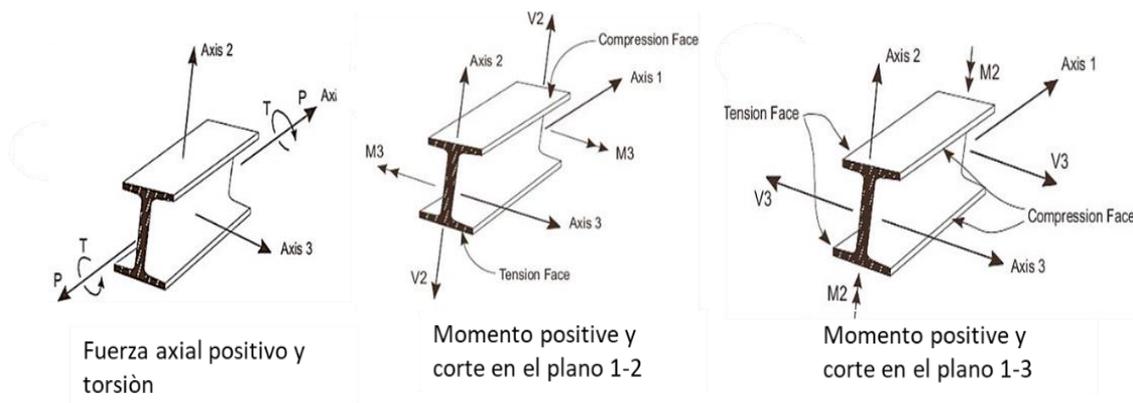
M2, el momento flector respecto al eje 2 (plano 1–3)

M3, el momento flector respecto al eje 3 (plano 1–2)

Estas fuerzas y momentos internos están presentes en cada sección transversal a lo largo del elemento. La convención de signos se ilustra en la figura.

Las fuerzas internas y el momento torsor positivos que actúan sobre la cara 1 positiva, están orientados en la dirección positiva de los ejes de coordenadas locales del elemento. Las fuerzas internas y el momento torsor positivos que actúan sobre una cara negativa se orientan en la dirección negativa de los ejes de coordenadas locales del elemento. La cara 1 positiva es aquella cuya perpendicular hacia afuera apunta en la dirección positiva del eje local 1.

Figura 31 – Convención de signos para fuerza axial, torsión, momentos y cortes



Fuente: COMPUTERS AND STRUCTURES (2021).

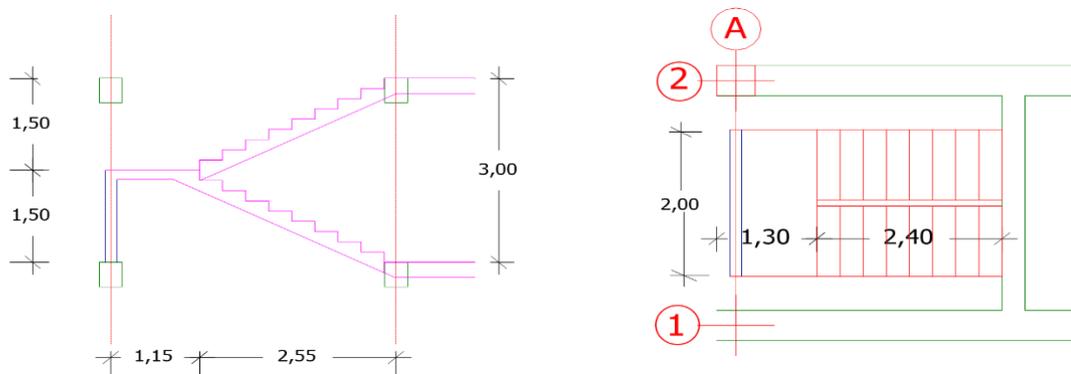
Momentos flectores positivos causan compresión en las caras 2 y 3 positivas y tracción en las caras 2 y 3 negativas. Las caras 2 y 3 positivas son aquellas caras en las direcciones locales 2 y 3 positivas, respectivamente, desde el eje neutro. Las fuerzas y momentos internos se calculan en puntos igualmente espaciados a lo largo de la longitud del elemento.

6 EJEMPLO PRÁCTICO

6.1 Ejemplo 1: Diseño estructural de una escalera

Huella = 0.30 m, contrahuella = 0.1667 m, $\alpha = 29.05^\circ$

Figura 32 – Vista en planta y corte de una escalera



Fuente: PROPIA (2021).

Predimensionado: Losa maciza en 1 dirección. Altura mínima.

$$h_{min} = \frac{L}{24} = \frac{370cm}{24} = 15.41cm \text{ usar } h = 15.5cm \quad (25)$$

Análisis de carga:

a. Carga permanente

Descanso:

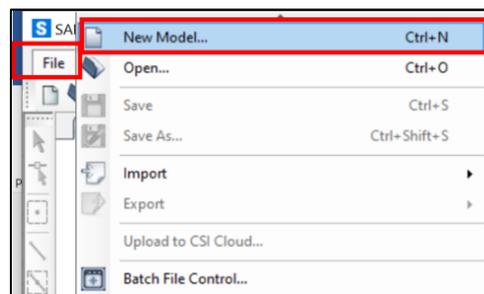
Losa = $0.155\text{m} \times 2400 \text{ kg/m}^3 =$	372 kg/ m^2
Pavimento =	100 kg/ m^2
Friso = $0.01\text{m} \times 2000 \text{ kg/m}^3 =$	20 kg/ m^2
Total =	492 kg/m^2

Rampas:

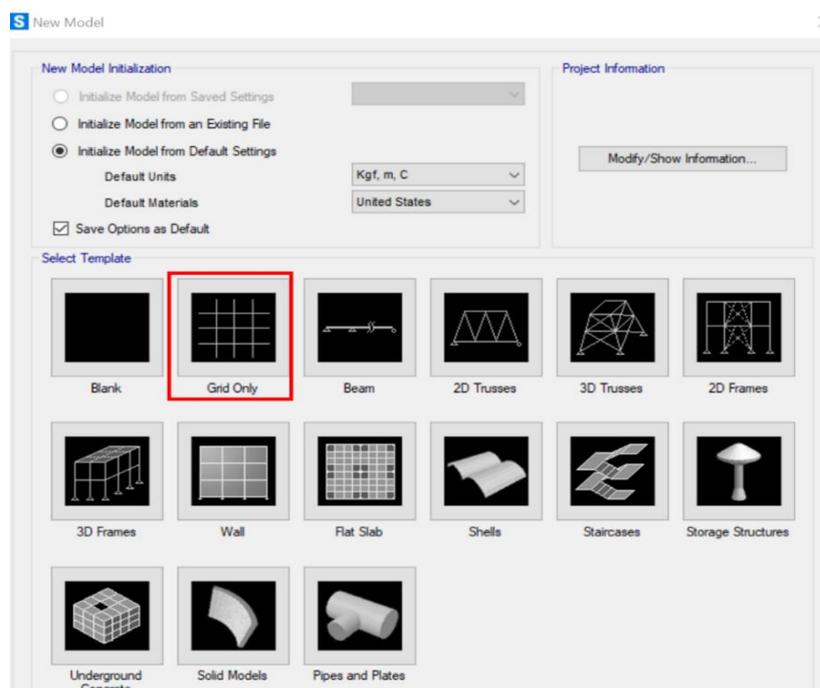
Losa = $0.155\text{m} \times 2400 \text{ kg/m}^3 =$	372 kg/ m^2
Pavimento =	100 kg/ m^2
Friso = $0.01\text{m} \times 2000 \text{ kg/m}^3 =$	20 kg/ m^2
Escalón = $0.1667/2\text{m} \times 2400 \text{ kg/m}^3 =$	200 kg/ m^2
Total =	692 kg/ m^2

- b. Carga viva o accidental (Este valor debe ser buscado según la Normativa usada en cada país). Para uso de escaleras = 300 kg/m^2 .

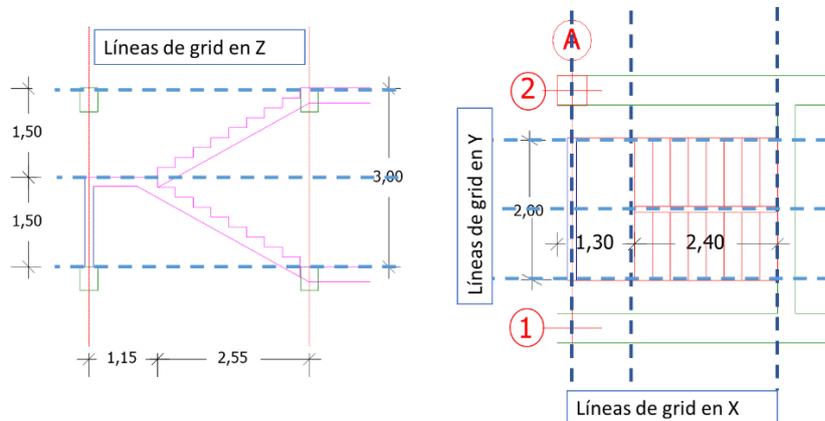
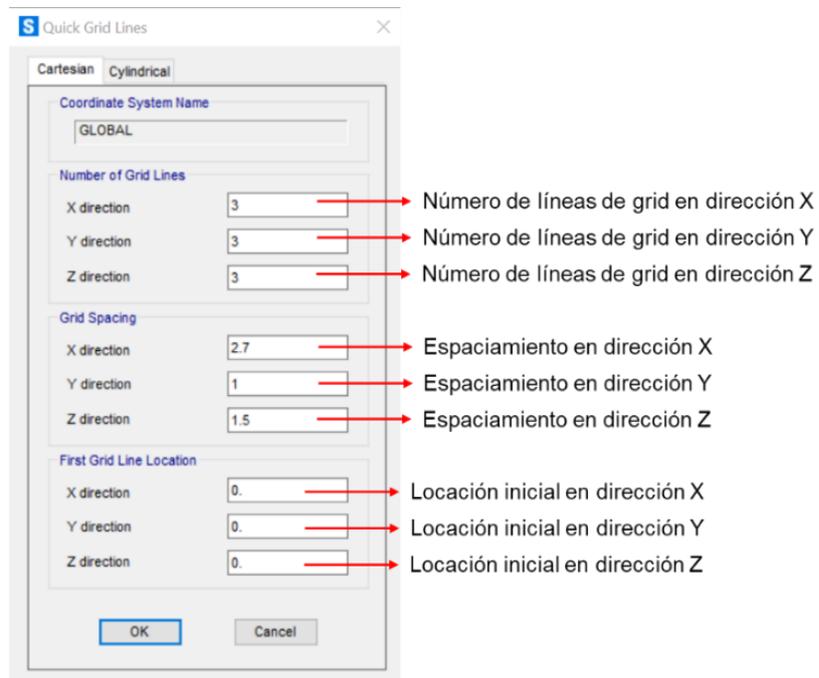
Abra el programa y coloque el sistema de unidades con el cual desea trabajar en la parte inferior derecha de la pantalla. **File – New Model – click:**



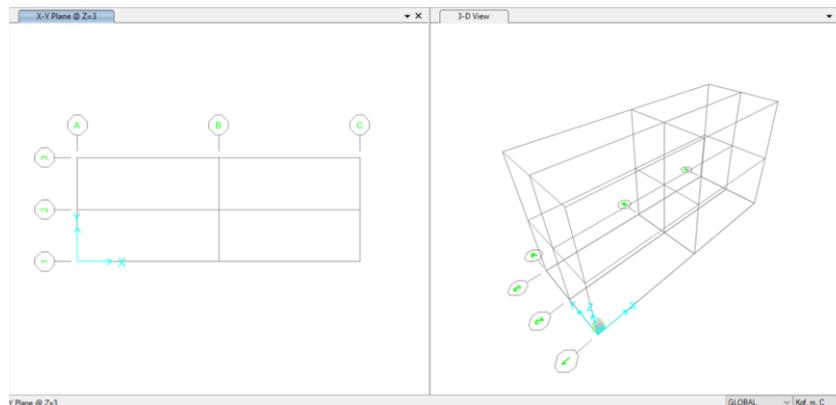
Se abrirá una pantalla donde se puede seleccionar un modelo predeterminado o simplemente trabajar en la pantalla de *grid* para generar el modelo manualmente. El programa permite elegir si se quiere trabajar en 2D o 3D. En este caso vamos a seleccionar: **Grid Only – clic:**



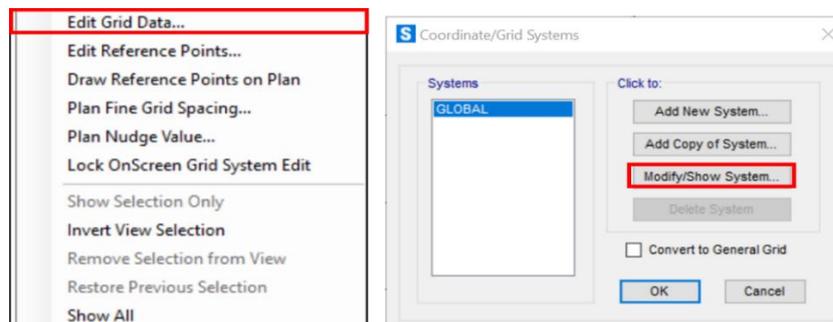
Se deben colocar los valores relativos a las líneas de *grid* que sirven como guía para hacer el dibujo:

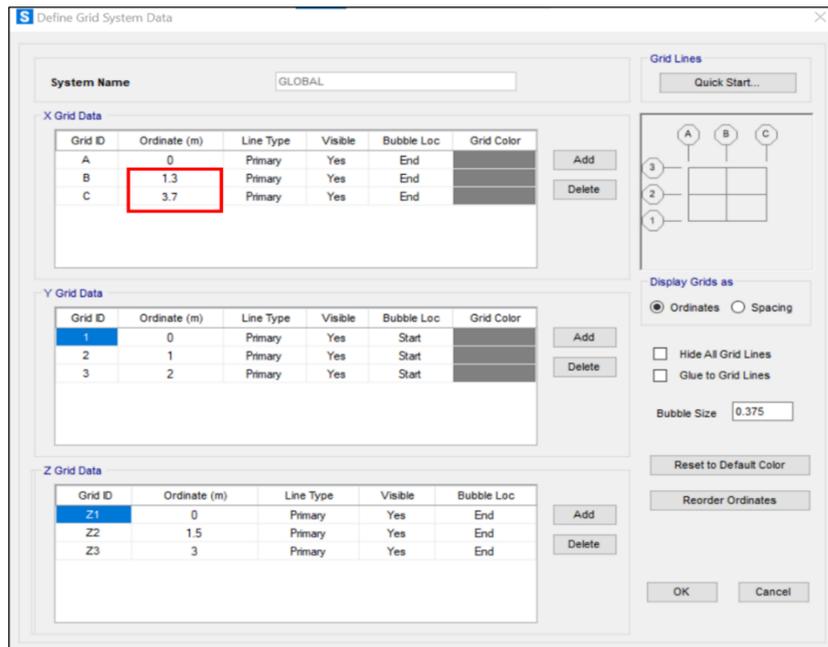


Se debe hacer *click* en *ok* y se obtiene la siguiente pantalla:



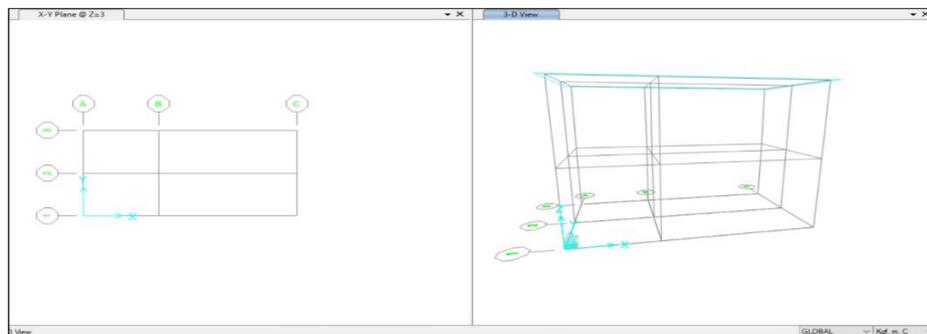
Se debe alterar en sentido X ya que la división de la *grid* no es correcta. Para ello se debe colocar el mouse sobre la pantalla y hacer clic en el botón derecho para que aparezca la ventana, *Edit Grid Data – Modify/Show System*





Una vez colocados los valores deseados se hace *clik en ok – ok*.

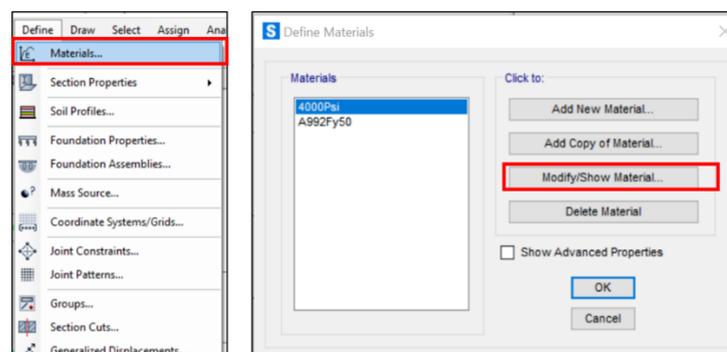
El programa muestra como quedaron los espaciados en cada dirección:



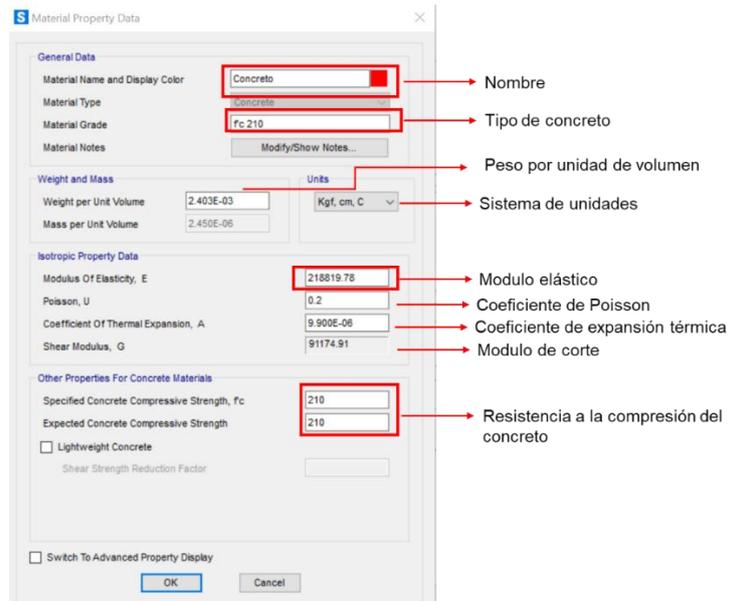
El siguiente paso consiste en definir las propiedades a ser usadas en la escalera:

- concreto: $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$
- acero (cabillas): $Fy = 4200 \text{ kg/cm}^2$
- recubrimiento = 3 cm

Define – Materials – clic – Modify/Show Material – ok:



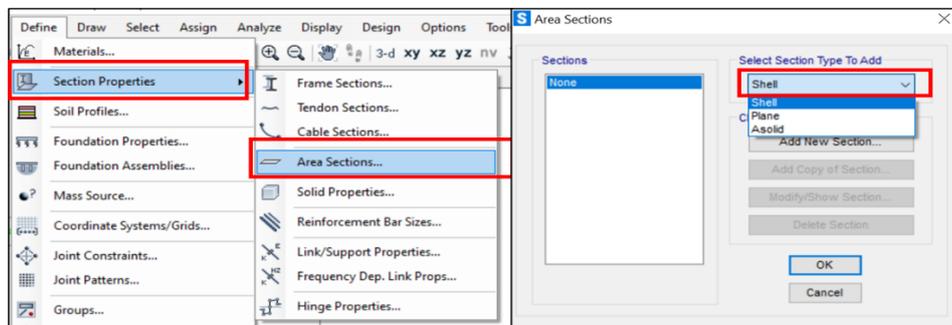
En este caso vamos a modificar la propiedad del concreto que aparece predeterminada, que es un concreto de $f'c = 4000\text{Psi}$, que equivale a $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$. Como el ejemplo nos está dando el valor del concreto a usar se debe modificar ese valor. Para acero no es necesario hacer ninguna modificación, ya que un acero A99Fy50 es equivalente a $Fy = 4200 \text{ kg/cm}^2$:



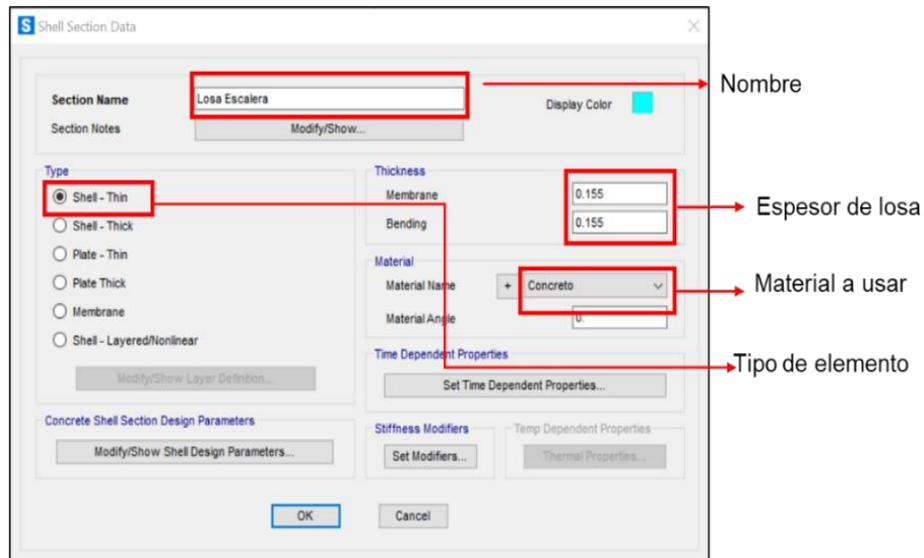
Una vez colocados los valores deseados, *ok – ok*.

Ahora es necesario definir el tipo de área que será usado para modelar la losa maciza.

Define – Section Properties – Area Sections – Shell – Add New Section:

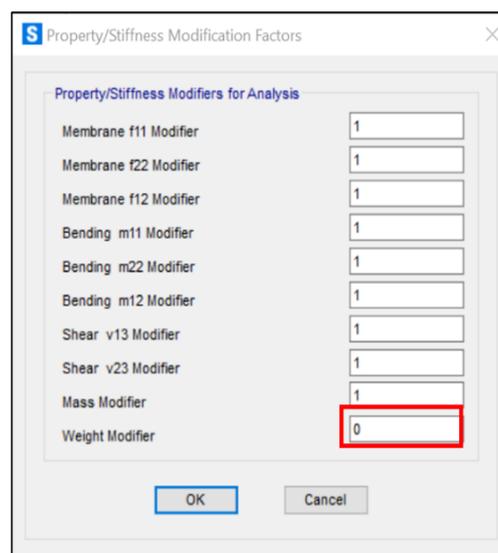


Se define el nombre de la sección, el tipo de elemento de área a ser usado, el tipo de material y el espesor (el espesor fue predimensionado previamente). Seleccione *ok – ok*:



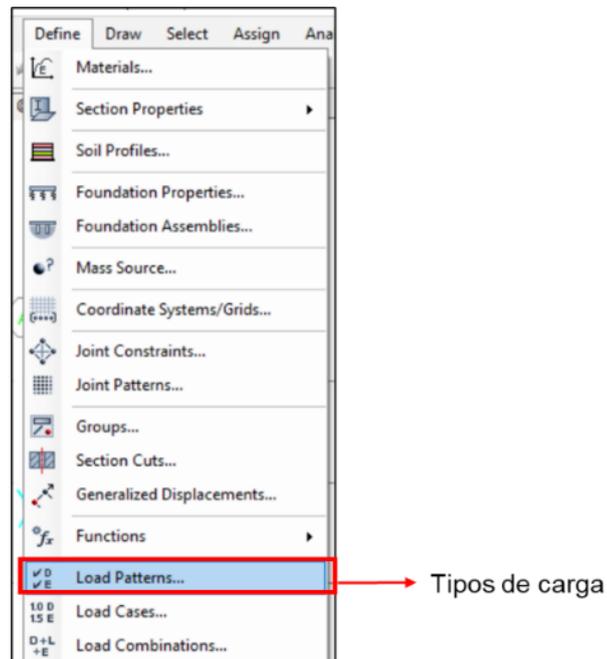
Como el programa toma en cuenta el peso propio del elemento, se debe colocar 0 en el valor de peso debido a que ya incluimos en el análisis de carga el valor del espesor de losa de concreto armado.

Set Modifiers – Weight Modifier – ok:

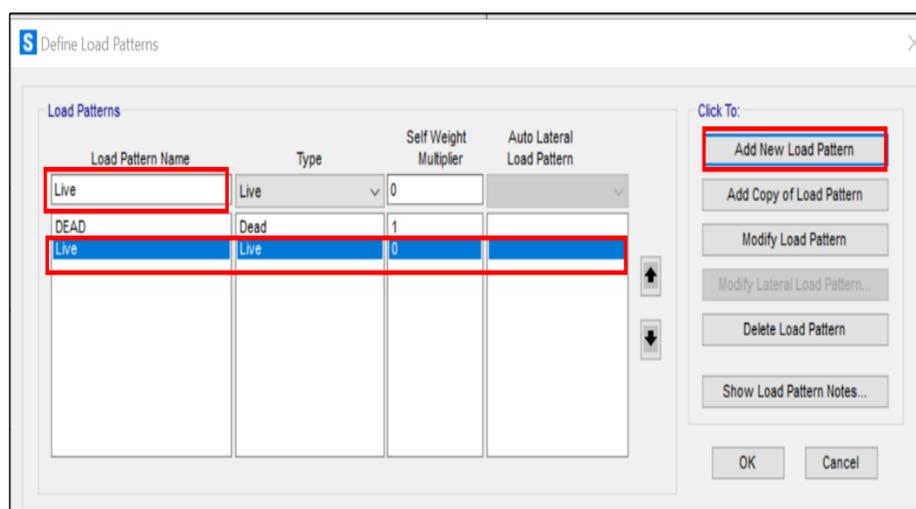


Es necesario definir los tipos de carga a ser usados; de forma predeterminada el programa trae la carga permanente (*dead*), por lo que se debe definir la carga accidental (*live*).

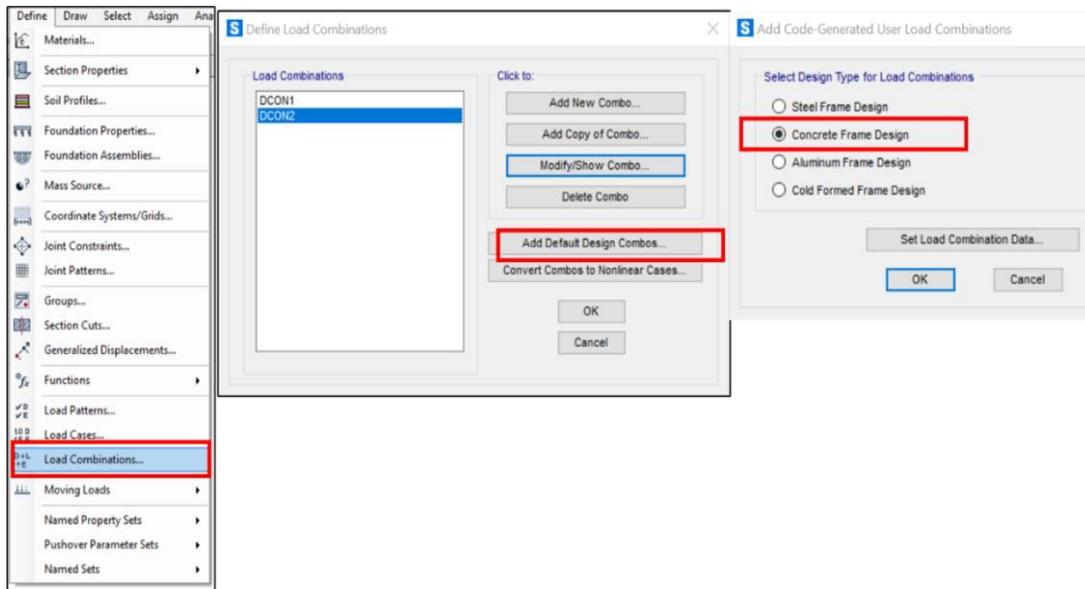
Define – Load Patterns – clic:



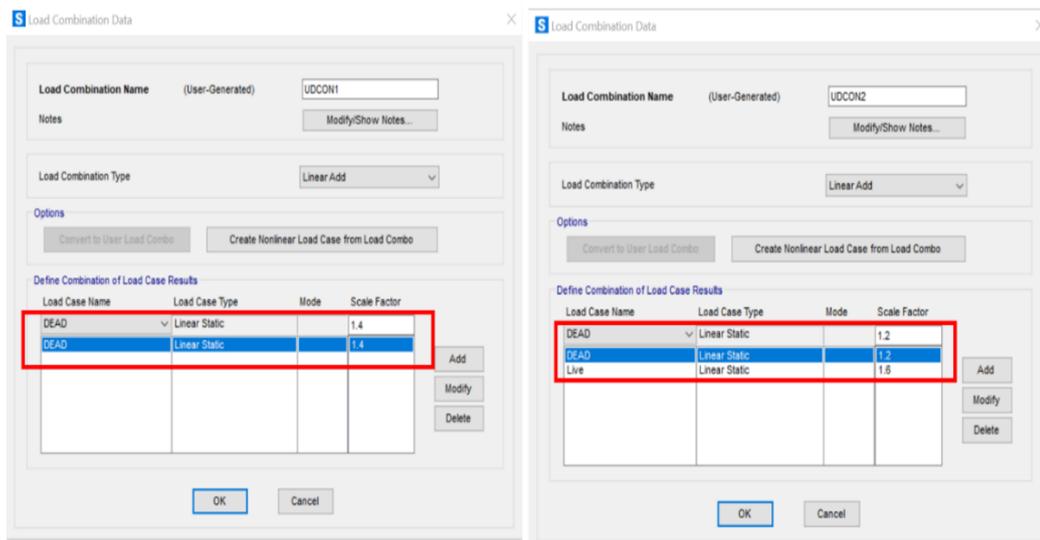
Escriba el nombre de la carga *Live* y seleccione *Type: Live – Add New Load Pattern – ok:*



Seguidamente, se debe añadir la combinación de carga normativa, *Define – Load Combinations – Add Default Design Combos – Concrete Frame Design – ok – ok*:



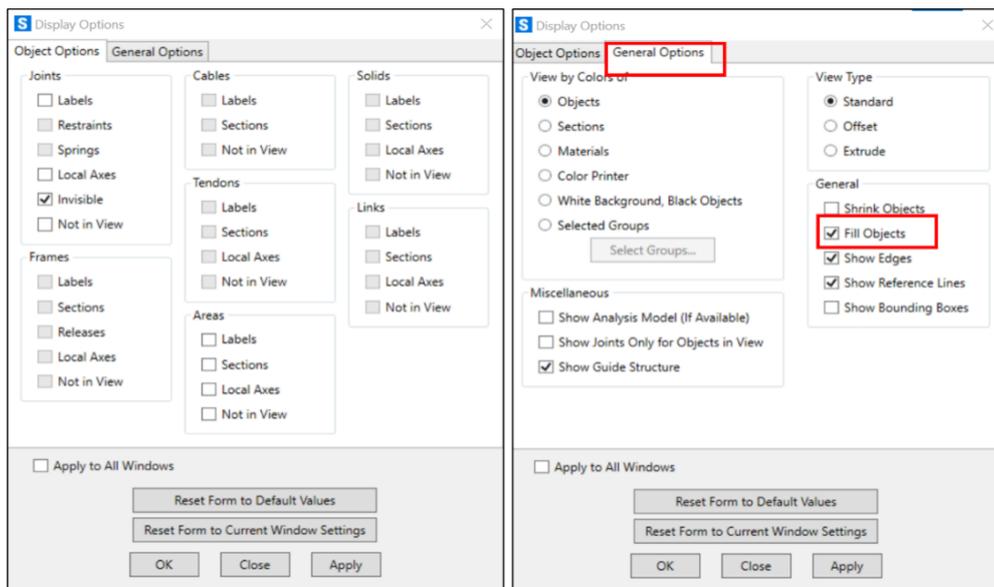
Combinaciones generadas en el programa:



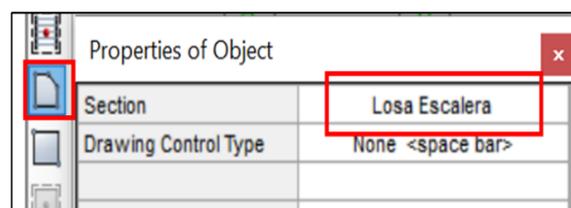
Para tener una mejor vista del dibujo, es necesario seleccionar el icono:



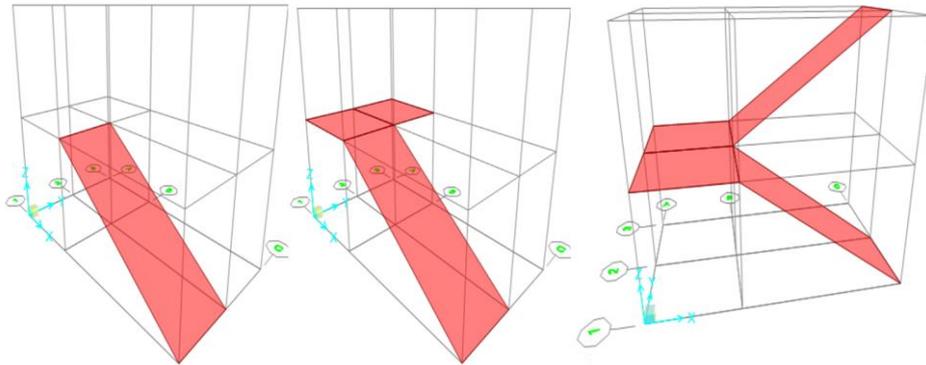
A continuación aparece una ventana, se debe seleccionar **General Options – Fill Objects – ok**:



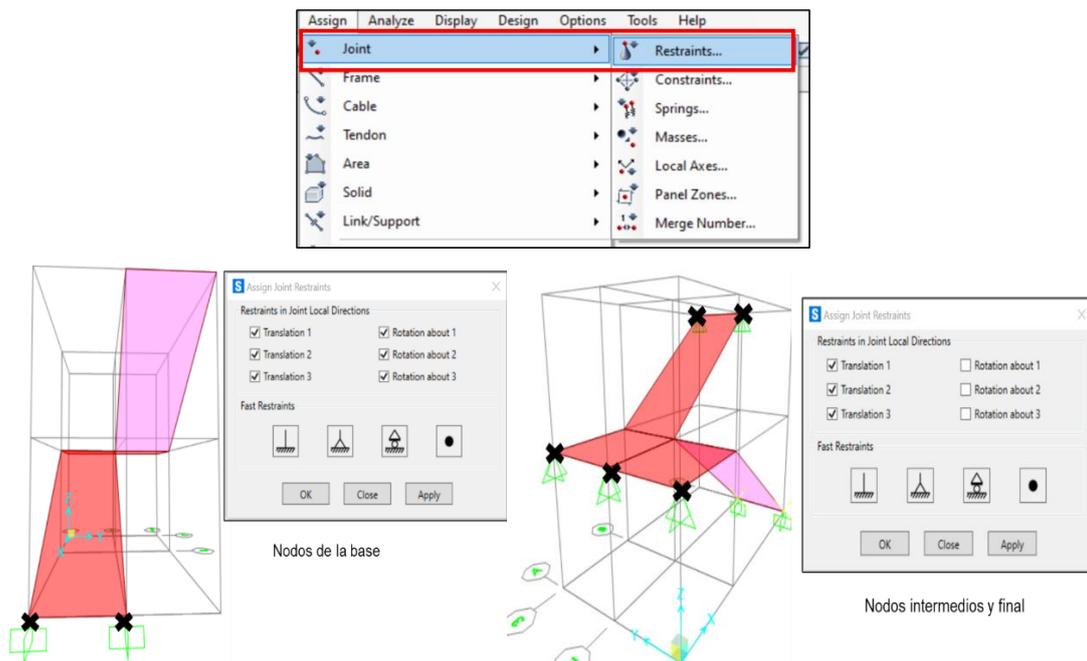
Seleccione **Draw Poly Area** en la parte izquierda de la pantalla, haga clic y aparecerá una nueva pantalla donde está definido el elemento de área creado anteriormente (Losa Escalera). Con esto ya es posible hacer el dibujo sobre la pantalla con ayuda de la *grid*.



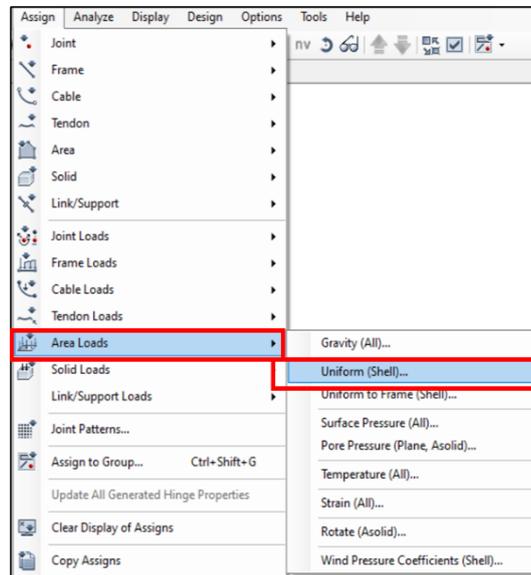
Se deben seleccionar 4 nodos para generar el elemento de área, haciendo **clik** en cada uno de ellos, finalizando con **enter**:



Coloque las condiciones de borde seleccionando cada parte donde los elementos serán apoyados. Vaya a la ventana: **Assign – Join – Restraints**:

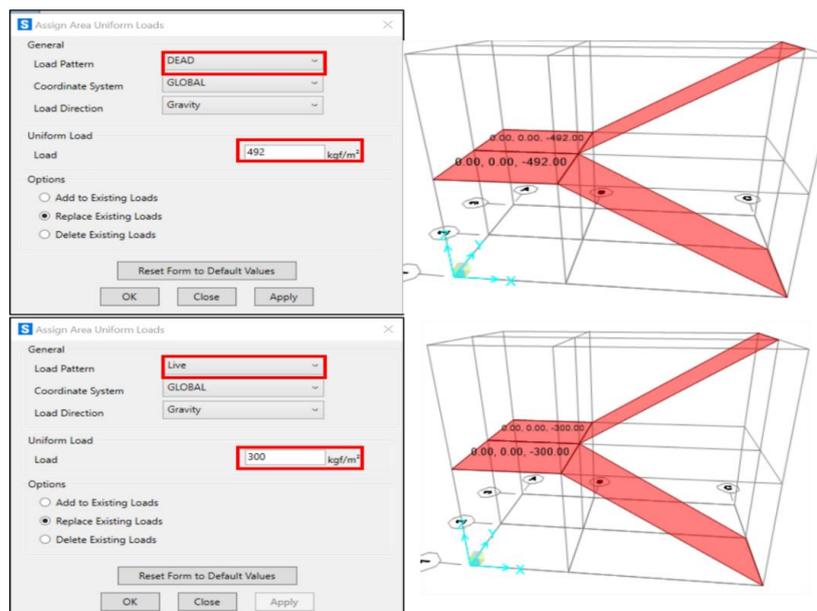


Para la aplicación de la carga, se debe seleccionar cada elemento de área, haciendo clic sobre cada una: **Assign – Area Loads – Uniform (Shell) – clic**:



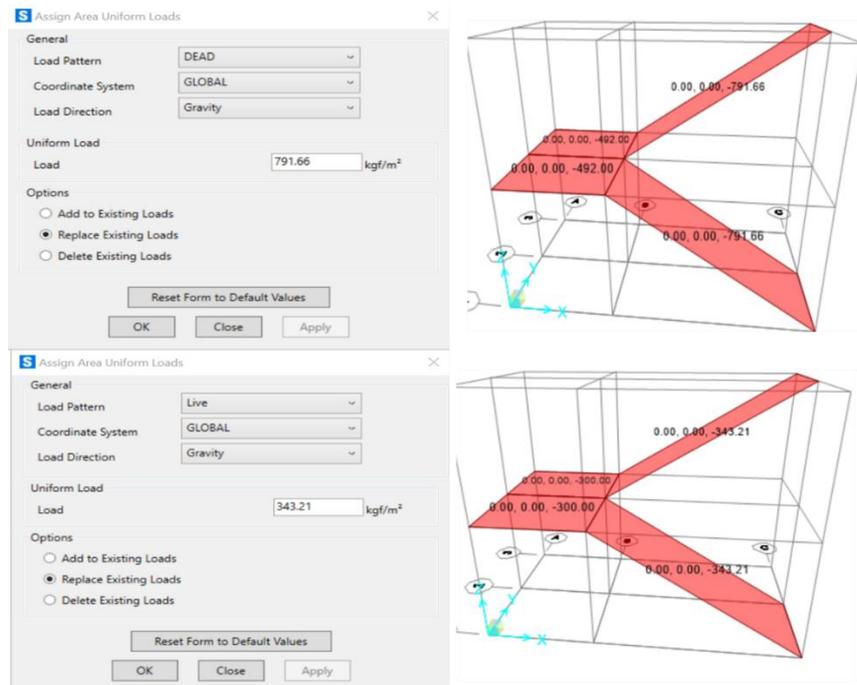
Para el descanso se usarán las siguientes cargas:

- carga permanente = 492 kg/m^2
- carga accidental = 300 kg/m^2

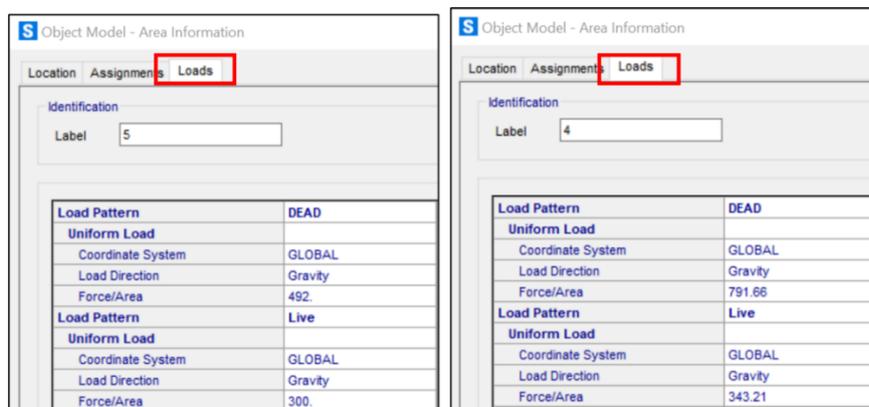


Para la rampa se usarán las siguientes cargas:

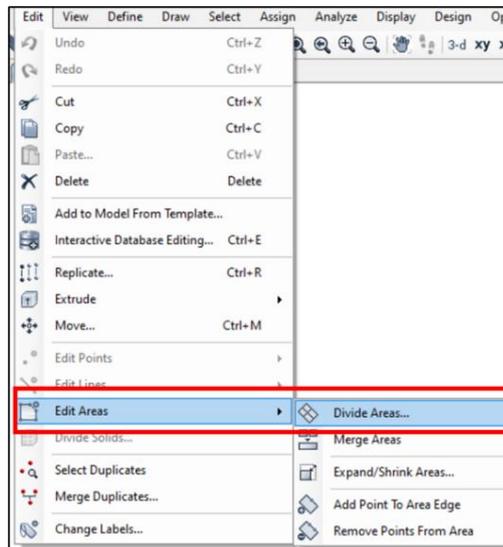
- carga permanente = $692 \text{ kg/m}^2 / \cos(29.06^\circ) = 791.66 \text{ kg/m}^2$
- carga accidental = $300 \text{ kg/m}^2 / \cos(29.06^\circ) = 343.21 \text{ kg/m}^2$



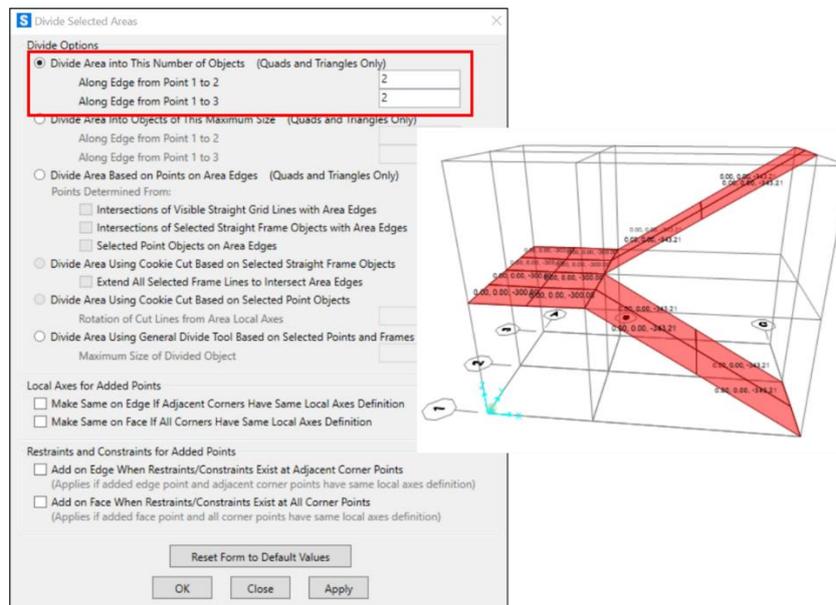
Para comprobar que las cargas se colocaron correctamente, seleccione la losa y haga *click con el botón derecho* sobre ella:



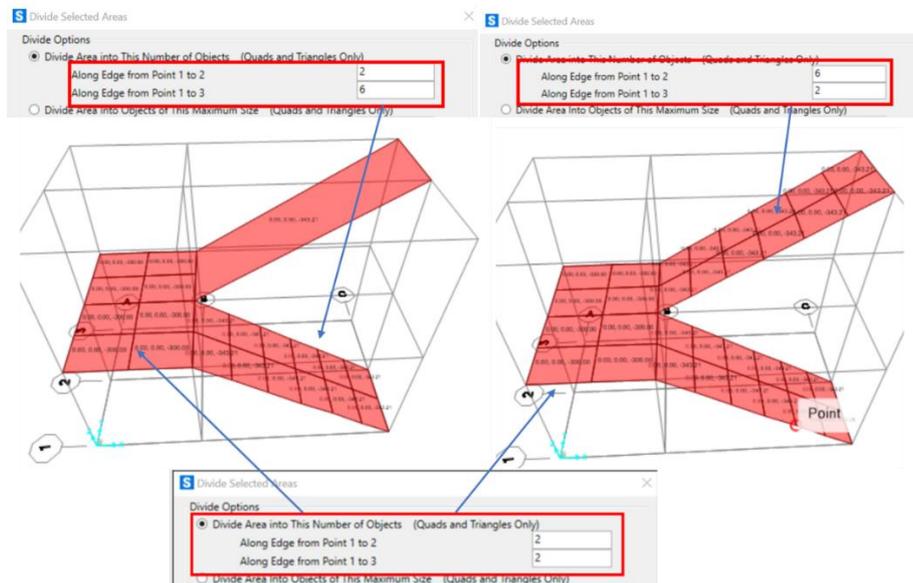
Para dividir la losa en elementos finitos se debe seleccionar la losa completa: *Edit Areas*
 – *Divide Areas*:



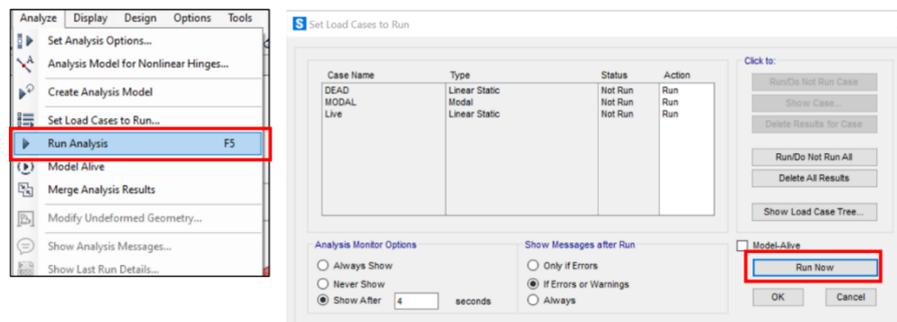
Se puede trabajar con diferentes opciones de división de la malla, en este caso dividiremos cada elemento generado en 2 x 2:



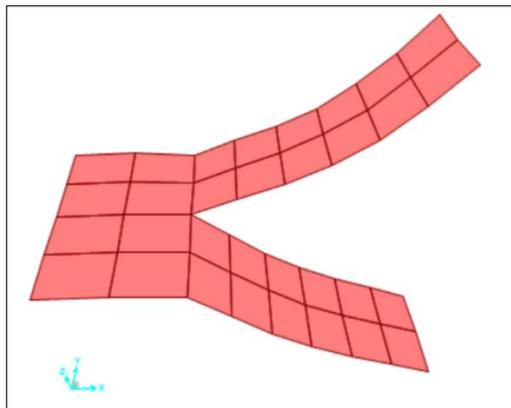
Se pueden generar diferentes tipos de malla de acuerdo a las necesidades del usuario:



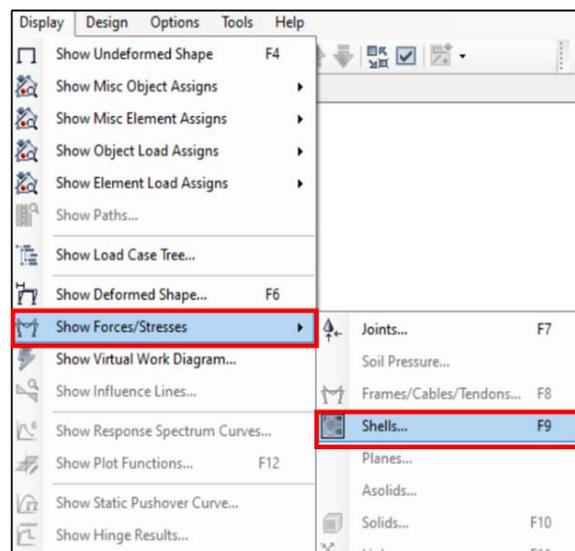
Para general el análisis de la estructura: *Analyze – Run Analysis – clic – Run Now*:



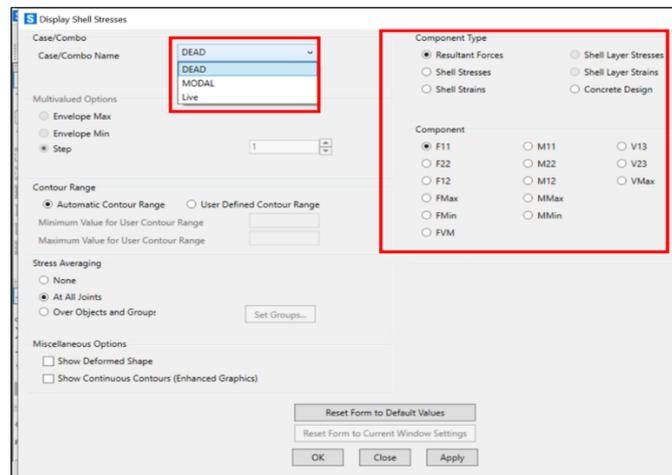
Estructura deformada:



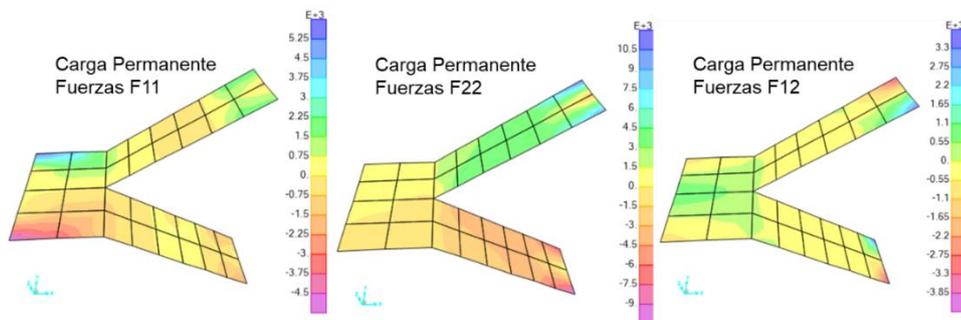
Para verificar otros resultados: **Display – Show Forces/Stresses – Shells – clic:**



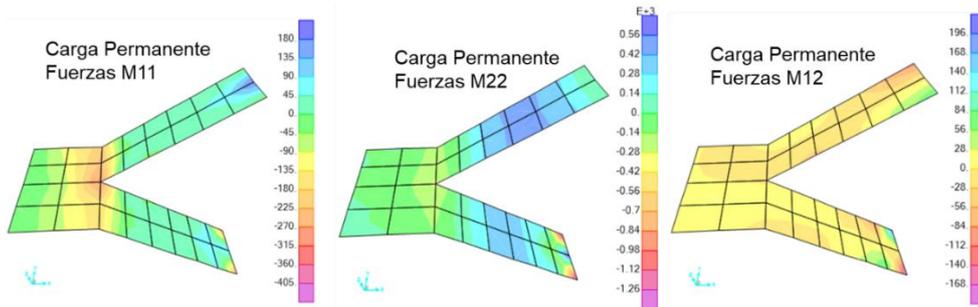
Se pueden ver resultados de fuerzas, esfuerzos, y deformación tanto por carga permanente como por carga accidental:



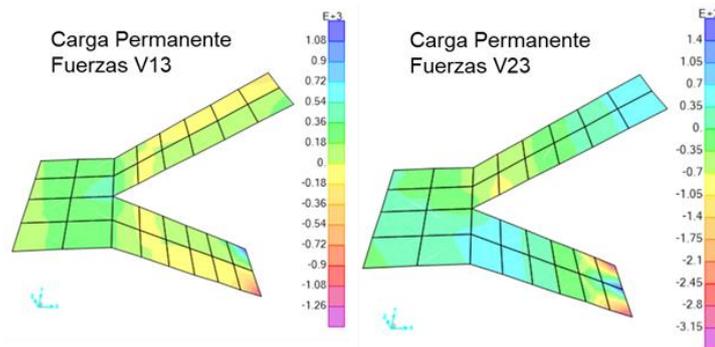
Para las fuerzas bajo carga permanente se tiene (kg):



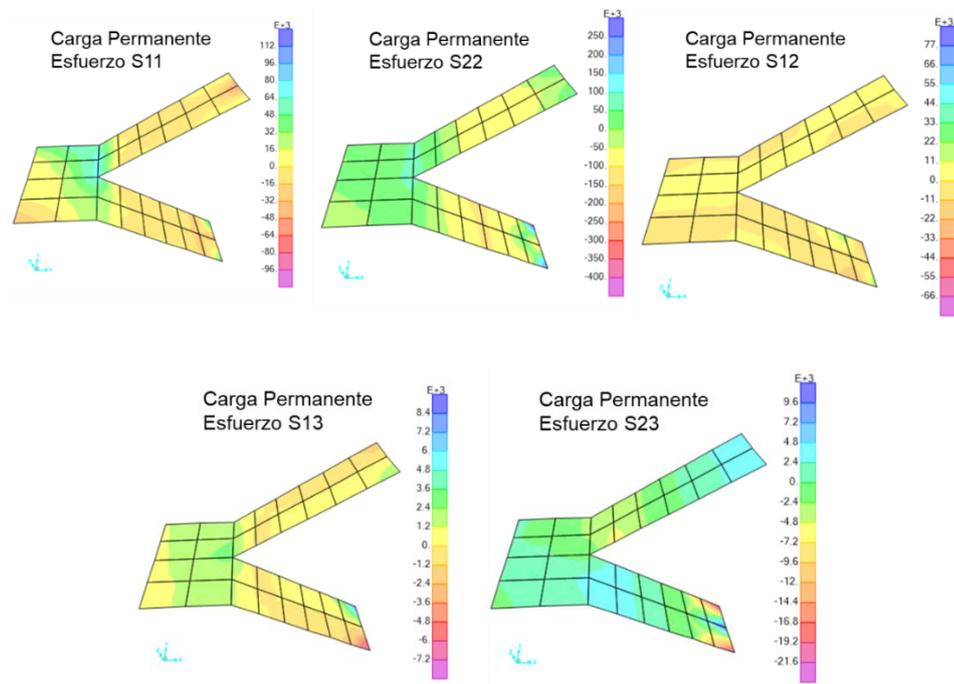
Momentos (kg.m):



Cortantes (kg):



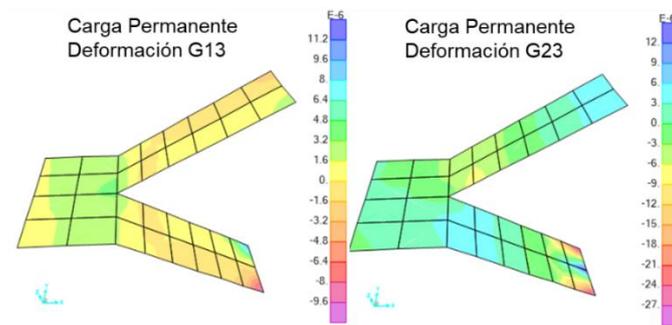
Esfuerzos S kg/m²:



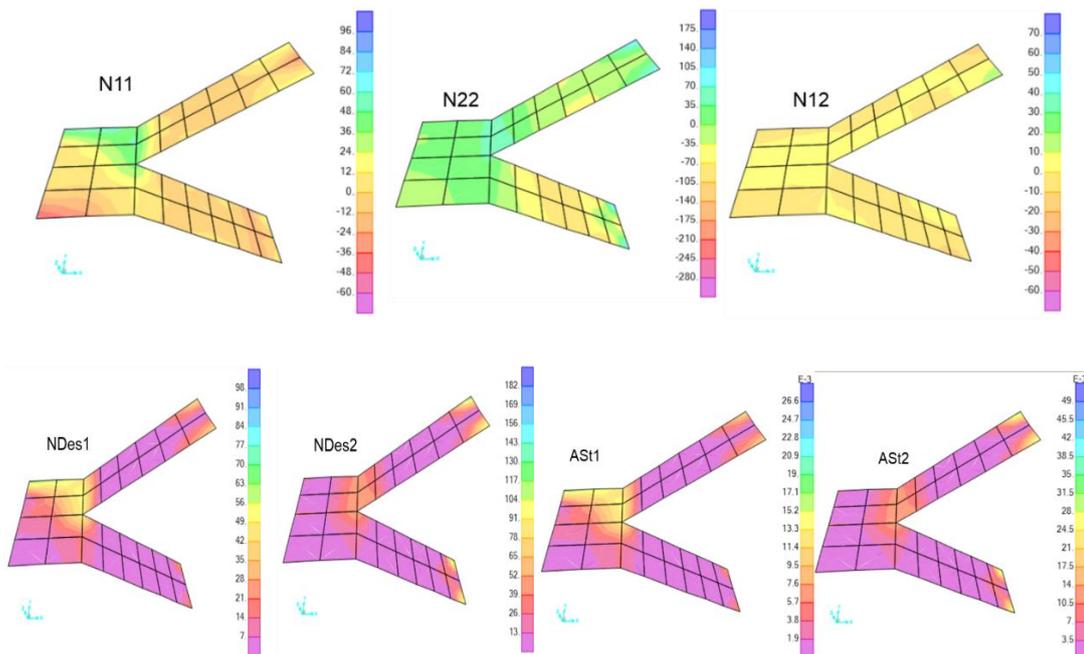
Deformación E (m):



Deformación por corte G (kg/m²):

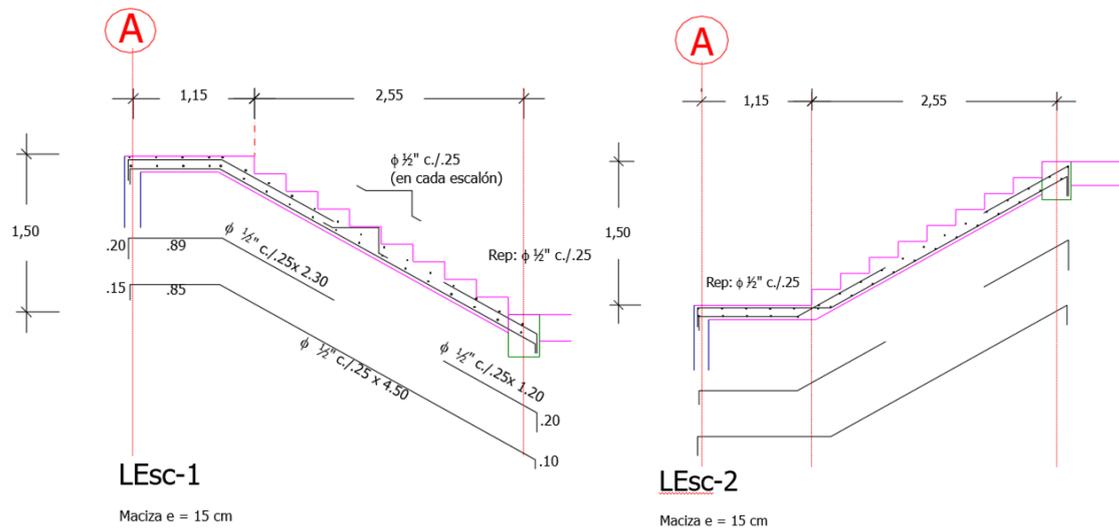


Diseño de los elementos de concreto *Concrete design* bajo la combinación de carga 1.2 carga permanente + 1.6 carga accidental (kg/m²):



Con los resultados obtenidos se puede proponer una armadura de acero para la losa de la escalera:

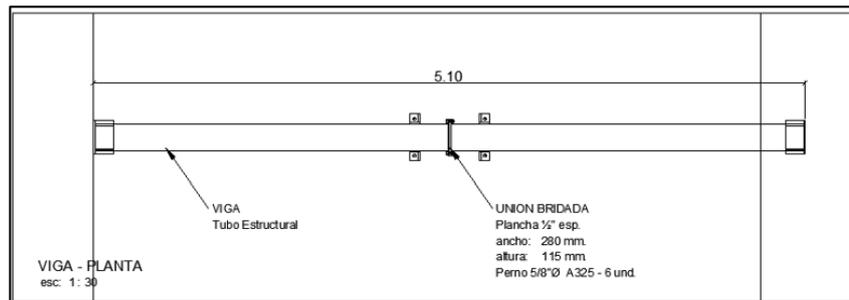
Figura 33 – Armado del acero de refuerzo de la escalera



Fuente: PROPIA (2021).

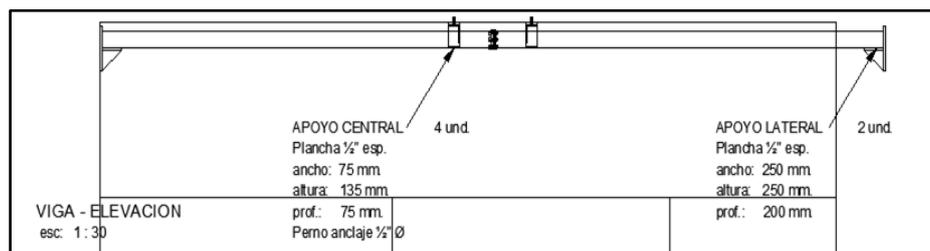
6.2 Ejemplo 2: Diseño estructural de unas vigas. Vida útil nominal de la estructura: 50 años

Figura 34 – Vista en planta de las vigas



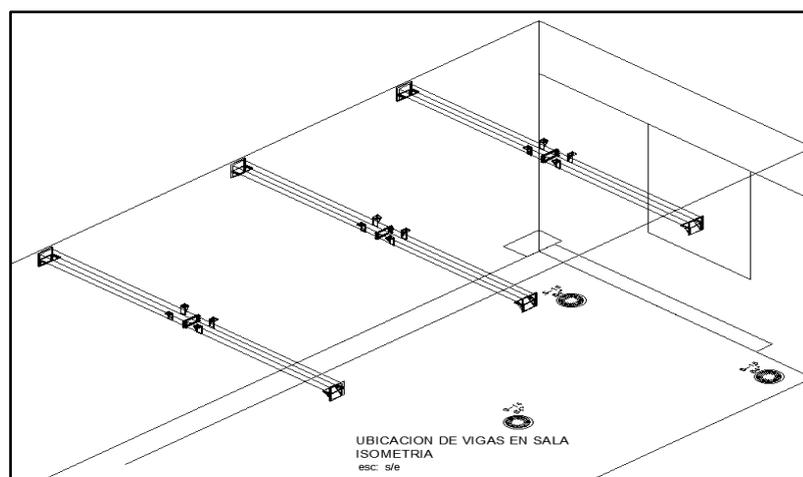
Fuente: PROPIA (2021).

Figura 35 – Vista en corte de las vigas



Fuente: PROPIA (2021).

Figura 36 – Isometría de las vigas

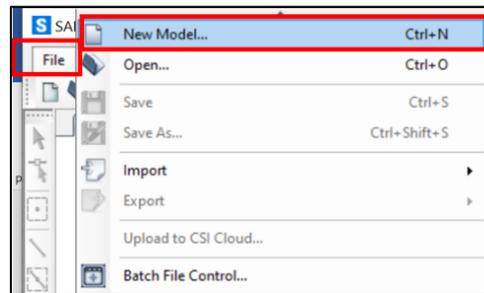


Fuente: PROPIA (2021).

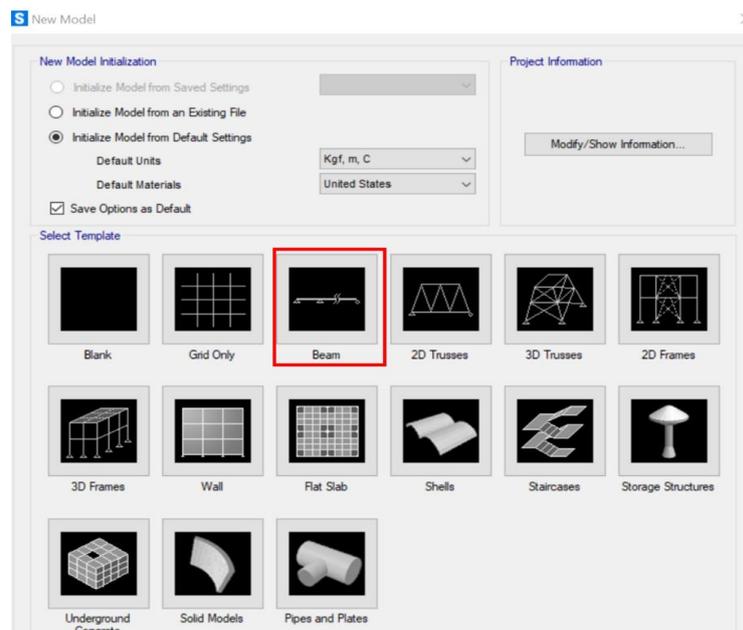
Análisis de carga:

- carga permanente: 50 kg (Puntual)
- carga viva o accidental: 60 kg/m (Distribuida)

Abra el programa y coloque el sistema de unidades con el que desea trabajar en la parte inferior derecha de la pantalla. **File – New Model – clic:**



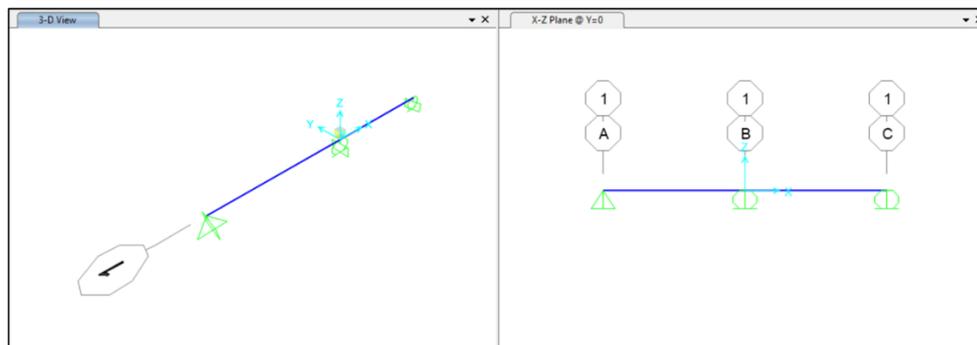
Se abrirá una pantalla donde se puede seleccionar un modelo predeterminado o simplemente trabajar en la pantalla de *grid* para generar el modelo manualmente. El programa permite elegir si se quiere trabajar en 2D o 3D. En este caso vamos a seleccionar: **Beam – clic:**



Se deben colocar los valores relativos a la viga para hacer el dibujo:



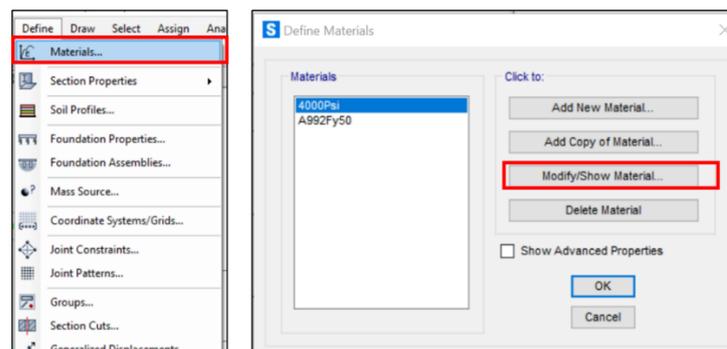
Se debe hacer *clik* en *ok* y se obtiene la siguiente pantalla:



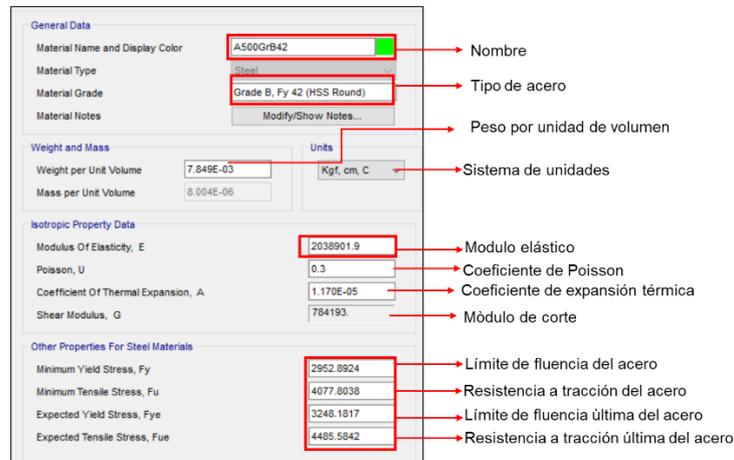
El siguiente paso es definir las propiedades a ser usadas en las vigas:

acero estructural: $F_y = 3600 \text{ kg/cm}^2$

Define – Materials – clic – Modify/ Show Material – ok:

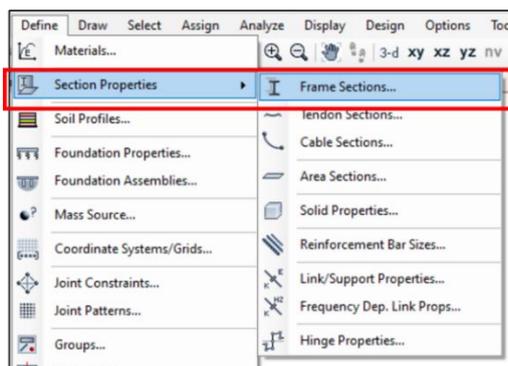


En este caso vamos a colocar las propiedades del tipo de acero que se usará en el diseño de las vigas:

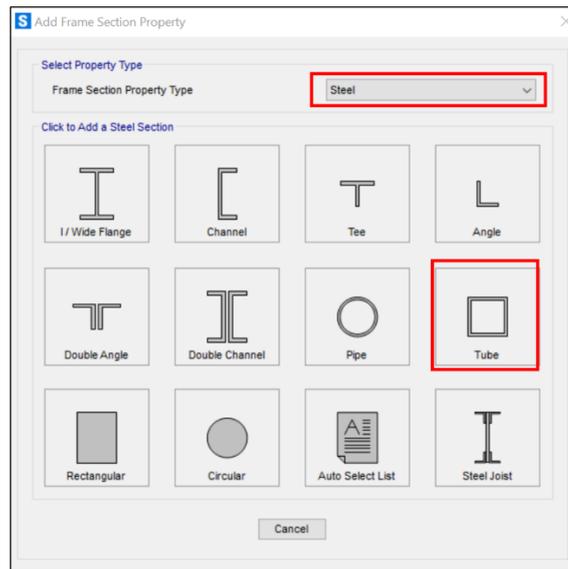


Una vez colocados los valores deseados, **ok – ok**:

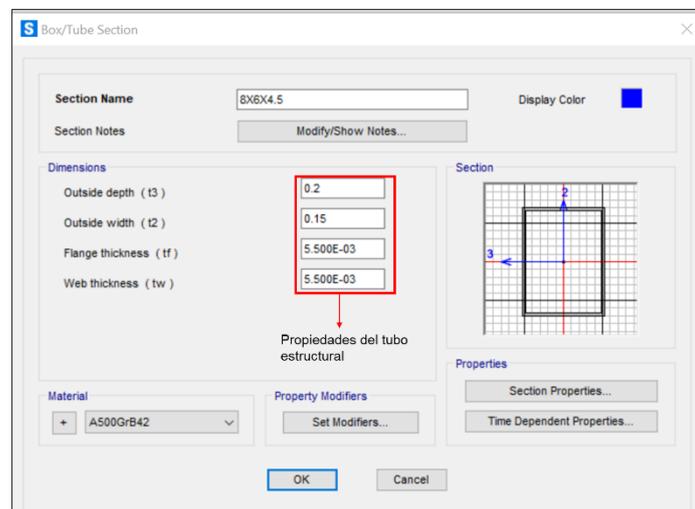
Para definir la sección del tubo de acero a usar, **Define – Frame Section– ok – Add New Property**:



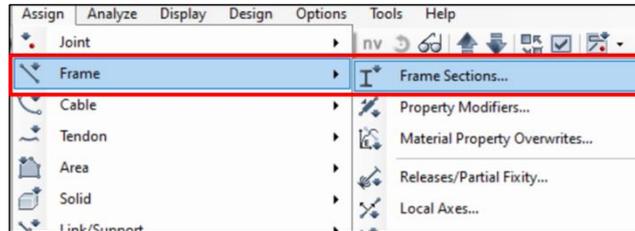
Seleccione *Steel – Tube* –click:



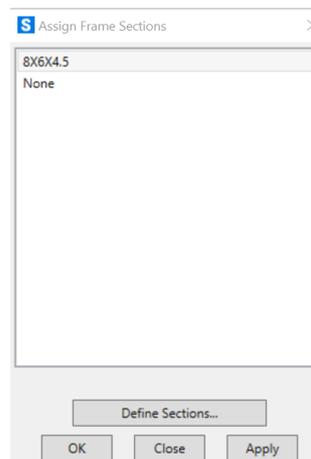
Se deben tener las propiedades de los elementos que serán usados. También se pueden importar estas propiedades:



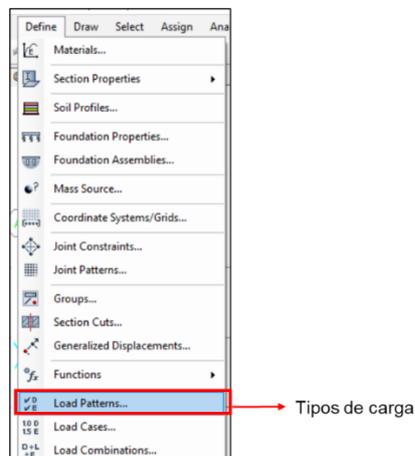
Una vez generada la propiedad, se puede asignar a la viga, **Assign – Frame – Frame Sections – clic**:



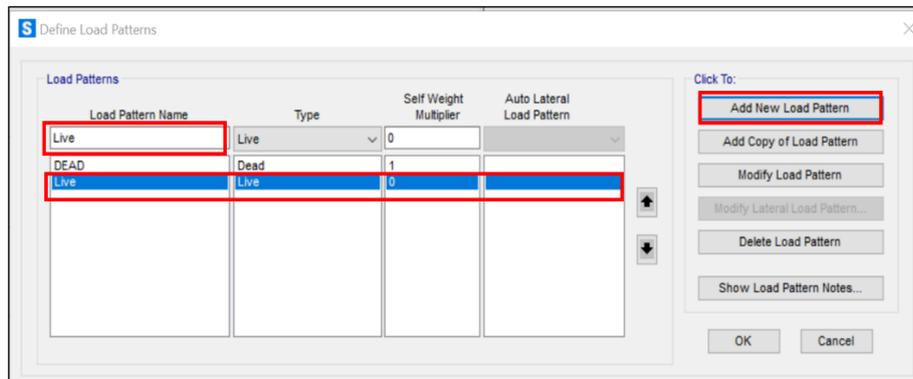
Seleccione el elemento deseado haciendo **clic** y **ok**:



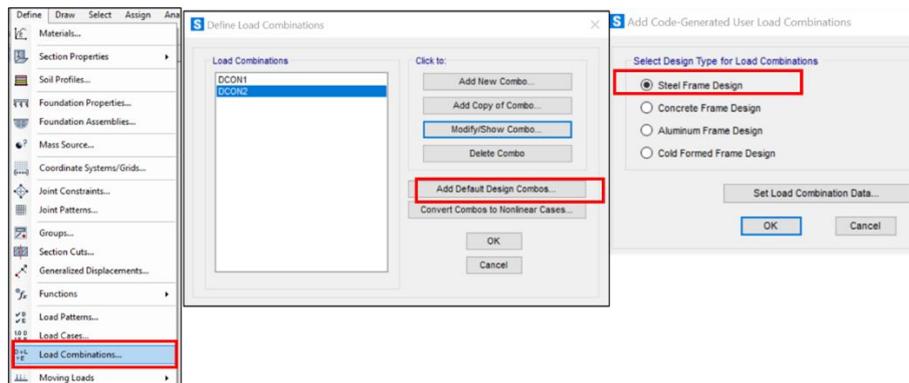
Es necesario definir los tipos de carga a usar; de forma predeterminada el programa trae la carga permanente (*dead*), por lo que se debe definir la carga accidental (*live*): **Define – Load Patterns – clic**:



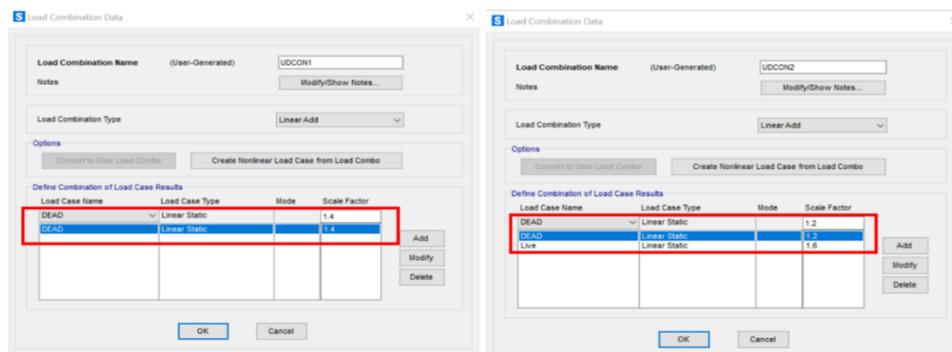
Escriba el nombre de la carga *Live* y seleccione *Type: Live – Add New Load Patterns – ok*:



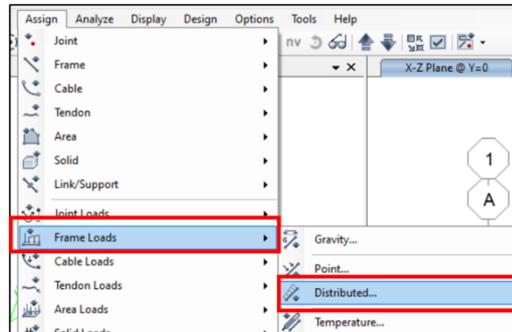
Se debe añadir la combinación de carga, *Define – Load Combinations – Add default Design Combos – Steel Frame Design – ok – ok*:



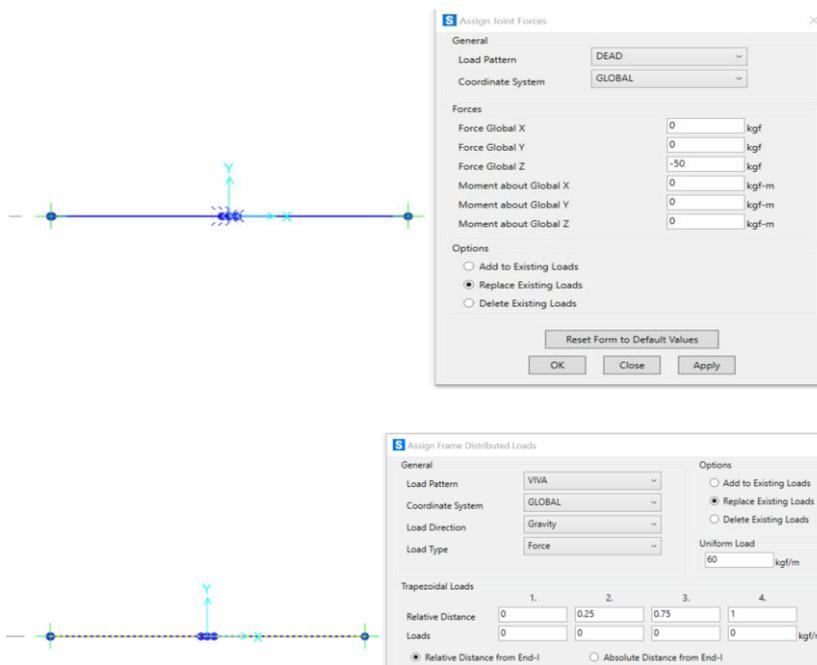
Combinaciones generadas en el programa:



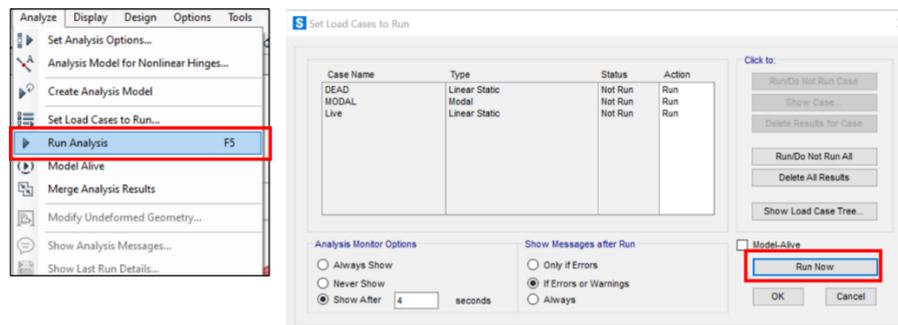
Para la aplicación de la carga, se debe seleccionar la viga, haciendo *clik* sobre **Assign – Frame Loads – Distributed – clic**:



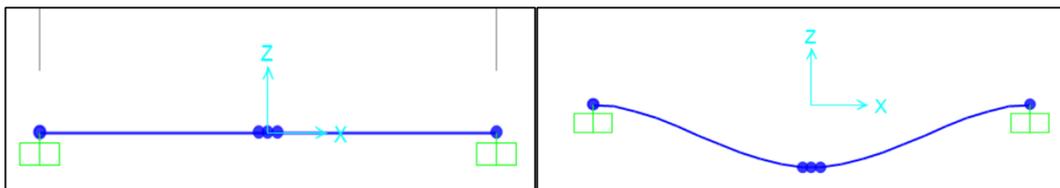
Coloque la carga permanente puntual en sentido vertical -50 y la carga accidental distribuida de 60:



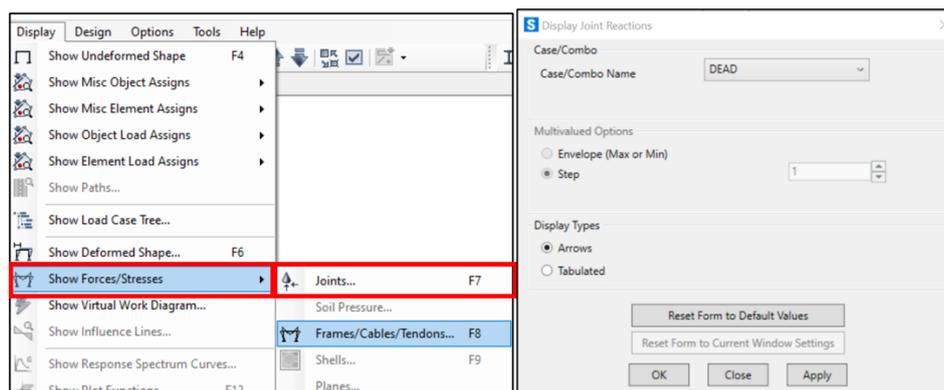
Para generar el análisis de la estructura. *Analyze – Run Analysis – clic – Run Now:*



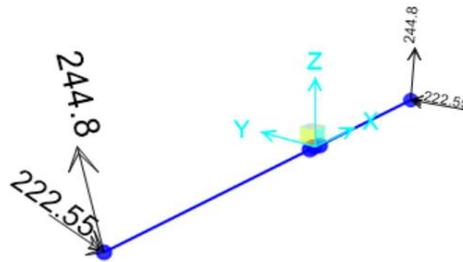
Estructura original y estructura deformada:



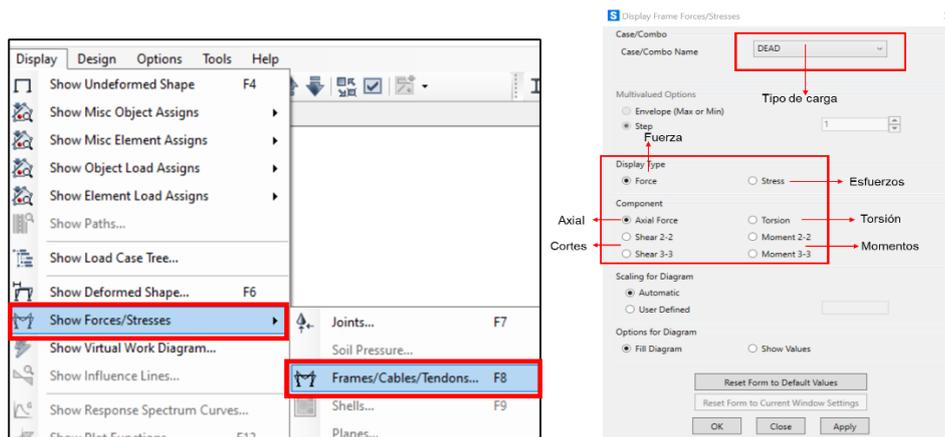
Para verificar otros resultados: *Display – Show Forces/Stresses – Joints – clic:*



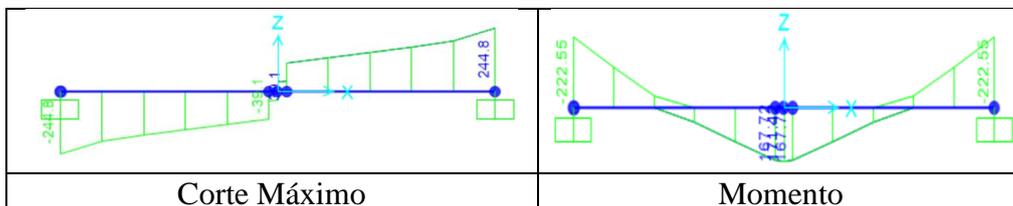
Para las fuerzas bajo carga permanente se obtienen las siguientes reacciones en kg:

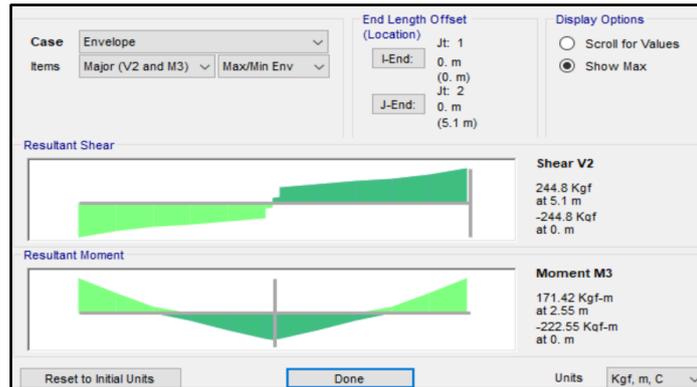


Para verificar otros resultados: **Display** – **Show Forces** – **Stresses** – **Frame/Cables/Tendons** – clic:

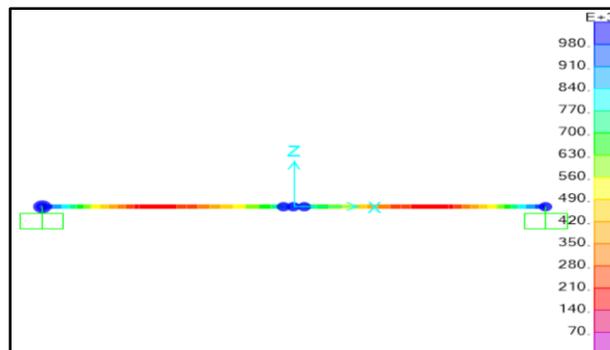


Cortes en kg y Momentos en kf-m:





Esfuerzos en kgf/m^2 :

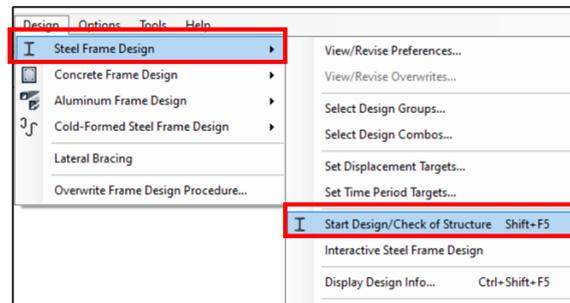


Se procedió a realizar el diseño bajo la norma AISC-LRFD93. Estos son los factores y parámetros de diseño que utiliza el programa según la normativa aplicada en cada país.

Design – Steel Frame Design – View/Revise Preferences:

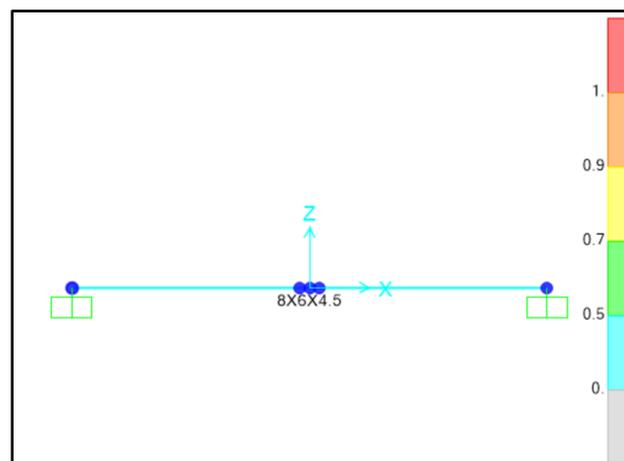
Item	Value
1 Design Code	AISC-LRFD93
2 Multi-Response Case Design	Envelopes
3 Framing Type	Moment Frame
4 Phi (Bending)	0.9
5 Phi (Compression)	0.85
6 Phi (Tension)	0.9
7 Phi (Shear)	0.9
8 Phi (Compression, Angle)	0.9
9 Consider Deflection?	Yes
10 DL Limit, Lj	120.
11 Super DL+LL Limit, Lj	120.
12 Live Load Limit, Lj	360.
13 Total Limit, Lj	240.
14 Total-Camber Limit, Lj	240.
15 Pattern Live Load Factor	0.75
16 Demand/Capacity Ratio Limit	0.95

Para hacer el diseño y poder verificar la sección escogida, se debe seleccionar **Design – Steel Frame Design – Start Design/Check of Structure – clic:**



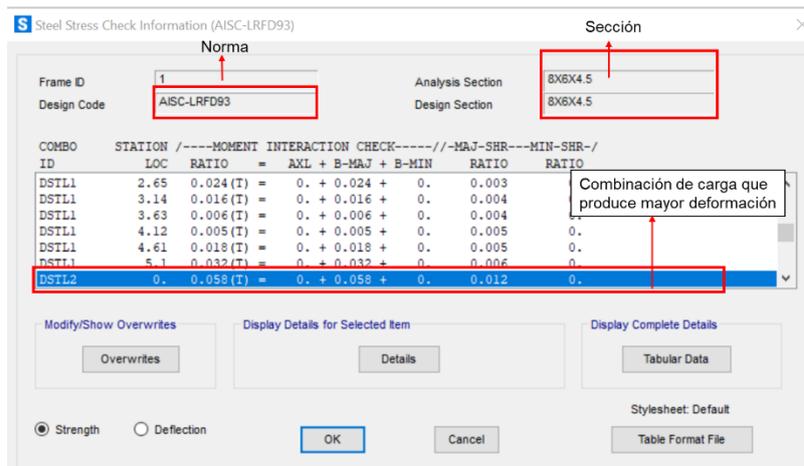
El programa arroja los valores de fuerza y momento en las direcciones 1, 2 y 3, siendo equivalentes F_1 , F_2 y F_3 a F_x , F_y y F_z y M_1 , M_2 y M_3 a M_x , M_y , y M_z , donde las restricciones X e Y corresponden a las restricciones en el plano y Z está asociado a la vertical.

Los resultados se muestran en una escala de colores asociada al porcentaje bajo el cual quedó trabajando cada elemento estructural donde la falla se presenta para factores mayores a 1 (100%) de la capacidad del elemento:



El gráfico anterior muestra los factores a los cuales quedaron trabajando las vigas (50% de su capacidad); este porcentaje se calcula en función de la demanda que se produce por la combinación de efectos de momento flector, fuerza axial, fuerza cortante y torsión sobre cada elemento de la estructura.

Haciendo *click con el botón derecho* sobre la viga se pueden obtener todos los resultados deseados:



Haciendo *click* en *Details* se obtienen los resultados de la demanda de capacidad de la viga:

```

Frame : 1          Design Sect: 8X6X4.5          Units: Kgf, m, C
X Mid : 0.        Design Type: Beam
Y Mid : 0.        Frame Type : Moment Resisting Frame
Z Mid : 0.        Sect Class : Non-Compact
Length : 5.1     Major Axis : 0. degrees counterclockwise from local 3
Loc : 0.         RLLF : 1.

Area : 0.004     SMajor : 2.180E-04      rMajor : 0.076      AWMajor: 0.002
IMajor : 2.180E-05  SMinor : 1.860E-04      rMinor : 0.061     AWMMinor: 0.002
IMMinor : 1.355E-05 ZMajor : 2.587E-04      E : 20389019158.
Ixy : 0.         ZMinor : 2.121E-04      Fy : 29528924.298

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS
Location      Fu      Mu33      Mu22      Vu2      Vu3      Tu
0.            0.      -398.841  0.        -424.363  0.        0.

PRM DEMAND/CAPACITY RATIO
Governing    Total    P      MMajor    MMinor    Ratio    Status
Equation     Ratio   Ratio  Ratio     Ratio     Limit   Check
(HI-Ib)     0.058  =    0. + 0.058 + 0.    0.95    OK

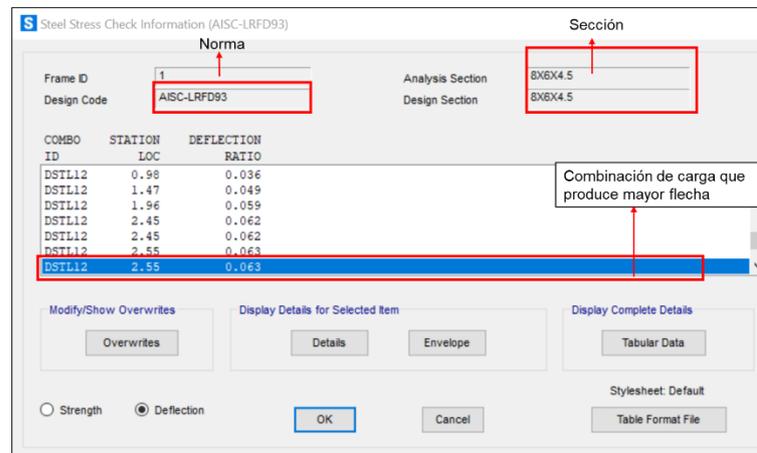
AXIAL FORCE DESIGN
Fu      phi*Pnc    phi*Pnt
Force   Capacity  Capacity
Axial   0.        61069.22  99102.023

MOMENT DESIGN
Mu      phi*Mn     Cm      B1      B2      K      L      Cb
Moment Capacity Factor Factor Factor Factor Factor Factor
Major Moment -398.841  6875.093  1.      1.      1.      1.      1.      2.274
Minor Moment 0.        3841.26   1.      1.      1.      1.      1.

SHEAR DESIGN
Vu      phi*Vn     Stress    Status    Tu
Force   Capacity  Ratio     Check     Torsion
Major Shear 424.363  35080.362  0.012    OK        0.
Minor Shear 0.        26310.272  0.        OK        0.

```

Haciendo *click* sobre **Deflection** se puede obtener la flecha máxima de la viga:



Haciendo *click* en **Details** se obtienen los resultados de la flecha por caso de carga:

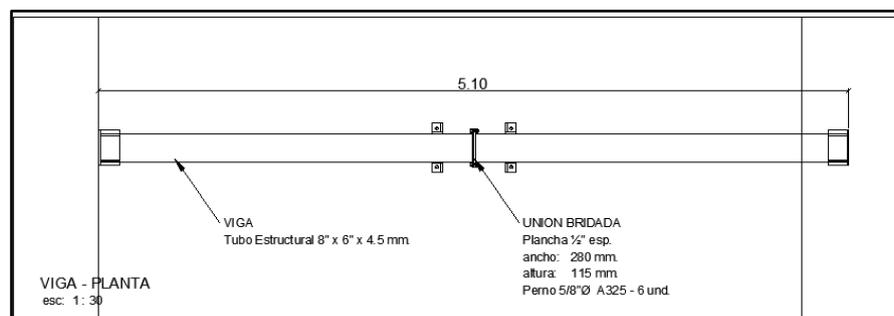
```

Frame : 1           Design Sect: 8X6X4.5
X Mid : 0.          Design Type: Beam
Y Mid : 0.          Frame Type : Moment Resisting Frame
Z Mid : 0.
Length : 5.1       Major Axis : 0. degrees counterclockwise from local 3
Loc : 2.55         RLLF : 1.

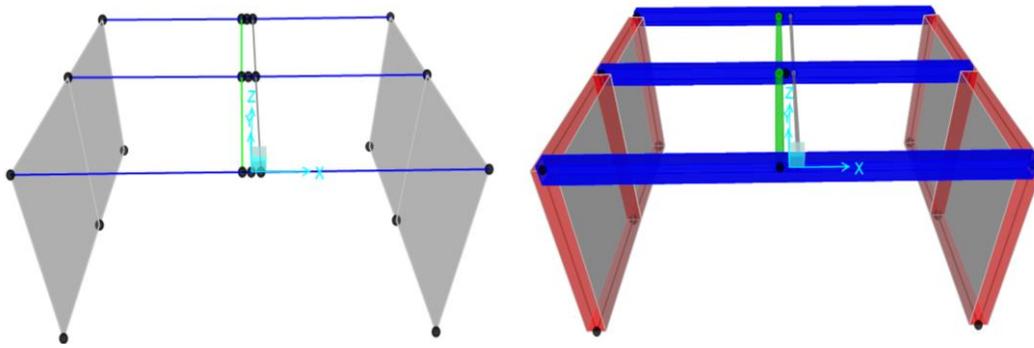
Area : 0.004        SMajor : 2.180E-04    rMajor : 0.076    AVMajor: 0.002
IMajor : 2.180E-05  SMinor : 1.860E-04    rMinor : 0.061    AVMinor: 0.002
IMinor : 1.395E-05 ZMajor : 2.507E-04    E : 20389019150.
Ixy : 0.            ZMinor : 2.121E-04    Fy : 29528924.298

DEFLECTION CHECK (Combo DSTL12)
Type      Consider Deflection Limit Ratio Status
Dead Load Yes 3.445E-04 0.043 0.008 OK
Super DL+LL Yes 8.858E-04 0.043 0.021 OK
Live Load Yes 8.858E-04 0.014 0.063 OK
Total Load Yes 0.001 0.021 0.058 OK
Total-Camber Yes 0.001 0.021 0.058 OK
  
```

Finalmente se tiene que el tubo estructural escogido funciona bajo las cargas adoptadas:



También se puede generar un modelo en 3D como se muestra a continuación, pero para términos de cálculo estructural puede ser modelada una sola viga para revisar el comportamiento individual:



REFERENCIAS

COMPUTERS AND STRUCTURES I. **Structural and Earthquake Engineering Software**. California, EUA, 2020.

COMPUTERS AND STRUCTURES. **SAP2000 Advanced V20.0**. California, USA, 2020.

COMPUTERS AND STRUCTURES. **CSI OAPI Documentation**. California, USA, 2011.

IBRAHIMBEGOVIC, Adnan; TAYLOR, R.; WILSON, E. A Robust Membrane Quadrilateral Element with Drilling Degrees of Freedom. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 43, Issue 1, Sept. 1992, p. 13-24.

MACNEAL, R. H.; HARDER, R. C. **A Proposed Standard Set to Test Element Accuracy, Finite Elements in Analysis and Design**. 1. v. 1, p. 3-20, 1985.

SCORDELIS, A. C.; LO, K. S. Computer Analysis of Cylinder Shells. **Journal of American Concrete Institute**, v. 61, May, 1964.



Para llevar a cabo proyectos de ingeniería es necesario contar con un equipo multidisciplinar de Investigadores, Ingenieros, Arquitectos, Técnicos, entre otros; en este sentido, el diseño asistido por computador facilita la vida de cada uno de los profesionales del área.

El uso de nuevas tecnologías es una herramienta fundamental para generar modelos cada vez más parecidos con la realidad, generando estructuras más seguras bajo la acción de diversos tipos cargas, el programa SAP2000 es una excelente herramienta para tales fines.

La propuesta de este manual permite conocer más a fondo el programa tanto a nivel teórico como a nivel práctico. Es necesario concientizar a los usuarios de la importancia de la teoría detrás de cada programa.