



Ingeniería de polímeros y materiales compuestos

Problemas resueltos

Diego Sebastián Lascano Aimacaña | Juan Ivorra Martínez
Luis Jesús Quiles Carrillo | Néstor Montañés Muñoz
Rafael Antonio Balart Gimeno



Editorial
Universitat Politècnica
de València

Diego Sebastián Lascano Aimacaña
Juan Ivorra Martínez
Luis Jesús Quiles Carrillo
Néstor Montañés Muñoz
Rafael Antonio Balart Gimeno

Ingeniería de polímeros y materiales compuestos: problemas resueltos



Editorial

Universitat Politècnica
de València

Colección *Académica*

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita: Lascano Aimacaña, D. S.; Ivorra Martínez, J.; Quiles Carrillo, L. J.; Montañés Muñoz, N.; Balart Gimeno, R. A. (2021). Ingeniería de polímeros y materiales compuestos: problemas resueltos. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València

© Diego Sebastián Lascano Aimacaña
Juan Ivorra Martínez
Luis Jesús Quiles Carrillo
Néstor Montañés Muñoz
Rafael Antonio Balart Gimeno

© 2021, Editorial Universitat Politècnica de València
Venta: www.lalibreria.upv.es / Ref.: 0313_04_01_01

Imprime: Byprint Percom, S. L.

ISBN: 978-84-9048-983-3
Impreso bajo demanda

Si el lector detecta algún error en el libro o bien quiere contactar con los autores, puede enviar un correo a edicion@editorial.upv.es

La Editorial UPV autoriza la reproducción, traducción y difusión parcial de la presente publicación con fines científicos, educativos y de investigación que no sean comerciales ni de lucro, siempre que se identifique y se reconozca debidamente a la Editorial UPV, la publicación y los autores. La autorización para reproducir, difundir o traducir el presente estudio, o compilar o crear obras derivadas del mismo en cualquier forma, con fines comerciales/lucrativos o sin ánimo de lucro, deberá solicitarse por escrito al correo edicion@editorial.upv.es

Impreso en España

Índice

Introducción	1
I. Estructura de materiales poliméricos	5
Estructura de cadenas poliméricas	
Estructura de copolímeros	
Estructura de polímeros reticulares	
Vulcanización de cauchos	
II. Análisis térmico de polímeros	47
Determinación cuantitativa de mezclas	
Determinación cuantitativa de aditivos	
Degradación de polímeros	
III. Comportamiento mecánico de materiales poliméricos	69
Fluencia, relajación y recuperación	
Modelización del comportamiento mecánico	
IV. Materiales compuestos	123
Cálculo de propiedades de láminas	
Cálculo de propiedades de laminados	
Respuesta de láminas y laminados sometidos a diferentes estados tensionales	
Apéndices	197
Apéndice I. Tablas	199
Apéndice II. Gráficos.....	223
Apéndice III. Resolución de ecuaciones diferenciales	227
Bibliografía	229

Introducción

Este libro de texto surge de la necesidad de afianzar ciertas competencias en el campo de la Ciencia y Tecnología de Materiales, que se adquieren en la formación de los ingenieros. En particular, se centra en la resolución de problemas ligados a dos grandes grupos de materiales, ampliamente utilizados en ingeniería: materiales poliméricos y materiales compuestos. A lo largo de la formación de los ingenieros en el ámbito industrial, el estudio de materiales y su relación con otras disciplinas de la ingeniería, tales como el diseño, cálculo, fabricación, representa un pilar básico para adquirir las competencias apropiadas para una correcta selección/uso de estos en aplicaciones técnicas. Este libro de problemas resueltos está dirigido a cualquier lector que tenga interés en profundizar en su formación en el ámbito de los materiales poliméricos y los compuestos ya que la resolución de los problemas le permitirá reforzar las competencias para el diseño, cálculo y utilización de estos materiales en diversos ámbitos de la ingeniería.

El libro está estructurado en 4 grandes bloques. El primer bloque se centra en la estructura de los materiales poliméricos. Si bien la mayoría de los problemas resueltos guían o amplían los conocimientos necesarios para su resolución, para un apropiado seguimiento de los problemas seleccionados, es conveniente que el lector repase o revise los conceptos básicos de las estructuras orgánicas (grupos funcionales), y cómo se obtienen las macromoléculas mediante procesos de polimerización. Conceptos como monómero, grado de polimerización, copolímeros, energía de enlace, geometría de enlaces, peso molecular, etc., entre otros, son interesantes para un aprovechamiento más sólido de los problemas resueltos contenidos en este bloque. En cuanto a herramientas matemáticas, es importante destacar que la mayoría de los problemas propuestos en los cuatro bloques no requieren herramientas matemáticas avanzadas para su resolución. No obstante, en algunos problemas, es conveniente refrescar ciertos contenidos matemáticos ligados a derivadas, integrales, trigonometría y análisis matricial. Con los problemas resueltos descritos en el Bloque I, se afianzará el concepto de polímero, cadena polimérica, peso molecular/distribución de pesos moleculares, estructura y diseño de copolímeros y análisis de reacciones de reticulación. Todos estos aspectos reforzarán las competencias del lector en el campo de la estructura de polímeros, tanto termoplásticos, como termoestables y elastómeros.

El segundo bloque proporciona una serie de problemas relacionados con la utilidad de las Técnicas de Análisis Térmico en la caracterización de materiales poliméricos, mezclas, copolímeros, etc. Es conveniente que el lector se familiarice con las técnicas de calorimetría diferencial de barrido (DSC) y análisis termogravimétrico (TGA), fundamentalmente, para realizar un seguimiento de los ejercicios resueltos. El Bloque II aborda el empleo de estas técnicas para la identificación de materiales poliméricos, mezclas, copolímeros, aspecto de gran relevancia en la actividad profesional del ingeniero. Además, se contemplan otras aplicaciones de gran utilidad en la caracterización de materiales poliméricos, tales como el contenido en humedad, la presencia de aditivos o estudio de estequiometría de reacción en materiales termoestables. Con estos problemas, se refuerza la competencia ligada al empleo de técnicas de Análisis Térmico para identificación y caracterización de materiales poliméricos, de tanta relevancia en los laboratorios de las empresas del sector.

El Bloque III se centra en el comportamiento mecánico de materiales poliméricos. Los conocimientos previos que se recomiendan para un correcto seguimiento son los relacionados con los fenómenos de viscoelasticidad en polímeros, fundamentalmente los fenómenos de fluencia y relajación de tensiones. El bloque aborda la particularidad del comportamiento mecánico de los materiales poliméricos y cómo este comportamiento varía con el tiempo debido a la naturaleza viscoelástica de los polímeros. Se presentan una serie de problemas reales de diseño y cálculo con materiales poliméricos considerando curvas reales de fluencia y, además, el bloque introduce al lector en el campo de la modelización matemática del comportamiento viscoelástico de materiales poliméricos, así como la utilidad de estos modelos matemáticos para predecir la respuesta de un material polimérico en función del tiempo. Este bloque consolida las competencias ligadas al comportamiento mecánico de materiales poliméricos, relacionadas con la interpretación de las curvas de fluencia, de relajación e isócronas.

El último bloque de este libro de texto se centra en los materiales compuestos, fundamentalmente laminados de materiales compuestos. Los conocimientos previos que se requieren están ligados a la estructura de estos materiales, fundamentalmente los tipos de matrices poliméricas empleadas, así como los elementos de refuerzo (fibras), y los fenómenos de interacción en la entrecara fibra-matriz. Este bloque también afianza las competencias ligadas al análisis de materiales con comportamiento anisotrópico, dada la marcada direccionalidad de las fibras de refuerzo empleadas en los laminados. El bloque aborda la Teoría Clásica de Laminados (TCL), como herramienta básica en el diseño y análisis de laminados de material compuesto, capacitando al lector en tareas de diseño avanzados con este grupo de materiales. Además de la TCL se

resuelven diversos problemas de materiales compuestos con fibras y la utilidad de los modelos micromecánicos en el análisis de materiales compuestos.

Esperamos que este texto ayude al lector a afianzar, mediante la resolución de problemas teóricos y reales, los aspectos más relevantes relacionados con la ciencia y tecnología de materiales poliméricos y compuestos, contribuyendo, de esta manera, a ampliar las capacidades para la correcta selección, diseño y uso de estos materiales en el ámbito de la ingeniería.

I. Estructura de materiales poliméricos

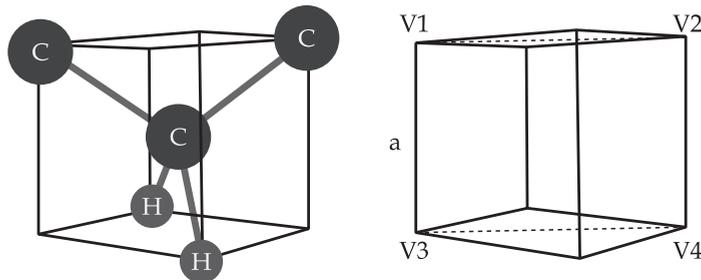
Problema I.1

Una cadena polimérica de polietileno (PE), está formada por 1000 átomos de carbono. Si se considera que la cadena es completamente lineal, que no presenta ramificaciones y que, además, no se considera la contribución de los grupos terminales, estimar la longitud de la cadena principal.

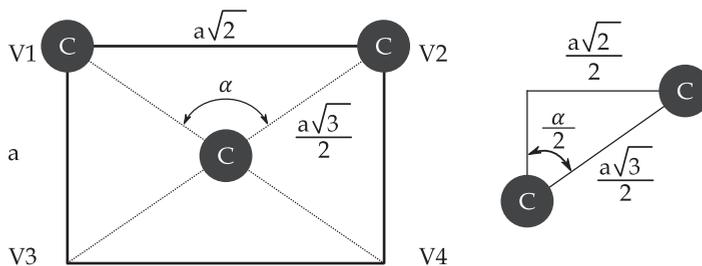
Solución

El polietileno es un polímero de estructura sencilla, cuyo monómero y representación 3D se muestra a continuación.

En primer lugar, es necesario conocer el ángulo formado entre dos átomos de carbono. Para ello, basta con tener en cuenta que el carbono presenta una hibridación sp^3 , con 4 orbitales dirigidos hacia los vértices opuestos de un cubo. Teniendo en cuenta que cada átomo de carbono está unido a dos átomos de carbono (formando la cadena principal) y dos átomos de hidrógeno, se tiene la siguiente representación.

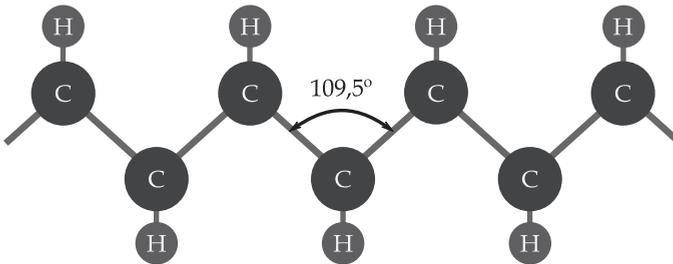


El corte de esta estructura por un plano que pasa por V1, V2, V3 y V4, deja la siguiente sección que permite determinar el ángulo formado por dos átomos de carbono, según las relaciones geométricas que se muestran.



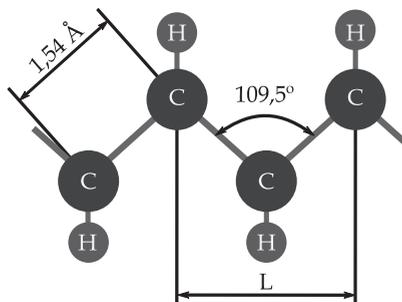
$$\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{\frac{a \cdot \sqrt{2}}{2}}{\frac{a \cdot \sqrt{3}}{2}} \Rightarrow \alpha = 109,5^\circ$$

En consecuencia, la cadena principal de átomos de carbono presenta una disposición como la que se muestra en el gráfico, con un ángulo entre enlaces de $109,5^\circ$.



Teniendo en cuenta que la unidad monomérica está formada por 2 átomos de carbono y considerando el valor de la longitud del enlace sencillo C - C (Tabla 4 del Apéndice I) que es de $1,54 \text{ \AA}$, se puede determinar la longitud entre 2 átomos de carbono (unidad monomérica o L_{mero}) situados en la misma zona del plano de simetría:

$$L_{\text{mero}} = 2 \cdot \left[1,54 \cdot \sin\left(\frac{109,5}{2}\right) \right] = 2,52 \text{ \AA}$$

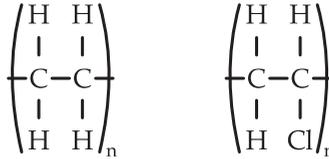


La longitud total media (L_T) de la cadena polimérica de polietileno será:

$$L_T = L_{\text{mero}} \cdot N^\circ\text{meros} = 2,52 \cdot \frac{1000}{2} = 1260 \text{ \AA} \rightarrow 126,0 \text{ nm}$$

Problema I.2

Deducir cómo puede afectar el calentamiento a altas temperaturas en el proceso de degradación térmica de la estructura del polietileno (PE) y policloruro de vinilo (PVC).



Polietileno (PE) Policloruro de vinilo (PVC)

Solución

La deducción se puede realizar en base a la fortaleza o energía de los diferentes enlaces que aparecen en las estructuras. Según la Tabla 4 del Apéndice I, estas energías son:

enlace	energía de disociación	
	(kcal/mol)	(kJ/mol)
C - H	99	414,22
C - C	83	347,27
C - Cl	81	338,90

En el polietileno (PE), el primer enlace que se rompe por efecto del calentamiento a altas temperaturas es el enlace C - C, correspondiente a la cadena principal. La rotura de estos enlaces provoca el fraccionamiento de la cadena principal incidiendo en una disminución del peso molecular.

Por el contrario, en el policloruro de vinilo (PVC), el primer enlace que se rompe por efecto del calor es el C - Cl. La rotura posterior del enlace C - H provoca la formación de HCl que se desprende en forma de gas incidiendo en una importante degradación. Al mismo tiempo, el gas que se desprende es altamente corrosivo y puede generar gran cantidad de problemas, sobre todo en los procesos de transformación.

En consecuencia, el efecto del calentamiento es más perjudicial para el PVC que para el PE ya que el enlace C - Cl presente en el PVC es el de menor fortaleza, de ahí que sea más inestable térmicamente. De hecho, el PVC a nivel industrial necesita la incorporación de ciertos aditivos que lo estabilicen frente a la temperatura, para evitar su degradación y la de los equipos que están en contacto con éste, ya que el ácido que desprende es muy corrosivo.

Problema I.3

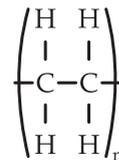
La tabla siguiente muestra la distribución de pesos moleculares en una muestra de polietileno (PE). Determinar el grado de polimerización medio para este polietileno.

rango de pesos moleculares (g/mol)	fracción relativa f_i
60000 - 70000	0,02
70000 - 80000	0,08
80000 - 90000	0,13
90000 - 100000	0,19
100000 - 110000	0,17
110000 - 120000	0,14
120000 - 130000	0,11
130000 - 140000	0,08
140000 - 150000	0,05
150000 - 160000	0,02
160000 - 170000	0,01

$$\Sigma f_i = 1$$

Solución

En primer lugar, es necesario determinar el peso molecular medio para el polietileno en base a la información presentada. Para ello, basta con considerar para cada rango de pesos moleculares el valor medio como peso representativo del rango. Con estos datos construimos una tabla como la siguiente:



Polietileno (PE)

rango de pesos moleculares (g/mol)	peso molecular medio M_i (g/mol)	fracción relativa f_i	$f_i \cdot M_i$
60000 – 70000	65000	0,02	1300
70000 – 80000	75000	0,08	6000
80000 – 90000	85000	0,13	11050
90000 – 100000	95000	0,19	18050
100000 – 110000	105000	0,17	17850
110000 – 120000	115000	0,14	16100
120000 – 130000	125000	0,11	13750
130000 – 140000	135000	0,08	10800
140000 – 150000	145000	0,05	7250
150000 – 160000	155000	0,02	3100
160000 – 170000	165000	0,01	1650
		$\Sigma f_i = 1$	$\Sigma f_i \cdot M_i = 106900$

El peso molecular medio \bar{M} de este polietileno es de **106900 g/mol**.

Para determinar el grado de polimerización, es necesario conocer el peso de un mero de polietileno.

$$\begin{array}{rcl}
 2 \text{ át. C/mero} & \times 12 \text{ g/mol} & = 24 \\
 4 \text{ át. H/mero} & \times 1 \text{ g/mol} & = 4 \\
 \hline
 M_{\text{Mero}} & = & 28 \text{ g/(mol} \cdot \text{mero)}
 \end{array}$$

El grado de polimerización, resulta del cociente entre el peso molecular medio de las cadenas poliméricas entre el peso de una unidad monomérica de polietileno.

$$GP = \frac{\bar{M}}{M_{\text{Mero}}} = \frac{106900 \text{ g/mol}}{28 \text{ g/(mol} \cdot \text{mero)}} = 3817,86 \text{ meros}$$

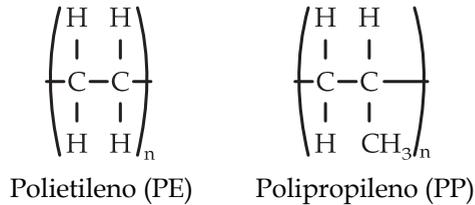
Problema I.4

Determinar el peso molecular medio de la unidad monomérica para un copolímero de etileno y propileno con un 65% en peso de etileno y un 35% de propileno.

Solución

El copolímero estará formado por cadenas en las que habrá presente monómeros de etileno y de propileno en determinada proporción.

Esta proporción, se puede calcular en base a las fracciones molares de cada uno de los componentes presentes en el copolímero.



Si se consideran 100 g de copolímero, las fracciones molares de etileno y propileno presentes son las siguientes:

Moles de etileno

$$\begin{array}{rcl} 2 \text{ át. C} & \times & 12 \text{ g/mol} & = & 24 \\ 4 \text{ át. H} & \times & 1 \text{ g/mol} & = & 4 \\ \hline & & M_{\text{Mero}} & = & 28 \text{ g}/(\text{mol} \cdot \text{mero}) \end{array}$$

Como el copolímero posee un 65% en peso de etileno, los moles presentes en 100 g de copolímero son:

$$N^{\circ} \text{ moles etileno} = \frac{65 \text{ g}}{28 \text{ g/mol}} = 2,32 \text{ moles}$$

Moles de propileno

$$\begin{array}{rcl} 3 \text{ át. C} & \times & 12 \text{ g/mol} & = & 36 \\ 6 \text{ át. H} & \times & 1 \text{ g/mol} & = & 6 \\ \hline & & M_{\text{Mero}} & = & 42 \text{ g}/(\text{mol} \cdot \text{mero}) \end{array}$$

Como el copolímero posee un 35% en peso de propileno, los moles presentes en 100 g de copolímero son:

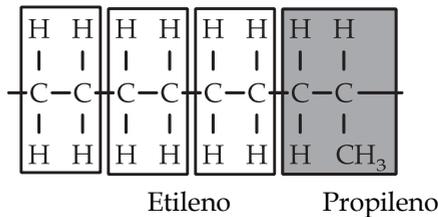
$$\text{N}^\circ \text{ moles propileno} = \frac{35 \text{ g}}{42 \text{ g/mol}} = 0,83 \text{ moles}$$

Las fracciones molares de los dos monómeros vendrán dadas por:

$$X_{\text{etileno}} = \frac{2,32}{2,32 + 0,83} = 0,7365$$

$$X_{\text{propileno}} = \frac{0,83}{2,32 + 0,83} = 0,2635$$

Esto indica que el copolímero posee un 73,65 % de monómero de etileno y un 26,35 % de monómero de propileno, o lo que es lo mismo, aproximadamente, cada 3 monómeros de etileno aparece uno de propileno.



A partir de las fracciones molares, el peso molecular medio de la unidad básica del copolímero es:

$$\bar{M} = X_{\text{etileno}} \cdot M_{\text{mero[Etileno]}} + X_{\text{propileno}} \cdot M_{\text{mero[Propileno]}}$$

$$\bar{M} = 0,7365 \cdot 28 + 0,2635 \cdot 42 = 31,69 \text{ g}/(\text{mol} \cdot \text{mero})$$

Problema I.5

La proporción de monómeros en un copolímero de cloruro de vinilo - acetato de vinilo es de 3:1. Suponiendo un grado de polimerización medio de 220, determinar el peso molecular medio de dicho copolímero.

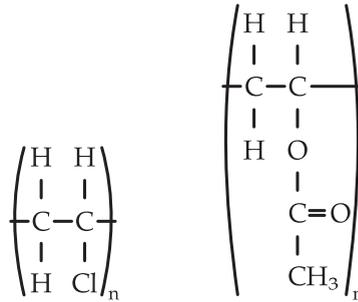
Solución

Según la información proporcionada por el enunciado, la unidad monomérica del copolímero posee 3 meros de cloruro de vinilo y 1 mero de acetato de vinilo.

A partir de esta proporción, se puede determinar la fracción molar de cada uno de los componentes del copolímero.

$$X_{\text{Cloruro}} = \frac{3}{1+3} = 0,75$$

$$X_{\text{Acetato}} = \frac{1}{1+3} = 0,25$$



Polichloruro de vinilo (PVC)

Poliacetato de vinilo (PVAc)

Peso del monómero de cloruro de vinilo:

2 át. C	x	12 g/mol	=	24
3 át. H	x	1 g/mol	=	3
1 át. Cl	x	35,5 g/mol	=	35,5
M_{Mero}			=	62,5 g/(mol · mero)

Peso del monómero de acetato de vinilo:

4 át. C	x	12 g/mol	=	48
6 át. H	x	1 g/mol	=	6
2 át. O	x	16 g/mol	=	32
M_{Mero}			=	86 g/(mol · mero)

El peso molecular medio de la unidad monomérica del copolímero es:

$$\bar{M}_{\text{Mero}} = 0,75 \cdot 62,5 + 0,25 \cdot 86 = 68,375 \text{ g/(mol · mero)}$$

Teniendo en cuenta que el grado de polimerización es 220, el peso molecular medio de las cadenas del copolímero es:

$$\bar{M} = GP \cdot \bar{M}_{\text{Mero}} = 220 \cdot 68,375 = 15042,5 \text{ g/mol}$$

Problema I.6

En un ensayo de control de calidad en una planta de polimerización de poliestireno (PS) se determina el peso molecular medio del polímero mediante la medida de la viscosidad de una disolución del polímero en un disolvente. Si el valor del peso molecular medio está en el rango 130000 - 140000 g/mol, el proceso de producción se ha desarrollado correctamente y el producto es válido. En caso contrario, el producto se desecha.

Uno de los ensayos realizados sobre un producto acabado de polimerizar ha dado los resultados que se muestran en la tabla. Determinar si el producto será válido o no.

Disolvente: ciclohexano.

Temperatura: 35 °C.

ensayo	concentración (g/dl)	tiempo (s)
1	0	72,00
2	0,202	76,39
3	0,399	81,14
4	0,608	86,76
5	0,810	92,66
6	1,000	99,07

Solución

La viscosidad de un polímero en un disolvente está relacionada con el peso molecular medio del polímero según la expresión:

$$[\eta] = k \cdot \bar{M}^a$$

Donde $[\eta]$ es la viscosidad intrínseca de la disolución cuando la concentración del polímero tiende a cero, k y a son constantes que dependen del polímero, del disolvente y la temperatura. Según la Tabla 6 del Apéndice I, para el ciclohexano a 35 °C, estas constantes adoptan los siguientes valores:

$$k = 76,0 \cdot 10^{-5} \text{ dl/g} \quad a = 0,50$$

Para determinar la viscosidad intrínseca de la disolución cuando la concentración tiende a cero, es necesario determinar la viscosidad reducida para los diferentes

valores de concentración considerados. Posteriormente, extrapolar el resultado para una concentración de cero.

La relación entre los diferentes tipos de viscosidad es la siguiente:

$$[\eta_{rel}] = \frac{t}{t_s}$$

$$[\eta_{esp}] = \eta_{rel} - 1$$

$$[\eta_{red}] = \frac{\eta_{esp}}{c}$$

Siendo:

η_{rel} viscosidad relativa.

η_{esp} viscosidad específica.

η_{red} viscosidad reducida.

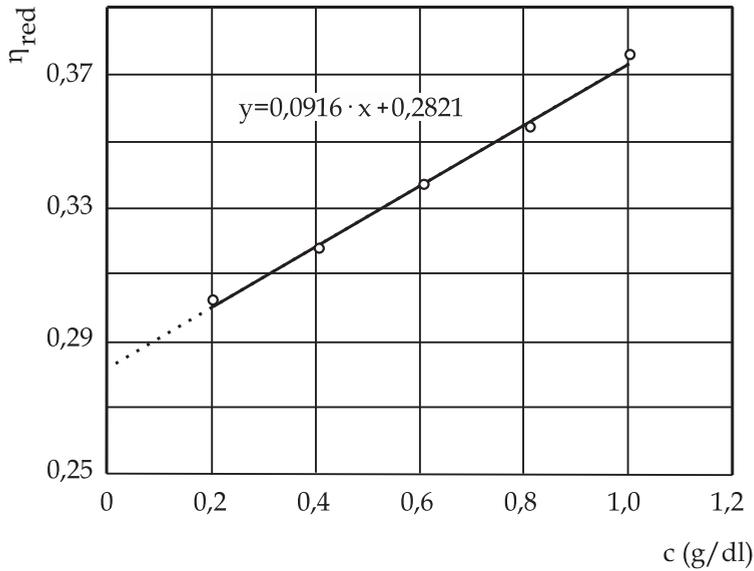
t tiempo de paso de la disolución entre las dos marcas del viscosímetro.

t_s tiempo de paso del disolvente entre las dos marcas del viscosímetro cuando la concentración de polímero es 0.

c concentración de polímero en la disolución.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se construye la siguiente tabla:

ensayo	concentración (g/dl)	t (s)	η_{rel}	η_{esp}	η_{red}
1	0,000	72,00	-	-	-
2	0,202	76,39	1,061	0,061	0,302
3	0,399	81,14	1,127	0,127	0,318
4	0,608	86,76	1,205	0,205	0,337
5	0,810	92,66	1,287	0,287	0,354
6	1,000	99,07	1,376	0,376	0,376



La extrapolación de la viscosidad de la disolución para $c = 0$ da un valor de viscosidad de 0,2821 como se deduce del ajuste lineal del gráfico. Este es el valor de la viscosidad intrínseca.

A partir de este valor, se puede determinar el peso molecular medio del polímero según la expresión:

$$[\eta] = k \cdot \bar{M}^a$$

$$\bar{M} = \left(\frac{[\eta]_{\text{int}}}{k} \right)^{\frac{1}{0,5}} = \left(\frac{0,2821}{76 \cdot 10^{-5}} \right)^{\frac{1}{0,5}} = 137777,7 \text{ g/mol}$$

El peso molecular medio obtenido está dentro del rango considerado y en consecuencia el producto obtenido es válido.

Problema I.7

Si un determinado grado de PS tiene un peso molecular de 500000 g/mol, determinar el grado de polimerización de las macromoléculas. Suponiendo que todas las macromoléculas tienen la misma longitud, ¿cuántas macromoléculas habrá en 20 g de material?

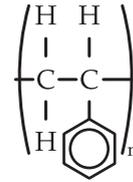
Solución

El peso de la unidad monomérica viene dado por:

$$8 \text{ át. C} \quad \times \quad 12 \text{ g/mol} \quad = \quad 96$$

$$8 \text{ át. H} \quad \times \quad 1 \text{ g/mol} \quad = \quad 8$$

$$M_{\text{Mero}} \quad = \quad 104 \text{ g}/(\text{mol} \cdot \text{mero})$$



Poliestireno
(PS)

El grado de polimerización GP vendrá dado por el cociente entre el peso molecular medio y el peso de la unidad monomérica.

$$GP = \frac{\bar{M}}{M_{\text{Mero}}} = \frac{500000 \text{ g/mol}}{104 \text{ g}/(\text{mol} \cdot \text{mero})} = 4807,69 \text{ mero}$$

Teniendo en cuenta que en 1 mol hay N_A (Número de Avogadro = $6,023 \cdot 10^{23}$) moléculas, se puede determinar el número de moléculas presentes en 20 g de este material.

El peso molecular medio, 500000 g corresponde a 1 mol de macromoléculas, en consecuencia, en 20 g habrá:

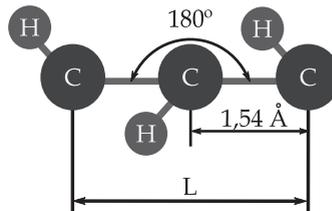
$$\frac{20 \text{ g}}{500000 \text{ g/mol}} \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \text{ moléculas/mol} = 2,4092 \cdot 10^{19} \text{ moléculas}$$

Problema I.8

La longitud media de una macromolécula de PE completamente estirada tiene una longitud de 320 nm (3200 Å). Determinar el grado de polimerización y el peso molecular medio.

Solución

Cuando la cadena de PE está completamente estirada, el ángulo entre dos enlaces C - C pasa de 109,5° a 180°. En estas condiciones, la longitud de la unidad monomérica que contiene 2 átomos de carbono viene determinada por:



$$L_{\text{Mero}} = 2 \cdot 1,54 = 3,08 \text{ \AA}$$

En consecuencia, el número de unidades monoméricas presentes en la cadena es:

$$N^{\circ} \text{ meros} = \frac{L_{\text{cadena}}}{L_{\text{Mero}}} = \frac{3200}{3,08} = 1038,96 \text{ mero} \Rightarrow GP = 1038,96$$

El peso molecular medio viene determinado por el peso de la unidad monomérica que es 28 g/(mol · mero).

$$\bar{M} = GP \cdot \bar{M}_{\text{Mero}} = 1038,96 \text{ mero} \cdot 28 \text{ g/(mol} \cdot \text{mero)} = 29090,90 \text{ g/mol}$$

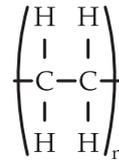
Problema I.9

Un polietileno de alta densidad se expone de forma permanente a una radiación lumínica. Determinar cuál es la longitud de onda de la radiación más perjudicial. ¿Qué se podría hacer para reducir los efectos del envejecimiento?

Solución

En la Tabla 4 del Apéndice I se muestran las energías de disociación de los diferentes enlaces. Las fuerzas de los enlaces que aparecen en la estructura del polietileno son:

enlace	energía de disociación (kcal/mol)
C - H	99
C - C	83



Polietileno (PE)

El enlace más débil de la estructura del polietileno es el enlace C - C que constituye la cadena principal. La radiación de menor energía necesaria para romper este enlace se puede determinar en base a la energía asociada a cada longitud de onda de la radiación lumínica.

Cada longitud de onda de la radiación lumínica lleva asociada una energía que viene dada por la expresión:

$$E = h \cdot \nu \rightarrow \nu = \frac{c}{\lambda}$$

$$h = \text{Constante de Planck} = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$c = \text{velocidad de la luz} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$\nu = \text{frecuencia de onda}$$

$$\lambda = \text{longitud de onda}$$

La energía asociada al enlace C - C es 83 kcal/mol = 347,3 kJ/mol. La longitud de onda más perjudicial para este enlace es, en consecuencia:

$$\frac{347300 \text{ J/mol}}{6,023 \cdot 10^{23} \text{ 1/mol}} = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{\lambda}$$

$$\Rightarrow \lambda = 3,447 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 344,7 \text{ nm}$$

**Para seguir leyendo, inicie el
proceso de compra, click aquí**