

Si usted no puede visualizar correctamente este mensaje, [presione aquí](#)

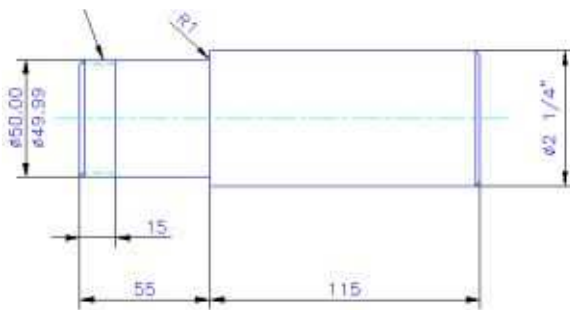


Medellín, 20 de junio de 2005

No. 24

EJES: ANÁLISIS Y PREVENCIÓN DE FALLAS EN SERVICIOS (PARTE 2 DE 2) [Ver parte 1](#)

Por: *Alonso Vélez Covo, Ingeniero especialista INDISA S.A* [\[1\]](#)



El diseño de ejes es un problema básico en la ejecución de proyectos. En él se utiliza el análisis de tensiones y deformaciones, selección de materiales, comportamiento de elementos mecánicos y por supuesto, fundamentos de proyectos.

Los textos y manuales para diseño de elementos mecánicos presentan diversos métodos para calcular y dimensionar ejes, para evitar su falla por fatiga, estimar sus deformaciones en servicio, velocidades críticas, etc. Por lo tanto, en el presente artículo no se exponen fórmulas de cálculo, simplemente se prefiere presentar los criterios para obtener diseños apropiados.

5. CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE EJES

Recuerde que un eje se define como un elemento rotatorio, normalmente de sección circular, que soporta elementos diversos y que se usa generalmente para transmitir potencia.

En su funcionamiento un eje puede estar sometido a cargas de flexión, tracción, compresión, o torsión; actuando separadamente o en combinación de unas con otras.

Cuando las cargas actúan combinadas es de suponer que las resistencias combinadas: estática y a la fatiga, sean ambas consideraciones importantes en el diseño.

Los métodos empíricos de diseño, como el planteado por el código ASME (American Society for Metals) [2], no tienen en cuenta las propiedades a la fatiga de los materiales, ni la magnitud de la concentración de esfuerzos. Aunque es una herramienta valiosa debe complementarse con análisis más ingenieriles, que incluyan criterios de diseño contra fallas por fatiga, rigidez del eje y velocidades críticas para evitar resonancias.

A continuación se exponen algunas recomendaciones a tener en cuenta sobre esos aspectos.

5.1 Diseño contra fallas por fatiga

- Utilizar materiales con alta tenacidad.
- Evitar radios de entalladura muy reducidos entre los resaltes del eje. Siempre que sea posible, utilizar cambios de sección graduales.

- Determinar bien las cargas y establecer el grado de certeza de estas: Dependiendo de cuán definidas estén, más acertados serán los márgenes de seguridad considerados en el dimensionamiento de los ejes. Además, se deben determinar los ciclos de carga esperados durante la vida útil del eje.
- Considerar todos los factores que inciden en la reducción de la resistencia a la fatiga, como acabado superficial, tamaño del eje, proceso de manufactura, confiabilidad, temperatura, humedad y corrosión, entre otros.
- Evitar concentradores de esfuerzos fuertes, o dos que se refuercen; por ejemplo un cuñero en un cambio de sección.
- Garantizar acabados superficiales de excelente calidad. Los radios de entalladura en los resaltes del eje y sitios adyacentes ameritan acabados superficiales pulidos.
- Evitar maquinados burdos, que dejen huellas circunferenciales del buril y puedan propiciar el inicio de grietas.
- Como regla general, se deben evitar las soldaduras en los ejes. Si es necesario aplicarlas se debe maquinar las superficies y pulir muy bien para eliminar los defectos superficiales. Además hay que practicar alivio de tensiones. Deben evitarse soldaduras en sitios altamente esforzados en ejes. Se prefieren los ensambles de interferencia en lugar de las soldaduras.
- Cuando se realizan ensambles con interferencia hay que hacerlos adecuadamente para mitigar el fenómeno de "fretting", que es un proceso erosivo que aparece en los bordes de las piezas ensambladas debido a micro deslizamientos entre ambas superficies que, favorece la generación de micro grietas e inducen la falla por fatiga. En la figura 7 se muestran recursos constructivos para mitigar este efecto.

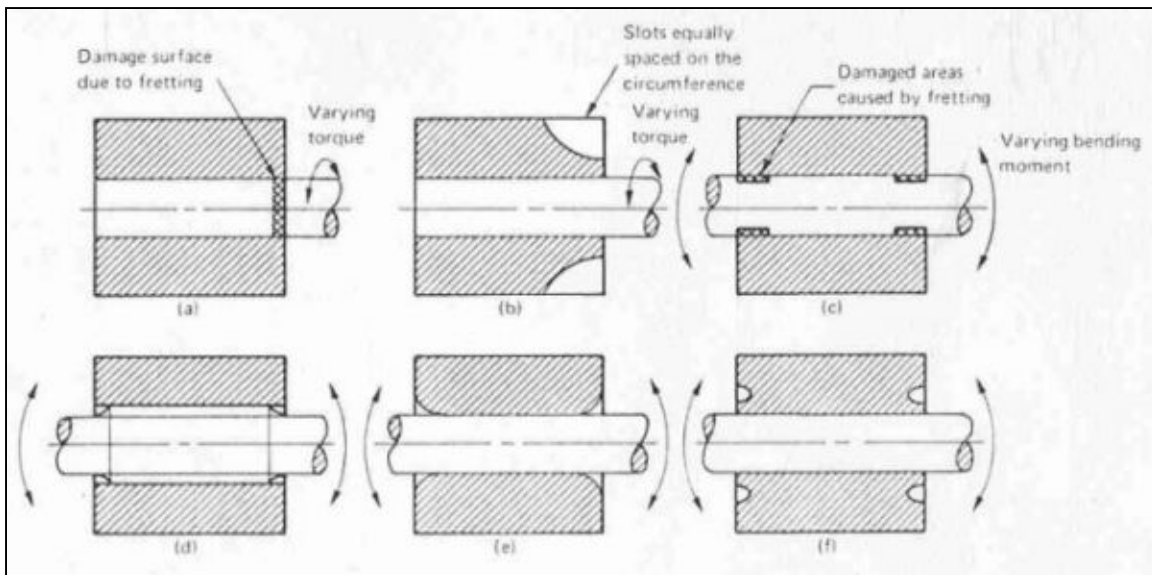


Figura 7. Fenómeno de "fretting" (a) y (c) y cómo mitigarlo (b), (d), (e) Y (f) [3]

- El diseñador debe aplicar las reglas del buen diseño para reducir los efectos de los concentradores de esfuerzos, como se muestra en la figura 8, buscando siempre evitar los cambios bruscos en las direcciones de las líneas de flujo de esfuerzos.

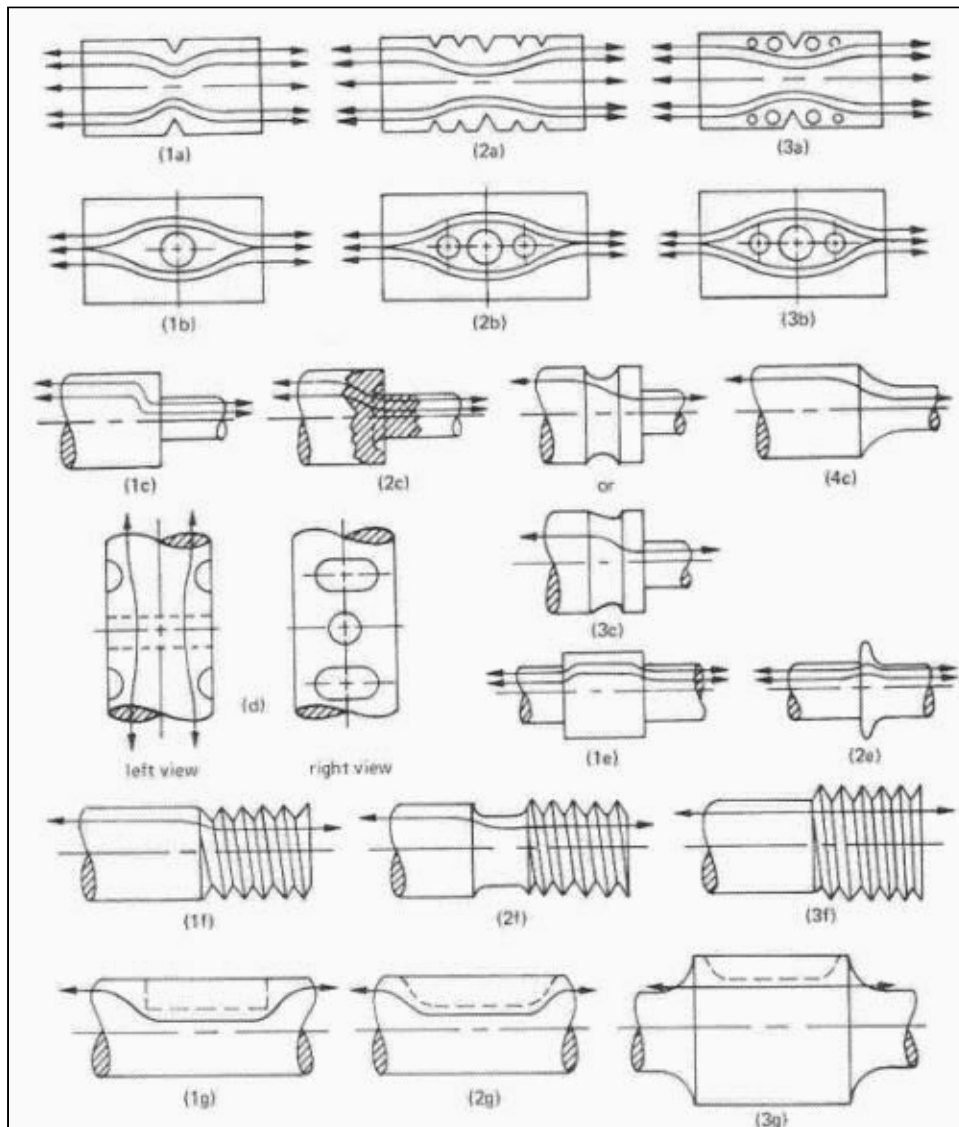
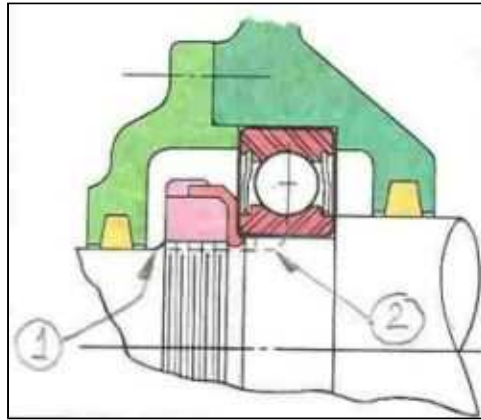


Figura 8. Recursos para reducir los concentradores de esfuerzos[3]

- Frecuentemente suele ocurrir que dos concentradores de esfuerzos actúan simultáneamente en el mismo sitio, reforzándose sus efectos. La figura 9 muestra una situación típica para la fijación de un rodamiento donde se tiene resalte con ranura longitudinal; sin embargo se aprecia como el acanalado no se extiende hasta el radio de entalla en el cambio de sección del eje. Cuando se tienen dos concentradores su efecto es algo menor que el producto de ambos, sin embargo para diseño se considera así. Por ejemplo, dos concentradores de esfuerzos de 1.7 y 2 tienen un efecto combinado prácticamente de 3.4, que es muy severo; por lo tanto deben evitarse estas situaciones y cuando no sea posible, ambos deben ser concentradores de bajo factor.



**Figura 9. Concentradores actuando simultáneamente[3]
Resalte 1 + ranura longitudinal 2**

5.2 Rigidez en el diseño

- Los ejes se deforman bajo las cargas de operación. Para cada aplicación específica hay requerimientos de rigidez. Por ejemplo, para el diseño de trenes de engranajes se recomienda que la flecha (desplazamiento transversal) de los ejes no supere 0.005" en los sitios de engrane de los piñones y la deformación angular (dy/dx) de la elástica del eje no supere 0.0005"/pulg (Control del "backlash" (juego)), con el fin de garantizar buenos engranes para evitar cargas de impacto fuertes durante el funcionamiento de los engranajes.
- Para los sitios donde hay rodamientos rígidos de bolas la deformación angular típica no debe exceder 0.0045 radianes.
- Generalmente los ejes de máquinas no deben exceder deformaciones por flexión de 0.001"/pie entre cojinetes.
- Usualmente los ejes de cajas reductoras y trenes de transmisión de potencia mediante engranajes son "vigas" cortas ($L/d < 10$). Para estos casos se calculan las deformaciones con los mismos métodos empleados para las deformaciones en vigas, pero además hay que considerar los efectos de las fuerzas cortantes, que participan con deformaciones de igual orden de magnitud que las debidas a las flexiones. En el cálculo de estructuras usualmente las vigas son relativamente largas y se desprecian los efectos de las fuerzas cortantes en los cálculos de las flechas.
- En el diseño de cajas reductoras compactas con ejes cortos los diámetros de los ejes usualmente son determinados por los rodamientos. Como regla práctica se recomienda seleccionar primero los rodamientos y con base en estos se definen los diámetros de los ejes, para luego verificar su resistencia a la fatiga y el cumplimiento de los requisitos de rigidez. Si los ejes no cumplen se procede al aumento de sus diámetros según sean los requerimientos.

5.3 Diseño contra resonancias (velocidad crítica)

- Los sistemas compuestos por ejes y masas, por ejemplo el rotor de un ventilador, el impeler de una bomba o la turbina de un agitador, son situaciones donde las fuerzas dinámicas debidas al desbalance de los rotores producen oscilaciones transversales en los ejes a la misma frecuencia de operación del rotor ($\text{cps} = \text{rev/s}$) (Todo rotor real tiene algún grado de desbalance que tiende a aumentar con el uso de los equipos). Cuando la velocidad de rotación coincide con la frecuencia natural de las oscilaciones para las vibraciones transversales del sistema rotor-eje, entonces se tiene una situación de resonancia que se debe evitar. Para agitadores se recomienda que la velocidad de operación no supere el 60% de la velocidad crítica. Para ventiladores se recomienda que no supere el 50%.
- Los ejes también pueden estar sometidos a oscilaciones torsionales como es el caso del eje, usualmente largo, de una embarcación. En estos casos se pueden presentar "pulsaciones" reactivas con una frecuencia igual al número de aspas de la hélice, por las revoluciones del eje;

si la frecuencia natural torsional del sistema hélice-eje es muy próxima a ese valor, se pueden presentar fallas por fatiga debidas a una amplificación de los esfuerzos de torsión causados por este fenómeno.


- En el caso de engranajes también se presentan perturbaciones en el par de torsión sobre los ejes con una frecuencia igual al número de dientes por las revoluciones del eje. En estos casos también se debe hacer un análisis dinámico para determinar las frecuencias naturales torsionales del sistema, con el fin de garantizar que ninguna estará perturbada durante la operación del mismo. Los motores de combustión interna producen pulsaciones con las explosiones de cada cilindro. Los ejes conectados no pueden tener frecuencias naturales cercanas a las producidas por el motor en su rango de operación.

6. CONCLUSIONES

- No siempre los ejes se diseñan por resistencia mecánica; muchas aplicaciones las determina la rigidez de esos elementos. En tales casos no se justifica utilizar un material costoso como puede ser un AISI 4340 bonificado, cuando se puede escoger un AISI 1020 calibrado, que cuesta menos. Por ejemplo, si se trata de un agitador con un eje de 6" y 6m de largo, la diferencia de precios es de casi 3 millones de pesos. Los manuales de aceros recomiendan los más resistentes para ejes porque es información de aplicación general, además debe entenderse que esos materiales son los más indicados para ejes con requerimientos exigentes de carga. Estos aspectos económicos son importantes en el diseño de maquinaria y equipos. Es importante aclarar que todos los aceros independientemente de su resistencia, su tratamiento térmico y sus elementos de aleación, tienen los mismos parámetros elásticos (módulo de Young y relación de Poisson), lo que significa que bajo cargas iguales las deformaciones son iguales independientemente del acero del eje. Las frecuencias naturales (velocidades críticas) tampoco varían con la calidad de los aceros.
- La fabricación de ejes críticos debe confiarse a constructores idóneos y se debe hacer una interventoría rigurosa. Se recomienda:
 - Que los materiales sean certificados.
 - Verificar si los ejes han sido enderezados con prensa y chequear qué influencia puede tener esto en el desempeño del eje respecto a sus cargas y su vida útil.
 - Verificar las tolerancias y acabados superficiales antes de que se realicen los ensambles.
 - Verificar mediante galgas todos los radios de los resaltes y las entalladuras.
 - Verificar los acabados superficiales, especialmente en los radios de entalladuras.
 - Cuando hay soldaduras, revisar los procedimientos de soldadura y de alivio de esfuerzos.
 - Cuidar que las temperaturas empleadas, tanto en los ajustes por interferencia como en los alivios, no arruinen los tratamientos térmicos del eje, si es del caso.
 - Verificar alineación al concluir el trabajo.
- Para ejes que giran a alta velocidad (ventiladores, turbinas, bombas, agitadores pequeños, etc.) recomendar que se practiquen balanceos estáticos y dinámicos.
- Para ejes muy esbeltos (L/d del orden de 50) pero que giran a baja velocidad, como ocurre con algunos agitadores grandes, debe practicarse el balanceo estático, preferiblemente también el dinámico.
- En la fabricación de equipos críticos nuevos solicitar al constructor memorias de cálculo de los ejes (Análisis de fatiga, deformaciones y velocidades críticas).
- El diseño de ejes para resistir cargas cíclicas y evitar su falla por fatiga es un proceso aproximado, lo que conduce a que el trabajo de diseño en la oficina sea solo una buena aproximación, que suele ser conservadora. Para depurar y optimizar el diseño de ejes hay que invertir en experimentación y pruebas sobre prototipos. Esta aproximación es normal para los productos de línea, como las cajas de engranajes y los ejes de las ruedas de los automóviles o en la construcción de motorreductores, por ejemplo. No obstante, en el caso de ejes especiales que se encuentran en la industria es posible que su mejora y confiabilidad se logre también mediante un procedimiento experimental, pero siempre acompañando de cálculos y análisis juicioso dentro de las mejores prácticas de la ingeniería.
- El diseño de elementos de máquinas es una combinación de cálculos, aplicación de reglas de

diseño y experiencia en las faenas del taller metalmecánico; conviene que el diseñador se asesore de constructores experimentados, para que los diseños sean realistas y adaptados a las técnicas constructivas, procesos de manufactura, tratamientos térmicos y disponibilidad de materiales.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Alonso Vélez Covo:** Ingeniero Mecánico Universidad Pontificia Bolivariana, 1970, Master en Diseño Mecánico de la Universidad de Stanford, más de 10 años como Profesor de Materiales, vibraciones, mecanismos y diseño de elementos mecánicos y otras materias relacionadas y 27 años como Ingeniero Diseñador de INDISA S.A.  volver
2. Failure analysis and prevention. Metals Handbook vol 10. American Society for Metals (ASME). USA, 1975.
3. DEUTSCHMAN, Aaron D., MICHELS, Walter J., WILSON, Charles E. MACHINE DESIGN, THEORY AND PRACTICE. Ed. Macmillan Publishing. New York

*Si tiene alguna duda sobre éste u otros temas de Ingeniería, [contáctenos](mailto:contactenos@indisa.com.co)
www.indisa.com.co*

NOVEDADES

PÁGINA DE INDISA ON LINE

Si usted no ha tenido la oportunidad de recibir las ediciones anteriores del boletín INDISA On line, puede entrar a www.indisaonline.8m.com. En esta página se encuentran todos los boletines en formato de página web, para que usted pueda grabarlos en su computador e imprimirlos.

También podrán [registrarse](#) las personas que no estén recibiendo el boletín directamente desde INDISA S.A.

FORMACIÓN ESPECIALIZADA EN INDISA S.A

En el mes de julio se realizará un seminario sobre diseño de ejes a cargo del Ingeniero Alonso Vélez Covo. Espere mayor información.

Si usted no recibe esta publicación directamente de INDISA S.A o si desea recomendarnos a alguien para que la reciba, [presione aquí](#)

[Ir a la página de INDISA S.A](#)

