

# Monitorización de estructuras de material compuesto mediante sensores de fibra óptica

**Malte Frövel**

**Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial**

**Área de Materiales Compuestos**

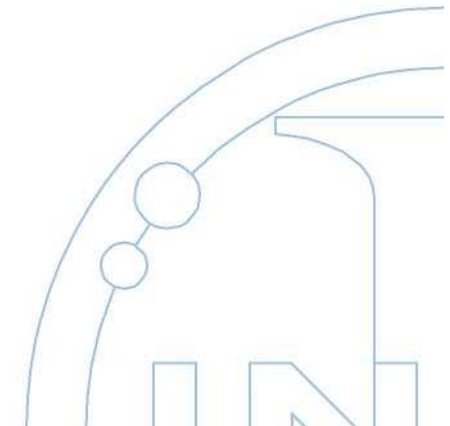
[frovelm@inta.es](mailto:frovelm@inta.es)

**Tel.: 6507**



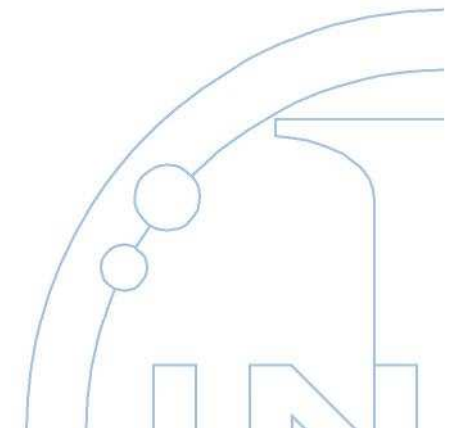
# Sobrevista de la presentación

- Base del funcionamiento de los sensores de Bragg
- Introducción de actividades del INTA en la monitorización estructural mediante sensores de fibra óptica
- Seguridad en vuelo de aviones no tripulados
- Detección de daños en estructuras aeroespaciales
- Monitorizar reparación de estructuras metálicas con parches de material compuesto
- Sensores para la monitorización estructural en ámbitos de alta radiación
- Sensores para detección de hidrógeno

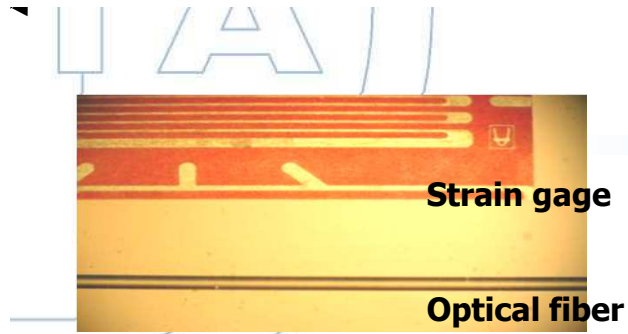




# Basic theory and On line data evaluation of Fiber Bragg grating Sensors, FBGS



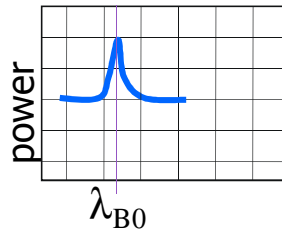
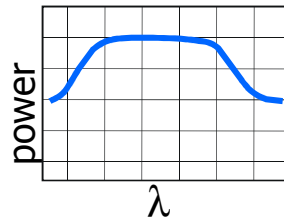
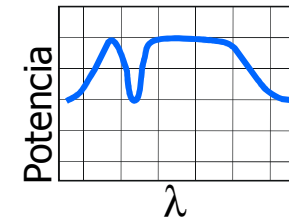
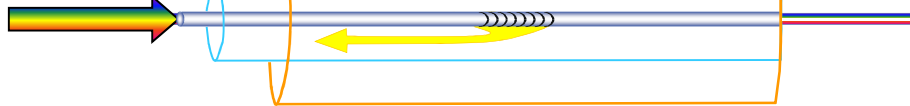
# Basic Theory on Fiber Bragg Grating Sensors



Sensor de Bragg, FBGS

FBGS: Periodical variation of the core refractive index

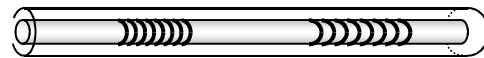
LED



$$\lambda_{B0} = 2 \cdot n_0 \cdot \Lambda$$

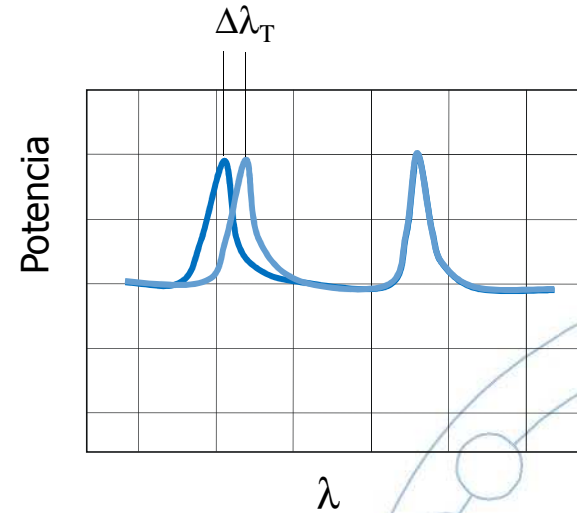
$n_0$  = refractive index

$\Lambda$  = period of modulation



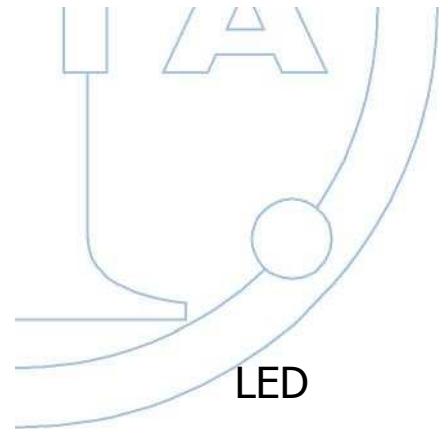
$\lambda_1$

$\lambda_2$





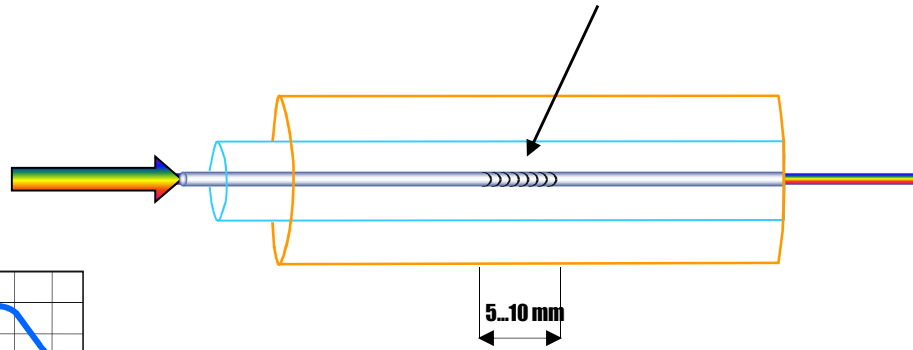
# Basic Theory on Fiber Bragg Grating Sensors



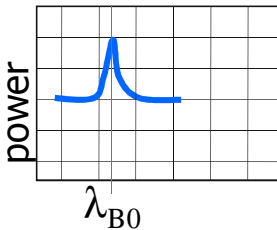
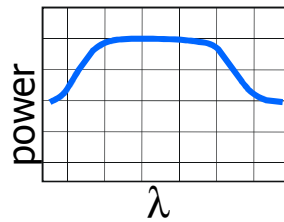
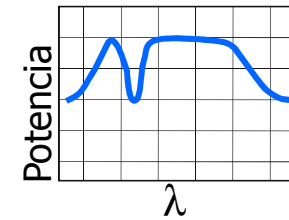
LED



Sensor de Bragg, FBGS



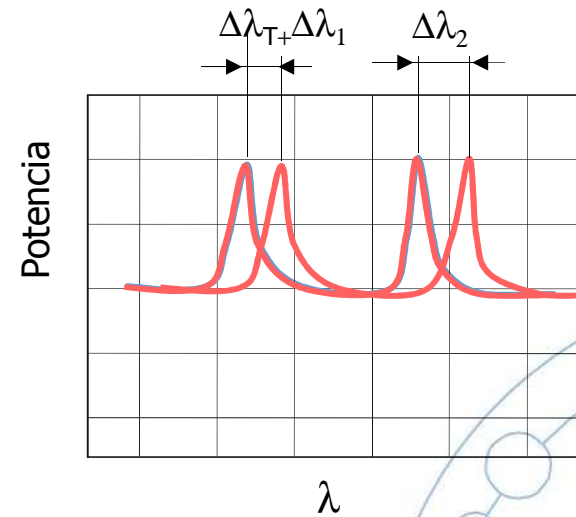
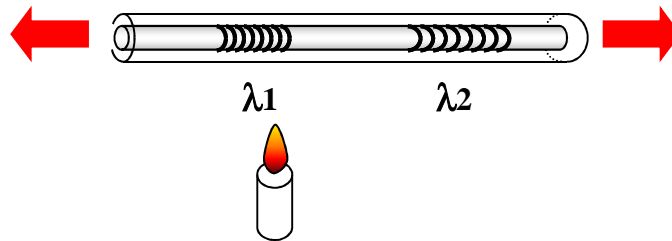
FBGS: Periodical variation of the core refractive index



$$\lambda_{B0} = 2 \cdot n_0 \cdot \Lambda$$

$n_0$  = refractive index

$\Lambda$  = period of modulation





**FBG-T sensor**

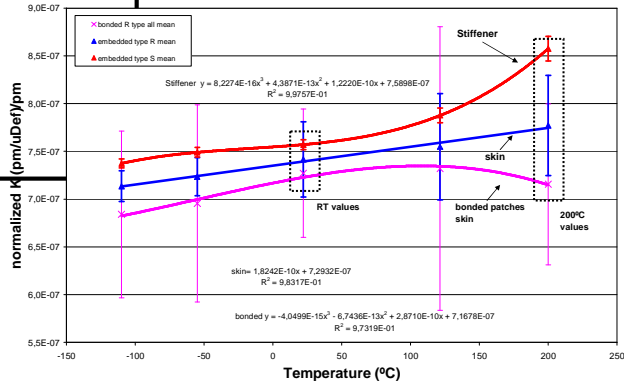
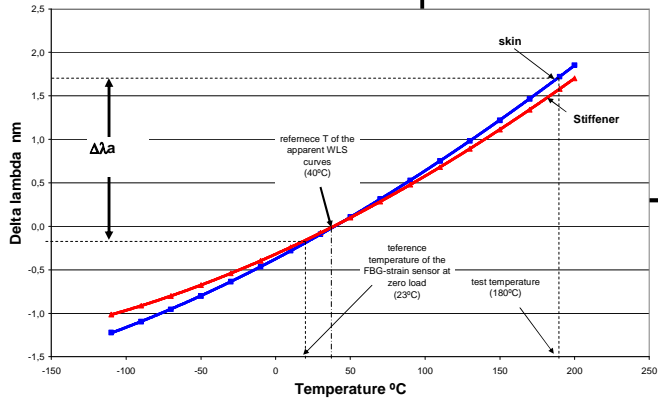
**FBG-strain sensor**

**T °C**

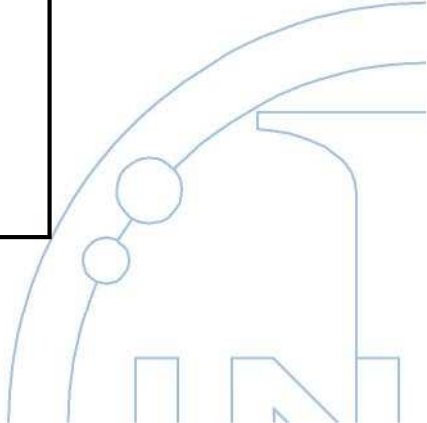
**$\Delta\lambda$  pm**

**Apparent strain (T)**  
 **$\lambda_a(T)$  [pm]**

**Sensitivity (T)**  
**K (T) [pm/ $\mu\epsilon$ ]**

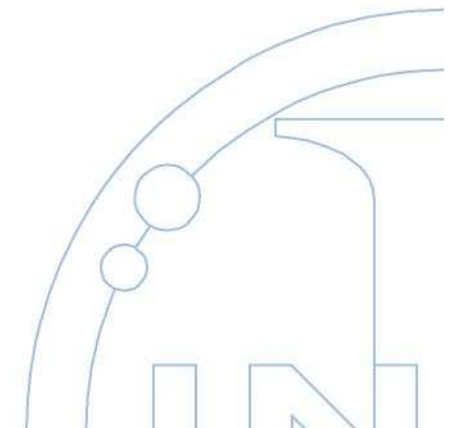


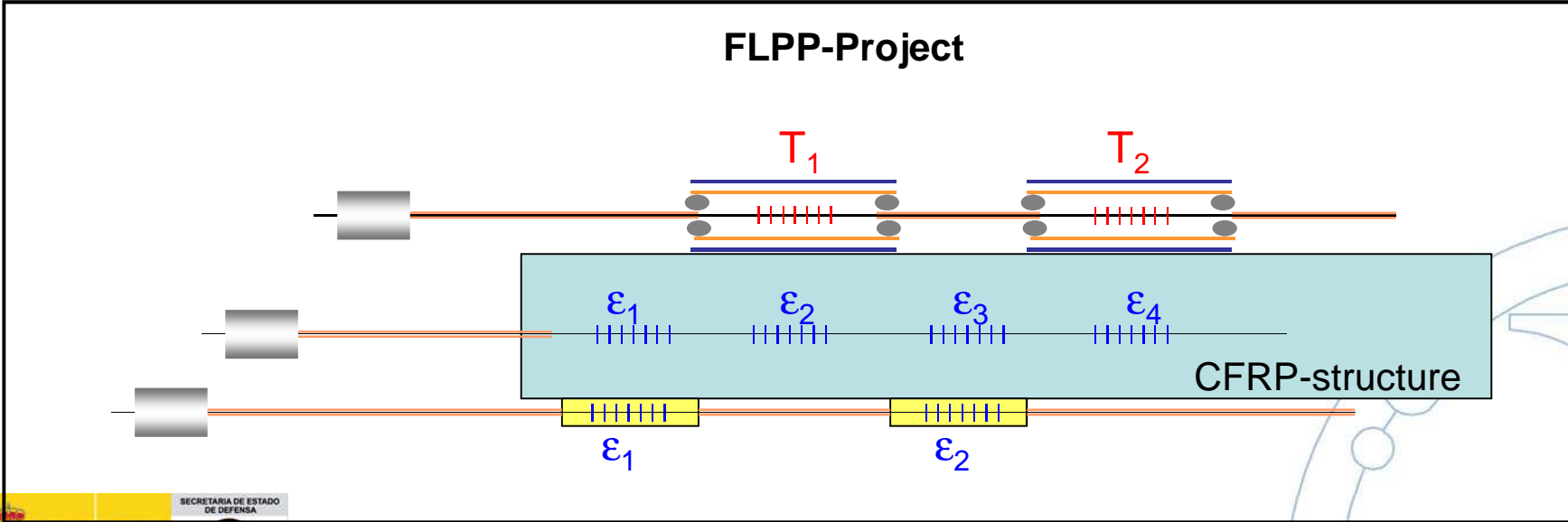
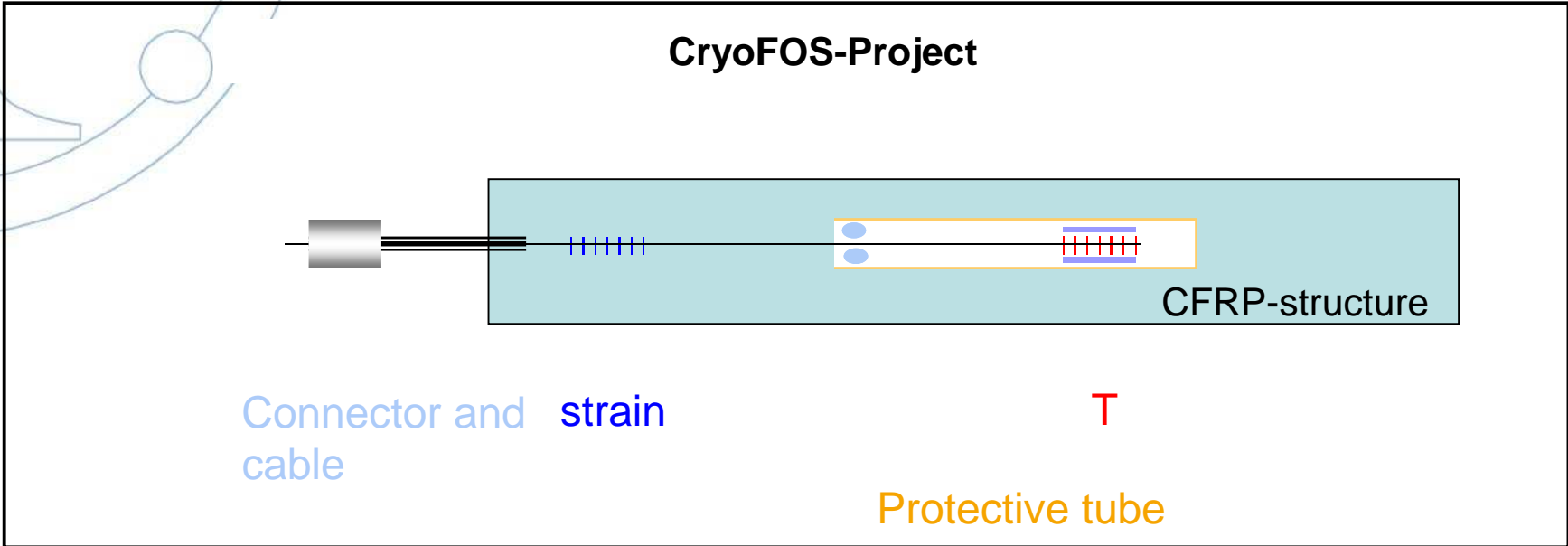
$$\epsilon = (\Delta\lambda - \lambda_a) / K(T)$$



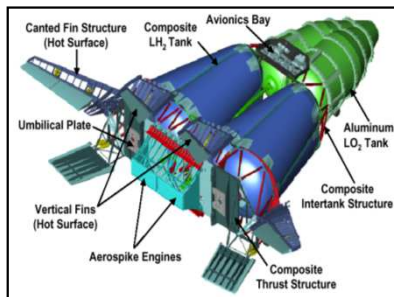


# FBG-strain and T sensor concepts

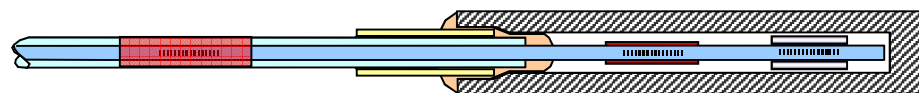
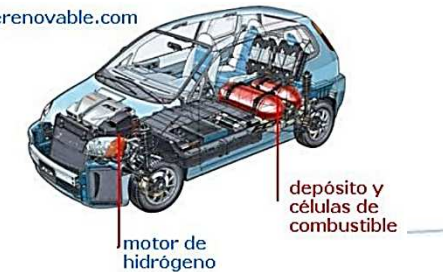




# Sensores para detección de fugas de hidrógeno

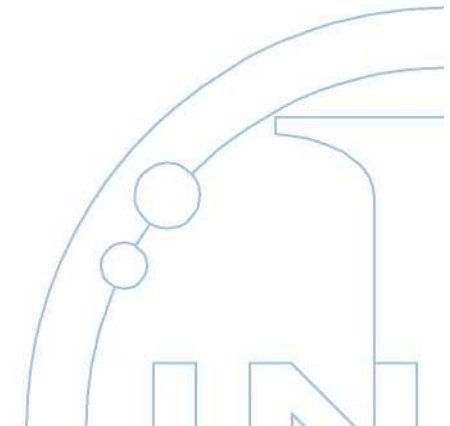


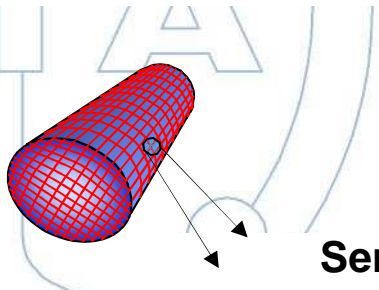
erenovable.com



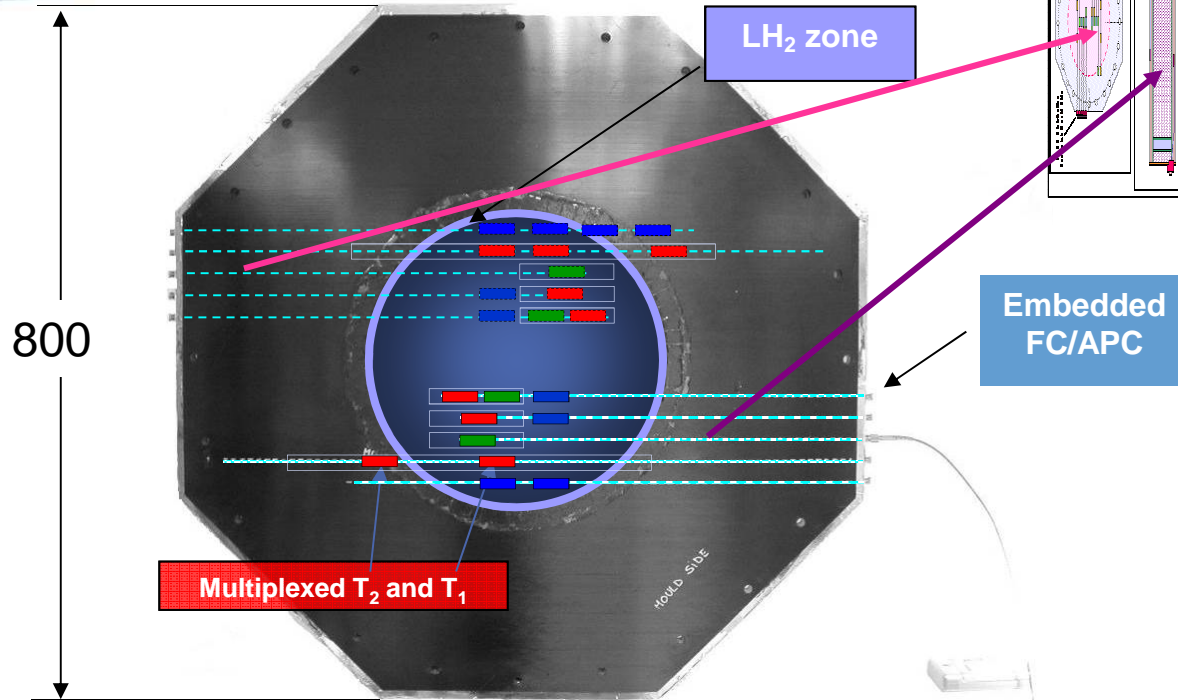


# Example: Technology Demonstrators CryoFOS





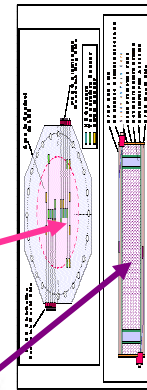
**Sensor Distribution**



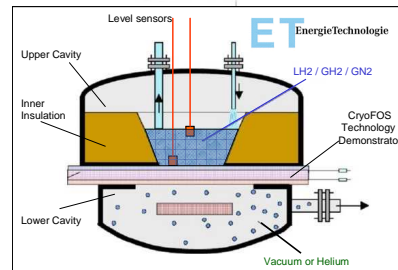
10 x FBG- strain

9 x FBG- T

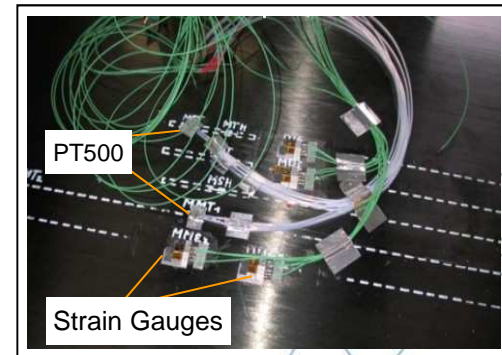
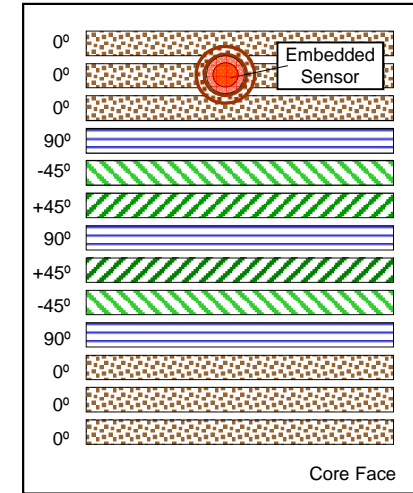
4 x FBG- H<sub>2</sub>



Embedded FC/APC

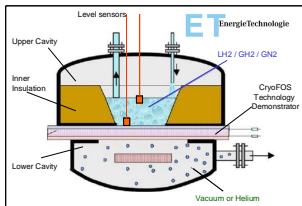
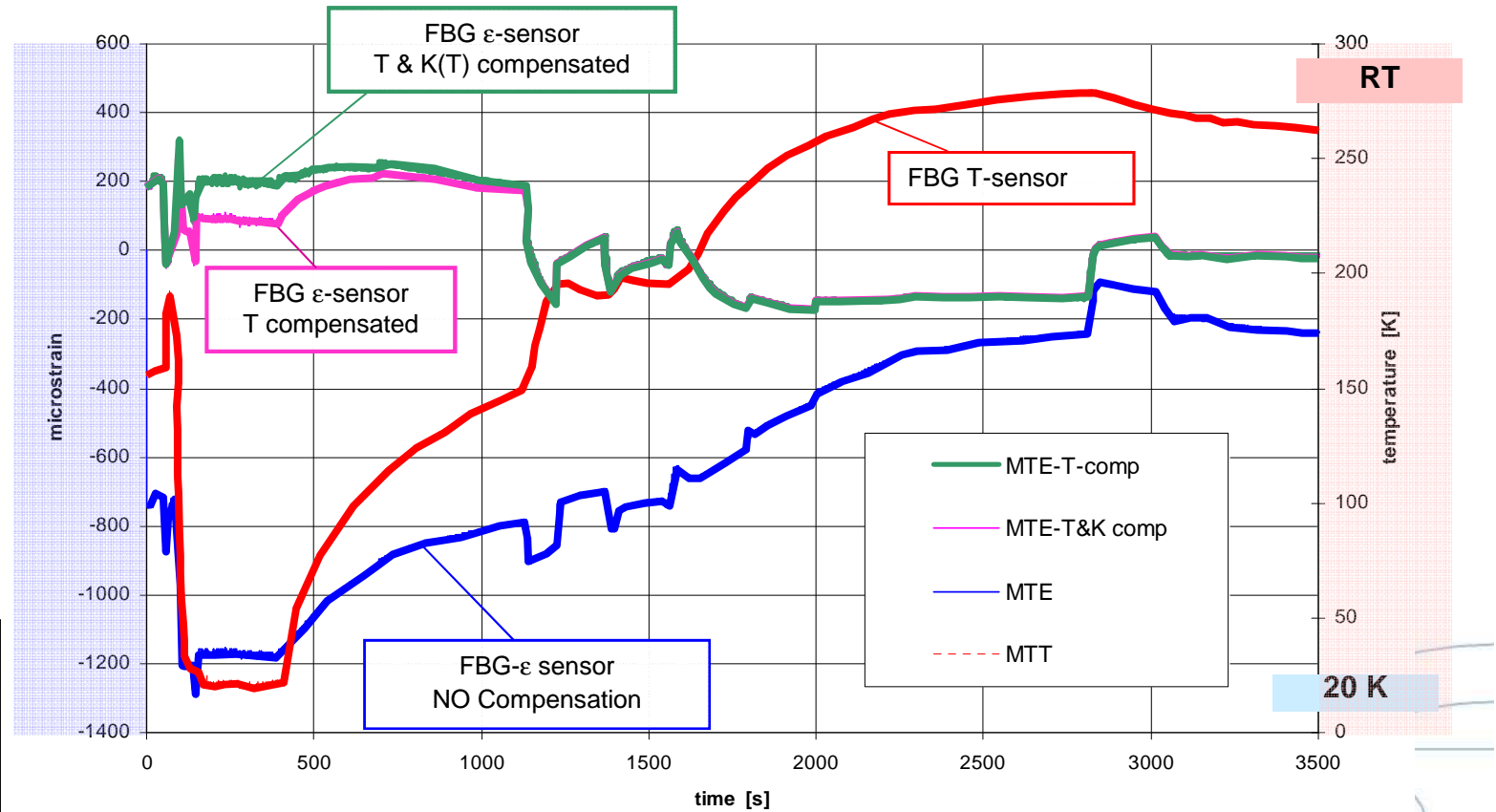


Embedded Optical FBG Sensors



Surface Bonded Conventional Sensors

## Embedded FBG $\epsilon$ -sensor: Temperature Compensation



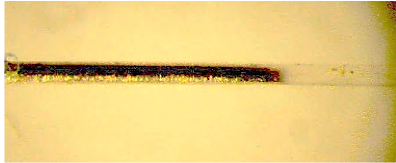


**H2-Pd INTERACTION: Physical Principle**

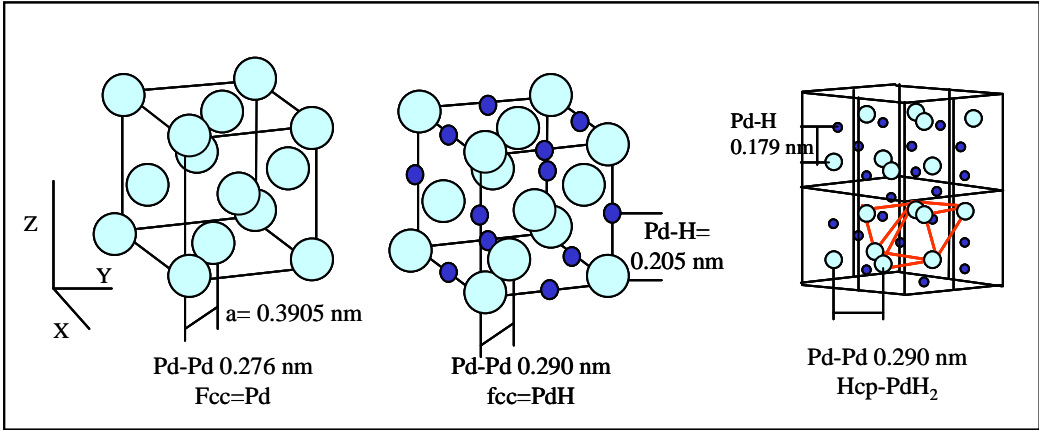
CryoFos design

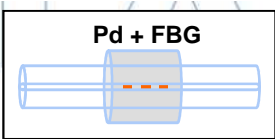


INTA pat.



**Palladium Hydride Structure**



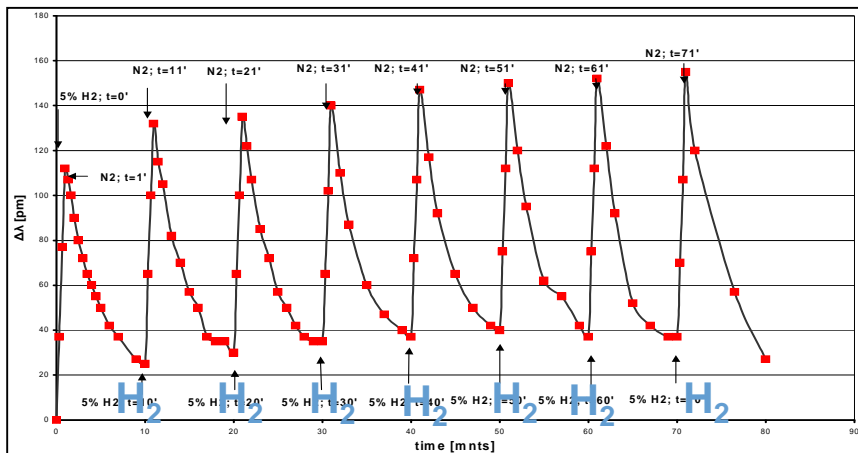


# CryoFOS: HYDROGEN SENSORS

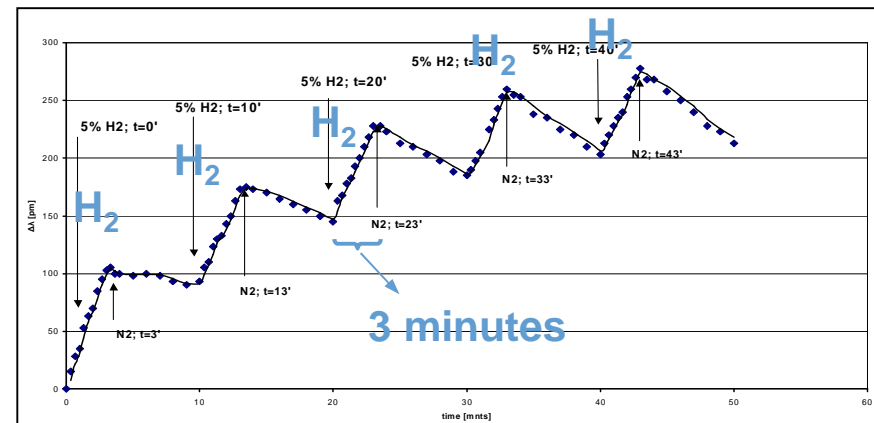
## OPTICAL FBG COATED WITH A THICK (2-4 MICRONS) Pd LAYER



### Absorption – Desorption cycles at T= (50°C)

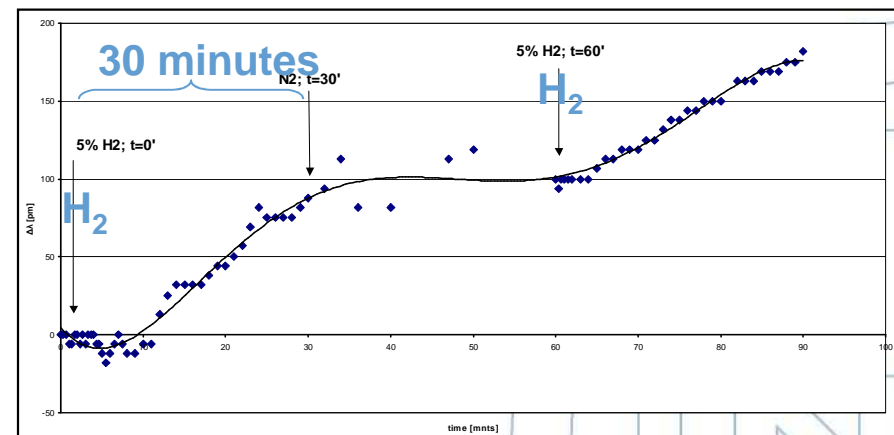


### Absorption – Desorption cycles at T= (23°C)



- Phenomena absorption /desorption are reversible, if enough time is given.
- The thick Pd layer did not attain saturation of H<sub>2</sub> during Absorption → Qualitative Detector
- Desorption is slower (characteristic times 6 time larger)

### Absorption – Desorption Cycles at T= (-35°C)

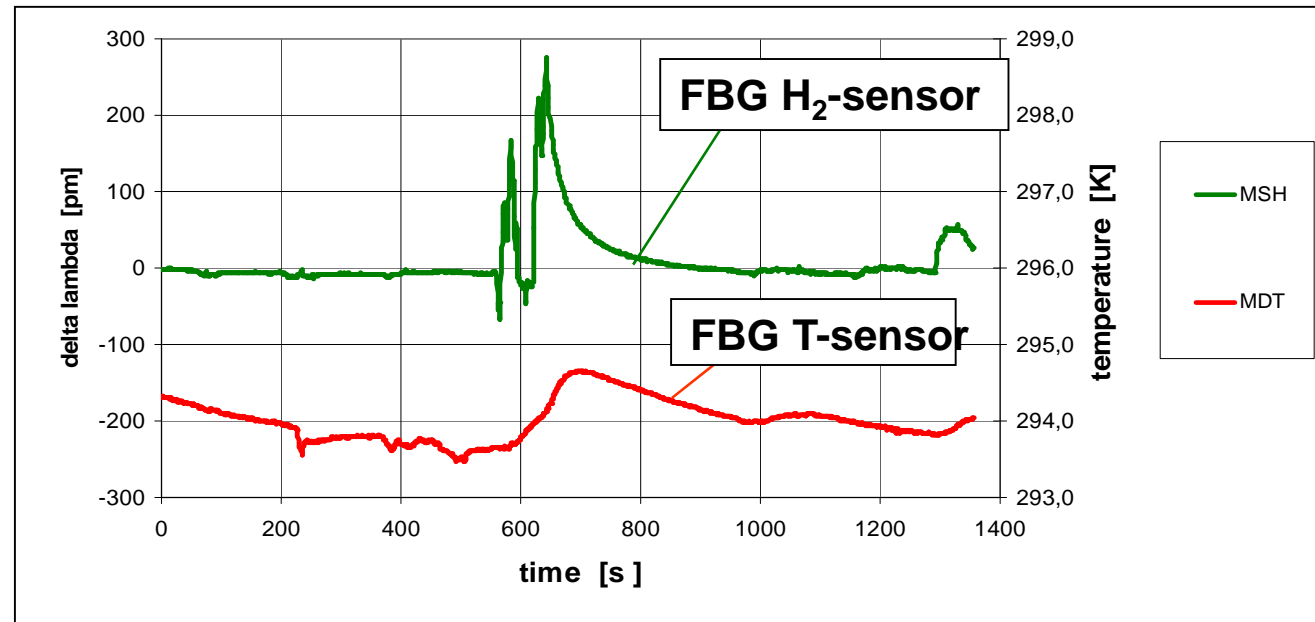
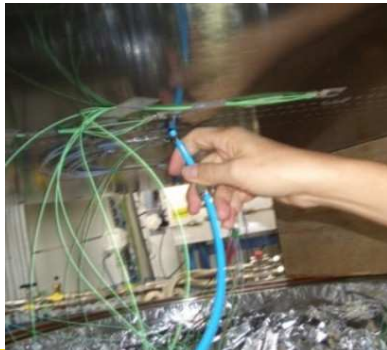


•Alfredo Güemes, Malte Frovel, Jose Maria Pintado, Ignacio Baraibar, Encarna del Olmo; "Fiber optic sensors for hydrogen cryogenic tanks" 2nd Europ-Conf.-on-SHM, Munich, DEStech publications, 2004



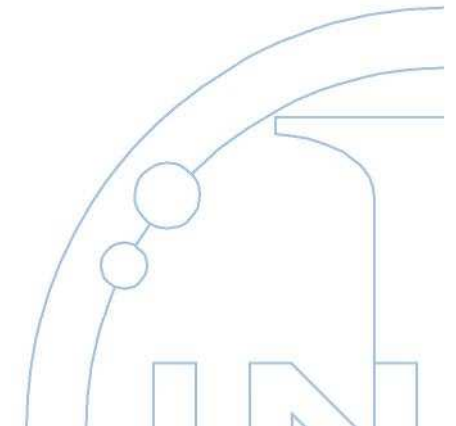
**Pd COATED FBG SENSOR RESPONSE: Technology Demonstrator**

**Embedded FBG H<sub>2</sub>-sensor: Response to GH2 at 293K (20°C)  
Direct Injection after Cryogenic Tests**





# Proyectos y actividades

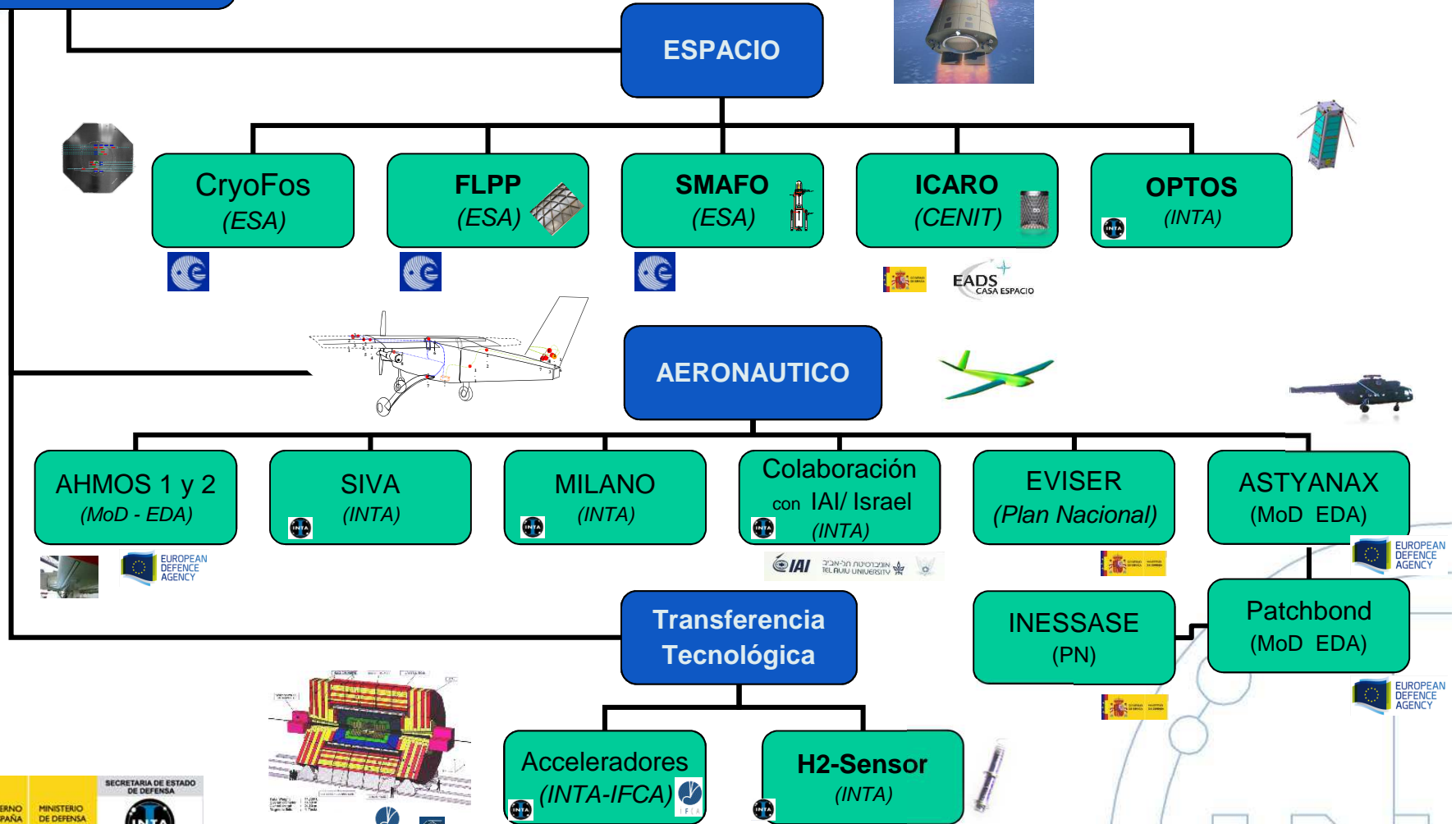


2000 a 2016

Aportaciones científicas/ tecnológicas

# Supervisión, SHM y autodiagnóstico en Sistemas Aeroespaciales

## PROYECTOS



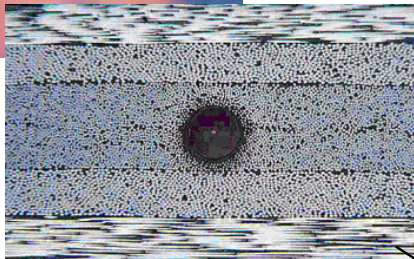


## Tecnologías aplicadas basados en Sensores de Fibra Óptica, FBGS

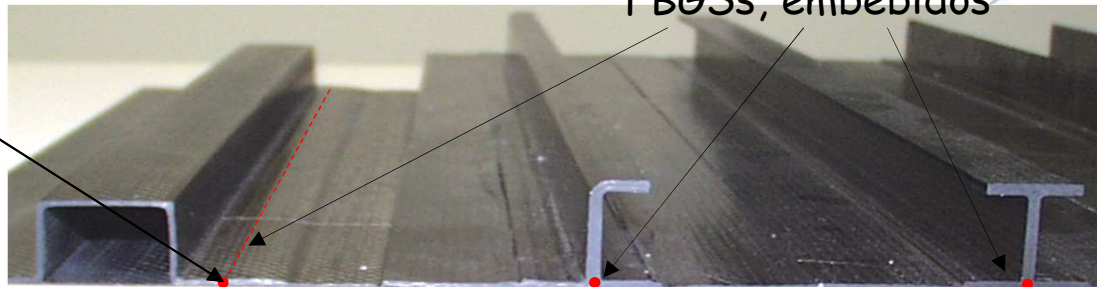
Monitorización de cargas y fatiga

Cambio de camino de carga por presencia de un daño

Cambio de deformaciones residuales



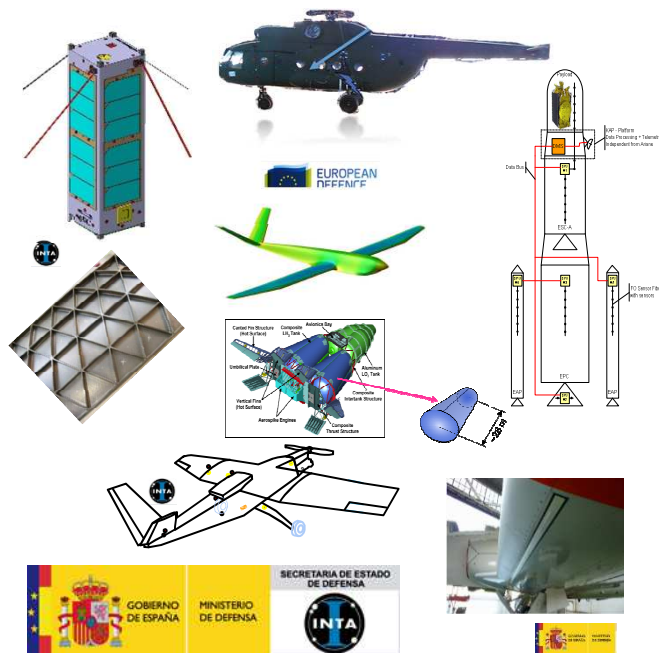
Sensores de fibra óptica, FBGSs, embebidos





# Líneas de I+D en SHM de Sistemas y Estructuras Aeroespaciales utilizando Sensores de fibra óptica (FBGS, LPG, distribuidos)

Monitorización de cargas en vuelo y fatiga



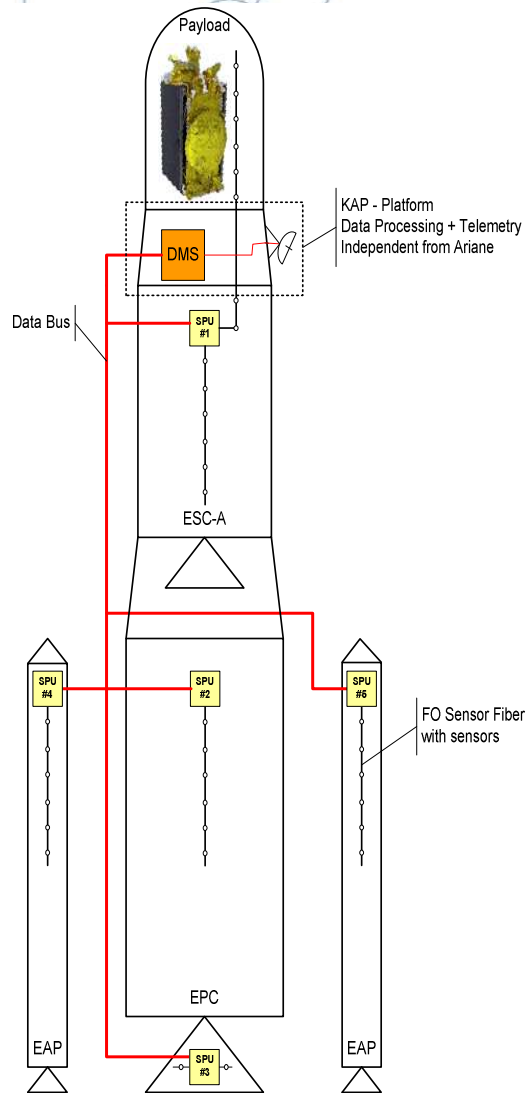
Detección de daño debido al cambio de carga



Relajación de deformaciones residuales



# SMAFO - Fiber Optic Sensors for Structural Monitoring of Launchers



**Acc. max: 54g entre  
10 Hz a 2000Hz**

**Ciclos térmicos en  
alto vacío**

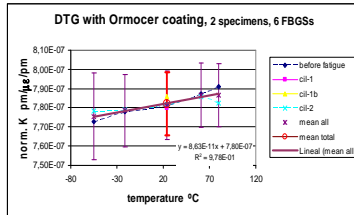


# INTA

Área de Materiales Compuestos

## SHM del helicóptero Mi8/17 Ensayos de caída libre y fatiga Proyecto ASTYANAX / EDA

### Aportaciones científicas/ tecnológicas

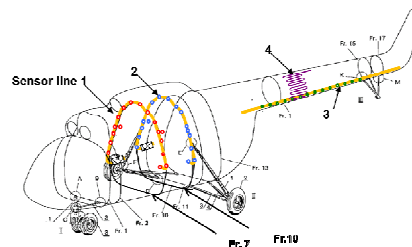


### Selección y caracterización del sistema

- Caracterización sensors: -55°C y 80°C
- Desarrollo de sensores de  $\epsilon$ -plast.
- Ensayos de adhesión
- Desarrollo equipo

### Instrumentación

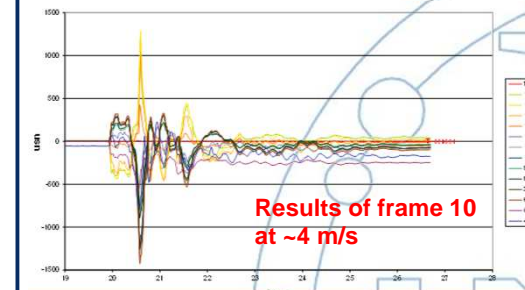
- Selección puntos
- Instrumentar marcos y tailboom
- Integración equipo



Primera aplicación de sensores de medición de deformaciones plásticas en ensayos de caída libre conocidos

### Ensayos de caída libre

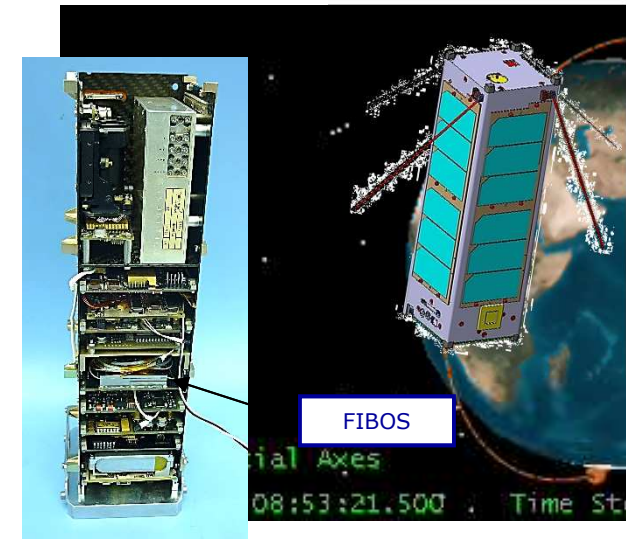
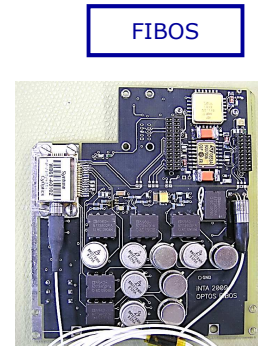
- Trasmisión de datos en tiempo real
- Evaluación de datos de caídas de diferentes alturas



## Verificación de sensores de fibra óptica tipo Bragg en el espacio

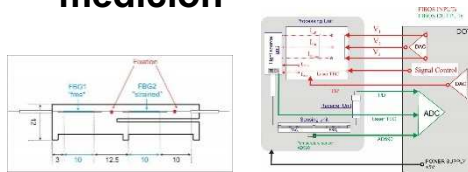
### Proyecto OPTOS-FIBOS

## Aportaciones científicas/ tecnológicas



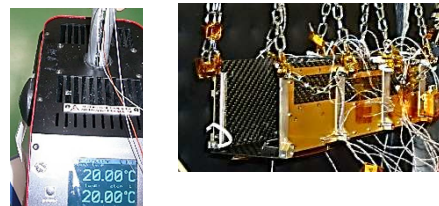
### Selección y caracterización del sistema

- Caracterización transductor
- Diseño de sistema de medición



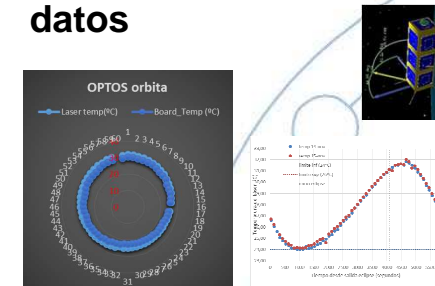
### Instrumentación

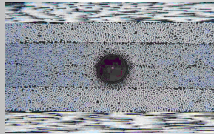
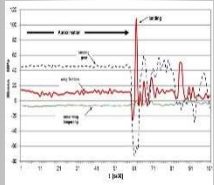
- Instrumentación FIBOS
- Calibración T en ambiente
- Calibración T en vacío



### Ensayos en orbita

- Optimización del software
- Definición de puntos de medida en orbita
- Evaluación de los datos





# Seguridad en vuelo de aviones no tripulados



UAVs de vigilancia

MILANO

SIVA

ALO

DIANA

Avión blanco





## Sistema de monitorización de cargas en vuelo

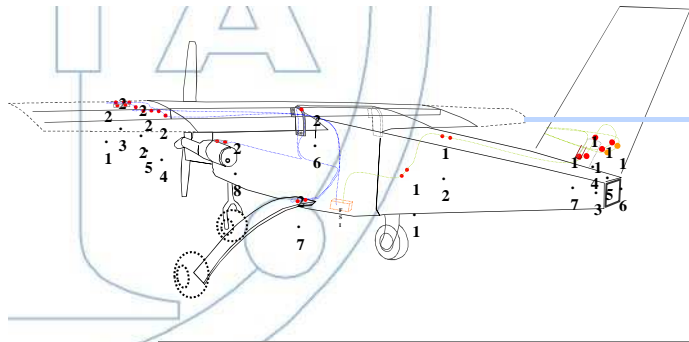
Interrogador FSI de INSENSYS- time domain

FBGS de deformación y Temperatura

1. configuración: 4x  $\epsilon$ , 2x T-Sensores

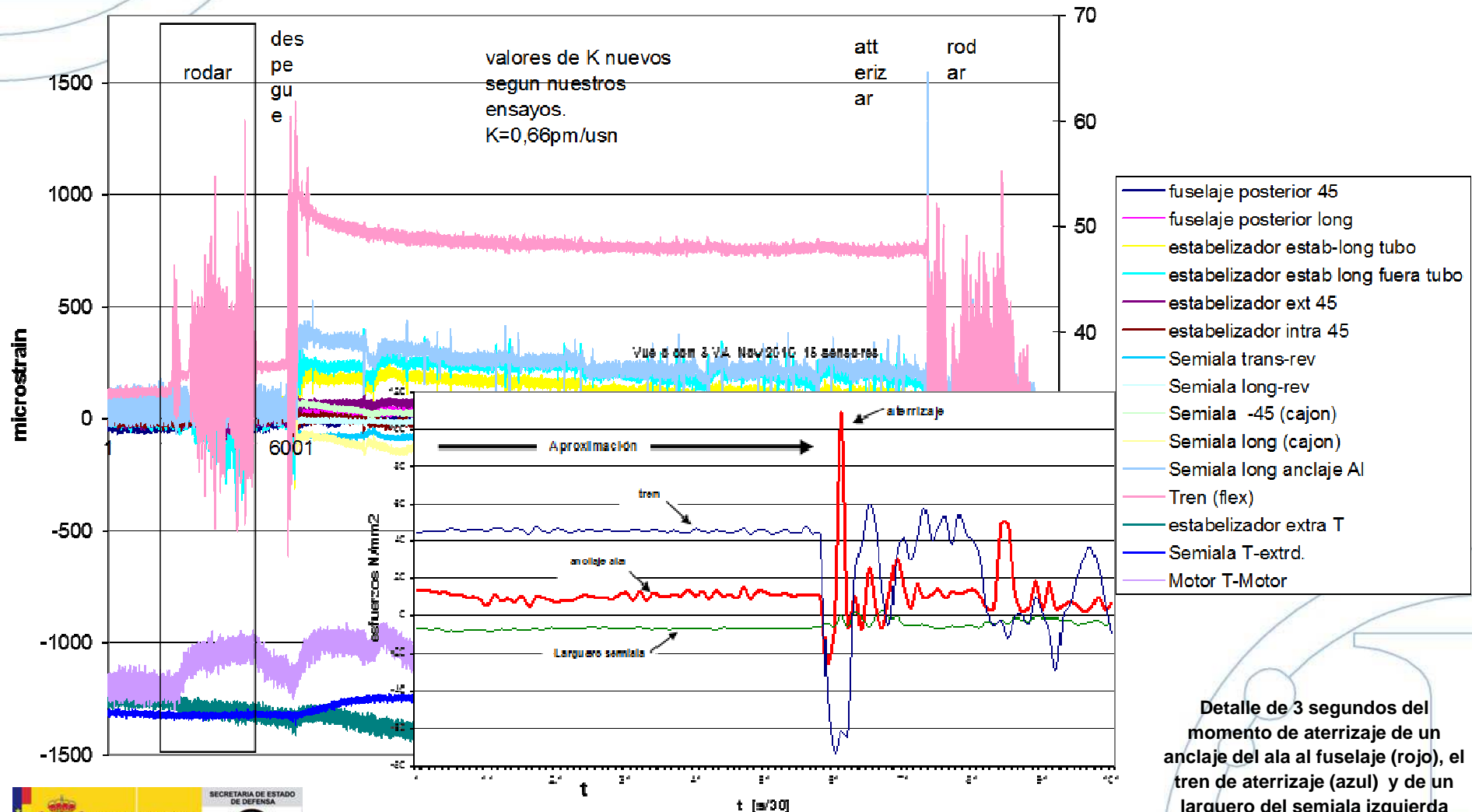
2. configuración: 16x  $\epsilon$ , 4x T-Sensores





Vuelo con 15 sensores

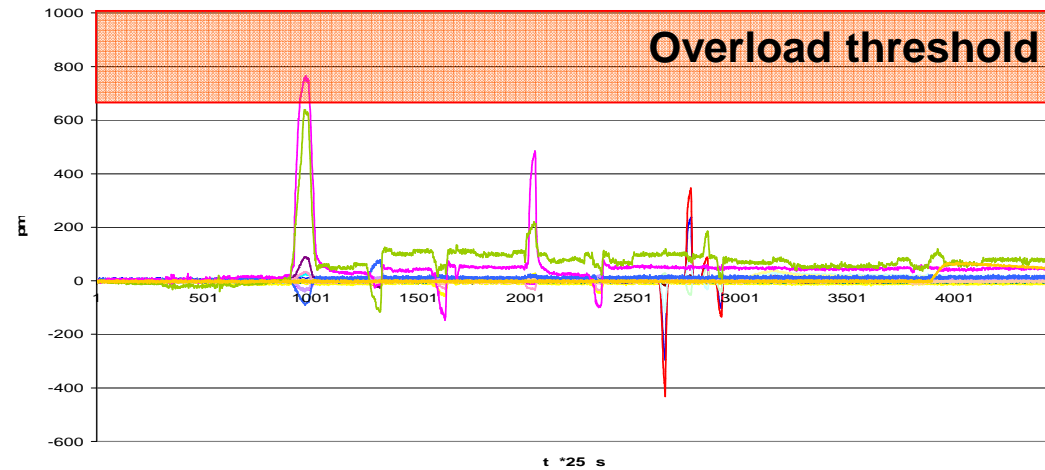
# Flight test 4



Detalle de 3 segundos del momento de aterrizaje de un anclaje del ala al fuselaje (rojo), el tren de aterrizaje (azul) y de un larguero del semiala izquierda

# Data analysis

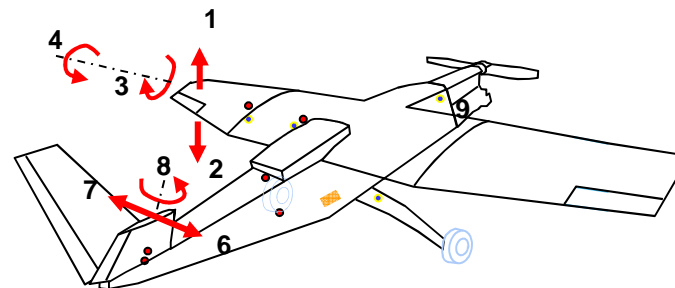
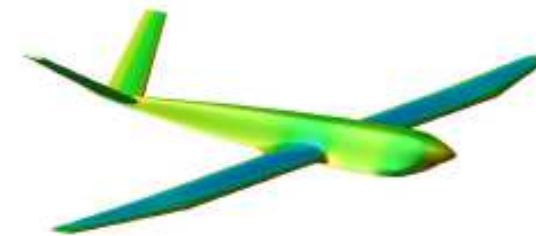
Detección de sobrecargas



Comparación de valores de diseño para:

Certificación

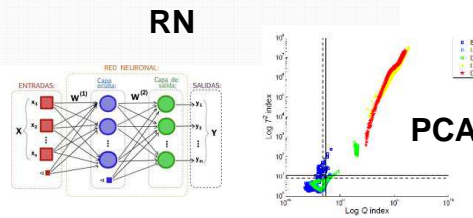
Optimización





# SHM en UAV tipo MALE

- Objetivos:** Certificación  
 Optimización del diseño  
 Detección de daño  
 Sostenibilidad



## Instrumentación

- Desarrollo y certificación de equipo de vuelo
- Desarrollo de la red de sensores/ técnica de integración
- Robustez del sensor harness

## Evaluación y Pronostico

- Redes Neuronales para estimar cargas de vuelo
- Ensayos en tierra y FEM para entrenar RN
- Técnicas estadísticas de PCA para detección de daño
- Modelización e ensayos en tierra para PCA

## Ensayos en vuelo

- Medición de cargas en vuelo
- Evaluar cargas y daño con RN y PCA
- Pronostico de vida restante
- Minimización de falsas alarmas y fiabilidad de prognosis



### Equipo lector

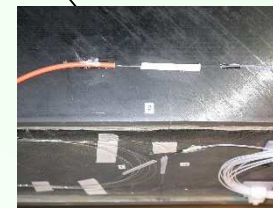
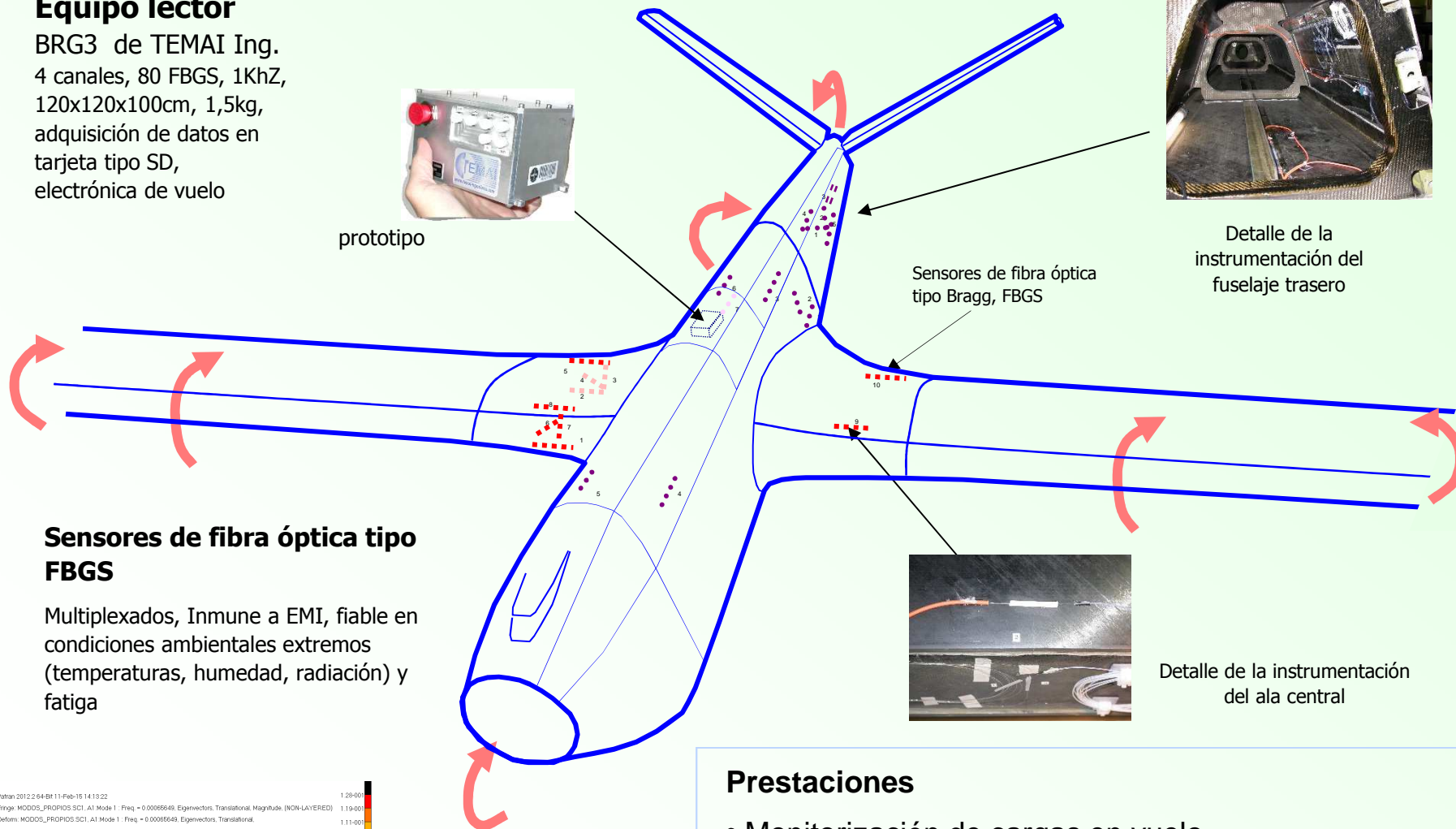
BRG3 de TEMAI Ing.  
 4 canales, 80 FBGS, 1KHz,  
 120x120x100cm, 1,5kg,  
 adquisición de datos en  
 tarjeta tipo SD,  
 electrónica de vuelo



prototipo



Detalle de la instrumentación del fuselaje trasero



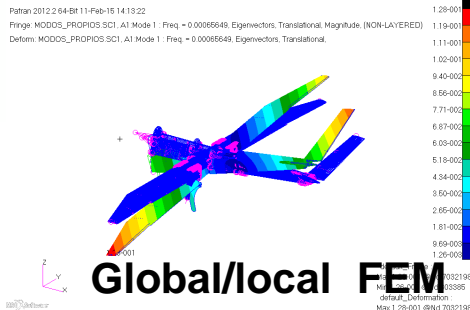
Detalle de la instrumentación del ala central

### Sensores de fibra óptica tipo FBGS

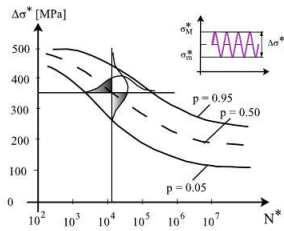
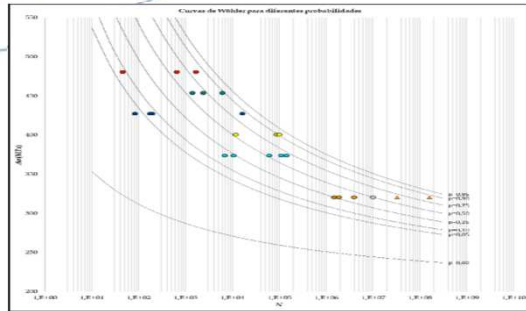
Multiplexados, Inmune a EMI, fiable en condiciones ambientales extremos (temperaturas, humedad, radiación) y fatiga

### Prestaciones

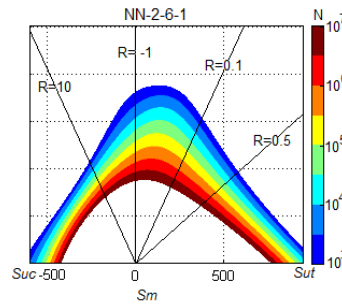
- Monitorización de cargas en vuelo
- Supervisión de la vida a fatiga de la estructura
- Evaluación de posibles sobrecargas (aterrizajes duros, ráfagas)
- Verificación de los parámetros del diseño → Certificación



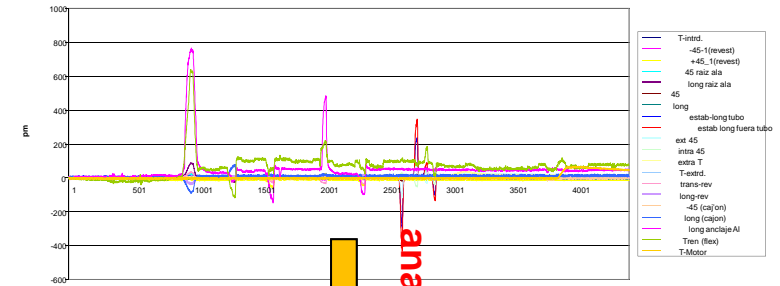
## Datos de ensayos con probetas



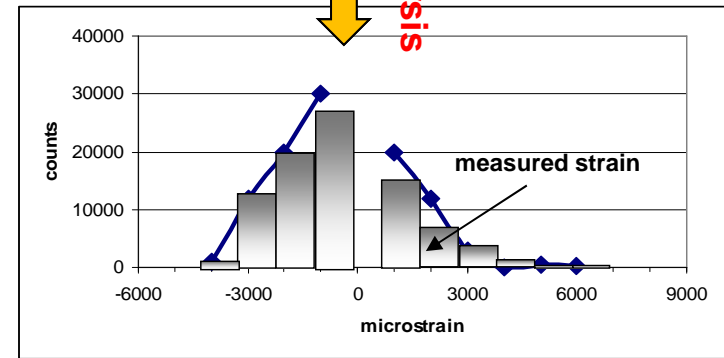
Método de Castillo/Cantelli



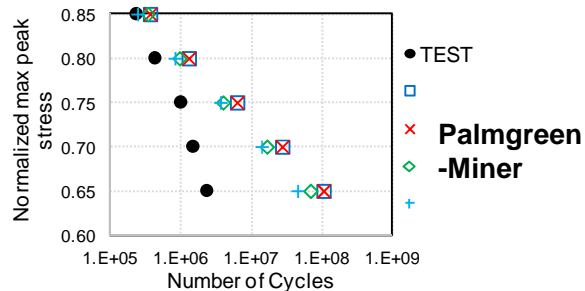
## Datos de vuelo



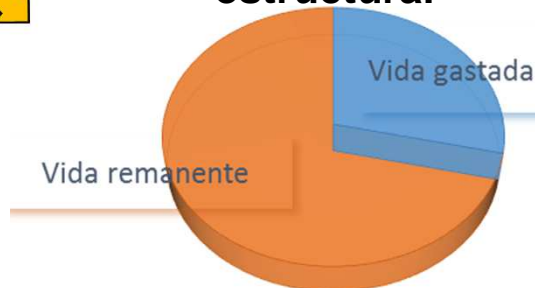
analysis



## Nuevos métodos de acumulación de daño necesarios

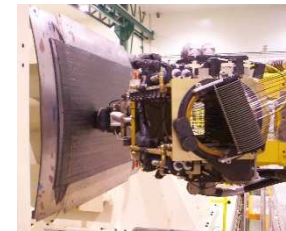


## Estimación de la vida estructural

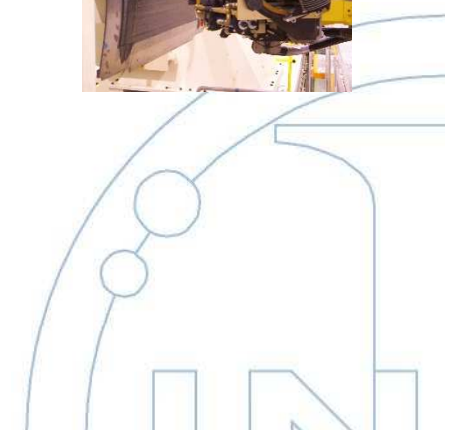




# Detección de daños en estructuras aeroespaciales

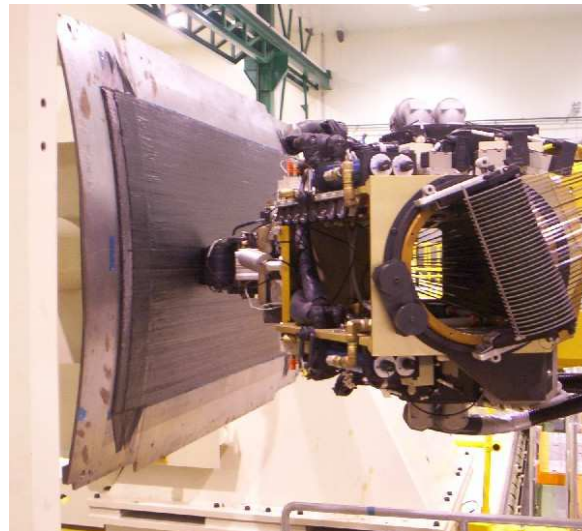


FLPP Project  
ICARO Project



**Manufacturing**

Evaluation of the Capability to Integrate  
Optical Fiber Sensor Lines  
in a Complex Composite Design  
following an Industrial Manufacturing Process

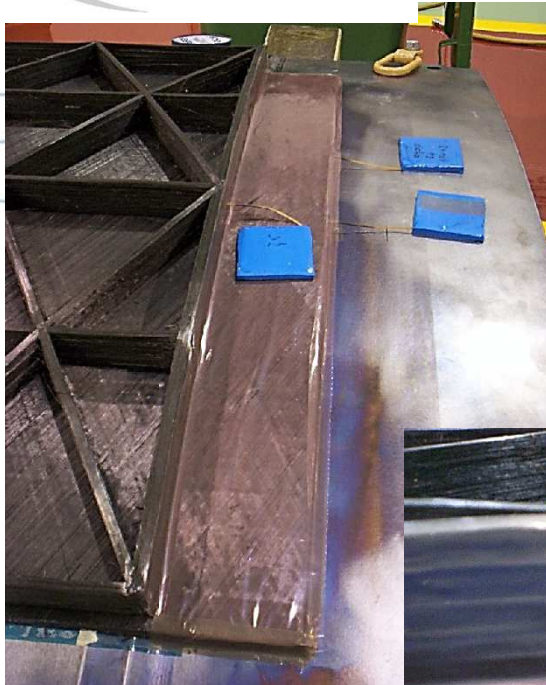


Automatic Layering  
Process



Contacto: Airbus Defence and Space  
Dr. Encarna del Olmo

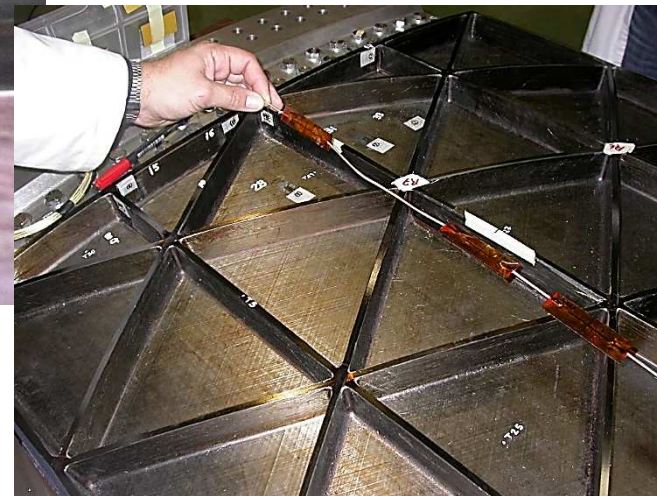
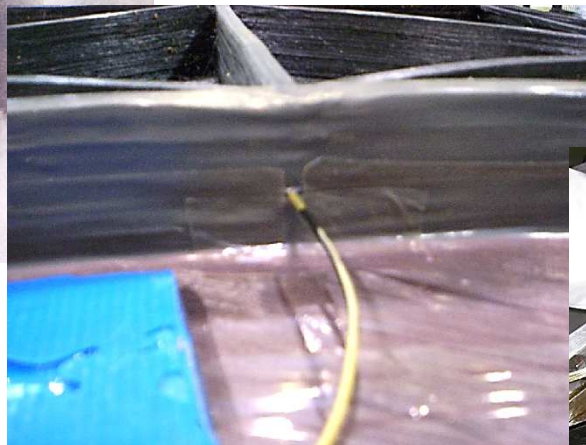




Structural integration of  
fiber optic sensors

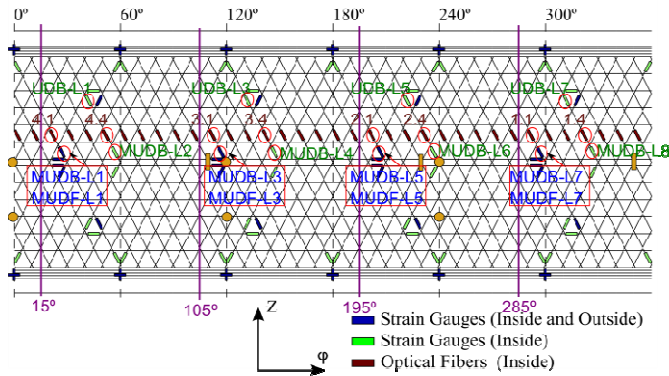
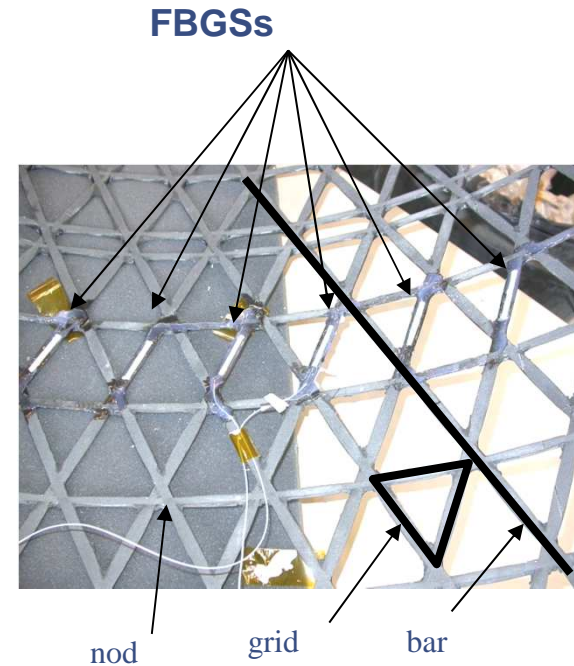
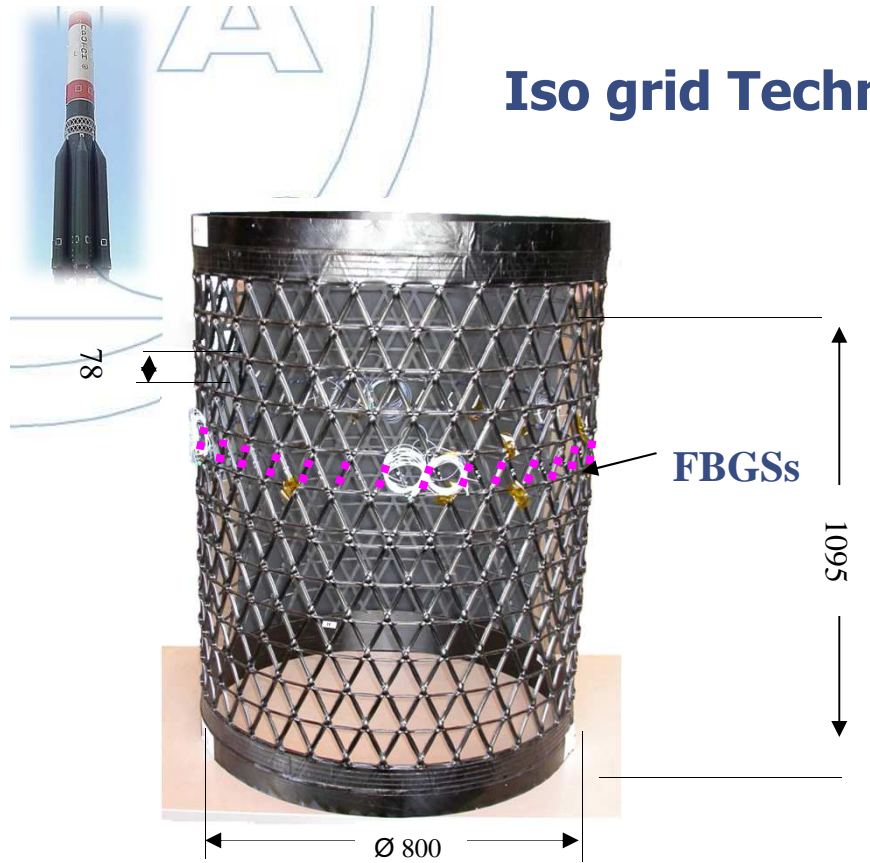


Loads monitoring



Surface integration of  
fiber optic sensors

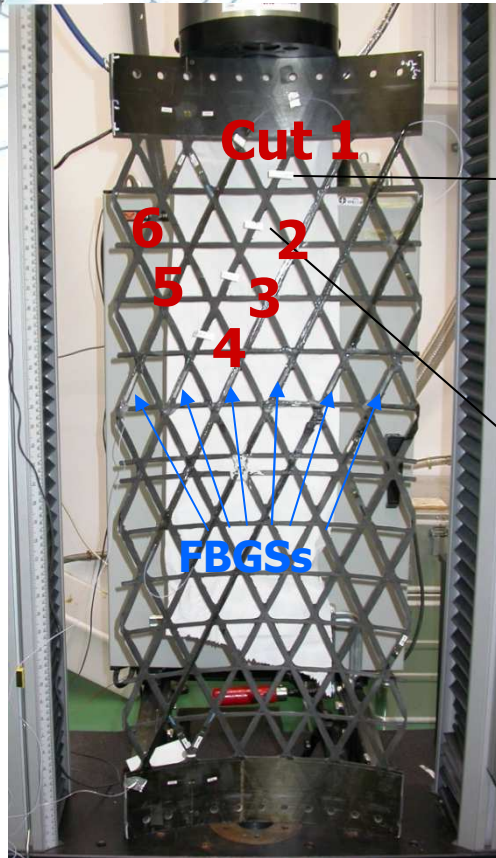
# Iso grid Technological Demonstrator: ICARO project



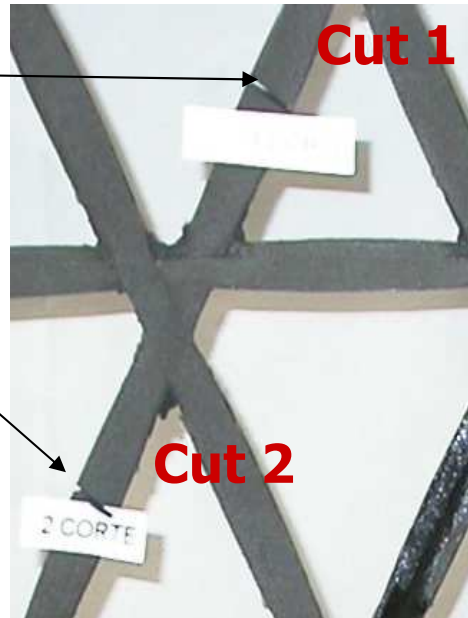
**36 FBGS bonded on each bar in clockwise direction in the Inner cylinder bars**



# Iso grid Technological Demonstrator: ICARO project



Sector

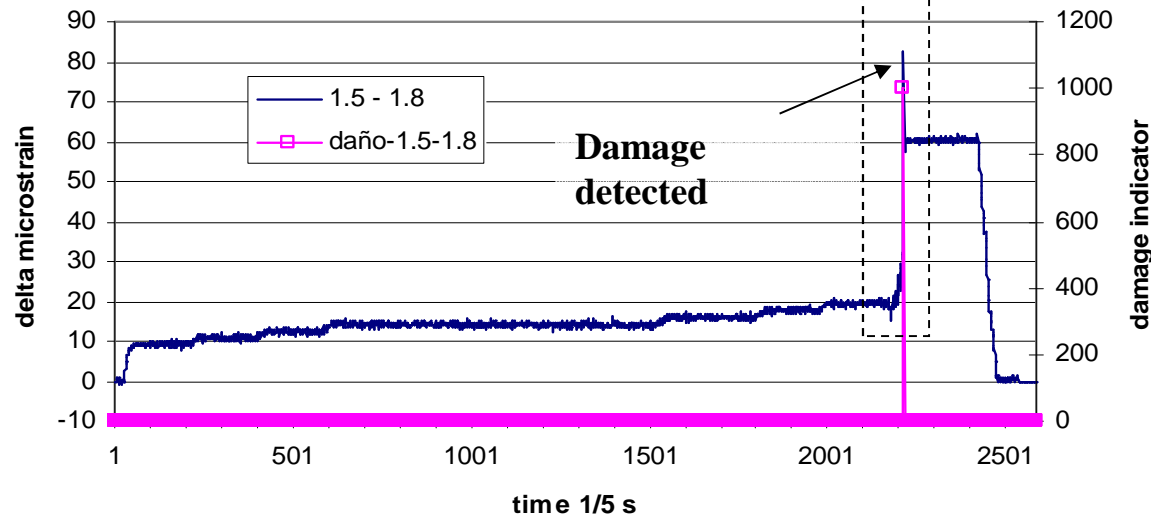
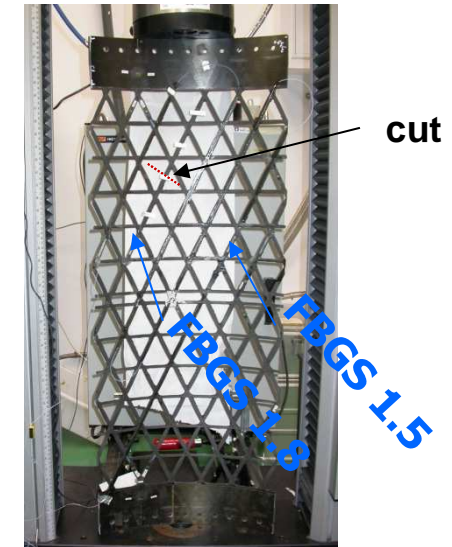
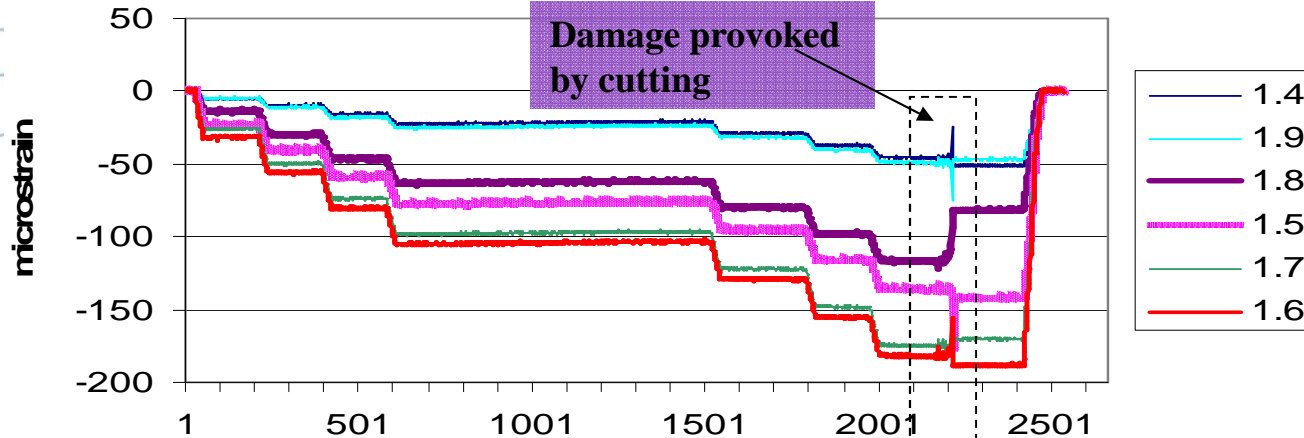


Detail of bar- cuts

- Compression tests in step loads on cylinder sectors to verify results of the entire cylinder
- Consecutive cuts of bars and repetition of the compression test
- Measured: corresponding strain distribution in the FBGSs



# Iso grid Technological Demonstrator: ICARO project



$$\varepsilon = (FBGS_{1.8} - FBGS_{1.5}) \cdot K$$

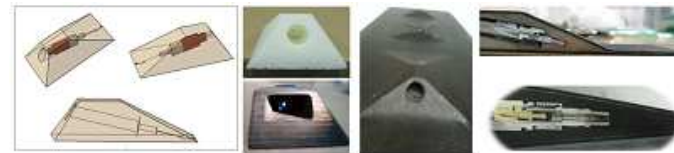
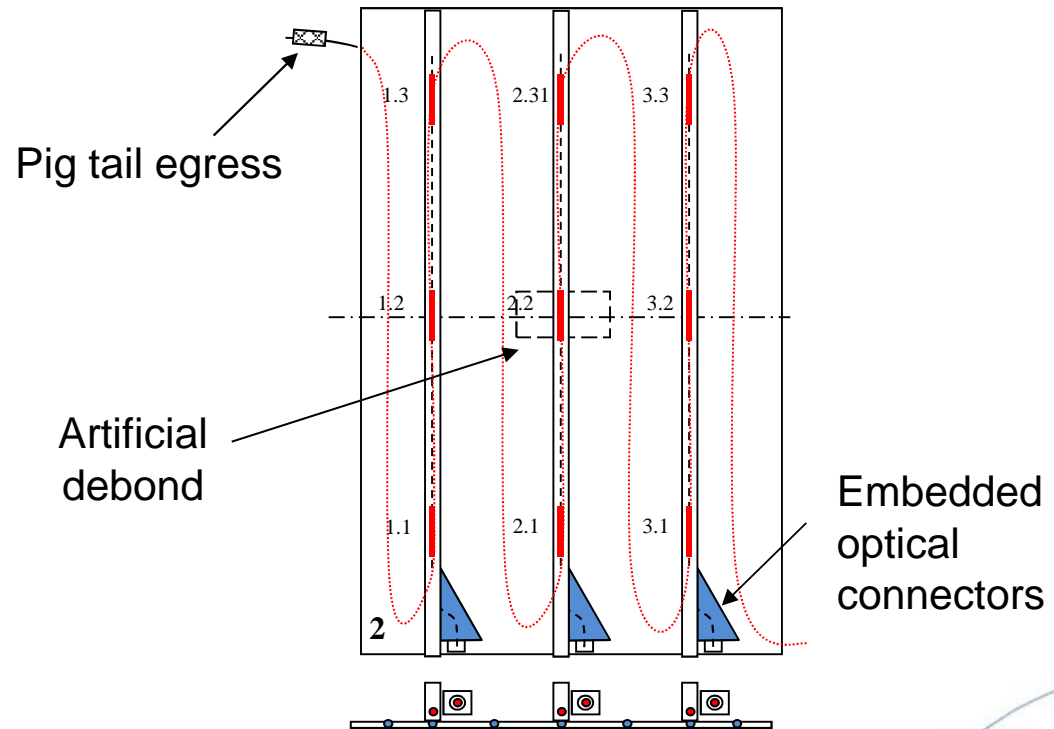
$$D = \Delta\varepsilon > 6 \mu m \text{ (200ms)}$$



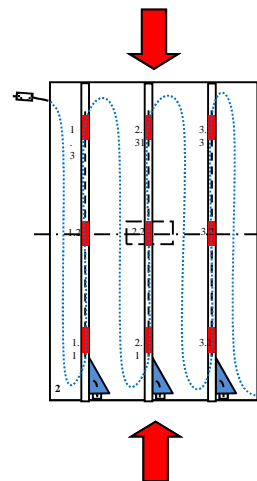
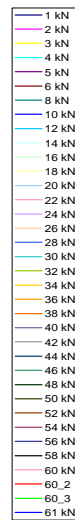
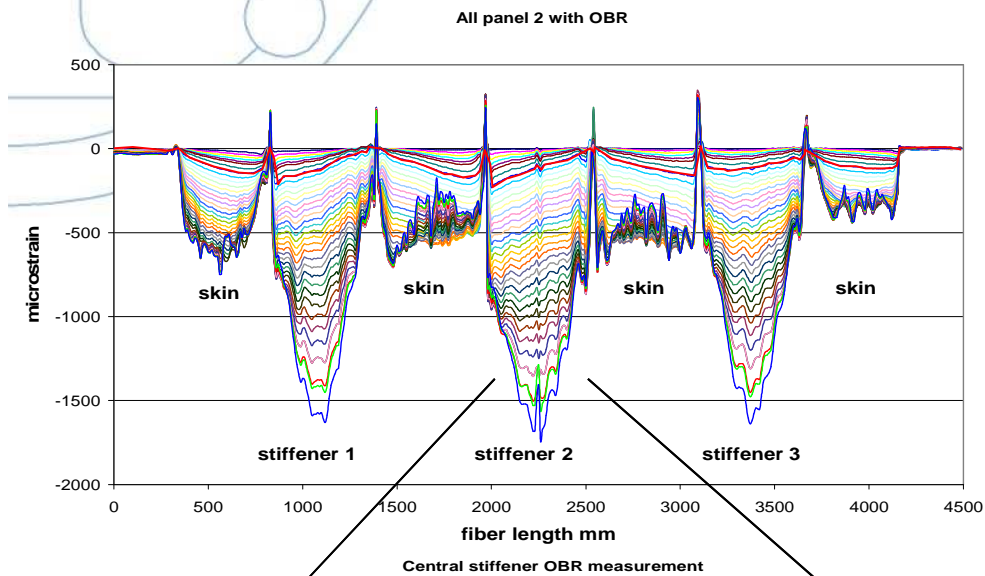
# Integrated Optical Sensors for Debond Detection



## Distributed measurement + local FBGS for comparison

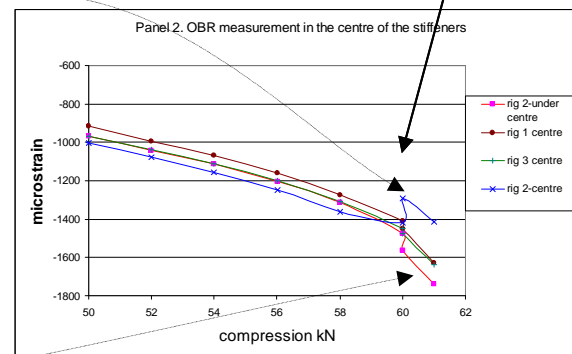
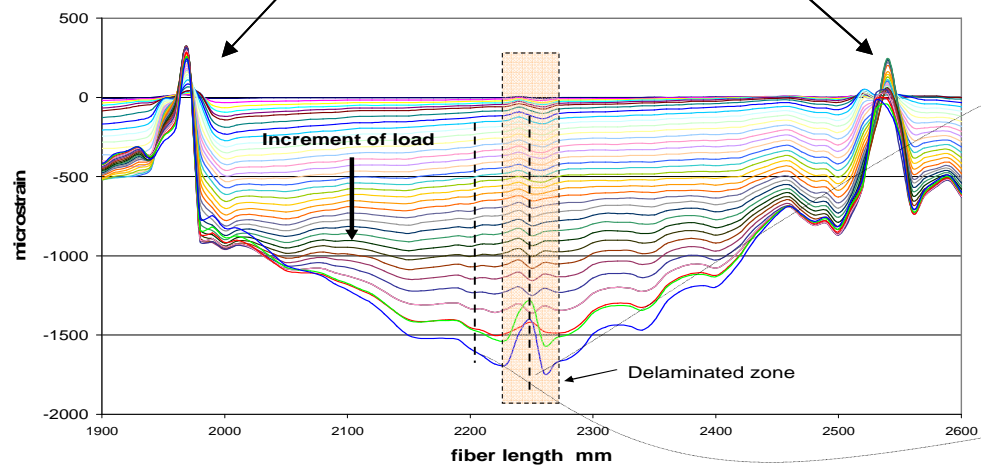


# Quasi Static Test Results: 2- Distributed Sensors + FBGS

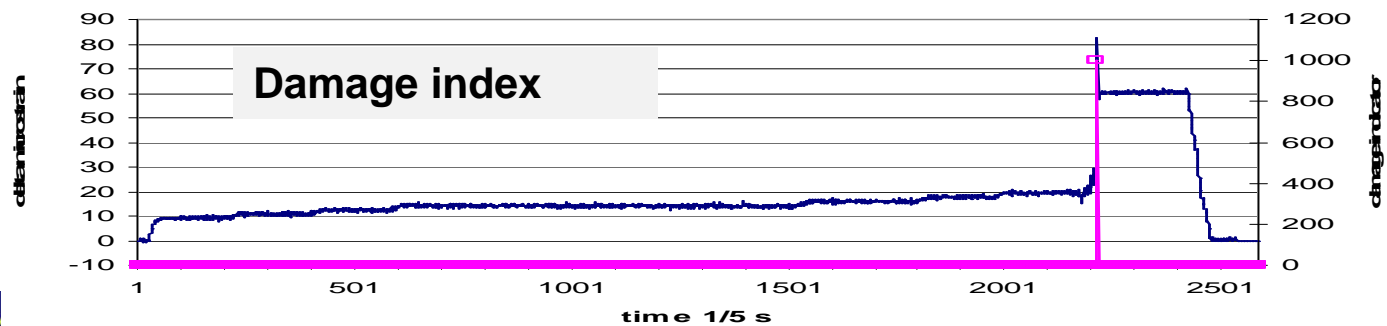
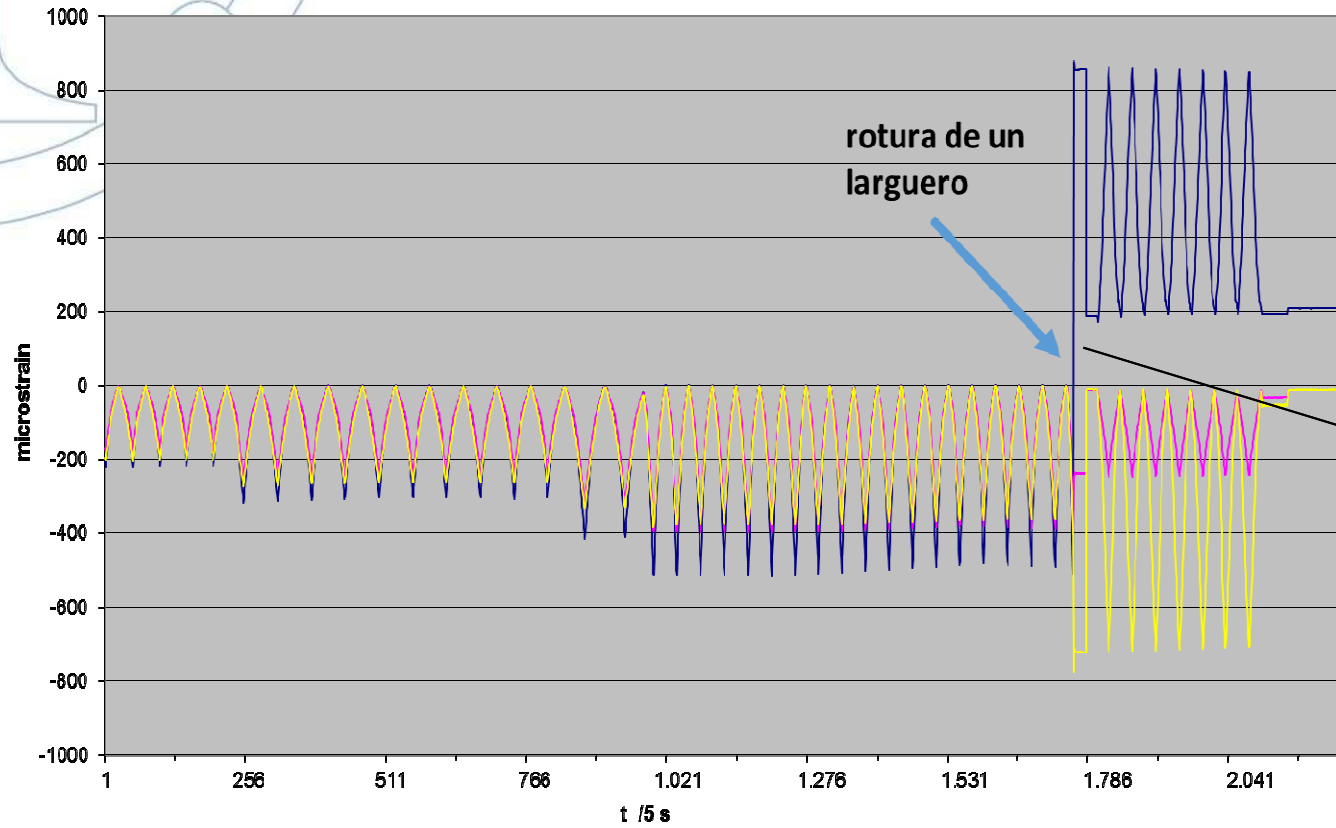


Optical Backscatter Reflectometry, OBR

Local skin buckling:  
→ debond indicator

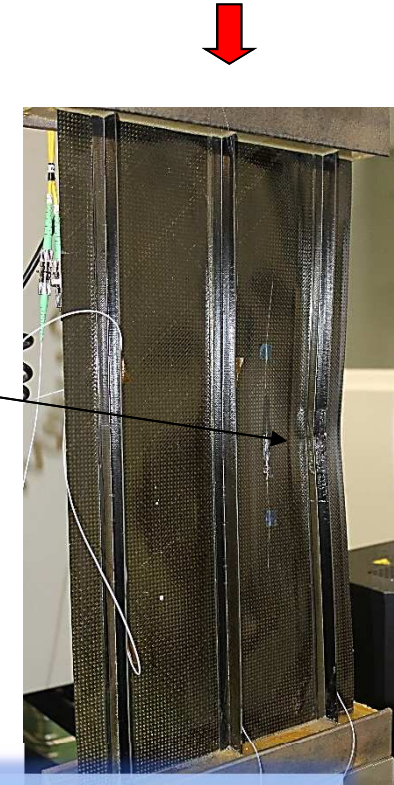
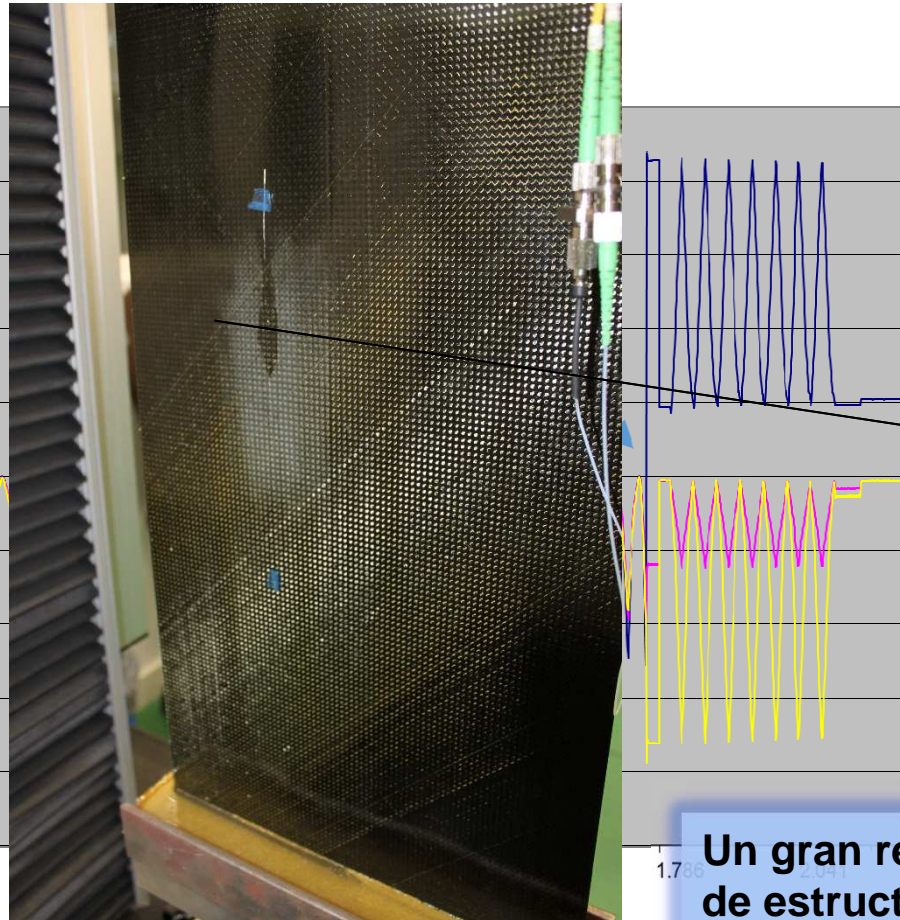
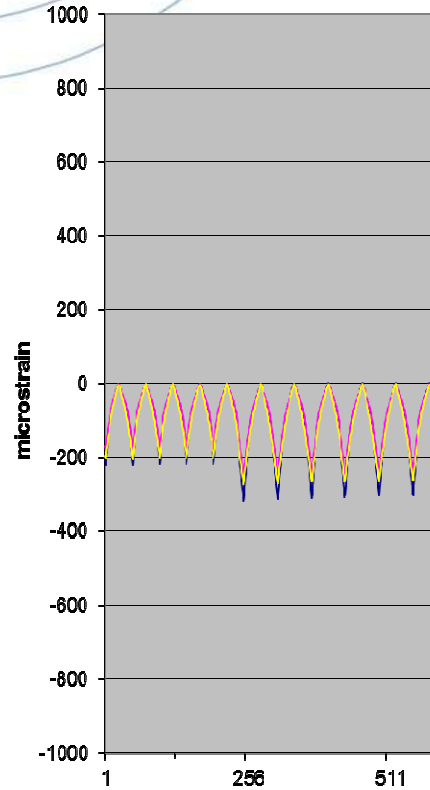
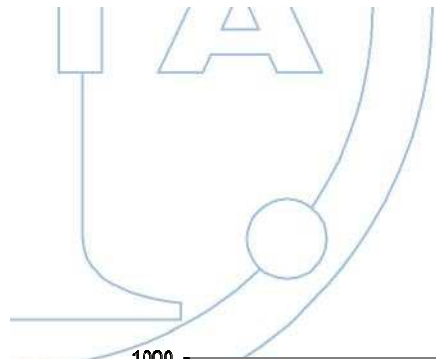


# Dynamic Test Results: FBGS





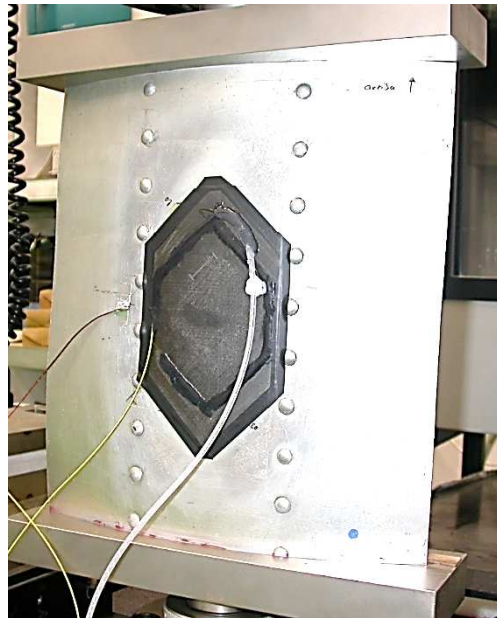
# Dynamic Test Results: FBGS



Un gran reto en la inspección de estructuras de material compuesto.

**¡Una vez quitado la carga, por detrás no se ve nada de la rotura!**

# Monitorización de reparaciones pegadas



# Monitorización de reparaciones pegadas

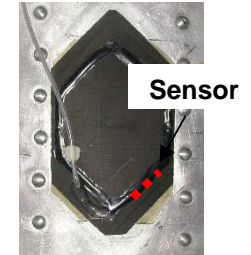


Parche monitorizado del INTA en un ensayo de fatiga de un panel rigidizado del botalón de cola de un helicóptero

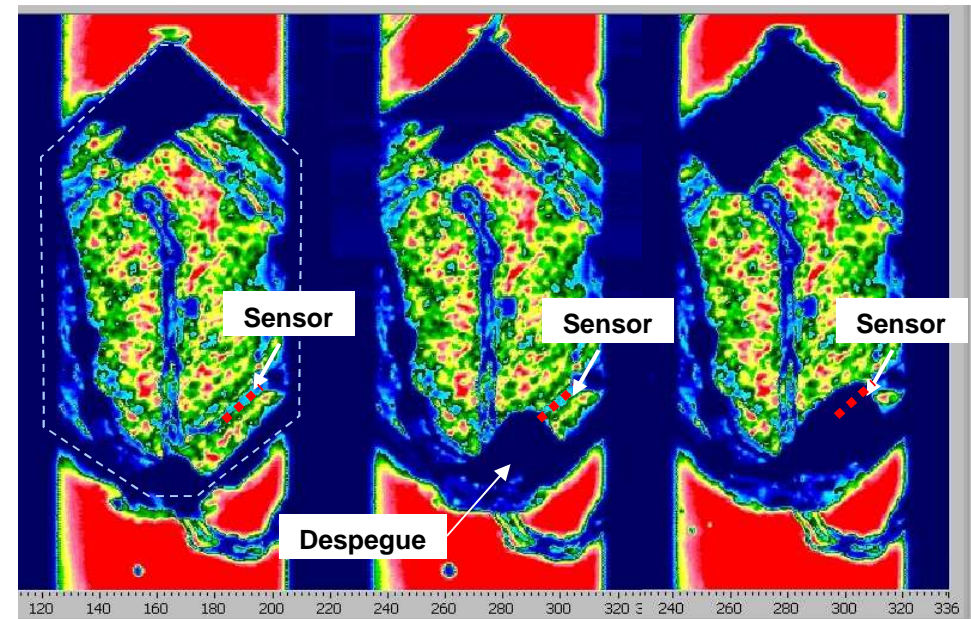
*Se ha podido detectar el avance de despegues provocados antes de que tengan un tamaño crítico*



# Monitorización de reparaciones pegadas



## C- Scan



Sin despegue

Despegue acercándose

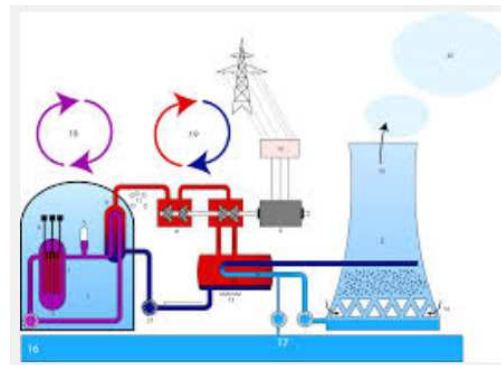
Con pasado el sensor



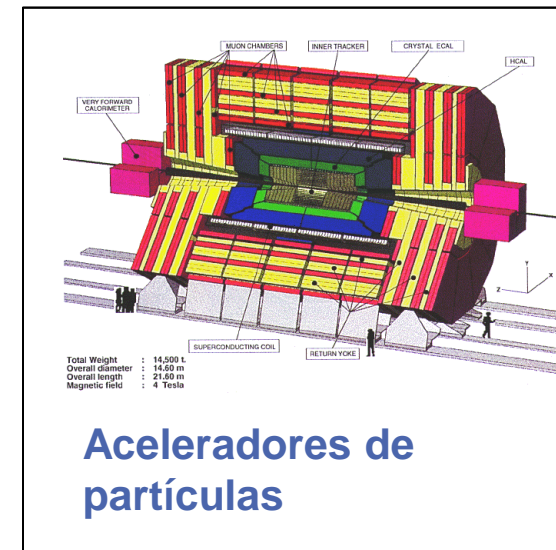
# Sensores para la monitorización estructural en ámbitos de alta radiación



Medicina



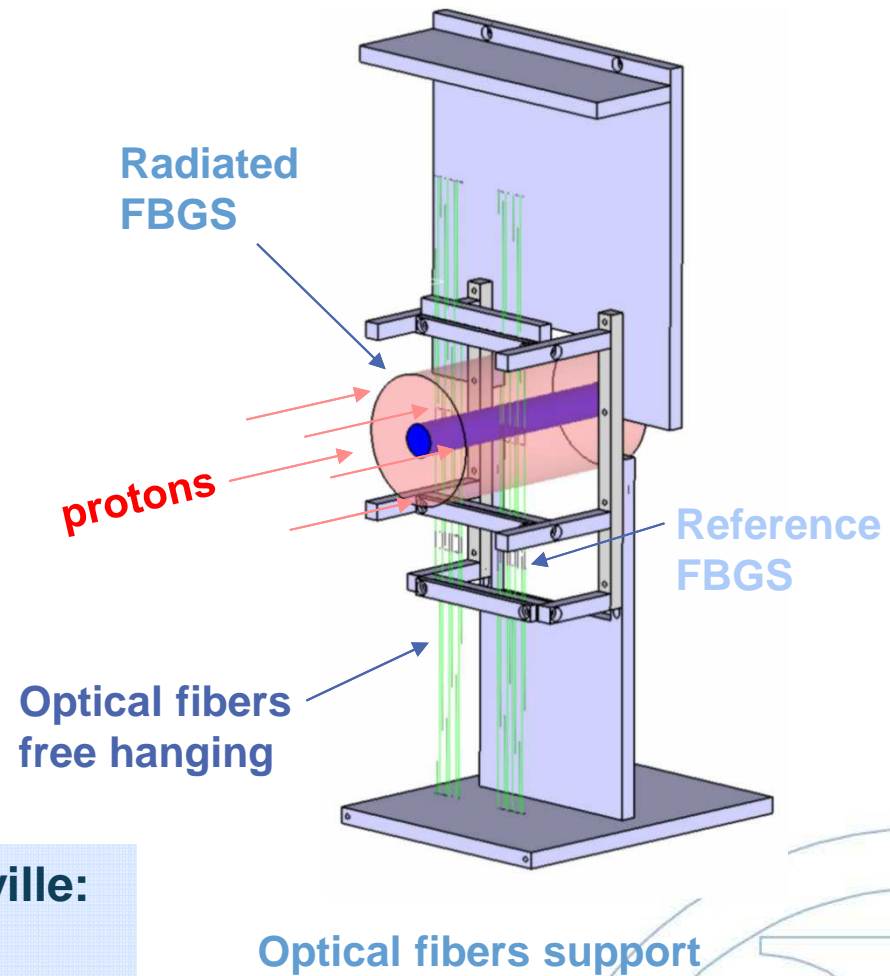
Centrales nucleares



Aceleradores de partículas



## proton radiation tests

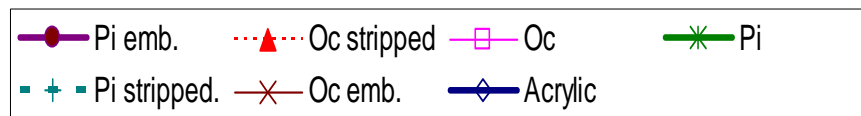
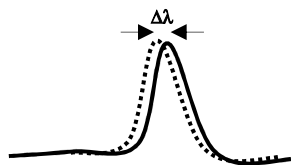
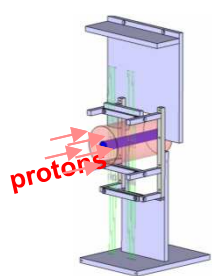
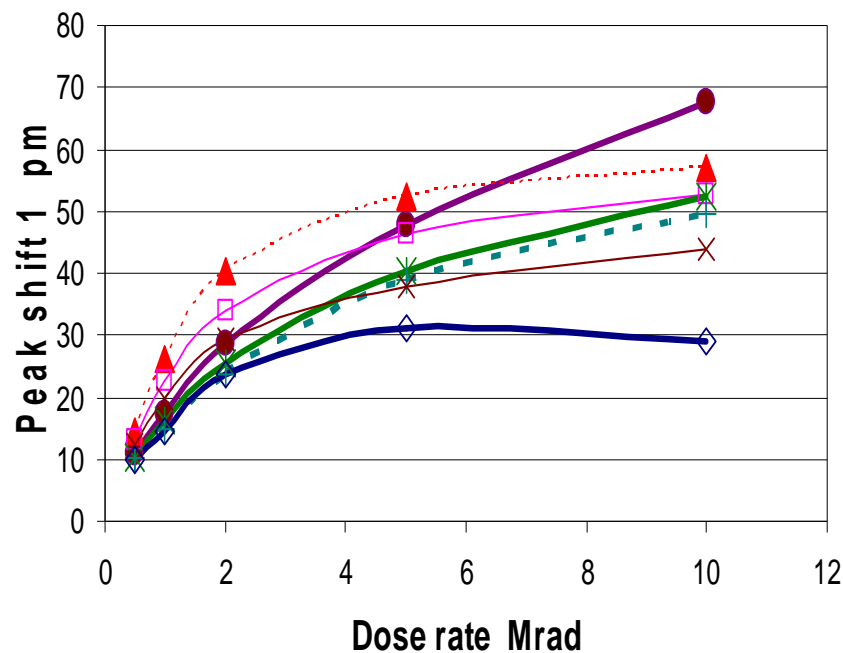
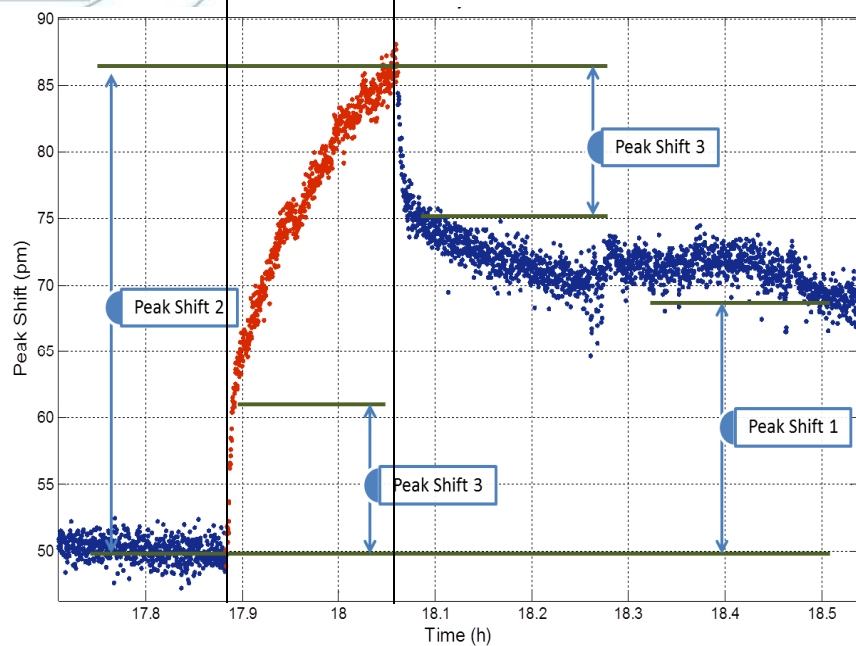


- **New Cyclotron facility at CNA en Seville: 15.5 MeV,  $3.3 \cdot 10^{15}$  protons/cm<sup>2</sup>**
- **Absorbed dose: 10 Mrad (100 KGy)**



# Results: Proton radiation

Before Radiation After radiation

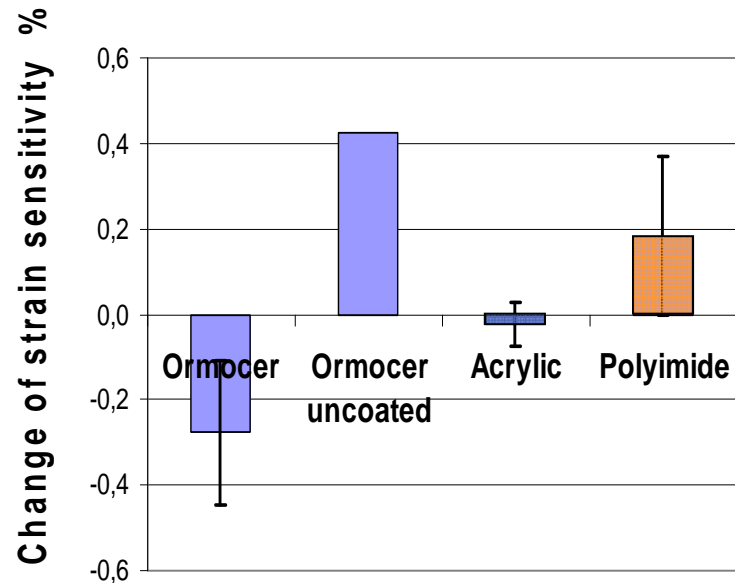


**FBGS wavelength shift after life time proton radiation dose: 30 ... 70 pm = 25...60 με**

Results: sensitivities before and after proton radiation

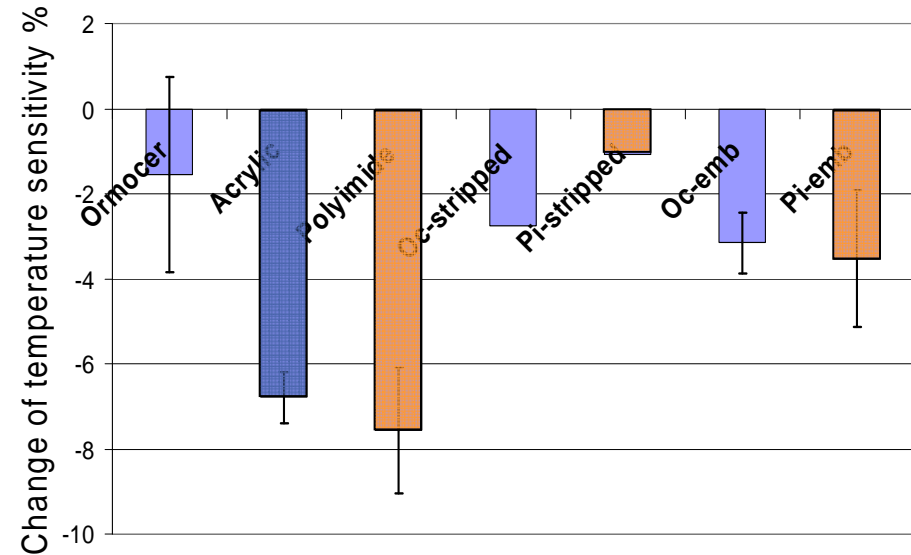
## Mechanical:

### strain sensitivity $K_\epsilon$



## Thermal:

### thermal sensitivity $K_T$



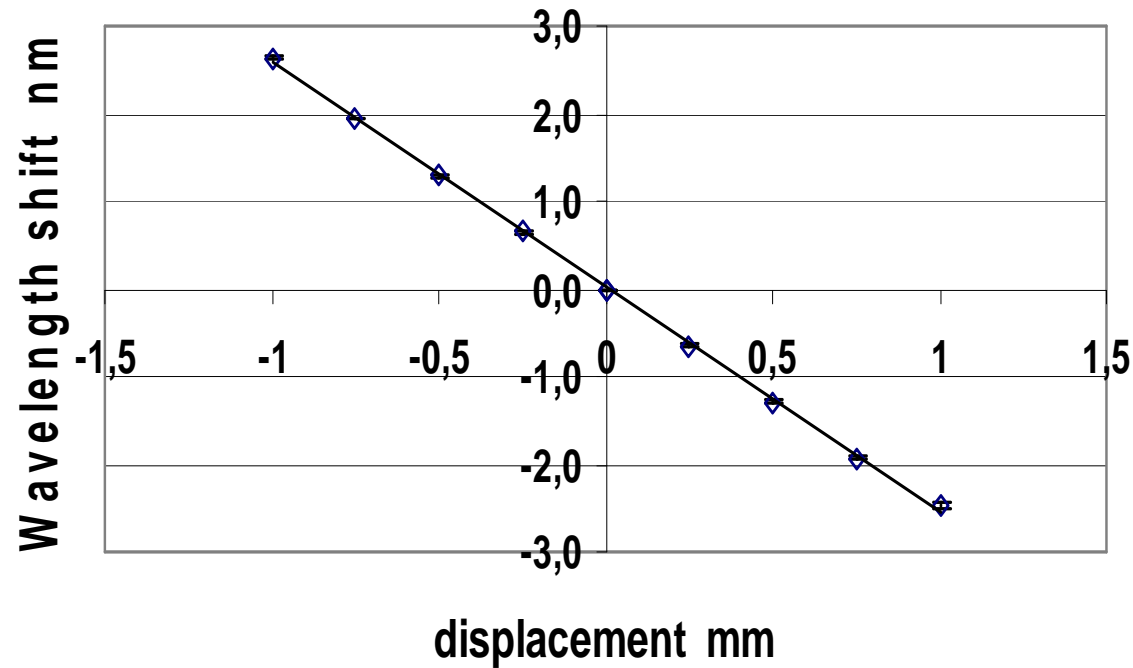
- **No significant change of the sensor properties after life time radiation exposure**



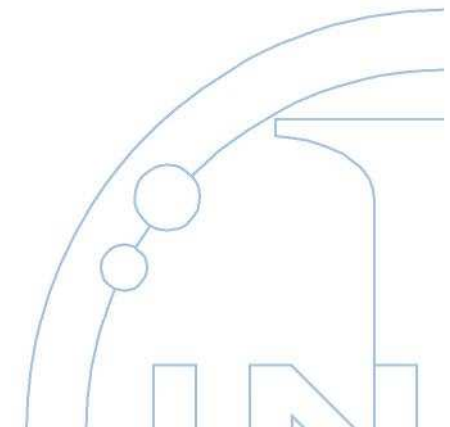




Displacement transducer

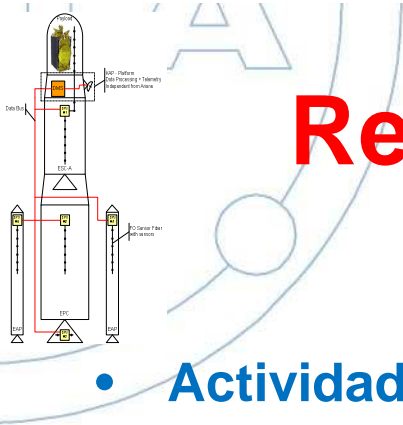
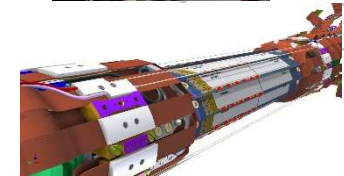
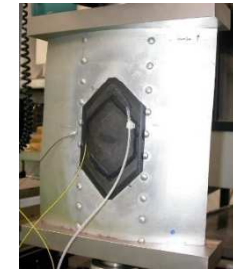
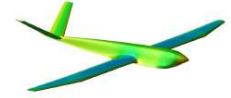


Achieved: resolution:  $< 1\mu\text{m}$ ,  
accuracy about  $10\mu\text{m}$  !!

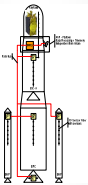
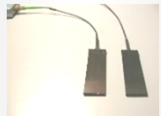
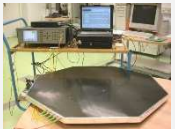
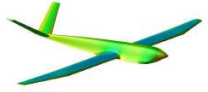


# Resumen de la presentación

- **Actividades del INTA en la monitorización estructural mediante sensores de fibra óptica**
- **Seguridad en vuelo de aviones no tripulados**
- **Detección de daños en estructuras aeroespaciales**
- **Monitorizar reparación de estructuras metálicas con parches de material compuesto**
- **Sensores para la monitorización estructural en ámbitos de alta radiación**
- **Sensores para detección de fugas de hidrógeno**







**Gracias por vuestra atención**

**Malte Frövel**

**[frovelm@inta.es](mailto:frovelm@inta.es)**

**Tel.: 6507**

