

Análisis de estabilidad estructural en un tubo de pared delgada reforzado con fibra de carbón

Rodrigo Andrés Calvo Ocampo; Doctor Elías Ledesma Orozco

1 [Ingeniería Mecánica, Universidad Santo Tomás de Aquino Sede Bogotá.] | Dirección de correo electrónico: [rodrigocalvo@usantotomas.edu.co]

2 [Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [elias@ugto.mx]

Resumen

El pandeo es uno de los fenómenos estructurales más interesantes que se presentan en el desarrollo diario del análisis de un Ingeniero Mecánico.

En este artículo se plantea un modelo desarrollado de manera lineal y no lineal, que consiste en un tubo de pared delgada que es reforzado con fibra de carbono y que se asemeja a un tanque de almacenamiento de hidrogeno, por resistir en su interior altas presiones. Este modelo reforzado con fibra de carbono nos permite obtener una mayor resistencia a los esfuerzos causado por la presión interna a la que va estar sometido. Para llevar a cabo poder realizar este estudio, previamente hemos realizado una validación de nuestro modelo por medio de la linealidad, permitiéndonos hacer una comprobación entre la obtención de datos de manera teórica y del software [APDL ANSYS] que hemos implementado. Para así verificar si es correcta o no la forma en que se implementó el modelo en la siguiente etapa de estudio, una vez hemos desarrollado esta validación, procedemos a implementarla en un modelo más complejo, de carácter "No Lineal" que está constituido por materiales compuestos .

Abstract

The buckling is one of the most interesting structural phenomena that occur in the daily development of the analysis of a Mechanical Engineer. In this paper a developed linearly and nonlinear model, consisting of a tube of thin wall is reinforced with carbon fiber and resembling a storage tank hydrogen, resist within high pressure arises. This model carbon fiber reinforced allows us to obtain greater resistance to the stresses caused by the internal pressure that will be subjected. To perform to perform this study, we previously performed a validation of our model through linearity, allowing us to make a check between data collection and theoretically [APDL ANSYS] software we have implemented. In order to check if it is correct or not the way in which the model was implemented in the next stage of study, once we have developed this validation, we proceed to implement a more complex model of character "Nonlinear" which is constituted by material compounds.

Palabras Clave

Pandeo; Análisis lineal ; Análisis no lineal ;Validación

INTRODUCCIÓN

En el pandeo podemos encontrar que las estructuras y elementos mecánicos pueden fallar dependiendo de su forma, materiales, condiciones de apoyo o frontera, y por el tipo de carga que se le aplica.

Un ejemplo claro para entender esto, es cuando aplicamos una carga excesiva a una estructura y esta falla flexionándose.

A continuación se hará un acercamiento a la descripción teórica del comportamiento del pandeo; así mismo se dará a conocer cómo se comporta un modelo Lineal y No Lineal.

Pandeo y estabilidad en columnas:

Cuando hablamos de pandeo, nos referimos a una falla que se presenta cuando un elemento está sometido a compresión. Para este caso particular, para analizaremos el pandeo que se presenta en columnas, donde una columna es un miembro estructural largo y esbelto cargado axialmente en compresión.[1]

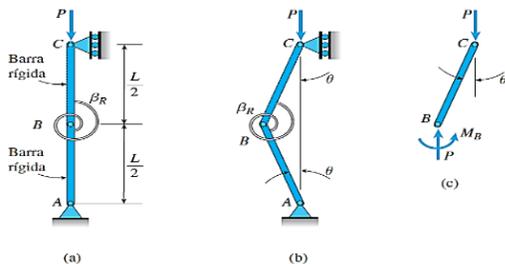


IMAGEN 1.1 Pandeo de una estructura idealizada que consiste en dos barras rígidas y un resorte rotacional

Esta estructura hipotética consiste en dos barras rígidas AB y BC, cada una con longitud $L/2$, unidas en B por un pasador y mantenidas en posición vertical por un resorte rotacional con rigidez β_R . [2]

En esta estructura idealizada las dos barras están perfectamente alineadas y la carga axial P tiene su línea de acción a lo largo del eje longitudinal [Imagen 1.1 a]. En consecuencia, el resorte inicialmente no está sometido a esfuerzo y las barras están en compresión directa.

Ahora suponiendo que la estructura es perturbada por alguna fuerza externa que causa que el punto B se mueva una distancia pequeña en sentido lateral [Imagen 1.1 b].

Carga Crítica:

La carga crítica es el estado en que la estructura ya está perturbada ha falla con dicha fuerza aplicada, [IMAGEN 1.1 c]. La solución general para el pandeo en columnas es: [1]

$$P_{CR} = \frac{4\beta_R}{L}$$

Ahora para entender este problema aplicado a tubos de pared delgada, tenemos que: [3]

$$P_{CR} = \frac{Et^3}{4R^3(1-\nu^2)}$$

Donde:

- E : es el Modulo de Elasticidad.
- t : es el espesor del tubo.
- R : es radio.
- ν : es la razón de Poisson.

Linealidad y no Linealidad de un Modelo.

La linealidad Se define como el comportamiento que tiene una ecuación cuando su grado no es superior a uno, esto quiere decir cuando se comporta como una línea recta; y la no linealidad se define como el comportamiento que tiene una ecuación cuando su grado es superior a uno, esto quiere decir cuando se comporta de manera exponencial.

Aplicación de la linealidad y no linealidad en el pandeo:

Al entender la diferencia entre estos dos comportamientos, procedemos a entender este problema aplicado al pandeo; diciendo entonces que el término "rigidez" define la diferencia

fundamental entre el análisis lineal y el no lineal. La rigidez es una propiedad de una pieza o ensamblaje que caracteriza la respuesta ante la carga aplicada. Tres factores principales afectan a la rigidez: forma, material y soporte de la pieza.

Cuando una estructura se deforma bajo una carga, su rigidez cambia, debido a uno o más de los factores que se han mencionado anteriormente. Si se deforma mucho, la forma puede cambiar.

Si el cambio de rigidez es suficientemente pequeño, es lógico asumir que las propiedades de la forma o las del material cambiarán durante el proceso de deformación. Esta suposición es el principio fundamental del análisis lineal.

Esto significa que a través de todo el proceso de deformación, el modelo analizado mantuvo la rigidez que poseía en la forma anterior a su deformación, con la aplicación de la carga. Independientemente de cuánto se deforme el modelo, si la carga se aplica en un paso o gradualmente, y sin importar lo altas que sean las tensiones que se desarrollan en respuesta a la carga, el modelo mantiene la rigidez inicial.[4]

Esta suposición simplifica enormemente la formulación del problema y su solución. Ahora decimos que la ecuación y la manera en que el software de análisis resuelve el problema de pandeo está regido por:[4]

$$[F] = [K] * [d]$$

Donde:

[F] es el vector conocido de cargas nodales

[K] es la matriz de rigidez conocida

[d] es el vector desconocido de desplazamientos nodales

Esta ecuación de matriz describe el comportamiento de los modelos de FEA. Contiene un gran número de ecuaciones algebraicas lineales, que varían de miles a millones dependiendo del tamaño del modelo. La matriz de rigidez [K] depende de la geometría, las propiedades del material y las restricciones.[4]

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación tenía como objetivo realizar un acercamiento al fenómeno de pandeo presente en columnas y tubos sujetos a presión externa con el fin de ser aplicada luego en problemas más complejos como lo es un tubo recubierto por fibra de carbono y de comportamiento no lineal, el cual necesito una verificación del modelo de estabilidad estructural comparados por medio de un análisis lineal, el cual dio la base de partida.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de un tubo de aluminio sometido a presión externa

El comportamiento de un tubo sometido a presión externa y de manera lineal en sus propiedades, es un modelo que es aplicado para poder obtener una validación del procedimiento y verificar la forma en que un tubo actúa en relación a la teoría que lo soporta; ya que al comprobar teóricamente el comportamiento no lineal de un tubo hecho por materiales compuestos, exige un nivel mayor de disciplina para el desarrollo de las ecuaciones que este requiere para obtener su solución.

Es decir, que es posible utilizar el mismo procedimiento al modelo no lineal y ver su comportamiento sin necesidad de llegar a la solución teórica.

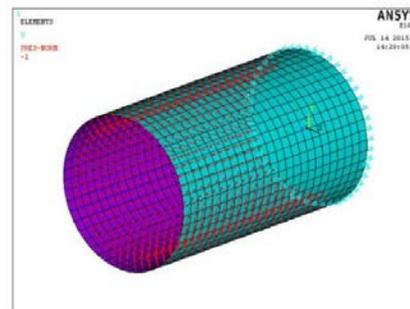


IMAGEN 2.1 Tubo de aluminio sometido a presión externa.

Carga crítica obtenida teóricamente:[3]

$$P_{CR} = \frac{10E^6 * 0.25^3}{4 * 15^3(1 - 0.3^2)}$$

$$P_{CR} = 12.71lb$$

Validación del análisis de un tubo de aluminio sometido a presión externa

Carga crítica y modo de comportamiento obtenidos por medio del software ANSYS APDL[5]

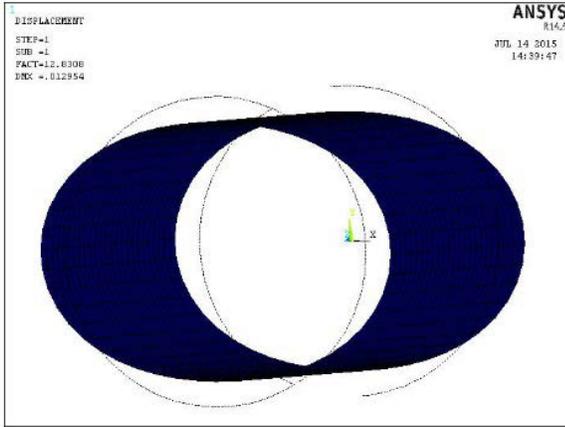


IMAGEN 2.2 Obtención del primer modo de comportamiento y el valor de la carga crítica.

Como se muestra en la IMAGEN 2.2 se obtuvo comportamiento del primero modo y el valor de la carga crítica a la que va a fallar.

$$P_{CR} = 12.831b$$

Una vez hemos hecho esto procedemos a comprobar el comportamiento de este mismo tubo sometido a características de no linealidad, esto se logra por medio del Software Ansys APDL[6]

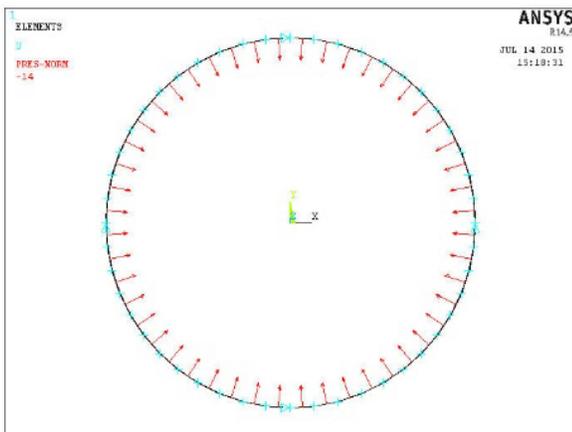


IMAGEN 2.3 Aplicación de la carga crítica en el modelo No Lineal.

Características del modelo Lineal para la validación:

Tabla 1: Características del modelo para la validación.

Características.	Valor	uni
Geometría		
1. Radio	15	in
2. Longitud	50	in
3. Espesor	0.25	in
Material[Aluminio]		
4. Módulo de elasticidad	10	Mpsi
5. Razón de Poisson	0.3	

Para poder resolver este problema, se debe aplicar un valor un poco mayor o muy cercano al obtenido por medio de la solución no lineal, entonces para este caso se aplico $P_{CR} = 141b$ como se muestra en la IMAGEN 2.3.

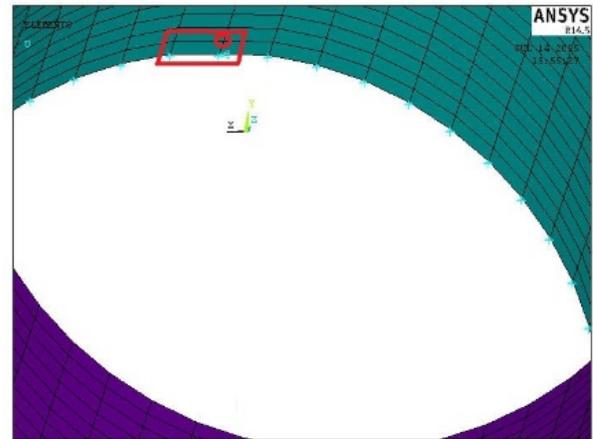


IMAGEN 2.4 Aplicación de la carga crítica en el modelo No Lineal.

Luego de haber aplicado la carga procedemos a solucionar nuestro modelo y analizar uno de los elementos y también un nodo de lo que están cerca de los soportes, como se muestra en la IMAGEN 2.4, en donde se analiza la reacción con respecto a "Y", al hacer que este análisis del Software nos muestra una gráfica de la reacción respecto al tiempo [IMAGEN 2.5].

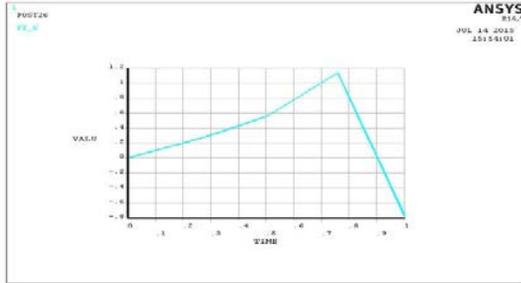


IMAGEN 2.5 Aplicación de la carga crítica en el modelo No Lineal.

Según la gráfica de la IMAGEN 2.5, respecto a la aplicación de la carga en el instante .7 aproximadamente, es cuando hace un cambio abrupto el comportamiento de la gráfica, siendo 1 la aplicación máxima de la carga, para este caso sería $P_{CR} = 14lb$ y así mismo porcentualmente respecto al tiempo ;entonces al instante .7 nos indica cuando se da la falla por pandeo en la estructura, entonces la carga que se aplico fue $P_{CR} = 14$, y el instante de tiempo en el que cambio la gráfica fue en .7 , entonces:

$$P_{CR} = 14lb * .7$$

$$P_{CR} = 9.8lb$$

Este resultado nos dice que esa será la carga a la cual va a fallar el tubo sometido a presión externa.

Una vez hemos hecho esto y comprobado cómo se comporta el modelo, procedemos aplicar el mismo procedimiento en el modelo del tubo de aluminio, que está recubierto por capas de fibra de carbón.

Análisis de un tubo de aluminio recubierto por capas de fibra de carbono sometido a presión externa.

Anteriormente se mencionó que para llegar a desarrollar el análisis de este modelo se debía hacer una validación previa; como ya se ha hecho empezamos definiendo las características del problema, puesto que este es más complejo al poseer una análisis por materiales compuestos ya que es un tubo de aluminio recubierto por tres capas de fibra de carbono de manera orto trópica transversalmente isotrópico. Las propiedades del material son necesarias para definir las dentro del software, estas propiedades hacen referencia a

cada una de las direcciones del material, estas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Características tubo recubierto en fibra de carbono.

Características.	val	uni
Geometría		
1. Radio	6	in
2. Longitud	60	in
3. Espesor Aluminio	0.25	in
4. Espesor AS4 epoxy[Capa 1]	0.125	in
5. Espesor AS4 epoxy[Capa 2]	0.0475	in
6. Espesor AS4 epoxy[Capa 3]	0.0475	in
Material[Aluminio]		
7. Módulo de elasticidad	1.00E+07	psi
8. Razón de Poisson	0.3	
Material[AS4 epoxy][7][8]		
9. E11	18.4	Mpsi
10. E22,E33	1.6	Mpsi
11. V12,V13	0.28	
12. V23[7]	0.59	
13. G12,G13	0.95	Mpsi
14. G23	0.5	Mpsi

Análisis lineal de un tubo de aluminio recubierto por fibras de carbono sometido a presión externa

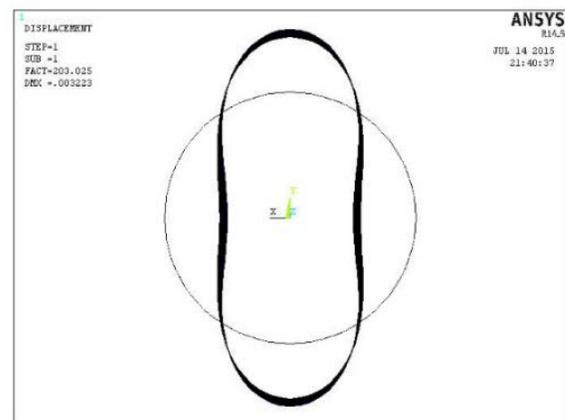


IMAGEN 2.6 Obtención de la carga crítica y el primer modo para un tubo de aluminio recubierto de fibra de carbono.

Por medio de este análisis no lineal obtenemos la carga a la cual fallara por pandeo el tubo:

$$P_{CR} = 203.025lb$$

Análisis No lineal de un tubo de aluminio recubierto por fibras de carbono sometido a presión externa

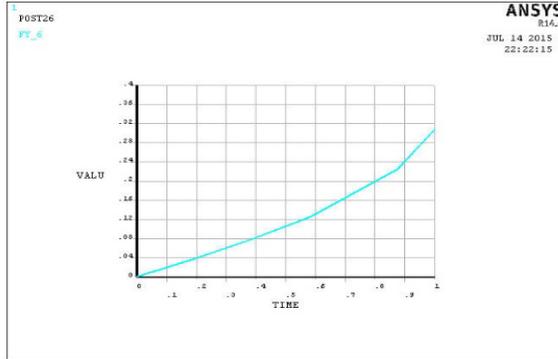


IMAGEN 2.7 Aplicación de la carga crítica en el modelo No Lineal respecto al tiempo.

Para este análisis se desarrolló el mismo procedimiento que se hizo en la validación, en este caso se aplicó una carga de $P_{CR} = 220lb$. Entonces en el instante .87 es cuando se presenta el mayor cambio en la gráfica, entonces decimos que la carga crítica a la cual fallará el tubo es:

$$P_{CR} = 220lb * .87$$

$$P_{CR} = 192.4lb$$

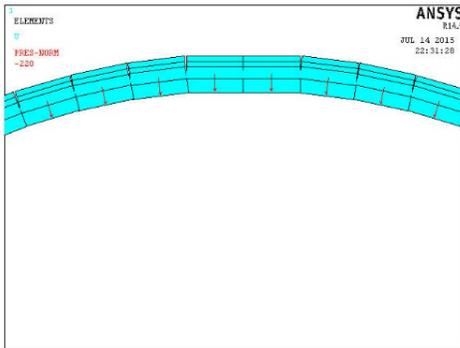


IMAGEN 2.8 Aplicación de la carga crítica en el modelo No Lineal y capas de materiales.

CONCLUSIONES

El análisis No lineal se acerca más a lo que realmente puede pasar en una estructura, ya que

este contempla las variaciones en la matriz de rigidez.

Al usar materiales compuestos, aumentamos la resistencia general de la estructura, ya que estas nos permiten manejar la dirección en la que deseamos resistir los esfuerzos.

La comprobación teórica de la carga crítica del comportamiento del tubo recubierto por fibras de carbono exige una mayor complejidad de desarrollo, por lo tanto se procedió hacer una validación previa a este para poder estudiar el comportamiento solo con ayuda del software.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a mi tutor el Doctor Elías Ledesma Orozco quien me brindó sus conocimientos y experiencias para el desarrollo de esta investigación. , durante mi estancia en la Universidad de Guanajuato, en el periodo de verano (de junio a julio de 2015)

También agradecer a mi Alma Máter la Universidad Santo Tomás de Aquino [Sede Bogotá Colombia], por darme y darme la oportunidad de haber sido seleccionado para asistir a esta gran experiencia, la cual agradezco a todos los que fueron parte de ella, y por último quiero agradecer a mi familia por brindarme su apoyo en esta experiencia .

REFERENCIAS

Libro:

- [1] J. Gere and S. Timoshenko, *Mecánica de Materiales*, 2da ed. 1986.
- [2] J. M. Gere and B. J. Goodno, *James M. Gere • Barry J. Goodno*, Séptima Ed. 2009.
- [3] J. Faupel, *Engineering Design : A synthesis of stress Analysis and Materials Engineering*, Second Ed. 1981.
- [4] SolidWorks Corp., "Comprensión del análisis no lineal," p. 15, 2011.
- [5] J. Swanson, "ANSYS APDL, Linear Buckling Help." 1963.
- [6] J. Swanson, "Ansys APDL , Nonlinear Buckling Help," 1963.
- [7] C. Herakovich, *Mechanics of Fibrous composites*. 1997.
- [8] A. Reddy, J .Miavect, *Practical Analysis of composites Laminates*. .