

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



.....Medellín, 17 de mayo de 2005

No. 23

EJES: ANÁLISIS Y PREVENCIÓN DE FALLAS EN SERVICIOS (PARTE 1 DE 2)

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



Un eje es una barra metálica -usualmente de forma cilíndrica, sólida o hueca- que es usada para soportar componentes rotatorios (Agitadores, por ejemplo) o para transmitir potencia o movimiento por rotación o movimiento axial.

Los ejes operan bajo un amplio rango de condiciones de servicio, incluyendo atmósferas agresivas, diferentes niveles y tipos de esfuerzos, y desde temperaturas tan bajas como ambientes criogénicos, hasta extremadamente altas como el eje de una turbina a gas.

Los mecanismos más comunes de falla de ejes son: la abrasión en los apoyos de los rodamientos (Fretting), agrietamiento por tratamientos superficiales, deformaciones por sobrecargas y fatiga del material por errores de diseño.

1. INTRODUCCION

El diseño de un eje es una actividad muy esporádica y hasta remota dentro del que hacer del ingeniero de planta e incluso para los que trabajan en proyectos industriales, por tratarse de una labor muy especializada concerniente a quienes desarrollan equipos de línea como reductores, ventiladores, agitadores y en las industrias de maquinaria especializada (Tractores, grúas, maquinaria textil, etc.), donde un mercado competitivo exige diseños óptimos. No obstante, el conocimiento de los fundamentos para el diseño de estos elementos, esencial en todas las máquinas, es de primordial interés para los ingenieros, que de muchas formas tienen que ver con maquinaria sea manteniéndolas, operándolas, repotenciándolas, analizando sus fallas, comprándolas, corrigiendo deficiencias, etc.

El desconocimiento de los criterios que gobiernan el diseño de ejes en ocasiones cuesta mucho dinero cuando se presentan fallas en estos elementos y no se alcanza a identificar lo que ha ocurrido, pues muchas veces se procede a hacer reparaciones indebidas que no funcionan y se entra en un ciclo de fallas y reparaciones reiterativo, errático y muy costoso, principalmente por los tiempos de inactividad de los equipos, además de los costos que implican dichas reparaciones.

En las actividades de selección de equipos, el encargado del tema debe conocer los atributos mínimos que deben tener los ejes para hacer una buena selección. Por otro lado, los ingenieros responsables de elaborar especificaciones para la adquisición de maquinaria especializada (agitadores, ventiladores, etc.) deben definir los requisitos mínimos para los ejes críticos de esos equipos. En ocasiones, también conviene rediseñar ejes que han fallado, pues ya el medio cuenta con la experiencia en diseño (firmas especializadas) y constructores idóneos, lográndose ahorros significativos respecto a repuestos importados y sobre todo, es una opción expedita que tiene además un valor agregado determinante, si se consideran las demoras por importaciones y tiempos de espera en las casas matrices.

2. MATERIALES PARA EJES

Generalmente los ejes de tamaños menores se construyen a partir de barras calibradas en frío (*Cold – Drawn*) con contenidos bajos de carbono (AISI 1010 / 1020 y 1030). Cuando se requiere alta tenacidad, resistencia a la fatiga y a las cargas de impacto, se utilizan aceros aleados y tratados térmicamente, con contenidos medios de carbono (AISI 1347 / 3140 / 4150 / 4340 / 5145 / 8650). Cuando la resistencia superficial a la abrasión es el factor dominante, se emplean aceros cementados superficialmente (AISI 1020 / 1117 / 2315 / 4320 / 4820 / 8620, etc.). Deben considerarse otras alternativas de endurecimiento superficial como "Nitrurado", "Cianurazo" y por llama, entre otros. Para aplicaciones con ejes endurecidos superficialmente y dependiendo del proceso empleado, aparecen esfuerzos residuales superficiales o en las interfaces de la "piel" endurecida con el núcleo, que hay que considerar en los cálculos de esfuerzos para determinar su fiabilidad respecto a la fatiga. Ha ocurrido que una microgrieta se inicie en la interfase debido a la combinación de los esfuerzos residuales y a que el núcleo tiene menor resistencia mecánica que la superficie endurecida. El cromado y el niquelado pueden inducir microgrietas e inclusiones gaseosas, que reducen drásticamente la resistencia a la fatiga del eje, razón por la que estos procesos deben evitarse en las aplicaciones de ejes bajo cargas repetitivas y dinámicas.

Las barras calibradas para ejes tienen mejores propiedades que las laminadas en caliente para aceros de igual composición química, pues tienen resistencia última y límites de cedencia mayores. Los esfuerzos residuales superficiales en los ejes trabajados en frío conllevan dos aspectos indeseables que el diseñador y el constructor de maquinarias deben considerar; por un lado la reducción de la resistencia del eje a la fatiga y por el otro, la aparición de distorsiones al realizar los maquinados del eje. Para el primer aspecto, al calcular el eje se aplican factores de reducción de la resistencia a la fatiga y para el segundo, se utilizan técnicas de taller para el enderezado. Si se hace mediante prensa, que es lo más común en talleres típicos, se generan deformaciones plásticas que inducen esfuerzos residuales de tracción que son nocivos y se tienen que considerar al estimar la resistencia del eje contra falla por fatiga. Existen técnicas de martilleo superficial en sitios estratégicos, que inducen esfuerzos de compresión, controlan la distorsión y mejoran la resistencia a la fatiga, obviamente esta técnica tiene limitaciones dependiendo del grado de distorsión que se desea corregir. Con frecuencia los proveedores de ejes los suministran con curvaturas y hay que enderezarlos, con las mismas implicaciones ya discutidas.

Las barras para ejes se consiguen en grado "bonificado" que implica mejoramiento en las propiedades mecánicas del material. Como regla, el diámetro del eje debe ser lo más próximo al nominal comercial. Suele ocurrir que los ejes tienen cambios de sección o espigas en sus extremos y esto implica reducciones en los diámetros por tramos, mediante maquinados. Se ha observado que las propiedades de un eje bonificado disminuyen un poco en los sitios próximos a su centro, debido al fenómeno de autorecocado. Esto es notorio para ejes mayores de 100mm; como regla práctica y si no se dispone de información, cuando el diámetro maquinado se reduce a la mitad del nominal en un eje de 120mm, se puede asumir que la resistencia mecánica baja un 20% y esta reducción es gradual desde la superficie. También se consiguen barras huecas para lograr mejores relaciones de peso a resistencia, que es ventajoso en ejes largos.

Los ejes de diámetros grandes son de aceros laminados en caliente; otros como cigüeñales y ejes para prensas pueden iniciarse por forja; también los hay fundidos. En todos estos casos el eje terminado se logra mediante maquinados. Se debe remover una capa superficial suficiente para retirar todo el material descarburado y así aprovechar plenamente las propiedades del acero de la pieza.

3. CARGAS Y ESFUERZOS EN LOS EJES

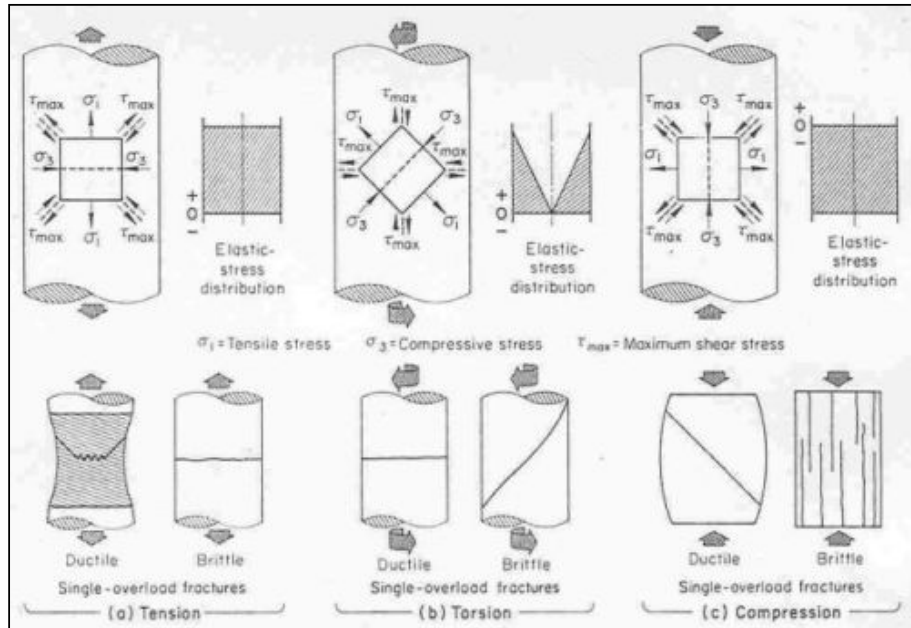


Figura 1. Diagrama de cuerpo libre de ejes sometidos a diferentes tipos de carga. Fracturas frágiles y dúctiles.[2]

Los ejes se consideran como vigas simplemente apoyadas, sometidas a cargas tanto transversales como axiales y con diversas direcciones y momentos torsionales (Torques). Estas cargas producen momentos y torques, que inducen flexiones en múltiples planos como se ilustra en las figuras 1, 2 y 3.

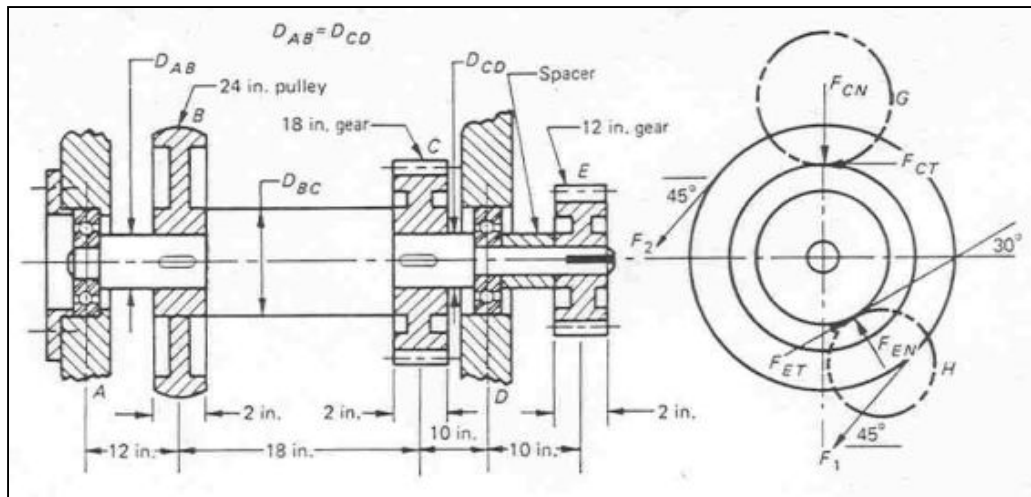


Figura 2. Ensemble de un eje con engranajes y cargas entre sus dientes [3]

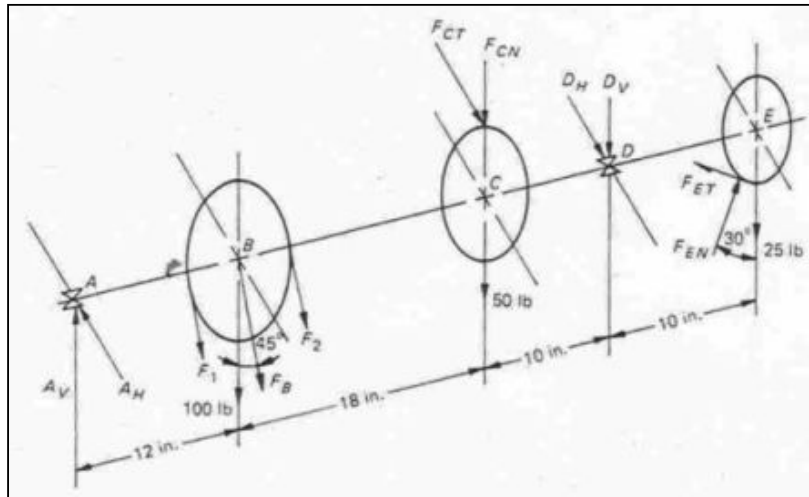


Figura 3. Estado de cargas para el eje de la figura 2. El eje se considera simplemente apoyado en A y D [3]

Se consideran como vigas simplemente apoyadas, porque los cojinetes permiten giros en sentido perpendicular al eje; algunos rodamientos vienen con chumaceras autoalineables, con gran capacidad de acomodamiento angular; otros se alojan en cavidades rígidas, pero todos los rodamientos tienen holguras micrométricas que permiten algún grado de giro que no se debe superar y que están definidos en los catálogos para cada tipo de rodamiento. Por otro lado, los cojinetes hidrodinámicos y los hidrostáticos tienen holguras radiales entre estos y el eje. En estos casos también se considera que los ejes están simplemente apoyados en esos sitios, porque el eje no debe rozar el cojinete cuando está en operación normal. En la mayoría de los casos en diseño de ejes se considera que ningún cojinete proporciona restricción de momento ni de torque, solo proporcionan reacciones en fuerzas transversales al eje y en algunos casos también en sentido axial.

Como los ejes normalmente giran continuamente la mayor parte del tiempo, los esfuerzos en cada punto cambian completamente en cada vuelta. Aunque la dirección y la magnitud de las fuerzas sean invariables, como ocurre con las tensiones de las bandas sobre las poleas, de igual forma los momentos flectores que actúan sobre el eje no cambian en su dirección ni en su magnitud. Sin embargo, como el eje está girando, en un punto superficial (y en los interiores también) pasan de esfuerzo de tracción a compresión (media vuelta), a tracción nuevamente (vuelta completa) y así sucesivamente. Esto implica que los ejes por lo regular se diseñan contra falla por fatiga. Lo usual en máquinas es que las cargas también pueden cambiar su intensidad y además producir impactos manteniendo su dirección, como ocurre en los engranajes. Estos efectos también tienen que considerarse al diseñar un eje contra falla por fatiga.

Suele pensarse que los ejes que giran lentamente pueden diseñarse con los criterios de carga estática; esto es falso. En la mayoría de los casos de equipos que operan la mayor parte del tiempo. Considérese un eje girando tan solo a 5 RPM en una máquina que funciona 90% del tiempo y se desea una vida útil de 15 años. Este elemento va a tener 35.5 millones de ciclos de carga y su diseño lo gobiernan los criterios de falla por fatiga, indiscutiblemente. Se puede decir que el diseño contra falla por fatiga comienza a ser determinante respecto a un diseño bajo carga estática para un eje, a partir de unos 10.000 ciclos de carga, que se cumplen fácilmente aun para máquinas con movimientos lentos y con poco uso. En este orden de ideas, los ejes se diseñan normalmente para impedir que ocurran fallas por fatiga y solo aquellos que accionan mecanismos muy pocas veces en su operación normal pueden diseñarse con criterios estáticos, como por ejemplo el árbol de accionamiento del mecanismo de apertura de una compuerta que se accione muy esporádicamente.

Para un eje típico con un acero de buena calidad (AISI 4340 bonificado) el esfuerzo nominal permisible a flexión para garantizar vida "infinita" está limitado a 22.000 psi con un factor de seguridad de 1.5 y una confiabilidad del 99% (Por arriba de dos millones de ciclos de carga, los niveles de esfuerzos permisibles son iguales que para cualquier número de ciclos superior, incluido "Vida infinita"). Para carga estática se pueden permitir hasta 70.000 psi con el mismo margen de diseño respecto a la fluencia (inicio de deformación plástica). Esto revela cuán desfavorable es el fenómeno de fatiga en las piezas de las máquinas y lo equivocado que es diseñar ejes con criterios estáticos cuando se tienen muchos ciclos de carga.

4. FALLAS EN LOS EJES

- Fractura por fatiga:** Estas fallas se presentan bajo cargas cambiantes y dinámicas, ocurren súbitamente después de que se ha desarrollado una grieta que debilita el eje y lo fractura totalmente. Estas fallas suelen ser de tipo catastrófico, acarreando daños, pérdidas físicas y humanas irreparables y costosas. Las fallas por fatiga suelen ocurrir con frecuencia, debido a técnicas de construcción inadecuadas que dejan esfuerzos residuales o acabados deficientes. Las figuras 4 y 5 muestran una falla típica de fatiga en un eje.

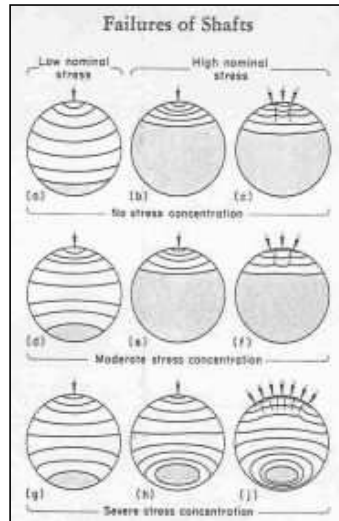


Figura 4. Marcas de fatiga bajo diferentes intensidades de esfuerzos [2]



Figura 5. Ejes fallados por fatiga [3]

- Deformaciones permanentes:** Esta falla implica que el límite de cedencia del material del eje ha sido excedido en alguna parte, alterando sus dimensiones y rectitud del eje. Este tipo de falla es más susceptible en ejes diseñados con criterios de carga estática que fueron sobrecargados o subdimensionados. Cuando ocurre puede que no se presente la ruptura del eje, debido a que los materiales normalmente utilizados en su construcción son tenaces o por lo menos dúctiles. Ejes diseñados bajo el criterio de fatiga también pueden presentar este tipo de fallas, debido a sobrecargas no previstas en el diseño o por eventos anormales.
- Resonancias:** Los ejes conforman sistemas con inercia (Engranajes, poleas, turbinas, el eje mismo, etc.) y elasticidad (deformaciones bajo cargas a flexión y a torsión del eje), estos dos atributos de todos los sistemas mecánicos determinan sus frecuencias naturales propias. Cuando un eje entra en resonancia porque su velocidad de operación esta próxima o coincide con una de las velocidades críticas (frecuencias naturales), se presentan oscilaciones y vibraciones fuertes, que ocasionan esfuerzos exagerados en la máquina, funcionamiento inadecuado y eventualmente pueden conducir a fallas por fatiga o por deformaciones exageradas. La figura 6 muestra la amplificación de las cargas dinámicas desbalanceadas en los rotores, respecto a la relación de la velocidad de operación ($wop/wcrit$). Nótese que el efecto se amplifica mucho cuando la relación está próxima a la unidad (situación de resonancia).

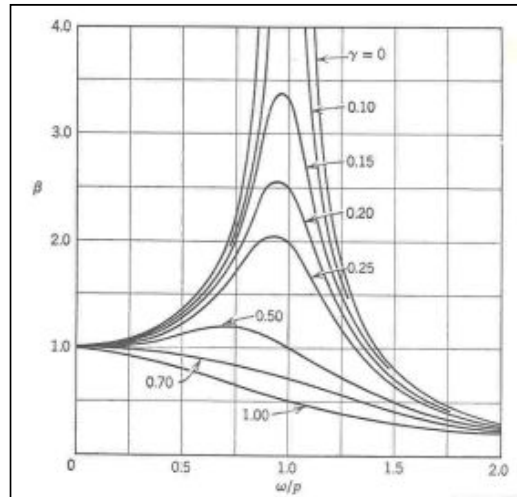


Figura 6. Amplificación de las cargas dinámicas desbalanceadas en los rotores
[4]

β = Factor de amplificación de las cargas por desbalance del rotor
 ω = Velocidad de operación del eje
 ρ = Velocidad crítica del eje
 γ = Relación de amortiguamiento (0.02 para ejes)

- **Rigidez inadecuada:** En múltiples aplicaciones en el arte de construcción de máquinas, el diseño de los ejes lo determina la rigidez en lugar de la resistencia. Un eje carente de la rigidez necesaria puede significar la operación incorrecta de engranajes y rodamientos; en un motorreductor por ejemplo. Por otro lado, suele ocurrir que algunos ejes muy largos con apoyos intermedios deben diseñarse con suficiente flexibilidad, pues si son muy rígidos requieren de ensambles muy precisos y constructivamente exigentes para garantizar la localización exacta de las chumaceras, o con muchos acoples intermedios, conduciendo a soluciones costosas. Estos requisitos constructivos se pueden omitir con ejes más flexibles. Algunas fallas en chumaceras intermedias en ejes largos se deben a que estos son muy rígidos

Encuentre en nuestra siguiente edición la segunda parte de éste artículo, que contiene los criterios para el diseño de ejes y las conclusiones finales.

Próximamente, el Ingeniero Alonso Vélez ofrecerá un seminario sobre este tema. Espere más información en el INDISA On line de junio.

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.
4. TIMOSHENKO, Stephen P., YOUNG, D. H., WEAVER, William. VIBRATION PROBLEMS IN ENGINEERING. 4a. edición. Ed. Wiley. Canada.

NOVEDADES

FORMACIÓN ESPECIALIZADA EN INDISA S.A

- El 29 de abril se inició exitosamente el Ciclo de Formación especializada de INDISA S.A con el Seminario "**Principios básicos de diseño y aplicación de sistemas compuestos de polímeros reforzados con fibras de carbono**".

Agradecemos a los participantes su asistencia y a los expositores Juan José Betancourt y Carlos Lleras, Ingenieros de [Degussa Construction Chemicals Colombia](#), su colaboración.

- El 14 de mayo se realizó el seminario "**Ejecución de Proyectos de Ingeniería**". Debido a la gran acogida de este tema, es posible que lo repitamos más adelante.



SEMINARIO-TALLER DE CREATIVIDAD APLICADA

El **25 de junio** INDISA S.A realizará el tercer seminario del ciclo de formación especializada: "**Taller de creatividad aplicada**", a cargo del Ingeniero Mecánico Enrique Posada, Ingeniero Mecánico Universidad Pontificia Bolivariana, Master of Mechanical Engineering University of Maine, Ingeniero Especialista de INDISA S.A. y Profesor de la Universidad Pontificia Bolivariana, Eafit, Politécnico, entre otras; e investigador en varias universidades y empresas. [Ver hoja de vida](#).

Lugar: INDISA S.A Carrera 75 No. 48 A- 27

Hora: 8 a 12 a.m

[Ver ficha técnica](#)

[Presione aquí para ver la programación del ciclo de formación especializada](#)

Si usted no recibe esta publicación directamente de MERCADEO INDISA S.A, envíe un mensaje a mercadeo@indisa.com.co con su nombre, cargo, empresa y email; con gusto lo ingresaremos a nuestra base de datos.

Si desea que sus amigos y colegas reciban el boletín, envíenos sus datos y nosotros los contactaremos.

[Ir a la página de INDISA S.A](#)

