Discurso de ingreso en la Real Academia de Ciencias de Sevilla (Jaime Domínguez Abascal)

La ingeniería mecánica y las máquinas, nuevos retos de una disciplina en evolución

Sr. Presidente, señores académicos, queridos amigos, señoras y señores:

Es para mí un gran honor haber sido elegido para formar parte de esta prestigiosa institución y tener la oportunidad decolaborar y aprender de tan distinguidos científicos y técnicos que forman parte de ella. Es un orgulloa la par que un estímulo que los miembros de esta casa hayan considerado que mi actividad profesional a lo largo de los años es merecedora de tal distinción. Sea para todos ustedes mi más sincero agradecimiento. Intentaré corresponder a este nombramiento participando activamente en las actividades de la Academia e impulsando aquello que esté en mi mano y manteniendo o incrementando mi actividad en el campo de la ingeniería.

No quisiera comenzar este discurso sin antes agradecer a todos los que de una u otra forma me han ayudado en el desarrollo profesional. En primer lugar a mis maestros y colegas. Comenzando por muchos de mis profesores de la etapa preuniversitaria, que despertaron mi interés por las materias científicas y técnicas y de los que aprendí valores humanos fundamentales para el desarrollo como persona.

En la Universidad son muchos a las que tengo que agradecer su colaboración, apoyo y ejemplo. Siento especial agradecimiento hacia mi maestro, el profesor Enrique Alarcón por sus enseñanzas, su estímulo y afecto, no solo durante la realización de la tesis doctoral, sino también a lo largo todos estos años. De él aprendí lo fundamental del quehacer de un universitario: el rigor en los planteamientos y soluciones de los problemas, la visión crítica, y sobre todo, el interés por la búsqueda de nuevos caminos en el planteamiento, análisis y solución de los problemas planteados. Me enseñó con su ejemplo a abordar los problemas con honestidad, combinando rigor, espíritu crítico, imaginación, perseverancia y generosidad en la colaboración.

También quiero agradecer al profesor Javier Aracil su ayuda durante mi carrera académica y especialmente el ejemplo que ha supuesto siempre observar su quehacer diario en la Universidad.

No quisiera dejar de mencionar la influencia que ha tenido en mi vida tanto personal como profesional una persona con la que compartí muchas inquietudes durante treinta años de vida académica y que desgraciadamente no está entre nosotros: el profesor Antonio Barrero. Su entusiasmo, honestidad y empuje al abordar cualquier situación y su afecto siempre me ayudaron a superar dificultades e intentar conseguir los objetivos trazados.

Mi actividad habría sido muy distinta si no hubiera contado con los colegas y colaboradores de mi grupo durante todos estos años de actividad universitaria. De todos he aprendido y sigo

aprendiendo y sin su colaboración no habría sido posible la actividad académica desarrollada por mí en estos casi cuarenta años.

Por último, pero no en menor medida, debo mostrar agradecimiento a mi familia. En primer lugar a mis padres; debo agradecer su cariño, su estímulo y apoyo constante. Me enseñaron el valor del esfuerzo y el trabajo constante para conseguir cualquier objetivo en la vida y fueron siempre un ejemplo de bondad, honradez y trabajo. A mis hermanos quiero agradecer su afecto y apoyo incondicional en cualquier situación. Especialmente estoy agradecido a mi hermano Pepón.

Él me presentó al profesor Alarcón, abriéndome el camino hacia la carrera académica. El trabajo cotidiano compartiendo inquietudes y de estímulo mutuo durante todos estos años ha sido fundamental en el desarrollo de mi actividad. Hace aproximadamente 30 años nos visitó el profesor Miller, de la Universidad de Sheffield, para iniciar una colaboración sobre fatiga de materiales y tuvo oportunidad de conocer el ambiente de colaboración que teníamos entre nuestros grupos. Una pregunta que desde entonces me hacía Keith Miller con cierta frecuenciailustra la influencia que el estímulo de Pepón ha tenido en mi actividad. Cuando nos encontrábamos de nuevo en alguna otra visita o en congresos, me preguntaba con frecuencia: Jaime, ¿tú trabajas mucho porque lo hace tu hermano o él trabaja mucho porque tú lo haces?

Finalmente tengo que agradecer a mi mujer y a mis hijos su constante apoyo y cariño. Pero sobre todo por la comprensión que me han mostrado todos estos años en los que he dejado de compartir con ellos muchas horas y fines de semana para dedicarlos a los temas profesionales que me ocupaban en cada momento. Hace algunos años, siendo pequeñas, cuando les preguntaba a mis hijas si alguna querría estudiar ingeniería cuando fuera mayor, ambas me contestaban siempre que no, que los ingenieros no hacen más que trabajar y ellas querían estar más tiempo con sus familias.

Cuando estaba decidiendo sobre el tema de este discurso, me planteaba si hacer un discurso de línea eminentemente académica, mostrando algunos de los desarrollos científico-técnicos realizados por nuestro grupo en los últimos años o, en otra línea, mostrar una breve perspectiva de la ingeniería de máquinas, destacando varios aspectos de interés en los que nuestro grupo está especialmente implicado. Opté por lo segundo.

El concepto de máquina ha ido evolucionando en el curso de los años. Desde la idea de artilugio especialmente útil para mover grandes pesos, que se tuvo inicialmente, se pasó a la idea en el siglo XIX de un sistema formado por diferentes elementos con capacidad de movimientos relativos y cuyo objetivo es la realización de un trabajo mecánico útil. Actualmente, no se considera que sea necesaria la realización de un trabajo mecánico o la existencia de movimientos relativos entre sus elementos. Ejemplos de ello son los ordenadores en general o las máquinas de juego, que no realizan trabajo mecánico alguno ni se producen en ellos movimientos de sus diferentes partes. Puede decirse que sí se ha mantenido desde el principio la idea de que el objetivo de las máquinas ha sido siempre ayudar y/o sustituir al hombre en el desarrollo de actividades difíciles de llevar a cabo. En cualquier caso, independientemente del concepto de máquina que se quiera transmitir, en este caso me referiré a Ingeniería de Máquinas como la disciplina dedicada al estudio, diseño y ensayo se sistemas mecánicos con capacidad de movimientos relativos entre sus partes y que transmiten

fuerzas y movimientos, independientemente de su tamaño y naturaleza y de que el trabajo realizado sea útil en el sentido mecánico del término o no.

Ya he comentado que el objetivo fundamental de las máquinas es ayudar al hombre o sustituirlo en el caso de las actividades más penosas. Desde un punto de vista social, las máquinas supusieron un hito para el desarrollo durante la revolución industrial y desde entonces son un vehículo para el desarrollo. Su evolución continua ha supuesto una constante mejora de la productividad y como consecuencia avances importantes en el bienestar además de potenciar el desarrollo de otras disciplinas. Los avances de algunas disciplinas han planteado nuevas necesidades y la aportación de otras ha permitido la mejora de las máquinas existentes y la aparición de otras para satisfacer las nuevas necesidades creadas, generándose así un proceso iterativo continuo que nos ha llevado hasta nuestros días.

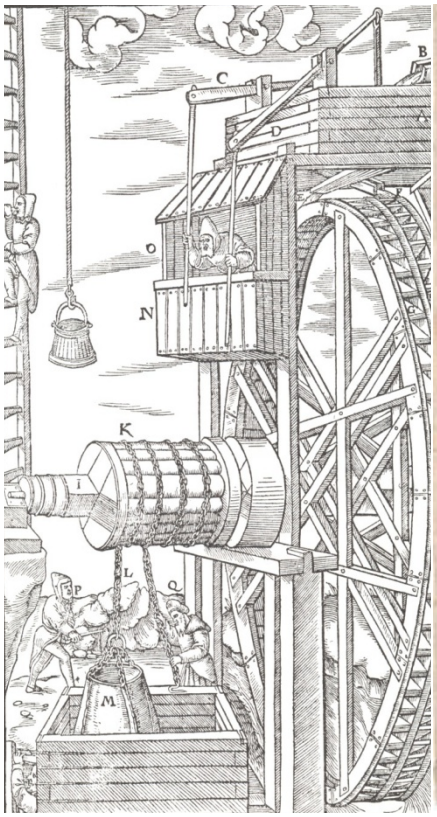

Figura 1. Máquina para elevar agua[1].

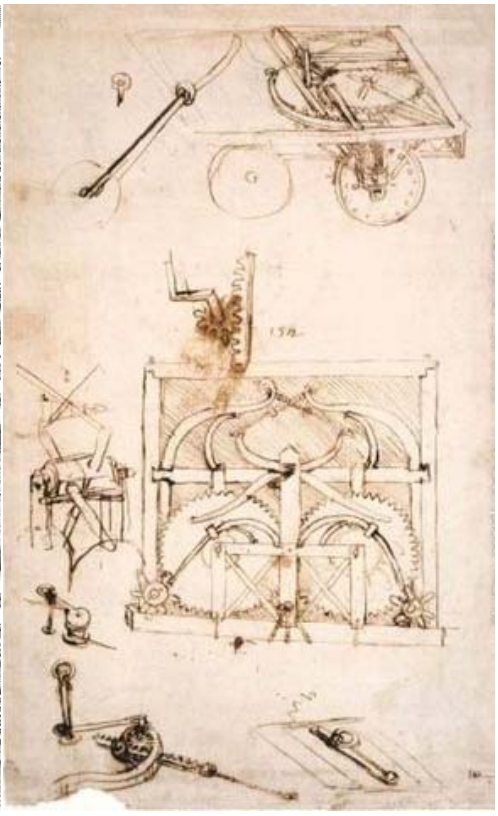

Figura 2. Boceto de automóvil de Leonardo da Vinci[2].

La evolución de las máquinas a lo largo de la historia ha estado influida por múltiples factores. Hasta el siglo XVII, estuvo marcada por la mejora de los mecanismos que las componían. Por un lado, se sustituyen los cierres de fuerza por los de forma; por otro, se desarrollan mecanismos más complejos aumentando la complejidad de los trabajos capaces de desarrollar y simplificando su realización. Muestra de ese aumento dela complejidad se puede ver en los dibujos de Leonardo, donde ya aparecen diferentes tipos de engranajes, transmisiones por cadenas, esquemas de rodamientos o incluso un primer boceto de automóvil. Las máquinas comienzan a emplearse para relacionar señales o manipular información. Ese es el caso de los relojes, que junto con otros mecanismos de precisión tuvieron gran influencia en el desarrollo de las máquinas. Su concepción y diseño requerían una gran creatividad y unas amplias dosis

de empirismo. Desde el punto de vista científico no requerían más que algunos rudimentarios análisis cinemáticos y un diseño resistente basado en análisis estáticos. El diseño lo realizaban personas que cultivaban diversas artes, entre ellas la de concepción de máquinas.

En el siglo XVIII se produce un cambio cualitativo: se establecen las bases científicas para el diseño de máquinas. Euler establece las bases de la cinemática y el mismo Euler, Lagrangey d'Alembert, precedidos por Newton en el siglo anterior y seguidos por Carnot en los inicios del XIX, establecen las bases de la dinámica, en las que se cimentará lo que hoy se denomina dinámica de máquinas.

Simultáneamente, se desarrolla la máquina de vapor, que supone la posibilidad de disponer fácilmente de fuentes de energía, al mismo tiempo que requiere para su desarrollo la obtención de nuevos materiales metálicos y mecanismos más complejos que permitan la transformación de los movimientos alternativos de las máquinas en otros, ya sean rotativos o de otra índole para la regulación del funcionamiento de las máquinas. Los requisitos impuestos por las máquinas de vapor y las necesidades de mejora de estas requieren también el desarrollo de nuevos procesos de fabricación y nuevas máquinas para ello. Se desarrolla la taladradora horizontal y el torno mecánico. Se modifican los métodos de fabricación; los sistemas de producción comienzan a dejar de ser artesanales para convertirse en fabriles.Con la máquina de vapor aparece también la industria textil.En definitiva, puede considerarse que es la principal impulsora de la revolución industrial. Sin duda, las distintas versiones de la máquina de vapor serán las impulsoras del desarrollo económico y social hasta principios del siglo XX.

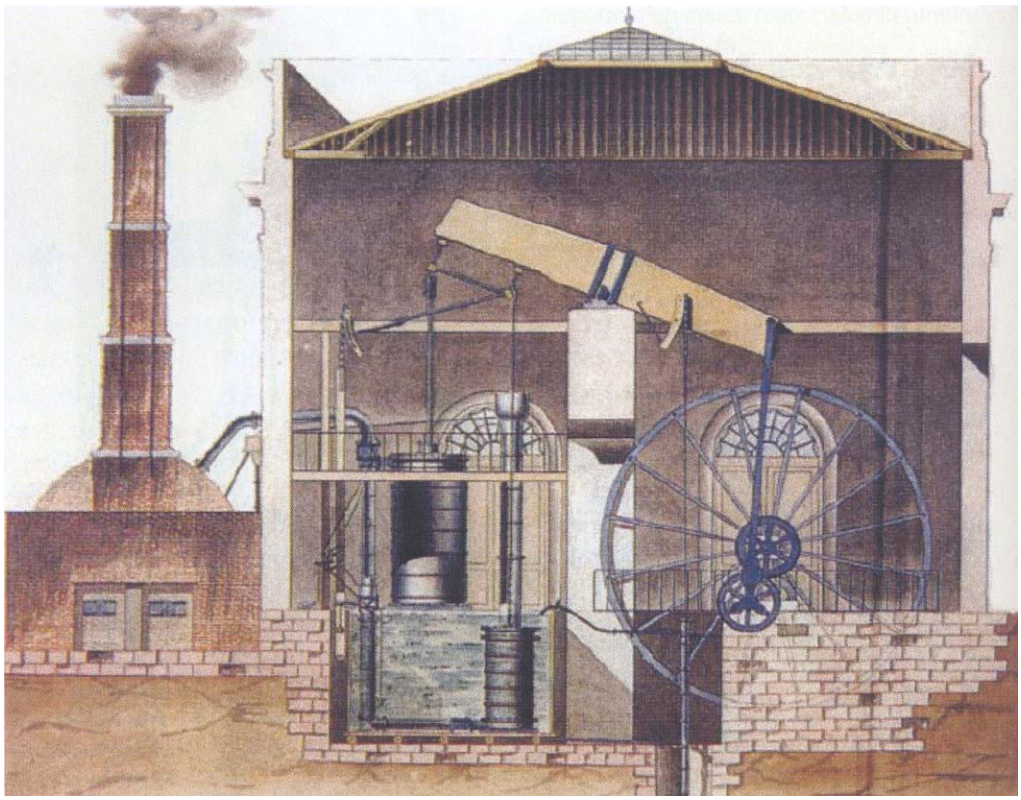

Figura 3. Máquina de vapor de doble efecto de Watt; dibujo de A. de Betancourt (1788)[3].

El siglo XIX es el de la sistematización del estudio delas máquinas. A principios de del XIX Lanz y Betancourt publican en Francia el primer ensayo sobre la composición de las máquinas[4], que puede considerarse el primer intento de clasificación de los mecanismos y que da origen a la aparición de una nueva disciplina, como es la Teoría de Máquinas. Este siglo es testigo del aumento de la velocidad y reducción del volumen de las máquinas de vapor, de nuevos desarrollos en las máquinas textiles, con la invención de la máquina de coser. Al mismo tiempo aumentan las velocidades, las fuerzas que desarrollan, las temperaturas a que deben soportar y la precisión del funcionamiento. Se desarrollan nuevos materiales y aparecen nuevas máquinas herramienta. Nuevos avances en este siglo, fundamentales para el desarrollo tecnológico y social, son la aparición de las turbinas hidráulicas y de vapor y del motor de combustión interna. Finalmente, cabe citar la aparición del ferrocarril a mediados del siglo como consecuencia de la reducción del tamaño de las máquinas de vapor.

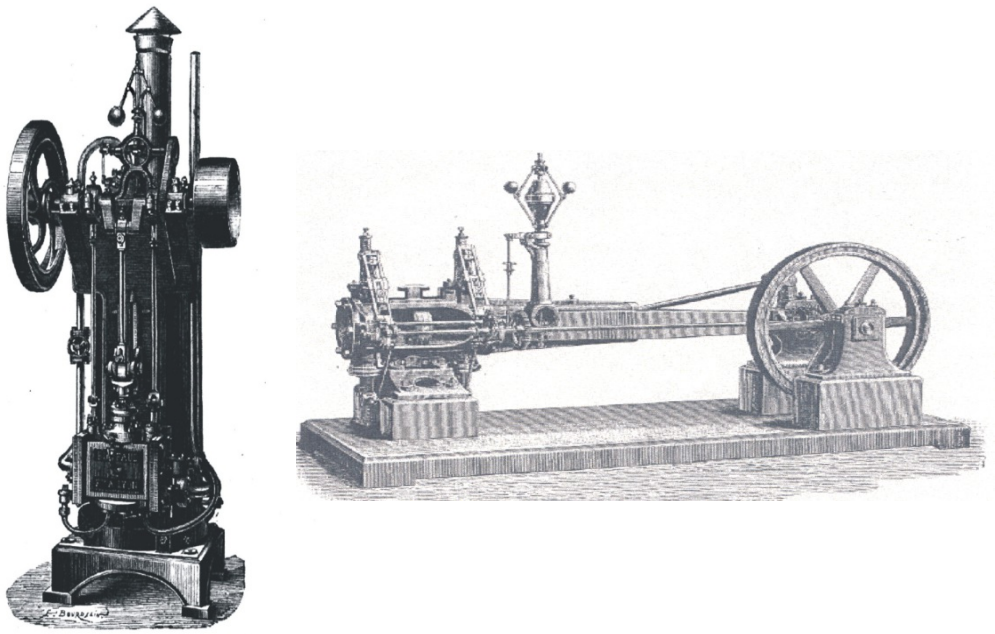

Figura 4. Máquinas de vapor vertical (1874) y horizontal (1899)[5].

Pero no es hasta el principio del siglo XX cuando se generaliza el uso del motor de combustión interna, con resultados espectaculares sobre la calidad de vida de la población, llevados principalmente por el mayor desarrollo del ferrocarril y el automóvil y, lo que es igualmente importante, la mecanización agrícola. Con el desarrollo de la electrificación de las ciudades se extiende el uso motor eléctrico y con él un nuevo concepto de las máquinas, con sistemas motrices individualizados, con una mejora delos procesos productivos como consecuencia.

Como fuentes principales del avance de las máquinas hasta el tercer cuarto del siglo pasado cabe mencionar la mejora de las capacidades de las máquinas motrices, el aumento de las prestaciones de los metales empleados en su fabricación, el desarrollo de nuevos métodos de cálculo y diseño y la aparición de nuevos diseños para cubrir nuevas o antiguas necesidades. El proyecto de las máquinas se realizaba fundamentalmente por un equipo de ingenieros mecánicos.

En los últimos 40 años el desarrollo de las máquinas adquiere unas nuevas características. Se desarrollan nuevos materiales, de mayor resistencia y menor peso, la calidad de los lubricantes permite mayores velocidades de deslizamiento y rodadura y mayores temperaturas de funcionamiento. La electrónica y la automática entran de lleno a participar en este desarrollo. Se generaliza la automatización de las máquinas, se desarrollan nuevos sensores, entre los que cabe destacar los sistemas microelectromecánicos que añaden enormes posibilidades a la automatización y control de las máquinas.

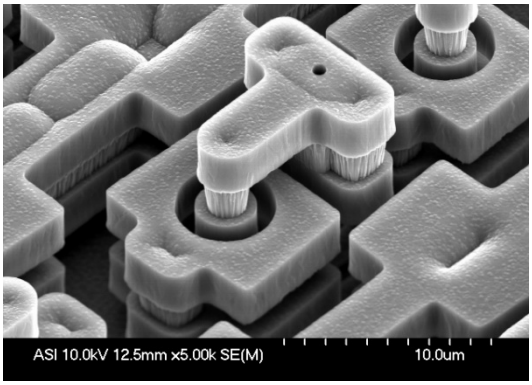

Figura 5. Actuador microelectromecánico (MEM)[6].

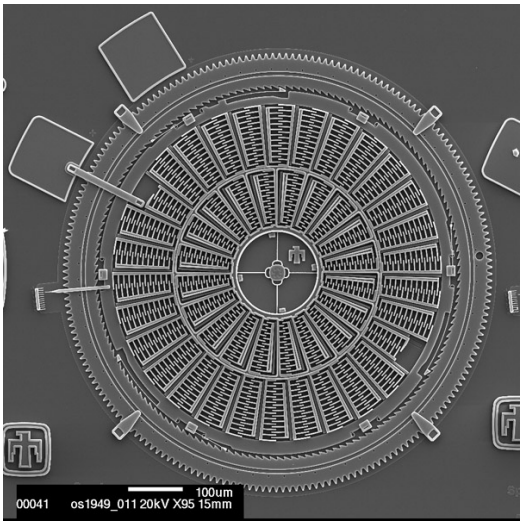

Figura 6. Actuador MEM torsional de Sandia[7, 8].

Con el desarrollo de los métodos numéricos se entra en otra dimensión tanto en el diseño como en la fabricación y operación de las máquinas y se desarrollannuevos y sofisticados sistemas de ensayo. En definitiva, aparecen nuevas máquinas que resuelven necesidades no resueltas hasta entonces o con soluciones alternativas para el mismo problema, al mismo tiempo que se incrementa sustancialmente la eficiencia de las máquinas existentes, aumentando la productividad y la calidad de vida hasta límites difícilmente imaginados pocos años antes. Los diseños de las nuevas máquinas no pueden ser realizados únicamente por ingenieros mecánicos; es necesario un grupo multidisciplinar con expertos en muy diversos campos, además de la ingeniería mecánica, como son la electrónica, la automática, o la ingeniería de materiales.

En este contexto, ¿cuál es el papel a desempeñar por la ingeniería mecánica en un escenario de interdisciplinariedad y de aumento del protagonismo de otras disciplinas en las máquinas?

La Ingeniería de máquinas debe estar preparada para la colaboración, realizando nuevas aportaciones y desarrollos que se complementarán con los aportados por otras disciplinas. Con estas colaboraciones se presentarán nuevas posibilidades, nuevas aplicaciones y nuevas soluciones.

Ejemplos de aportaciones conjuntamente con otras disciplinas los encontramos en los robots y mecanismos posicionadores. Los robots son unas de las máquinas que han producido una de las transformaciones más importante de los procesos productivos. Su diseño es una tarea que debe ser realizada conjuntamente entre ingenieros mecánicos y de automática y electrónica. La necesidad de colaboración entre esas disciplinas para el diseño y análisis de robots y otras máquinas se ha hecho tan patente que han dado origen a nuevas disciplinas que las combinan como son la robótica o la mecatrónica. Los requisitos de diseño requieren conseguir una alta movilidad y resistencia, poco peso, precisión, simplicidad de movimiento y facilidad de control. Para conseguirlo, es necesario que el diseño tenga un comportamiento dinámico adecuado, exento de vibraciones y distorsiones en elmovimiento.Aunque los aspectos mecánicos en un robot se consideran a veces triviales, hay aún muchos análisis y diseños que requieren avances importantes para conseguir un comportamiento eficiente. Por ejemplo, es necesario realizar actuadores adecuados para muchas aplicaciones específicas o pares cinemáticosmás ligeros, rígidos, robustos, con alta movilidad, que permitan el control independiente de los diferentes grados de libertad, y simplicidad de las ecuaciones de restricción.

Centrándonos en los aspectos de la dinámica de los robots, un análisis dinámico preciso y rápido es primordial para un correcto dimensionamiento de los sistemas de accionamiento y sobre todo para el correcto control de los movimientos. Para conseguir un control eficiente es imprescindible disponer de una formulación suficientemente simple y precisa que permita el control en tiempo real. Para ello será necesario el aumento de las velocidades de análisis cinemático y dinámico, lo que requiere nuevos modelos semianalíticos y procedimientos numéricos. Al mismo tiempo,el aumento de las velocidades de análisispermitirá considerar aspectos no incluidos hasta ahora por su complejidad y coste computacional como son las holguras, que reducen la precisión y aumentan las vibraciones y esfuerzos soportados por los componentes, o el rozamiento, que modifica el comportamiento dinámico.

En el caso de los robots de cadena abierta generalmente empleados en la industria los modelos dinámicos están bien estudiados y permiten su simplificación, manteniendo generalmentela precisión necesaria. No obstante los métodos experimentales de identificación de los parámetros dinámicos son aún motivo de estudio por un buen número de investigadores.

El uso de los robots paralelos se está extendiendo en las últimas décadas[9]. Aunque su reducido espacio de trabajo limita el uso a determinadas aplicaciones, son especialmente adecuados cuando se requiere una gran rigidez, una buena relación capacidad de carga-peso, buena precisión en los movimientos o altas velocidades y aceleraciones. Son bien conocidas sus aplicaciones en simuladores de vuelo o en sistemas de posicionamiento en máquinas herramienta de alta velocidad. Como hemos indicado, para obtener una buena precisión de movimientos es necesario disponer de controladores robustos capaces de hacer simulaciones dinámicas realistas y precisas. Sin embargo, sus modelos dinámicos son altamente complejos y

requieren una fuerte simplificación de las ecuaciones sin por ello perder precisión. Estas particularidades hacen que la dinámica de robots paralelos sea otro de los campos de reciente actividad en ingeniería de máquinas.

Figura 7. Plataforma Stewart, ejemplo de robot paralelo.

Otro ejemplo de sistemas que requieren un diseño interdisciplinar pueden ser las máquinas herramientas con control numérico. Aunque importantes las aportaciones de otras disciplinas, aún hay muchos aspectos que mejorar en estas máquinas, especialmente las de mecanizado a alta velocidad. Estas fundamentan sus excelentes prestacionesen la deformación plástica cuasi adiabática muy localizada en la zona de corte, que reduce la resistencia local del material y permite el mecanizado con fuerzas un orden de magnitud inferior que en el mecanizado tradicional. Sin embargo, para conseguir precisión, acabados y consumos energéticos competitivos es necesario seguir avanzando en el modelado de los problemas termoelastoplásticos y procesos de localización del falloque se producen. Igualmente, la mejora de los modelos dinámicos no lineales del conjunto pieza-herramienta-husillopermitirá reducir las fuerzas sobre las herramientas y las cargas sobre los husillos, con el consiguiente aumento de la duración de los mismos y la reducción de costes.Por otro lado, el mejor conocimiento del comportamiento del material ante las fuerzas de corte y el modelado con mayor fidelidad del proceso de interacción pieza-herramienta permitirá una reducción de las fuerzas de corte, la mejora de la precisión y el acabado, y una disminución de las tensiones residuales superficiales producidas por el corte. Estas últimas, responsables tanto de distorsiones de la geometría de la pieza fabricada como de posibles fallos por fatiga durante su uso. Al mismo tiempo, la reducción delas vibraciones autoexcitadas producidas por las cargas de mecanizado en el conjunto herramienta-husillo permitirá mejorar también el acabado superficial y la precisión en el mecanizado.Todo ellosupondrá una mejora de la eficiencia del proceso de corte y aumentando la productividad sin menoscabo de la calidad de las piezas fabricadas.

Los ferrocarriles, especialmente los de alta velocidad son otro ejemplo de colaboración entre múltiples disciplinas. Desde la Ingeniería Civil y Mecánica hasta la Ingeniería Eléctrica, la Electrónica o la Automática. En este campo hay diversos aspectos que requieren soluciones basadas en la ingeniería mecánica para su desarrollo.

El modelado de la interacción rueda carril a las velocidades que se desarrollan, considerando la flexibilidad tanto de los elementos rodantes como de la infraestructura estática, es esencial para el análisis del comportamiento dinámico del vehículo. Su estabilidad, y por tanto la seguridad y el confort de los pasajeros, dependen de ello. El modelado de las condiciones locales del contacto entre rueda y carril, considerando las deformaciones que se producen, y el conocimiento de la posición lateral del punto de contacto en el ancho de la rueda y del carril es necesaria para determinar las fuerzas transmitidas al vehículo. Dichas fuerzas condicionan no solo la estabilidad sino también el daño producido en la rueda y el carril. Ya en marzo de 1955 se alcanzaron 330 km/h en una prueba de velocidad en Francia; sin embargo, las deformaciones producidas en la víadurante las pruebas fueron tales que fue necesaria su reparación antes de permitir el paso de otros trenes. Hicieron falta 25 años más de investigación sobre la dinámica de la interacción vehículo-carril para permitir el uso comercial de esas velocidades de forma segura. Actualmente sigue siendo necesario el perfeccionamiento delos modelos y diseños para aumentar la velocidad, la seguridad y el confort, además de la reducción de costes.

Figura 8. Estado de la vía después del record de velocidad de 330 km/h en 1955[10].

Figura 9. Tren con el record de velocidad de 575 km/h, en 2007[11].

La integridad estructural de la infraestructura ferroviaria es otro aspecto fundamental en la fiabilidad del servicio y la seguridad de los pasajeros[12, 13]. Los fallos por fatiga de los vehículos y vías han sido numerosos en la historia y desgraciadamente se siguen produciendo aunque con escasísima frecuencia. Desde que a mediados del siglo XIX se identificara el problema de la fatiga en los ejes de ferrocarril, se ha producido un gran número de avances, fruto de investigaciones normalmente a cargo de ingenieros de materiales y mecánicos.

Por un lado, la mejora de los materiales ha incrementado su resistencia. Por otro, el desarrollo de las infraestructuras, con raíles más flexibles verticalmente, los diseños de los bogies con masa no suspendida más ligera y flexible y los avances producidos en los sistemas de suspensión y amortiguación han permitido reducir las solicitaciones dinámicas sufridas por los elementos. Además, la mejora de los modelos de predicción de vida a fatiga, de estimación de las cargas de distinto tipo y de los modelos de evolución del daño han permitido hacer diseños más resistentes y con menor peso, al mismo tiempo que han ayudado a diseñar programas de mantenimiento que detecten daños antes de que devengan en fallos catastróficos.

En la actualidad hay muchos campos de la ingeniería mecánica que despiertan gran interés por su repercusión en el avance tecnológico y en los que existe actualmente una gran actividad de investigación y desarrollo. Algunos de ellos son la dinámica, la integridad estructural, la biomecánica, el modelado del comportamiento de nuevos materiales, el conformado de materiales, la fiabilidad, la acústica, los microsistemas mecánicos y electromecánicos o las máquinas de precisión.

En el caso de la dinámica, ya hemos comentado algunos sectores en los que su aplicación es fundamental para el desarrollo de nuevos sistemas. En ese sentido, cabe destacar la dinámica de vehículos.Entre las líneas de mayor interés por su repercusión de una u otra forma a la mejora de la seguridad y confort, cabe mencionar el diseño de suspensiones en vehículos.

Para el adecuado funcionamiento de la suspensión en cualquier condición de conducción, además de su geometría, que condiciona la cinemática y dinámica del vehículo tanto en recta como en curva, es fundamental el diseño de los sistemas elásticos y de amortiguamiento dela misma, para garantizar una buena interacción neumático-pavimento, al mismo tiempo que una adecuada transferencia de las fuerzas a la estructura.

El diseño de la geometría y leyes de comportamiento de los elementos tradicionales de la transmisión para conseguir el confort y la estabilidad requeridos exigeel estudio del comportamiento dinámico conjunto de las masas suspendida y no suspendida particularizado para cada modelo de vehículo. Este es un problema clásico de ingeniería en el diseño de vehículos, para cuya solución hace años que existen métodos establecidos. La introducción de los sistemas de suspensión activa ha incorporado una nueva dimensión al problema. El diseño se ha convertido en un problema claramente multidisciplinar. Los ingenieros de automática deben realizar el sistema de control activo, contando con los modelos dinámicos aportados por los ingenieros mecánicos. La relación entre las características mecánicas requeridas al vehículo, el modelo dinámico del mismo y el sistema de control hace imprescindible el trabajo en equipo de especialistas de ambas disciplinas.

Por otro lado, es bien conocido que las condiciones de presión y rigidez del neumático condicionan el comportamiento dinámico en general y particularmente la estabilidad del vehículo en curvas. Sin embargo, la simulación de esta interacciónno es una tarea sencilla. El neumático tiene un comportamiento visco-elástico no lineal, con grandes deformaciones. A ello se une la complejidad del problema local del contacto de rodadura entre neumático y asfalto, así como el conocimiento limitado delas fuerzas de adherencia y su dependencia de las condiciones ambientales. Todo ello hace que los modelados de estas interacciones sean generalmente parciales, con simplificaciones que hagan abordable el problema, lo que reducesu fiabilidad. Esta reducción de fiabilidad se debe compensar conmayores requisitos de experimentación durante el diseño y desarrollo de cualquier sistema de suspensión, con el consiguiente aumento de tiempo y coste.

Cabe también mencionar el interés de la dinámica de vehículos ante impactos. La importancia creciente de la seguridad ha hecho que cada vez se empleen más medios al diseño de sistemas de seguridad, tanto la activa, entre los que se encuentran el sistema de suspensión ya mencionado, el de frenado o de dirección, como la pasiva. Para el diseño de estos últimos sistemas, entre los que se encuentran el cinturón de seguridad, los airbags o la carrocería, es fundamental el correcto modelado del comportamiento del vehículo y sus ocupantes en situaciones de emergencia, como pueden ser choques o vuelcos. El modelado de las deformaciones del vehículo en esas circunstancias, conjuntamente con la dinámica del vehículo y los ocupantes y la interacción entre ellos es un campo de enorme actividad actualmente en ingeniería de vehículos. Estos modelos permiten estimar las fuerzas transmitidas a los ocupantes y el diseño de los elementos que reduzcan los efectos de los citados impactos.

La biomecánica es un campo al que cada día se dedica más atención y en el que la ingeniería mecánica, conjuntamente con los profesionales sanitarios y otras disciplinas están participando muy activamente en los últimos años. Las líneas de colaboración son numerosas; desde el diseño de prótesis o la ayuda a la planificación de intervenciones quirúrgicas, hasta análisis dinámico del movimiento humano, ya sea orientado al deporte o a la corrección de alteraciones patológicas de los movimientos, pasando por el análisis del flujo sanguíneo, la deformabilidad de tejidos blandos o las distribuciones de tensiones en implantes.

Figura 10. Prótesis de mano y de rodilla.

El análisis dinámico del movimiento humano requiere en primer lugar un correcto modelado de los grados de libertad de cada articulación o par cinemático. Normalmente las articulaciones de la naturaleza tienen una gran riqueza de movimientos posibles, lo que posibilita la flexibilidad y capacidad de movimientos. Generalmente, tienen varios grados de libertad y varían su configuración durante el movimiento relativo, lo que dificulta su modelado. Las fuerzas entre los componentes se transmiten por contacto con algún elementoviscoelástico interpuesto, que reduce los picos de las fuerzas y redistribuye las tensiones de contacto. La zona del contacto varía de una posición a otra durante el movimiento, produciéndose simultáneamente desplazamientos y giros relativos en más de una dirección entre las superficies de contacto. Todo ello hace que los modelos haya que ir transformándolos durante la simulación, al mismo tiempo que hay que resolver un problema de contacto con deslizamiento.

Debido a esta complejidad de movimientos, los modelos más completos, aunque con simplificaciones, solo se realizan para estudios parciales y concretos de prótesis de las articulaciones. En otros casos la complejidad del modelo y el coste computacional lo hacen actualmente inviable. Para el estudio de movimientos coordinados de varias articulaciones es necesario simplificar el modelo, normalmente reduciendo los grados de libertad permitidos a cada una de ellas.

En cualquier caso, para el análisis del movimiento se requieren dos tipos de análisis dinámicos consecutivos. Por un lado debe realizarse el denominado análisis dinámico inverso. Mediante este análisis, se registran los movimientos del sujeto en estudio, concretamente los movimientos de diferentes referencias adheridas al cuerpo durante el movimiento que desea representarse. Dichos movimientos de puntos dela piel deben transformarse en movimiento de la estructura ósea, para lo que se emplean sensores redundantes y técnicas de minimización de errores. A partir de esos movimientos se determinan las fuerzas necesarias en cada articulación para producirlos.

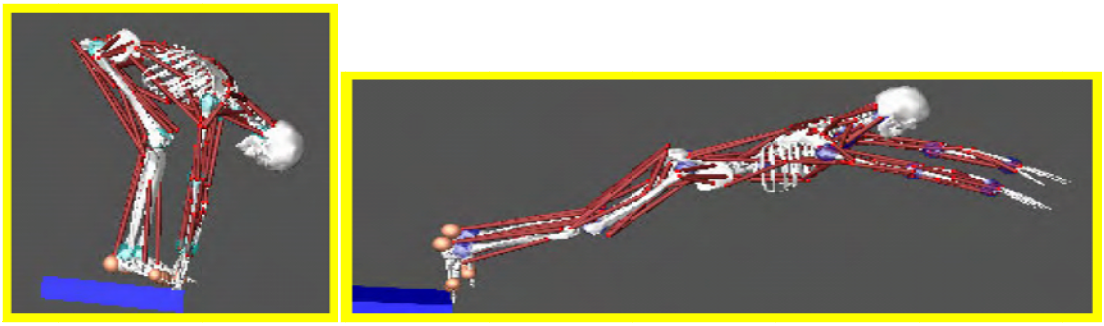

Figura 11. Simulación de movimientos humanos.

Hecho este análisis inverso, deben determinarse las fuerzas que realizan los músculos para conseguir los movimientos. Si cada movimiento estuviera gobernado por un solo músculo, el problema sería simple. Pero los músculos actúan conjuntamente, colaborando entre varios de ellos para conseguir cualquier movimiento. En otras palabras, para cada movimiento suele haber músculos redundantes y si quieren conocerse las fuerzas producidas por cada uno debe determinarse la proporción del trabajo que realiza cada uno de ellos, proporción que varía con la velocidad, la posición e incluso en función del valor total de la fuerza a desarrollar. Para resolver esta indefinición deben emplearse técnicas de optimización basadas en la

minimización de algún parámetro fisiológico, como pueden ser la fatiga muscular o el coste metabólico. Resuelta esta indefinición, sepuede determinar la evolución de la fuerza que debe desarrollar cada músculo en su inserción para conseguir la fuerza generalizada obtenida en el análisis inverso. Bien sea como ayuda para la determinación de las fuerzas musculares o para contrastación de los resultados obtenidos en los análisis puede recurrirse a la medida de la actividad muscular mediante algún procedimiento aplicable, por ejemplo electromiografía.

En relación al diseño de prótesis, puede decirse que es una actividad en la que participan tanto ingenieros mecánicos como de materiales, conjuntamente con profesionales sanitarios. El uso de nuevos materiales biocompatibles y a veces osteointegrables que garanticen a su vez la integridad estructural ha requerido y requiere esfuerzos importantes de investigación y desarrollo de nuevos materiales. En unos casos el problema es de desgaste de la prótesis y en otros de fatiga, ya sea de la prótesis o del hueso y siempre unidos a los múltiples aspectos planteados por las necesidades de biocompatibilidad del conjunto hueso-implante.Desde el punto de vista mecánico, es importante reducir al mínimo posible las concentraciones de tensión en la unión hueso-prótesis, ya que son fuentes de reabsorciones y fallos por inestabilidad. En los puntos de contacto entre elementos con movimiento relativo son críticas las propiedades tribológicas de las superficies en contacto, principalmente coeficiente de rozamiento y resistencia al desgaste. Por un lado, el excesivo desgaste puede originar mal funcionamiento de la prótesis y requerir su sustitución, y por otro, los residuos del desgaste quedan circulando por el cuerpocomo elementos contaminantes, con las consecuencias que puede tener. Por ello, es fundamental el diseño con las menores tensiones de contacto posibles, la máxima resistencia al desgaste y con materiales que no sean contaminantes. Lo primero se consigue mediante el diseño con una geometría que aumente las superficies de contacto con la menor restricción posible de los movimientos y los otros dos requisitos mediante ingeniería de materiales.

Otro campo de enorme importancia en la biomecánica es el estudio del flujo sanguíneo y su interacción con los vasos. Tanto el estudio de la influencia de las propiedades mecánicas de los eritrocitos en la circulación por los vasos sanguíneos de menor diámetro, cuya modificación por enfermedades como la malaria puede tener efectos letales, como el análisis de la influencia de las propiedades de las paredes de los vasos en el flujo sanguíneo o en la posible aparición de aneurismas y su desarrollo, son campos de gran actividad en la ingeniería mecánica. Igualmente, son campos en constante desarrollo la aplicación de la mecánica de medios continuos al estudio del comportamiento de tejidos blandos, de gran utilidad, entre otras, para la planificación de intervenciones de cirugía plástica.

Finalmente, no quisiera dejar de mencionar un campo de la ingeniería mecánica, que por ser antiguo, no deja de ser actual y de enorme interés en múltiples áreas de la ingeniería: ya sean los transportes, la energía, la maquinaria en general o inclusola electrónica, este es la integridad estructural, y especialmente la fatiga.

La fatiga es un daño estructural localizado y progresivo que se produce en los materiales sometidos a cargas cíclicas y que puede producir la rotura con cargas bastante menores que su límite de fluencia. El número de ciclos de carga necesarios para producir la rotura depende del nivel de tensiones, pudiendo ser de uno o varios miles hasta cientos de millones.

La existencia del fenómeno es conocida desde la primera mitaddel siglo XIX. Los primeros análisis del problema se hicieron en la minería, donde eran frecuentes las roturas de cadenas de sistemas de alimentación de mineral. Sin embargo, es en los ferrocarriles donde se hizo más palpable el problema de la fatiga debido a la frecuencia de los accidentes y las consecuencias catastróficas de los mismos. Desde el accidente de ferrocarril producido en Versalles en 1842 como consecuencia de la rotura de un eje y que se cobró la vida de 60 personas, hasta finales de ese siglo los accidentes fueron enormemente frecuentes y un gran número de ellos producidos por fatiga. Fueron frecuentes hasta tal punto que en 1887 aún podíanverse en la prensa británica noticias como la que decía[14]"el accidente ferroviario más grave de la semana ocurrió el 27 de mayo. La rotura de una rueda causó la muerte de seis personas" o la aparecida un mes después diciendo "el accidente ferroviario más grave de la semana ocurrió el 23 de junio como consecuencia de la rotura de un raíl. Falleció una persona". Los fallos se producían tanto en los ejes como en las vías o incluso en puentes. Puede decirse que fueron las primeras máquinas en las que por sus características de funcionamiento se producían grandes solicitaciones con variación cíclica y un alto número de ciclos.

Aunque el conocimiento del fenómeno y los medios para evitarlo han aumentado apreciablemente desde entonces, en el siglo pasado hubo un número importante de accidentes debido a este fenómeno en múltiples sectores industriales. Así, es bien conocido el caso de la serie de barcos Liberty producidos por los Estados Unidos durante la segunda guerra mundial[15]. Utilizando procedimientos de fabricación en serie y haciendo los cascos mediante soldadura para aumentar el ritmo de producción, se llegaron a producir 2710 barcos de diversos tipos. De ellos, solo200 se perdieron por ataques enemigos, sin embargo alrededor del 50% presentarongrietasconsiderables por fatiga, más de 100 tuvieron fracturas casi completas de la estructuray alrededor de 20 llegaron a fracturarse con separación completa en dos partes. La defectuosa ejecución de las soldaduras, el uso de aceros poco adecuados para ello y la falta de elementos para detener el crecimiento de las grietas, como eran previamente las líneas de remaches de conexión entre planchas de acero, hicieron que se iniciaran fisuras en puntos de concentración de tensiones; defectos que en un alto número de casos se propagaron hasta la fractura final del barco. Pero no tenemos que ir a esa época para encontrar fracturas de barcos iniciadas por un proceso de fatiga: el Prestige es un ejemplo reciente de fallo por fatiga de desastrosas consecuencias.

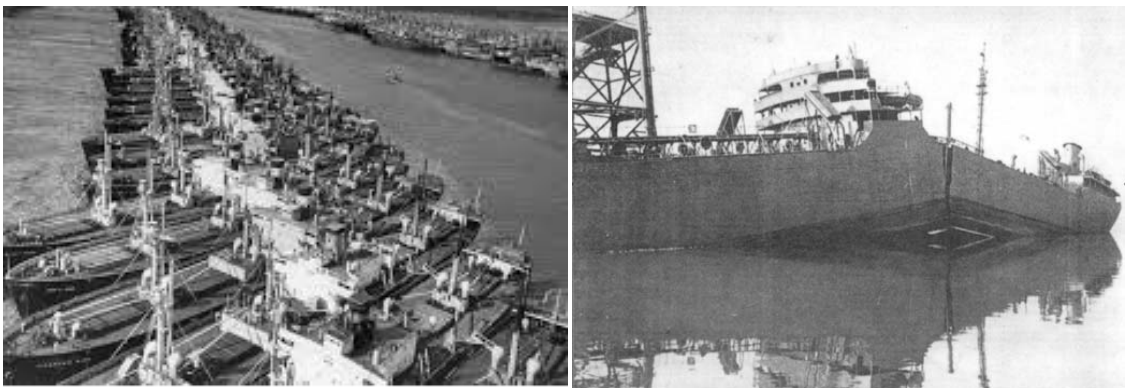

Figura 12. Conjunto de barcos de la serie Liberty y uno de ellos, el Schenectady, fracturado mientras estaba en puerto.

Figura 13. Imagen del Prestige durante el hundimiento.

En la industria aeronáutica hay múltiples ejemplos de fallos por fatiga. Uno de los más conocidos por sus consecuencias es el de los aviones Comet, producidos por de Havilland en el Reino Unido. Este modelo entró en servicio a principios de los 50 del siglo pasado y supuso un hito en la aviación, ya que fue el primer avión comercial turbopropulsado.A los dos años del primer servicio comercial se habían producido tres accidentes catastróficos en vuelo, con la destrucción total del avión. Después de dos años de análisis de los restos, se descubrió que los fallos se habían producido por fatiga[16].

El aumento de la altitud de vuelo de estos aviones requirió la presurización de los mismos, lo que significaban nuevas solicitaciones al fuselaje, sometido a un ciclo de presión en cada vuelo. El diseño de las ventanillas cuadradas unido a los taladros para remachado de las ventanillas provocaba unas concentraciones de tensión que indujeron la iniciación de grietas bajos las presurizaciones cíclicas. Grietas que cuando llegaron a una longitud suficiente generaron la fractura completa del fuselaje.La solución no era complicada, pero necesitaron de los accidentes antes descritos para darse cuenta de ello: hacer las ventanillas ovaladas o al menos con las esquinas suficientemente redondeadas y fijar las ventanillas mediante pegado envez de remachado.

Además de las pérdidas materiales producidas por estos accidentes, el fallo de diseño supuso la pérdida de competitividad de la fabricación de aviones comerciales en Europa frente a sus competidores Boeing y McDonald. El descrédito del fabricante y las necesidades de modificación del diseño retrasaron las soluciones y redujeron los pedidos de tal forma que sus competidores se hicieron prácticamente con todo el mercado de turborreactores comerciales.

Pero no hay que irse a hace 60 años para encontrar fallos por fatiga en la industria aeronáutica. Los accidentes producidos en los DC-10 en los años 70 son otro ejemplo de este tipo de fallo. Quizás el más conocido es el producido en el vuelo 118 de American Airlines al despegar del aeropuerto O´Hare en Chicago. Durante el despegue se produjo el desprendimiento de uno de los motores lo que ocasionó la pérdida de estabilidad y el accidente inmediatamente después del despegue.

Un mal diseño del sistema de sujeción de los motores que permitió que se generaran microfisuras por fatiga en los bulones de sujeción, unido a malas prácticas de mantenimiento durante el montaje y desmontaje permitieron la fractura final por fatiga de esos bulones y el desprendimiento final de los motores[16]. La solución no era complicada: un rediseño de la fijación y unas instrucciones de mantenimiento precisas y de obligado cumplimiento. Pero además de ello, por si eso no fuera suficiente, los bulones de fijación se diseñaron con el concepto de tolerancia al daño. Dichos bulones son tubulares, con fluido fosforescente en su interior y capaces de soportar las fuerzas de empuje de los motores incluso cuando tienen una grieta pasante del interior a la superficie. De esa forma, cualquier grieta que se inicie en la superficie y alcance el núcleo del bulón producirá una fuga de líquido detectable a simple vista bastante antes de originar un fallo catastrófico.

Figura 14. Accidente de un Dc-10 en el aeropuerto O'Hare de Chicago.

En esta época se comenzó a introducirse en la industria aeronáutica el criterio de diseño denominado tolerante al daño. Dicho criterio considera que es posible que aparezcan grietas en un avión y por ello debe garantizarse que la aparición de dichas grietas no generará un fallo catastrófico. Para ello, el avión debe diseñarse capaz de soportar las cargas de funcionamiento con grietas de determinada longitud, que en aviones comerciales grandes puede llegar a un metro en algunos puntos. Pero ello no quiere decir que se permita volar con grietas de esas dimensiones. El diseño tolerante al daño va unido al cumplimiento de tres condiciones: la capacidad de análisis de la velocidad de crecimiento de grieta por fatiga ante las cargas de funcionamiento; la capacidad de detección de grietas de pequeñas dimensiones durante el mantenimiento; y una planificación adecuada de los periodos de revisión para comprobar la existencia de grietas. Teniendo en cuenta las grietas menores que es capaz de detectar el sistema de inspección, los periodos de revisión deben planificarse suficientemente cortos para que desde que la grieta alcanza una longitud detectable por los procedimientos al uso hasta que llega a la longitud máxima tolerada se hayan producido varias revisiones. De esa forma solo es posible un accidente si el procedimiento de detección de grietas falla varias veces y cada vez con grietas de mayor longitud, más fáciles de detectar.

Pero sin ir tan lejos en el tiempo, y después de la aplicación de criterios de tolerancia al daño en el diseño, aún se han producido algunos accidentes debido a la fatiga. Es bien conocido el accidente de un Boeing 727-200 de la compañía Aloha en 1988[17], después de 89100 vuelos. Durante una tormenta se desprendió parte de la parte superior del fuselaje, dejando al descubierto todo el ancho de la cabina en una longitud de aproximadamente 5 metros haciendo necesario un aterrizaje de emergencia en el aeropuerto más próximo. El hecho de

que estuvieran pasando una tormenta, llevando los pasajeros el cinturón abrochado permitió que un accidente tan aparatoso se saldara con solo una víctima: una azafata que fue succionada durante la despresurización producida.

Figura 15. Estado en que quedó el avión accidentado de la compañía Aloha en 1988 después del accidente.

El fallo ocurrió debido a lo que se denomina “multysite fatigue crack initiation”, un tipo de fallo no contemplado hasta entonces en los supuestos del criterio de tolerancia al daño. La iniciación de múltiples grietas por el efecto sinérgico de la corrosión y la fatiga en los bordes de taladros contiguos de paneles remachados y la unión posterior de estas grietas provoca un daño de crecimiento rápido por la interacción de las tensiones alrededor de cada taladro. A partir de entonces es necesario modelar este crecimiento y garantizar en el diseño que estas grietas son detectables en los periodos de inspección especificados.

No obstante estas nuevas especificaciones, aún se producen fallos por fatiga, como el producido el 13 de julio de 2009 en un Boeing 737 de la compañía Southwest Airlines[18] o el ocurrido el 1 de abril de 2011 en otro Boeing 737 de la misma compañía[19]. En ambos casos se produjo una descompresión debido a un agujero en el fuselaje. En el primer caso se inició una grietaen el bode de un rebaje realizado mediante fresado electroquímico[18, 20] y el segundo,de nuevo una situación de“multysite fatigue crack initiation”, produjo una rotura en el fuselaje de 1,5 m por 20 cm. Cabe decir que la aerolínea tenía el antecedente de multa de 7,5millones de dólares por sus defectuosas prácticas de mantenimiento.

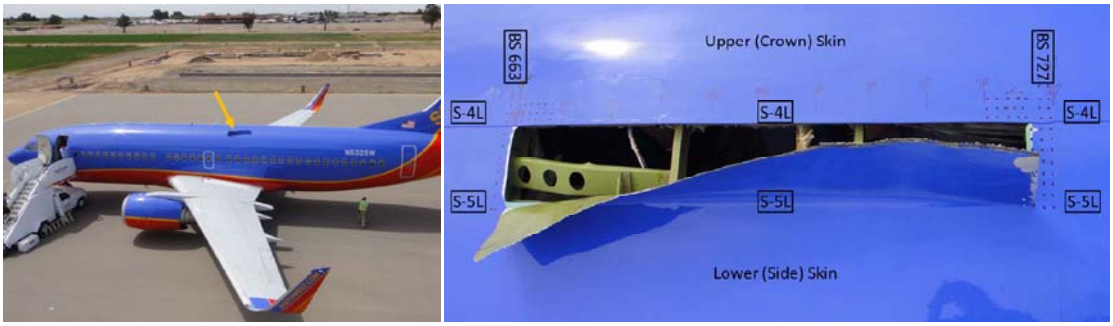

Figura 16. Fallo producido en un Boeing 737 de la compañía Southwest Airlines en abril de 2011.

Fallos por fatiga pueden encontrarse en prácticamente cualquier tipo de máquina sometida a cargas variables en el tiempo. Así, en las turbinas de vapor y gas son típicos los fallos en álabes en los puntos de conexión al rotor, frecuentemente producidos por el fenómeno denominado fatiga por *fretting*, fenómeno en el que colaboran las tensione de contacto asociadas a microdeslizamientosen la unión con las tensiones globales en los álabes. En la industria de los aerogeneradores se encuentran fallos por fatiga en tornillos de conexión de las palas, en los ejes principales, en la estructura de la torre o en los componentes de la multiplicadora; en la automoción son frecuentes los fallos en ejes de transmisión, componentes de la suspensión, bloques del motor, debidos a cargas térmicas, cigüeñales o cajas de cambio. En general, son elementos típicos sujetos a fatiga los ejes de transmisión, rodamientos, resortes, tornillos y un largo etcétera, entre el que cabe destacar las soldaduras. Incluso, en los últimos años ha aparecido fatiga a bajo número de ciclos en componentes electrónicos debido a las altas temperaturas cíclicas que deben soportar algunos de ellos.

Pese a los enormes avances en este campo, la fatiga sigue siendo probablemente la causa principal de fallo mecánico en máquinas en general. Muestra de ello son algunas estadísticas sobre modos de fallo en máquinas y en la industria aeronáutica. En los años 90, Nishida[21], realizó un análisis delos fallos mecánicos producidos en máquinas fabricadas por la multinacional japonesa Hitachi. De 242 casos analizados, el 77% de ellos fueron producidos por fatiga en alguna de sus manifestaciones, ya sea fatiga simple, a bajo número de ciclos, por contacto o fatiga con corrosión. Igualmente, a finales de los años 70, de diversos análisis realizados por las fuerzas aéreas americanas[22], se pudo concluir que de los fallos estructurales analizados, más del 50 % de ellos fueron fallos por fatiga y más del 30% de los fallos de los motores.

Para reducir la incidencia de la fatiga en los fallos mecánicos es necesario seguir profundizando en el fenómeno y para ello es necesario abordar el problema desde diferentes puntos de vista. Por un lado, es fundamental alcanzar un mejor conocimiento de las cargas que se producen, lo que requieremejorar los modelos y análisis dinámicos. También, será necesario introducir las componentes aleatorias de las cargas producidas, ya sean debidas a agentes atmosféricos, defectos de fabricación, modificaciones por el uso o variabilidad de los regímenes de carga producidos.

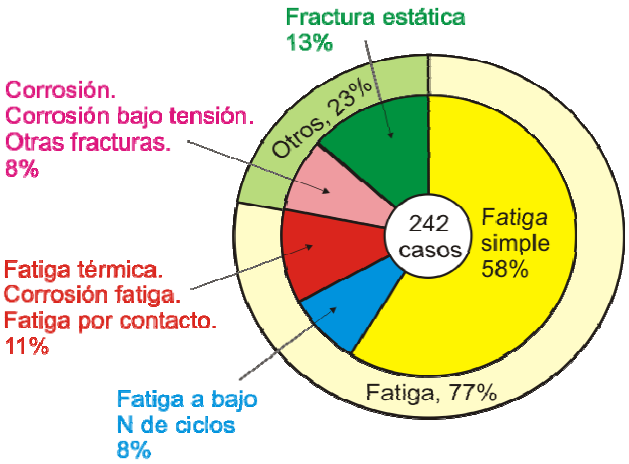

Figura 17. Estadística de modos de fallo mecánicoen máquinas Hitachi[21].

Figura 18. Estadística de modos de fallo en aviones[22].

Por otro lado, es importante mejorar el conocimiento del proceso de fatiga desde el punto de vista de Ciencias de Materiales. Eso requiere conocer realmente los mecanismos de iniciación y propagación de las grietas, analizando el efecto de diferentes factores, como son el material y su microestructura, el tipo y nivel de carga, los agentes externos, etc. Especialmente importante es el conocimiento de los parámetros que caracterizan el crecimiento de las grietas cuando tienen dimensiones del mismo orden que la microestructura del material, ya que en ese estadio se consume generalmente la mayor parte del tiempo necesario para llegar al fallo final.

El avance en el conocimiento del proceso permitirá la mejora los modelos de iniciación y crecimiento de grieta, incluyendo los efectos de los múltiples factores que influyen en el proceso. Ello permitirá una mayor aproximación en la extrapolación de los resultados de ensayos en condiciones muy específicas a las condiciones reales de funcionamiento.

Normalmente se realizan en condiciones muy definidas y controladas, tales que permitan extrapolar posteriormente los resultados a otras condiciones, ya sean de carga, ambientales, de tensiones residuales o geometría del elemento. Excepto los ensayos orientados a aplicaciones muy específicas, realizados generalmente para comprobación de la resistencia de un equipo, una vez construido un prototipo, o el efecto de algún parámetro, los ensayos se realizan en probetas de pequeño tamaño, geometría suave, superficies pulidas, ambiente de laboratorio, carga uniaxial de variación senoidal, con el elemento libre de tensiones residuales, sin recubrimiento superficial, etc. Pero la realidad es mucho más complicada y esas diferencias pueden modificar la resistencia a fatiga de cualquier sistema mecánico incluso un orden de magnitud.

Centrándonos en los metales, el acabado superficial puede tener un gran efecto sobre la resistencia, pero será diferente, dependiendo del tipo y del tratamiento a que haya estado sometido; el aumento de tamaño reduce la resistencia a fatiga para los mismos valores de tensiones máximas producidas sobre el elemento; los recubrimientos superficiales modifican la resistencia a fatiga de forma diferente dependiendo, no solo del tipo de recubrimiento, sino también del material sobre el que se aplique y la forma de aplicarlo; las cargas de amplitud

variable o irregulares tienen un efecto diferente al de superposición lineal del efecto de cada ciclo, dependiendo del orden de aplicación de las mismas y del grado de irregularidad de los ciclos; la temperatura afecta no solo reduciéndola resistencia, sino superponiendo efectos de acumulación de deformaciones locales; en ambientes corrosivos se produce un efecto sinérgico entre la corrosión y la fatiga, de forma que se reduce drásticamente la resistencia. Así podríamos mencionar otros diez o doce factores adicionales que modifican la resistencia a fatiga y cuyo efecto debe predecirse o al menos aproximar de la mejor forma posible durante la fase de diseño de cualquier sistema mecánico.

Para dar una idea se pueden citar unos pocos ejemplos. Uno de ellos es el diseño de sistemas sometidos a cargas irregulares, por ejemplo, estructuras sometidas al viento o al oleaje, la estructura portante de las aeronaves o la suspensión de un vehículo. En estos casos es necesario extrapolar los resultados experimentales ante cargas cíclicas a los casos de cargas reales irregulares. El primer problema que se presenta es la definición de los ciclos. Cabe preguntarse cómo pueden contabilizarse los ciclos en un registro de carga irregular, por ejemplo, como el de la figura. Para ello debe definirse como ciclo equivalente aquel que produce el mismo daño a fatiga. Teniendo en cuenta que el daño por fatiga, al menos en la primera fase, se produce como consecuencia de las microplastificaciones cíclicas generadas en el material, se definen ciclos equivalentes de fatiga a los ciclos de histéresis del material cerrados durante el proceso de carga. Como se ve en la figura 19, si el registro temporal de carga se representa en un gráfico fuerza deformación, se cierran varios ciclos de histéresis, que serán los ciclos equivalentes a considerar en el análisis a fatiga ante las cargas irregulares producidas. Este proceso de identificación de ciclos se realiza normalmente mediante los denominados métodos de contar ciclos, entre los que el denominado generalmente como “rain-flow” el más conocido. Definidos los ciclos equivalentes, generalmente el daño total por fatiga se determina mediante la simple adición del daño producido por cada ciclo, empleando la regla de Palmgren-Miner.

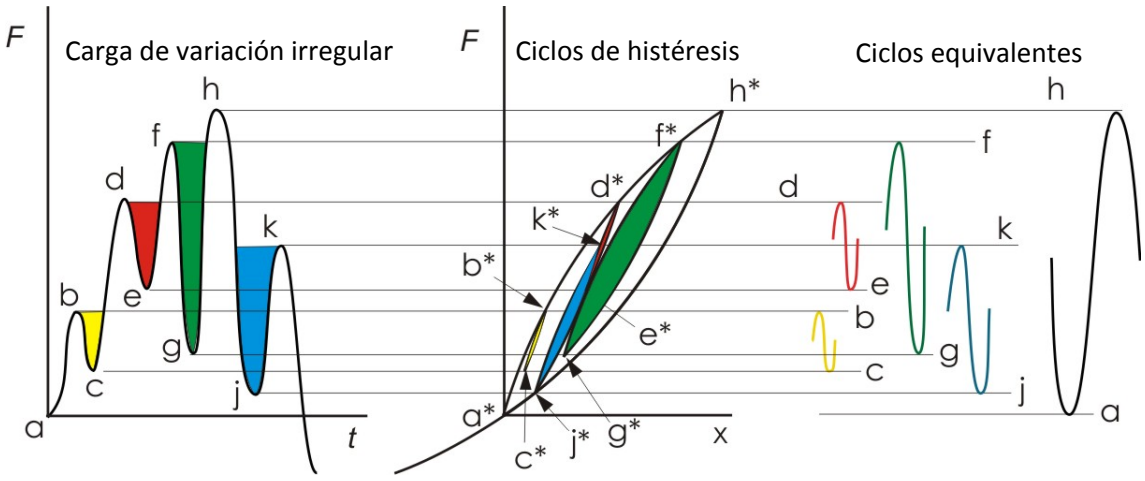

Figura 19. Aplicación del método Rain Flow de contar ciclos.

Este procedimiento relativamente simple presenta algunos problemas no totalmente resueltos hasta el momento. El denominado efecto de secuencia es uno de ellos. Este efecto hace que el daño producido por una misma combinación de ciclos de carga sea diferente, dependiendo del orden en que se apliquen, algo que la simple adición del daño producido por cada ciclo no permite predecir.El efecto de sobrecarga es otro ejemplo de situación no predecible mediante

la simple adición del daño. Una sobrecarga aplicada durante un proceso de carga puede llegar a hacer que disminuya la velocidad de propagación de una grieta por fatiga o incluso hacer que deje de propagarse. Este efecto, permite decir que una fuerte tormenta producida en un avión en vuelo puede ser beneficiosa para la integridad estructural del mismo, desde el punto de vista de la fatiga. De hecho, este efecto de sobrecarga fue uno de los causantes del fracaso de los aviones Comet antes citado. Las pruebas hidráulicas realizadas a la cabina del prototipo, a doble presión de la máxima esperable,antes de los ensayos de fatiga generaron unas tensiones residuales suficientes para retrasar o detener las grietas que se habrían formado en los vértices de los huecos de las ventanillas durante los ensayos de fatiga. Ello impidió que se produjera el fallo durante las pruebas del prototipo, pero no evitó el fallo de los aviones de serie. Estos últimos se ensayaban antes de su puesta en servicio a una presión soloun 40% superior a la de diseño, con lo que las tensiones residuales favorables generadas fueron menores y no impidieron la propagación de las grietas y el fallo prematuro en vuelo.

Otro ejemplo de situaciones en las que la extrapolación de resultados experimentales a situaciones reales presenta dificultades importantes es cuando se producen estados de tensiones multiaxiales, especialmente cuando los componentes dela tensión varían de forma noproporcional, casos que son más frecuentes de lo deseable en fatiga[23]. Actualmente existen diversas propuestas para estimar la resistencia a fatiga en estos casos; propuestas que producen resultados más o menos fiables dependiendo del material, forma de variación de las cargas y nivel de las mismas.Dichas propuestas distinguen la fase de iniciación de la de propagación de las grietas, pero presentan especiales dificultades en la transición, con grietas de dimensiones microestructurales. Para la fase de iniciación proponen el uso de un parámetro de daño equivalente al caso uniaxial, que tiene en cuenta las distintas componentes de los tensores de tensiones y deformaciones que intervienen en el proceso de iniciación de la grieta.Pare la estimación de la resistencia en la fase de propagación también existen diversas propuestas, aunque aún hay diversas incertidumbres. Por ejemplo, no existe aún un criterio generalmente aceptado que permita predecir la dirección en que se propagará una grieta o a qué velocidad lo hará en casos de cargas multiaxiales, especialmente con variación no proporcional de las componentes deltensor de tensiones, lo que dificulta la aplicación de los criterios de tolerancia al daño en esos casos.

Más incertidumbre aún se presenta cuando los estados multiaxiales de tensión se presentan con variación irregular de las cargas. En esos casos, a las dificultades ya comentadas en los casos de cargas irregulares y de estados multiaxialesde tensión con variación no proporcional se une la dificultad para contar los ciclos, ya que se plantean aún algunas incógnitas aún no resueltas para la definición del ciclo equivalente.

Una idea del estado actual de las técnicas de predicción de la vida a fatiga en los sistemas mecánicos la pueden dar dos ejemplos.

El primero es el criterio que deben emplear los fabricantes de álabes de los turborreactores de los aviones de las fuerzas aéreas americanas. Estos componentes están sometidos en su conexión al rotor a condiciones severas de fatiga por *fretting* generadas por las fuerzas centrífugas, las vibraciones producidas por el funcionamiento y las altas temperaturas. En estas condiciones es difícil predecir el tiempo necesario para que se inicie una grieta y crezca

hasta dimensiones del orden de centésimas de milímetro, tiempo que puede ocupar la mayor parte delproceso de fatiga. Debido a ese desconocimiento,la normativa de las Fuerzas Aéreas Americanas sobre diseño tolerante al daño[24]supone ese periodo como margen de seguridad y requiere a los suministradores que demuestren que los álabes son capaces de soportar las cargas especificadas durante el tiempo prescrito de uso, sin que una grieta supuestamente existente desde el principio crezca hasta la de fallo. Este requisito supone un enorme coeficiente de seguridad, ya que el tiempo para que se desarrolle la grieta hasta esa longitud inicial considerada será muy superior al necesario para la propagación. Estogarantiza que la duración del álabe será muy superior a la de cálculo, aunque no se conoce bien el grado de seguridad.

Otro ejemplo es el análisis realizado en 2013 bajo la dirección del profesor Socie[25], de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Para ello han tomado como referencia una serie de ensayos de fatiga multiaxial realizados sobre una probeta estándar empleada en varios proyectos de fatiga auspiciados por la Society of AutomotiveEngineering. Han seleccionado los 6 modelos de cálculo a fatiga más empleados por los códigos de elementos finitos comerciales usados normalmente en ingeniería. La figura muestra la comparación entre los resultados de las simulaciones y los experimentales. Puede comprobarse que prácticamente en todos los modelos se producen diferencias entre las simulaciones y los experimentos, cuya relación está comprendida entre 0.1 y 10. Es decir, en la estimación de vida no es descartable tener errores del orden de 10 a 1.

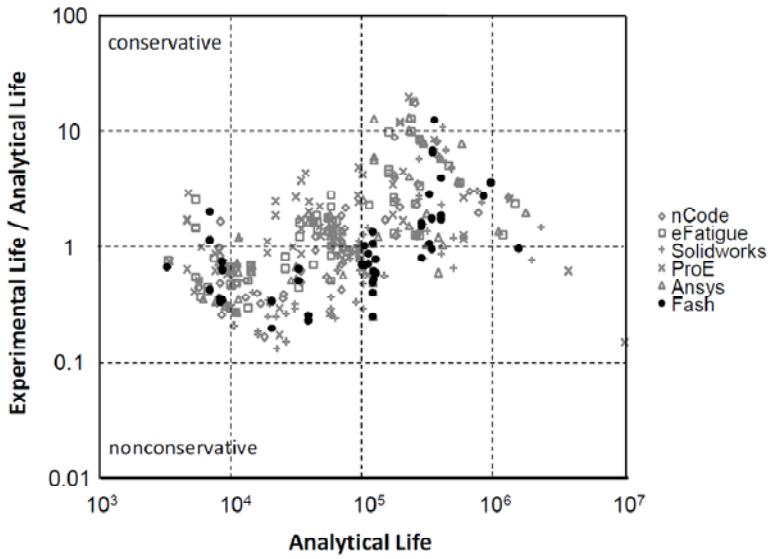

Figura 20. Dispersión de resultados de cálculo de vida a fatiga.

Teniendo en cuenta que en este caso las probetas tuvieron una geometría bien controlada y que las cargas eran perfectamente conocidas, aunque multiaxiales con variación en fase, cabe esperar que la dispersión en los resultados aumente si se tienen en cuenta estos factores. De ahí la importancia en el control de los procesos de fabricación y en la determinación de las cargas, algo en lo que tanto la industria aeronáutica como la de la automoción están especialmente empeñadas.

Antes de terminarestos comentarios sobre fatiga quierohacer una consideración que ofrece mayor optimismo sobre la calidad de las predicciones de resistencia y vida a fatiga. Por un

lado, las mejoras recientes de los métodos de ensayo sobre piezas prototipo, que permiten simular las cargas realmente producidas, permiten mejorar los modelos, consiguiendo un mejor ajuste de los parámetros. Con ello pueden conseguirse relaciones entre las vidas calculadas y las reales dentro de un margen de 2 o 3 a 1. Por otro lado, teniendo en cuenta la relación entre la vida a fatiga y los niveles de carga producidos, puede decirse que un incremento del nivel de tensiones del orden del 20% produce una variación en la vida del 100%. Ello quiere decir que incertidumbres en los valores de vida a fatiga calculada del orden del 100% supondrán unos incrementos en los coeficientes de seguridad solo del orden del 20% para mantener una aceptable seguridad ante el fallo.

Llegando ya al final de este discurso,no quisiera dejar e comentar un aspecto fundamental para el avance de la ingeniería mecánica y de las máquinas. Es el ejercicio de la ingeniería en el más puro sentido de la palabra. Todas las nuevas técnicas aquí mencionadas y otras muchas no comentadas aquí, unas por falta de tiempo y otras por insuficiente conocimiento de ellas por mi parte, no son suficientes para conseguir los avances deseados. Además hace falta imaginación para diseñar nuevas soluciones a viejos y nuevos problemas, para encontrar y encauzar nuevas aplicaciones de otras disciplinas a la solución de problemas mecánicosy paradefinir nuevas técnicas o diferentes aplicaciones de técnicas conocidas, que permitan mejorar las capacidades de las máquinas. Sin esta práctica del oficio y del ejercicio de imaginación en la búsqueda de soluciones, los avances quedarían reducidos a pequeñas mejoras e soluciones ya conocidas.

Con este breve análisis no he querido más que resaltar las múltiples dificultades que aún debe superar la ingeniería mecánica en muy diversas facetas.Y que a pesar de todas estas dificultades e incertidumbres,la ingeniería de máquinas sigue trabajando para diseñar y desarrollar nuevos equipos y aumentar las prestaciones de los existentes, ya sea sola o en colaboración con otras disciplinas. Su avance ayudará al desarrollo social y la mejora de la calidad de vida, como lo ha hecho desde que existe esta disciplina.

Por último, solo me quedaagradecer de nuevo el apoyo detodos los que me han ayudado a conseguir los objetivos alcanzados, a los académicos que tuvieron a bien proponerme para formar parte de esta institución y a todos los miembros de esta casa, que me han honrado eligiéndome, y a todos ustedes por su atención.

Muchas gracias.

Referencias

1 G. Agricola, De re metallica, 1556.

2 L. da Vinci, Códice Atlántico, Biblioteca Ambrosiana, Milán, S. XV.

3 J. I. Cuadrado Iglesias y M. Ceccarelli, “El nacimiento de la teoría de máquinas y Betancourt”, Técnica e ingeniería en España III, El siglo de las luces. De la industria al ámbito agroforestal, M. Silva Suárez (Ed.), Real academia de Ingeniería, Institución Fernando el Católico y Prensas Universitarias de Zaragoza, 131-181,2005.

4 J. M. Lanz y A. Betancourt, Ensayo sobre la composición de las máquinas, Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos, 1990.

5 E. Bautista et al., Breve historia ilustrada de las máquinas, Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, 2007.

6 http://www.memx.com/products.htm

7 http://www.mems.sandia.gov/

8 S. M. Barnes, S. L. Miller, M. S. Rodgers y F. Bitsie, "Torsional ratcheting actuating system",Proceedings of the 2000 International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, Nano Science and Technology Institute, 2000.

9 R. Aracil, R. J. Saltaren, J. M. Sabater y O. Reinoso, Robots paralelos: máquinas con un pasado para una robótica del futuro, *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, **3**, 16-28, 2006.

10 A. López Pita, Ferrocarril, ingeniería y sociedad, Discurso de Ingreso en la Real Academia de Ingeniería, Real Academia de Ingeniería, 2004.

11. I. Barrón de Angoiti, "Nuevo record mundial de velocidad sobre raíles: 574,8 km/h", *Vía Libre*, **508**, 4-8, 2007.

12 *A. Doherty, S. Clark, R. Care y M. Dembosky, "*Why Rails Crack?", Ingenia on line, **23**, 2005, http://www.ingenia.org.uk/ingenia/articles.aspx?Index=318

13 R. A Smith, "Railways and materials: synergetic progress", *Ironmaking and Steelmaking*,**35**, 505-13, 2008.

14 D. Broek, Elementary engineering fracture mechanics (4ª Ed.), Martinus Nijhoff Publishers, 1986.

15 J. M.Barsom yS. T. Rolfe, Fracture and fatigue control in structures: applications of fracture mechanics, ASTM International, 1999.

16 McEvily, Metal Failures, Wiley-Interscience, 2002

17 National Transportation Safety Board, Aircraft Accident Report NTSB/AAR-89/03, 1989.

18 National Transportation Safety Board, Accident Number DCA09FA065, 18/8/2010.

19 National Transportation Safety Board, Aircraft Accident Report, NTSB/AAB-13/02, 2013.

20 http://blog.seattlepi.com/aerospace/2010/08/19/ntsb-fatigue-cracks-led-to-hole-in-southwest-airlines-737/

21 S. Nishida, Failure Analysis in Engineering Applications, Butterworth-Heinemann, 1992.

22 T. D. Cooper y C. A. Kelto, "Fatigue in machines and structures-aircraft",Fatigue and microstructure, ASM, pp. 29-56, 1979.

23 A.Fatemi y N. Shamsaei, “Multiaxial fatigue: an overview and some approximation models for life estimation”, *International Journal of Fatigue*, **33**, 948-58, 2011.

24 Department of Defense Handbook: Engine Structural Integrity Program (ENSIP), MIL-HDBK-1783B, febrero 2002.

25 D.F. Socie, S.D. Downing y S. Utagawa, “Benchmark Problems in Multiaxial Fatigue”, The Tenth International Conference on Multiaxial Fatigue and Fracture, Kyoto, Japón, junio 2013.