

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

METROLOGÍA E INSTRUMENTACIÓN
IM-0303

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES DE RESISTENCIA MECÁNICA
DEL TUBO DE ALUMINIO 6063-T5 PARA USO EN COHETERÍA

ESTEBAN JIMÉNEZ SÁNCHEZ B13519

I - 2017

RESUMEN

ÍNDICE

1	OBJETIVOS Y ALCANCE	1
1.1	Objetivo General	1
1.2	Objetivos Específicos	1
1.3	Alcance	1
2	ANTECEDENTES	2
3	Marco Teórico	4
3.1	Resistencia de Materiales	4
3.1.1	Esfuerzo	4
3.1.2	Deformación	4
3.1.3	Gráfica de Esfuerzo - Deformación y Propiedades Mecánicas	4
3.2	Método de determinación de punto de cedencia	6
3.3	Recipientes a Presión	6
3.3.1	Esfuerzos en Pared Gruesa	7
3.4	Material a Prueba	8
4	METODOLOGÍA	9
4.1	Preparación de Probetas	9
4.2	Equipos de Medición Usados	9
4.2.1	Maquina de Ensayos Universales	9
4.2.2	Calibrador Vernier Digital	10
4.3	Desarrollo del Experimento	10
4.4	Determinación del Área de la Probeta	11
5	RESULTADOS	12
5.1	Incertidumbres	14
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	16
	Referencias	17
7	APÉNDICES	18
8	ANEXOS	19

ÍNDICE DE CUADROS

1	Cuadro 1. Especificaciones del Material	8
2	Cuadro 2. Datos Climatológicos	12
3	Cuadro 3. Resultados Obtenidos de las pruebas de tensión	13
4	Cuadro 4. Valores Estadísticos	14

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Figura 1. Motor de Combustible Sólido	2
2	Figura 2. Motor de Combustible Sólido Destruído	2
3	Figura 3. Curva Esfuerzo - Deformación Teórica	5
4	Figura 4. Curva Esfuerzo - Deformación de aleación de Aluminio	6
5	Figura 5. Metodo de determinación de resistencia de cedencia	6
6	Figura 6. Esfuerzos Ocasionados por Presión	7
7	Figura 7. Curva de Esfuerzo Deformación Esperada.	8
8	Figura 8. Probeta diseñada para la elaboración de los experimentos.	9
9	Figura 9. Maquina de Ensayos Universales Instron	10
10	Figura 10. Procedimiento para la determinación de las áreas de las probetas	11
11	Figura 11. Probetas de Prueba	12
12	Figura 12. Fuerza en función de la deformación	13
13	Figura 13. Esfuerzo en función de la deformación unitaria	13
14	Figura 14. Módulo de elasticidad en función de la deformación unitaria	14
15	Figura 15. Gráfico Generado por el programa de maquina de pruebas universales	18
16	Figura 16. Plano de tobera del motor	19

1 OBJETIVOS Y ALCANCE

1.1 Objetivo General

Determinar los valores de las propiedades mecánicas de un tubo de aluminio para determinar si este fue la causa de explosión de un cohete modelo.

1.2 Objetivos Específicos

- 1) Diseñar y manufacturar probetas de aluminio a partir del segmento de tubo del que se extrajo la cubierta del cohete.
- 2) Cuantificar la magnitud del esfuerzo ultimo para el material del tubo de aluminio.
- 3) Cuantificar la magnitud del esfuerzo de cedencia y modulo de elasticidad como mecanismo para comprender el comportamiento del material en el régimen plástico.

1.3 Alcance

El alcance de este trabajo es primeramente la determinación del esfuerzo ultimo del material usado en la construcción de motores de cohete de combustible sólido. Esta magnitud permitirá en futuros trabajos la determinación de causas de explosión de cohetes, y el diseño de mejores cohetes capaces de operar de manera segura.

La determinación de las magnitudes del esfuerzo de cedencia y del modulo de elasticidad son un objetivo secundario que permitirá la compresión, en investigaciones futuras, del comportamiento de la cubierta del motor bajo los esfuerzos normales de operación. Se permitirá realizar la determinación de las presiones bajo las cuales se da cedencia, y el diseño de motores reutilizables.

2 ANTECEDENTES

El Grupo de Ingeniería Aeroespacial de la Universidad de Costa Rica (GIA) es un grupo multi-disciplinario conformado en su mayoría por estudiantes. Una de sus muchas metas es el desarrollo de motores de combustible sólido a base de Nitrato de Potasio y Azúcar (conocido popularmente como Candy Fuel); con el objetivo de fomentar el desarrollo de investigación y la divulgación científica en el ámbito aeroespacial.

El 20 de mayo del año 2016 se llevo a cabo una prueba del primer motor de cuerpo metálico con combustible sólido desarrollado dentro del grupo. Dicho motor consistió en un motor con una cubierta hecha a partir de tubo de aluminio (6063 - T5), un tapón y una tobera de acero inoxidable (Ver Figura 1).



Figura 1: Motor de Combustible Sólido Manufacturado por el GIA

La prueba se realizó en el campo de tiro con arco en las Instalaciones Deportivas de la Universidad de Costa Rica. Se siguieron todos los protocolos de seguridad establecidos para la prueba de motores de tamaño G¹, respetando una distancia de 30 m².

Unos instantes después de la ignición del propelente, el motor súbitamente explotó en sus dos extremos destruyendo la celda de carga usada para la medición del empuje. La explosión destruyó además la carcasa protectora del banco de pruebas. Adicionalmente, la tobera fue expedida a alta velocidad hacia una región boscosa de la cual no se pudo recuperar.



Figura 2: Motor de Combustible Sólido Destruído

Se determinó, después de una investigación, que existen dos explicaciones posibles para la explosión:

- 1) Falla del material, dado que este no cumpla con las especificaciones requeridas.

¹La clasificación de los motores de combustible sólido en los estilos modelo y amateur se realiza mediante el impulso total del cohete. Se clasifican rangos de impulsos en diferentes clasificaciones definidas en un esquema por letras. La clasificación G implica un cohete con impulso total de entre 80 N*s - 160 N*s.(NAR., 2000)

²Las distancias de seguridad para la experimentación con cohetes se rigen mediante las normas definidas por las asociaciones estadounidenses de Cohetería TRIPOLI(TRIPOLI, 2017), y NAR (National Association of Rocketry)(Krech, 2011)

- 2) Datos termodinámicos incorrectos con respecto a los gases generados por la reacción, ocasionando un diseño más pequeño de la tobera.

Durante el transcurso de este trabajo se busco determinar la validez de la primera posibilidad, y de ser posible descartarla.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Resistencia de Materiales

La resistencia de los materiales es el área de estudio que comprende el comportamiento de los materiales ante el sometimiento de estos a fuerzas externas. En otras palabras, es el estudio de la resistencia que estos materiales tienen a los diferentes rigores a los que se ven sometidos. Dentro de la resistencia de los materiales existen dos conceptos fundamentales que son el *esfuerzo* y la *deformación*.

3.1.1 Esfuerzo

El esfuerzo se puede definir como la medida de cuanta fuerza se le esta aplicando a un material con relación a cuanta área transversal este material tiene para distribuir esa fuerza. Se puede definir matemáticamente mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Donde:

σ : Esfuerzo en Pa.

F: Fuerza perpendicular a la superficie en N.

A: Área transversal en m².

3.1.2 Deformación

La deformación es la medida en la que un cuerpo cambia sus dimensiones al estar sometido a cargas externas. La cantidad de la deformación es dependiente de las fuerzas aplicadas sobre el objeto, el material del cual esta fabricado y de sus dimensiones iniciales. Como mecanismo para eliminar la dependencia de la deformación de las dimensiones físicas iniciales, y poder predecir el comportamiento de otros objetos del mismo material, pero de dimensiones diferentes, nace el concepto de deformación unitaria. La deformación unitaria es la medida en la cual un objeto se deforma en relación a su dimensión original. Dado que es una razón de dos variables de longitud, se considera adimensional.

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (2)$$

Donde:

ϵ : Deformación Unitaria. (Adimensional)

δ : Deformación real del objeto en m.

L: Longitud original del objeto previo a ser sometido a carga en m.

3.1.3 Gráfica de Esfuerzo - Deformación y Propiedades Mecánicas

Las gráficas de esfuerzo en función de deformación son entonces muy útiles para determinar los comportamientos de los materiales con respecto a estos elementos básicos. La Figura 3 muestra un ejemplo de la curva de esfuerzo deformación con sus diferentes elementos y puntos de interés.

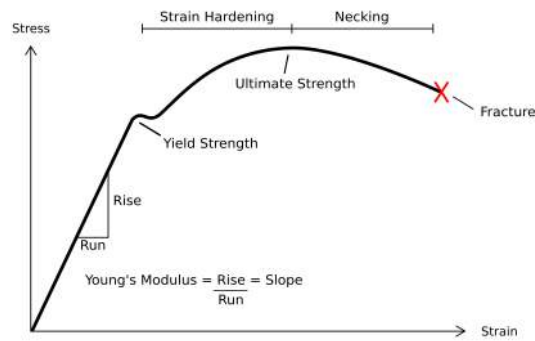


Figura 3: Curva Esfuerzo - Deformación Teórica

Para términos de este trabajo, existe un especial interés en tres de los puntos expuestos en la figura 3:

- 1) Módulo de Elasticidad (Conocido como Módulo de Young) en MPa.
- 2) Esfuerzo de Cedencia (Yield Strength) en MPa.
- 3) Esfuerzo Ultimo (Ultimate Strength) en GPa.

El esfuerzo Ultimo es el más sencillo de calcular, dado que es el esfuerzo máximo en la gráfica de esfuerzo - deformación. El Módulo de Elasticidad se refiere a la relación entre es esfuerzo (stress) y la deformación unitaria (strain), como se expresa en la siguiente fórmula:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3)$$

Donde:

E: Módulo de Elasticidad en Pa.

σ : Esfuerzo en Pa.

ϵ : Deformación Unitaria (Adimensional)

El Esfuerzo de Cedencia es el valor límite entre las regiones de deformación *elástica* y *plástica*. La deformación elástica corresponde al tipo de deformación no permanente que desaparece cuando se remueve la carga del objeto. Por otro lado, la deformación plástica corresponde a la deformación permanente del objeto. Para el caso de materiales como el aluminio es un poco más complicada de determinar, dado que e presenta en un punto de inflexión definido en la gráfica. Esto se puede visualizar en la Figura 4, que presenta una curva de esfuerzo - deformación para una aleación de aluminio. Se espera que el material a probar presente un comportamiento semejante.

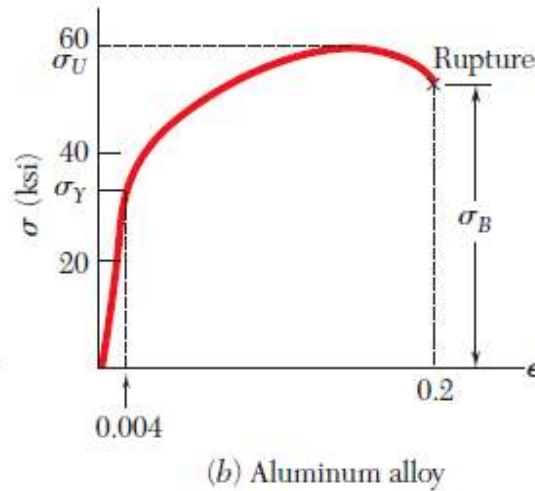


Figura 4: Curva Esfuerzo - Deformación de aleación de Aluminio

(Beer, Johnston, DeWolf, y Mazurek, 2013)

A continuación se discutirá el método usado para la determinación del punto de cedencia en estos escenarios.

3.2 Método de determinación de punto de cedencia

La determinación del punto de cedencia en materiales donde dicho punto no está definido por un punto de inflexión fijo se da mediante el método de desviación. El método de desviación es un procedimiento de análisis gráfico que, mediante el uso de una curva de esfuerzo - deformación, permite encontrar el esfuerzo de cedencia para un material a partir de su curva. Consiste en el dibujo de una línea que parte desde la intersección de cero esfuerzo con una deformación unitaria del 0.2 %, yendo en una dirección paralela al segmento recto de la curva, hasta chocar con esta. El esfuerzo correspondiente a este punto de intersección corresponde al esfuerzo de cedencia del material. La Figura 5, muestra este procedimiento esquemáticamente.

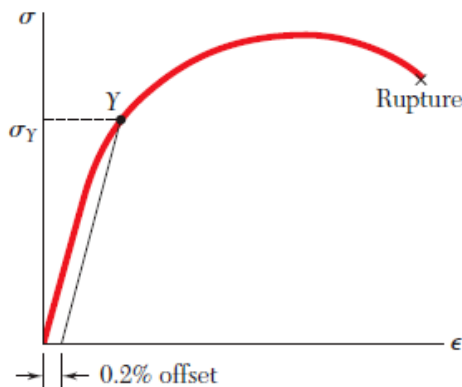


Figura 5: Curva Esfuerzo - Deformación Teórica

(Beer y cols., 2013)

3.3 Recipientes a Presión

Existen tres tipos de esfuerzos principales en el caso particular de los esfuerzos en un recipiente de presión.

- 1) Tangencial (σ_1)

2) Longitudinal (σ_2)

3) Radial (σ_3)

Los esfuerzos Tangencial y Longitudinal están representados en la Figura 6.

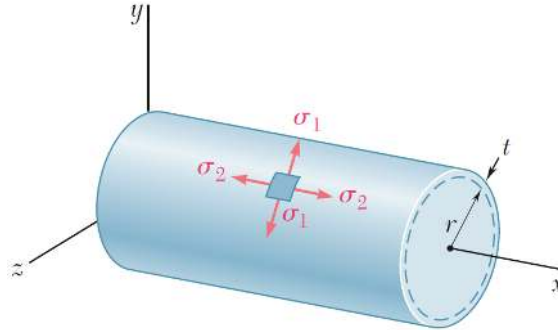


Figura 6: Esfuerzos Ocasionados por Presión

(Beer y cols., 2013)

Debe definirse adicionalmente el concepto de *radio medio* como el radio promedio entre el radio externo e interno:

$$R_m = \frac{R_e - R_i}{2} \quad (4)$$

Donde:

R_m : Radio medio en m.

R_e : Radio externo en m.

R_i : Radio interno en m.

Los recipientes de presión se subdividen en dos clasificaciones:

1) Recipientes de Pared Delgada

2) Recipientes de Pared Gruesa

Existen múltiples criterios para realizar la diferenciación entre los dos. Para términos de este trabajo se usará el criterio por Mott, R. en su libro de Resistencia de Materiales (Mott, 2009).

Un recipiente de presión es considerado de pared delgada si se cumple la siguiente relación:

$$\frac{R_m}{t} \geq 10 \quad (5)$$

Donde:

R_m : Radio Medio en m.

t : Espesor del tubo en m.

3.3.1 Esfuerzos en Pared Gruesa

Dadas las dimensiones de la pared del tubo y del radio medio, se llegó a la conclusión que el tubo bajo investigación se debe considerar de pared gruesa. Por lo tanto se usan las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_1 = \frac{P * (R_e^2 + R_i^2)}{R_e^2 - R_i^2} \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \frac{P * R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} \quad (7)$$

$$\sigma_3 = -P \quad (8)$$

Donde:

σ_1 : Esfuerzo Tangencial en Pa.

σ_2 : Esfuerzo Longitudinal en Pa.

σ_3 : Esfuerzo Radial en Pa.

P: Presión Interna del recipiente de Presión en Pa.

R_e : Radio externo del tubo en m.

R_i : Radio interno del tubo en m.

3.4 Material a Prueba

El material a probar es un tubo de aluminio vendido por la empresa Alumicentro S.A. Los datos provistos en el Cuadro 1 muestra las especificaciones provistas por la empresa sobre su producto.

Cuadro 1: Especificaciones del Material

Material	Tubo de Aluminio
Aleación	6063-T5
Proveedor	Alumicentro S.A.
Diámetro Interno	26,6446 mm
Diámetro Externo	33,401 mm
Esfuerzo de Cedencia	145 MPa
Esfuerzo Ultimo	185 MPa
Modulo de Elasticidad	69 MPa

De acuerdo a un grupo de investigadores del Instituto del Petroleo, en pruebas realizadas en tubos de aluminio de pared delgada de aleación 6063 con un tratamiento térmico 5, se obtuvieron curvas como la presentada en la Figura 7. (Barsoum, Khan, Molki, y Seibi, 2013)

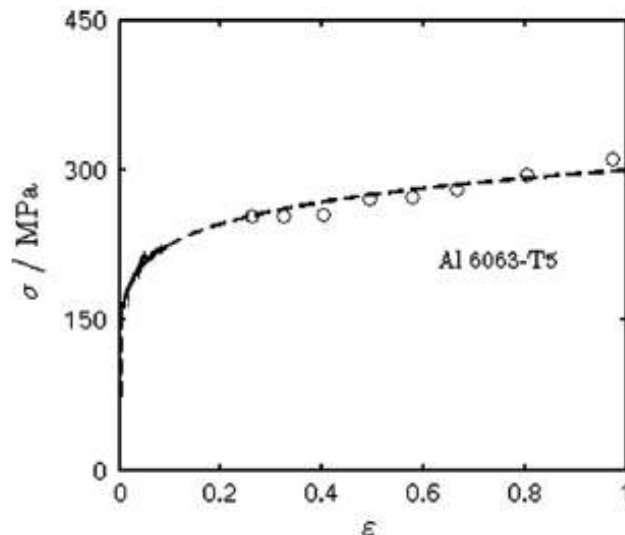


Figura 7: Curva de Esfuerzo Deformación Esperada

4 METODOLOGÍA

4.1 Preparación de Probetas

La preparación de probetas para prueba de propiedades mecánicas en materiales metálicos se realiza mediante la aplicación de la norma ASTM E8/E8M (ASTM, 2009). El siguiente diseño de probeta se ajusta a las especificaciones de la norma mencionada.

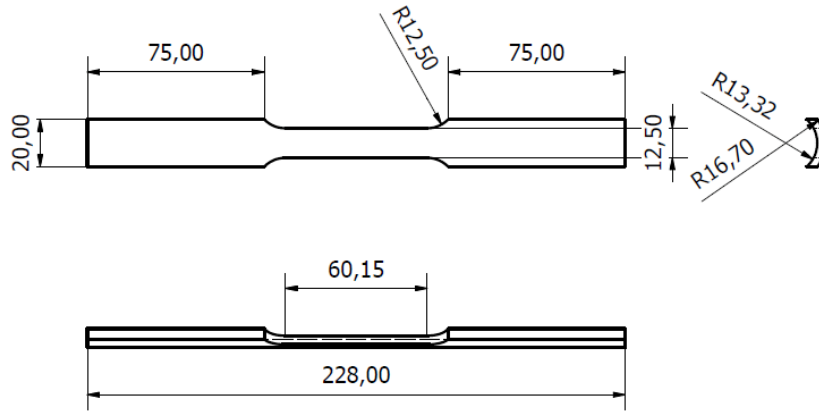


Figura 8: Probeta diseñada para la elaboración de los experimentos. (Dimensiones en mm)

Se plantea el corte de segmentos de tubo de aluminio de alrededor de 24 cm de longitud. Dada las dimensiones del tubo de aluminio se plantea el corte de 4 segmentos, suponiendo el uso de una herramienta de corte delgada, o 3 segmentos en caso contrario. Una vez cortados los segmentos se procede a la elaboración de los cortes longitudinales en 3 o 4 segmentos de acuerdo a la herramienta de corte empleada. Durante la realización del experimento se optó por el uso de un corte grueso, lo cual conllevó 3 probetas por segmento.

El paso siguiente consiste en la realización de los cortes internos de la probeta. Estos se recomienda realizarlos mediante el uso de una fresadora. Se inicia el corte y se toma sumo cuidado de no realizarlo en la línea, sino dejando un margen de separación entre la línea, para dejar el espacio de remoción correspondiente al acabado de la pieza.

Una vez finalizado el proceso se procede al limado de las superficies cortadas hasta que se alcance las dimensiones finales de las piezas. Este proceso puede ser también ayudado por el uso de lija, y otros implementos, con el fin de garantizar un acabado liso.

Finalmente, se procede, mediante el uso de una prensa hidráulica, al aplanamiento de los extremos de las probetas para facilitar el agarre de las pinzas a estas. Este proceso se debe de hacer con sumo cuidado de no deformar la parte central de la probeta, y por tanto ocasionar daños que hagan a la probeta inservible. Una vez listo este procedimiento se realiza la marca de los puntos de calibración (gage length).

4.2 Equipos de Medición Usados

Durante el desarrollo del experimento se realizaron dos instrumentos de medida principalmente. Primeramente la Máquina de Ensayos Universales, y en menor medida, el uso de un calibrador vernier digital.

4.2.1 Máquina de Ensayos Universales

- **Marca:** Instron
- **Modelo:** 3367
- **Placa:** 321950



Figura 9: Maquina de Ensayos Universales Instron

Celda de Carga

- **Capacidad Máxima:** 30 kN
- **Número de Serie:** 71215

Sensor de Desplazamiento y Velocidad

- **Número de Serie:** R6561

4.2.2 Calibrador Vernier Digital

- **Marca:** iGaging
- **Modelo:** OriginCal
- **Protección:** IP54
- **Tamaño:** 6 in

4.3 Desarrollo del Experimento

Las pruebas de tensión se realizaron el 18 de julio del 2017 en el laboratorio de metalurgia y metrología de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica, alrededor del medio día. Primeramente se preparo la maquina mediante su encendido, así como el encendido del equipo de compute compañero.

Mientras se realizaba el encendido del equipo se realizo la medición de las propiedades del dimensionales como la longitud efectiva de la probeta y el ancho de las diferentes probetas. Estos datos permiten la determinación del área final, con el fin de obtener los esfuerzos, y la determinación de la deformación unitaria.

Una vez seleccionado el método de medición, se hace una calibración de la maquina de pruebas, mediante una opción interna de la maquina. una vez realizada esta calibración”, no es necesario volver a realizarla. Una vez realizado este procedimiento se procede a montar la pieza en la pinza superior. Se ajusta la altura de la bancada, y se ajusta la pinza inferior. En este momento es recomendable introducir las variables dimensionales dentro del programa, aunque no es completamente necesario.

Con la probeta lista y montada se puede proceder con la prueba. Tiende a tener una duración de entre 1 y 2 minutos hasta alcanzar la ruptura de la pieza. Una vez se da la ruptura, se puede proceder a remover las piezas. Este proceso se vuelve a repetir para el resto de las piezas. Una vez finalizado el proceso, se guardan los datos y se apaga el equipo.

4.4 Determinación del Área de la Probeta

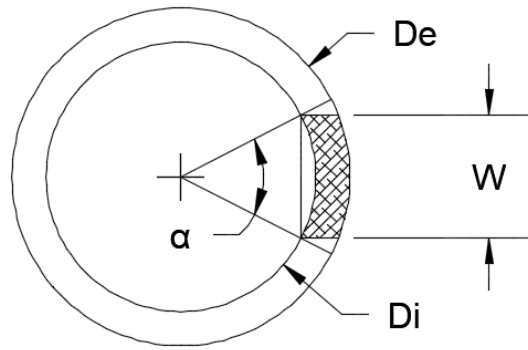


Figura 10: Procedimiento para la determinación de las áreas transversales de las probetas

Donde:

α : Angulo del semicírculo definido por las dos aristas internas de la probeta en radianes

D_e : Diámetro Externo en m.

D_i : Diametro Interno en m.

W : Ancho de la Probeta en m.

Al tomar el triangulo formado por el semi ángulo³ de α , la mitad del espesor de W y el radio interno, y aplicar el seno del semi ángulo y despejar, se obtiene la siguiente ecuación para el valor de α .

$$\alpha = 2 * \sin^{-1} \left(\frac{W}{D_i} \right) \quad (9)$$

Donde:

α : Angulo del semicírculo definido por las dos aristas internas de la probeta en radianes

W : Ancho de la Probeta en m.

D_i : Diametro Interno en m.

$$A = \frac{\alpha * (r_e^2 - r_i^2)}{2} - \frac{\alpha * (r_e - r_i)^2}{2} \quad (10)$$

Donde:

A : Área de la probeta en m^2 .

α : Angulo del semicírculo definido por las dos aristas internas de la probeta en radianes

r_e : Radio Externo en m.

r_i : Radio Interno en m.

³El semi ángulo se refiere a la mitad del ángulo. Es un término usado ampliamente en cohetería. semi ángulo = $\frac{\alpha}{2}$

5 RESULTADOS

Las probetas mostradas en la Figura 11 fueron el resultado del proceso de diseño y fabricación llevado a cabo previo a la realización de las pruebas de tensión



Figura 11: Probetas de Prueba

A pesar de los mejores esfuerzos, dado a una restricción en la cantidad de tiempo disponible para su manufactura, existen ciertas desviaciones entre las medidas finales de las probetas. Dichas medidas fueron registradas, promediadas y tomadas en cuenta a la hora de la realización de los cálculos de áreas, para el cálculo de las demás variables.

Cuadro 2: Datos Climatológicos

	Inicio	Fin
Temperatura (°C)	19,9	21,6
Humedad Relativa (%)	79,6	77,8
Presión Ambiental (hPa)	882,3	882,2

En la Figura 12 se presentan los datos crudos dados por la maquina de ensayos universales en una forma gráfica. Estos valores no representan exactamente el comportamiento real de las figuras, en relación unas con otras, dadas las diferencias ya mencionadas en dimensiones físicas entre las diferentes probetas.

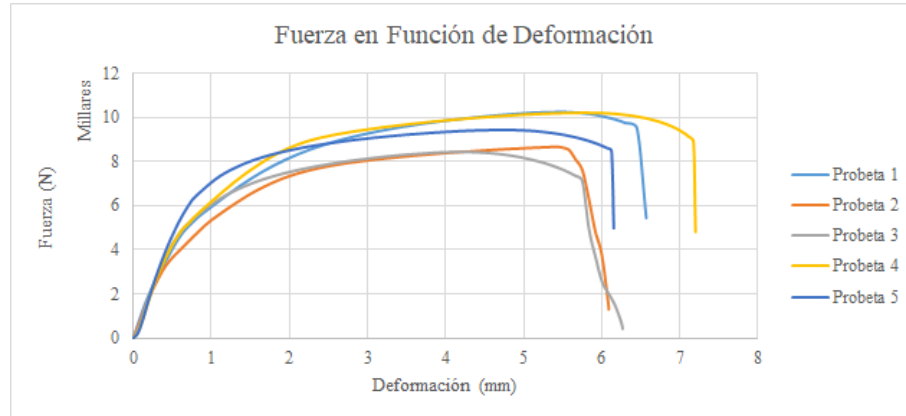


Figura 12: Fuerza en función de la deformación

Para compensar dichas diferencias es necesario dejar de trabajar con deformación real y pasar a la deformación unitaria. La Figura 13 muestra la gráfica de Esfuerzo como función de la deformación unitaria. En esta gráfica se obtienen los comportamientos de los materiales, sin tener que considerar la diferencia del tamaño entre las diferentes probetas.

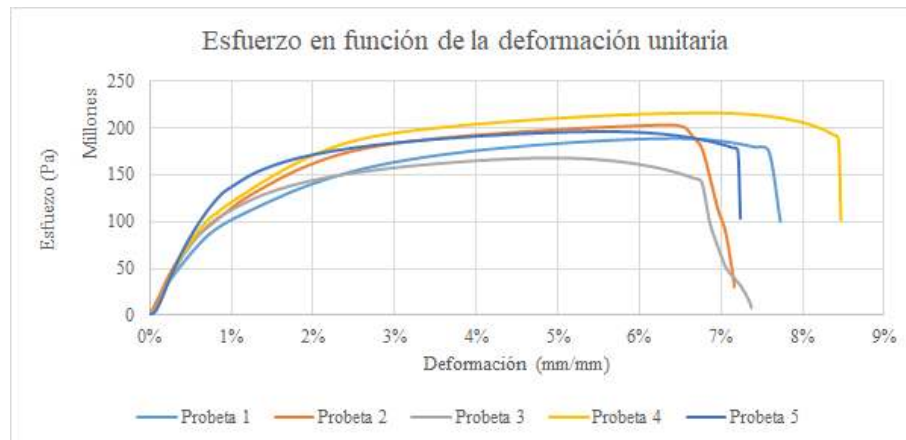


Figura 13: Esfuerzo en función de la deformación unitaria

El resumen de los datos para las diferentes propiedades mecánicas bajo estudio se presentan en la siguiente tabla.

Cuadro 3: Resultados Obtenidos de las pruebas de tensión

	Probeta				
	1	2	3	4	5
Esfuerzo Ultimo (MPa)	188,71	203,26	167,99	216,01	196,14
Cedencia al 0.2 % (MPa)	50,08	52,13	74,22	99,60	124,46
Módulo de Elasticidad (MPa)	13271,06	17324,43	14504,55	14506,57	15111,38

Al realizar los análisis estadísticos, se puede apreciar una marcada diferencia en los valores de esfuerzo de cedencia y módulo de elasticidad al ser comparados con los valores de referencia usados.

Cuadro 4: Valores estadísticos

	Promedio	Desv. Est.	Valor de Referencia
Esfuerzo Ultimo (MPa)	194,42	17,88	185
Cedencia al 0.2 % (MPa)	80,10	31,88	145
Modulo de Elasticidad (MPa)	14943,60	1489,77	69000

Con el objetivo de determinar si se dio un error en la selección de datos para la determinación del módulo de elasticidad, se decidió graficar dicho módulo como función de la deformación. Los resultados se presentan en la Figura 14.

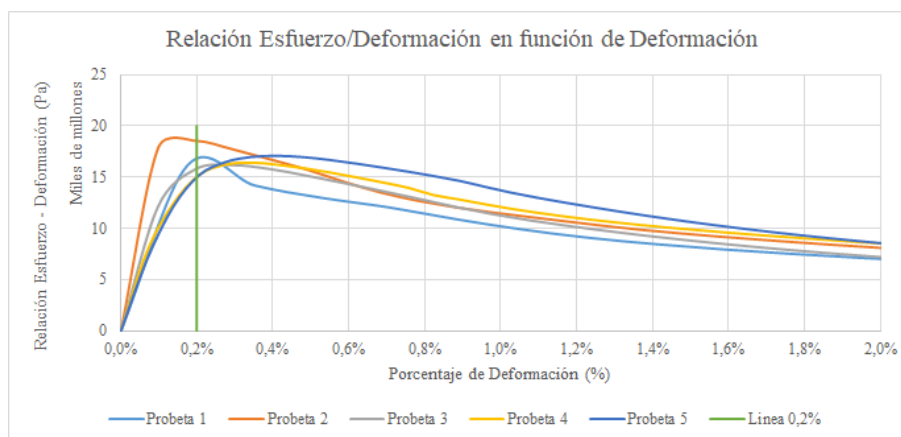


Figura 14: Módulo de elasticidad en función de la deformación unitaria

Como se puede apreciar, el módulo nunca supera los 20 GPa. Lo cual precluye la posibilidad de un error durante la selección de los datos en su calculo.

5.1 Incertidumbres

Se han determinado, de acuerdo a la guía de códigos de practicas de UNCERT (Gabauer, 2000), que existen las siguientes posibles fuentes de incertidumbre:

- 1) Medición del ancho de probeta
- 2) Medición de diámetros de tubos originales
- 3) Medición de Longitud Inicial
- 4) Medición de la Fuerza Ejercida por la maquina
- 5) Medición de la Deformación
- 6) Acabado de la Probeta (Presencia de grietas y deformaciones)
- 7) Alineamiento
- 8) Condiciones Ambientales
- 9) Deflexión Estructural

Para los puntos 1, 2, y 3, se tiene la incertidumbre asociada a la medición con el calibrador vernier digital. La medición de fuerza y deformación esta dependiente a la incertidumbre de la maquina de prueba universal. Con respecto a los puntos 6, 7, 8, y 9, no se logró determinar matemáticamente el impacto que estos factores tienen

sobre los resultados individuales. Claramente existe un impacto de parte del acabado de la superficie, dado que genera concentradores de esfuerzos, por donde puede iniciar una grieta, y empequeñecer el área verdadera, pero se desconoce de una manera de poder cuantificar tal valor.

Para la determinación de múltiples aspectos de la determinación de incertidumbres se basó en la metodología usada en "Calculation of Measurement Uncertainty for Tensile Strength and Flexural Strength of Thermoplastic" (Shamsuri, Awing, y Tawil, 2016).

Al tomar todas las consideraciones se obtiene un valor del esfuerzo último de $194,4 \text{ MPa} \pm 8,1 \text{ MPa}$ ($k=2$, 95,45 %, Distribución Normal).

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se logró realizar la determinación del esfuerzo ultimo, el cual devolvió un valor promedio de 194,42 MPa, lo cual esta por encima del valor de referencia de 185 MPa. Esto permite concluir que en este aspecto el material cumple con las especificaciones definidas por norma para un aluminio 6062-T5. Esto a su vez permite confirmar que el cohete debió de poder aguantar el esfuerzo calculado, lo que a su vez descarta la opción de fallo por material.

Con respecto a los valores dados por el módulo de elasticidad y esfuerzo de cedencia, se encuentran por debajo de los valores definidos por norma. Esto implica una menor área de deformación plástica, lo que reduciría la reutilización de los cohetes. O implica un fallo en los procedimientos de prueba de las probetas, o en la manufactura de las mismas.

Al no tener el certificado de calibración de la maquina, no se tiene certeza del estado de esta. Adicionalmente la maquina fue movida desde las instalaciones del CIEMIC a su posición actual en la Facultad de Ingeniería. Se desconocen las condiciones bajo las cuales se dio la mudanza, y si esta pudo tener algún efecto sobre la maquina. Dado que el error se da principalmente en los valores relativos a la deformación y por tanto a la medida de la deformación real, puede deberse a un error en el sensor de medición de longitud de la máquina.

Entre las posibles explicaciones para el error en las mediciones en una medición incorrecta de las longitudes efectivas de las probetas. Esto podría afectar la determinación de la deformación unitaria, y por tanto afectar los valores determinados tanto del módulo de elasticidad como del esfuerzo de cedencia.

Se recomienda, entonces, el uso de un extensometro en la realización de futuras pruebas para permitir una mejor medición del modulo de elasticidad de las probetas. La ausencia de los datos del extensometro dificultó la determinación de un valor del módulo de elasticidad para las probetas en el experimento.

Existe adicionalmente la posibilidad de modificar la probeta de una configuración de hueso a una configuración con cuñas a los extremos del tubo completo. Esta posibilidad se descarto, dado que las dimensiones del tubo y la capacidad máxima de las pinzas no permitieron este estilo de prueba, pero podría generar resultados diferentes, y posiblemente más exactos.

REFERENCIAS

- ASTM. (2009). *Standard test methods for tension testing of metallic materials* (Inf. Téc.). ASTM International.
- Barsoum, I., Khan, F., Molki, A., y Seibi, A. (2013). Modeling of ductile crack propagation in expanded thin-walled 6063-t5 aluminum tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*.
- Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., y Mazurek, D. F. (2013). *Mecánica de materiales*. McGraw-Hill.
- Gabauer, W. (2000). The determination of uncertainties in tensile testing. *Standards Measurement and Testing Project*.
- Krech, B. (2011). *Standards and testing committee motor testing manual nar* (Inf. Téc.). National Association of Rocketry. Descargado de <http://www.nar.org/wp-content/uploads/2014/08/ST-MotorTestingManual.pdf>
- Mott, R. L. (2009). *Resistencia de materiales*. Pearson Education.
- NAR. (2000). *Standard motor codes*. Descargado de <http://www.nar.org/standards-and-testing-committee/standard-motor-codes/>
- Shamsuri, A., Awing, M., y Tawil, M. (2016). Calculation of measurement uncertainty for tensile strength and flexural strength of thermoplastic. *Asian Research Journal of Mathematics*.
- TRIPOLI. (2017). *Safety code for high-power rocketry* (Inf. Téc.). Autor. Descargado de <http://www.tripoli.org/Portals/1/Documents/Safety%20Code/HighPowerSafetyCode%20-%202017.pdf>

7 APÉNDICES

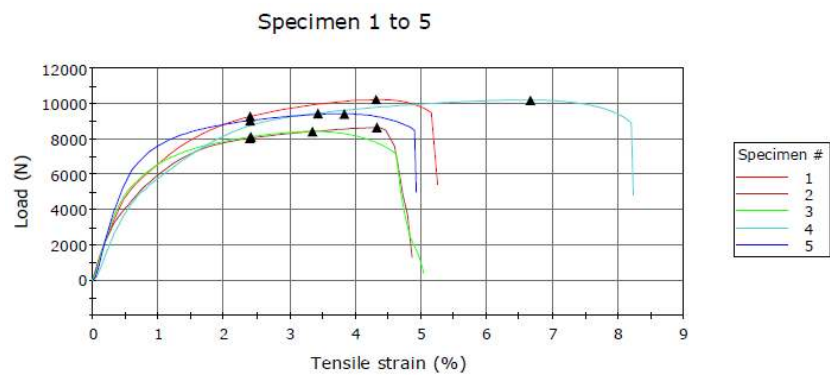


Figura 15: Gráfico Generado por el programa de maquina de pruebas universales

8 ANEXOS

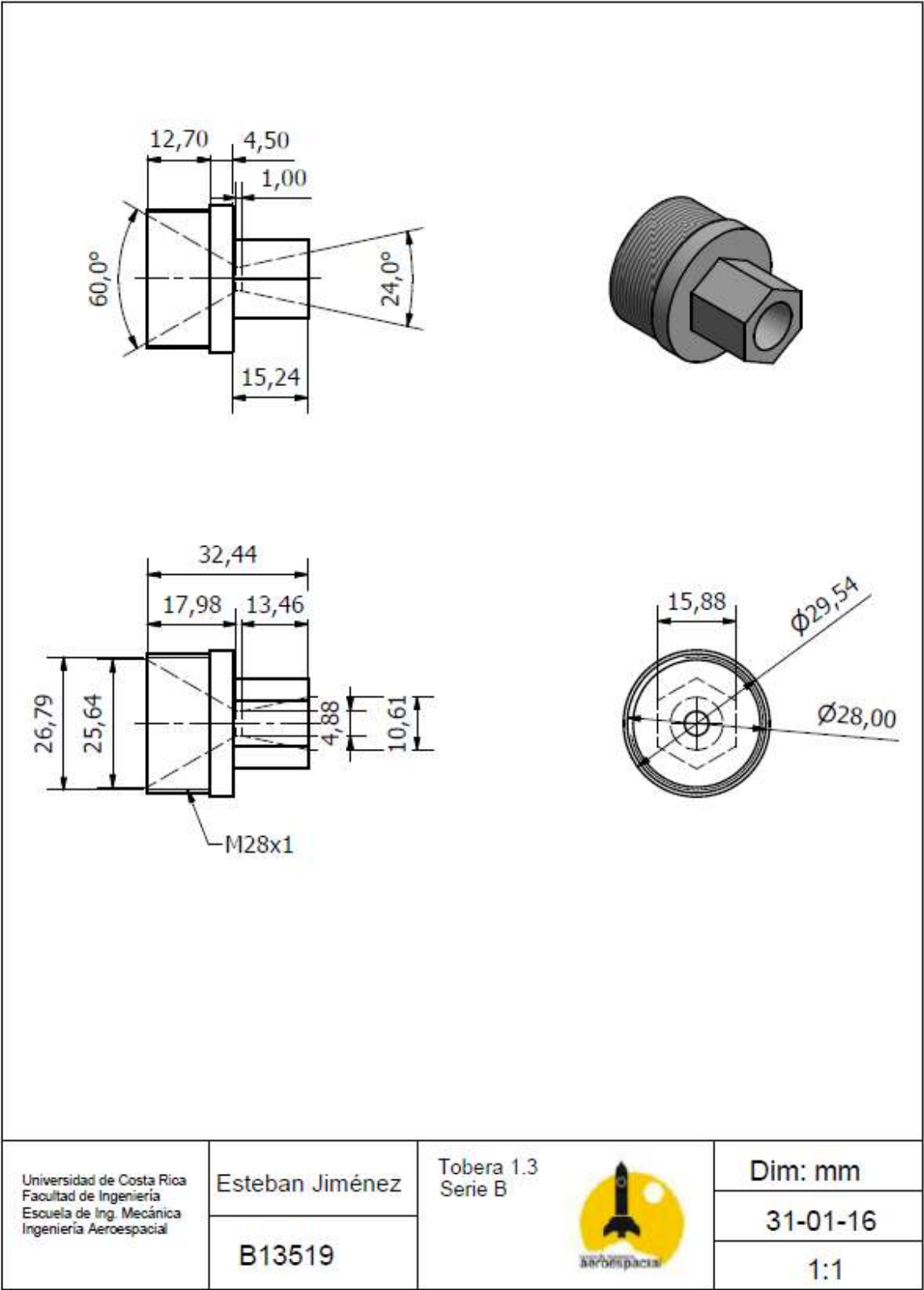


Figura 16: Plano de Tobera del Motor Serie B Usado