



4^{to} Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica



ESTRUCTURAS INTELIGENTES (SMART STRUCTURES) SU APLICACIÓN EN LA INDUSTRIA AERONAUTICA

María Laura Otero^a

^a *Ingeniera Industrial Mecánica, facultad de Ingeniería, Universidad de la República Oriental del Uruguay (UDELAR).
Empresa de mantenimiento electromecánico.*

Palabras claves: Estructuras inteligentes, industria aeronáutica, diseño, materiales

Resumen

El presente trabajo brinda un acercamiento a la utilización de las estructuras inteligentes en la industria aeronáutica. Se define el concepto de estas estructuras según distintos autores. Se describen las ventajas y desventajas de estas estructuras y sus aplicaciones para el avance tecnológico en la industria aeronáutica y aeroespacial.

Este tipo de estructuras requieren que varias áreas del conocimiento trabajen en conjunto, se necesitan equipos multidisciplinarios que logren estructuras multifuncionales. Se trabaja siempre con el objetivo de ser más eficientes y brindar mejores resultados en lo que refiere a performance y durabilidad de los materiales, considerando los costos asociados. Los beneficios de su utilización incluyen la reducción de costos de mantenimiento, mayor comfort por reducción de vibraciones y ruidos, extender la vida útil de los componentes de los equipos, entre otras.

Se identifican las diferencias entre las estructuras inteligentes y las estructuras clásicas.

La aplicación de estructuras inteligentes en casos reales. Se muestra la relevancia de esta área del conocimiento en el futuro de la industria aeroespacial.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de más y mejor información sobre el estado y desempeño de las estructuras generan un nuevo acercamiento al diseño de las mismas y con ello el desarrollo y búsqueda de los materiales adecuados a utilizar. La investigación de diferentes materiales que pueden brindar información sobre el estado de una estructura data del siglo XIX con el descubrimiento del efecto piezoeléctrico, a partir de allí se puede considerar que los primeros pioneros de la aviación usaban en sus aeronaves materiales cuya morfología les permitía adaptarse a la estructura creada. Posteriormente surgen los efectos de las aleaciones que tiene memoria de forma (Shape memory alloys, en aleaciones de Au-Cd) (transformaciones martensíticas termo elásticas). Y a partir de 1980, comienzan a coordinarse actividades y programas para el desarrollo de estructuras inteligentes a nivel internacional entre los diferentes organismos y empresas con el fin de implementar y extender la utilización de este tipo de materiales y estructuras inteligentes.

2. GENERALIDADES

En la actualidad los sistemas inteligentes están presentes en varios aspectos de la vida diaria desde los teléfonos celulares hasta edificios que mediante el uso de distintos sensores permiten el uso eficiente de la energía y el control de sistemas globales. Estos sistemas inteligentes que simplifican y aceleran el diario vivir se han incorporado paulatinamente hasta el punto que es muy difícil imaginarse como se desenvolverían las tareas cotidianas sin ellos. En general se puede considerar que una estructura no tiene que ser completamente inteligente para ser considerada como tal puede tener partes si y otras no.

En lo que refiere a los materiales y estructuras que pueden facilitar y permitir que el desarrollo de la vida diaria se encuentran los materiales inteligentes, y las estructuras inteligentes en las que se centrará este trabajo.

Un **material inteligente** es aquel que posee una o más propiedades que pueden ser modificadas significativamente de manera controlada por un estímulo externo (tales como tensión mecánica, temperatura, humedad, pH o campos eléctricos o magnéticos) de manera reversible. Es decir un material inteligente es el que posee la capacidad de cambiar sus propiedades físicas (rigidez, viscosidad, forma, color, etc.) en presencia de un estímulo concreto.

Este tipo de materiales de forma intrínseca deben de presentar sensores de reconocimiento y medida de la intensidad del estímulo ante el que reaccionará el material. También deben de presentar actuadores intrínsecos que responden ante el estímulo.

Para controlar la respuesta de una forma predeterminada presentan mecanismos de control y selección de respuesta.

Deben de tener tiempos de respuestas breves y deben de ser reversibles, es decir una vez finalizado el estímulo vuelven al estado original.

Entre los materiales inteligentes habituales y conocidos se encuentran los materiales con memoria de forma, los materiales electro y magneto activos, y foto y cromo activos.

Dentro de los materiales con memoria de forma se encuentran: las aleaciones (shape memory alloys (SMA)), cerámicas (SMC), polímeros (SMP) y aleaciones ferromagnéticas (FSMA).

El efecto de memoria de forma (SM) se esquematiza en general:



Figura 1:esquema SM

Para las aleaciones (SMA) que serán las que se ejemplificarán con más detalle en este trabajo:

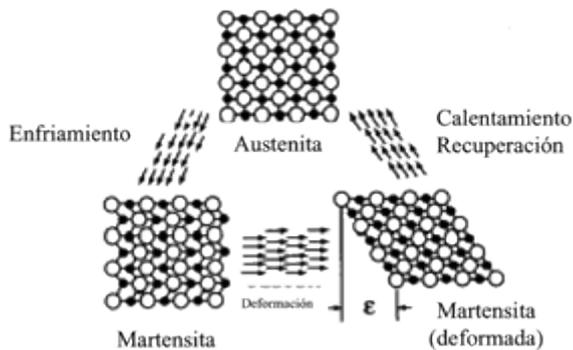


Figura 2: cambio de estructura cristalina durante el cambio de fase en SMA.

En el caso de las aleaciones metálicas, el efecto de memoria de forma se basa en la transición que se produce entre dos fases sólidas, una de baja temperatura (martensítica) y otra de alta temperatura o austenítica como puede verse en la figura 2. El material se deforma en la fase martensítica y recupera de forma reversible sus dimensiones originales mediante el calentamiento por encima de una temperatura crítica de transición. [1]

Comportamientos similares ocurren en los otros materiales nombrados frente a otros estímulos como la luz o reacciones químicas, y campos magnéticos.

La utilización de estructuras inteligentes en la industria aeronáutica y aeroespacial, como en otros campos del conocimiento surge de la necesidad de manejar los datos apropiadamente para optimizar tiempos en mantenimiento y poder considerar la disponibilidad de los equipos y aeronaves. Lo que conlleva a menos tiempos de espera, mayor eficiencia por tanto disminución de costos y mejores servicios en general.

3. CONCEPTO DE ESTRUCTURAS INTELIGENTES:

Una aproximación que permite comprender fácilmente el comportamiento de una estructura inteligente es compárala con la adquisición y transformación de datos del cuerpo humano. Por lo que:

Una estructura inteligente es una estructura no biológica con los siguientes atributos:

- Tiene un propósito definido.
- Tiene los medios y la esencia para alcanzar dicho propósito
- Tiene un patrón de funcionalidad biológica que se puede describir equivalentemente a un cuerpo humano como:
 - (1) Adquisición de datos (sentido del tacto): juntar los datos requeridos para sensar y monitorear una estructura.
 - (2) Transmisión de datos (nervios sensitivos) transmite los datos a la zona o unidad de control,
 - (3) El centro de control (cerebro) maneja y controla todo el sistema analiza los datos busca la conclusión o solución apropiada y determina que acciones se requiere tomar.
 - (4) Instrucciones (nervios de movimiento) transmiten las decisiones e instrucciones a los componentes de la estructura
 - (5) Dispositivos de accionamiento (músculos) toman la acción poniendo en movimiento el equipo.[2]

Las estructuras inteligentes forman parte de un campo de estudios más amplio en los que están incluidos los actuadores, los sensores, los materiales adaptables y los controles.

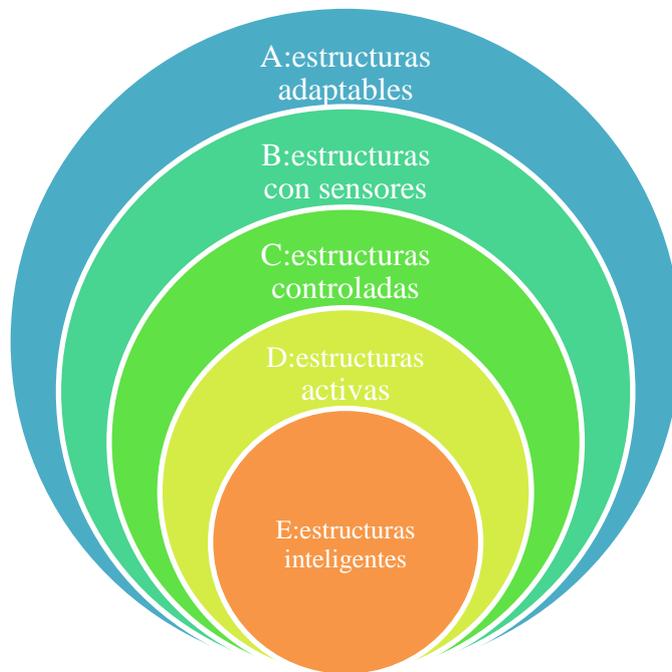


Figura 3: Esquema de estudio de estructuras

Las estructuras inteligentes son aquellas que tienen incorporados actuadores y sensores de manera tal que estos están integrados a una lógica de control. [3]

4. DESCRIPCIÓN DE VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE ESTRUCTURAS INTELIGENTES:

Entre las ventajas que proveen las estructuras inteligentes a las industrias y operadores se encuentra un monitoreo continuo, monitoreo del estado de “salud”, daños y posibilidades de mitigar y/o reparar las estructuras en tiempo real.

Permiten monitorear, controlar y supervisar el estado de estructuras y tomar acción para poder modificar dicho estado frente a necesidades del material y poder reducir costos al prevenir con precisión y adecuadamente antes de que se produzcan roturas irreparables o deterioro de mayores áreas o zonas de un equipo o aeronave.

Las desventajas que se pueden encontrar es que al ser nuevas concepciones y muchos de estos materiales estar en proceso de estudio no es tan fácil su difusión y sus costos son elevados, los procesos de prueba requieren recursos y tiempos de preparación para una correcta comprobación de su efectividad.

5. APLICACIONES EN LA INDUSTRIA AERONAUTICA Y AEROESPACIAL

Se puede dividir en 4 áreas de aplicación monitoreo de materiales compuestos, supresión de vibración estructural, supresión del ruido, y control de la morfología de la superficie.

5.1 Monitoreo de materiales compuestos

Los materiales compuestos se utilizan más en la industria aeronáutica ya que ofrecen mayores ventajas respecto a las aleaciones metálicas, entre las que se encuentran la reducción de peso, mayor soporte a la tensión y mayor resistencia a la corrosión. Se debe tener en cuenta que su reacción a las cargas y vibraciones es diferente a la de los metales. La rotura de los componentes metálicos es predecible mientras la de los materiales compuestos no.

Por lo que el control y monitoreo de estos materiales compuestos se realiza de una manera distinta a las aleaciones metálicas. Una forma es usando placas o circuitos impresos que permiten incorporar sensores de bajo costo en la estructura con un mínimo impacto en el global del material en general. Como ejemplo: the Smart Layers R 12, usa este método al combinar actuadores y sensores para detectar cualquier modificación en el material compuesto. Al estimular el material compuesto el actuador genera ondas que permitirá a los sensores detectar cualquier desviación de la estructura original. Cuando aparece una rotura o una rotura existente crece se modifica el patrón de propagación de las ondas y esto permite reportar el problema que se presenta. (En el año 2006 en experimentos se llegaron a detectar roturas del 0.1mm). [2]

5.2 Disminución de las vibraciones estructurales

Se utilizan actuadores para aliviar las cargas y vibraciones de diferentes componentes por ejemplo en los helicópteros que están sometidos a grandes vibraciones y ruido con limitada carga y velocidad. Existen varios ejemplos del uso de actuadores y SMA en estas aeronaves para disminuir las vibraciones. Uno de ellos es el realizado en el año 2005 por Eurocopter en el helicóptero BK117 [2]. Se utilizan también en el control anti-sísmico de edificios los que pueden disminuir significativamente la aceleración en los terremotos. [3]

5.3 Disminución del ruido

Con la expansión de la industria aeronáutica, la creación de más aeropuertos y mayor flujo de aeronaves a nivel global, la necesidad de disminuir la contaminación sonora en las grandes ciudades se ha convertido en una necesidad a tener presente al momento de considerar que tipo de materiales utilizar.

La reducción del ruido no solo beneficia a los usuarios mejorando el confort de las aeronaves sino también resulta en una mejor interacción entre la estructura y los motores. Una manera de disminuir el ruido es con sensores localizados a lo largo del fuselaje en conjunto con actuadores cerámicos piezoeléctricos que reducen significativamente el ruido en la cabina.

También actuando directamente en el ruido generado por los motores y es aquí donde se puede ejemplificar con claridad la utilización de materiales inteligentes particularmente SMA, en el Boeing 747-8 es el primer avión comercial en volar con un componente inteligente integrado a su estructura.





Figura 4 y 5: SMA geometría variable en estructuras (chevron)

La geometría variable del chevron que utiliza SMA adherido como puede verse en la figuras, que se usa para modificar la forma de salida y controlar así el ruido en la fase de despegue de la aeronave. A baja altitud y bajas velocidades el aumento de temperatura en SMA provoca el movimiento hacia el interior, reduciendo el ruido sin embargo esto reduce el desempeño del motor, por otro lado a altas velocidades y altitudes y bajas temperaturas en las propiedades del SMA provocan que se enderecen los “chevrons” volviéndolos a su posición y forma original con la consecuencia directa de una mejora en el desempeño del motor. [2, 4, 5]

5.4 Control de la morfología de la superficie

El objetivo es explotar las tecnologías de control inteligente para optimizar arreglando o adaptando la forma de las superficies por ejemplo del ala para mejorar la eficiencia de la aeronave.

La definición de morfología (morphing) para:

- La NASA (National Aeronautics and Space Administration): Capaz de operar en un escenario multipropósito, más eficiente que los vehículos tradicionales, adaptable a una gran variedad de condiciones de vuelo.
- DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency): Estado de cambio (morphing)
- RT (RT Aerostats Systems): La adaptación en tiempo real para optimizar el desempeño.

Existen proyectos que buscan usar este concepto con los cambios de forma para las alas utilizando SMA, como ejemplo en la figura de más abajo se puede observar cómo se logra la flexión de un prototipo del ala de un avión mediante el calentamiento de bandas de SMA.

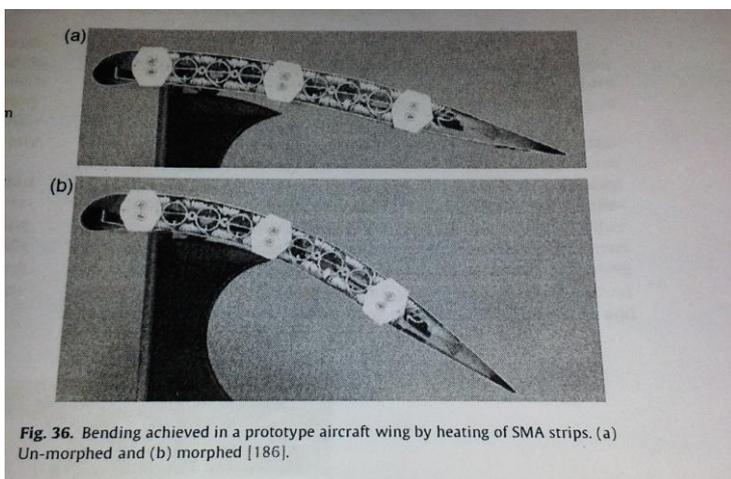


Fig. 36. Bending achieved in a prototype aircraft wing by heating of SMA strips. (a) Un-morphed and (b) morphed [186].

Figura 6: Ejemplo de utilización de SMA para cambios en la morfología. [6]

SMA: Son una alternativa más liviana que los actuadores convencionales como pueden ser los neumáticos ó hidráulicos como se puede ver en la tabla siguiente:

Tipo de actuador	Fuerza (MPa)	Deformación (%)	Eficiencia(%)	Ancho de banda (Hz)	Trabajo por volumen (J/cm ³)	Potencia por volumen(W/cm ³)
NiTi SMA	200	10	3	3	10	30
Piezocerámico	35	0.2	50	5000	0.035	175
Piezoeléctrico (cristal simple)	300	1.7	90	5800	2.55	15000
Músculo humano	0.007-0.08	1-100	35	2-173	0.035	0.35
Hidráulico	20	50	80	4	5	20
Neumático	0.7	50	90	20	0.175	3.5

Tabla N°1: comparación de la performance de diferentes actuadores.

Existen una gran variedad de SMA pero solamente los que tienen como base NiTi (Níquel y Titanio), ó base de Cu (cobre) o ferrosa son los comercialmente importantes o más desarrollados. El más utilizado es el NiTi por sus propiedades mecánicas, muy buena resistencia a la corrosión, su estabilidad, su facilidad para procesarlo y su resistencia. Su utiliza mucho en biomedicina por su buena biocompatibilidad. (Nitinol, para ampliar la información: <http://jmmedical.com/resources/221/Nitinol-Technical-Properties.html>)

6. IDENTIFICACIÓN DE DIFERENCIAS ENTRE ESTUCTURAS INTELIGENTES Y CLÁSICAS:

La ingeniería mecánica puede ser conceptualmente definida como diseño construcción y operación de sistemas mecánicos con un propósito definido según las necesidades comerciales y dentro de la legalidad. En este contexto las estructuras forman parte del sistema y proveen soporte y contención a todas las otras partes. Al mismo tiempo las estructuras tienen ser lo suficientemente fuertes y rígidas para evitar fallas o deformaciones no elásticas (o excesivas) que provoquen roturas durante la vida útil del sistema en cuestión. Las estructuras y sistemas se desempeñan de acuerdo a su diseño en el que se tiene en cuenta clásicamente el evitar deformaciones y fallas, para esto se prevén las cargas y geometría con la que deberá contar.

En otras palabras en una estructura tradicional la resistencia y rigidez son las características principales al momento de diseñar. Tomando esto como base y estudiando la posibilidad de reducir costos surgen que con menos masa o con geometrías igual de fuertes pero con mejores diseños se pueden alivianar estructuras disminuyendo cantidad de materiales. En estas bases tradicionales del diseño es que surgen las bases para comprender que las estructuras inteligentes proveerán a medida que se extienda su utilización de materiales más livianos y preparados para resistir mayores exigencias que los materiales clásicos o tradicionales que no tienen la capacidad de adecuarse a cambios rápidos, controlando y seleccionando la respuesta frente a estímulos externos predeterminados. [4]

7. EJEMPLOS REALES DE APLICACIÓN:

7.1 Morphing del borde de ataque o borde delantero.

La transformación o adaptación del borde delantero utilizando estructuras inteligentes, es una aplicación en proceso de estudio que tiene beneficios potenciales y puede realizarse con los elementos y estructuras que existen actualmente. Como puede mejorar sustancialmente el desempeño del ala en lo que refiere al drag (arrastre) y al ruido permitiendo al flujo laminar pasar por el ala eliminando discontinuidades y desviaciones de la superficie. La intención es utilizar “morphing leading edges” en lugar de “slats” (listones actuales, que se usan normalmente como elementos elevadores). De esta forma se elimina el gap (desviación) entre los slats y el resto del ala permitiendo una superficie continua y suave durante el transcurso del vuelo. La falta de “costura” o de unión en el borde delantero provocará una disminución importante del ruido. Como se conoce una pequeña discontinuidad en la superficie del ala puede provocar una transición de la capa límite y convertir el flujo de laminar a turbulento aumentando así el arrastre (Drag) del ala. Eliminando esta “costura” o transición del borde de ataque se genera una superficie lisa que permitirá reducir el ruido y consumir menos combustible al tener menos arrastre. De esta forma se disminuye también las emisiones de dióxido de carbono preservando el medio ambiente. [7, 8]

7.2 APLICACIÓN PARA EL CHOQUE DE PÁJAROS, LOS RAYOS Y EL DESHIELO

Se utilizan varios materiales compuestos e inteligentes para mejorar el choque de pájaros, los efectos de los rayos y el deshielo en la actualidad en las aeronaves. La utilización de materiales y estructuras inteligentes para cualquiera de estos tres problemas en el curso de la vida útil de las aeronaves es de trascendental importancia ya que si luego de un choque con un pájaro la estructura puede recuperarse rápidamente o el hecho de tener elementos que puedan prevenir o eliminar la acción de los rayos eléctricos en el resto de los equipos de la aeronaves también disminuye costos posteriores en reparaciones y mantenimiento. En lo que refiere al deshielo el uso de estos materiales compuestos que se adaptan con más facilidad a los cambios permitirá grandes avances en este punto. [8]

7.3 Saristu 2011: SmARt Intelligent Aircraft STrUctures (SARISTU)

Es un Proyecto que estudia y busca reducir los costos de operación además de mejorar la performance de los vuelos. Hay varios asociados trabajando en esto y se han logrado varios objetivos. Se continúa estudiando. [9]

8. CONCLUSIONES:

La utilización de estructuras y materiales inteligentes es un tema de estudio continuo que se está desarrollando paulatina y fuertemente y se van introduciendo en la vida diaria todos estos nuevos elementos, en lo que refiere a la industria aeronáutica y aeroespacial se han logrado muchos avances con la ayuda de estas estructuras y se continúa estudiando, cómo puede verse en varios links de las referencias. Estas estructuras que permiten monitorear, controlar y tomar decisiones y acciones en tiempo real sobre el estado en que se encuentra un equipo o aeronave permite una mejora continua en lo que refiere al mantenimiento en general y los costos asociados que esto tiene, reduciéndolos. A medida que se desarrollen más y mejores materiales inteligentes y que el costo de su fabricación se económicamente viable serán más difundidos globalmente. Hasta el momento los que son más conocidos son los SMA que fue en los que se hizo énfasis en este trabajo, pero sin detrimento del resto que a medida que se avance en su estudio permitirán mejores resultados a nivel general.

REFERENCIAS

- [1] <http://www.interempresas.net/plastico/articulos/2971-materiales-y-estructuras-inteligentes.html>
- [2] http://airforceapp.forces.gc.ca/CFAWC/eLibrary/Journal/Vol1-2008/Iss2-Summer/Sections/06-Smart_Structure_Applications_in_Aircraft_e.pdf
- [3] AIAA Journal Vol.32 No.8, august 1994. Intelligent structures for aerospace: A technology overview and assessment. Edward F. Crawley (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139).
- [4] Smart structures: physical behaviour, mathematical modelling and applications P. Gaudenzi © 2009.
- [5] HTTP://WWW.BOEING.COM/NEWS/FRONTIERS/ARCHIVE/2005/DECEMBER/TS_SF07.HTML
- [6] Composite structures: 151 (2016)3-35. Multifunctional Material systems: A state of the art review (André Duarte B.L. Ferreira, Paulo R.O.Novoa, Antonio Torres Marques –Department of mechanical engineering, University of Oporto.
- [7] <http://www.flxsys.com/blog/2014/12/19/flexfoil-variable-geometry-control-surface-youtube-video-january-2014>
- [8] <http://www.compositesworld.com/>
- [9] <http://www.saristu.eu//> <https://online-learning.tudelft.nl/courses>