



Received: 1/2/2022
Accepted: 18/2/2022

Anales de Edificación
Vol. 8, Nº1, 15-21 (2022)
ISSN: 2444-1309
Doi: 10.20868/ade.2022.5017

Plásticos en la industria de la construcción: resistencia a tracción del polietileno de ultra-alto peso molecular. Una alternativa a las armaduras de acero. Plastics in the construction industry: tensile strength of ultra-high molecular weight polyethylene. An alternative to steel reinforcement.

Raquel Martínez Muñoz^a, Jorge Gallego Sánchez-Torija^a, Francisco Hernández-Olivares^a

^aDepartamento de Construcción y Tecnologías Arquitectónicas, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Universidad Politécnica de Arquitectura. Madrid, España.

Resumen-- Este papel desarrolla las premisas para considerar la utilización del polietileno de ultra-alto peso molecular UHMWPE puro y proveniente de reciclado según normativa europea, como una alternativa viable al empleo de acero estructural en armaduras de hormigón. Desde las normativas europeas encaminadas a la promoción del empleo de plásticos en una economía circular, se potencian las actuaciones de reciclado de este material en todos los ámbitos y sectores susceptibles de aprovechamiento de su reutilización. Para ello, es fundamental analizar las posibilidades de este material en construcción desde un punto de vista estructural, que derivarán en la utilización del mismo como alternativa a materiales tradicionales.

Palabras clave-- Polietileno de ultra-alto peso molecular; reciclado de materiales plásticos; acero en estructuras de hormigón.

Abstract— This paper develops the premises for considering the use of pure ultra-high molecular weight polyethylene UHMWPE from recycling according to European regulations, as a viable alternative to the use of structural steel in concrete reinforcement. European regulations aimed at promoting the use of plastics in a circular economy encourage the recycling of this material in all areas and sectors that are susceptible to reuse. To this end, it is essential to analyse the possibilities of this material in construction from a structural point of view, which will lead to its use as an alternative to traditional materials.

Index Terms— Ultra-high molecular weight polythene; recycling of plastic materials; steel in concrete structures.

I. INTRODUCCIÓN

EL desarrollo de este estudio se ha circunscrito a la construcción arquitectónica que emplea sistemas constructivos de hormigón armado todavía de manera muy generalizada en España, y parte de la necesidad manifiesta y extensiva en todos los sectores de la economía e industria internacionales, de optimizar el proceso aplicación y

reutilización de materiales plásticos no biodegradables.

En la industria de la construcción y en particular el diseño de edificación residencial, el 97% de las estructuras se siguen diseñando en base a la conjunción hormigón – redondos de acero, y hasta la fecha no se está promocionando de manera extensiva la posibilidad de permitir que los esfuerzos mecánicos a los que quedan sometidas las armaduras, sean

R.M., J.S. and F.H. are full professors from Dpto. de Construcción y tecnología Arquitectónicas at Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid in Universidad Politécnica de Madrid. Av. de Juan de Herrera, 4, 28040 Madrid.

absorbidos por un sistema de entramado tubular a base de plásticos de muy altas prestaciones mecánicas, como el polietileno de ultra alto peso molecular.

Implementar este sistema constructivo en construcciones de pequeña envergadura supondría el cálculo y diseño óptimo que garantice estructuras más eficientes, utilizando tubos de polietileno de ultra alto peso molecular que permita reducir el empleo de armaduras metálicas convencionales. El objeto de este documento es señalar la necesidad de proponer una solución habitual y viable para el sector de la construcción, al respecto de la producción de polietilenos procedentes de reciclados, más allá de la reutilización de estos y su aplicación a objetos de consumo entre la población.

Para ello se discute la implantación de sistemas constructivos diseñados consecuentemente a los requerimientos de reciclado de materiales poliméricos de los últimos tiempos y su posterior reutilización en la industria de la construcción; reciclado previsto según las directrices de la DIRECTIVA (UE) 2019/904 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 5 de junio de 2019 relativa a la reducción del impacto de determinados productos de plástico en el medio ambiente (Texto pertinente a efectos del EEE). De acuerdo con esta directiva, más del 80% de los residuos desechados al mar son de naturaleza polimérica, siendo el 50% de éstos, artículos de un solo uso y aproximadamente un 27% está formado por artículos de pesca. Ambos tipos de productos representan un grave problema medioambiental puesto que no se contemplan para el reciclado y se convierten de este modo en basura dispersa no biodegradable (Jambeck, 2015).

A. Materiales plásticos. Hacia un enfoque de economía circular y un compromiso con la agenda 2030. El reciclado de plásticos como una necesidad a nivel mundial.

El empleo de materiales de naturaleza polimérica se comenzó a hacer extensivo en Europa hacia la década de los 60. Se estima que a partir del año 2020 la producción anual de plásticos a nivel mundial sobrepasará los 500 millones de toneladas, de los cuales unos 60 millones de toneladas corresponderían a la producción en Europa, lo que supone un 900% más que la década de los 80. Cierto es que los materiales plásticos pueden llegar a tener una vida útil hasta su degradación, de unos 500 años, lo que hace de éste un material muy susceptible de ser empleado por su durabilidad.

En construcción, los edificios representan aproximadamente el 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero en la Unión Europea, y el empleo de plásticos en la construcción reduciría notablemente su clasificación como basura dispersa. La agenda 2030 contempla que todos los edificios de nueva planta y rehabilitados sean energéticamente eficientes para lo que los plásticos deben jugar un papel fundamental.

Así, en la Unión Europea, los residuos plásticos están controlados por una serie de medidas y objetivos en materia de gestión, que incluyen el reciclado de envases previsto en la Directiva 94/62/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, en la que quedan marcadas las directrices de la agenda 2030, esto es, que todos los envases plásticos introducidos en el mercado sean reciclables o reutilizables. Consecuentemente, estas

medidas han de contribuir a la disminución de la basura plástica en mares y océanos. Desde la Unión Europea, no obstante, se está produciendo diferencias en cuanto al alcance de dichas medidas y lo que supondría a nivel comercial la restricción en la comercialización de plásticos de un solo uso. A pesar de esto y desde 2021, los plásticos de uso único han sido prohibidos, siendo sustituidos por materiales biodegradables.

Es indudable que el plástico es un material enormemente consolidado en el consumo contemporáneo y en proyección creciente desde hace dos décadas hasta ahora, y es portador de innumerables beneficios para el ser humano, como la contribución a la seguridad alimentaria, la industria de prótesis médicas o el empleo de materiales poliméricos ligeros en la industria automovilística, que se traduce en una reducción considerable de emisiones de CO₂ desde principios del siglo XXI.

No obstante, la producción, consumo y deshecho anual de plásticos siguen derivando en un perjuicio notable al medio ambiente. Se calcula que aproximadamente ocho millones de toneladas de plástico acaban en el mar cada año, y la cantidad total de plástico en el océano hoy en día es de unos 150 millones de toneladas (Jambeck, 2015).

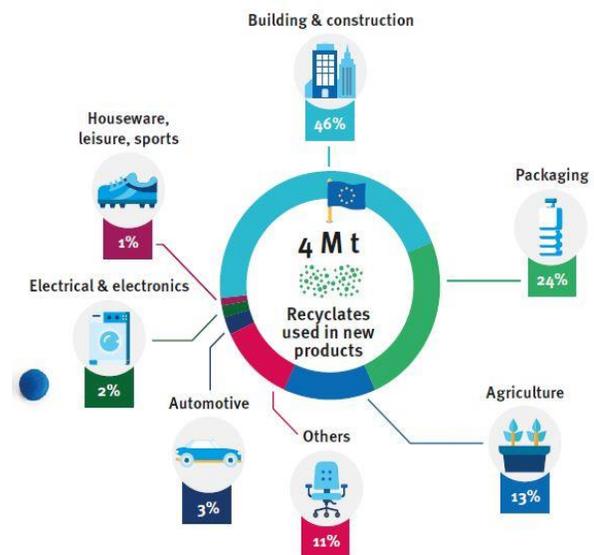


Fig. 1. Plásticos reciclados en la industria. Porcentaje anual. (Fuente: Plastics Europe. The circular economy for plastics. A European overview).



Fig. 2. Esquema de economía circular aplicada a la producción y consumo de plástico. (Fuente: Plastics Europe. The circular economy for plastics. A European overview).

En un informe de la ONU, de los aproximadamente 300 millones de toneladas de residuos plásticos anuales hasta la fecha, únicamente se recicla un 14%, y de este, el 46% se destina a la industria de la construcción (Fig. 1), pero únicamente en materiales para instalaciones y acabados. La implementación generalizada de materiales plásticos en estructuras es una propuesta en vías de desarrollo, no consolidada hoy en día.

De manera general, la política europea de reutilización y reciclado de plásticos es todavía insuficiente, siendo de urgente necesidad la implementación de procedimientos que propicien una economía circular (Fig. 2), esto es, encaminada a hacer uso de todos los ciclos de vida útil de aquellos materiales susceptibles de ser reciclado. De este modo se conseguirían beneficios muy notables y de necesaria aplicación para el medio ambiente, tales como la reducción de la extracción de combustibles fósiles para la producción de plásticos, que derivaría en una notable reducción de las emisiones de CO2 y de este modo el ahorro energético mundial podría estimarse en equivalente a 3500 millones de barriles de petróleo al año.

B. Polímeros de uso común con altas prestaciones mecánicas. El polietileno

Los plásticos de uso común y plásticos industriales son polímeros. Se trata de sustancias formadas por grandes moléculas de alto peso molecular que componen unidades estructurales que se repiten. Estas macromoléculas se forman a partir de la unión de monómeros, moléculas más pequeñas que resultan de la unión de átomos no metálicos mediante enlaces covalentes (Fig. 3).

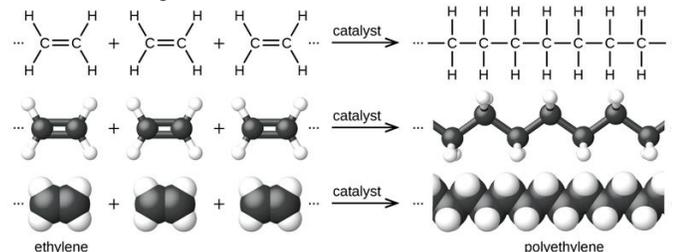


Fig. 3. Representación de cadenas poliméricas y sus monómeros de origen. (Fuente: Hauze D. Expil).

Los polímeros en estado cristalino tienen como característica fundamental en cuanto a su conformación, la secuencia parcial y en tres dimensiones de la cadena polimérica, e independientemente de los detalles de la estructura, las moléculas están dispuestas en paralelo entre sí. Son las condiciones del entorno en cuanto a presión y temperatura las que hacen que las moléculas con cierto orden estructural puedan acabar cristalizando hasta adoptar conformaciones helicoidales, como es el caso del polipropileno, o plegarse sobre sí mismas como en el caso del polietileno.

En un polímero semicristalino, son las regiones cristalizadas las que hacen del polímero un material resistente y rígido, siendo las regiones amorfas las que otorgan tenacidad y flexibilidad (Sauer, 1977). El modelo radial de conformación de polímeros semicristalinos contempla que cuando este tipo de polímeros solidifican, se forman una serie de cristales laminares en disposición radial – esferulitas- con un tamaño hasta 10

micras (Fig. 4), que se unen entre ellas mediante moléculas que conforman las zonas amorfas (Odian, 2004). Existe otra teoría de conformación de polímeros cristalinos, el modelo de micela de flecos, que considera que las cadenas o secciones de éstas se ordenan formando cristalitas dentro de una matriz amorfa. Una cadena puede formar parte de varios cristalitas y de varias regiones amorfas (Hernández, 2010).

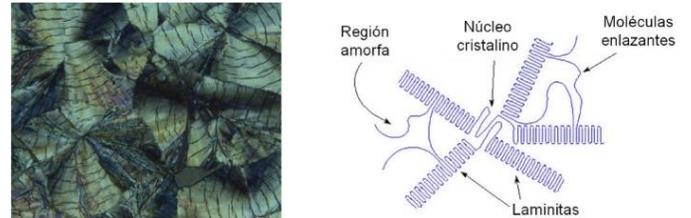


Fig. 4. Disposición radial de la Hidroxipropilcelulosa. Fuente: J. Coreño-Alonso, M.T. Méndez-Bautista. Relación estructura-propiedades de polímeros. © Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.

En una imagen TEM, la diferenciación de partes cristalinas y amorfas se hace visible, resultando en la presencia de un patrón de micelas, donde cada molécula participa en las regiones amorfa y cristalina (Katime, 2010).

El polietileno es el plástico más comúnmente utilizado en industria y consumo. Es un material termoplástico, es decir, capaz de cambiar de estado de agregación de sólido a líquido y a la inversa como consecuencia de un aumento o disminución de temperatura que propicie dicho cambio. Los materiales plásticos como el polietileno se generan desde cadenas de polímeros, que no son otra cosa que macromoléculas de carbono e hidrógeno en secuencias muy largas que se desarrollan a partir de la química orgánica, o química del carbono; Estas macromoléculas se organizan en proporciones que varían según la cantidad de hidrógeno en cada monómero (Fig. 5).

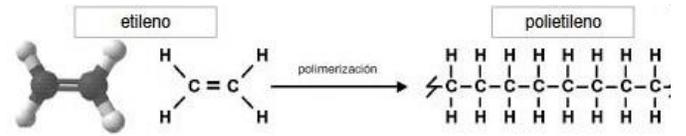


Fig. 5. Estructura química del etileno y polietileno (Fuente: Polimerización. Corinto. Pucp. Edu. Pe)

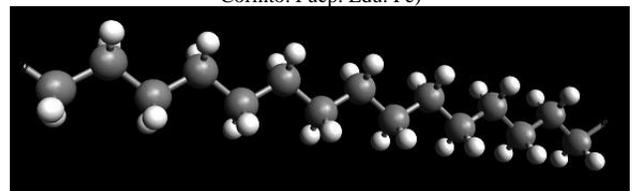


Fig. 6. Simulación 3D de molécula de polietileno (Fuente: Tecnología de los plásticos).

Más concretamente, es un plástico que se obtiene a partir de cadenas de etileno en forma de monómero (eteno según la IUPAC) unidas por enlaces dobles. Es un polímero de estructura molecular sencilla en forma de cadena larga de hidrocarburos, en las que se enlazan dos átomos de hidrógeno por cada átomo de carbono (Fig. 6) y su comercialización es enormemente extendida en todos los ámbitos de la industria, con una producción anual estimada en más de 85 millones de toneladas. Es además un material susceptible de ser reciclado con facilidad sin perder sus propiedades mecánicas. Botellas de detergente de uso común, bolsas de compra, geomembranas,

empaquetados de alimentos, etcétera, están hechas de polietileno. Su fórmula química básica, a pesar de una gran cantidad de variantes del mismo, es $(C_2H_4)_nH_2$, siendo estas variantes caracterizadas por distintos valores de n (grado de polimerización). La gran mayoría de polietilenos son muy resistentes desde un punto de vista químico a ataques de sustancias ácidas o básicas, y sus propiedades mecánicas y térmicas resultan enormemente reforzadas con la adición de fibras de refuerzo.

El Polietileno presenta un punto de fusión que varía entre los 105°C y los 115°C, en función de su densidad y su textura es similar a la parafina durante este cambio de su estado de agregación. La clasificación del polietileno depende de su densidad, así como de sus propiedades mecánicas, peso molecular y estructura cristalina.

C. UHMWPE: Un plástico de ultra alto peso molecular con unas prestaciones mecánicas óptimas.

El UHMWPE es un tipo de polietileno que debe sus características mecánicas a su muy alto peso molecular que oscila entre 3,5 y 7,5 millones de gramos/mol. Proveniente del etileno como el resto de los tipos de polietileno, el UHMWPE está formado por más de 200.000 unidades de etileno, o lo que es lo mismo, la cadena molecular de este tipo de polietileno puede llegar a tener hasta 400.000 átomos de Carbono (Duque-Morán, 2012). Su estructura interna es a su vez amorfa y semi cristalina a partes iguales. La estructura amorfa se conforma gracias un denso ovillamiento de sus moléculas, mientras que su estructura semi cristalina ofrece una disposición en lamelas perfectamente ordenadas, siendo esta ordenación dependiente de condiciones físicas en su procesamiento, tales como presión y temperatura, lo que determinará la intensidad y orientación de las lamelas semi cristalinas. (Kurtz, 2009). Dichas lamelas son capaces de producir difracción en la luz y por tanto otorgan al polietileno su apariencia blanquecina y opaca, cambiando a translúcida cuando se somete el material a temperaturas superiores a 130°C. Y estas partes quedan relacionadas mediante lo que se denominan moléculas lazo.

Es un material muy duro y tenaz, con una resistencia a tracción máxima de hasta 48 MPa (489,46kg/cm²) y un módulo de Young de unos 6.000 kg/cm², y es principalmente utilizado en engranajes industriales, entubados y maquinaria industrial ya que se trata indudablemente del plástico que mejor resiste la abrasión, chalecos antibalas e implantes en el cuerpo humano, y más recientemente en el montaje de pistas de patinaje a modo de hielo artificial. La temperatura de fusión de este polímero se encuentra entre los 132°C Y 138°C, siendo la temperatura de trabajo variable entre los -100°C y 80°C. Su muy alto peso molecular hace de éste un polímero incapaz de ser extrusionado y conformado en maquinaria convencional, por tanto, su procesado ha de hacerse por compresión o por extrusión RAM

II. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

En los ensayos de tracción uniaxial se tiene como objetivo determinar las características de resistencia mecánica a tracción y el módulo de tracción de cualquier material. Para ello, se

somete el material a una carga uniaxial hasta que se produce la rotura de este por tracción. No obstante se pueden obtener resultados irregulares debidos a causas como una superficie defectuosa del material que facilite un punto de rotura debido a tensiones superficiales derivados de dichas imperfecciones, unas condiciones ambientales no adecuadas para la realización del ensayo, como un exceso o defecto de humedad relativa, fallos derivados de errores en la calibración, una elección inadecuada de la velocidad a la que se somete la probeta a la carga uniaxial, una sujeción deficiente de las probetas, un aumento de carga aplicado de manera no uniforme, etc.

A. Ensayo ISO 527-2.

La norma ISO 527-2 se emplea de manera internacional y estandarizada para determinar la respuesta mecánica a tracción de cualquier tipo de termoplásticos rígidos y semirrígidos obtenidos por medios que excluyen generalmente la inyección, y se considera equivalente a la norma ASTM D638 en cuanto a la determinación de propiedades del polímero, pero no así en lo referente a requisitos de dimensionado de las probetas. Aunque se trata de una norma internacional, este tipo de ensayos resultan más frecuentes en Europa y Asia, frente a las ASTM D638 más común en el continente americano. El ensayo según la norma ISO 527-2 se realiza comúnmente en una máquina universal con suficiente capacidad de carga que se produzca la falla de la probeta.

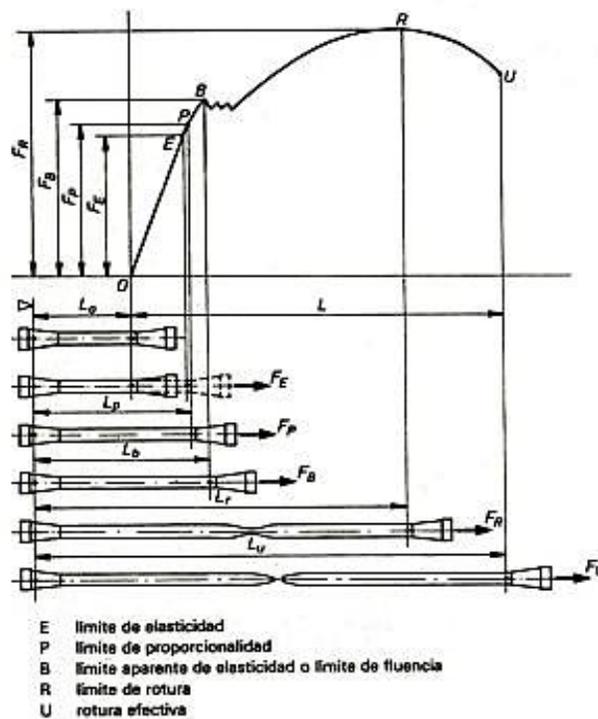


Fig. 7. Diagrama tensión deformación. Esquema de deformación de probetas "hueso de perro" (Fuente: norma ISO 527-1-2)

Se utilizan probetas de UHMWPE que se moldean por compresión en forma hueso de perro con dimensiones según norma (Fig. 7) (Fig. 8) (Tabla 1).

Se introduce el área de sección transversal que incluye espesor y ancho de la pieza con el objeto de conseguir medidas

de tensión además de medidas de fuerza, debido a que la tensión es el cociente entre la fuerza aplicada sobre una superficie y el área de sección transversal, tomando como unidades de tensión los kg/mm², MPa o GPa en estas mediciones.

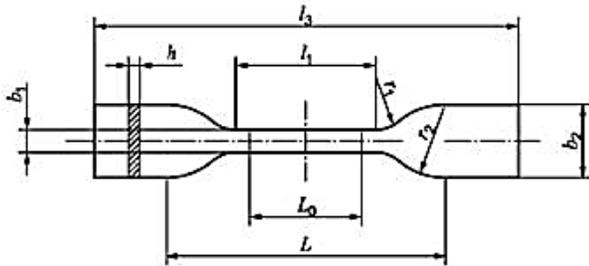


Fig. 8. Esquema de probeta normalizada tipo 5 (Fuente: norma ISO 527-1-2)
 TABLA I

DIMENSIONES DE LAS PROBETAS TIPO 5. (FUENTE: NORMA ISO 527-1-2)

	Tipo de probeta	5A*	5B*
l_3	Longitud total	≥ 75	≥ 35
b_2	Anchura de los extremos	12.5 ± 1	6 ± 0.5
l_1	longitud de la parte estrecha de caras paralelas	25 ± 1	12 ± 0.5
b_1	Anchura de la parte estrecha	4 ± 0.1	2 ± 0.1
r_1	Radio pequeño	8 ± 0.5	3 ± 0.1
r_2	Radio grande	12.5 ± 1	3 ± 0.1
L	Distancia inicial entre las mordazas	50 ± 2	20 ± 2
L_0	Longitud de referencia	20 ± 0.5	10 ± 0.2
h	Espesor	2 ± 0.2	1 ± 0.1

NOTA Los tipos de probetas 5A y 5B son similares al tipo 5 de la Norma ISO 527-3 y representan, respectivamente, los tipos 2 y 4 de la Norma ISO 37

*Medidas en mm

El procedimiento se realiza de la siguiente manera. La probeta de UHMWPE (Fig. 9) se coloca verticalmente y se pinza por los extremos mediante mordazas que la sujetan a la máquina de ensayo universal (Fig. 10). La probeta se coloca verticalmente y se pinza por los extremos mediante mordazas que la sujetan a la máquina de ensayo universal, con fuerza o capacidad de carga en Newtons suficientemente alta para producir su rotura.

La probeta se agarra con los extensómetros, que son los dispositivos encargados de tomar las medidas de tensión y deformación. Se aplica esta fuerza a velocidad constante y lenta y la probeta se va alargando de manera longitudinal y acortando en sentido transversal.



Fig. 9. Probetas "hueso de perro" UHMWPE dimensionadas según norma ISO. (Fuente: elaboración propia)

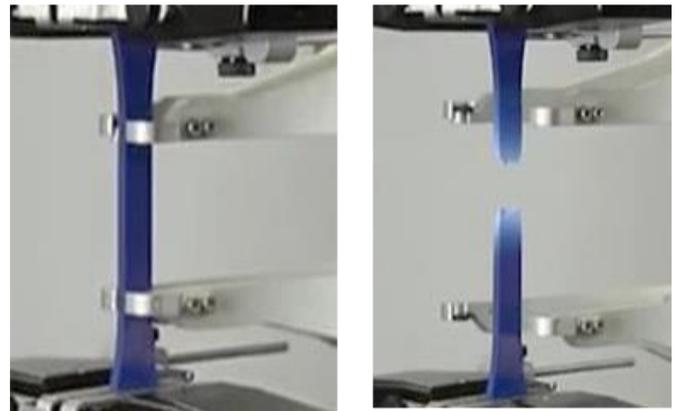


Fig. 10. Ensayo de tracción uniaxial sobre las probetas en máquina universal. (Fuente: elaboración propia)

III. RESULTADOS

El ensayo de tracción uniaxial de probetas según norma ISO 527-2 tiene como resultado unos parámetros definidos que se miden a partir de la carga aplicada y el desplazamiento del cabezal en la máquina universal de ensayos, y que permiten diseñar, en su caso, una curva de tensión-deformación y recoger en una tabla comparativa los resultados de resistencia a tracción obtenidos. La prueba de tracción en las probetas determinan los parámetros a considerar, que son el Módulo de Young (E), esfuerzo de tracción último (σ_{UTS}) el esfuerzo de cedencia (σ_y), la elongación en porcentaje calculada en el punto de esfuerzo de cedencia antes de sobrepasar el estado elástico del material, y el porcentaje de deformación máxima dentro del estado plástico del material hasta el esfuerzo de tracción último.

El esfuerzo de cedencia determina la capacidad de un material para deformarse permanentemente antes de llegar al punto de rotura. Es la tensión del material al alcanzar el límite de fluencia o cedencia, punto a partir del cual el material pasa de tener un comportamiento elástico a plástico, y se producen incrementos de deformación sin aumentos significativos de la carga. El esfuerzo de tracción último muestra la capacidad resistente de tracción del material justo en el instante del fallo de la probeta y rotura de la misma. El módulo de Young o módulo de elasticidad determina la relación entre la tensión y la reformation unitaria en la región elástica.

TABLA II
 RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DE LAS PROBETAS

σ_y (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	E (MPa)	ξ (n/d) % límite elástico	ξ (n/d) % límite plástico
20,571	42,312	661,025	6,4	455
17,540	41,152	437,787	9,4	410

Existen diferencias en cuando a los resultados obtenidos en las pruebas de tracción, que se interpretan como variaciones en el corte y procesado del material. Además, el polietileno es un material anisótropo, es decir, el comportamiento mecánico del material depende de la dirección cristalográfica en la que se miden las propiedades del mismo. Parece por tanto plausible determinar una relación entre la estructura cristalina y las propiedades mecánicas del polietileno. En el momento en que aumenta la región cristalina en el polímero, un exceso de zona amorfa – región caótica o enredada, queda atrapada en la zona

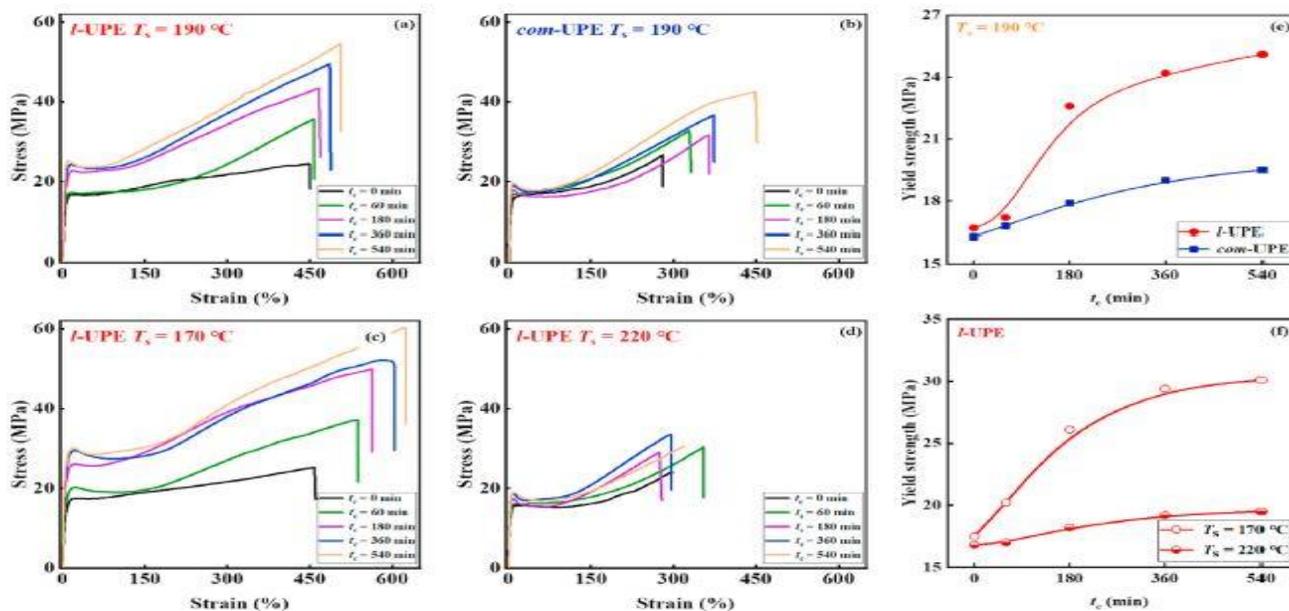


Fig. 11. curvas de tensión-deformación de probetas UHMWPE obtenidas y cristalizadas a diferentes temperaturas (a), (b), (c), y evolución del esfuerzo de cedencia en función de la temperatura (e), (f). (Fuente: P. Dong, Q. Zhang, K. Wang, B.H. Zhu, W. Su, J.F. Li, Q. Fu, Pursuit of the correlation between yield strength and crystallinity in sintering-molded UHMWPE. *Polymer*. 215. 123352. 10.1016/j.polymer.2020.123352, diciembre de 2020.)

cristalina y puede producir defectos en la estructura. Por otro lado si la zona caótica es muy densa, el crecimiento de los cristales poliméricos se verá reducido (Dong, 2020). En este sentido, las muestras que poseen una baja densidad en la zona caótica son susceptibles de soportar mejor la deformación hasta la rotura. El control de esta densidad baja es posible con parámetros de reducción de temperatura de procesamiento del material, consiguiendo de este modo mayor porcentaje de cristalinidad y más alta temperatura de fusión para el UHMWPE.

IV. CONCLUSIONES

Los polímeros semicristalinos como el UHMWPE presentan unas respuestas determinadas en régimen visco-elástico que derivan en comportamiento visco-plástico en su punto de esfuerzo de cedencia (Fig. 11) que varía en función de la temperatura de conformado y cristalización. No obstante y atendiendo a los resultados que se obtienen en ensayos de tracción uniaxial, se puede afirmar de manera generalizada que se trata de un material susceptible de ser utilizado como una alternativa viable al acero estructural en armaduras, para estructuras de pequeña envergadura, particularmente en construcción residencial unifamiliar. Analizando una comparativa entre el acero estructural y el polietileno de ultra alto peso molecular, se puede establecer una correlación entre ambos materiales atendiendo a su capacidad de resistencia a los esfuerzos de tracción. Así, para un acero AISI 304 laminado en frío para estructuras porticadas se obtiene una tensión a tracción último diez veces superior a la media del UHMWPE, lo que hace plausible en empleo de este en barras corrugadas para estructuras de pequeña envergadura, siendo la futura línea de actuación de este planteamiento el diseño y dimensionado de las barras de UHMWPE y su conformación como composite polímero-fibra de carbono, que reduciría la diferencia con las prestaciones del acero considerablemente.

AGRADECIMIENTOS

Dr. Alberto Jiménez Suárez, profesor titular del Departamento de Matemática Aplicada, Ciencia e Ingeniería de Materiales y Tecnología Electrónica. Dra. Araceli Flores Aguilar-Amat, Científico Titular de OPIs en el Departamento de Física Macromolecular. Dr. Matthias Merzkirch, Researcher Structural Materials Testing & Optical Metrology.

REFERENCES

- P. Dong, Q. Zhang, K. Wang, B.H. Zhu, W. Su, J.F. Li, Q. Fu, Pursuit of the correlation between yield strength and crystallinity in sintering-molded UHMWPE. *Polymer*. 215. 123352. 10.1016/j.polymer.2020.123352, diciembre de 2020.
- J. F. Duque Morán, R. Navarro Navarro, R. Navarro García, J.A. Ruiz Caballero, *Tribología y materiales en pares friccionales metal-polietileno*. Canarias Médica y Quirúrgica Vol. 10 - Nº 28 – 2012
- S., R. A. Hernández, Esterificación de la hidroxipropilcelulosa con derivados de bifenilo. Tesis: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México, 2010.
- I. Katime, J.R. Quintana, M. Villacampa, Grupo de Nuevos Materiales y Espectroscopia Supramolecular. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. Volumen 4(2), abril de 2003.
- S.M. Kurtz, *UHMWPE Biomaterials Handbook*. Ultra-High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices. Ed. Academic Press, 2009.
- J.R. Jambeck, R. Geyer, C. Wilcox, T. Perryman, A. Andrady, R. Narayan, K.L. Law Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 13 Feb 2015: Vol. 347, Issue 6223, pp. 768-771. DOI: 10.1126/science.1260352.
- G. Odian, *Principles of polymerization*. USA: Wiley-Interscience, 2004.
- J.A. Sauer, K.P. Pae., *Mechanical properties of high polymers*,

in: H.S. Kaufman (Eds.), Introduction to polymer science and technology: An SPE textbook, Wiley-Interscience Publication, New York, USA 1977, pp. 302-423.

- A. Alonso, A. Rodríguez, J. Gadea, S. Gutiérrez-González, V. Calderón. (2019) Impact of Plasterboard with Ladle Furnace Slag on Fire Reaction and Thermal Behavior. Fire Technology 55, 1733–1751. AENOR, "Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo. UNE-EN 13279-2:2014." Madrid: AENOR: 2014.



Reconocimiento – NoComercial (by-nc): Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.