



## ESTUDIO EXPERIMENTAL DE INTEGRIDAD MECÁNICA Y DEGRADACIÓN DE RENDIMIENTO DE PANELES SOLARES BAJO CARGAS DINÁMICAS

Roberto GARAY(1), Eugenio GALIAN, Gustavo TORRESAN  
**Instituto Universitario Aeronáutico**  
Av.Fuerza Aérea Km.6,5 - Córdoba - R. Argentina,

**RESUMEN:** Las deflexiones en paneles solares de micro satélites resultantes de las cargas de lanzamiento ocasionan deformaciones en las celdas y movimientos relativos entre estas que son absorbidas por los conectores.

Su verificación estructural consiste básicamente en el cálculo de respuesta dinámica y la evaluación del daño en sus componentes.

No existen muchas referencias bibliográficas sobre el tema.

Por ello en el marco del programa micro satélites - IUA, se decidió efectuar estudios teóricos y ensayos a fin de determinar parámetros que relacionen la falla en los conectores y la degradación o rotura de celdas causados por cargas dinámicas.

Se realizaron ensayos dinámicos de flexión y extensión combinando frecuencias y aceleraciones en especímenes representativos.

La integridad mecánica y degradación en la performance eléctrica fueron evaluadas microscópicamente y con ensayos.

También se presentan en este trabajo parámetros útiles para la verificación estructural de los paneles solares del  $\mu$ -sat 2 bajo cargas vibratorias.

*Palabras claves:* substrato, satélite, integridad.

### OBJETO

Este trabajo tiene el propósito de describir investigaciones experimentales llevadas a cabo en el IUA sobre integridad estructural y/o degradación de rendimiento eléctrico de celdas solares y conectores metálicos sujetas a cargas vibratorias. Estos componentes fueron utilizados en los paneles solares del microsatélite  $\mu$ -sat 1 (figura 1).



Fig.Nº1:  $\mu$ -sat 1 en la nave espacial.

También se exhiben gráficos que muestran la curvatura admisible de los paneles solares versus frecuencia para este caso particular de celdas solares y deformaciones admisibles en función de la frecuencia para conectores. Los resultados de la degradación de la performance de celdas sometidas a cargas dinámicas también se exponen en este trabajo.

El procedimiento de ensayo aquí descrito se puede usar con el debido cuidado como herramienta de diseño.

### INTRODUCCIÓN

En la actualidad las celdas solares de uso espacial presentan un notable grado de desarrollo. Mucha información y modelos precisos de performance de generación eléctrica están disponibles. En relación al diseño estructural el "know how" no es fácilmente accesible.

Hoy en día los métodos numéricos permiten buenas predicciones de respuesta a cargas dinámicas en las estructuras espaciales, pero no hay ningún software comercial con la capacidad de estimar el daño o degradación de celdas solares y sus conectores causada por las cargas dinámicas.

(1) [robgaray@hotmail.com](mailto:robgaray@hotmail.com)

En el IUA fue implementado un procedimiento de cálculo que tuvo buenos resultados en la predicción de rotura de cristales de protección de celdas solares (Rodrigo PAZ, Año 1999, Trabajo Final INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE PANELES SOLARES, Universidad Nacional de Córdoba-Instituto Universitario Aeronáutico).

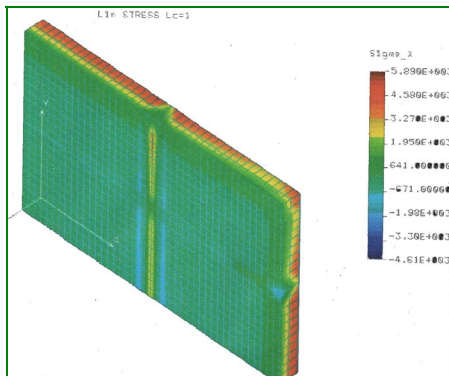


Figura N° 2: Análisis de una celda solar por el Método de Elementos Finitos

Pero existe otro tipo de daño que ocurre en las placas de silicio, colectores y conectores metálicos entre celdas que afectan la performance de los paneles solares y son muy difícil de analizar y evaluar usando MEF u otros métodos numéricos.

Por esta razón fue definido y ejecutado un programa experimental para analizar y evaluar los daños ocasionados por cargas dinámicas ocurridas durante el manipuleo y lanzamiento.

En ensayos anteriores se encontraron algunas dificultades en las mediciones de tensiones en los cristales de protección usando strain gauges. Por ello se optó por medir las deformaciones directamente o usando datos de acelerómetros colocados en varios puntos del panel. Usando estas deflexiones se estimó la curvatura local de las celdas suponiéndola representativa de las tensiones en los vidrios de protección y placas de silicio. La curvatura, que se define como la inversa del radio de curvatura, es calculada basándose en consideraciones geométricas y por teoría de deformación de vigas y placas (Roark, Madrid 1958, Fórmulas de Resistencia de Materiales, Esfuerzos y Deformaciones. Aguilar S.A. de Ediciones).

Ésta es ciertamente una simplificación del real comportamiento de la estructura, pero suficientemente precisa en el rango de pequeñas deformaciones. En la figura 3 se puede ver que la flexión de la placa substrato provoca deformaciones y tensiones en las celdas solares y conectores.

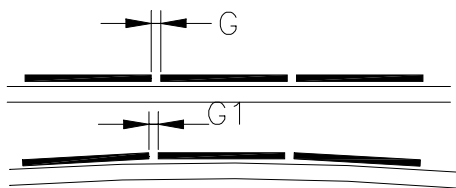


figura N°3: Flexión de la placa Substrato

Un análisis más detallado de la estructura puede revelar algunas características importantes a saber:

- La celda solar en sí misma es una estructura laminada, que consta de una placa de silicio, capa adhesiva y un vidrio protector.
- Hay zonas de alta concentración de tensiones tales como soldadura de conectores e hilos colectores (grilla).
- El adhesivo es un material viscoelástico de comportamiento complejo. En el caso particular de los paneles del  $\mu$ -sat se usó un adhesivo de silicona de calidad espacial.

Teniendo en cuenta este análisis se observa que es muy difícil por el momento simular esta clase de estructura usando métodos numéricos; por lo que se concluye que es necesario realizar un trabajo experimental.

Las restricciones presupuestarias limitaron el alcance del plan de ensayo a la determinación de la función curvatura admisible versus frecuencia para un periodo de 10 minutos de carga dinámica. También se realizó un estudio de daños de conectores metálicos bajo cargas vibratorias.

### PLAN DE ENSAYO

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se diseñó y ejecutó un plan de ensayos.

Fueron ensayadas probetas representativas de paneles solares del  $\mu$ -sat 2 que consisten en celdas de silicio monocristalino de 20x40 mm pegadas con adhesivo de silicona a un substrato metálico.

*Ensayo de flexión estática:* Se efectuaron en principio para estudiar en detalle el proceso de degradación y daño de celdas solares y conectores sujetos de flexión estática.

La probeta se muestra en la figura 4. Se diseñó un dispositivo de flexión a los fines de producir una curvatura constante a lo largo de toda la probeta (fig. 5).

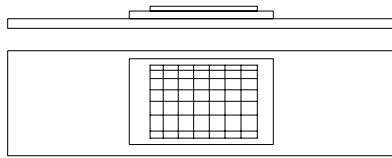


Figura N° 4: Probeta de flexión

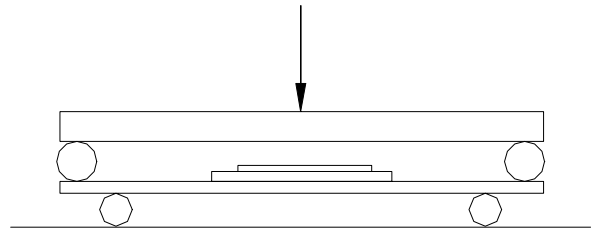


Figura N° 5: Ensayo de flexión estático

Las deflexiones fueron medidas sobre la placa sustrato y sobre la celda incrementándose la carga hasta rotura. Se determinó la curvatura que produce daño en la celda.

*Ensayo de vibración:* Fue realizado a los fines de estudiar y caracterizar el comportamiento mecánico del conjunto bajo cargas vibratorias. Para esto, se diseñaron dos tipos de probetas. La primera es una viga en voladizo con celdas pegadas en dos diferentes orientaciones a los fines de evaluar un eventual comportamiento orthotrópico; otra es una viga en forma de cruz con cuatro apoyos, diseñada con el propósito de obtener una doble curvatura en la zona central. Todas las probetas fueron construidas utilizando celdas solares calificadas espacialmente según norma MIL C 83443A.

Los dos tipos de probetas fueron usadas en ensayos de barrido sinusoidal. Los principales objetivos de estos ensayos fueron:

- Calibrar la frecuencia natural de cada probeta
- Calcular el coeficiente de amortiguamiento
- Observar el comportamiento mecánico, mecanismo de daño y degradación del rendimiento de celdas solares. Durante la ejecución de los ensayos se realizaron mediciones eléctricas y observaciones microscópicas.
- Estudiar la influencia de la temperatura en la integridad estructural de las celdas solares.

En las figuras 6 y 7 se muestran las dos probetas empleadas.

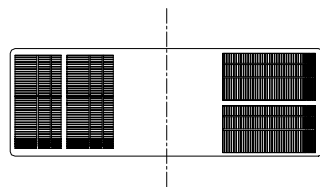


Figura N° 6: Probeta tipo cantilever.

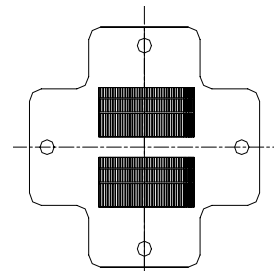


Figura N° 7: Probeta en forma de cruz.

*Ensayos dinámicos a conectores metálicos:* A consecuencia de la flexión de los paneles aparecen deformaciones en los conectores como se aprecia en la figura 8. Las excursiones estimadas usando datos de los ensayos dinámicos del  $\mu$ -sat 1 son de 0,02mm. Aplicando un coeficiente de seguridad apropiado se efectuaron los ensayos con un rango de deformaciones 0,075 a 0,04 mm. con frecuencias entre 50 y 150 HZ. También se usaron los resultados de los ensayos de flexión dinámica citados anteriormente como una comprobación adicional.

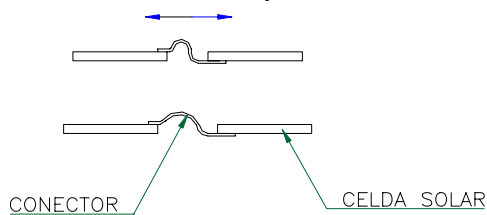


Fig. N°: 8 Sentido de desplazamiento de las probetas.

*Obtención de datos para el estudio de integridad de celdas solares y conectores:* El objetivo fue obtener datos para definir una función que relacione la curvatura local admisible del panel con la frecuencia que asegure la integridad de las celdas luego de 10 minutos de excitación. Estos ensayos fueron realizados en probetas con diferentes espesores y/o contrapesadas a los fines de sintonizar su frecuencia natural de resonancia. La aceleración fue incrementada hasta generar fallas en las probetas. Paralelamente se realizaron ensayos eléctricos para detectar degradaciones en el rendimiento eléctrico. El esquema del ensayo se muestra en la figura 9.

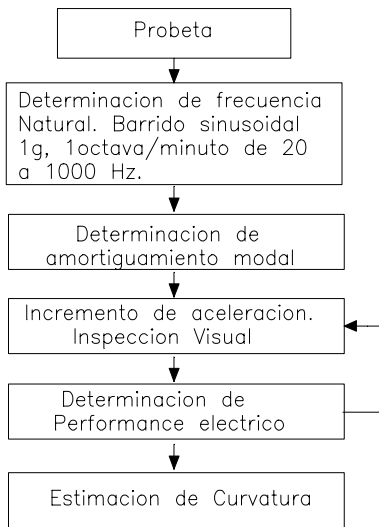


Figura N° 9: Diagrama de flujo de ensayo para determinación de la curvatura

Al analizar el diagrama de flujo se observa que hay un retorno para incrementar la carga durante el ensayo. Este criterio fue considerado válido en razón de que en ensayos preliminares no se detectaron daños después de cortos periodos de vibración (menos de 10 minutos).

En lo que respecta a los ya citados ensayos eléctricos se midieron los siguientes parámetros:

- Corriente de corto circuito ( $I_{cc}$ )
- Tensión a circuito abierto ( $V_{oc}$ )
- Tensión y corriente con cargas resistivas (2 Ohm)

Referente a la obtención de datos de los ensayos de los conectores se puede decir que se efectuaron inspecciones macro y microscópicas durante su ejecución.

#### DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE ENSAYOS

Se observó que debido a la baja rigidez de la capa adhesiva, la curvatura fue menor en la celda solar que en placa de aluminio. Por ejemplo para un caso típico en que el espesor de la placa de aluminio es de 2 mm. y el espesor de la capa adhesiva 2 mm., la curvatura de la placa es 3,25 /m y en la celda solar fue de 2,76 /m. Para provocar la rotura de la celda, la curvatura de la placa fue de 5 /m.

Durante el ensayo de flexión el primer daño que pudo ser detectado es la rotura del cristal de protección. Ocasionalmente aparecen grietas en los bordes de las placas de silicio y cerca de los colectores metálicos. El daño en los conectores nunca se observó.

Las probetas mostradas en figuras 6 y 7 con diferentes espesores y frecuencias de resonancia fueron ensayadas a temperaturas ambiente y -15 °C que es el rango de temperatura esperado en la rampa de lanzamiento y durante el vuelo. La curva típica de respuesta de un barrido senoidal se muestra en figura 10.

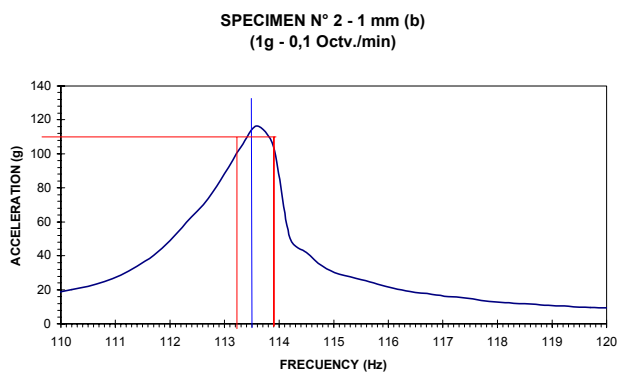


Figura N° 10: Respuesta de una probeta tipo cantilever a un barrido senoidal de frecuencias.

En general los especímenes mostraron un modo de falla repetitivo que consistió en la rotura de los cristales de protección. Pocas veces se observaron grietas en las placas de silicio, burbujas o despegue en el adhesivo del cristal de protección. También se observaron grietas en la grilla colectora. Estas fallas aparecen en ambos tipos de probetas (cantilever y cruz) para curvaturas similares.

La degradación en la performance eléctrica no es apreciable hasta la aparición de grietas macroscópicas. Es importante resaltar que las degradaciones sólo se producen bajo condiciones severas de rotura de placas de silicio y cristal de protección. La tensión a circuito abierto no cambia; la degradación de la corriente de corto circuito fue 4,25% en promedio y en un punto de trabajo (carga de 2 ohm) fue del 2 % promedio.

Con respecto a los conectores metálicos, el modo de falla consistió siempre en la aparición y propagación de grietas transversales en la zona con menor radio de curvatura. Nunca se observaron fallas en las interfaces soldadas.

A los fines de resumir los resultados, se confeccionaron los gráficos que se muestran a continuación:

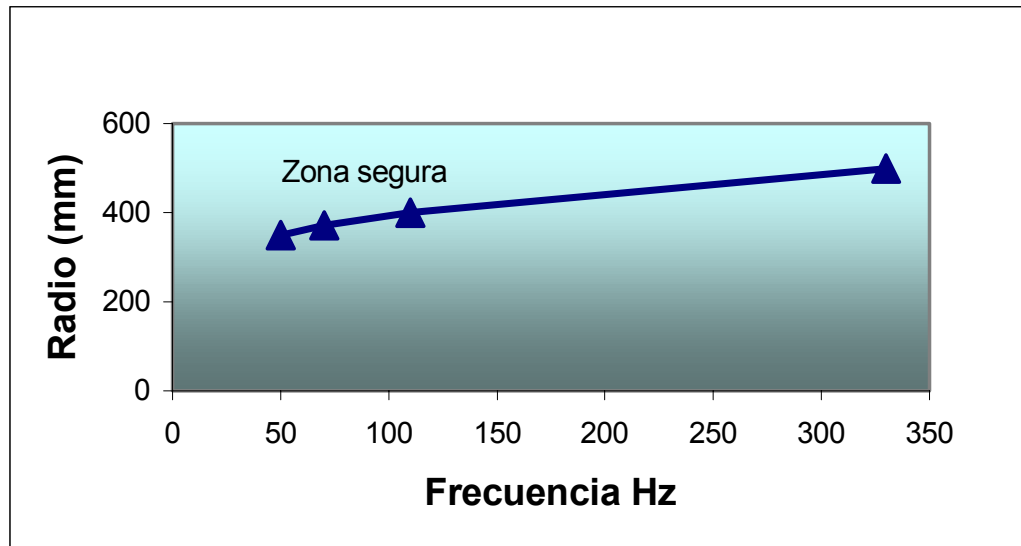


Figura N°11: Radio de curvatura admisible versus frecuencia de resonancia para celdas solares

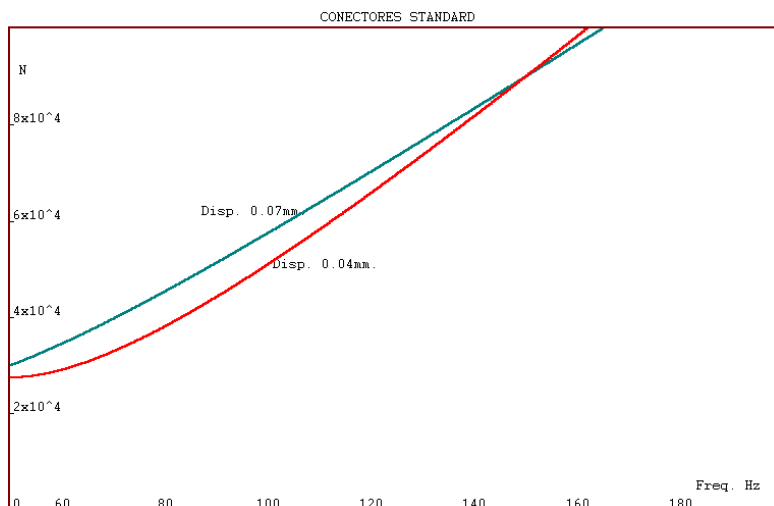


Fig. N° 12: Deflexiones admisibles en función de la frecuencia y n° de ciclos

### CONCLUSIONES

1. A partir de ensayos de vibraciones en probetas representativas de la estructura laminadas de paneles solares se pudo obtener una función que relaciona la curvatura admisible de las celda con la frecuencia de la excitación. Estos datos pueden ser empleados para verificar la integridad estructural de las celdas solares instaladas en paneles, confrontándolas con curvaturas calculadas empleando el método de elementos finitos .
2. No se pudo establecer ningún efecto orthotropico en ensayos de vibración. Solamente se observó una pequeña diferencia en rigidez en probetas sobre substrato metálico de bajo espesor (menor de 0,75 mm).
3. La degradación del rendimiento de las celdas solares es menor a 4% cuando la curvatura del panel está en la “zona segura” del diagrama N°11 para períodos de carga menores de 10 minutos.

4. La aparición de daños detectables visualmente en celdas solares, bajo la acción de cargas vibratorias en períodos cortos, es instantánea, probablemente debido a un proceso de crecimiento de grieta muy veloz. No se pudo identificar en ninguno de los especímenes un proceso de fatiga o daño acumulado.

Las curvas paramétricas de deformación admisible en función de la frecuencia. para conectores y celdas solares mostradas en el presente trabajo pueden ser utilizadas para diseño y verificación estructural de paneles solares.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen a las instituciones siguientes:

INSTITUTO UNIVERSITARIO AERONÁUTICO-CENTRO DE INVESTIGACIONES APLICADAS. Córdoba R.A.

LOCKHEED MARTIN AIRCRAFT ARGENTINA S.A. - Departamento de Ensayos Estructurales, Córdoba R.A.

**ABSTRACT** Deflection of micro satellite solar panel resulting from launch loads produce solar cell bending and relative displacements between them that connectors must compensate.

Panel structural verification consist basically in dynamic response calculation and stress analysis for damage evaluation. There are not many available bibliographic references.

For this a theoretical and experimental study about the matter was decided and carried out in order to improve  $\mu$ -sat panel technological profile with the main purpose of correlating dynamic loads with damage and/or degradation of connectors and cells.

Tension and flexural tests at different frequencies were performed in specimens representing panel structure.

Mechanical integrity was macro and microscopically monitored while electrical performance degradation was measured.

In this work general guidelines that assure structural integrity of  $\mu$ -sat panels under vibratory loads are also described.

*Key Word:* integrity, satellite, vibration.