

CONCLUSIONES

Las conclusiones que se pueden sacar de los resultados obtenidos en los trabajos experimentales realizados y de los modelos teóricos elaborados para explicarlos y generalizarlos, se pueden resumir en los siguientes párrafos:

1. Se ha puesto en evidencia que para el cálculo de la capacidad de carga de cilindros oleohidráulicos siempre es necesario calcular:

- a) El valor de la carga crítica o de pandeo como resolución de la ecuación trascendental correspondiente (inestabilidad del cilindro oleohidráulico), considerando el sistema como una columna bi-escalonada.
- b) El valor de la carga límite que se alcanza cuando la tensión, en algún punto del cilindro-vástago, supera la tensión de fluencia del material. Este valor es consecuencia de la resistencia del cilindro oleohidráulico considerado como un elemento estructural, constituido por dos sólidos (cilindro y vástago) interconectados mecánicamente, con deformación inicial, articulado en los dos extremos y sometido a cargas de compresión y a cargas consecuencia de la interacción con el mecanismo.

2. La Norma ISO 13725 [15] si bien contempla los dos cálculos anteriores (carga crítica y carga límite), su modelización solo contempla cargas axiales con y sin excentricidad, y el peso propio. Por otra parte se extiende el método no solo a bi-articulado sino a otras condiciones de contorno mostradas en el anexo A. La versión correspondiente al año 2001 de la Norma contiene numerosos errores tipográficos en las fórmulas presentadas. Por otra parte, en general el documento es de difícil interpretación y en consecuencia es poco utilizada. El mundo industrial y los usuarios tienden a utilizar algoritmos muy simplistas tales como la ecuación de Euler y ecuación de la tangente.

En esta tesis se presenta en los anexos un resumen de la citada Norma con unos algoritmos implementados en Excel y Visual Basic para su fácil utilización.

3. Entre los artículos que tratan la capacidad de carga de cilindros oleohidráulicos queremos destacar el trabajo de Baragetti [19]. Este trabajo hace una aportación teórico-experimental muy detallada en los aspectos relacionados con el acoplamiento cilindro-vástago, pero deja pendiente los fenómenos

debidos a la interacción cilindro oleohidráulico-mecanismo en las articulaciones. Su modelo no permite justificar capacidades de carga superiores a la capacidad de carga de un cilindro oleohidráulico bi-articulado con apoyos ideales.

4. En esta tesis se ha tratado el tema de la capacidad de carga de los cilindros oleohidráulicos, implicando todos los factores que pueden influir sobre ésta:

a) Se ha planteado un modelo que describe el comportamiento de un cilindro oleohidráulico bi-articulado, sometido a carga axial. Para una aplicación real, el comportamiento de este cilindro oleohidráulico bi-articulado puede apartarse del comportamiento ideal y manifestar características propias de un comportamiento distinto, por ejemplo bi-empotrado.

b) También se han considerado para el modelo: las imperfecciones iniciales (desalineamiento entre tubo y vástago) debidas a las tolerancias de fabricación.

c) A diferencia de todos los modelos presentados hasta el momento, el modelo propuesto contempla la influencia del desgaste de los anillos guía.

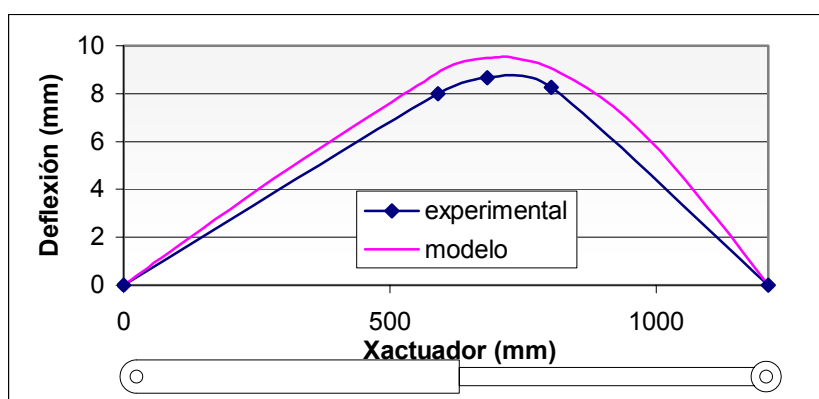
d) El modelo permite visualizar la curva de deflexión, curvas de momentos flectores, y las tensiones (por compresión, flexión y total) en cualquier punto a lo largo del actuador (cilindro-vástago). Finalmente estima la carga máxima admisible, como aquella carga que genera sobre el actuador una tensión máxima equivalente a la tensión de fluencia.

e) El elemento más débil en un cilindro oleohidráulico es el vástago, debido a que la tensión máxima generada se encuentra sobre éste. Efectivamente se ha demostrado, tanto teórica como experimentalmente, que el término "pandeo" de cilindros oleohidráulicos no debería emplearse, si relacionamos estrictamente el término pandeo con condiciones de coaxialidad entre carga aplicada y eje centroidal del actuador. El colapso de cilindros se efectúa por la tensión de fluencia del material generada por la combinación de cargas de compresión y flexión.

f) En el cilindro-tubo, se generan tensiones de flexión debidas a la carga aplicada en combinación con las imperfecciones vástago-tubo presentes, y tensiones longitudinales y transversales debidas a la presión interna del fluido generada en el tubo-cilindro. La tensión total equivalente (von Misses) presente en el tubo, para todos los casos (condiciones de contorno), no alcanza la tensión de rotura del material del cilindro, cuando la tensión máxima presente en el vástago ya ha alcanzado su valor de fluencia.

5. Otro aporte importante de esta tesis ha sido la creación de una base de datos experimental que agrupa más de 100 ensayos (de tipo destructivo) en relación con la capacidad de carga de cilindros oleohidráulicos. Hasta el momento, en la literatura especializada en este tema, hay muy pocas evidencias de este tipo de ensayos destructivo. Lo normal es encontrar como evoluciona la tensión y/o deflexión del vástago en función de la carga mucho antes que se produzca el colapso.

6. Los resultados del modelo propuesto y los resultados experimentales muestran una buena concordancia. Con relación a este punto queremos destacar la similitud entre curvas de deflexión del modelo teórico con relación a la curva de deflexión experimental, como se muestra en la siguiente figura:



Estas curvas corresponden a la deflexión obtenida del cilindro 'prueba' bi-apoyado, con aplicación de la carga límite admisible (80,6 kN). La diferencia entre teoría y pruebas se justifica en el hecho que, aun reduciendo considerablemente los efectos de fricción en los puntos de apoyo al instalar pasadores de 22mm sobre agujeros de 25,6mm de diámetro, quedan efectos de fricción inevitables, que limitarán la deflexión del actuador.

La bondad de este modelo permite utilizarlo para extrapolar el cálculo de la capacidad de carga a otros cilindros oleohidráulicos de distinta esbeltez.

7. Según nuestros resultados teóricos y experimentales se puede colegir:
 - a) La inclusión del peso propio (100 N) del cilindro 'prueba', ha significado tan solo, una reducción del 2% de su capacidad de carga.
 - b) La variación de la capacidad de carga debida a la imperfección inicial (debido a las tolerancias lógicas de un buen diseño y una buena fabricación) es mucho menor que la variación de capacidad de carga debida a las condiciones de contorno reales que se manifiestan en las articulaciones.
 - c) El desgaste del anillo guía en un 5% de su espesor inicial (efecto que se produce básicamente en los primeros 1000 ciclos) representa una disminución de la capacidad de carga de un 10%. Hay que mencionar que a partir de los 1000 ciclos no hay variaciones significativas en el desgaste del anillo guía.
 - d) Aquellas aplicaciones donde las fuerzas de contacto en la articulación (pasador – cabezal sin cojinetes) son importantes, por ejemplo en nuestro banco de ensayos, el cilindro oleohidráulico bi-articulado se comporta como cilindro bi-articulado en ambos extremos, pero sus condiciones de contorno reales son equivalentes a un bi-empotramiento. En estas circunstancias la capacidad de carga puede aumentar de 3 a 4 veces. Esto ha sido demostrado experimentalmente y justificado teóricamente en esta tesis con el cilindro 'prueba'. Este comportamiento también ha sido experimentado y mencionado, pero no justificado en los trabajos de Baragetti [19], en donde se comenta que la capacidad de carga de un cilindro oleohidráulico bi-articulado equipado con pasador-cabezal rótula (fuerzas de rozamiento importantes) es superior que cuando se utiliza una articulación pasador-cabezal con cojinetes de bolas (fuerzas de rozamiento muy pequeñas).

8. Un punto importante tratado en esta tesis ha sido la influencia de la cinemática del mecanismo (existe rotación relativa entre piezas), sobre la capacidad de carga de cilindros oleohidráulicos. Debido a la presencia de las fuerzas de contacto en los elementos de la articulación, nos podemos encontrar con acciones externas debidas al rozamiento, que favorecen o perjudican la

capacidad de carga del cilindro oleohidráulico (ver Fig.3.2). Para aquellos casos en que el rozamiento puede tener un efecto negativo, es siempre recomendable utilizar articulaciones muy bien lubricadas o cabezales que incorporan cojinetes de muy baja fricción.

9. En aquellas otras situaciones en que por alguna causa se manifiesta una cierta excentricidad de la carga hay que considerar que ésta reduce considerablemente la capacidad de carga del cilindro oleohidráulico. Para el caso del cilindro 'prueba' ensayado, una excentricidad de solo 1 mm equivale a una reducción del 12% de su capacidad de carga.

10. A título de conclusión final y como recomendación podemos afirmar que los efectos de rozamiento siempre deben minimizarse al máximo, tanto si es a favor o en contra de la capacidad de carga.

En aquellas aplicaciones donde el cilindro oleohidráulico acciona un mecanismo y las acciones del rozamiento van en contra de la capacidad de carga, se aconseja calcular el cilindro oleohidráulico con un momento externo aplicado en la articulación del lado vástago (lado más débil) y de valor igual al producto de la carga axial aplicada multiplicada por una excentricidad aparente, de valor $\mu \frac{d_p}{2}$ (μ coeficiente de rozamiento y d_p el diámetro del pasador).

La utilización de cojinetes de baja fricción puede garantizar un funcionamiento prolongado con mínimo desgaste de los pasadores y fuerzas de fricción muy reducidas, y reducir el riesgo de un mal diseño debido a la incertidumbre de estas fuerzas.

RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Todo conocimiento encontrado es susceptible de ser ampliado. Como propósito de extender el conocimiento en todos los aspectos que influyen en la determinación de la capacidad de carga de los cilindros oleohidráulicos, es necesario continuar con el trabajo de investigación realizado en esta tesis. Para tal fin, proponemos:

- Realizar pruebas de capacidad de carga de cilindros oleohidráulicos en mecanismos (rotación relativa entre piezas de contacto en apoyos del actuador), midiendo el coeficiente de fricción en las articulaciones y las tensiones generadas en el vástago.
- Realizar pruebas de fatiga en cilindros oleohidráulicos, provocando ciclos repetitivos de carga en el banco de pruebas, que permitan estudiar de que manera el daño acumulado afecta la capacidad de carga de los cilindros.
- Aplicar las formulaciones presentadas en el modelo propuesto, mediante un programa amigable e interactivo, que permita a usuarios y fabricantes calcular la capacidad de carga de un cilindro oleohidráulico.
- Ampliar el modelo y la experimentación en cilindros oleohidráulicos bi-articulados, en la que una de las articulaciones esté situada en un punto intermedio cercano al tapón guía.