

COMPARACIÓN ANALÍTICA Y DE ELEMENTOS FINITOS DE ARRIOSTRES SEGÚN DISPOSICIÓN GEOMÉTRICA CON SOFTWARE DE CÁLCULO

Celso Sanga Quiroz^{1a}, Edson Huertas Flores^{2b}, Manuel Caipo Ccoa^{3c}

RESUMEN

Objetivo. Comparar y evaluar la metodología de análisis de arriostres en estructuras de acero con la utilización de *software* de cálculo. **Método.** El análisis consta de la comparación de metodologías de operación de dos diferentes *software* los cuales son frecuentemente usados en ingeniería; Sap2000 posee elementos tipo *Frame* para vigas, para los que aplica el cálculo matricial convencional, además posee elementos *top Shell* y *Asolid*, para los que utiliza un cálculo por elementos finitos y, por lo tanto, el programa realiza cálculos lineales y no lineales (formación de rótulas plásticas), el *software* Inventor contrasta con un análisis único de elementos finitos en la estructura, para la evaluación de arriostres, estos son considerados como *Frames* en Sap2000 y analizados mediante el cálculo matricial según la disposición que se presente. **Resultados.** El cálculo matricial muestra niveles de pandeo, flexión, diagramas de momentos, fuerzas axiales y cortantes en los arriostres, con esto es práctico el dimensionamiento de perfiles, el cálculo por elementos finitos muestra la concentración de esfuerzos en cada elemento perteneciente al arriostre además de las deformaciones en este Inventor posibilita la simulación de conexiones empernadas y soldadas. **Conclusión.** La metodología de diseño en estructuras sigue un proceso el cual debe ser respaldado por una variedad de cálculos.

Palabras clave: Metodología de diseño de estructuras de acero; Arriostres en estructuras; Cálculo matricial en estructuras; Cálculo por elementos finitos en estructuras.

ANALYTICAL AND FINITE ELEMENT COMPARISON OF CROSS BRACING ACCORDING TO GEOMETRICAL DISPOSITION

ABSTRACT

Objective. Compare and evaluate the methodology of analysis of cross bracing in steel structures with the use of calculation software. **Method.** The analysis consists of the comparison of operating methodologies of two different software which are heavily used in engineering, Sap2000 has "Frame" elements for beams, for which it applies the conventional matrix calculation, it also has "Shell" and "top" elements Asolid, for those that use a calculation by finite elements, and therefore the program performs linear and non-linear calculations (formation of plastic balls), the Inventor software contrasts with a unique analysis of finite elements in the structure, for the evaluation of cross bracing, these are considered as "Frames" in SAP2000 and analyzed by the matrix calculation according to the disposition presented. **Results** The matrix calculation shows levels of buckling, bending, moment diagrams, axial and shear forces in the braces, with this the profiling of profiles is practical, the calculation by finite elements shows the concentration of forces in each element belonging to the brace in addition to the deformations in this, inventor makes possible the simulation of bolted and soldered s. **Conclusion.** The methodology of design in structures follows a process which must be supported by a variety of calculations.

Key words: Methodology of design of steel structures; Arrests in structures; Matrix Calculation in structures; Calculation by finite elements in structures.

¹ Facultad de Ingeniería de Producción y Servicios. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú

² Docente ordinario. Doctor en Ingeniería en Energética.

² Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad José Carlos Mariátegui-Sede Ilo, Perú

^b Estudiante de Ingeniería Mecánica

³ Facultad de Ingeniería de Producción y Servicios. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú

^c Docente contratado a tiempo completo. Magíster en Ingeniería de Sistemas, coordinador de la Escuela Profesional Ingeniería de Sistemas e Informática. edsonml@yahoo.com

INTRODUCCIÓN

En ingeniería se presentan tres métodos factibles para la resolución de problemas, estos son el método experimental, método analítico y el método numérico. El método experimental es largo además de costoso para la solución de problemas, es aplicable únicamente si el prototipo posee disponibilidad de fabricación, y no es confiable si se ha realizado con una cantidad mínima de prototipos diferentes. El método analítico es el método clásico de solución de problemas en ingeniería, sus resultados son obtenidos con una variedad de suposiciones, consta de un análisis integral o diferencial según el caso, el cálculo matricial realizado por SAP2000 de estructuras pertenece a esta categoría de solución. El método matricial acepta determinadas hipótesis que se usan generalmente en la teoría de diseño de estructuras, las cuales son comportamientos elástico y lineal del material y estado de pequeños desplazamientos. Los métodos numéricos como el realizado por Inventor tienen sustento en el método analítico y es aplicable a problemas reales y comunes de naturaleza compleja, el cálculo por elementos finitos es un ejemplo de este método. El diseño de estructuras es planteado como problema ingenieril, por lo que la solución requiere un amplio discernimiento sobre el método por usar en el proceso.

Las estructuras, en general, constan de arriostres, los cuales son simétricos en distribución de masa, además representan una solución estructural beneficiosa para suministrar resistencia y rigidez en estructuras ⁽¹⁾. El análisis de concentración de esfuerzos y el cálculo matricial realizado con *software* de arriostres es relevante para el correcto diseño de estos en la actualidad. El arriostramiento en estructuras puede tener una disposición geométrica la cual depende de las condiciones externas de diseño como la sismo resistencia y el efecto de cargas de viento en la estructura completa, la disposición geométrica de arriostres modifica además, en determinado caso, el pandeo lateral, la carga axial a las columnas además de la distribución de momentos en el pórtico; por estas condiciones, el arriostramiento debe considerarse para el diseño adecuado; los parámetros de diseño a elegir pueden ser costo y seguridad, por lo que el diseño debe ser económicamente factible y resistente ⁽²⁾.

MATERIALES Y MÉTODOS

La ejecución de análisis con *software* realizó repetitivamente el dimensionamiento y simulación de el modelado realizado por el ingeniero Celso Sanga Quiroz, especialista en ingeniería estructural en acero; Edson Huertas Flores, ingeniero de sistemas, y el estudiante de Ingeniería Mecánica, Manuel Caipo Ccoa. Los datos evaluados son específicos, el *software* utilizado fue Autodesk Inventor para el análisis con elementos finitos, el *software* de contraste fue SAP2000 de la compañía CSI Spain; para esto, los ingenieros y el estudiante recibieron cursos de capacitación en el manejo de los *softwares*.

La metodología de diseño se basó en desplazamientos, llevando a cabo el siguiente proceso: definición cualitativa de desempeño, que es la descripción de factores aceptables de daño en el sistema en función a la rigidez de los elementos del sistema estructural ⁽³⁾.

La metodología del desarrollo del *software* SAP2000 para el análisis de vigas se sostiene en el análisis matricial convencional, la solución matricial convencional requiere una serie de suposiciones de análisis estático y lineal para un dimensionamiento correcto ⁽⁴⁾, el programa realiza un análisis no lineal en conjunto para analizar el sismo resistencia o la alternación de cargas en la estructura.

En contraste, la metodología de ejecución del *software* Autodesk Inventor realiza un análisis de elementos finitos, la cual es una aproximación numérica que tiene como base formulas y cálculos convencionales, para esto se da la discretización del cuerpo, que es el proceso de modelación que consiste en la división de un cuerpo, de manera equivalente, un sistema que se conforma con cuerpos de menor tamaño denominados elementos finitos conectados entre sí por puntos comunes llamados nodos, los cuales forman superficies y volúmenes de control completamente independientes entre sí, los cuales son afectados por las condiciones de frontera que afectan al cuerpo estudiado ⁽⁵⁾.

El material utilizado en la simulación del modelo es acero estructural, sin embargo, lo que tradicionalmente se ha entendido como acero no siempre alcanza la calidad necesaria para ser

considerado como tal, incluso en contextos actuales, el material puede contener impurezas las cuales no son distribuidas homogéneamente, sino que tienden a localizarse en determinados planos, lo cual llega a ser problemático al efectuar refuerzos sobre piezas con estas imperfecciones⁽⁶⁾.

Configuraciones geométricas de las arriostras

Los pórticos arriostrados claramente cambian en análisis al variar la distribución geométrica, lo cual hará variar en gran medida la distribución de esfuerzos en el pórtico analizado^[1]. Se muestra una comparación analítica de arriostres en distintas configuraciones geométricas realizando una comparación analítica de los elementos con fundamento en análisis de columnas y vigas estáticamente.

Cuatro de las configuraciones más usuales se representan esquemáticamente en la Figura 1. Una primera consideración para el diseño del sistema

de arriostramientos se relaciona con el ángulo de inclinación de las riostras, cuyo valor se recomienda que esté comprendido entre 30 y 60°.

En caso contrario, se desarrollan esfuerzos internos en las riostras o en el pórtico, que son desproporcionados y el sistema pierde eficiencia. Además, se puede dificultar la construcción de las conexiones entre las riostras y el pórtico. Esto usualmente se logra disponiendo un número par de riostras en cada plano resistente, con igual sección y ángulo de inclinación (como en los casos de la Figura 1). De esta forma, la inversión del sentido de carga produce alternancia de esfuerzos de compresión y tracción en las riostras, las que varían su resistencia y rigidez, pero la respuesta estructural del sistema es similar en ambos sentidos. Además, el adecuado balance entre riostras comprimidas y traccionadas evita la acumulación de distorsiones de piso inelásticas en una dirección^[2].

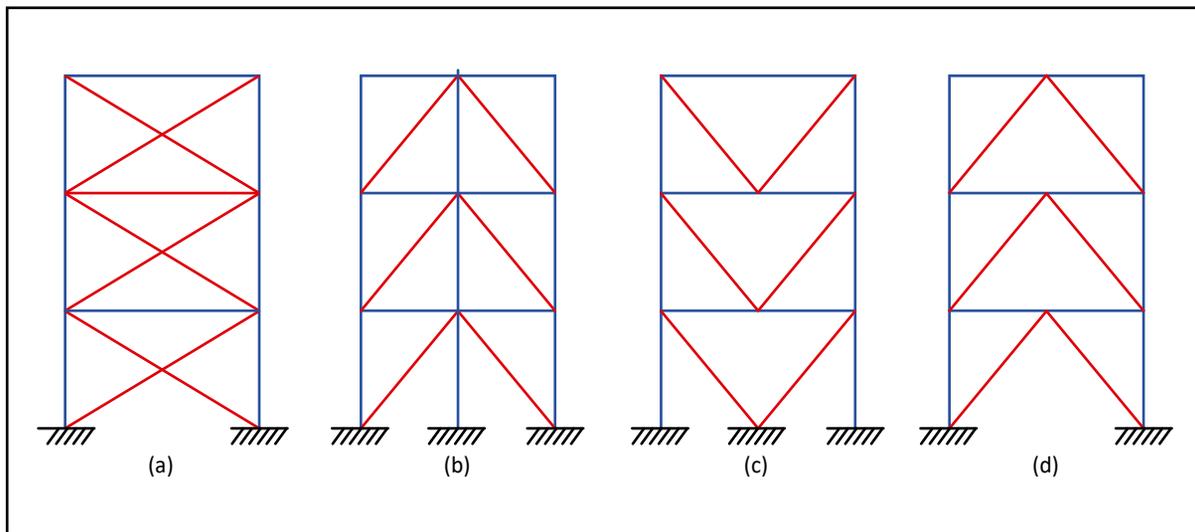


Figura 1. Configuraciones de riostra: (a) en X, (b) diagonales, (c) en V y (d) en V invertida o Chevron. ^[2]

RESULTADOS

Análisis con elementos finitos

El análisis de elementos finitos con inventor muestra deformaciones en varios puntos del pórtico, además de la concentración de esfuerzos en los elementos sujetos a carga, el *software* compara el esfuerzo al que se encuentra cada elemento del pórtico con el esfuerzo permisible del acero, y da factores

de seguridad, los resultados se muestran según una distribución de colores, para un factor de seguridad de uno el color representante es rojo, esta distribución de colores parte de azul como mínimo factor a posterior celeste y un factor intermedio de verde, la gráfica puede representar la concentración de esfuerzos de cada elemento o de otro modo los factores de seguridad a la que se encuentra el elemento.

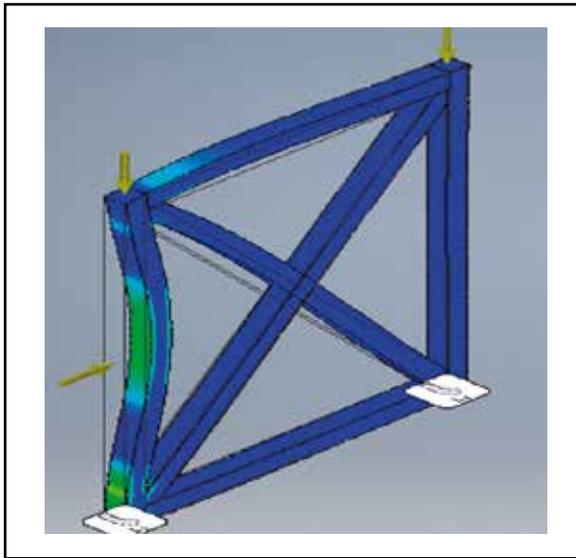


Figura 2. Análisis de elementos finitos dando muestra de comportamiento de desplazamientos

El pórtico mostrado está construido totalmente de acero con intersecciones articuladas perfectas, caso en el que se supo vibraciones mínimas y se desprecia el fallo de conexiones para el análisis, el perfil usado es de una barra cuadrada totalmente de acero con un área de una pulgada cuadrada, se ha verificado desplazamientos con cargas de cuatro toneladas que recibe axialmente de los demás elementos de la estructura y una carga lateral de dos toneladas, la cual es transmitida lateralmente por otros elementos de la estructura. Puede resaltarse la eficacia en desplazamientos laterales en comparación al planteamiento geométrico que continua.

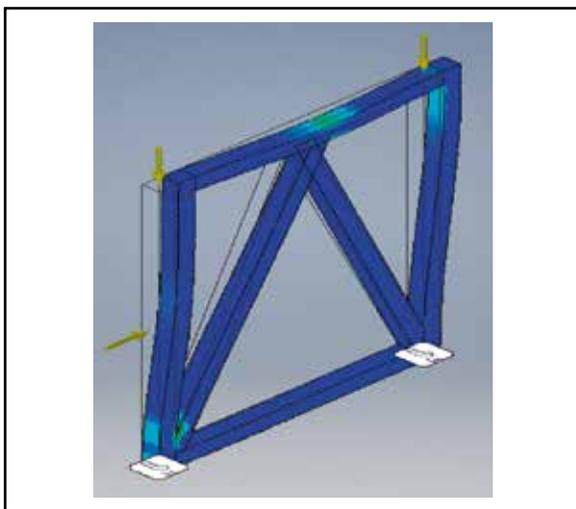


Figura 3. Análisis con elementos finitos de un pórtico con disposición V invertida

Puede notarse claramente que los desplazamientos laterales son mayores en comparación con el análisis anterior, sin embargo, puede notarse también que el esfuerzo axial ha disminuido y que el pórtico está bajo esfuerzos menores, esto se debe a la liberación de energía que se da al presentarse mayores desplazamientos. Puede notarse que la disposición en X reduce desplazamientos laterales, lo cual es adecuado para el diseño adecuado de toda estructura, sin embargo, la concentración de esfuerzos es mayor, lo que hace suponer que para efectos sísmicos la distribución en X supondrá un mayor riesgo de falla inmediata, en comparación de la distribución en V la cual tendrá un comportamiento más elástico, todo esto para mismos valores de carga y mismo material, área y disposición geométrica del pórtico.

Análisis por método matricial

El *software* que realiza el caculo matricial convencional el cual plantea una matriz de rigidez con características de la estructura [4] es Sap2000. De la siguiente disposición es posible afirmar que el arriostamiento cambia la rigidez y resistencia al pandeo de las columnas según sea la disposición geométrica. La descripción del pórtico es la siguiente, son pórticos cuadrados de tres metros de ancho y largo, los perfiles son tubos cuadrados de 2"x2"x1/4" de material acero A36. Notamos que el arriestre cruzado tiene mayor resistencia a cargas laterales, sin embargo, para efectos sísmicos se recomienda utilizar arriostres en "V".

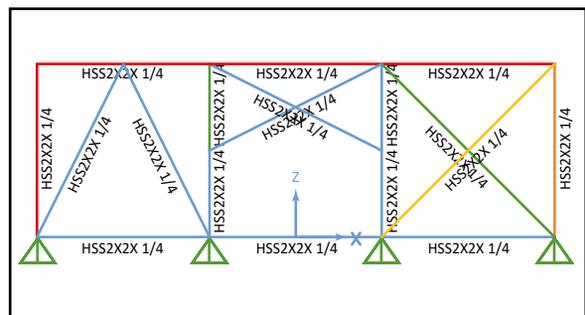


Figura 4. Factores de seguridad al ser sometidos a carga lateral de 0,5 ton y carga vertical en el sentido de la gravedad de 1 ton

La distribución de momentos es uno de los efectos más importantes del arriostamiento [2] esto se muestra en la Figura 5.

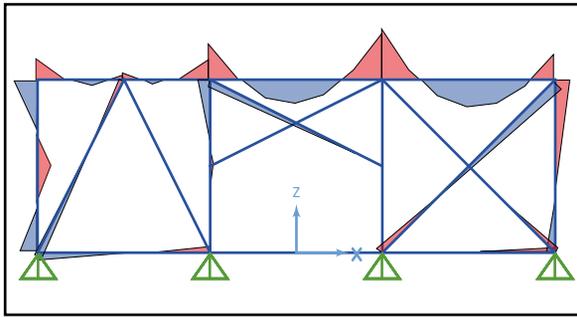


Figura 5. distribución de momentos según la distribución geométrica de las arriostras sometidas a la misma carga

Gracias a la presentada distribución de momentos es posible afirmar que los arriostres en "V" invertida reducen claramente la flexión en vigas, mientras que los arriostres en X ya que con inicio el restricción o mitad de columna dan mayor soporte a las columnas y evitan un posible pandeo.

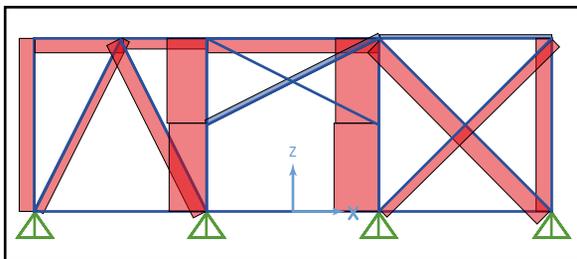


Figura 6. Distribución de cargas axiales en el pórtico.

Con respecto a las cargas axiales que se presentan en el pórtico es claro notar que un arriostramiento desde mitad de columna y en "X" representará una carga axial mayor a la columna, lo que repercutirá con la sección a utilizar en caso en que se tenga esa disposición, la columna deberá ser más robusta para esa distribución geométrica.

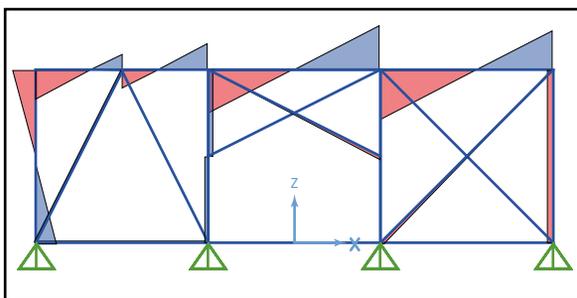


Figura 7. Diagrama de fuerzas cortantes de los elementos.

La distribución de estas fuerzas se da de mejor manera en el arrioste con disposición "V", es claro notar además que los arriostres no están sujetos a fuerzas cortantes en su utilización.

Análisis de conexiones en arriostres

El análisis realizado con anterioridad es únicamente referencial a un cálculo realizado con acero como material principal, se presenta a continuación un estudio realizado a las conexiones presentes en el arriostramiento en estructuras, para lo cual se parte de la representación de esfuerzos presentes en dichas conexiones. El análisis mostrado muestra la aplicación de carga axial a la columna de una tonelada, la carga de viento es dada por la norma técnica peruana E90 la que considera que 30 kg/m^2 es la consideración a nivel del mar, la carga de arrioste de la conexión se estima para un valor de 200 kg, los pernos poseen un diámetro nominal de 4 mm en el sistema ANSI METRIC. El análisis individual de la conexión se utiliza de modo que se verifiquen las cargas admisibles de la conexión para integrar los resultados a posterior el pórtico y su disposición geométrica dada.

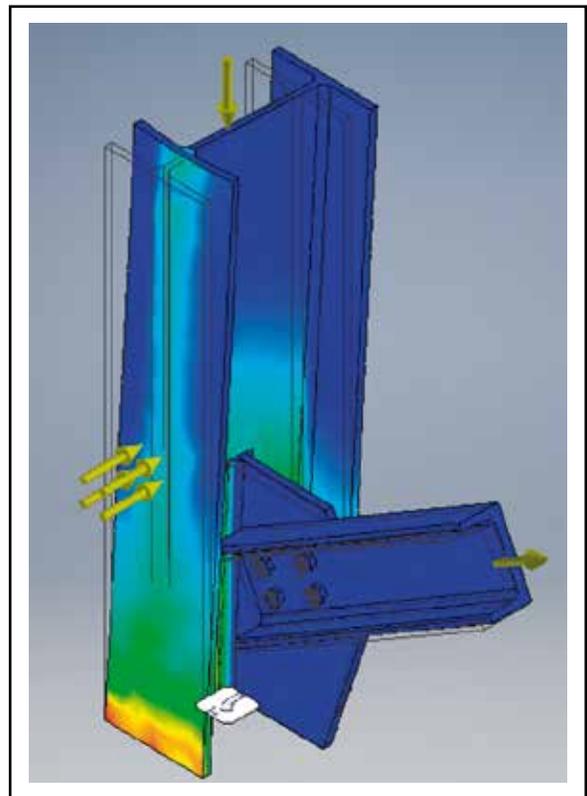


Figura 8. Análisis de fatiga por las cargas aplicadas

Podemos resaltar que la fatiga es por las cargas de viento ya que esta al ser una carga variable posee valores máximos y mínimos, en comparación con las cargas lineales las cuales son más estables y permanentes en la estructura considerando que el diseño de estructuras considera a cargas vivas en su análisis estático.

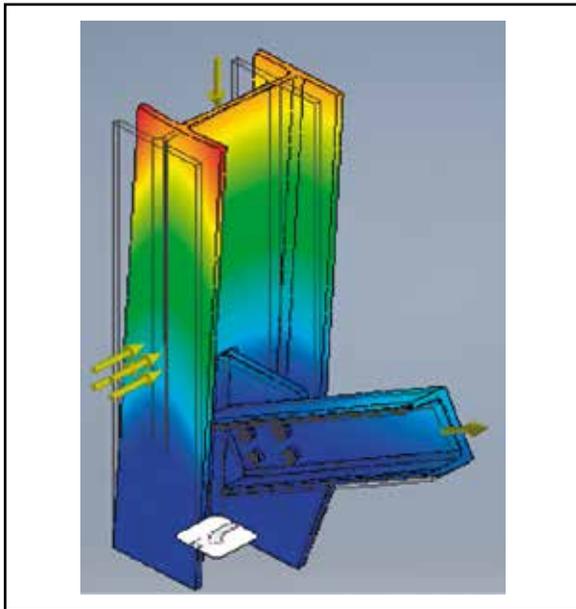


Figura 9. El análisis muestra los factores de seguridad en función a los desplazamientos dados en la conexión.

Podemos resaltar que los desplazamientos en la conexión axial de los arriostres son mínimos y que el desplazamiento mayor se da debido a la carga lateral de la estructura.

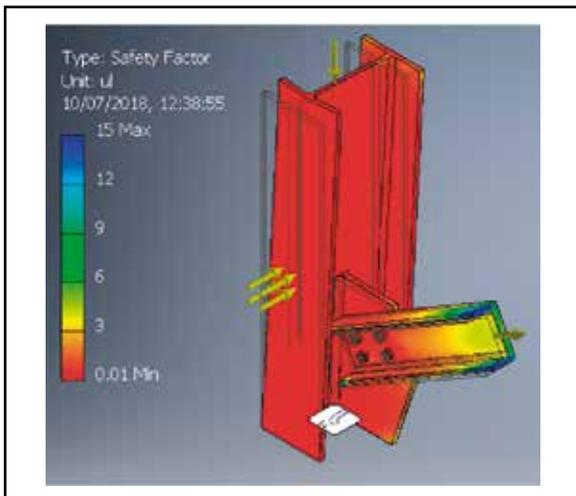


Figura 10. Factores de seguridad en la conexión

En este gráfico concluimos que las cargas axiales, de arriostre y de viento fueron excesivas para una conexión en voladizo.

Los factores se muestran bajos al solo tener un punto estable que se mantiene como bastidor de la simulación de la conexión, lo cual cambia al integrar la conexión a la estructura.

DISCUSIÓN

El diseño estructural es un proceso extenso lleno de variables que considerar en su metodología, sin embargo, este tiende a acercarse cada vez más a la estructura en la realidad; en el desarrollo de *software* de simulación se consideran variables muy consistentes y trascendentes en el diseño, la pregunta sería si es adecuado que para el diseño de una estructura o partes de esta como los arriostres se tomen cada vez más variables de análisis, de modo que el *software* de operación necesite recursos inmensos para la solución de estos, el análisis no lineal mediante computador requiere recursos altos de *software* y *hardware*, por lo que si se da a considerar variables más complejas se demandará requerimientos cada vez más altos.

CONCLUSIONES

Se concluye que el flujo de diseño de una estructura puede comenzar con un predimensionamiento con análisis estático realizado por Sap2000 y continuar con un análisis de conexiones y desplazamientos no lineales con Autodesk Inventor.

Se concluye que el proceso de diseño estructural puede reducir su tiempo de ejecución y análisis con la utilización de *software* de cálculo, pero en contraste debe conocerse la operación matemática que realiza el *software* además de interpretar correctamente los resultados.

De los resultados se puede concluir que los pórticos con arriostros tipo V invertida, tienen una respuesta sismorresistente satisfactoria, siempre que se contemplen normas de construcción como también las normativas propuestas para conexiones.

Concluimos que el uso de diversos medios de análisis de una estructura brinda mayor confiabilidad y efectividad que la utilización de únicamente una metodología teórica.

Se añade a esto que todo arriostamiento requiere un análisis extenso de la aplicación y las circunstancias que este presentará.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. S. Vinnakota, Estructuras de acero: comportamiento y LRFD, McGraw-Hill, 2006.
2. F. J. CRISAFULLI, Diseño sismorresistente de construcciones de acero, Mendoza, 2018.
3. Terán Gilmore y G. coeto Galaz, «Dimensionamiento preliminar basado en rigidez de edificios altos con estructura de acero rigidizados con diagonales concéntricas,» Revista de Ingeniería Sísmica, n° 9034-54, p. 20, 2014.
4. J. L. Blanco Claraco, A. González Herrera y J. M. García-Manrique Ocaña, Análisis Estático de Estructuras por el Método Matricial, Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico de la Universidad de Málaga, 2012.
5. J. R. Atienza y A. Agüero, «Diseño de estructuras metálicas esbeltas susceptibles de pandear. Definición de la imperfección geométrica,» ELSEVIER, 2013.
6. J. Hierro, A. Aznar, J. Hernando, J. de la Torre y J. Ortiz, «Criterios para el refuerzo de estructuras metálicas,» Revista Ingeniería de Construcción RIC, 2014.
7. J. Sánchez y F. Escrig, «DISEÑO Y ANÁLISIS DE UNA GRAN CUBIERTA Y,» Informes de la Construcción, 2015.

Correspondencia: Celso Sanga Quiroz

Facultad de Ingeniería de Producción y Servicios. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa 04001 Perú
antonioce1211@hotmail.com