
	GERENCIA DE FÍSICA - GAIyANN DEPARTAMENTO/DIVISIÓN/SECCIÓN	INT-INN_03MET-019
	Informe Técnico	Página: 1 de 9
TÍTULO: Determinación experimental del módulo de Young en probetas PDMS utilizando correlación digital de imágenes.		
1. OBJETIVO Estimación experimental del módulo de Young de PDMS (polidimetilsiloxano) provistas por el solicitante.		
2. SOLICITANTE Dr. Hernán Pastoriza Ing. Andrés Glücksberg MZP Tecnología		
Preparó		
Nombre y Apellido (Filiación)		Firma
NOMBRE APELLIDO (CNEA) Marcelo Gastón Alonso. NOMBRE APELLIDO (CNEA-CONICET-IB) Alejandro Yawny.		
Aprobó		
Nombre y Apellido	Fecha	Firma
Jorge Luis Pelegrina Jefe División Física de Metales	28-10-2021	 J.L. PELEGRINA
NOTA: Este documento es propiedad de CNEA y se reserva todos los derechos legales sobre él. No está permitida la explotación, transferencia o liberación de ninguna información en el contenido, ni hacer reproducciones y entregarlas a terceros sin un acuerdo previo y escrito de CNEA.		

CNEA	Determinación experimental del módulo de Young en probetas PDMS utilizando correlación digital de imágenes.	INT-INN_03MET-019 Página: 2 de 09
-------------	--	--------------------------------------

INDICE

1. OBJETIVO.....	1
2. SOLICITANTE.....	1
3. DESARROLLO.....	3
4. REFERENCIAS.....	6
5. INFORMACIÓN DE CONTACTO.....	6
6. ANEXOS.....	7

<p>CNEA</p>	<p>Determinación experimental del módulo de Young en probetas PDMS utilizando correlación digital de imágenes.</p>	<p>INT-INN_03MET-019 Página: 3 de 09</p>
--------------------	---	--

3. DESARROLLO

3.1 Método.

De acuerdo a lo requerido por el Solicitante, se determinó el módulo de Young de PDMS (polidimetilsiloxano). Se acordó con el Solicitante la utilización de probetas provistas por éste, con la geometría y dimensiones nominales mostradas en la Fig. 1. Dicha geometría se basó en la recomendada en la norma ASTM E8 / E8M – 21[1]. Se acordó también que la determinación del módulo se realizara en tracción, en la dirección longitudinal de las mismas.

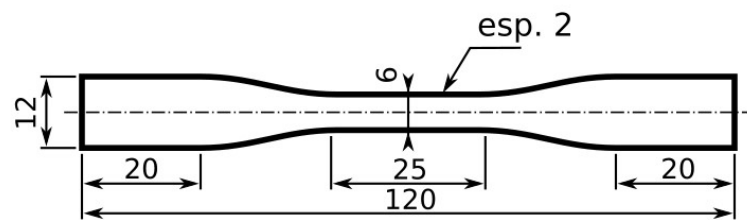


Figura 1: esquema y dimensiones nominales en [mm] de las probetas utilizadas.

Dadas las características del PDMS, se observó que los resultados de las mediciones del tamaño de las probetas pueden alterarse significativamente debido a la presión ejercida por los instrumentos de uso convencional disponibles para esto. Para minimizar tales efectos, el espesor real de las probetas se midió mediante un comparador (DIGIMESS, apreciación 0,01 mm), con el auxilio de una pastilla de metal duro, Fig. 2. El valor reportado es el promedio de cuatro mediciones del espesor a lo largo de la sección media de la probeta.

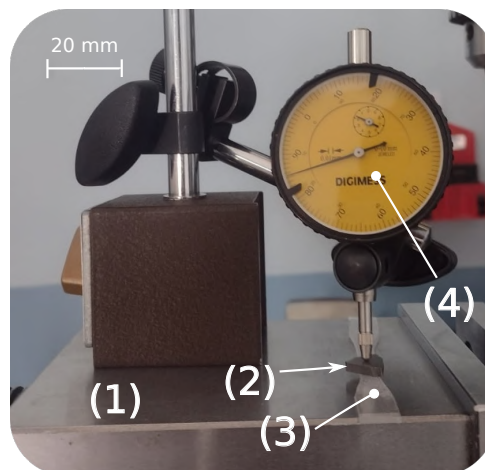


Figura 2: montaje utilizado para la medición del espesor de las probetas. (1) Base rectificada. (2) Pastilla de metal duro. (3) Probeta. (4) Comparador centesimal.

De la misma manera, el ancho de la sección reducida se determinó mediante un calibre (ESSEX, apreciación 0,01 mm), tomando cuatro puntos distribuidos a lo largo de la zona adelgazada. La medición se realizó bajo lupa con iluminación, restringiendo la presión en las patas del calibre al momento que el reflejo de la probeta evidenciaba una deformación inducida por éstas.

CNEA	Determinación experimental del módulo de Young en probetas PDMS utilizando correlación digital de imágenes.	INT-INN_03MET-019 Página: 4 de 09
-------------	--	--------------------------------------

Se utilizó una máquina de ensayos electromecánica INSTRON 5567 con celda de carga máxima ± 5 kN, a la que se agregó en serie una celda de carga MTS 661.09B-20 (capacidad máxima ± 10 N), Fig. 3.

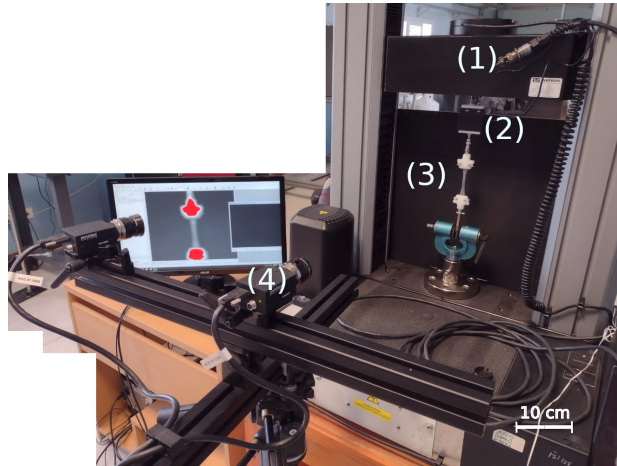


Figura 3: montaje experimental utilizado. (1) Celda de carga de 5 kN. (2) Celda de carga de 10 N. (3) Probeta. (4) Equipo de correlación de imágenes.

Debido a la baja rigidez de las probetas de PDMS, para su montaje en la máquina de ensayos se fabricó el dispositivo ad hoc que se ilustra en la Fig. 4. El mismo consta de dos mordazas de nylon (1) y un soporte de alineación y montaje (2). Se insertaron tuercas metálicas en las mordazas, de manera que es posible ajustar la probeta mediante dos tornillos. El diseño de las mordazas permite que encastran entre sí en una única posición, garantizando la posición relativa entre las mismas y fijando la probeta con un ajuste de interferencia de aproximadamente 0,75 mm. Para esto, la superficie que apoya sobre las probetas se fabricó con una ranura y un patrón estriado. Una vez ajustada y alineada la probeta en estudio, se fijó el conjunto a la máquina de ensayos mediante juntas tipo cardánicas (3) y se retiró el soporte para comenzar el ensayo.

La tasa de muestreo utilizada fue de 10 Hz, tanto para la carga en la máquina de ensayos como para la captura de imágenes. Se registraron los datos de tiempo, desplazamiento del cabezal y carga en la celda de 10 N.

La preparación de las muestras se realizó por salpicado mediante aerógrafo (EVOLUTION Silverline), con boquilla de 0,25 mm. Se utilizó pintura blanca y se colocó un fondo negro detrás de la probeta. La densidad de puntos en la superficie de la probeta fue de aproximadamente 43 puntos/mm², Fig. 5.

La deformación de la probeta se midió mediante un equipo de correlación de imágenes (VIC-3D Correlated Solutions). Se utilizó correlación bi-dimensional, con lente Schneider-Kreuznach Xenoplan 1.9/35-0901. Para ello se definió un extensómetro virtual en la porción media de las probetas, Fig. 6. En todos los casos se verificó la no existencia de concentradores de deformación significativos en la región de interés, dentro del 2 %. Se utilizó el extensómetro de mayor longitud que fue posible ubicar en la porción adelgazada de la probeta.

<p>CNEA</p>	<p>Determinación experimental del módulo de Young en probetas PDMS utilizando correlación digital de imágenes.</p>	<p>INT-INN_03MET-019 Página: 5 de 09</p>
--------------------	---	--

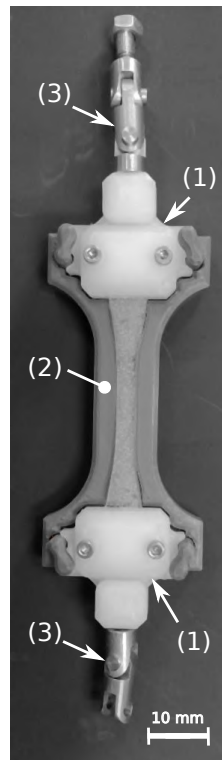


Figura 4: dispositivo fabricado para el montaje de las probetas.

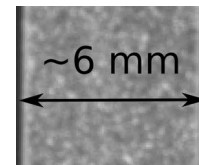


Figura 5: imagen de una porción de probeta, con el patrón de salpicado típico utilizado para la correlación de imágenes.

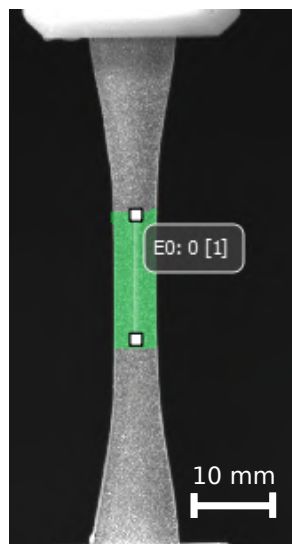


Figura 6: imagen de la probeta adquirida con el sistema de correlación de imágenes. Los cuadrados unidos por una línea blanca muestran la posición del extensómetro virtual.

El ensayo se realizó a una velocidad de desplazamiento del cabezal de 10 mm / min hasta una deformación de aproximadamente el 10 % (desplazamiento del cabezal de 3 mm). Llegado este punto, se descargó la probeta en iguales condiciones de velocidad, hasta alcanzar una carga de 0,5 N. Estos parámetros fueron preestablecidos en base a ensayos en una probeta de ajuste (ver Anexo A).

CNEA	Determinación experimental del módulo de Young en probetas PDMS utilizando correlación digital de imágenes.	INT-INN_03MET-019 Página: 6 de 09
-------------	--	--------------------------------------

La sincronización de los datos adquiridos mediante la máquina de ensayos y el sistema de correlación de imágenes se realizó a partir del dato de máxima deformación registrada.

Se calculó el módulo de Young del material a partir del ajuste mediante regresión lineal de la curva tensión – deformación durante la descarga, en el rango estudiado.

3.2 Resultados.

Las dimensiones, módulo de Young (E) calculado y bondad del ajuste para cada probeta se muestran en la Tabla 1. La dispersión máxima en el espesor medido para una misma probeta representó un 5 % de error (probeta 2). La dispersión máxima medida en el ancho para una misma probeta representó el 3 % del valor (probeta 3). Éstas constituyeron las fuentes más apreciables de error en la determinación del módulo de Young. En todos los casos se observa que el comportamiento del material es fuertemente lineal (coeficiente de correlación > 0,9999). Esto refuerza la observación de que la incerteza en el valor determinado no se debe a que en el rango de deformaciones estudiado el material se aparte significativamente del comportamiento lineal asumido al definir el módulo de Young, sino a la geometría irregular de la probeta. El valor del módulo de Young promedio que surge a partir de estas mediciones es de $(1,7 \pm 0,1)$ MPa.

Tabla 1: dimensiones de las probetas ensayadas, módulo de Young (E) calculado, y número de correlación del ajuste utilizado para calcular E.

N.º de probeta	Espesor [mm]	Ancho [mm]	E [Mpa]	Correlación ajuste
1	1,39 ± 0,04	5,43 ± 0,09	1,6 ± 0,1	0,99992
2	1,00 ± 0,05	5,93 ± 0,05	1,8 ± 0,1	0,99994
3	1,91 ± 0,05	5,8 ± 0,2	1,7 ± 0,1	0,99990
4	1,94 ± 0,03	6,1 ± 0,2	1,80 ± 0,06	0,99993
5	1,36 ± 0,04	5,81 ± 0,09	1,67 ± 0,09	0,99991
6	1,81 ± 0,07	5,79 ± 0,07	1,8 ± 0,1	0,99990
7	1,62 ± 0,05	5,80 ± 0,07	1,8 ± 0,1	0,99997
8	1,19 ± 0,03	6,1 ± 0,2	1,6 ± 0,1	0,99990

4. REFERENCIAS

[1] ASTM E8 / E8M – 21 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials

5. INFORMACIÓN DE CONTACTO

Gastón Alonso, Laboratorio de Propiedades Mecánicas, División Física de Metales, CAB.

e-mail: marcelo.alonso@cab.cnea.gov.ar

CNEA	Determinación experimental del módulo de Young en probetas PDMS utilizando correlación digital de imágenes.	INT-INN_03MET-019 Página: 7 de 09
-------------	--	--------------------------------------

6. ANEXO A: estimación previa de los parámetros de ensayo.

Los parámetros de ensayo utilizados en este estudio se seleccionaron a partir del cálculo del módulo de Young longitudinal para una probeta de PDMS aportada por el solicitante, previo a la provisión de las probetas de interés. El espesor de la probeta utilizada fue de $(1,89 \pm 0,02)$ mm y el ancho de $(5,8 \pm 0,2)$ mm.

Se analizó la dependencia de la deformación medida con el largo y la posición del extensómetro virtual utilizado. Para ello se definió un extensómetro E0, Fig. 8(a), ocupando la mayor longitud posible de la zona central de la probeta. Además, se definieron tres extensómetros E1, E2 y E3, ocupando el tercio superior, medio e inferior de dicha zona, respectivamente. En la Fig. 8(b) se observa la dependencia temporal de la deformación medida por cada uno de los extensómetros definidos, partiendo de un nivel de carga nula y hasta una deformación máxima del orden del 25 %. La diferencia máxima en la deformación medida es la que ocurre entre la deformación determinada con el extensómetro E1 y el extensómetro E3. Dicha diferencia representa un 3 % de la deformación promedio para deformaciones del orden del 25 %, y no es mayor que el 1,5 % en el rango de deformaciones inferiores al 10 %. Se sugiere que estas diferencias pueden estar asociadas tanto a inhomogeneidades en las propiedades del material como a diferencias en la geometría de la probeta.

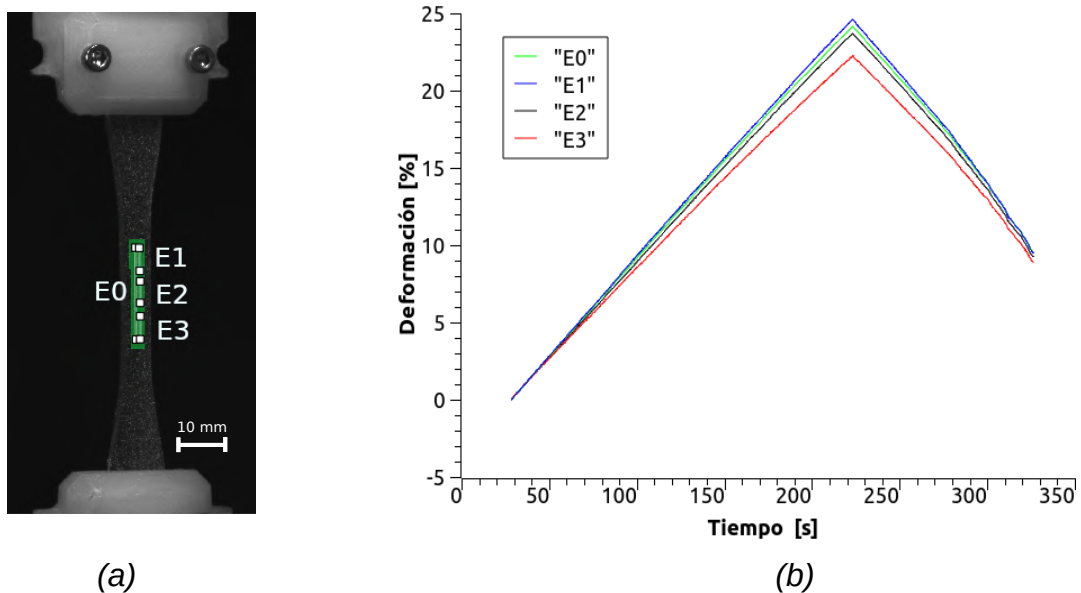


Figura 8: efecto de la posición y el largo del extensómetro utilizado. (a) Ubicación de los extensómetros sobre la probeta. (b) Dependencia temporal de la deformación medida.

El comportamiento mecánico del material durante la carga no es lineal, Fig. 9. Se observó que el material se comporta viscoelásticamente, disminuyendo la rigidez del mismo a mayor nivel de deformación, tanto en carga como en descarga. Esto se hace particularmente evidente para deformaciones superiores al 7%, donde se observa un marcado cambio de pendiente en la curva tensión – deformación.

Si bien el material no se comporta de forma lineal, se comporta en forma aproximadamente elástica ante el ciclado mecánico, Fig. 10.

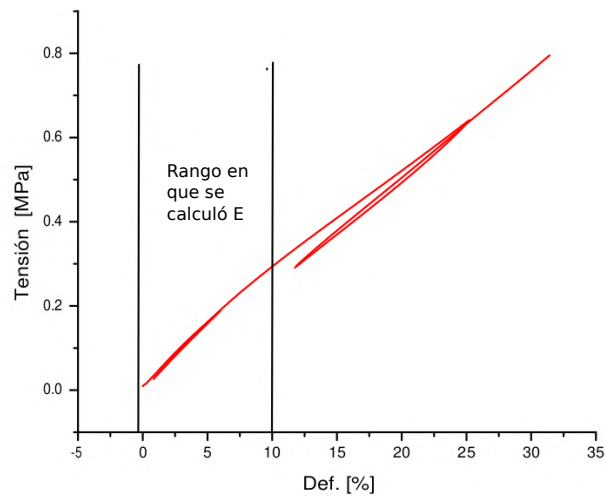


Figura 9: curva tensión vs. deformación considerada en el proceso de selección de los parámetros del experimento. Se muestra una carga hasta el 25%, seguida de una descarga hasta el 12% y otra carga final.

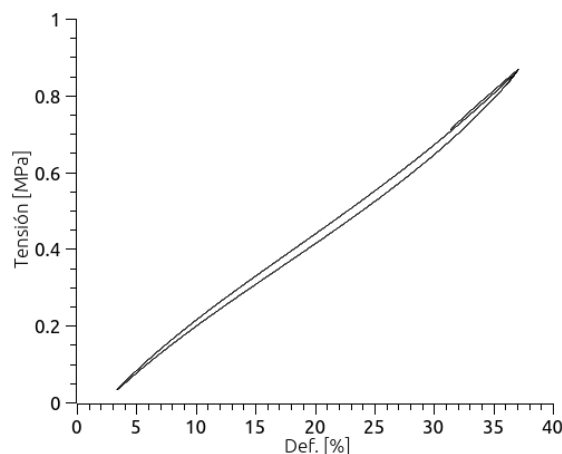


Figura 10: curva tensión vs. deformación del material utilizada en el proceso de selección de los parámetros del experimento. Se muestran tres ciclos de carga-descarga, entre un nivel de tensión equivalente a una precarga de 0,5 N y una deformación máxima del 40 %.

Se analizó el efecto de la velocidad de deformación y la deformación máxima alcanzada en el valor del módulo de Young calculado. Los valores obtenidos para distintos niveles de carga y de velocidad de deformación se muestran en la Tabla 2.

CNEA	Determinación experimental del módulo de Young en probetas PDMS utilizando correlación digital de imágenes.	INT-INN_03MET-019 Página: 9 de 09
-------------	--	--------------------------------------

Tabla 2: valores calculados para el módulo de Young y la rigidez de la probeta (por unidad de deformación), para distintos valores de los parámetros de ensayo.

Vel. Def. [mm/min]	Def. Máxima (Máq. Ensayos) [%]	Rigidez [N / (mm/mm)]	E [Mpa]	Correlación
5	10	$16,441 \pm 0,007$	$1,50 \pm 0,05$	0,9999
10	10	$16,668 \pm 0,007$	$1,52 \pm 0,06$	0,9999
10	20	$16,23 \pm 0,01$	$1,48 \pm 0,05$	0,9996

En base a lo medido, se observa que:

1. Los efectos de la velocidad, a igualdad de deformación máxima alcanzada, se manifiestan como un incremento en la rigidez de la probeta cuando se incrementa la velocidad de carga.
2. Si bien este aumento de rigidez es detectable, las diferencias en el valor calculado para el del módulo de Young no son significativas debido al error introducido en la determinación de la sección transversal de la probeta. Debido a esto, no se obtendrían resultados más precisos por realizar los ensayos a menor velocidad, en perjuicio del tiempo ocupado para esto.
3. Para niveles más altos de deformación máxima, a igual velocidad de deformación, la rigidez medida es menor.
4. El comportamiento del material es fuertemente lineal ($r > 0,999$), como surge de evaluar el coeficiente de correlación en todos los casos.
5. Los resultados sugieren que de ser necesario, sería posible disminuir la incerteza en el módulo de Young calculado para un dado nivel de deformación disminuyendo las tolerancias dimensionales de las mismas.

Por lo antes expuesto, se fijó la deformación máxima para la determinación del módulo de Young en 10 %, y la velocidad de deformación en 10 mm/min.