

Hipoelasticidad del policarbonato en pequeñas deformaciones.

Alfredo Alán Rey Calderón.

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.

alfredo.rey@cimav.edu.mx

Dr. Alberto Díaz Díaz.

Departamento de Metalurgia e Integridad Estructural.

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.

alberto.diaz@cimav.edu.mx

Temática general: Materiales.

Resumen.

Este trabajo de investigación se enfoca en poner en evidencia el comportamiento hipoelástico del policarbonato mediante la realización de pruebas mecánicas uniaxiales a bajas y altas velocidades de deformación en distintas temperaturas. Se realizan pruebas a esfuerzos de tensión y compresión. Previo a la realización de las pruebas, el material recibe un tratamiento de rejuvenecimiento con el fin de borrar los efectos del envejecimiento físico. Se observa un comportamiento no lineal elástico en altas velocidades de deformación atribuido a la hipoelasticidad. Se confirma también un efecto de asimetría en el policarbonato.

Palabras clave. Comportamiento mecánico, policarbonato, Makrolon GP, hipoelasticidad.

Abstract.

This paper focuses on highlighting the hypoelastic behavior of polycarbonate by uniaxial mechanical tests at low and high strain rates at different temperatures. Tests are carried out on tension and compression. Prior to conducting the tests, the material receives a rejuvenation treatment in order to erase the effects of physical aging. An elastic non-linear behavior is observed at high strain rates attributed to hypoelasticity. An asymmetry effect on the polycarbonate is also confirmed.

Keywords. Mechanical behavior, polycarbonate, Makrolon GP, hypoelasticity.

Introducción.

En cualquier tipo de industria se necesita tener un amplio conocimiento del material utilizado para conseguir diseños más seguros, óptimos y confiables. Actualmente los polímeros tienen aplicaciones en diversas áreas por su bajo costo y buena resistencia mecánica, entre otras ventajas.

Dentro de estos materiales se encuentra el policarbonato (PC) que presenta diversos atributos: ligereza, resistencia al calor, durabilidad y versatilidad, entre otros.

El PC tiene reportado extensamente su comportamiento viscoelástico (1) (Cao, Ma, Zhang, Wang, & Wang, 2010) (3). Sin embargo, existe poca información acerca del comportamiento del PC a altas velocidades de deformación y sobre un posible comportamiento elástico no lineal inclusive en pequeñas deformaciones (hipoelasticidad, (4)). También, existe otro fenómeno interesante que presenta el PC y otros polímeros. Éste es el *efecto de asimetría* (5) (Mahnken & Shaban, Finite elasto-viscoplastic modeling of polymers including asymmetric effects, 2013) (7) (8). Este fenómeno consiste en un comportamiento mecánico dependiente del tipo de esfuerzo aplicado (tensión o compresión).

Por otro lado, el *envejecimiento físico* influye significativamente en las propiedades de los polímeros (9) (10) (11) (12) (13). Para revertir estos efectos Odegaard y Bandyopadhyay (Odegaard & Bandyopadhyay, 2011) proponen dar un tratamiento térmico por arriba de la temperatura de transición vítrea (T_g) del polímero. Dicho tratamiento borra la historia previa del material, eliminando los cambios debidos al envejecimiento físico y reestableciendo las propiedades originales. Este proceso se conoce como *rejuvenecimiento* del material.

El objetivo de este trabajo de investigación es ampliar el conocimiento del comportamiento mecánico del policarbonato (PC) sometido a altas velocidades de deformación. Es necesario tener un amplio conocimiento de cierto material para desarrollar un modelo que prediga en forma precisa el comportamiento mecánico de éste.

Este trabajo se desglosa en tres secciones. Primeramente, se presenta *material y métodos*, donde se detallan aspectos referentes al material de estudio y a los métodos utilizados en la experimentación. Seguidamente se detalla *resultados y discusión* de los hallazgos en base a los ensayos realizados. Finalmente se presentan las *conclusiones* que arrojó la investigación del comportamiento mecánico del PC.

Material y métodos.

El material de estudio es policarbonato (PC) sólido, fabricado por Bayer, de nombre comercial Makrolon GP (15). Los especímenes se maquinaron directamente de placas de PC. Las dimensiones de las probetas están basadas en normas ASTM (American Society for Testing and Materials); para pruebas en compresión se utilizaron probetas rectangulares con un área de sección transversal de 24.5mm x 12.7mm y 55mm de altura (16); para pruebas en tensión se usaron probetas en forma de hueso con un área de sección transversal de 13.5mm x 3mm dentro de la sección estrechada (17). Se realizaron pruebas monotónicas uniaxiales en una máquina de ensayos universal Instron 3382 con una cámara térmica adicionada para el manejo de distintas temperaturas de trabajo (25°C, 50°C, 70°C y 90°C). Las pruebas fueron controladas por deformación, usando dos velocidades, una lenta (0.002%/s) y otra extremadamente rápida (3%/s).

Previo a la realización de las pruebas, el material recibió un tratamiento térmico de rejuvenecimiento (18). Este tratamiento consiste en dos calentamientos consecutivos: el primero a 120°C durante 24 horas, y el segundo a 155°C (valor por arriba de la Tg del PC, 140 °C) durante 24 horas.

En cada caso se utilizaron galgas extensiométricas para medir las deformaciones axiales (ϵ_a).

Resultados y discusión.

En esta sección se muestran los resultados de las pruebas efectuadas a tensión y compresión a las cuatro temperaturas de trabajo. En la Figura 1 se muestran gráficos de curvas de esfuerzo contra deformación axial 25 °C (a), 50 °C (b), 70 °C (c) y 90 °C (d). En línea discontinua se muestra el comportamiento del PC a una lenta velocidad de deformación, mientras que en línea continua se muestra el comportamiento a una velocidad de deformación extremadamente rápida. Existe una evidente diferencia entre una velocidad de deformación lenta y una rápida. Esto se debe a que en una velocidad lenta de deformación existe el tiempo suficiente para que aparezcan deformaciones viscosas, que serán mayores a velocidades más lentas. Estas diferencias incrementan a altas temperaturas, pues los efectos viscosos son más significativos.

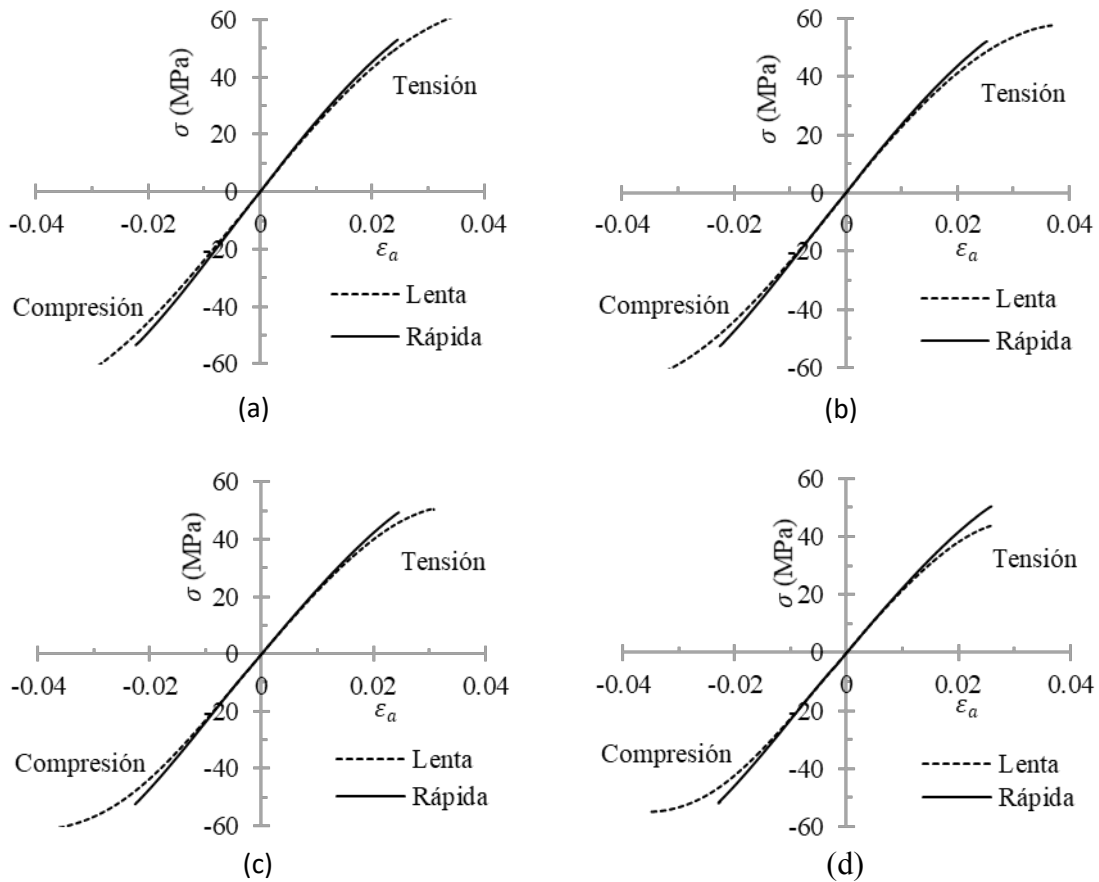


Figura 1. Curvas esfuerzo contra deformación axial a 25 °C (a), 50 °C (b), 70 °C (c) y 90 °C (d).

En la Figura 2 se muestran curvas de esfuerzo contra deformación axial a velocidades de deformación lenta (a) y rápida (b). A velocidades lentas se aprecia de forma significativa los efectos viscosos con el incremento de la temperatura. Sin embargo, a una velocidad extremadamente rápida no existe el tiempo suficiente para que aparezcan deformaciones viscosas. Todas las pruebas presentan una región inicial lineal elástica, donde se deduce un módulo elástico de $E = 2.3 \text{ GPa}$; después de esto, se obtiene un comportamiento no lineal. A bajas velocidades de deformación, el comportamiento no lineal en PC se atribuye principalmente a viscoelasticidad no lineal, mientras que a altas velocidades de deformación se observa un comportamiento hipoelástico no lineal donde los efectos viscosos son despreciables.

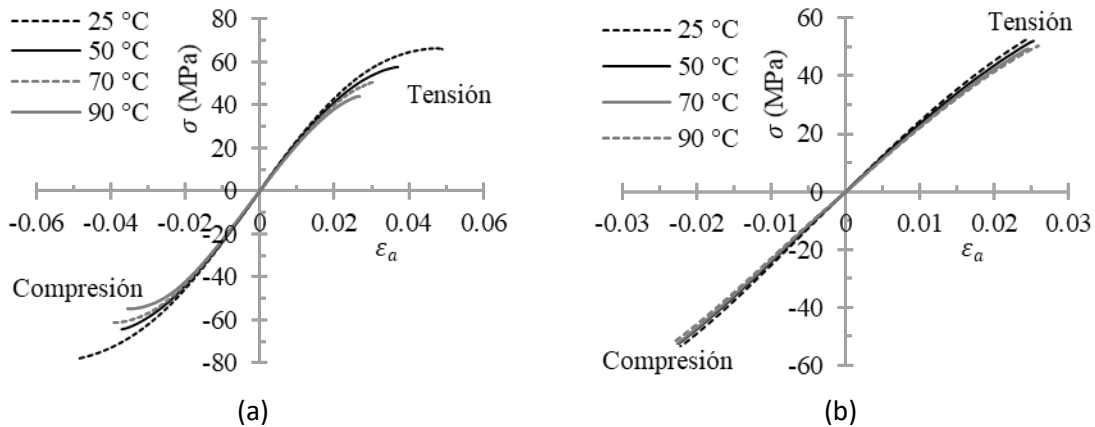


Figura 2. Curvas esfuerzo contra deformación axial a velocidades de deformación baja (a) y alta (b).

En las pruebas a velocidades de deformación altas, se observa que a medida que incrementa el nivel de deformación se necesita un nivel de esfuerzo menor al esperado en un comportamiento lineal elástico. Para observar este fenómeno se graficó el valor absoluto de la diferencia de esfuerzos entre un comportamiento hipoelástico no lineal (experimento) y un comportamiento lineal elástico, obtenido mediante:

$$|\Delta\sigma| = |\sigma_i - \varepsilon_i E|$$

Estos resultados se muestran en la Figura 3. En línea continua se presentan los resultados a esfuerzos a tensión, mientras que en línea discontinua se muestran los resultados a esfuerzos a compresión. Se puede observar que, a bajos valores de deformación axial, esta diferencia es nula o mínima, indicando que se trata de un comportamiento lineal elástico. A medida que incrementa el nivel de deformación, la diferencia de esfuerzo se incrementa en forma no lineal tanto a esfuerzos de tensión como a esfuerzos de compresión. También se confirma el efecto de asimetría en el PC, pues a esfuerzos de tensión se obtienen diferencias mayores respecto a sus contrapartes a esfuerzos de compresión.

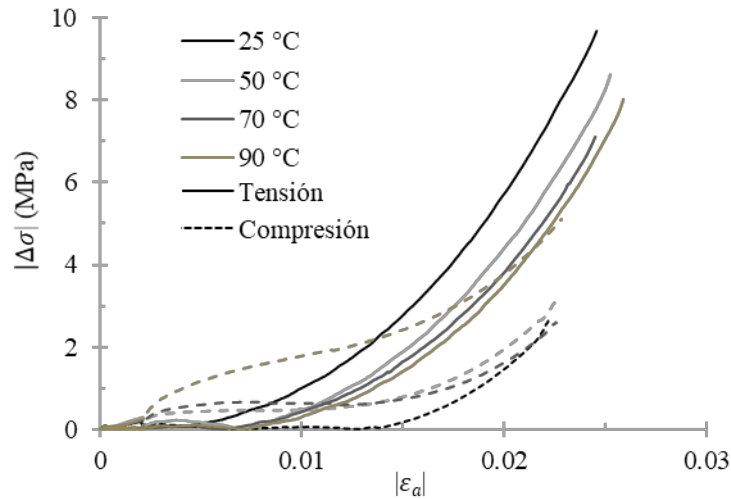


Figura 3. Diferencia de esfuerzo en pruebas a alta velocidad de deformación.

Adicionalmente a las pruebas monotónicas, se realizaron pruebas cíclicas uniaxiales a tensión y compresión a distintas temperaturas, con el fin de estudiar el comportamiento hipoelástico. Las pruebas consistieron en 3 ciclos siguiendo los siguientes pasos:

1. carga a velocidad de deformación de 3%/s hasta llegar a un nivel mayor de aproximadamente 50MPa,
2. descarga a la misma velocidad de deformación,
3. recuperación de 10 minutos,
4. carga a velocidad de deformación de 1%/s hasta llegar a un nivel mayor de aproximadamente 50MPa,
5. descarga a una velocidad de deformación de 1%/s,
6. recuperación de 10 minutos,
7. carga a velocidad de deformación de 0.3%/s hasta llegar a un nivel mayor de aproximadamente 50MPa,
8. descarga a una velocidad de deformación de 0.3%/s,
9. recuperación de 10 minutos.

En la Figura 4a, se grafica el esfuerzo contra la deformación axial para una prueba cíclica a tensión a 25 °C. Cada tipo de línea corresponde a un ciclo de carga-descarga-recuperación. Debido a que los ciclos se superponen, en la Figura 4b se aplica un corrimiento horizontal artificial de 0.5% para una mejor visualización de la curva que se obtiene en cada ciclo. Como se puede observar, se obtiene prácticamente la misma curva en cada ciclo. Lo mismo se aprecia en las Figura 5a y Figura 5b para una prueba cíclica a compresión a 25 °C.

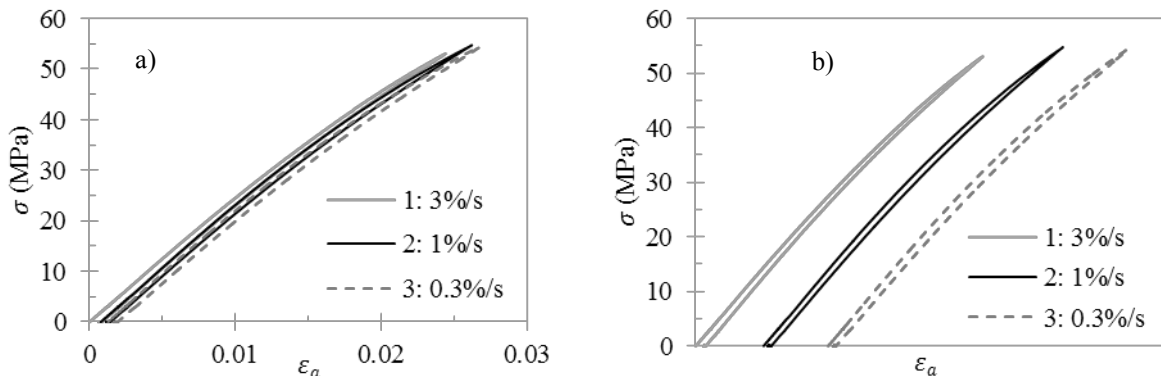


Figura 4. Comportamiento mecánico en prueba cíclica a tensión a 25 °C.

En la Figura 4a, se puede observar que las curvas correspondientes a los ciclos subsecuentes de carga comienzan en un estado de deformación distinta de cero mostrando un corrimiento de la curva de comportamiento hacia la derecha. Este efecto se debe a que después de descargar, una pequeña deformación axial permanece y comienza a disminuir durante la etapa de recuperación, dejando una pequeña deformación persistente. Los tres ciclos muestran prácticamente la misma curva esfuerzo-deformación, por lo que el comportamiento del material no depende de la velocidad de carga utilizada durante la carga y descarga en cada etapa, por lo que la no linealidad no se debe a efectos viscosos. El camino de carga y descarga siguen casi la misma trayectoria, por lo que se puede inferir un componente hipoelástico en el comportamiento del material. Después de la etapa de recuperación se mantiene una pequeña deformación axial, que puede ser debida a plasticidad. Por consiguiente, el comportamiento de estas curvas a altas velocidades de deformación puede ser explicado mediante hipoelasticidad y plasticidad. En el caso a esfuerzos a compresión (Figura 5a) se observa mejor el comportamiento hipoelástico, pues prácticamente no existen deformaciones persistentes después de cada ciclo de carga-descarga-recuperación, y las tres curvas siguen el mismo trayecto.

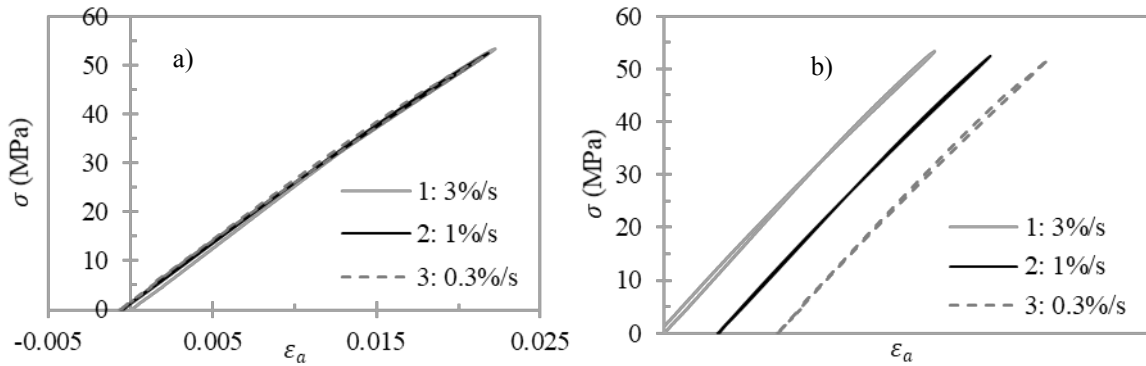


Figura 5. Comportamiento mecánico en prueba cíclica a compresión a 25 °C.

De estas pruebas cíclicas se aprecia que el PC cumple con las propiedades presentadas por Bower (4) que describen un comportamiento hipoelástico:

- El espécimen presenta deformación reversible.
- La deformación depende únicamente del esfuerzo aplicado, y no depende de la velocidad de carga (a altas velocidades de deformación), ni de la historia de carga.
- El esfuerzo es función no lineal de la deformación, en pequeñas deformaciones.
- Se asume un material es isotrópico.

Conclusiones.

En este trabajo se estudió el comportamiento mecánico del PC mediante pruebas uniaxiales a tensión y compresión a dos velocidades de deformación (una lenta y otra extremadamente rápida), y a cuatro temperaturas por debajo de la T_g del material. De este trabajo experimental se encontró para el PC:

1. Se confirma el efecto de asimetría en el PC, como lo observan otros autores.
2. Con los rangos de esfuerzos y deformaciones considerado en este trabajo, el PC exhibe un comportamiento hipoelástico no lineal para altas velocidades de deformación. Este comportamiento hipoelástico no ha sido reportado previamente.
3. Los resultados son confiables. El PC fue sometido a un rejuvenecimiento térmico antes de la prueba, de tal manera que se reestablecieron las propiedades originales del material. También se hicieron mediciones de deformación mediante galgas extensiométricas, que ofrecen mediciones confiables a niveles por debajo del 5%.

Estos resultados son importantes a tomar en cuenta en un modelo de predicción preciso del comportamiento del PC a grandes velocidades de deformación.

Bibliografía

1. *Nonlinear creep behavior of viscoelastic polycarbonate*. **Jazouli, Said, y otros**. 2006, Journal of Materials Science, Vol. 41, págs. 531-536.
2. *Tensile behavior of polycarbonate over a wide range of strain rates*. **Cao, Kan, y otros**. doi: 10.1016/j.mse.2010.03.088, 2010, Materials Science and Engineering A, Vol. 527, págs. 4056-4061.
3. *Extending the EGP constitutive model for polymer glasses to multiple relaxation times*. **van Breemen, L.C.A., y otros**. 2011, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 59, págs. 2191-2207.
4. **Bower, Allan F.** *Applied Mechanics of Solids*. s.l. : CRC Press, 2010. ISBN 978-1-4398-0247-2.
5. *Viscoelastic Behavior of HDPE Polymer using Tensile and Compressive Loading*. **Elleuch, Riadh y Taktak, Wafa**. 1, 2006, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 15, págs. 111-116. doi: 10.1361/105994906X83475.
6. *Finite elasto-viscoplastic modeling of polymers including asymmetric effects*. **Mahnken, R. y Shaban, A.** 2013, Archive of Applied Mechanics, Vol. 83, págs. 53-71. doi:10.1007/s00419-012-0632-6.
7. **Mahnken, R., y otros**. Thermoviscoplastic modelling of asymmetric effects for polymers at large strains. *International Journal of Solids and Structures*. 2008. Vol. 45, págs. 4615–4628.
8. *Modeling of the nonlinear viscoelasticity of polyoxymethylene in tension and compression*. **Tscharnutter, S. y Pinter, G.** 2012, International Journal of Engineering Science, Vol. 60, págs. 37-52.
9. *Ageing and rejuvenation in glassy amorphous polymers*. **Mahajan, Dhiraj K., Estevez, Rafael y Basu, Sumit**. 2010, Journal of the Mechanics and Physics, Vol. 58, págs. 1474-1488.
10. *Physical aging in amorphous polymers far below the glass transition temperature*. **Drozdov, Aleksey D.** 1999, Computational Materials Science, Vol. 15, págs. 422-434.
11. *Physical aging of polymers*. **Hutchinson, John M.** 4, 1995, Progress in Polymer Science, Vol. 20, págs. 703-760.
12. *Polymer ageing: physics, chemistry or engineering? Time to reflect*. **White, Jim R.** 2006, Comptes Rendus Chimie, Vol. 9, págs. 1396-1408.
13. *Viscoelasticidad y efectos de asimetría en el comportamiento mecánico del policarbonato*. **Rey Calderón, Alfredo Alán y Díaz Díaz, Alberto**. 1, 2017, Memorias Congreso Internacional de Investigación Científica Multidisciplinaria, Vol. 5, págs. 38-49.
14. *Physical aging of epoxy polymers and their composites*. **Odergard, G.M. y Bandyopadhyay, A.** doi: 10.1002/polb.22384, 2011, Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, Vol. 49, págs. 1695-1716.
15. **Covestro**. Product Center Sheets. Covestro. [En línea] [Citado el: 30 de septiembre de 2016.] <http://www.sheets.covestro.com/Products/Americas/Makrolon/Makrolon-GP/Product->

List.aspx?pid=73A35A72E65043EA9B5D0095BC652DAF®ion=8AFF11D2344143BCA7C2817A7A923E33.

16. **ASTM D695-15.** ASTM Compass. *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics.* [En línea] <https://compass.astm.org/download/D695.3083.pdf>.

17. **ASTM D638-14.** ASTM Compass. [En línea] <https://compass.astm.org/download/D638.39258.pdf>.

18. **Struik, Lendert Cornelis Elisa.** *Physical aging in amorphous polymers and other materials.* 1977.