

# ANÁLISIS DE FALLAS UTILIZANDO ENSAYOS MECÁNICOS EN PROTOTIPO ESTRUCTURAL DE PICOSATÉLITE TIPO “CUBESAT” PARA EL C.I.E. DE LA ESPE.

**D. Hernández Echeverría<sup>1</sup>, J. Pérez<sup>2</sup>, C. Naranjo<sup>2</sup>, A. Tierra<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Carrera de Ingeniería Mecánica, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Escuela Politécnica del Ejército, Campus Sangolquí, Av. General Rumiñahui S/N, Sangolquí, Ecuador.  
E-mail: dahe\_185@hotmail.com

<sup>2</sup>Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Escuela Politécnica del Ejército, Campus Sangolquí, Av. General Rumiñahui S/N, Sangolquí, Ecuador.  
E-mail: jeperez@espe.edu.ec, crnaranjo@espe.edu.ec

<sup>3</sup>Centro de Investigaciones Científicas, Escuela Politécnica del Ejército, Campus Sangolquí, Av. General Rumiñahui S/N, Sangolquí, Ecuador.  
E-mail: artierra@espe.edu.ec

## RESUMEN

Se fabrican de 5 prototipos estructurales tipo CubeSat para utilizarlos en los ensayos mecánicos. El material que se utiliza es aluminio 1050 con láminas de 1.2 mm de espesor. El análisis de fallas arranca con un ensayo de tracción basado en la norma ASTM B577M-02 para conocer el límite de fluencia, esfuerzo último y porcentaje de alargamiento del aluminio 1050. Se realiza simulaciones en computadora mediante el software ANSYS 14® de los ensayos de compresión, de fatiga y compresión bajo carga térmica. Se lleva a cabo el ensayo de compresión que permite saber la carga máxima a compresión que soporta la estructura aplicando fuerza sobre sus contactos a temperatura ambiente y bajo un carga térmica de -74.1°C y 120°C. Por otro lado, el ensayo de fatiga da a conocer el número de ciclos de carga que soporta la estructura y su comportamiento ante el sometimiento a una determinada carga repetitiva sobre sus contactos. También se realiza ensayos de impacto del material basado en la norma ASTM A370 – 03A a temperatura ambiente y a -75.3°C y 120°C. La relación de los resultados reales con los de la simulación se asemejan y se da a conocer los datos de resistencia del material y de la estructura.

## ABSTRACT

Five structural prototypes of a CubeSat are built to use them on the mechanical testing analysis. The type of material necessary to use on the manufacturing was aluminum 1050, width 1.2 mm. In order to begin with the failure analysis, it's necessary to carry out a tension test based on the standard ASTM B577M-02 which gives the mechanical properties of the aluminum 1050. Before the mechanical tests were made (compression and fatigue tests), the prototype is digitalized with the assistance of a simulation software called ANSYS 14® which also is used for the simulating mechanical tests. Both give the initial parameters for real tests. Compression test let know the maximum load supported by the structure while compression forces are being applied over its contacts under normal conditions and over a thermic load of -74.1°C y 120°C. In the other hand, fatigue test will let know the number of cycles supported by the structure as well as its behavior while a specified repetitive load is being applied over its contacts. Also impact tests are made under the standard ASTM A370 – 03A under normal conditions and under thermal loads of -75.3°C y 120°C. The results of the real and the simulated tests are similar to each other and the values of material and the structure resistance are given.

**Palabras Clave:** Prototipo, ensayos mecánicos, CubeSat, cargas, fatiga.

## I. INTRODUCCION

El Centro de Investigaciones Científicas (CEINCI) de la Escuela Politécnica del Ejército dio los primeros pasos en la investigación del proyecto de la fabricación de picosatélites tipo “CubeSat”. En el mes de Octubre de 2010, el CEINCI llevó a cabo el proyecto de Diseño y Construcción de un prototipo estructural de un picosatélite de estas características. Este diseño se basó en cálculos teóricos y simulaciones por computadora de la resistencia de la estructura a las cargas que se presentarían durante el lanzamiento del picosatélite y durante su funcionamiento en órbita. El presente proyecto es una continuación del proyecto previo de diseño donde se corregirán ciertos errores de fabricación de los prototipos y se

someterá a las estructuras a ensayos mecánicos de resistencia que nos dará resultados reales de las cargas que soporta la estructura.

## II. MARCO TEÓRICO

*Cubesat* es el nombre genérico de un tipo de picosatélites de investigación, normalmente con un volumen de 1 litro, un peso de no más de 1 kg y que se caracteriza por ser contruidos habitualmente con elementos y componentes comerciales. Las especificaciones para los CubeSat fueron establecidas en 1999 por la Universidad Politécnica del Estado de California y la Universidad de Stanford para ayudar a las universidades de todo el mundo a realizar investigaciones

espaciales con costes de menos de 100.000 dólares por picosatélite [1].

- **Materiales:** La norma CDS-R12, recomienda la utilización de Aluminio 7075 o 6061-T6 como material de construcción de la estructura principal. O similar al Aluminio 7075-T73, que es el material en el que está construido el P-POD [2].

- **Consideraciones de diseño:**

El sistema estructural debe diseñarse de forma que pueda soportar aceleraciones y cargas mecánicas, estas cargas llegan a 108 KPa en compresión y 20 Hz en vibraciones. Durante el lanzamiento, los CubeSats se encuentran comprimidos dentro de un dispositivo de expulsión (P-POD) que facilitará su liberación en el espacio. Dentro de este dispositivo se generan las cargas de compresión y de fatiga de las estructuras. Y en el espacio las cargas de temperatura fluctúan entre 120°C y -180°C [2,3].

**Ensayo Mecánicos aplicados.**

**Tracción:** El ensayo de tracción de un material consiste en someter a una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta.

La máquina utilizada para los ensayos de tracción y compresión es la máquina de ensayos universales, marca AMSLER de capacidad 200 tons. en compresión y 10 tons. en tracción. El diagrama carga vs. desplazamiento que la máquina brinda, nos expone datos necesarios para poder calcular las propiedades mecánicas del material que necesitamos para este proyecto: esfuerzo de fluencia, esfuerzo último y porcentaje de elongación. Las ecuaciones necesarias para este cálculo son:

$$ESFUERZO = \frac{FUERZA}{AREA} \text{ ó } \frac{P}{A} \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (1)$$

$$\%e = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100 \quad (2)$$

**Compresión:** Para este ensayo se somete a la probeta a los esfuerzos contrarios a los de tracción. La máquina usada para este ensayo fue la misma que para el ensayo de tracción. De igual forma la máquina nos provee de datos de las cargas que soporta la probeta y las deformaciones que sufre.

**Fatiga:** La máquina utilizada para este ensayo es la MTS 810-14-2 de 50 tons. de capacidad. Consiste en aplicar cargas a la probeta varias veces hasta que esta falle. Estas repeticiones se les denomina ciclos. Esta carga cíclica puede tener un comportamiento senoidal que es el que se aplica en este proyecto. Además puede aplicarse tanto como en tracción, compresión o combinados. La figura 1 muestra el tipo de fatiga aplicada en este proyecto.

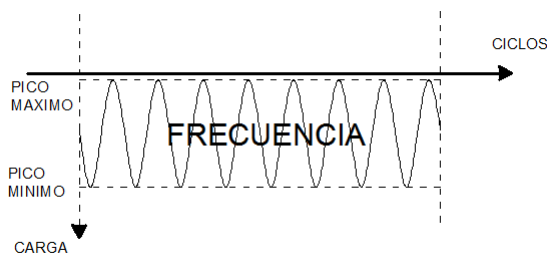


Figura 1: *Fatiga senoidal con carga de compresión. Comportamiento a bajas temperaturas del aluminio.*

A temperaturas bajo cero, la mayoría de aleaciones de aluminio muestran pequeños cambios en sus propiedades; la resistencia a la tracción y la fluencia puede incrementarse; la elongación puede disminuir mínimamente y la resistencia al impacto se mantiene aproximadamente constante. A elevadas temperaturas, el aluminio disminuye su resistencia mecánica [4].

### III. ENSAYOS

**Ensayo de tracción**

Para el caso del aluminio utilizado para la construcción de los prototipos tipo CubeSat, se trata del aluminio 1050. Para obtener los datos de sus propiedades mecánicas se fabricó 2 probetas para someterlas al ensayo de tracción de acuerdo a la norma: ASTM B577M-02a, Métodos Estándares de Ensayos a Tensión para Aluminios Fundidos y Forjados y productos de aleaciones de magnesio. El espesor de estas probetas es del mismo utilizado en la construcción de los prototipos: 1.2 mm. El diseño del proyecto previo a este, aprobó este espesor como idóneo para el prototipo [3].

Los resultados del diagrama Carga vs. Desplazamiento se muestran en la figura 2.

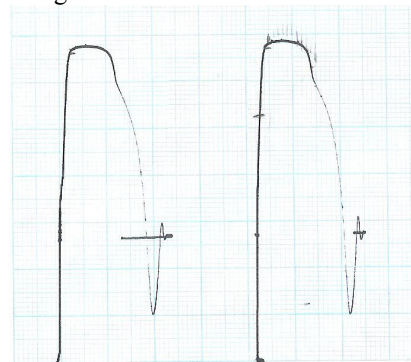


Figura 2: *Diagramas carga vs. desplazamiento resultantes de 2 probetas de Aluminio 1050 de 1.2 mm de espesor a tracción.*

Luego de haber realizado las pruebas de tracción a las probetas, en la Máquina de Ensayos Universales AMSLER, se obtuvo un par de gráficas que describen el comportamiento mecánico del material sometido a una carga de tensión. La figura 3 muestra el diagrama Esfuerzo vs. % Deformación derivada de la información brindada por las gráficas de la máquina.

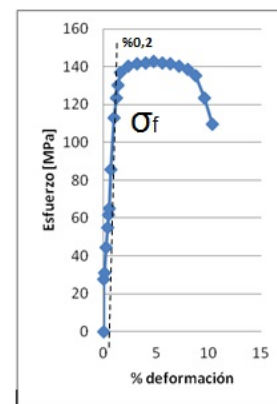


Figura 3. *Digitalización de datos de los diagramas de la figura 2.*

De acuerdo a los resultados de la gráfica, se pudo obtener 3 propiedades mecánicas que se aplican para las condiciones de

este ensayo. Para el cálculo del esfuerzo en la tabla 1 y 2 se utilizó la ecuación 1 y para el cálculo del porcentaje de elongación de la tabla 3 se utilizó la ecuación 2.

Tabla 1. Resultados del esfuerzo de fluencia

	Medición 1	Medición 2	Promedio
FUERZA [N]	1508,9	1516,9	1512,9
AREA [mm <sup>2</sup> ]	14.3	14.3	14.3
ESFUERZO [N/mm <sup>2</sup> ]	105,5	106,1	<b>105,8</b>

Tabla 2. Resultados del esfuerzo de último.

ESFUERZO ÚLTIMO			
	Medición 1	Medición 2	Promedio
FUERZA [N]	2105,1	2112,2	2108,7
AREA [mm <sup>2</sup> ]	14.3	14.3	14.3
ESFUERZO [N/mm <sup>2</sup> ]	147.2	147.6	<b>147.4</b>

Tabla 3. Resultados del porcentaje de elongación

% ELONGACION			
	Medición 1	Medición 2	Promedio
Lo [mm]	50	50	50
Lf [mm]	55.2	55.4	55.3
% ELONG	10.5	10.7	<b>10.6</b>

### Ensayo de compresión

Los esfuerzos debidos al resorte dentro del P-POD no son muy grandes, llegan a 108 KPa a lo mucho [3], por lo que es casi imposible que la estructura llegue a tener fallas por esta compresión.

Pero para corroborar con los datos de diseño que el software de computadora especifica y para saber el límite real de carga que soporta la estructura, se la sometió a un ensayo de compresión (Figura 4) que lo llevará a la falla y que nos permitirá saber el esfuerzo máximo que soportaría la estructura mediante los diagramas carga vs. desplazamiento que se muestran en la figura 5. Este primer ensayo de compresión se lo realizó a condiciones de temperatura normales, es decir, 20.1° C y humedad relativa de 61%.



Figura 4: Prototipo tipo CubeSat sometido a ensayo de compresión hasta la falla.

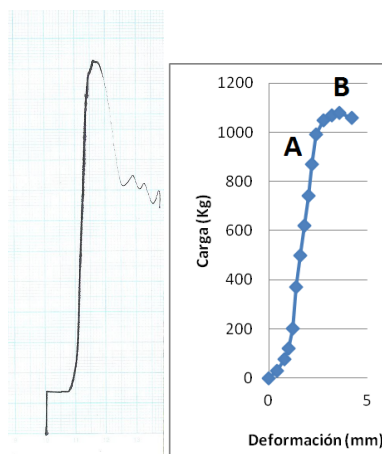


Figura 5. Diagrama Carga vs. Desplazamiento resultante de la compresión de un prototipo estructural tipo CubeSat.

El punto B de la figura 6 da a conocer la fuerza máxima que logro soportar la estructura. Se aprecia que la estructura absorbió la carga de manera lineal hasta que llegó al punto A y comenzó a ceder.

La carga máxima que soportó la estructura fue de 1080.6 Kg y el límite lineal fue de 900 Kg. Pero la carga a la que se empezaron a ver deformaciones en los vértices del prototipo fue de 500 Kg.



Figura 7: Uno de los vértices deformados del prototipo estructural del picosatélite CubeSat.

Un segundo y tercer ensayo de compresión se llevó a cabo bajo condiciones de temperatura de -74.1° C y 120°C. Para obtener un medio que llegase a la temperatura bajo cero, se mezcló alcohol industrial con hielo seco en un recipiente lo suficientemente grande para que se inserte un prototipo estructural tipo CubeSat como muestra la figura 8.

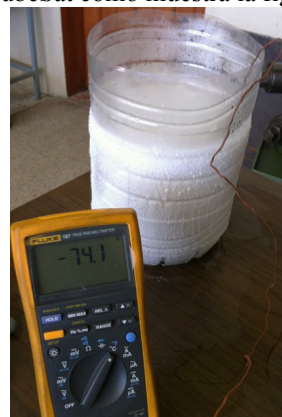


Figura 8: Prototipo tipo CubeSat sumergido en un medio a -74.1°C.

Para alcanzar la temperatura de 120°C se utilizó un horno de fundición marca PHILIPS del laboratorio de Fundición de la ESPE (figura 9).



Figura 9. Prototipo estructural CubeSat dentro del horno.

La figura 10 muestra el diagrama carga vs. Desplazamiento para el ensayo de compresión de la estructura tipo CubeSat bajo una carga de térmica que lo llevó a  $-74.1^{\circ}\text{C}$  de temperatura. La carga máxima que soportó la estructura según la gráfica fue de 1175.4 Kg.

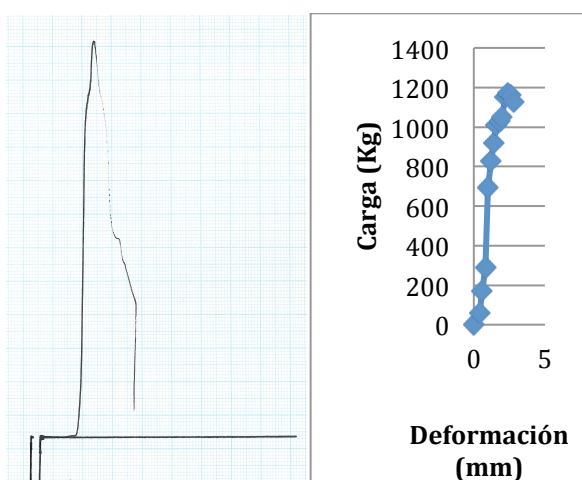


Figura 10. Diagrama Carga vs. Desplazamiento resultante de la compresión de un prototipo estructural tipo CubeSat con una temperatura de  $-74.1^{\circ}\text{C}$ .

La figura 11 muestra el diagrama carga vs. Desplazamiento para el ensayo de compresión del prototipo bajo una carga de térmica que lo llevó a  $120^{\circ}\text{C}$  de temperatura. La carga máxima que soportó la estructura según la gráfica fue de 985 Kg.

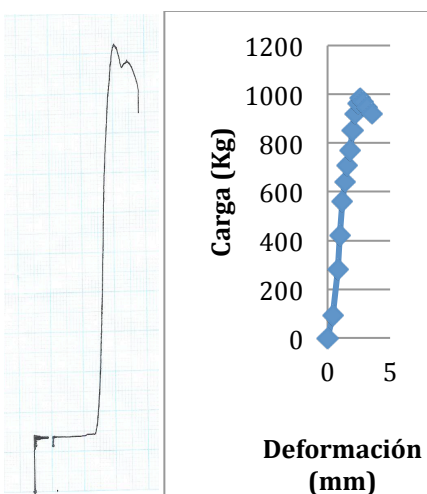


Figura 11. Diagrama Carga vs. Desplazamiento resultante de la compresión de un prototipo estructural tipo CubeSat con una temperatura de  $120^{\circ}\text{C}$ .

### Ensayo de Fatiga

El ensayo de fatiga se lo realiza en la Máquina de Ensayos Universales MTS 810 como se muestra en la figura 12.



Figura 12: Prototipo "CubeSat" listo para ensayo de fatiga.

Para empezar, se aplicó una carga correspondiente al 50% de la carga máxima o de aplastamiento que sufrió la estructura en el ensayo de compresión ya que al 100% se darían deformaciones permanentes en el material. La figura 13 representa el primer ensayo de fatiga con carga del 50% de la carga máxima, en este ensayo se notaron aplastamientos casi insignificantes.

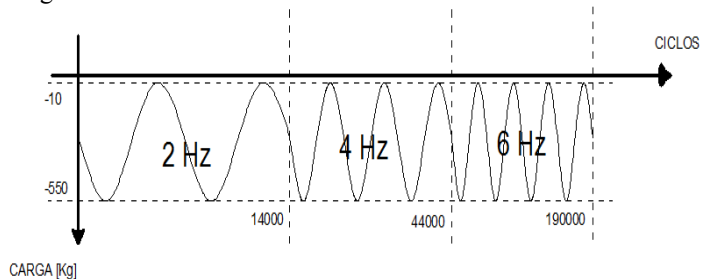


Figura 13: Ensayo de fatiga realizado con el 50% de carga máxima de compresión.

Se resolvió aumentar la carga al 75% del total de la fuerza máxima aplicada en compresión como se representa en la figura 14.

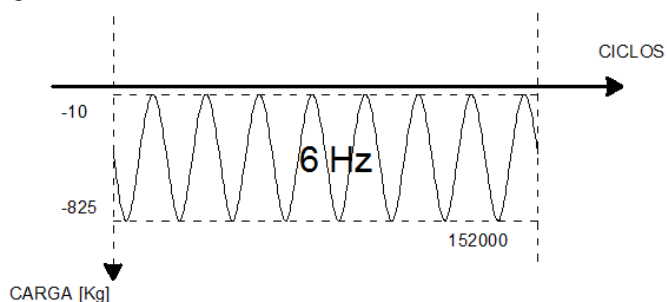


Figura 14: Ensayo de fatiga realizado con el 75% de carga máxima de compresión.

Cuando el conteo llegó a 5000 ciclos se pudieron apreciar pequeños aplastamientos en los vértices del prototipo. Estos aplastamientos permanecieron sin ninguna alteración hasta los 20000 ciclos donde se pronunciaron un poco más, pero no se apreciaba alguna falla o grieta considerable. Fue hasta aproximadamente 130000 ciclos que se comenzó a observar el surgimiento de pequeñas grietas junto a los aplastamientos de los vértices. A medida que seguía el conteo de los ciclos se podía ver que las grietas se pronunciaban cada vez más. A los

140000 ciclos las grietas se veían fisuras incluso en un par de uniones atornilladas. Las fallas iban acrecentándose aceleradamente hasta que a los 152110 ciclos todos los contactos ya habían cedido uno por uno hasta incrustarse dentro de la estructura, las fallas al final fueron considerablemente visibles como muestra la figura 15.

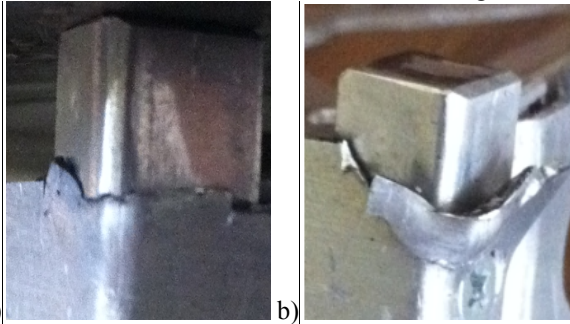


Figura 15: a) Grieta en vértice a los 140000 ciclos. b) Grieta en vértice a los 152110 ciclos.

#### Ensayo de Impacto.

Se prepararon 9 probetas en base a las dimensiones que especificaba la norma ASTM A370 – 03A. Tres de ellas se ensayaron a temperatura ambiente de 20° C, otras tres se ensayaron a temperatura de -75.3° C y las últimas tres a temperatura de 120°C. Se utilizó el mismo procedimiento de enfriamiento con una mezcla de hielo seco y alcohol y para el calentamiento se usó el horno de fundición marca PHILIPS. Se utilizó la máquina de ensayos Charpy para estas pruebas y se obtuvo los siguientes datos de la tabla 4.

Tabla 4. Resultados de ensayo de impacto Charpy con probetas de aluminio 1050 a -20°C, a 120°C y a -75.3°C.

	Prueba 1 [Kgm]	Prueba 2 [Kgm]	Prueba 3 [Kgm]	Promedio [Kgm]
20°C	2.9	3.1	2.8	2.9
120°C	2.0	2.1	2.3	2.1
-75.8°C	4.0	3.8	3.6	3.8

#### IV. SIMULACIONES

El software ANSYS 14® utiliza el método matemático de Análisis por Elementos Finitos para la resolución de los distintos estudios como son: estáticos, de fatiga y térmico.

Las propiedades mecánicas obtenidas en el ensayo de tracción del aluminio 1050 fueron utilizadas en el estudio de estas simulaciones.

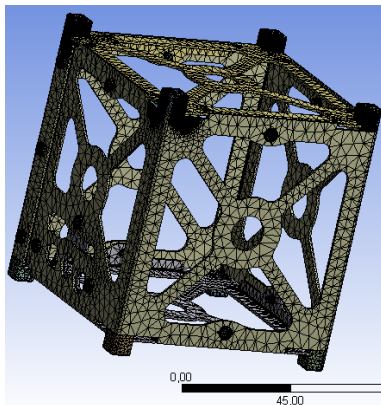


Figura 16: Mallado del modelo del prototipo estructural tipo “CubeSat” en software ANSYS 14®.

#### Estudio estático:

A la estructura se le aplicó cargas en cuatro de los ocho contactos en sentido negativo de tal manera que generen compresión. A los otros cuatro contactos se les asignó restricciones geométricas fijas sin movimiento para procurar la estabilidad del ensayo como muestra la figura 17.

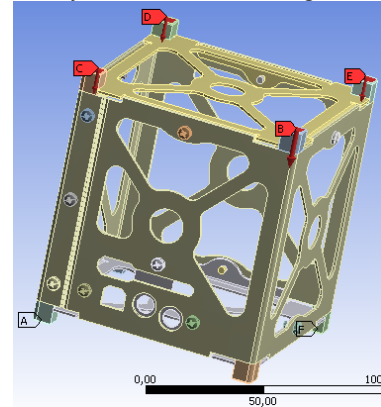


Figura 17: Asignación de cargas y restricciones en el modelo de prototipo estructural tipo “CubeSat” en software ANSYS 14®.

Posteriormente, se llevó a cabo el estudio estático en repetidas ocasiones con diferentes cargas para poder saber la carga a la cual el diagrama de factor de seguridad estático del estudio, nos arrojaba un valor de 1 como factor mínimo. La carga a la cual obtuvimos este valor fue de 440 Kg. En la figura 18 se observa los resultados del estudio estático.

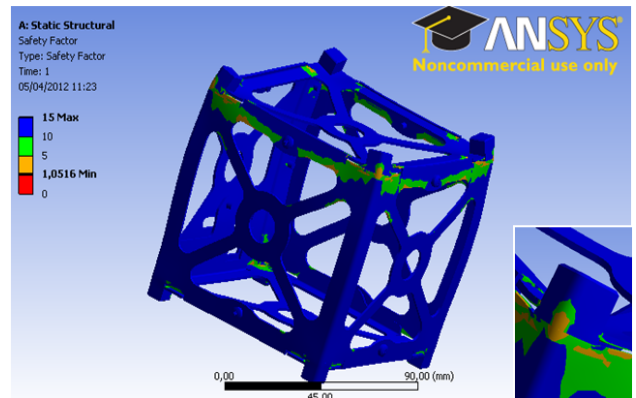


Figura 18: Resultados del estudio estático en el modelo de prototipo estructural tipo “CubeSat” en software ANSYS 14®.

#### Estudio de fatiga:

De igual forma como en el estudio de estático, el análisis de fatiga se lo llevo a cabo varias veces y con diferentes cargas para poder conocer cuál es el comportamiento y las tendencias de la estructura bajo el sometimiento de estas cargas cíclicas. Se realizó las simulaciones con cargas de 825, 550, 440 y 200 Kg y con distintos números de ciclos. La tabla 5 muestra los factores de seguridad a la fatiga mínimos para cada caso de carga con su correspondiente número de ciclos. La figura 19 es un ejemplo de un estudio de fatiga a 525 Kg con 2 e+05 ciclos de carga.

Tabla 5. Factores de seguridad a la fatiga para distintas cargas y números de ciclos proporcionados por el software ANSYS 14

		CARGA [Kg]			
		825	550	440	200
C	1,00E+06	0.58	0.87	1,10	2.39
	2,00E+05	0.73	1.10	1.40	3.03
I	1,00E+05	0.74	1,12	1.42	3.07
	20000	0.75	1,13	1.44	3.11
O	10000	0.75	1,14	1.45	3.13
	5000	0.76	1,15	1.46	3.14

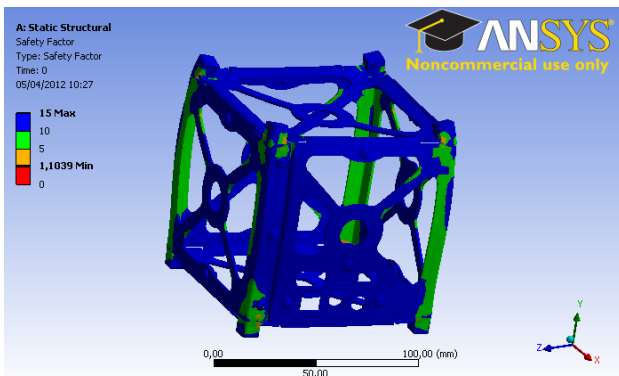


Figura 19: Estudio de fatiga a 550 Kg y 2e+05 ciclos de carga en el modelo de prototipo estructural tipo “CubeSat” en software ANSYS 14®.

## V. DISCUSIÓN

Las simulaciones fueron útiles en la predicción de los sitios donde se producirían las fallas y para conocer las tendencias sobre el comportamiento de la estructura ante cargas de compresión y de fatiga. Los valores cálculo virtual de resistencia en el software ANSYS 14® se asemejaron a la realidad, por lo que son confiables.

Además se comprobó lo que se manifestaba en la teoría en el ASM Handbook, con respecto al comportamiento del aluminio ante bajas temperaturas que aumenta su resistencia y a altas temperaturas disminuyen, aunque en próximos estudios y construcciones de estas estructuras CubeSat se sugiere utilizar los materiales especificados en la norma de diseños de CubeSats, que son los aluminios 7075-T6 y 6061-T6.

Los ensayos, métodos y resultados de este proyecto brindan las pautas para seguir con investigaciones de nuevos diseños para picosatélites y para iniciar estudios espaciales en el Ecuador.

## VI. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, los prototipos que se ensayaron, soportarán las cargas estáticas y dinámicas que se presentarán en el espacio sin problema alguno.

El aluminio 1050 que se usó para la construcción de los 5 prototipos estructurales presenta las siguientes propiedades mecánicas: esfuerzo de fluencia de 105.8 MPa, un esfuerzo último de 147.4 MPa y un porcentaje de elongación de 10.6%.

El ensayo de compresión permitió conocer la carga máxima que soporta el prototipo estructural que es de 1080.5 Kg y permitió saber la carga a la que se presentaban las primeras deformaciones que fue de 500 Kg. Comparando con la simulación del estudio estático, las primeras deformaciones se darían a los 440 Kg por lo que se concluye que la simulación tiene un error del 12% respecto a la realidad.

El ensayo de fatiga reflejó que bajo la acción de la carga de 550 Kg a 190450 ciclos no se obtuvieron daños en el prototipo y con 825 Kg y 152110 ciclos, se produjeron agrietamientos y rupturas. Comparando estos resultados con la simulación podemos apreciar que bajo los mismos parámetros, se obtuvo un factor de seguridad a la fatiga de 1.10 y 0.74 respectivamente, con lo que podemos decir que los resultados virtuales concuerdan con lo que pasó en la realidad.

Los resultados del ensayo de compresión llevado a cabo a temperatura de -74.1°C muestran un aumento en la resistencia de la estructura de un 8.84% con respecto al ensayo a temperatura ambiente y los resultados del ensayo de compresión a temperatura de 120°C presentaron una disminución de la resistencia en un 8.77%.

En cuanto a los resultados de los ensayos de impacto llevados a cabo a temperatura de -75.8°C y 120°C, comparados con los de resultados a temperatura ambiente, resultaron en un aumento de 31.03% y disminución de 27.58% respectivamente.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a la Escuela Politécnica del Ejército por el apoyo económico para la realización de este proyecto.

Agradecimiento al Centro de Investigaciones Científicas de la ESPE por la capacitación y guía técnica en la realización del proyecto.

Agradecimiento al Ing. Francisco Navas por la guía técnica y desarrollo de los ensayos y pruebas mecánicas en el laboratorio de Mecánica de Materiales de la ESPE.

## REFERENCIAS

- [1] <http://es.wikipedia.org/wiki/CubeSat>
- [2] RIKI MUNAKATA. CubeSat Design Specification. Traducido del inglés por Daniel Hernández. 12a ed. San Luis Obispo. Cal Poly. 2009
- [3] LIMAICO ROMERO J. y SOLANO GONZALEZ R. Diseño de los sistemas estructural y de alimentación, construcción de prototipo estructural y procedimientos operacionales de lanzamiento de picosatélite tipo “CubeSat” para el C.I.E de la ESPE. Tesis Escuela Politécnica del Ejército. 2010. p. 145
- [4] ASM INTERNATIONAL, ASM (American Society of Materials) Handbook, Volume 2, Properties and selection: Non ferrous alloys, and special-purpose materials. Traducido del inglés por Daniel Hernández. Edición 1990. P. 218.