

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Preámbulo

Los actuadores hidráulicos hacen parte del grupo de componentes más utilizados en la industria hidráulica de potencia, y su uso abarca diversas aplicaciones, como levantamiento, empuje, tracción, etc., haciendo que la carga a compresión aplicada sea uno de los factores más importantes sobre el cual se basa su diseño. Esta carga sobre el actuador provoca efectos combinados de compresión y flexión, debido a su interacción con la máquina o mecanismo a la cual queremos transmitir energía.

Los fabricantes de cilindros ofrecen a los usuarios métodos gráficos, tablas o fórmulas con el fin de seleccionar la longitud del vástago necesaria para soportar el fenómeno de pandeo (en general, la carga crítica según Euler). No tienen en cuenta otros factores que se presentan como juegos e imperfecciones en la conexión vástago-cilindro, fricción de las partes en contacto o excentricidad de la carga aplicada. Es por esto que se hace necesario el estudio de estos efectos como factores importantes que inciden directamente en su capacidad de carga.

El contenido de esta tesis se centra en el estudio de cilindros articulados en los extremos (o apoyos simples), ya que para los actuadores oleohidráulicos, tal configuración, además de tener una amplia aplicación, se convierte en una configuración crítica, en relación a la carga aplicada; es decir, presenta las condiciones más desfavorables para su capacidad de carga (colapso del cilindro).

Esta tesis está relacionada con un proyecto macro cuyo título es "***New design and manufacturing processes for high pressure fluid power products***" - **2004-2008** (acrónimo: PROHIPP). Este proyecto es cofinanciado por la Unión Europea dentro del 6º programa Marco. En este proyecto intervienen 22 entidades de 8 países distintos entre pequeñas y medianas empresas europeas, centros de investigación y universidades. El objetivo, en términos generales del PROHIPP, es desarrollar, validar y diseminar nuevos métodos de diseño y procesos de manufactura basados en el conocimiento (Design by analysis and

design by categories). Su enfoque está dirigido hacia cilindros oleohidráulicos y acumuladores, como componentes sometidos a alta presión interna.

1.2 Planteamiento del problema

En principio los actuadores hidráulicos son asumidos por los fabricantes para su diseño contra pandeo, como columnas ideales cargadas concéntricamente. Aún así, las columnas reales, difieren de una columna ideal debido a las imperfecciones, como la curvatura inicial del eje longitudinal, las condiciones imperfectas de los soportes y la no homogeneidad del material. Además, aún cuando se supone que la carga está centralmente aplicada, habrá excentricidades inevitables en su dirección y punto de aplicación. Todas las imperfecciones tienen el efecto de producir flexión además de compresión directa.

Adicional a esto, en los actuadores hidráulicos existen movimientos relativos entre piezas, involucrando con esto otros factores que aumentan la posibilidad de generación de momentos flectores progresivos en relación al desgaste entre elementos sometidos a fricción, como son los anillos guía, rascadores y juntas. También, inevitablemente existirán excentricidades o momentos flectores en los extremos, con la aplicación de las cargas compresivas, que variarán de acuerdo al tipo de montaje en función de la aplicación del actuador.

Los fabricantes de actuadores hidráulicos utilizan la carga de Euler, como carga de diseño o carga máxima admisible, considerando el actuador como una barra equivalente con sección transversal y momento de inercia del vástago y cuya longitud total (longitud equivalente) está definida de acuerdo a las condiciones de montaje (Fig.1.1). De esta manera:

$$P_E = \frac{p^2 \cdot E_2 \cdot I_2}{L_e^2 \cdot u} \quad (1.1)$$

La longitud L_e (le en Fig. 1.1) está definida entre los puntos de apoyo y para el caso más crítico: actuador extendido; y depende de la ubicación del soporte en el cilindro (base, intermedio o extremo del cilindro).

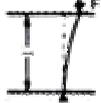
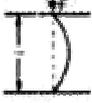
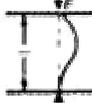
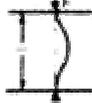
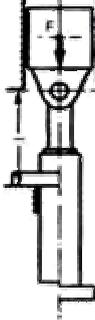
Solicitaciones según Euler				
Solicitaciones según Euler	Caso 1	Caso 2 (básico)	Caso 3	Caso 4
	Un extremo libre, un extremo fijo	Dos extremos articulados	Un extremo articulado, un extremo fijo	Dos extremos fijos
Gráfico				
Longitud libre de pandeo	$l_e = 2l$	$l_e = l$	$l_e = l \cdot \sqrt{\frac{1}{2}}$	$l_e = \frac{l}{2}$
Situación de montaje del cilindro			Indicación: Guiado cuidadoso de la carga, posible bloqueo 	Indicación: Destavorable, gran posibilidad de bloqueo 

Fig. 1.1 Métodos de fijación de cilindros y longitud equivalente para ecuación de Euler.

La Fig. 1.1 muestra además, cómo, de acuerdo a las condiciones en que está montado el actuador, pueden generarse una reducción en el valor de las cargas críticas [expresión (1.1)] si las longitudes equivalentes aumentan, incrementando así el riesgo de pandeo. Así, el caso 1 presenta la situación mas crítica (carga admisible baja) mientras que el caso 4 la situación mas favorable (carga admisible alta).

Para la selección del diámetro adecuado del vástago, de una manera práctica de acuerdo a la carga de Euler (1.1), los fabricantes ofrecen gráficos como el presentado en la Fig. 1.2. Este diámetro será función de la carga que soportará el actuador, el factor de seguridad que se emplee y la longitud equivalente ('Longitud virtual' en la Fig. 1.2).

Como ya se ha mencionado este criterio de diseño, limitado en la ecuación de Euler, asume el actuador oleohidráulico como una columna ideal (cuerpo rígido), sin considerar los efectos generados por diferentes factores que se presentan en cualquier aplicación real, como imperfecciones de montaje, desalineamiento inicial, falta de coaxialidad entre vástago y cilindro debido al desgaste en los

anillos guía, así como momentos de fricción en los apoyos y excentricidad en la aplicación de la carga.

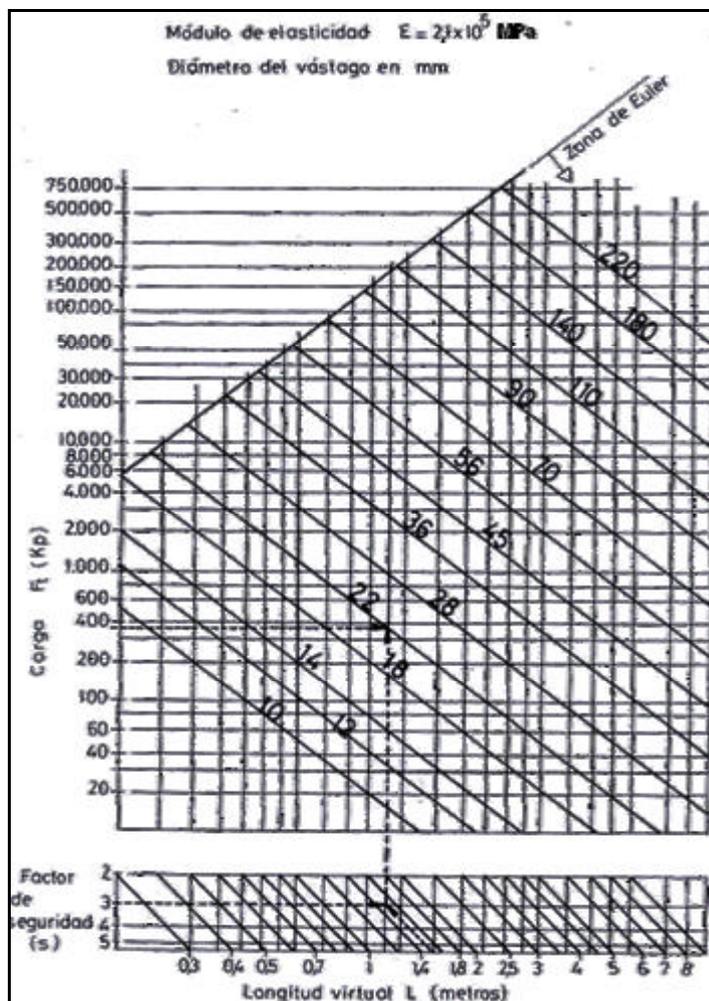


Fig. 1.2 Gráfico, determinación de diámetro de vástago, en función de carga a soportar, coeficiente de seguridad y longitud equivalente (Fig. 1.1)

Los momentos de fricción pueden convertirse en un factor importante considerando que los actuadores oleohidráulicos de acuerdo a su aplicación actúan como componentes dentro de un mecanismo. Así por ejemplo los cilindros de la excavadora (Fig. 1.3) están articulados en sus puntos de apoyo y actúan como elementos de mecanismos.

En condiciones ideales (rozamiento nulo en apoyos) los cilindros soportan cargas exclusivamente a compresión P , pero en ambientes de trabajo pesado es inminente la presencia de polvo, desajustes y desgaste en los elementos de unión, que conlleven a generar, con la interacción del mecanismo, fricciones en

los puntos de apoyo, provocando momentos M que tiendan, además de los factores anteriormente mencionados, a reducir, posiblemente, la capacidad de carga del actuador, dependiendo de la aplicación del mismo.



Fig. 1.3 Foto, excavadora

Estos efectos hacen que la carga crítica disminuya en función de los diferentes fenómenos antes mencionados, generando entre otras un riesgo de flexión permanente en el vástago que repercutirá finalmente en un desgaste progresivo de las juntas presentes en la conexión.

En este contexto, se requiere una investigación teórica y experimental, que ponga en evidencia las ventajas e inconvenientes de los métodos propuestos hasta la actualidad y permita analizar y determinar los factores más críticos que causan el colapso, y permita proponer unos criterios de diseño útiles para minimizar el riesgo de colapso de los cilindros oleohidráulicos.

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

General

Estudiar la capacidad de carga de los actuadores lineales oleohidráulicos bi-articulados.

Específicos

- Estudiar las teorías de pandeo de elementos estructurales y realizar un análisis crítico del estado del arte en relación a la capacidad de carga de los cilindros oleohidráulicos.
- Desarrollar un modelo que describa los efectos de la carga aplicada sobre cilindros oleohidráulicos, teniendo en cuenta todos los factores que de alguna manera puedan influir sobre la capacidad de carga de cilindros, entre las cuales pueden encontrarse: desalineamiento entre vástago y tubo debido a juegos, tolerancias de fabricación y desgaste de elementos en contacto (como anillo guía), excentricidades y rozamiento en los puntos de apoyo del actuador, etc.
- Diseñar y construir un banco de pruebas, que permita someter a cargas estáticas los cilindros, objeto de estudio y la medición experimental de las variables más importantes que intervienen en el fenómeno tales como, carga aplicada (presión hidráulica empleada), deflexiones laterales del actuador, deformación y tensiones en el vástago, desplazamiento longitudinal (compresibilidad del fluido), etc.
- Desarrollar una metodología experimental que permita, entre otras cosas, la validación de los resultados de los modelos teóricos desarrollados.
- Redactar unos criterios de diseño y unas recomendaciones, en relación a todos los factores influyentes en la capacidad de carga de los cilindros oleohidráulicos.

1.4 Descripción del documento

Esta tesis está desarrollada en 5 capítulos. En el primer capítulo se sustentan las razones del planteamiento de este proyecto y los objetivos buscados. El segundo corresponde al estado del arte del fenómeno del pandeo. Por la relevancia del tema se plantean inicialmente las teorías correspondientes al pandeo de columnas.

Como base fundamental de estudio ha sido necesario analizar detenidamente los aportes que realizan algunos autores en el tema de la capacidad de carga de los cilindros oleohidráulicos. Se presenta entonces, el estudio de las publicaciones con mayores aportes en este tema, iniciando por la Norma ISO 13725 (Hydraulic fluid power –cylinders- Method for determining the buckling load) que normaliza el cálculo de la carga máxima admisible de actuadores oleohidráulicos. Estas publicaciones analizadas pretenden básicamente plantear las ecuaciones que describen el comportamiento (deflexiones y tensiones) de un actuador oleohidráulico sometido a carga axial. La Norma dentro del estado del arte, será analizada para actuadores articulados en sus extremos; las demás condiciones de contorno se analizan en el anexo A. Al final del capítulo se presenta una matriz que resume los factores analizados por los autores en las diferentes publicaciones

El método planteado en la documentación publicada por la Norma [11] deja bastantes dudas al lector, para su efectiva aplicación en la industria oleohidráulica. En el anexo A, mediante criterios de resistencia tratados de una manera simple, se permite al lector de la Norma una mejor interpretación de ésta. Se expone además un software de aplicación de la Norma, de fácil manejo por parte de fabricantes y personas en general que tenga relación con el diseño, selección y fabricación de cilindros oleohidráulicos.

El capítulo 3 se dedica a analizar teóricamente los cilindros oleohidráulicos sometidos a carga axial, determinando las diferentes tensiones y deflexiones resultantes bajo determinadas solicitaciones de carga, determinando así, los efectos generados de diferentes parámetros sobre la capacidad de carga de los cilindros. En este análisis se involucran todos los factores presentes dentro de una aplicación real entre las cuales están: imperfección inicial entre vástago y cilindro debido a juegos por montaje y/o desgaste, momentos por fricción y excentricidad en los puntos de apoyo.

El capítulo 4 describe el banco de pruebas empleado para validación experimental de los resultados teóricos del modelo propuesto, así como los elementos que incorporan todo el sistema de adquisición de señales necesarias

en las pruebas realizadas, como es la descripción de los elementos de sensado, conexiones eléctricas y programa de adquisición y almacenamiento de datos.

En el capítulo 5 se desarrollan las pruebas experimentales del proyecto, entre las cuales se encuentran: medición de la tensión del vástago y deflexión del cilindro oleohidráulico en función de la carga aplicada, pruebas con variación de la imperfección inicial, pruebas con aplicación de momentos externos, pruebas con variación de las condiciones de contorno en los extremos. Además, se realizan análisis mediante herramientas de elementos finitos para relacionar los resultados teóricos obtenidos en relación a tensiones y deformaciones de un tubo-cilindro debidas a la presión interna del fluido. En este capítulo, paralelo a la obtención de resultados experimentales, se realiza un análisis de validación con los resultados teóricos del modelo propuesto en el capítulo 3. Este capítulo cubre el análisis de un cilindro oleohidráulico sometido a carga axial, bajo diferentes condiciones de contorno.

Al final del documento se plantean las conclusiones del proyecto, en donde se resaltan los factores que influyen de manera importante sobre la capacidad de carga de los cilindros oleohidráulicos, y se realizan algunas recomendaciones en la proyección del trabajo de investigación realizado.