

Compatibilidad entre materiales poliméricos y lubricantes de transmisiones de vehículos eléctricos: Resistencia y elongación a rotura

Alberto García Martínez¹, Guillermo Diez Valbuena², Alejandro García Tuero³, Eduardo Rodríguez Ordoñez⁴, José Luis Viesca Rodríguez⁵

¹Depto. de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Universidad de Oviedo, España. Email: garciamaralberto@uniovi.es

²Depto. de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Universidad de Oviedo, España. Email: guille.d.valbuena@gmail.com

³Depto. de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Universidad de Oviedo, España. Email: garciatalejandro@uniovi.es

⁴Depto. de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Universidad de Oviedo, España. Email: eduardo@uniovi.es

⁵Depto. de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Universidad de Oviedo, España. Email: viescajosé@uniovi.es

Resumen

El presente trabajo de investigación analiza la compatibilidad entre 6 materiales poliméricos, tres de ellos plásticos estructurales (PEEK, PTFE y PA-66) y los otros tres elastómeros empleados en sellos y juntas (FKM, EPDM y silicona), con 4 aceites lubricantes de transmisión automática para vehículos eléctricos. Los materiales fueron sometidas a un envejecimiento mediante inmersión en los 4 lubricantes, manteniendo diferentes tiempos de inmersión a temperatura de 100°C. La compatibilidad se analiza con las variaciones en tensión de rotura y elongación a rotura evaluadas en ensayos de tracción y ensayos complementarios de análisis fisicoquímico de los materiales. Los plásticos estructurales apenas sufren variaciones de resistencia con el envejecimiento salvo el PA-66, que ve ligeramente mermada su tensión de rotura y elongación. Los elastómeros presentan todos ellos variaciones apreciables en su tensión de rotura, siendo mayores en el EPDM. En el caso de la silicona, el envejecimiento con los diferentes lubricantes genera variaciones notables en la tensión de rotura.

Palabras clave: Vehículo eléctrico; Compatibilidad; ATFs; Polímeros.

Abstract

This research work analyzes the compatibility between 6 polymeric materials with 4 Automatic Transmission Fluids for electric vehicles. Three of these polymers are structural plastics (PEEK, PTFE and PA-66) and the other three elastomers used in seals and gaskets (FKM, EPDM and silicone). The samples of the polymeric materials were subjected to an aging process by submerging them in the 4 lubricants studied, maintaining different immersion times with a constant temperature of 100°C. The compatibility is analyzed based on the variations in the breaking stress of the materials and the elongation at break evaluated in tensile tests. Complementary physicochemical analysis tests of the materials are made. Structural plastics do not shows significant variations in resistance with aging, except for PA-66, which presents slightly reduction in its breaking stress and elongation at break. All the elastomers present significant variations in their breaking strength, being greater in the EPDM. In the case of silicone, aging with the different lubricants generates notable variations in the breaking stress.

Keywords: Electric vehicle; Compatibility; ATF's; Polymers.

1. Introducción

El vehículo eléctrico (VE) se ha convertido en la principal solución para minimizar las emisiones

relacionadas con el transporte, que representan el 14% del total de gases de efecto invernadero emitidos según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [1]. El VE tiene una eficiencia

promedio del 77% en comparación con el 21% del vehículo impulsado por un motor convencional de combustión interna [2]. Esta mayor eficiencia del VE se traduce en una gran reducción de las emisiones de CO₂ [3], especialmente cuando se utilizan fuentes renovables de generación [4]. Los VE se pueden encontrar en diferentes versiones, como vehículo eléctrico de batería, vehículo eléctrico de autonomía extendida, vehículo eléctrico híbrido, vehículo eléctrico híbrido enchufable, vehículo eléctrico híbrido ligero o vehículo eléctrico con celda de combustible. Independientemente del tipo de VE, el motor eléctrico se puede colocar en diferentes posiciones [5]. Algunas configuraciones de sistemas de propulsión tienen el motor eléctrico instalado dentro de la transmisión, especialmente en algunas configuraciones de vehículos híbridos. En tales configuraciones, el motor eléctrico está en contacto con el lubricante utilizado en la transmisión, que habitualmente es de tipo automático. Debido a este hecho, los lubricantes de transmisiones automáticas (ATFs- Automatic Transmission Fluids) deben cumplir una serie de requisitos adicionales, como la compatibilidad con diferentes materiales, la mejora en cuanto a conductividad térmica, compatibilidad eléctrica y magnética [6].

La compatibilidad de los lubricantes con los materiales de sellado que se encuentran comúnmente en las transmisiones se prueba evaluando la variación en volumen, dureza, resistencia a la tracción y alargamiento a la rotura después de la inmersión en ATFs (generalmente durante 168 h) [7, 8]. Este es el caso de varios elastómeros utilizados principalmente en sellos y juntas, como el monómero de etileno-propileno-dieno (EPDM), el fluorelastómero (FKM) o el caucho de silicona (vinil-metil-silicona, VMQ). El hinchamiento y la degradación de los elastómeros causados por algunos aceites han sido reportados previamente [9,10] por diferentes investigadores. La degradación de estos materiales conlleva la aparición de fugas de lubricante tanto hacia el exterior de las

transmisiones, como en conductos y dispositivo internos.

Sin embargo, las configuraciones con el motor eléctrico dentro de la transmisión han puesto en contacto nuevos materiales poliméricos con los ATF. Estos materiales se utilizan principalmente con fines estructurales, por lo que son rígidos y consistentes. Haverley et al. [11] estudiaron la compatibilidad de algunos polímeros estructurales (poliéter éter cetona - PEEK, politetrafluoroetileno -PTFE y polietileno de peso molecular ultraelevado - UHMW PE) con diferentes bioaceites. Llegaron a la conclusión de que PEEK y PTFE sufren una degradación insignificante después del envejecimiento. Por el contrario, según nuestro conocimiento, no se ha estudiado la compatibilidad de los polímeros estructurales con los ATF.

El objetivo de este trabajo es estudiar la compatibilidad de cuatro ATF comerciales con materiales susceptibles de ser utilizados en la transmisión de vehículos eléctricos. Se realizaron mediciones de volumen, dureza, resistencia a la tracción y alargamiento a la rotura para tres elastómeros (EPDM, silicona y FKM) y tres polímeros estructurales (politetrafluoroetileno – PTFE, Poliamida 66 – PA 66 y poliéter éter cetona – PEEK), teniendo en cuenta la norma ASTM D7216 y las especificaciones de los fabricantes de transmisiones [7, 12]. Las combinaciones aceite/material fueron envejecidas no solo por el tiempo recomendado en las especificaciones o norma (168 h), sino también por un tiempo mayor (336, 504 y 672 h).

2. Detalles experimentales

2.1. Materiales

Se seleccionaron tres materiales poliméricos estructurales y tres elastómeros habitualmente empleados tanto para funciones estructurales como para sellos y juntas. La tabla 1 muestra las principales características de los 6 materiales estudiados. Las

Tabla 1. Cambios en la dureza de los elastómeros

	PEEK ⁽¹⁾	PTFE ⁽²⁾	PA 66 ⁽³⁾	FKM ⁽⁴⁾	EPDM ⁽⁵⁾	Silicona
Densidad [g/cm ³]	1.31	2.15	1.15	-	1.13	1.3
Módulo Young [MPa]	4200	22	3500	-	-	-
Tensión de rotura[MPa]	116	-	84	9.8	12	5
Elongación a rotura [%]	15	220	70	165	360	450
Dureza	253 ⁽⁶⁾	55 ⁽⁷⁾	175 ⁽⁶⁾	70 ⁽⁸⁾	70 ⁽⁸⁾	60 ⁽⁸⁾
Temp. max. de servicio [°C]	260	260	100	204	1000	200

⁽¹⁾ Poliéter éter cetona

⁽²⁾ Politetrafluoroetileno (Teflón)

⁽³⁾ Poliamida 66 (Nylon)

⁽⁴⁾ Caucho fluorado

⁽⁵⁾ Etileno-propileno dieno monómero

⁽⁶⁾ Ball indentation hardness ISO 2039-1 [N/mm²]

⁽⁷⁾ Shore D

⁽⁸⁾ Shore A

Fuente: elaboración propia: Datos de hojas de características de los materiales.

probetas empleadas han sido troqueladas o cortadas mediante agua /en el caso del PA 66 y el PEEK) según norma ASTM D638, empleando la geometría y dimensiones tipo V.

Los lubricantes empleados para evaluar la compatibilidad han sido 4 muestras de lubricante para transmisiones automáticas (ATF) nombradas consecutivamente con las letras A, B, C y D. La tabla 2 muestra la composición de aceites base y aditivos de cada uno de los lubricantes, así como la viscosidad de cada uno de los aceites base que lo componen. La tabla 3 muestra las principales propiedades físicas de los 4 lubricantes completamente formulados.

Tabla 2. Composición de los ATFs.

ATF	Aceites Base (% masa)	Paquete aditivos (% masa)
A	Grupo I 4.9 cSt/100 °C (77.7)	11.7
	Grupo I 2.7 cSt/100 °C (10.6)	
B	Grupo III 3.0 cSt/100 °C (38.3)	11.0
	Grupo III 6.5 cSt/100 °C (50.7)	
C	Grupo III 3.0 cSt/100 °C (45.0)	17.0
	Grupo III 6.5 cSt/100 °C (38.5)	
D	Grupo III 3.0 cSt/100 °C (36.5)	27.0
	Grupo III 4.2 cSt/100 °C (36.5)	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Propiedades físicas de los ATFs.

ATF	ATF A	ATF B	ATF C	ATF D
Densidad 15 °C [g/cm ³]	0.869	0.847	0.854	0.854
Viscosidad 100 °C [cSt]	7.8	6	7.2	6.9
Viscosidad 40 °C [cSt]	43	30	35	34
Índice de Viscosidad	161	151	181	165

Fuente: elaboración propia.

2.2. Envejecimiento

Las probetas de los distintos materiales se sometieron a un proceso de envejecimiento consistente en la inmersión de las mismas en las muestras de lubricante durante periodos de 168, 336, 504 y 672 horas a una temperatura controlada de 100 °C (manteniendo las muestras sumergidas en el interior de una estufa de laboratorio con una precisión de ± 0.5 °C).

Previo al proceso de envejecimiento, las probetas fueron limpiadas mediante paño húmedo e inmersión

en etanol, seguido de secado mediante aire caliente. Tras el envejecimiento, las probetas fueron nuevamente limpiadas empleando papel absorbente para drenar los restos de lubricante, así como nuevamente mediante inmersión en etanol.

2.3. Caracterización mecánica

La resistencia y elongación a rotura de los materiales fue medida según norma ASTM D6838 mediante una máquina de ensayos a tracción MTS[©] Sinergy con una célula de carga de 5 kN (MTS-166). Con objeto de seguir las recomendaciones de la norma ASTM D6838 en lo referente a mantener tiempos de ensayo por debajo de 5 minutos, la velocidad de tracción para cada material y para cada envejecimiento fue determinada mediante ensayos preliminares. La tabla 4 muestra las diferentes velocidades de ensayo empleadas.

Tabla 4. Velocidad de tracción en mm/s.

Material	Tiempo de envejecimiento			
	168 h	336 h	504 h	672 h
PEEK	1.5	1.5	1.5	1.5
PTFE	20	20	20	18
PA 66	3	3	3	3
FKM	20	15	15	15
EPDM	25	25	25	25
Silicona	25	30	30	30

Fuente: elaboración propia.

Los datos de tensión de rotura y alargamiento son obtenidos a partir del análisis de la curva tensión-deformación obtenida durante el ensayo, reportando la tensión máxima soportada antes de la rotura así como la deformación unitaria en ese instante. Cada material envejecido en cada uno de los ATF y en los diferentes periodos de tiempo fue replicado 3 veces, reportando como resultado la media y desviación típica.

3. Resultados y discusión

3.1. Cambios en la tensión de rotura

Los resultados de tensión de rotura para cada material tras el proceso de envejecimiento son analizados como variación porcentual con respecto al mismo ensayo realizado con los materiales frescos, sin haber sido sometidos a ningún tipo de envejecimiento. La figura 1 muestra de forma gráfica estos resultados.

La curva de tensión-deformación de todos los materiales se obtuvo antes y después de su envejecimiento en los ATF en diferentes periodos de tiempo. En general, se encontraron dos tipos de comportamiento. Por un lado, los materiales elastómeros (FKM, Silicona y EPDM) presentaron una

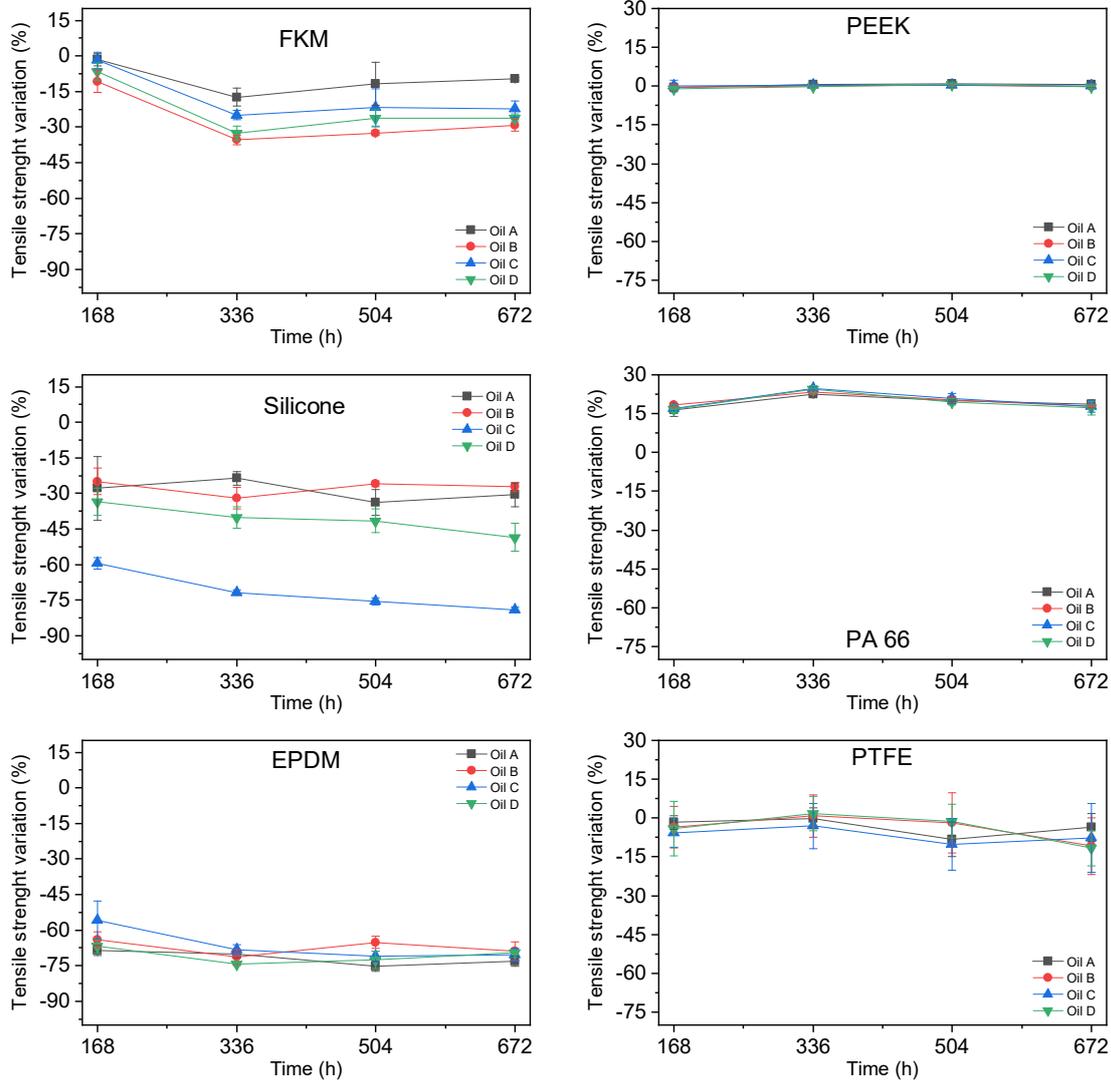


Figura 1. Variación porcentual de la tensión de rotura. Fuente: elaboración propia

reducción apreciable de la resistencia a la tracción ya con el tiempo de envejecimiento más corto, y en particular FKM y silicona mostraron diferencias significativas según el ATF utilizado. Por otro lado, los polímeros estructurales (PEEK, PTFE y PA 66) no mostraron dependencia del ATF y en general, mostraron muy bajas variaciones en su resistencia a la tracción, a excepción del PA 66. Este resultado se alinea con los reportado por Cabrera et al. [13].

El PEEK se mostró inmune al efecto de envejecimiento en los diferentes ATF. El PTFE sufrió un ligero descenso de su resistencia a la tracción, y sobre todo una mayor variabilidad en los resultados al comparar entre réplicas de unas mismas condiciones de ensayo. Siendo ligeramente mayor esa variabilidad conforme se incrementa el tiempo de envejecimiento. EL PA 66

por su parte, es el único material estructural que ha experimentado una variación significativa de su resistencia a tracción, incrementándose ligeramente por encima del 15% para las 4 muestras de ATF indistintamente.

En cuanto a los materiales elastómeros, todos ellos ven mermada su resistencia a la tracción, siendo el EPDM el que mayor pérdida de resistencia experimenta indistintamente del lubricante empleado, y ya desde las primeras etapas de envejecimiento. Por el lado opuesto, el FKM es el elastómero que menos variación de resistencia experimenta entre los estudiados. Con los cuatro tipos de lubricante, el FKM muestra un comportamiento similar, reduciéndose más la resistencia alcanzada las 336 horas de envejecimiento, para mantenerse estable a partir de este tiempo. Entre

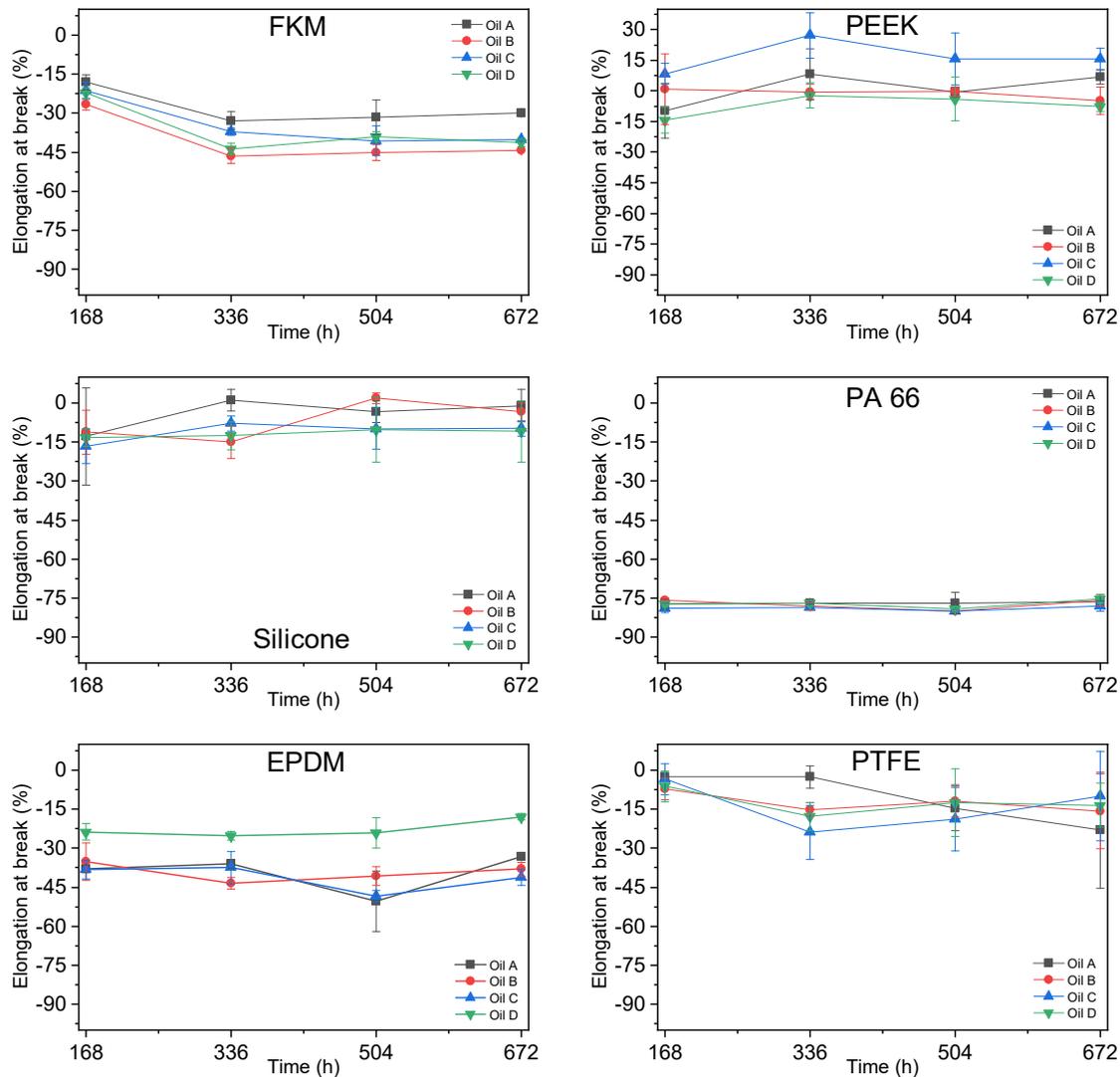


Figura 2. Variación porcentual de la elongación a rotura. Fuente: elaboración propia

los cuatro lubricantes se aprecian ligeras diferencias, siendo el lubricante A el que supone una menor pérdida de resistencia y en consecuencia una mayor compatibilidad. La silicona presenta para todos los tipos de lubricante excepto el C una reducción de la resistencia de entono al 30% desde la primera fase de envejecimiento. Esta reducción es similar a la reportada para el FKM en periodos largos de envejecimientos, si bien en la silicona se apreció una mayor variabilidad en las medidas, y una reducción ya entono al 30% desde la primera fase de envejecimiento a 168 h. Con el lubricante C, la silicona experimenta una reducción de su resistencia a la tracción mucho más acusada (valores entono al 75%, de forma similar a lo observado en las muestras de

EPDM) y con una tendencia decreciente según se incrementa el tiempo de envejecimiento.

3.2. Cambios en la elongación a rotura

En cuanto al alargamiento a la rotura, todos los elastómeros (FKM, Silicona y EPDM) mostraron un comportamiento similar, con cierta reducción de los valores medidos (Fig. 2). Entre estos materiales, el EPDM fue el más afectado por el envejecimiento a la semana (excepto en el aceite D), mientras que la Silicona presentó la menor variación de este parámetro, a pesar de la alta variabilidad de las medidas. Para los polímeros estructurales (PEEK, PA 66 y PTFE), solo PA 66 fue significativamente influenciado por la inmersión en todos los ATF.

PA 66 fue el único material que mostró una elongación a la rotura similar, independientemente del tiempo de inmersión y el tipo de aceite, mostrando la mayor reducción de esta propiedad (Fig. 2). Lann et al. [14] señalaron la tendencia del PA 66 a cristalizar al envejecer en ATF, aunque concluyeron que eran las altas temperaturas las que provocaban este efecto, lo cual propiciaría que el comportamiento de este material no se viese afectado por el tipo de lubricante empleado en el envejecimiento. Si bien Lann [14] también reporta una caída en la resistencia del PA 66, en este trabajo no se ha producido tal reducción. Decker et al. [15] confirmaron la cristalización de PA 66 en ATF después de 2000 h a 130 °C, aunque señalaron que la degradación era aún mayor en aire a la misma temperatura debido a la termooxidación. Por el contrario, el PTFE y el PEEK mostraron un comportamiento más variable, con una evolución no constante del alargamiento a la rotura. El comportamiento de la silicona fue similar entre los elastómeros, al igual que el EPDM con los aceites A, B y C. (Fig. 3). Finalmente, el alargamiento a la rotura de FKM siguió un patrón similar con respecto a la variación de la resistencia a la tracción, análogo a lo reportado por Tate et al. [16]. Por el contrario, Zeng [10] obtuvo una disminución continua de las propiedades de resistencia a la tracción de FKM con el tiempo en dos ATF diferentes hasta 3024 h. No se detectó ninguna señal de estabilización durante todo el ensayo. Los resultados en este estudio fueron similares a los de Zeng hasta las 336 h, alcanzando una disminución del 45% del alargamiento a la rotura con aceite B, manteniéndose constante desde ese momento hasta el final del ensayo.

3.3. Ensayos complementarios

Con objeto de analizar variaciones en la estructura cristalina de los materiales se realizó un estudio de calorimetría diferencial del barrido (DSC) sobre las muestras de materiales poliméricos estructurales. Las tablas 5, 6 y 7 muestran las entalpías de fusión (ΔH) y las temperaturas de inicio de la fusión y pico durante la misma. (T_{Onset} y T_{Peak} respectivamente)

El envejecimiento de las muestras de PEEK en los diferentes lubricantes provocó una variación apreciable en la entalpía de fusión del material, siendo indicativo de posibles cambios en la cristalinidad del mismo. Estas variaciones han sido especialmente marcadas con los lubricantes B y C, tomando valores por encima del doble de la muestra original no envejecida. No obstante, estas diferencias apreciables en la entalpía de fusión así como en las temperaturas no redundó en modificaciones significativas de la resistencia a la tracción ni la elongación a rotura, siendo el PEEK el material más estable de los estudiados en relación con estas dos propiedades mecánicas.

Tabla 5. Resultados de DSC para las muestras de PEEK.

Muestra	ΔH [J/g]	T_{Peak} (°C)	T_{Onset} (°C)
Fresca	31.60	338	315
ATF A	48.50	336	321
ATF B	76.16	337	313
ATF C	73.37	337	307
ATF D	45.89	339	318

Fuente: elaboración propia.

El PTFE muestra un ligero cambio en la entalpía de fusión de las muestras envejecidas, siendo las diferencias entre los distintos lubricantes poco significativas

Tabla 6. Resultados de DSC para las muestras de PTFE

Muestra	ΔH [J/g]	T_{Peak} (°C)	T_{Onset} (°C)
Origen	39.18	336	324
Aceite A	41.28	336	324
Aceite B	40.14	338	324
Aceite C	41.30	336	324
Aceite D	42.95	335	325

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 7 muestra los resultados de DSC para el PA66. Este material fue el único de los polímeros estructurales que sufrió variaciones significativas en su resistencia a la tracción. Estas variaciones sugerirían cierto grado de cristalización, lo cual ya había sido notificado por Lann et al. [14] después de un proceso de envejecimiento en ATF. El PA66 es un polímero semicristalino [15], y la variación en el grado de cristalinidad se puede observar en la evolución de la entalpía de fusión [16]. La entalpía de fusión se duplica después del envejecimiento en los diferentes ATF, lo que significa que el aumento en el grado de cristalinidad es proporcionalmente mayor que en los otros dos polímeros estudiados, siendo indicativo de la variación observada en la resistencia del mismo

Tabla 7. Resultados de DSC para las muestras de PA66.

Muestra	ΔH [J/g]	T_{Peak} (°C)	T_{Onset} (°C)
Origen	11.03	258	250
Aceite A	19.30	258	248
Aceite B	17.43	257	246
Aceite C	29.71	260	249
Aceite D	21.26	258	249

Fuente: elaboración propia.

La figura 3 muestra el análisis termogravimétrico de las muestras envejecidas durante 168 h de FKM, EPDM y durante el proceso de envejecimiento por efecto de la temperatura.

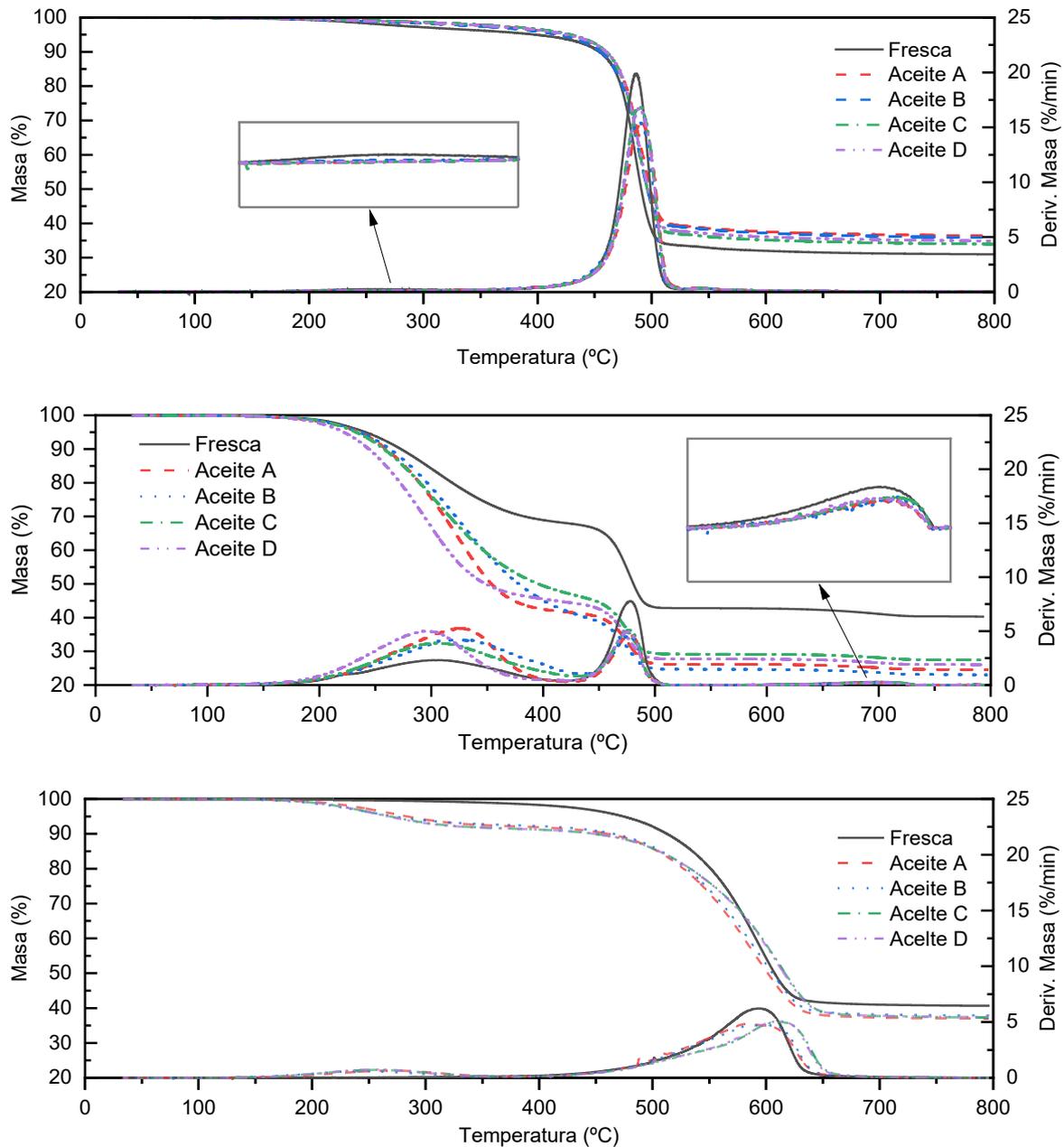


Figura 3. Curvas de TGA y DTGA de las muestras de FKM (Superior), EPDM (central) y siliocona (inferior). Fuente: elaboración propia.

silicona. Se reporta tanto la variación porcentual en masa con respecto a la temperatura, como la derivada de la misma respecto al tiempo.

Para las muestras envejecidas de FKM, la pérdida de masa es ligeramente menor a partir de la temperatura de activación. Esta diferencia puede explicarse por la pérdida de los componentes volátiles del elastómero

El proceso de degradación térmica del EPDM consta de tres etapas, con picos en la derivada correspondientes a 303, 478 y 707 °C respectivamente. En la primera etapa se produce una evaporación de los componentes volátiles del elastómero [14] constituyendo una importante pérdida en masa. En la segunda se reduce el 25% de la masa por la degradación de la matriz elastomérica [15]. Finalmente, la tercera etapa supone una ligera pérdida

de la masa inicial por la descomposición del carbonato de calcio. Para muestras envejecidas, las curvas TGA siguieron la misma tendencia, aunque la reducción de peso durante la primera etapa fue mucho mayor debido a la degradación de los aceites incorporados a los elastómeros durante el envejecimiento.

La termogravimetría de la muestra de silicona no envejecida mostró una mayor estabilidad térmica de este material. La pérdida total de peso puede atribuirse a la descomposición polimérica. En la Figura 3 se muestra cómo en todas las muestras envejecidas aparecen dos etapas. La primera etapa, que comienza a temperaturas cercanas a los 200 °C, se debe a la evaporación de los aceites absorbidos por la silicona, de manera similar a lo que ocurría en el EPDM. Debido a este proceso de absorción, la pérdida total de peso aumentó y, por lo tanto, el grado de cristalinidad disminuyó, ya que el peso total fue aumentado por el aceite, que tiene cristalinidad nula. La segunda reducción de peso correspondió a la degradación térmica del polímero.

4. Conclusiones

La compatibilidad de 4 ATF convencionales con 6 materiales poliméricos (3 estructurales y 3 elastómeros para juntas y sellos) fue estudiada mediante la evaluación de las variaciones en la resistencia a tracción y elongación a rotura tras un proceso de envejecimiento por inmersión y temperatura a 100 °C. las principales conclusiones extraídas de este trabajo son:

- El PEEK y el PTFE mostraron compatibilidad a corto y largo plazo en cuanto a las variaciones de tensión de rotura y alargamiento a rotura.
- El PA66 mostró una disminución drástica de la elongación a rotura (75%) y un ligero aumento de su resistencia tracción (15%), relacionado con el aumento del grado de cristalización durante el envejecimiento por efecto de la temperatura, lo cual fue confirmado por DSC.
- El EPDM mostró una reducción muy significativa de su resistencia a la tracción, haciéndolo incompatible con los cuatro lubricantes estudiados.
- La silicona y el FKM mostraron variaciones significativas tanto en su resistencia a la tracción como en su elongación a rotura, si bien esta merma de propiedades está acotada y contenida dentro de los límites comúnmente aceptados.
- El FKM es el único material que ha mostrado una sensibilidad representativa respecto al tiempo de envejecimiento.
- El lubricante C y la silicona muestran una clara incompatibilidad reflejada en un descenso drástico de la resistencia a tracción de la silicona envejecida con este lubricante.

5. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades por apoyar este trabajo mediante la concesión del proyecto PID2019-109367RB-I00.

6. Referencias

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change. 2014. doi:10.1017/cbo9781107415416.
- [2] Holmberg K, Erdemir A. The impact of tribology on energy use and CO2 emission globally and in combustion engine and electric cars. *Tribol Int* 2019;135:389–96. doi:10.1016/j.triboint.2019.03.024.
- [3] Woydt M. The importance of tribology for reducing CO2 emissions and for sustainability. *Wear* 2021;474–475:203768. doi:10.1016/j.wear.2021.203768.
- [4] Bellekom S, Benders R, Pelgröm S, Moll H. Electric cars and wind energy: Two problems, one solution? A study to combine wind energy and electric cars in 2020 in The Netherlands. *Energy* 2012;45:859–66. doi:10.1016/j.energy.2012.07.003.
- [5] Xue Q, Zhang X, Teng T, Zhang J, Feng Z, Lv Q. A comprehensive review on classification, energy management strategy, and control algorithm for hybrid electric vehicles. *Energies* 2020;13. doi:10.3390/en13205355.
- [6] Farfan-Cabrera LI. Tribology of electric vehicles: A review of critical components, current state and future improvement trends. *Tribol Int* 2019;138:473–86. doi:10.1016/j.triboint.2019.06.029.
- [7] Afton Chemical. Specification Handbook. 2013.
- [8] Braun J. Current elastomer compatibility test standards - A critical view. *Seal Technol* 2011;2011:8–12. doi:10.1016/S1350-4789(11)70066-6.
- [9] Bulut D, Krups T, Poll G, Giese U. Lubricant compatibility of FKM seals in synthetic oils. *Ind Lubr Tribol* 2020;72:557–65. doi:10.1108/ILT-02-2019-0065.
- [10] Zeng N. Compatibility Study of Fluorinated Elastomers in Automatic Transmission Fluids. 2008 SAE Int. Powertrains, Fuels Lubr. Congr., SAE International; 2008. doi:https://doi.org/10.4271/2008-01-1619.
- [11] Haverly MR, Whitmer LE, Brown RC. Evaluation of Polymer Compatibility with Bio-oil Produced from Thermochemical Conversion of Biomass. *Energy and Fuels* 2015;29:7993–7. doi:10.1021/acs.energyfuels.5b01943.
- [12] ASTM D7216-15 Standard Test Method for Determining Automotive Engine Oil Compatibility with Typical Seal Elastomers. 2015. doi:10.1520/D7216-15.

- [13] Farfán-Cabrera LI, Gallardo-Hernández EA, Reséndiz-Calderón CD, Sedano de la Rosa C. Physical and Tribological Properties Degradation of Silicone Rubber Using *Jatropha* Biolubricant. *Tribol Trans* 2018;61:640–7. doi:10.1080/10402004.2017.1386808.
- [14] Lann PL, Derevjanik TS, Snyder JW, Ward J. Nylon degradation with automatic transmission fluid. *Thermochim. Acta*, vol. 357–358, Elsevier; 2000, p. 225–30. doi:10.1016/S0040-6031(00)00392-0.
- [15] Decker J, Brüll R, Schuster T, Oehler H, Alig I, Richstein B, et al. Investigations about the influences of temperature and oil on the fatigue behavior of short fiber reinforced polyamide 6.6. 2014.
- [16] Tate N, Saito M, Sugitani K. Fluoroelastomer resistant to automotive lubricants. *SAE Tech. Pap.*, SAE International; 2003. doi:10.4271/2003-01-2000.