

Crecimiento de las Microcavidades en el Área del Cuello bajo la Prueba de Tensión

Joseph Mulero Ramírez
Maestría en Ingeniería en Ingeniería Mecánica
Julio A. Noriega Motta, Ph.D.
Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad Politécnica de Puerto Rico

Resumen — En esta investigación usted encontrará unos registros de datos e ilustraciones que fueron analizados sobre una serie de pruebas realizadas a varios especímenes de aleación de Aluminio 6061-T6 bajo la prueba de tracción mediante un procedimiento de medición de carga cuando se comienza a formar internamente las microcavidades o la propagación de la grieta que se van produciendo después de su máximo esfuerzo donde comienza a crearse el cuello en la probeta durante la prueba de tensión hasta su rompimiento o detención de una carga determinada con reducción de 2.5%, comenzando desde un 97.5%. Se incluyen ilustraciones macroscópicas digitalizadas y microscópicas del material estudiado.

Palabras Claves — Aluminio, Grieta, Microcavidad, Microscopio.

INTRODUCCIÓN

Esta investigación para el Proyecto de Diseño de la Maestría en Ingeniería Mecánica tiene el objetivo inmediato de investigar el comportamiento de los 16 especímenes de la Figura 1, mediante el uso de un equipo óptico con capacidad de hacer mediciones y de observar el tamaño de las cavidades que se crearon en el área transversal y forma de las cavidades que se crearon en la probeta durante haberse realizado la prueba de tensión hasta la carga determinada o rompimiento.



Figura 1

Probetas de Tensión para el Ensayo de Tracción

Al realizar una revisión de literatura tanto en los libros como en las redes informáticas se dificulta encontrar ilustraciones que muestren el crecimiento interno de una microcavidad o en inglés como se le conoce “microvoid” es por tal motivo que mi aportación es proveer una serie de imágenes que ayuden en esta investigación.

La máquina de pruebas de tensión deforma un espécimen del material a estudiar, aplicando la fuerza uniaxial de tensión continua o una carga determinada en el sentido del eje de la muestra [1]. Después del esfuerzo último en tensión se estará investigando la propagación de una fisura interna o la razón de crecimiento de las microcavidades en la prueba de tensión. Utilizando otros procesos como cortes, monturas, desbaste, pulido y la utilización de un equipo óptico.

Los aspectos a desarrollar en el presente trabajo, contribuyen al conocimiento general de la fractografía, lo cual es complementario en el estudio del fenómeno de agrietamiento “Crack”.

MICROCAVIDADES

Microcavidad significa una cavidad microscópica en la estructura cristalina de un metal. La fractoténacidad de un material está relacionada con su capacidad de deformarse plásticamente y absorber energía durante el proceso de fractura por el mecanismo de deslizamiento de dislocaciones. Esta deformación plástica puede variar con cada microestructura y estado de tensiones. Ópticamente se caracteriza por una superficie más bien opaca, está caracterizada por pequeñas depresiones o cavidades que son la resultante de la coalescencia de microcavidades iniciadas alrededor de inclusiones, partículas o discontinuidades que originan una concentración de tensiones y un aumento local de la deformación plástica. Durante el proceso de deformación las microcavidades existentes crecen

bajo las tensiones vigentes en el extremo de la fisura. Finalmente las paredes o ligamentos que separan estas microcavidades se rompen, resultando una superficie de fractura con depresiones semiesféricas o semielipsoidales denominadas simplemente cavidades [2].

Tanto el diámetro como la profundidad de las cavidades dependen del número de sitios donde se puedan iniciar las microcavidades originales, y por supuesto de la plasticidad de la matriz. Una aleación que contenga un gran número de partículas dispersas presentará una mayor densidad de cavidades que un metal puro sin aleación. La forma y profundidad de estas cavidades depende del tamaño y distribución de las microcavidades originales, de la tensión aplicada (tracción, corte, desgarramiento) y por supuesto de la fractoténacidad del material. Así por ejemplo cuando la fractura se produjo por tracción simple, las cavidades son equiaxiadas, como se muestra en la Figura 2.

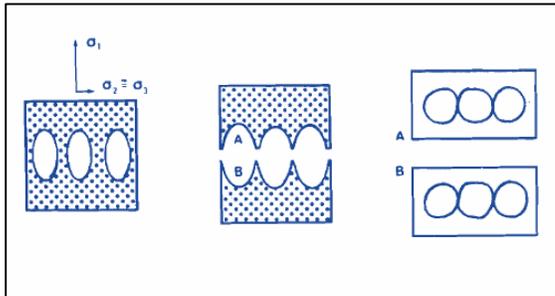


Figura 2
Fractura Normal, Cavidades Equiaxiadas

METALOGRAFÍA CUANTITATIVA Y ANÁLISIS DE IMÁGENES

Basado en el procesamiento de imágenes del microscopio, el diámetro de la cavidad se puede obtener de acuerdo con la Ecuación 1,

$$d_c = 2 \sqrt{\frac{A_c}{\pi}} \quad (1)$$

donde A_c es el área de cada cavidad. La densidad del número de cavidades se estima como,

$$\rho = \frac{n}{A_{img}} \quad (2)$$

donde n y A_{img} son el número de cavidades dentro de la imagen tomada del microscopio y el área de la imagen tomada con el microscopio, respectivamente [3].

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El material seleccionado para la investigación es una aleación de aluminio 6061-T6, cuya composición química de por ciento en peso se muestra como referencia en la Tabla 1, la Tabla 2 se presentan las propiedades mecánicas del ensayo en la prueba de tracción.

Tabla 1
Composición Química % en Peso Certificada por ALMETCO

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0.40 - 0.8	0.7	0.15 - 0.40	0.15	0.8 - 1.2	0.004 - 0.035	0.25	0.15

El material se adquirió con su certificación en la compañía Aluminum and Metal Service Corporation ALMETCO en forma de barras cilíndricas calibradas de 1/2 pulgada de diámetro con tratamiento T6.

Tabla 2
Propiedades Mecánicas de la Aleación de Aluminio 6061-T6

σ_{ys} (ksi)	σ_{UTS} (ksi)	Módulo de Elasticidad (ksi)	elongación %
39.3	43	9,700	19

Los ensayos de tracción se realizaron mediante el uso de la máquina universal marca ATS, modelo 910 de 10,000 libras fuerza de capacidad [4]. Se manufacturaron y utilizaron probetas cilíndricas con sección reducida, seleccionadas con tolerancia de diámetro de 0.2500 ± 0.001 pulgadas y longitud calibrada de 1 pulgada, según las especificaciones establecidas en la norma ASTM E-8/E8M-13 [5]. Debido a las imperfecciones internas que poseen los materiales al no ser 100% homogéneos ni isotrópicos, las propiedades físicas no dependen de la dirección de observación, el sitio del encuellamiento puede ocurrir en cualquier parte de la probeta; por este motivo se reduce su sección

central con el fin de que el encuellamiento ocurra dentro del área demarcada de 1 pulgada de longitud. La geometría de las probetas de tracción uniaxial se muestra en la Figura 3. Las deformaciones fueron medidos por un extensómetro con una longitud de calibre de 1 pulgada. Se ensayaron 16 probetas a temperatura ambiente, 15 hasta varias cargas determinadas y una hasta la ruptura, a una velocidad de cabezal de 0.02 in/min [6] [7].

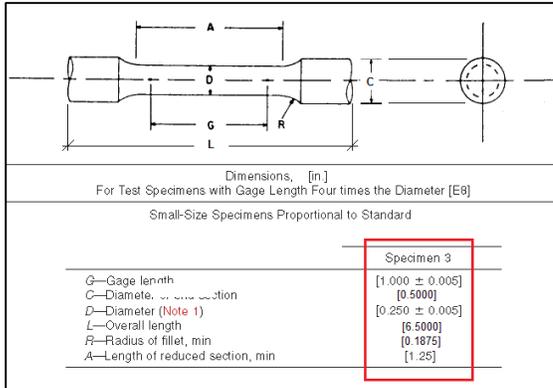


Figura 3
Geometría de la Probeta de Tensión del Estándar ASTM E8

Para la microscopía de medición óptica se analizaron tres muestras, seleccionadas de los últimos especímenes que se ensayaron a uno por ciento de diferencia cada uno del otro de la carga determinada sin llegar a la fractura. Se utilizó un estereoscopio marca Motic Digital Microscopes modelo DM143-NTSC para las imágenes y para medir el diámetro transversal del espécimen montado en baquelita y también se utilizó un microscopio Vicker marca Shimadzu, modelo HVM, con cámara integrada y con magnificación de 10X y 40X, con el que se logró medir el diámetro de las cavidades de las muestras correspondientes a los ensayos de tracción. Antes de realizar las observaciones en el microscopio Vicker, se seccionaron y prepararon las muestras utilizando un equipo de sierra con disco de diamante de baja velocidad marca Buehler modelo Isomet y un equipo de montura automática de la misma marca modelo Simplimet 1000 y luego se procedió sometiendo a técnicas estándar de desbaste y pulido.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos obtenidos de los ensayos de tracción como la carga y la deformación, mediciones del diámetro final de las probetas en el estereoscopio y las mediciones realizadas a las microcavidades ópticamente se encuentran tabulados en la Tabla 3.

Tabla 3
Recopilación de Datos

ID No	% Detención	ε (in/in)	Load (lbf)	d _{f_espécimen} (in)	d _{mc_prom} (m)
43	67.5	0.2702	1480.7	0.1734	5.97E-06
44	66.5	0.2682	1428.3	0.1700	5.35E-06
45	65.5	0.2662	1429.4	0.1686	3.24E-06

En la Tabla 4 se muestra los resultados obtenidos del área final de los especímenes, el área de la microcavidad, el esfuerzo ingenieril, También se calculó el esfuerzo real utilizando el área final o actual de los ensayos y se hizo la conversión del diámetro de las microcavidades a pulgadas.

Tabla 4
Resultados

ID No	d _{mc_prom} (in)	σ _{eng@Det} (ksi)	A _{f_espéc} (in ²)	A _{mc} (in ²)	σ _{T@Det} (ksi)
43	2.352E-04	30.16	2.363E-02	4.344E-08	62.67
44	2.105E-04	29.10	2.269E-02	3.480E-08	62.96
45	1.276E-04	29.12	2.232E-02	1.278E-08	64.04

La Figura 4 muestra la relación cuantitativa entre el perfil del área de las microcavidades versus el cambio de un porcentaje de diferencia de la carga determinada después que pasa el umbral del esfuerzo máximo convertido los datos a la tensión real, se puede observar en la curva el decrecimiento del promedio del área de la microcavidad de $4.344 \cdot 10^{-8}$ in² a $1.278 \cdot 10^{-8}$ in² según va aumentando la tensión real de 62.67 ksi a 64.04 ksi.

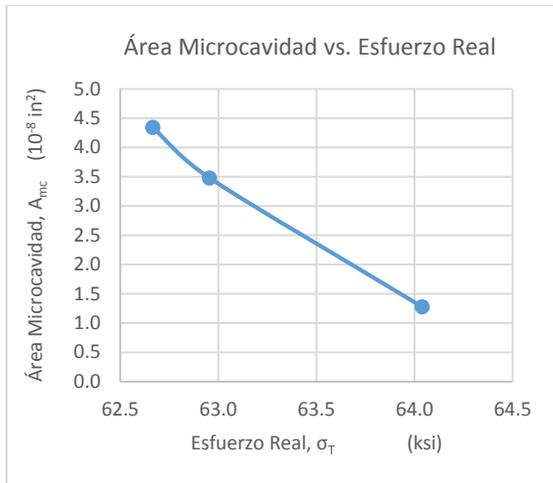


Figura 4
Variación del Promedio del Área de la Microcavidad con el Esfuerzo Real

Se observó el comportamiento después del máximo esfuerzo ingenieril construyendo una gráfica con los datos experimentales del esfuerzo real entre el área actual de todos los ensayos en conjunto de la prueba de tensión, la cual se muestra en la Figura 5 indicando que la deformación es proporcional en aumento con el esfuerzo real.

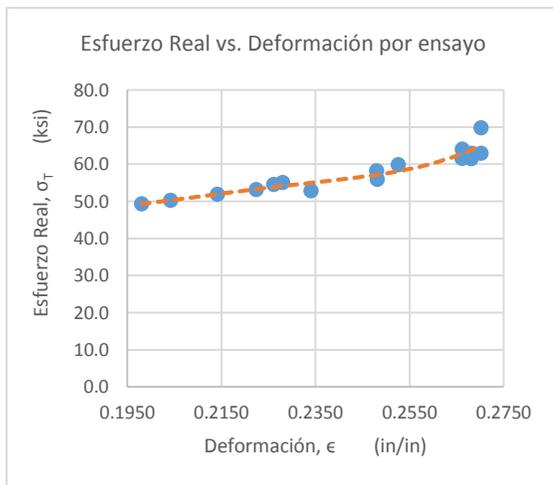


Figura 5
Esfuerzo Real versus la Deformación por cada Espécimen después del Máximo Esfuerzo

La Figura 6 es una muestra de cómo se determinó estereoscópicamente el diámetro del espécimen, en esta ilustración el diámetro mide 0.1686 pulgadas y corresponde al espécimen número 45 con una carga determinada de detención al 65.5% como se registró en la Tabla 3.

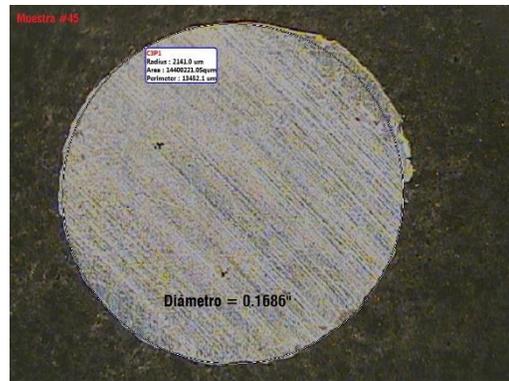


Figura 6
Medición Óptica de la Muestra #45 con el Estereoscopio

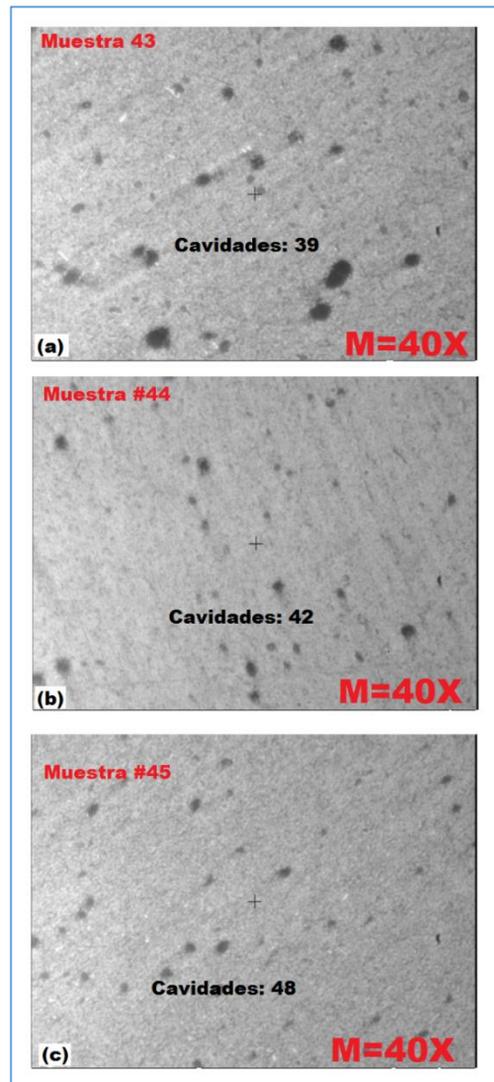


Figura 7
Metalografía Cuántica de Microcavidades de Muestras Diferentes de la Misma Barra del Material

En la Figura 7 se muestra las imágenes que se utilizaron para calcular la densidad y para medir el diámetro de las microcavidades. En las imágenes se puede observar el aumento de microcavidades desde la imagen Figura 7(a) correspondiente a la muestra 43 hasta la imagen de la Figura 7(c) correspondiente a la muestra 45, estas imágenes cubren un área de tamaño a escala de $117.4 \mu\text{m} \times 156.5 \mu\text{m}$ con una magnitud de 40X. Las imágenes presentadas son de diferentes ensayos y no representan la misma muestra.

Para mostrar los resultados de la Tabla 5 se utilizó la Ecuación 2 de la densidad del número de cavidades, y para obtener la población entera de las microcavidades se multiplicó la densidad por el área actual de cada espécimen. Los diámetros promedios de las cavidades se muestran en la Tabla 4. El área representativa de las imágenes en la Figura 7(a), 7(b) y 7(c) son de $18,373 (\mu\text{m})^2$ equivalente al área en pulgadas cuadradas de $28.47 \cdot 10^{-6} \text{ in}^2$.

Tabla 5
Resultados de la Densidad Poblacional

ID №	n	ρ (in^{-2})	P_{mc}
43	39	1.369E+06	3.235E+04
44	42	1.474E+06	3.345E+04
45	48	1.685E+06	3.761E+04

Según los datos experimentales, a medida que aumento el esfuerzo, la población de microcavidades va creciendo como se muestra en la Figura 8.

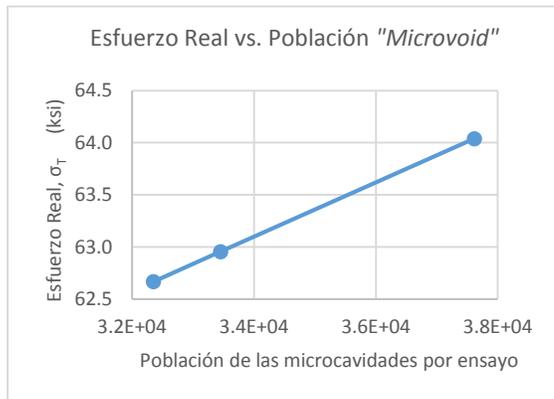


Figura 8
Esfuerzo Real entre la Población

METALOGRAFÍA DE MICROCAVIDADES

En la Figura 9 se muestra el espécimen #45 con microcavidades externas debajo de las estrías las cuales se produjeron en el centro del área calibrada de la probeta.

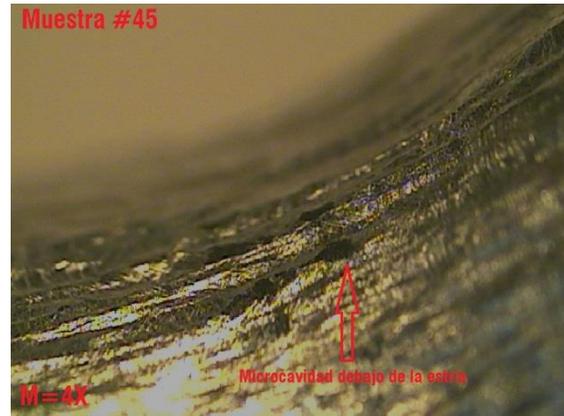


Figura 9
Microcavidad Externa debajo de la Estría del Especimen #45

Aquí en la Figura 10 correspondiente a la muestra #44, se pueden observar varias microcavidades externas en la que se señala en la imagen una de las microcavidades que ocurrió durante el ensayo de la prueba de tensión en el centro donde se deforma el espécimen.



Figura 10
Microcavidad Externa del Especimen #44

Por último en la muestra #43 se encontraron dos cavidades, examinando la Figura 11 y 12 se puede observar que las paredes que separan estas microcavidades se han roto, resultando en una superficie de una cavidad; estas dos cavidades se encuentran localizadas cerca del centro del corte

transversal, se puede observar que alrededor de ambas cavidades se ven circundando varias microcavidades y algunos que llegaron a la coalescencia.

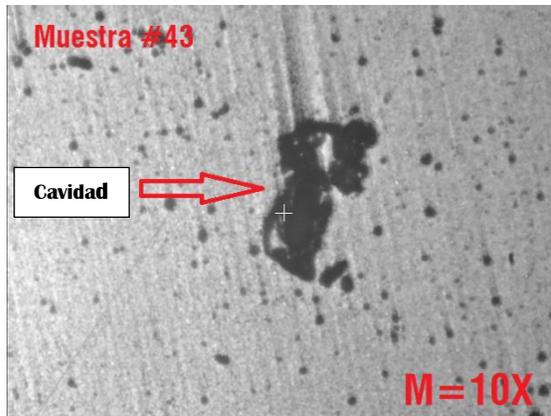


Figura 11

Cavidad Interna encontrada en el Centro de la Muestra #43

La cavidad de la Figura 11 tiene un largo aproximado de $1,827.9 \cdot 10^{-6}$ pulgadas y de ancho tiene entre $724.9 \cdot 10^{-6}$ pulgadas a $1,035.5 \cdot 10^{-6}$ pulgadas estas mediciones se calcularon a escala con una regla de seis pulgadas sobre ambas imágenes impresas.

En la Figura 12 se indica la otra cavidad que se encontró en la misma muestra #43, separada a una distancia aproximada de $9,242 \cdot 10^{-6}$ pulgadas de la cavidad de la Figura 11 con un tamaño de $1,501.5 \cdot 10^{-6}$ pulgadas de ancho por $3,175.6 \cdot 10^{-6}$ pulgadas de largo.

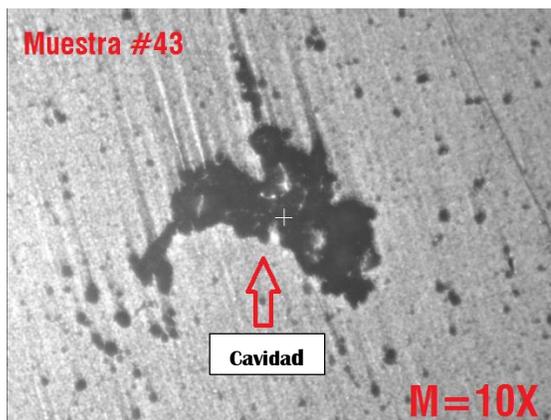


Figura 12

Otra Cavidad Interna encontrada en la Muestra #43

CONCLUSIÓN

El crecimiento de las microcavidades fueron estimadas en el área del cuello bajo la prueba de tensión cuantitativamente y el número de la densidad de microcavidades fueron analizadas utilizando técnicas de análisis de imágenes por la cual se concluye que a medida que los esfuerzos reales aumentan la población va creciendo.

Se muestra como evidencia imágenes del comportamiento de las microcavidades como parte de los objetivos de esta investigación.

Las pruebas y análisis realizados al aluminio 6061-T6 para hallar el número de la densidad de microcavidades se lograron hacer en el lugar de laboratorio como se dice "in-situ". Las densidades presentaron un aumento a medida que los esfuerzos reales se van incrementando o sea que a mayor esfuerzo real se producen más microcavidades.

Referencias

- [1] W. D. Callister, Jr. and D. G. Rethwisch, "Mechanical Properties of Metals," in *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 9th ed., New York, NY: Wiley, 2013, ch. 6, pp. 168-190.
- [2] T. L. Anderson, "Ductile Fracture," in *Fracture Mechanics Fundamentals and Applications*, 3rd ed., Boca Raton, FL: CRC Press, 1991, ch. 5, pp. 219-232.
- [3] S. Ying et al., "Fracture Morphologies of Advanced High Strength Steel During Deformation," *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, vol. 27 no. 1, pp. 101-106, 2014.
- [4] *Instruction Manual 101F 12/91 Series 900 UTM*, 6th ed., ATS, Butler, PA, 1991.
- [5] *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM Standard E8/E8M, 2013.
- [6] *Engineering Materials Laboratory Manual*, Dept. Mech. Eng., Polytechnic Univ. of Puerto Rico, San Juan, Rev. 3, March 2015, pp. 4-10.
- [7] H. E. Davis et al., "Static Tension," in *The Testing of Engineering Materials*, 4th ed., New York, NY: Mc-Graw Hill, 1982, ch. 8, pp. 125-188.