

**Simulación con**  
**SolidWorks**  
**Análisis estático lineal**





## Simulación con SolidWorks

© Derechos de autor registrados:

Empresa Editora Macro EIRL

© Derechos de edición, arte gráfico y diagramación reservados:

Empresa Editora Macro EIRL

Corrección de estilo:

Claudia Prieto Requejo

Coordinación de arte y diseño:

Alejandro Marcas León

Diagramación:

Paul Escobar Tantalean

Edición a cargo de:

© Empresa Editora Macro EIRL

Av. Paseo de la República N.º 613 , Miraflores, Lima, Perú.

☎ Teléfono: (511) 748 0560

✉ E-mail: [proyecto@editorialmacro.com](mailto:proyecto@editorialmacro.com)

🌐 Página web: [www.editorialmacro.com](http://www.editorialmacro.com)

Primera edición: setiembre de 2014

Tiraje: 1000 ejemplares

### Impresión

Talleres gráficos de la Empresa Editora Macro EIRL

Jr. San Agustín N.º 612-624, Surquillo, Lima, Perú

ISBN N.º 978-612-304-214-1

Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2014-12571

Prohibida la reproducción parcial o total, por cualquier medio o método, de este libro sin previa autorización de la Empresa Editora Macro EIRL.

## Alejandro Vera Lázaro

Ingeniero mecánico egresado de la Universidad Nacional de Trujillo. Diplomado en Computer Aided Design and Computer Aided Engineering CAD-CAE-UCV, especializado en Análisis Vibracional en Máquinas y Estructuras Mecánicas con Modelamiento en Elementos Finitos en Diseño Mecánico. Además, cuenta con una maestría en Ingeniería Mecánica Eléctrica, con mención en Energía (Convenio UNPRG-CARELEC).

En la actualidad, se desempeña como docente en la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo. Asimismo, es consultor de empresas e instructor de MATLAB y Solidworks Simulation en estudio estático, frecuencial y térmico, así como en Computational Fluids Dynamics (CFD).

Con respecto a su línea de investigación, está dedicado a la aplicación del método de elementos finitos a la ingeniería en diseño de máquinas. Asimismo, está comprometido con la realización de proyectos, planificación y gestión en energías renovables. Por ello, se encuentra involucrado en el diseño y dimensionamiento de sistemas eólicos *onshore* y *offshore*.



## Introducción

En el ámbito de la ingeniería, se plantean problemas que pueden ser resueltos a través de diversos métodos científicos que presentan beneficios, pero también ciertas limitaciones. Así, el método empírico aporta soluciones basadas en la experiencia acumulada en la solución de casos similares; sin embargo, este método implica la excesiva formulación de hipótesis simplificadoras. Otra alternativa sería utilizar el método analítico, que se caracteriza por plantear y resolver ecuaciones con cierto grado de complejidad, no obstante, este trata de adaptarse a geometrías simples. Por otro lado, puede utilizarse el método numérico, que se caracteriza por incluir las leyes constitutivas del material, los diferentes tipos de cargas y la geometría; sin embargo, con la técnica de mallado pueden obtenerse soluciones más precisas y con menos simplificaciones.

En este sentido, el presente libro *Simulación con SolidWorks. Análisis estático lineal* tiene por objetivo servir como una iniciación al lector en la simulación asistida por computadora en la ingeniería de diseño mecánico y estructural, a partir de los fundamentos esenciales del método por elementos finitos.

La metodología empleada consiste en la resolución de casos diversos, donde puede apreciarse cómo asignar un material a través de la librería, aplicar diferentes tipos de carga a la pieza que se analizará, el mallado correspondiente y, por último, la solución con el *solver* del *software* para obtener resultados e interpretarlos. En algunos casos, se ha considerado rediseñar, cambiar cargas, remallar, entre otras alternativas, para obtener resultados más óptimos.

El libro está dirigido a diseñadores, y a todo aquel que posea conocimientos básicos de diseño y que esté interesado en conocer el método numérico aplicado a la ingeniería.

## **Dedicatoria**

A Sol por todo el apoyo moral y los consejos acertados en un momento difícil de mi vida. En memoria de Julio Zaldívar, Carlos Gorriti, Luis Aguilar y Edwin Narváez.

# Índice

## Capítulo 1

<b>Fundamento teórico .....</b>	<b>9</b>
1.1 Simulación con SolidWorks.....	9
1.1.1 Ventajas del análisis .....	9
1.1.2 Conceptos básicos del análisis .....	10
1.1.3 Gestor de simulación .....	11
1.1.4 Estudios de simulación.....	12
1.1.5 Pasos del análisis.....	13
1.1.6 Asesor de simulaciones.....	14
1.1.7 Investigación de análisis.....	15
1.1.8 Materiales.....	16
1.1.9 Sujeciones y cargas .....	16
1.1.10 Especificar direcciones .....	17
1.1.11 Mallado .....	18
1.1.12 Ejecutar estudios .....	19
1.1.13 Ver resultados .....	20
1.1.14 ¿Qué errores hay?.....	20
1.1.15 Parámetros.....	21
1.1.16 Sistemas de coordenadas.....	21
1.1.17 Información básica sobre los análisis.....	24

## Capítulo 2

<b>Activación de simulación con SolidWorks.....</b>	<b>29</b>
2.1 Aplicación 1 .....	31

## Capítulo 3

<b>Casos de aplicación .....</b>	<b>43</b>
3.1 Primer caso.....	43
3.2 Segundo caso.....	49
3.3 Tercer caso.....	58
3.4 Cuarto caso.....	68
3.5 Quinto caso.....	75
3.6 Sexto caso .....	83
3.7 Séptimo caso .....	91
3.8 Octavo caso .....	99

## Capítulo 4

<b>Torsión.....</b>	<b>109</b>
4.1 Aplicación 1 .....	109
4.2 Aplicación 2 .....	120
4.3 Aplicación 3 .....	131
4.4 Aplicación 4 .....	143

## Capítulo 5

<b>Chapa metálica .....</b>	<b>169</b>
5.1 Chapa metálica 1 .....	169
5.1.1 Aplicación .....	169
5.2 Chapa metálica 2 .....	178
5.2.1 Aplicación.....	178

5.3 Simulación de la chapa metálica 2.....	195
5.3.1 Descripción .....	195
5.3.2 Información del modelo.....	196
5.3.3 Propiedades del estudio .....	196
5.3.4 Unidades .....	197
5.3.5 Propiedades del material .....	197
5.3.6 Cargas y sujeciones .....	197
5.3.7 Información de la malla .....	198
5.3.8 Información de la malla - detalles.....	198
5.3.9 Fuerzas resultantes .....	199

## Capítulo 6

<b>Control de malla .....</b>	<b>203</b>
6.1 Estudio 1.....	203
6.2 Simulación .....	235
6.2.1 Descripción .....	235
6.2.2 Suposiciones .....	235
6.2.3 Información del modelo.....	236
6.2.4 Propiedades del estudio .....	237
6.2.5 Unidades .....	237
6.2.6 Propiedades del material .....	238
6.2.7 Cargas y sujeciones .....	238
6.2.8 Información de la malla .....	239
6.2.9 Información de la malla - detalles.....	240
6.2.10 Fuerzas resultantes .....	241
6.2.11 Resultados del estudio .....	241
6.3 Análisis térmico .....	244
6.4 Simulación de Pieza7 .....	271
6.4.1 Descripción .....	271
6.4.2 Información del modelo.....	271
6.4.3 Propiedades del estudio .....	272
6.4.4 Unidades .....	272
6.4.5 Propiedades del material .....	273
6.4.6 Cargas y sujeciones .....	273
6.4.7 Información de la malla .....	274
6.4.8 Información de la malla - detalles.....	274
6.4.9 Fuerzas resultantes .....	275
6.4.10 Resultados del estudio .....	275
6.5 Mallado.....	277
6.5.1 Aplicación.....	277
6.6 Simulación .....	303
6.6.1 Descripción .....	303
6.6.2 Información del modelo.....	304
6.6.3 Propiedades del estudio .....	305
6.6.4 Unidades .....	305
6.6.5 Propiedades del material .....	306
6.6.6 Cargas y sujeciones .....	306
6.6.7 Información de la malla .....	307
6.6.8 Información de la malla - detalles.....	307
6.6.9 Información sobre el control de malla .....	308
6.6.10 Fuerzas resultantes .....	308
6.6.11 Resultados del estudio .....	309
Bibliografía .....	311

## 1.1 SIMULACIÓN CON SOLIDWORKS

Sistema de análisis de diseño que ofrece soluciones de simulación para análisis estáticos lineales y no lineales, de frecuencia, de pandeo, térmicos, de fatiga, de recipiente a presión, de caída, dinámicos lineales y no lineales, y de optimización. Asimismo, permite resolver problemas de manera intuitiva mientras que diseña, ya que presenta programas de resolución de problemas precisos y rápidos (*solvers*). Esto permite ahorrar tiempo y esfuerzo en la búsqueda de resultados de diseño óptimos; de esta manera se reduce el tiempo de salida del producto al mercado. Este sistema satisface sus necesidades de análisis a través de dos paquetes: SolidWorks Simulation Professional y SolidWorks Simulation Premium.



Fig. 1.1 Material analizado

Imagen tomada de <[http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c\\_Simulation\\_Studies.htm](http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c_Simulation_Studies.htm)>

### 1.1.1 Ventajas del análisis

Tras la construcción de su modelo, deberá comprobar el funcionamiento correcto de este en el campo; pero si no cuenta con herramientas de análisis, forzosamente tendrá que realizar ciclos de desarrollo de productos costosos que demanden una gran cantidad de tiempo.

Por lo general, un ciclo de desarrollo de producto comprende los siguientes pasos: primero, la construcción del modelo; segundo, la construcción de un prototipo del diseño; tercero, la prueba del prototipo en el campo; cuarto, la evaluación de los resultados de las pruebas de campo; y por último, la modificación del diseño conforme a los resultados de la prueba de campo.

Este proceso continúa hasta lograr una solución satisfactoria. En este sentido, el análisis le puede ayudar a disminuir el costo elevado de pruebas de campo, en cuyo lugar se realizará solo una simulación de la prueba de su modelo en la computadora; además, se podrá agilizar la comercialización del producto, a través de la reducción del número de ciclos de desarrollo del mismo; y finalmente, se mejorarán los productos, a través de rápidas pruebas de múltiples conceptos y situaciones previas a la toma de una decisión final. Esta simulación brinda mayor tiempo para idear nuevos diseños.

1.1.2 Conceptos básicos del análisis

El *software* emplea el método de elemento finito (FEM), que es una técnica numérica utilizada para analizar diseños de ingeniería. Por su generalidad y compatibilidad para ser implementado en computadoras, el FEM es considerado como el método de análisis estándar. A través de la división del modelo en numerosas piezas pequeñas de formas simples —denominadas “elementos”—, este método permite reemplazar de manera eficaz un problema complejo por muchos problemas simples, los cuales serán resueltos de forma simultánea.

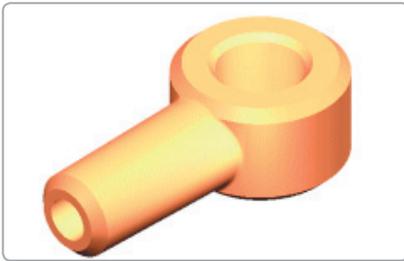


Fig. 1.2 Modelo CAD de una pieza

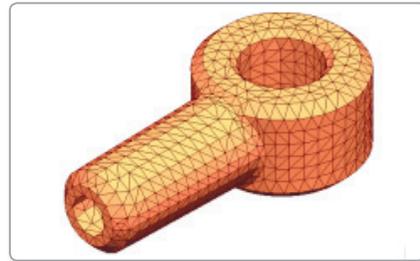


Fig. 1.3 Modelo subdividido en piezas pequeñas

Imágenes tomadas de <[http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c\\_Simulation\\_Studies.htm](http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c_Simulation_Studies.htm)>

El proceso de división del modelo en pequeñas piezas es conocido como “mallado”; asimismo, los elementos que conforman dicho mallado tienen puntos comunes denominados “nodos”. El comportamiento de cada elemento es evidente bajo cualquier situación de soporte y carga posibles. El método de elemento finito emplea elementos con formas diferentes.

La respuesta en un elemento depende, a su vez, de la respuesta en los nodos del elemento. De acuerdo al tipo de análisis o del elemento empleado, cada nodo es descrito detalladamente por un número determinado de parámetros. Así, la temperatura de un nodo describe su respuesta en el análisis térmico; en cambio, para el análisis estructural, la respuesta de un nodo generalmente está descrita por tres traslaciones y tres rotaciones, las cuales se denominan “grados de libertad” (GDL). El análisis que utiliza FEM se denomina “análisis de elementos finitos” (FEA).

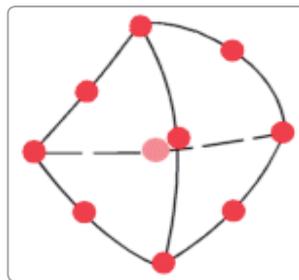


Fig. 1.4 Elemento tetraédrico

Imagen tomada de <[http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c\\_Simulation\\_Studies.htm](http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c_Simulation_Studies.htm)>

Los puntos rojos que figuran en el elemento tetraédrico de la imagen superior representan nodos. Las aristas de un elemento pueden ser curvadas o rectas.

Sobre la base de su conectividad con los demás elementos, el *software* establece las ecuaciones que determinan el comportamiento de cada elemento, las cuales están relacionadas con la respuesta de cargas, restricciones y propiedades del material. Posteriormente, el programa organiza las ecuaciones en un conjunto mayor de ecuaciones algebraicas simultáneas y soluciona las ecuaciones desconocidas.

Por ejemplo, en el análisis de tensión, el *solver* encuentra los desplazamientos en cada nodo y, posteriormente, el programa calcula las deformaciones unitarias y finalmente las tensiones.

El *software* ofrece los siguientes tipos de estudios:

Tabla 1.1 Tipos e íconos de estudio

Tipo de estudio	Ícono del estudio	Tipo de estudio	Ícono del estudio
Estático		Gráfico de historia-tiempo	
Frecuencia		Armónico	
Pandeo		Vibración aleatoria	
Térmico		Espectro de respuesta	
Estudio de diseño		Caída	
Estático no lineal		Fatiga	
Dinámico no lineal		Diseño de recipiente a presión	

Tabla tomada de <[http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c\\_Simulation\\_Studies.htm](http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c_Simulation_Studies.htm)>

### 1.1.3 Gestor de simulación

Su función es similar al gestor del Feature Manager, ya que también se encarga de organizar un sistema de análisis. A pesar de que se puede utilizar tanto un sistema de menús como el gestor de simulación para la administración de los estudios de análisis, es preferible el empleo del último, debido a que cuenta con menús contextuales de representación intuitiva. A continuación, se describirá detalladamente la utilización del gestor de simulación.

- ▲ En la parte inferior de la zona de gráficos, el *software* crea una pestaña para cada estudio.
- ▲ Haga clic en la pestaña del gestor de simulación para ver un estudio.
- ▲ Las subcarpetas determinan los parámetros del estudio. Así, cada estudio estructural tiene una subcarpeta:
  - **Sujecciones**  , donde aparecen las definiciones de las restricciones;
  - **Cargas externas**  , donde aparecen las definiciones de carga;
  - **Conexiones**  , donde aparecen las definiciones de contacto. Puede organizar sujeciones, cargas y conectores en carpetas.
- ▲ Los menús contextuales brindan opciones de sensibilidad al contexto. Copiar, pegar y duplicar contribuye a determinar de manera rápida los estudios posteriores.
- ▲ A través del gestor de simulación se puede obtener una visión práctica de la información más relevante de los estudios de análisis en un documento.
- ▲ Cada pestaña del gestor de simulación representa un estudio, el cual tiene una carpeta y subcarpetas en su gestor. Las subcarpetas dependen del tipo de estudio asignado por el *software* para una fácil identificación.

Tabla 1.2 Tipos e íconos de estudio del gestor de simulación

Tipo de estudio	Ícono del estudio	Tipo de estudio	Ícono del estudio
Estático		Gráfico de historia-tiempo	
Frecuencia		Armónico	
Pandeo		Vibración aleatoria	
Térmico		Caída	
Estudio de diseño		Fatiga	
Estático no lineal		Diseño de recipiente a presión	
Dinámico no lineal			

Tabla tomada de <[http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c\\_Simulation\\_Studies.htm](http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c_Simulation_Studies.htm)>

- Después de la adecuada ejecución de un estudio, el *software* elabora los trazados de resultados en la carpeta **Resultados** , de acuerdo a lo determinado en las opciones de resultados, o sino actualiza los trazados de resultados ya existentes.

### 1.1.4 Estudios de simulación

Durante su ciclo de vida, por lo general, un modelo está supeditado a diferentes entornos de servicios y condiciones de funcionamiento. Por ello, es relevante tomar en consideración los escenarios de cargas, las condiciones de posibles contornos y la evaluación de distintas propiedades del material en el análisis de un modelo determinado. Entre los factores que caracterizan un estudio de simulación, se encuentran las cotas del modelo, el tipo de estudio y opciones relacionadas para determinar la intención del análisis, las propiedades del material, y las condiciones de cargas y contorno.

Para crear un estudio, haga clic en **Nuevo estudio**  (**Administrador de comandos de Simulation**). En segundo lugar, defina un estudio de acuerdo a una determinada característica: nombre, tipo de análisis y propiedades. Cabe indicar que las propiedades del estudio establecen opciones vinculadas con un tipo de análisis específico. De esta manera, los estudios de diseño y fatiga emplean la malla de los estudios asociados; los estudios de caída solo utilizan una malla sólida; y por último, los estudios de diseño de recipientes a presión combinan resultados y no requieren una malla.

#### A. Tipo de malla basado en las características geométricas

Según sus operaciones de geometría, el programa establece de manera automática el tipo de malla adecuado a los sólidos.

Tabla 1.3 Tipos de malla

Malla sólida	Todos los modelos de sólidos se mullan con elementos sólidos (tetraédricos).
Malla de vaciado	Las geometrías de la superficie y las planchas metálicas con espesor uniforme se mullan con elementos de vaciado triangulares. Solo en los estudios de caída los sólidos de chapa metálica se convierten en sólidos y se mullan con elementos sólidos.
Malla de viga	Los miembros estructurales y las soldaduras se mullan con elementos en viga. Puede tratar una extrusión (mallas con elementos sólidos de forma predeterminada) como una viga haciendo clic con el botón derecho del ratón en el icono del sólido y seleccionando <b>Tratar como viga</b> .
Malla mixta	Cuando hay varias geometrías en el mismo modelo, se genera una malla mixta.

Tabla tomada de <[http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c\\_Simulation\\_Studies.htm](http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c_Simulation_Studies.htm)>

## B. Uso de los estudios de simulación

Pueden utilizarse para verificar la seguridad de los productos ya existentes o para diseñar nuevos productos. Así, la línea de simulación con SolidWorks incluye estudios no lineales, de respuesta dinámica, de flujo de fluidos y electromagnéticos. A continuación, conviene detenerse más detalladamente en los usos de los estudios de simulación.

- ▲ **Comprobar un diseño existente.** Al tener una geometría determinada, el objetivo consiste en ejercer control sobre el rendimiento del producto en diversas condiciones de trabajo y evaluar la posibilidad de mejorar el rendimiento o de ahorrar material.
- ▲ **Realizar un nuevo diseño.** El análisis de diseño es empleado para realizar pruebas de diferentes configuraciones geométricas y materiales, con la finalidad de probar la respuesta del modelo ante diferentes condiciones de trabajo.

## C. Sugerencias rápidas

Estos mensajes que aparecen mientras se van definiendo los estudios brindan pistas e indicaciones para definir el estudio, ejecutarlo y visualizar los resultados. La mayoría de estos mensajes tienen hipervínculos que permiten ver el elemento relacionado con la interfaz del usuario. Para activar **Sugerencias rápidas**, haga clic en **Ayuda > Sugerencias rápidas**.

## D. Asesor de simulaciones

Brinda ayuda para elegir el tipo de estudio, definir cargas, sujeciones y conexiones, e interpretar los resultados.

### 1.1.5 Pasos del análisis

Los pasos necesarios para realizar un análisis dependen del tipo de estudio. Sin embargo, por lo general, un estudio se completa a través de los siguientes pasos:

- ▲ Cree un estudio especificando el tipo de análisis y las opciones.
- ▲ De ser el caso, defina parámetros del estudio (cota del modelo, propiedad del material, valor de fuerza o cualquier otro dato).

- ▲ Defina propiedades de material<sup>1</sup>.
- ▲ Especifique restricciones y cargas<sup>2</sup>.
- ▲ Automáticamente, el programa crea una malla de vaciado para superficie y chapas metálicas de un espesor uniforme. Si desea crear una malla para chapas metálicas<sup>3</sup>, haga clic con el botón derecho del ratón en el ícono de vaciado y seleccione **Tratar como sólido para mallar con elementos sólidos**.
- ▲ Los miembros estructurales con elementos de viga son mallados de manera automática por el programa.
- ▲ Cuando se presentan diferentes geometrías (sólido, vaciado o miembros estructurales) en el modelo, el programa crea una malla mixta de forma automática.
- ▲ Determine un contacto entre componentes y conjuntos de contactos.
- ▲ Cree el mallado del modelo para dividirlo en piezas pequeñas (elementos).
- ▲ Ejecute el estudio<sup>4</sup>.
- ▲ Ver resultados.

### 1.1.6 Asesor de simulaciones

Es un conjunto de herramientas que sirven de guía a través del proceso de análisis, ya que reúnen los datos necesarios para la realización del mismo.

Tabla 1.4 Componentes del asesor de simulaciones

<b>Asesor de estudios</b>	Recomienda los tipos de estudio y las salidas previstas. Ayuda a definir sensores y crea estudios automáticamente.
<b>Asesor de sólidos y materiales</b>	Permite especificar cómo se quiere tratar los sólidos dentro de una pieza o un ensamblaje, así como aplicar materiales a los componentes.
<b>Asesor de interacciones</b>	Define interacciones internas entre sólidos en el modelo, al igual que interacciones externas entre el modelo y el entorno. Las interacciones incluyen cargas, sujeciones, conectores y contactos.
<b>Asesor de Crear malla y Ejecutar</b>	Ayuda a definir la malla y ejecutar el estudio.
<b>Asesor de resultados</b>	Proporciona consejos para interpretar y ver la salida de la simulación. Además, ayuda a determinar si la frecuencia o el pandeo pueden plantear problemas.

Tabla tomada de <[http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c\\_Simulation\\_Studies.htm](http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c_Simulation_Studies.htm)>

<sup>1</sup> Si se han definido las propiedades de material en el sistema CAD, este paso no es necesario. Los estudios de fatiga y optimización emplean estudios de referencia para las definiciones de materiales.

<sup>2</sup> Los estudios de fatiga y optimización emplean estudios indicados para restricciones y cargas. En cambio, los estudios de caída no permiten definir restricciones y cargas distintas de las especificadas en la configuración.

<sup>3</sup> Las chapas metálicas se mallan con elementos sólidos en los estudios de caída.

<sup>4</sup> Si bien es cierto que se pueden definir las propiedades del material, las cargas y restricciones, y crear la malla en cualquier orden, se deberán definir todos los datos necesarios antes de ejecutar el estudio.

El **Asesor de simulaciones** funciona con la interfaz de simulación con SolidWorks, inicia los Property Managers adecuados y enlaza con los temas de ayuda en línea para conseguir información adicional. Este asesor sirve de guía tanto para la selección del tipo de estudio como para el análisis del resultado de la simulación. Por medio del flujo de trabajo y de acuerdo con los requisitos a satisfacer, se emplea cada uno de los asesores individuales.

Para iniciar el **Asesor de simulaciones**, haga clic en **Estudio**  (**Command Manager de Simulation**).

Aparece la pestaña **Asesor de simulaciones**  en el **Panel de tareas**. Para abrir cada asesor, haga clic en una de las siguientes operaciones del Command Manager del simulador:

Tabla 1.5 Operaciones del Command Manager del simulador

Opción	Descripción
Estudio 	Acceder al <b>Asesor de estudios</b>
Sujeciones 	Acceder a la sección <b>Sujeciones</b> del <b>Asesor de interacciones</b>
Cargas externas 	Acceder a la sección <b>Cargas</b> del <b>Asesor de interacciones</b>
Conexiones 	Acceder a la sección <b>Conexiones</b> del <b>Asesor de interacciones</b>
Resultados 	Acceder al <b>Asesor de resultados</b>

Tabla tomada de <[http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c\\_Simulation\\_Studies.htm](http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c_Simulation_Studies.htm)>

### 1.1.7 Investigación de análisis

La pestaña **Investigación de análisis**  del **Panel de tareas** brinda recursos y vínculos a la base de conocimiento en línea. Puede acceder a la misma función haciendo clic en **Investigación** en el menú **Simulation**.

#### A. Recursos en línea

- ▲ **Solicitar licencia en línea** . Puede enviar una solicitud de licencia al vincularse a la página **Servicio de suscripción de Simulation – Formulario de solicitud de licencia**.
- ▲ Conectar con el sitio **Web de SolidWorks Simulation** . Se enlaza con el sitio web del simulador de SolidWorks.
- ▲ **Comunidades** . Se vincula a la página en línea **Grupos de comunidad de SolidWorks Simulation**.
- ▲ **Descargas** . Se vincula a la página en línea **Soporte para la suscripción a SolidWorks Simulation – Descarga**.

#### B. Base de conocimiento

Para consultar la base de datos de conocimiento de simulación con SolidWorks en línea, escriba las palabras clave en la opción **Buscar** y haga clic en **Ir**. Los resultados de la búsqueda aparecen en el explorador web. Sin embargo, también puede buscar los materiales por su nombre, basta con conectarse en el sitio web MatWeb y los resultados aparecerán en el explorador. Si desea explorar más sus propiedades, puede hacer clic en los hipervínculos. Por último, emplee las opciones **Anterior** y **Siguiente** para navegar por los resultados de la búsqueda.

### 1.1.8 Materiales<sup>5</sup>

Es necesario definir las propiedades de material correspondiente al tipo de análisis y al modelo de material antes de ejecutar un estudio, ya que el modelo de material describe el comportamiento del material y establece las propiedades del mismo. Los modelos de material isotrópico y ortotrópicos lineales pueden utilizarse en todos los estudios estructurales y térmicos, aunque también hay otros modelos de material para estudios de tensión no lineales, como el modelo von Mises de plasticidad disponible para estudios de caída. Las propiedades de material pueden ser especificadas como función de temperatura. Así, para los ensamblajes sólidos, cada componente puede tener un material diferente; para los modelos de vaciado, cada vaciado puede tener un material y un espesor distinto, además, el material de la pieza se emplea para todos los vaciados; para los modelos de viga, cada una puede contar con un material diferente; finalmente, para los modelos de malla mixta, es preferible definir las propiedades de material necesarias para los sólidos y vaciados de manera separada.

Se pueden definir las propiedades del material a través del empleo de materiales asignados a piezas en el sistema CAD, la selección del material de una de las bibliotecas de materiales predeterminados o de una biblioteca definida por el usuario y por medio de la determinación de valores de las propiedades necesarias de forma manual.

El *software* emplea el material asignado a piezas en el sistema CAD de manera predeterminada. Cabe señalar que la asignación de un material a una pieza en el *software* no implica la actualización del material utilizado en el sistema CAD. Para obtener mayor información, consulte la sección **Materiales** de simulación.

### 1.1.9 Sujeciones y cargas

Definen el entorno del modelo y están representadas por un ícono en el gestor de simulación. El *software* presenta opciones sensibles al contexto para definir las restricciones. Así, por ejemplo, si todas las caras seleccionadas son cilíndricas, el programa espera que defina las restricciones radiales, circunferenciales y axiales. Por otro lado, en el caso de los estudios no lineales y los estudios térmicos transitorios, las cargas y las sujeciones son definidas como función de tiempo.

Asimismo, las cargas y las sujeciones se caracterizan por ser asociativas y ajustarse automáticamente a los cambios en la geometría. Para copiar estudios, carpetas y elementos debe emplearse la función de arrastrar y colocar del gestor de simulación.

La importación de cargas es realizada directamente por el *software* desde SolidWorks Motion y SolidWorks Flow Simulation.

## A. Conectores

Sin la necesidad de presentar una geometría detallada, un conector puede simular el comportamiento de un mecanismo. El *software* puede definir conectores de distintos tipos (rígidos, de muelle, espiga, perno, soporte elástico, articulación, soldadura por puntos y conectores de apoyo), los cuales se encuentran presentes en muchos diseños del mundo real.

Para organizar sujeciones, cargas y conectores en carpetas, haga clic con el botón derecho del ratón en la opción correspondiente y seleccione **Crear nueva carpeta**, luego arrástrela o haga clic con el botón derecho del ratón en el nombre de la carpeta y seleccione un elemento para crear en ella.

<sup>5</sup> En el cuadro de diálogo **Material**, la propiedad es obligatoria en función del tipo de estudio activo si aparece una descripción roja; en cambio, si aparece una descripción azul, la propiedad es opcional.

### 1.1.10 Especificar direcciones

En algunas ocasiones, especificar las direcciones es necesario durante la definición del modelo, para definir las cargas, las restricciones y las propiedades del material ortotrópico; y en la visualización de resultados, para visualizar los resultados direccionales (desplazamientos, tensiones, deformaciones unitarias y flujo de calor).

Para identificar direcciones cuando se apliquen cargas o prescriban restricciones distintas de cero, se recomienda utilizar el Property Manager; en cambio, para las direcciones opuestas, utilice valores negativos. En un ensamblaje, puede emplear la geometría de referencia del ensamblaje o de sus componentes, o subensamblajes de referencia.

Tabla 1.6 Tipos de direcciones

<b>Utilizar un plano de referencia</b>	Un plano de referencia (o cara plana) define dos direcciones en su plano y una normal. Las dos direcciones del plano son designadas como Plano dir. 1 (Plane dir. 1) y Plano dir. 2 (Plane dir. 2). Son paralelas a los contornos del plano. Al aplicar restricciones y cargas, seleccione <b>Vista preliminar</b> para identificar la dir. 1 y la dir. 2. La normal es obvia.
<b>Utilizar caras planas</b>	En modo similar a un plano de referencia, una cara plana define dos direcciones en su plano y una normal. Dir. 1 y dir. 2 se definen internamente para cada cara plana. No pueden ser modificadas. Al aplicar restricciones y cargas, seleccione <b>Vista preliminar</b> para identificar la dir. 1 y la dir. 2. La normal es obvia.
<b>Sistemas de coordenadas</b>	Un sistema de coordenadas define 3 direcciones, X, Y y Z. El sistema de coordenadas predeterminado que utiliza el <i>software</i> , llamado "sistema de coordenadas global", se basa en el Plano 1. El origen del sistema de coordenadas global se encuentra dentro del origen de la pieza o del ensamblaje. El Plano 1 es el plano de referencia principal que aparece en el gestor de diseño del Feature Manager y puede tener un nombre diferente. El sistema de referencia muestra las direcciones globales X, Y y Z. A todos los otros sistemas de coordenadas se les denomina "sistemas de coordenadas locales".
<b>Utilizar un eje de referencia</b>	Un eje de referencia define una dirección radial, una dirección circunferencial y una dirección axial. Al aplicar restricciones y cargas, seleccione la casilla de verificación <b>Vista preliminar</b> en el Property Manager para identificar las direcciones positivas. Utilice valores negativos para la dirección opuesta.  Al especificar una traslación circunferencial, se especifica un ángulo ( $\Theta$ ) en grados. Esto establece la traslación en la dirección circunferencial ( $v$ ) en: $v = r \cdot \Theta \cdot \pi / 180$ , donde $r$ es el radio del nodo en el cual se aplica la restricción en relación con el eje de referencia.
<b>Utilizar una cara cilíndrica</b>	Esto es similar a la utilización de un eje de referencia. El eje de la cara cilíndrica se utiliza como el eje de referencia.
<b>Utilizar una arista recta</b>	Una arista recta define una dirección. Al aplicar restricciones y cargas, seleccione la casilla de verificación <b>Vista preliminar</b> en el Property Manager para identificar la dirección positiva.

Tabla tomada de <[http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c\\_Specifying\\_Directions.htm](http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c_Specifying_Directions.htm)>

### 1.1.11 Mallado<sup>6</sup>

El análisis de elementos finitos (FEA) brinda una técnica numérica óptima para analizar los diseños de ingeniería. Primero, se crea un modelo geométrico; luego, se subdivide el modelo en pequeñas partes (elementos), que están conectadas en puntos comunes (nodos). Precisamente, el proceso de subdivisión del modelo en partes minúsculas se denomina “mallado”. Así, los programas de análisis de elementos consideran al modelo como una red de elementos interconectados.

El mallado es una fase crucial en el análisis de diseño, donde se crea de manera automática una malla conformada por elementos sólidos, de vaciado y de viga. La malla sólida corresponde a los modelos voluminosos o complejos en 3D; los elementos de vaciado son adecuados para las piezas delgadas, como las chapas metálicas; por último, los elementos de viga corresponden a los miembros estructurales.

La calidad de la malla es determinante en la precisión de la solución: cuanto más delgada es la malla, mayor es la precisión. Factores como la geometría creada, opciones de malla activas, control de malla, condiciones de contacto influyen en la malla generada.

Respecto al tamaño del elemento y la tolerancia de la malla, el *software* sugiere medidas globales. De esta manera, el tamaño global de un elemento está relacionado con la longitud promedio de una arista del elemento. Cabe señalar que la cantidad de elementos incrementa rápidamente al emplear un tamaño global del elemento más pequeño.

#### A. Tipo de malla basado en las características geométricas

Sobre la base de sus operaciones de geometría, el programa determina de forma automática el tipo de malla adecuada para los sólidos.

- ▲ **Malla sólida**<sup>7</sup>. Todos los modelos de sólidos son mallados a través de elementos sólidos (tetraédricos).
- ▲ **Malla de vaciado**. Para mallar las geometrías de la superficie y las planchas metálicas con espesor uniforme, son necesarios los elementos de vaciado triangulares. En cambio, las chapas metálicas definidas en un estudio de caída se mallan con elementos sólidos.
- ▲ **Malla de viga**. Se emplean elementos en viga para mallar los miembros estructurales y las soldaduras. Puede tratar mallas con elementos sólidos de forma predeterminada (extrusión), como una viga, haciendo clic con el botón derecho del ratón en el ícono del sólido y seleccionando **Tratar como viga**.
- ▲ **Malla mixta**. Es generada cuando existen varias geometrías en el mismo modelo.

#### B. Métodos adaptativos para estudios estáticos

Brindan ayuda en la búsqueda de una solución apropiada para los estudios estáticos. Existen dos tipos de métodos adaptativos: método-h, que emplea elementos más pequeños en regiones que cuentan con errores relativos altos; y el método-p, que incrementa el orden polinomial de elementos con errores relativamente altos.

<sup>6</sup> Para ampliar la información, consulte Vera, A. (2011). *Técnicas de mallado*. Manuscrito inédito, USAT, Perú.

<sup>7</sup> Los estudios de caída solo emplean una malla sólida. Los estudios de diseño y fatiga utilizan la malla de los estudios asociados. Los estudios de diseño de recipientes a presión combinan resultados y no necesitan una malla.

### 1.1.12 Ejecutar estudios<sup>8</sup>

Tras asignar los materiales, definir las cargas y restricciones, y mallar el modelo, se debe ejecutar el estudio para calcular los resultados. En caso de ejecutar un estudio antes de generar el mallado, el *software* se encarga de mallar el modelo y ejecutar el estudio.

Para ejecutar un estudio, haga clic en el gestor de simulación con el botón derecho del ratón y seleccione **Ejecutar**, o haga clic en **Ejecutar**  en la barra de herramientas de simulación. En cambio, si desea ejecutar todos los estudios, haga clic en la flecha hacia abajo en **Ejecutar**  (Administrador de comandos de simulación) y seleccione **Ejecutar todos los estudios**. Finalmente, para ver sus resultados, mueva el cursor sobre la pestaña del estudio de simulación que esté ejecutando.

#### A. Solvers

Emplea una nueva tecnología para solucionar grandes sistemas de ecuaciones simultáneas, con la finalidad de reducir los requerimientos de tiempo de solución, espacio en disco y memoria. En su mayoría, los *solvers* de simulación con SolidWorks son cien veces más rápidos que los *solvers* convencionales.

El *software* cuenta con tres opciones para afrontar problemas de distintos tipos y tamaños: automática, donde el *software* elige el *solver* tipo Direct Sparse o el *solver* tipo FFEPlus de forma automática; el *solver* tipo Direct Sparse; y el *solver* tipo FFEPlus (iterativo).

Seleccione el *solver* al definir las propiedades de un estudio. Siempre que se utilice la misma malla, ambos *solvers* deben ofrecer respuestas similares; sin embargo, el rendimiento y la velocidad cambian de acuerdo al tipo y tamaño del problema. Así, los dos *solvers* son eficaces para los problemas pequeños, aunque cabe indicar que el *solver* FFEPlus es mucho más eficaz para problemas grandes (más de 300 000 grados de libertad).

#### B. Estado del solver

Al ejecutar un estudio, se visualiza la ventana **Estado del solver**, la cual contiene el uso de memoria, el tiempo transcurrido, la información específica del estudio (grados de libertad, número de nodos o número de elementos), información de *solver* y advertencias.

Puede acceder al trazado de convergencia y a los parámetros del *solver* a través de los estudios estáticos que emplea el *solver* tipo FFEPlus. Este trazado muestra la forma en que converge la solución, mientras los parámetros permiten manipular las interacciones del *solver* con la finalidad de mejorar en precisión o mejorar la velocidad con resultados menos exactos. Pueden utilizarse valores predefinidos del *solver* o cambiarse el umbral máximo de iteraciones y el umbral de detención.

Si desea mejorar la precisión, debe disminuir el valor correspondiente al umbral de detención; en cambio, si quiere mejorar la velocidad sin importar la precisión, puede incrementar el valor del umbral de detención o disminuir el número máximo de iteraciones<sup>9</sup>.

<sup>8</sup> Cuando uno o varios estudios de simulación se ejecutan, lo hacen como procesos en segundo plano. Por ello, después de finalizar la sesión, la simulación sigue ejecutándose en segundo plano. Al completar la simulación, los resultados son guardados en el directorio asignado.

<sup>9</sup> Haga clic con el botón derecho del ratón en la carpeta **Resultados** y seleccione **Mensajes del solver** si quiere ver los mensajes después de terminar el análisis. Los tipos de mensajes están conformados por número de nodos, tiempo de solución, errores o advertencias. Debe tomar en cuenta que estos mensajes son los mismos que aparecen en la ventana durante el análisis. Para mayor información, consulte la sección **Estudios de diseño**.

1.1.13 Ver resultados

Después de que el análisis es ejecutado, el *software* origina trazados de resultados predeterminados personalizables. Para ver un trazado, haga doble clic en el ícono correspondiente al gestor de simulación.

Tras ejecutar el análisis, el *software* genera trazados de resultados predeterminados personalizables. Puede ver un trazado haciendo doble clic en su ícono en el gestor de simulación; asimismo, puede definir otros trazados haciendo clic en la carpeta de resultados o seleccionando la opción **Definir**. Una vez que los trazados son definidos, pueden utilizarse sistemas de coordenadas de referencia. Así, pueden verse las tensiones radiales y tangenciales seleccionando un eje cuando defina los trazados de tensión.

Las herramientas de visualización de resultados están compuestas por trazados de bordes, trazados de sección, Iso, animación, sondeo y vistas explosionadas. Respecto a los trazados de sección, pueden elegirse herramientas de corte plana, cilíndrica y/o esférica. Para la visualización conveniente de los trazados de sección y los trazados Iso, se proporciona una utilidad de recorte para una visualización adecuada.

Puede generar un informe para Internet que esté estructurado de manera automática por todos los trazados disponibles, para lo cual se requiere de la ayuda del asistente para informes en la personalización del informe y en la inclusión de los trazados de resultados. Para emplear el **Asistente para informes**, haga clic con el botón derecho del ratón en carpeta **Informe** y seleccione **Definir**.

Los trazados de resultados pueden ser guardados en formatos eDrawings, mapa de bits, JPEG, VRML, XGL y ZGL; mientras que las animaciones pueden ser guardadas en archivos de video AVI. Estos trazados de resultados pueden ser incluidos automáticamente en el informe de estudio. Al margen del formato que se emplee en un trazado, para guardarlo es necesario hacer clic con el botón secundario del ratón en el ícono del trazado y seleccionar **Guardar como**. En cambio, si quiere guardar todos los trazados exclusivamente en formato JPEG, seleccione **Actualizar todos los trazados en archivos JPEG automáticamente**, que se encuentra en el cuadro de diálogo informe.

1.1.14 ¿Qué errores hay?

Permite visualizar los errores y advertencias en el estado actual de un estudio de simulación. Para hacer uso de esta aplicación, haga clic con el botón derecho del ratón en el ícono **Estudio**, que tiene un ícono de error, y seleccione **¿Qué errores hay?**

Para ejecutar el estudio, antes debe corregir todo error que se encuentre en este; sin embargo, cuando solo se presenta una advertencia en una operación, todavía puede ejecutar el estudio o visualizar los resultados existentes. Los errores o advertencias pueden ser identificados a través de los íconos que conforman el gestor de simulación.

Tabla 1.7 Íconos de error y advertencia

Icono	Descripción
	Se encuentra al lado de un nombre de <b>Estudio</b> en la parte superior del gestor de Simulation y sirve para indicar un error con el estudio.
	Señala un error con una operación de un estudio y al hacerlo invalida la operación de Simulation.
	Junto a las carpetas <b>Resultados</b> o <b>Malla</b> , este ícono de advertencia indica que los resultados no son actuales.

Tabla tomada de <[http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c\\_Simulation\\_Studies.htm](http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c_Simulation_Studies.htm)>

El cuadro de diálogo está provisto de columnas que presentan características como el tipo, conformado por error (❌) y advertencia (⚠️); operación, nombre de la operación del estudio y su ícono en el gestor de simulación; y por último, la explicación de la advertencia o del error. Asimismo, el cuadro de diálogo presenta las siguientes casillas de verificación: **Mostrar errores**, que visualiza los mensajes de error; y **Mostrar advertencias**, que permite ver los mensajes de advertencia.

### 1.1.15 Parámetros

Deben emplearse en los estudios de diseño y vincularse a variables de acuerdo a la iteración de un escenario de diseño de evaluación u optimización. Estos parámetros pueden crearse para cotas de modelo, variables globales y operaciones de estudios de simulación o *motion*.

Para permitir que los parámetros dirijan el valor numérico de la operación asociada, deben vincularse los parámetros a los campos de entrada. Por ejemplo, si **Fuerza 1** (Force 1) es un parámetro de fuerza, en lugar de introducir un valor numérico, puede ser vinculado al campo de entrada de fuerza. Por ello, si se cambia el valor del parámetro **Fuerza 1**, también se cambia de manera automática la entrada de fuerza vinculada.

### 1.1.16 Sistemas de coordenadas

#### A. Sistema de coordenadas global

Está relacionado en forma predeterminada con la entrada direccional. Es necesario indicar que el sistema de coordenadas global (X, Y y Z) está basado en el **Plano 1** (Plane 1), cuyo origen concuerda con el origen de la pieza o ensamblaje, y que puede encontrarse ubicado en el gestor de diseño del Feature Manager con un nombre diferente. El sistema de referencia muestra las direcciones globales X, Y y Z.

La siguiente figura muestra la relación entre el sistema de coordenadas global y **Plano 1** (Plane 1), **Plano 2** (Plane 2) y **Plano 3** (Plane 3).

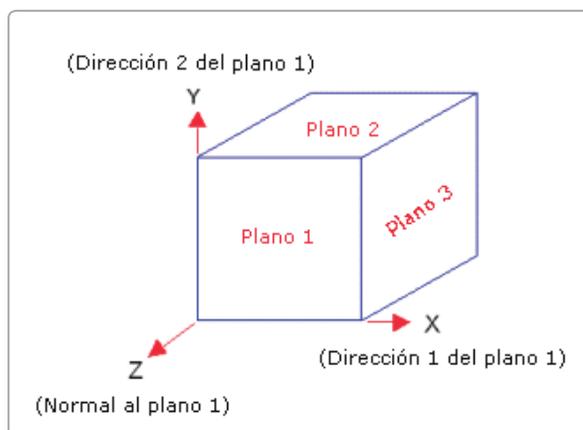


Fig. 1.5 Relación entre sistema de coordenadas global y planos

Imagen tomada de <[http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c\\_Simulation\\_Studies.htm](http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c_Simulation_Studies.htm)>

Donde X es la Dirección 1 (Direction 1) del Plano 1, Y es la Dirección 2 (Direction 2) del Plano 1 y Z es el Normal al plano 1 (Normal to plane 1).

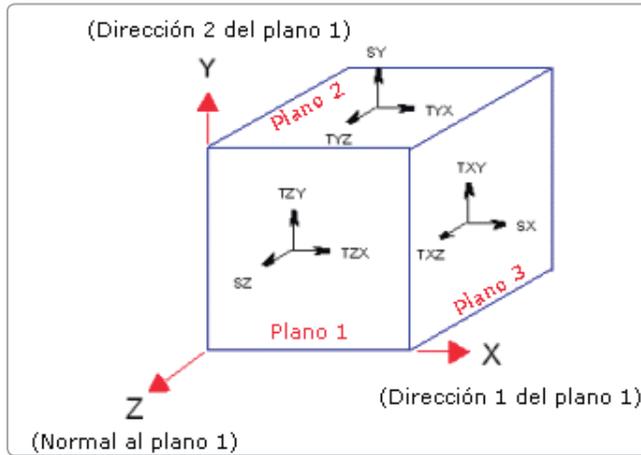


Fig. 1.5 Componentes de tensión

Imagen tomada de <[http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c\\_Simulation\\_Studies.htm](http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c_Simulation_Studies.htm)>

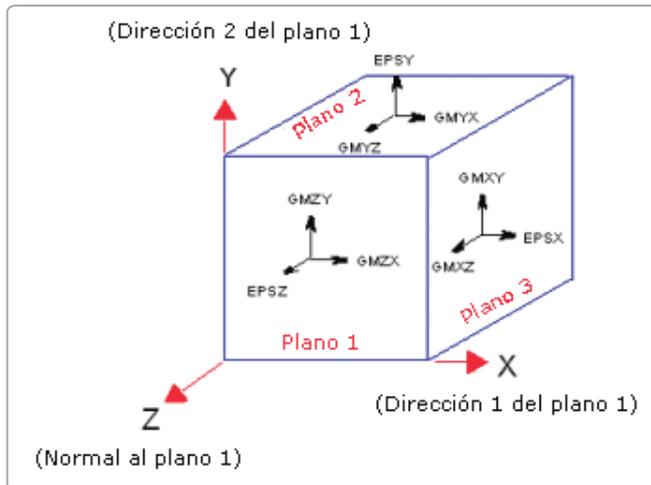


Fig. 1.6 Componentes de deformación unitaria

Imagen tomada de <[http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c\\_Simulation\\_Studies.htm](http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c_Simulation_Studies.htm)>

Para ver el sistema de coordenadas global en cualquier trazado, haga clic con el botón derecho del ratón en el ícono correspondiente y seleccione **Ejes**.

## B. Sistemas de coordenadas locales

Estos sistemas de coordenadas diferentes del sistema de coordenadas global permiten especificar restricciones y cargas en cualquier dirección deseada. Por ejemplo, si se define una fuerza sobre una cara cilíndrica, esta se puede aplicar en las direcciones radial, circunferencial o axial. En este caso, debe seleccionar un eje como geometría de referencia. En cambio, si se elige una cara esférica, se pueden elegir las direcciones radiales, de longitud o de latitud que aplican a las restricciones. Por otro lado, cuando se visualizan los resultados, pueden emplearse planos y ejes de referencia, así se pueden observar tensiones sobre una cara cilíndrica en dirección radial.

**a. Utilizar planos y ejes de referencia.** Pueden utilizarse para definir propiedades de material ortotrópico o para aplicar cargas y restricciones direccionales.

▲ **Utilizar planos de referencia.** Define un sistema de coordenadas cartesianas, tal como puede observarse en la siguiente figura.

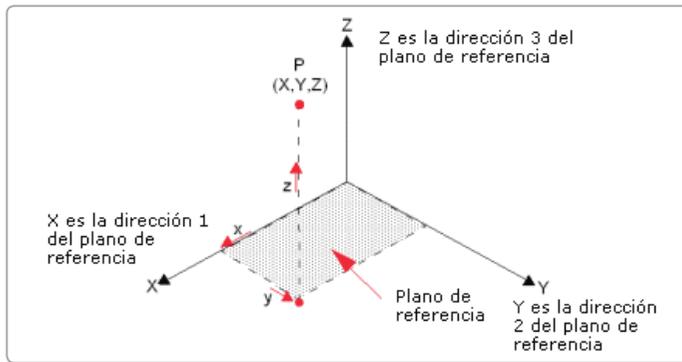


Fig. 1.7 Sistema de coordenadas cartesianas

Imagen tomada de <[http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c\\_Simulation\\_Studies.htm](http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c_Simulation_Studies.htm)>

▲ **Utilizar ejes de referencia**<sup>10</sup>. Define el sistema de coordenadas cilíndricas, como se ilustra en la figura.

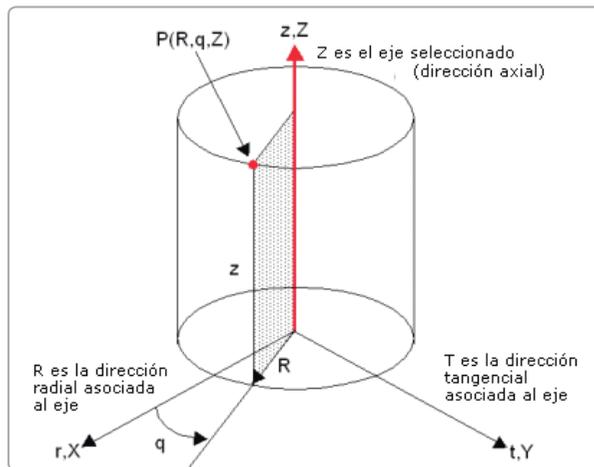


Fig. 1.8 Sistema de coordenadas cilíndricas

Imagen tomada de <[http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c\\_Simulation\\_Studies.htm](http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c_Simulation_Studies.htm)>

<sup>10</sup> Para obtener mayor información, consulte la sección **Cargas y restricciones**.

### 1.1.17 Información básica sobre los análisis<sup>11</sup>

Proporciona información teórica básica para el empleo del *software*. Así, determina la función de cada tipo de análisis, las suposiciones sobre las que se basa cada análisis, los datos necesarios que deben ingresarse para realizarlo y los resultados que debería mostrar; además, brinda una breve descripción para la ejecución de cada análisis. Se presentan los siguientes temas:

#### A. Análisis estático lineal

Al aplicar cargas a un sólido, este se deforma y el efecto de las cargas es transmitido a través del sólido. A su vez, las cargas externas inducen fuerzas internas y reacciones para renderizar el sólido a un estado de equilibrio. Precisamente, el análisis estático lineal calcula los desplazamientos, las deformaciones unitarias, las tensiones y las fuerzas de reacción bajo el efecto de cargas aplicadas. El análisis estático lineal cumple las siguientes suposiciones:

- ▲ **Suposición estática.** Toda carga es aplicada de forma lenta y gradual hasta que complete sus magnitudes; luego, las cargas permanecen constantes (no varían en el tiempo). A partir de esta suposición, se pueden ignorar las fuerzas inerciales y de amortiguación causadas por pequeñas aceleraciones y velocidades poco relevantes. En cambio, las cargas que varían con el tiempo y que inducen fuerzas inerciales o de amortiguación relevantes pueden garantizar el análisis dinámico; por ello, por ningún motivo pueden ser despreciadas.

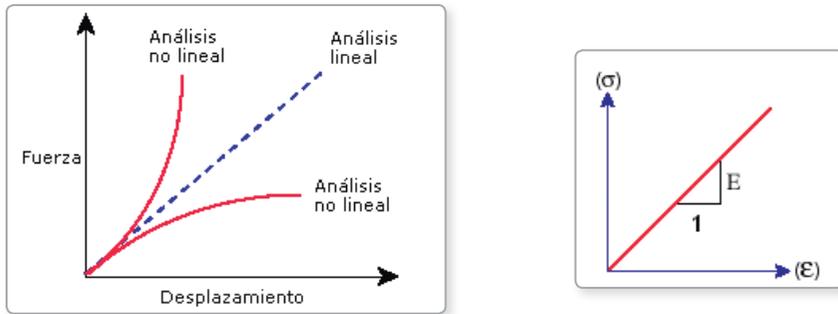
Tiene gran importancia verificar la suposición estática, ya que una carga dinámica puede generar tensiones de hasta el doble del cociente de amortiguamiento viscoso de las tensiones generadas por las cargas estáticas de la misma magnitud. En el caso de una estructura con un 5 % de amortiguación, las tensiones dinámicas son diez veces mayores que las tensiones estáticas. El peor de los casos se presenta en la resonancia<sup>12</sup>.

El análisis estático puede ser empleado para calcular la respuesta estructural de los sólidos que giran a velocidades constantes o se trasladan con aceleraciones constantes, ya que las cargas generadas no sufren modificaciones con el tiempo. Se recomienda utilizar estudios dinámicos lineales o no lineales para calcular la respuesta estructural provocada por cargas dinámicas, las cuales incluyen cargas oscilatorias, impactos, colisiones y cargas aleatorias.

- ▲ **Suposición de linealidad.** La relación entre cargas y respuestas inducidas es lineal. Por ello, si se duplican las cargas, la respuesta del modelo (desplazamientos, deformaciones unitarias y tensiones) también se duplica. Se puede realizar la suposición de linealidad si todos los materiales del modelo cumplen con la ley de Hooke (cuando la tensión es directamente proporcional a la deformación unitaria), si los desplazamientos inducidos son suficientemente pequeños como para ignorar el cambio en la rigidez causado por la carga o si las condiciones de contorno no cambian durante la aplicación de las cargas<sup>13</sup>.

<sup>11</sup> No resulta conveniente sustentar sus decisiones de diseño exclusivamente en los resultados obtenidos con CosmosWorks. Por ello, esta información debe emplearse junto con los datos experimentales y la experiencia práctica, ya que las pruebas de campo son obligatorias para validar su diseño definitivo. Este *software* ayuda a reducir el tiempo de salida al mercado de sus productos sin necesidad de eliminar las pruebas de campo por completo.

<sup>12</sup> Consulte la sección "Análisis dinámico".



<sup>13</sup> Las cargas deben ser constantes en cuanto a magnitud, dirección y distribución. No deben cambiar mientras se deforma el modelo.

Fig. 1.9 Ejes de fuerza y desplazamiento

Imágenes tomadas de <[http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c\\_Simulation\\_Studies.htm](http://help.solidworks.com/2014/Spanish/SolidWorks/cworks/c_Simulation_Studies.htm)>

## B. Análisis de frecuencias

Cada estructura tiene la tendencia de hacer vibrar a las frecuencias naturales o resonantes. Cada frecuencia natural se asocia a una forma determinada, llamada forma modal, que el modelo tiende a adoptar al vibrar a esa frecuencia.

La estructura tiene grandes desplazamientos y tensiones cuando una estructura es activada adecuadamente por una carga dinámica con una frecuencia coincidente con una de sus frecuencias naturales: este fenómeno es denominado “resonancia”. En el caso de los sistemas sin amortiguar, a nivel teórico, la resonancia causa un movimiento ilimitado; sin embargo, la amortiguación limita la respuesta de las estructuras a causa de las cargas resonantes.

Los estudios estáticos no pueden ser utilizados para evaluar la respuesta si el diseño está sujeto a entornos dinámicos. Por ello, sería más conveniente emplear los estudios de frecuencia, que ayudarían a evitar la resonancia<sup>14</sup>, y los sistemas de aislamiento de vibración en el diseño. Además, forman parte de la base necesaria para la evaluación de la respuesta de sistemas dinámicos lineales en los que la respuesta de un sistema a un entorno dinámico se presupone que corresponde a la suma de las contribuciones de los modelos empleados en el análisis.

Un modelo real presenta una cantidad infinita de frecuencias naturales; sin embargo, un modelo de elementos finitos tiene una cantidad finita de frecuencias que corresponde a la cantidad de grados de libertad considerada en el modelo. Solo son necesarios algunos de los primeros modos para la mayoría de los fines.

Las frecuencias naturales y las formas modales respectivas dependen de la geometría, las propiedades de material y las condiciones de soporte. El cálculo de frecuencias naturales y formas modales se denomina análisis modal, de frecuencia y de modo normal.

- ▲ **Efecto de las cargas en el análisis de frecuencias.** Por lo general, la construcción de la geometría de un modelo es creada sobre la base de la forma original del modelo. Sin embargo, algunas cargas (el peso propio de la estructura) siempre están presentes y pueden causar efectos considerables en la forma de la estructura y en sus propiedades modales. En la mayoría de los casos, este efecto es omitido, debido a que las desviaciones inducidas son pequeñas.

<sup>14</sup> La resonancia solo debe emplearse en el diseño de ciertos dispositivos.

Las características de modalidad de un sólido se ven afectadas por las cargas. De esta manera, las cargas comprensivas disminuyen las frecuencias de resonancia, mientras que las cargas de tracción las aumentan. Este hecho es fácilmente demostrable a través de la modificación de la tensión de las cuerdas de un violín: cuanta más alta sea la tensión, más alta será la frecuencia (tono).

Para un estudio de frecuencia, las cargas no tendrán que ser definidas; sin embargo, si son definidas, se debe tener en consideración sus efectos <sup>15</sup>.

- ▲ **Cargas dinámicas.** Para calcular la respuesta motivada por cargas dinámicas y excitaciones de la base, utilice estudios dinámicos lineales. Cabe señalar que no debe considerarse ni el efecto de cargas estáticas en frecuencias ni las formas de modo.

### **C. Análisis dinámico**

Los estudios estáticos parten del presupuesto de que las cargas son constantes o bien son aplicadas muy lentamente hasta alcanzar sus valores completos; por ello, la velocidad y aceleración de cada partícula del modelo se supone nula. En consecuencia, los estudios estáticos desprecian las fuerzas de inercia y amortiguación. Sin embargo, en muchos casos prácticos, las cargas no son aplicadas lentamente ni cambian con el tiempo o la frecuencia, por lo cual debe utilizarse un estudio dinámico. Así, por regla general, si la frecuencia de una carga es mayor que un tercio de la frecuencia más baja (fundamental), entonces debe utilizarse un estudio dinámico.

Los estudios de frecuencia conforman la base de los estudios dinámicos lineales. El *software* se encarga de calcular la respuesta del modelo a través de la acumulación de la contribución de cada modo al entorno de carga; en la mayoría de los casos, aquellos que contribuyen significativamente a la respuesta solo son los modos más bajos. La contribución de un modo está determinado por ciertas características (contenido, magnitud, dirección, duración y ubicación de la frecuencia de la carga).

La realización de un análisis dinámico incluye objetivos, como el diseño de sistemas estructurales y mecánicos que funcionen satisfactoriamente en entornos dinámicos, y la modificación de características del sistema (geometría, mecanismos de amortiguamiento, propiedades de material, entre otras), con la finalidad de disminuir los efectos de la vibración.

### **D. Análisis de pandeo linealizado**

Bajo el efecto de la carga axial, los modelos delgados frecuentemente se deforman. Así, el pandeo es un tipo de deformación repentina producida cuando la energía de la membrana almacenada (axial) se transforma en energía de deformación sin cambios en las cargas aplicadas de manera externa. En términos matemáticos, al producirse el pandeo, la rigidez se convierte en única. Por ello, el pandeo linealizado soluciona un problema de autovector para el cálculo de los factores de pandeo críticos y formas modales de pandeo asociadas.

<sup>15</sup> En caso de incluirse el efecto de carga en las frecuencias resonantes, deberá utilizarse el *solver* Direct Sparse. Cuando la opción **Solver** se establece en automático, se utilizará el *solver* Direct Sparse (*solver* directo de dispersión matricial) si las cargas son definidas para un estudio de frecuencia.

El pandeo puede afectar a un modelo en diferentes formas y bajo niveles de carga diferentes. La forma que adopta el modelo cuando es pandeado es “forma modal del pandeo”, mientras que la carga se denomina “carga crítica o de pandeo”. El análisis de pandeo se encarga de calcular una determinada cantidad de modos de acuerdo a lo requerido por el cuadro de diálogo de pandeo. Por lo general, los diseñadores muestran un mayor interés en el modo más bajo, ya que está asociado a la carga crítica más baja. En caso el pandeo sea el factor de diseño crítico, entonces, el cálculo de múltiples modos de pandeo podrá determinar las áreas débiles del modelo. Así, las formas modales pueden ayudar a modificar el modelo o, de lo contrario, pueden contribuir a evitar un determinado modo de pandeo.

Para un procedimiento más enérgico aplicado al estudio del comportamiento de los modelos, se requiere del empleo de códigos de diseño de análisis no lineal.

- ▲ **Cuándo utilizar el análisis de pandeo.** Bajo el efecto de cargas axiales pequeñas, las piezas delgadas y los ensamblajes con piezas delgadas que se cargan en dirección axial se deforman. Por ello, es posible que estas estructuras presenten errores a causa del pandeo, mientras que las tensiones se mantienen por debajo de los niveles críticos. Así, la carga del pandeo se convierte en un factor de diseño crítico. A diferencia del caso anteriormente descrito, cuando las estructuras son voluminosas, no es necesario el análisis de pandeo, ya que el error se produce previamente a causa de las tensiones altas.

### **E. Análisis térmico**

Se encarga de calcular la distribución de temperatura en un cuerpo producida por tres mecanismos: conducción, convección y radiación. A través de estos mecanismos, la energía calorífica fluye desde el medio con mayor temperatura hasta el medio con menor temperatura. Las transferencias de calor por conducción y convección necesitan la presencia de un medio interviniente, a diferencia de la transferencia de calor por radiación que no la requiere. Por medio de un termostato pueden controlarse las fuentes de flujo de calor y de potencia calorífica.



Impreso en los talleres gráficos de



Surquillo