

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Con este Proyecto Fin de Carrera se ha conseguido entender en mayor medida la influencia de distintos parámetros geométricos en la resistencia a fatiga por fretting de un sistema mecánico eje-cubo unidos mediante ajuste a presión. Para poder llegar a las soluciones que se han mostrado se pretendía la optimización del problema. Para ello se propuso como objetivo el desarrollo de un algoritmo de optimización. Finalmente se han implementado dos algoritmos de optimización, de primer y de segundo orden. Cada uno de ellos se ha implementado en lenguaje *APDL* y en *FORTRAN*. Éstos han sido validados tras varios problemas de prueba que funcionan correctamente, habiéndose probado todas las posibilidades que se pueden dar en un proceso de optimización. La implementación en *FORTRAN* ha servido como banco de pruebas y como comprobación a su vez del implementado en *APDL*, comprobándose que se obtienen en ambos casos los mismos resultados dentro de un pequeño margen de error, tanto en lo referente a las variables de diseño como a la función objetivo.

La implementación en elementos finitos (*APDL*) era el objetivo de esta parte del proyecto. Se ha conseguido un programa compuesto por una serie de archivos cada uno de los cuales realiza una función referente a dicho algoritmo de optimización. El programa de optimización obtenido es de validez general dentro del programa para el que se ha implementado, *ANSYS*[®]. De esta forma, es aplicable a cualquier problema mecánico que se modele de acuerdo con las directrices de asignación de las variables de diseño a los parámetros del modelo y de obtención de las restricciones y función objetivo que compongan el problema de optimización. Para la correcta aplicación del programa de optimización es necesario que se genere el modelo de forma paramétrica, es decir, que se genere paraméricamente tanto la geometría, como el mallado, las cargas, condiciones de contorno, la resolución y el postprocesado, de forma que el modelo final obtenido sea válido dentro de toda la región factible de la optimización. Que el modelo de elementos finitos sea paramétrico es necesario para que en el proceso de optimización se pueda generar y resolver de manera automática y que sea válido en toda la zona factible, para que no produzca errores el proceso de optimización por culpa de un problema mal condicionado o incluso irresoluble. El postprocesado necesario consiste en la obtención de las distintas variables que formen parte tanto de la función objetivo como de las restricciones. Los pasos a seguir se indican en más profundidad en el anexo A junto a los archivos creados.

En lo que respecta al modelo del acoplamiento eje-cubo con ajuste a presión se ha obtenido un modelo que cumple las condiciones inicialmente impuestas al mismo gracias al

procedimiento de submodelado que se ha utilizado. La condición más exigente, impuesta por el método utilizado para el cálculo de la vida a fatiga, era la de generar un modelo que tuviese una malla de elementos finitos lo suficientemente fina como para que en la profundidad a la que se evalúan las deformaciones y tensiones se tuviera un mínimo de 3 elementos. Un modelo del sistema completo que cumpliera esta condición tendría un elevadísimo número de elementos, de manera que su resolución sería muy lenta, imposibilitando así el posterior proceso de optimización. Para solventar esto se han utilizado condiciones de simetría en el plano medio del cubo, reduciendo a la mitad el número de elementos. Al no ser suficiente con esta reducción se ha optado, como se comentó anteriormente, por la resolución mediante submodelado. De esta manera se ha realizado un modelo completo con una malla lo suficientemente refinada como para que proporcione unos valores correctos de desplazamientos a imponer en las fronteras de corte del submodelo. Una vez se tienen estos valores, se imponen en el submodelo y se resuelve el mismo, obteniendo el estado de tensiones y deformaciones en la zona crítica del contacto. Una vez validado el problema mediante el estudio teórico del contacto y la validación del submodelado se ha obtenido la solución para unos valores nominales de los parámetros del modelo. El modelo se ha resuelto suponiendo una ley de comportamiento elástica lineal sin plasticidad. Esta simplificación es necesaria debido a que en el proceso de optimización se va a realizar un elevado número de evaluaciones de la función objetivo y por tanto de resoluciones del modelo. Por esta misma razón, no es factible tampoco la simulación del proceso de inserción. Al ser éste el paso en el que las deformaciones plásticas son mayores y al no modelarse por razones de tiempo, las deformaciones plásticas obtenidas durante los ciclos de carga no serían acordes con la realidad. La realización de este estudio incluyendo las deformaciones plásticas en todo el proceso, inserción incluida, se deja como posible trabajo futuro si las condiciones y los medios lo permiten.

Para reducir el tiempo de optimización se ha realizado un análisis de convergencia en el que se estudia tanto la validez de los resultados obtenidos del modelo, como el tiempo de resolución del mismo para distintos tipos de mallas con diferente número de grados de libertad. Comparando estos resultados se han obtenido las mallas que ofrecen unos buenos resultados para un tiempo de resolución que haga factible la optimización. Estos mallados son los que se utilizan durante el proceso de optimización.

La optimización se ha realizado sobre el modelo tanto con el algoritmo de primer orden como con el de segundo orden. Los resultados obtenidos con ambos algoritmos son los mismos si se tienen en cuenta las tolerancias de dicho proceso. Se observa cómo con el algoritmo de segundo orden se obtienen unos resultados muy similares a los obtenidos con el de primer

orden. Esta similitud de resultados se muestra tanto en términos de convergencia, ya que en ambos casos se realiza el mismo número de iteraciones, como de variables de diseño que en el óptimo toman valores casi iguales. Esto se debe principalmente a que el problema no presenta una alta no linealidad y a que la región factible no es excesivamente grande, por lo que el método de primer orden funciona eficientemente.

Con respecto a los resultados se ha observado en primer lugar, cómo la influencia en la vida a fatiga de la relación de diámetros del eje y de la interferencia es mucho mayor que la de los radios de acuerdo de eje y cubo. Esto también se encuentra reflejado en el análisis de sensibilidad realizado en el óptimo. Sobre los valores óptimos de las variables de diseño son los siguientes:

- La relación de diámetros del eje óptima es el límite superior impuesto. Es decir, aumentar el diámetro del eje en el acoplamiento mejora la resistencia a fatiga por fretting.
- El radio de acuerdo del cubo óptimo es el límite inferior impuesto. Por tanto la reducción de dicho radio mejora la resistencia a fatiga del acoplamiento. En el caso límite se tendría un radio igual a cero, pero este sería otro problema a estudiar por las particulares características que posee un borde de contacto a 90°. Este problema se deja como desarrollo posterior para ser comparado con los resultados aquí obtenidos.
- La interferencia óptima ha tomado un valor bajo pero no el mínimo del intervalo impuesto. Es el único parámetro de los estudiados que no tiene una tendencia clara. El equilibrio entre las tensiones de compresión derivadas del ajuste y los deslizamientos relativos, es el que decidirá el valor óptimo de la interferencia.
- El radio de acuerdo óptimo en el eje es el límite inferior impuesto. Al reducir dicho radio aumenta la resistencia a fatiga del acoplamiento.

Respecto a la relación de diámetros y al radio de acuerdo en el eje hay que comentar que llegará un momento en que al aumentar la relación de diámetros o al disminuir el radio de acuerdo, el problema de resistencia a la fatiga se desplace desde el borde del contacto hasta el radio de acuerdo del eje. Para evitar esto, durante la optimización, se ha impuesto un radio mínimo de acuerdo que para la máxima relación de diámetros en el eje no implique un elevado concentrador de tensiones.

Por último sería aconsejable la confirmación experimental de los resultados obtenidos en este trabajo.