

ESTUDIO DEL DESEMPEÑO DE UN NUEVO MATERIAL DESLIZANTE PARA UTILIZAR EN APOYOS ESTRUCTURALES

Performance study of a new sliding material for use in structural bearings

Mariela CORDERO VERGE^a, Rafael DE LA SOTILLA CLARASÓ^b

^a PhD Ingeniera Civil. MK4 WORLD WIDE, S.L. Directora de I+D. mcordero@mekano4.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. MK4 WORLD WIDE, S.L. Presidente. rsotilla@mekano4.com

RESUMEN

Los apoyos estructurales enfrentan desafíos por variaciones térmicas y cargas dinámicas derivadas del cambio climático y tráfico intenso, además, las regulaciones europeas eliminarán antes del 2030 el PTFE por su impacto ambiental. Este trabajo presenta un material deslizante no ferroso basado en poliamida-polietileno modificado (MKSM), donde se presenta todos los estudios realizados para analizar propiedades mecánicas, resistencia al desgaste, humedad y comportamiento a largo plazo. Los resultados confirman que el MKSM cumple con todos los requisitos normativos y aporta una alternativa eficiente y sostenible para reemplazar el PTFE en aplicaciones estructurales.

ABSTRACT

Structural bearings are challenged by thermal variations and dynamic loads due to climate change and heavy traffic, and European regulations will eliminate PTFE by 2030 due to its environmental impact. This paper presents a non-ferrous sliding material based on modified polyamide-polyethylene (MKSM), where all the studies carried out to analyse mechanical properties, wear resistance, moisture and long-term behaviour are presented. The results confirm that MKSM meets all regulatory requirements and provides an efficient and sustainable alternative to replace PTFE in structural applications.

PALABRAS CLAVE: apoyos estructurales, material deslizante, capacidad portante, durabilidad.

KEYWORDS: structural bearings, sliding material, load-bearing capacity, durability

1 Introducción

En la ingeniería estructural, especialmente en aplicaciones como puentes y otras infraestructuras críticas, los materiales deslizantes para apoyos estructurales (figura 1) desempeñan un papel fundamental en la absorción de movimientos, rotaciones y cargas estáticas y dinámicas. Tradicionalmente, materiales poliméricos como el politetrafluoroetileno (PTFE) y el polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) han

liderado este campo, siendo aprobados por normativas europeas como la EN 1337-2^[1] y diversos Documentos de Evaluación Europeo (EAD^[2]), respectivamente. Estas opciones han establecido estándares en términos de baja fricción, alta durabilidad y resistencia al desgaste, características esenciales para soportar cargas constantes y movimientos repetitivos.



Figura 1. Ejemplo de un apoyo estructural.

Sin embargo, la creciente preocupación ambiental ha puesto en el foco al PTFE, un gas fluorado con alto impacto en el calentamiento global y el agotamiento de la capa de ozono. La Unión Europea, comprometida con la sostenibilidad, ha implementado regulaciones para eliminar progresivamente el uso de materiales fluorados en múltiples aplicaciones, con prohibiciones previstas entre 2025 y 2035. Esta transición requiere soluciones innovadoras que mantengan el rendimiento técnico, mientras se alinean con los objetivos medioambientales.

Este trabajo presenta el desarrollo de un nuevo material deslizante libre de gases fluorados, basado en un polímero modificado de poliamida-polietileno denominado MK Sliding Material, de ahora en más MKSM, diseñado para apoyos esféricos y cilíndricos. Este material desarrollado por la empresa MK4 World Wide S.L. y protegido por la Patente Europea EP4290011, no solo cumple con las estrictas normativas internacionales como la EN1337^{[1][3][4]} y el EAD 050078-00-0301^[2], sino que supera las capacidades de los materiales tradicionales en términos de rendimiento mecánico y sostenibilidad. Además, el MKSM ofrece beneficios significativos en el mantenimiento de estructuras, gracias a su alta resistencia al desgaste y estabilidad a largo plazo, lo que reduce la frecuencia y los costes asociados al mantenimiento, posicionándose como una solución eficiente, rentable y avanzada para las demandas de la infraestructura moderna.

El MKSM ofrece una combinación única de baja fricción, alta capacidad portante y una resistencia excepcional al desgaste, lo que garantiza una vida útil significativamente más larga. Los ensayos experimentales demostraron su capacidad para soportar cargas extremas, mantener la estabilidad bajo condiciones adversas y resistir tanto el envejecimiento térmico como químico. Además, su desempeño al desgaste es sobresaliente, superando al PTFE y al UHMWPE en escenarios de largo plazo y aplicaciones dinámicas. Todos estos estudios se desarrollaron durante casi 7 años hasta obtener un material certificado (ETA23/0869).

En este contexto, el MKSM representa un avance técnico clave, proporcionando una solución estructural avanzada, eficiente y ambientalmente responsable. Su desarrollo responde a las demandas actuales del cambio climático, el aumento de tráfico y las necesidades de infraestructura moderna, asegurando un rendimiento óptimo con un impacto ambiental reducido.

2 Desarrollo del material MKSM

El desarrollo del material deslizante MKSM se basa en un enfoque innovador de ingeniería de polímeros. A partir de una aleación modificada de poliamida 6 (PA6) y polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE), se diseñó un polímero que supera las limitaciones de las aleaciones tradicionales. Mediante el uso de un promotor de adhesión, se logró una unión química estable entre las cadenas moleculares de los polímeros base. Este proceso crea un nuevo material indivisible, con propiedades únicas en términos de resistencia y durabilidad.

2.1 Estudio de diferentes soluciones

Las formulaciones desarrolladas incluyen variaciones de aporte de cada componente hasta lograr ajustar la elasticidad y la resistencia del material. Los ensayos, realizados conforme a la norma EN ISO 527-3^[5], incluyeron pruebas de

resistencia a la tracción, elongación a la rotura, módulo de elasticidad y envejecimiento acelerado (figura 2). Los resultados indicaron una mejora significativa en el rendimiento del material modificado en comparación con aleaciones convencionales y otros polímeros disponibles.

Las figuras 3 y 4 muestran el comportamiento de diferentes materiales propuestos. En la figura 4 se muestra el material finalmente adoptado durante el ensayo de tracción y su elongación hasta rotura. Se puede ver la baja dispersión en su comportamiento elástico.



Figura 2. Ensayo según EN ISO 527-3^[5]

Tabla 1. Comparación de formulaciones.

Muestra	Material MK21		Material MK25	
	Tensión fluencia (MPa)	Alargam. Rotura (%)	Tensión fluencia (MPa)	Alargam. Rotura (%)
1	48.89	203		
2	47.36	200	53.94	61.44
3	49.94	284	52.40	43.20
4	48.53	207	51.02	54.73
5	48.53	209	51.76	54.45
Prom.	48.65	220	51.12	52.05
Desv. St.	0.92	36	1.13	7.27

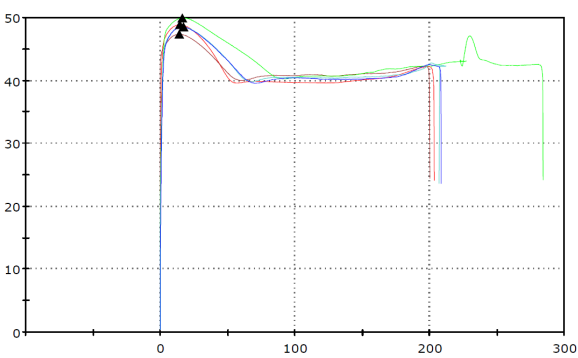


Figura 3. Ejemplo de diagramas tensión-def. de material MK21

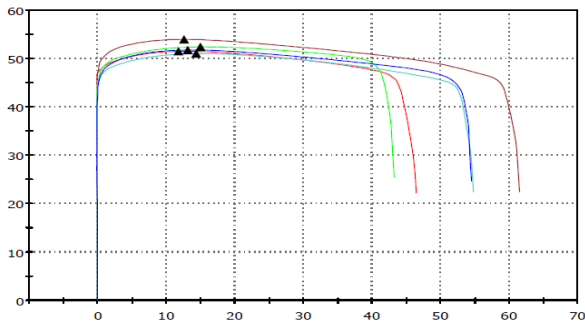


Figura 4. Ejemplo de diagramas de material MK25

Además de los ensayos mecánicos, se realizaron pruebas exhaustivas para evaluar el contenido de humedad del material (figura 5), un factor crítico para su rendimiento y debido al componente de poliamida que forma la aleación.

Los estudios de contenido de humedad se realizaron conforme a la norma UNE EN ISO 15512:2019^[6] (Método B2), evaluando muestras obtenidas del núcleo de discos de material. Tras un secado inicial de 18 horas a 80°C, las muestras fueron analizadas a 195°C en atmósfera de nitrógeno (pureza >99.99%). Los resultados mostraron un contenido promedio de humedad del 0.29%, dependiendo del lote y las condiciones de preparación. Esta baja absorción de humedad garantiza la estabilidad dimensional y mecánica del MKSM, incluso bajo condiciones ambientales adversas. A continuación, se muestra el material MKSM ya validado antes y después del ensayo.



Fig. 1 Samples before test



Fig. 2 Samples after test

Figura 5. Muestras - condición inicial y después de secado 18 horas

A continuación, en la siguiente tabla se presentan algunos resultados obtenidos de estas muestras.

Tabla 2. Contenido de humedad

Ref.	Temp. prueba (°C)	Peso (g)	Cont. agua (%)	Media (%)
C23-282_3	195	0.998	0.29	0.29
		0.996	0.30	

También se analizó el punto de fusión de las diferentes formulaciones desarrolladas, un aspecto crucial para garantizar su rendimiento y estabilidad bajo temperaturas extremas (figura 6). Los resultados obtenidos para cada formulación permitieron seleccionar aquellas con las características térmicas más adecuadas para aplicaciones estructurales exigentes. Algunos de estos resultados se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 3. Comparación de formulaciones

Muestra	Masa (g)	Temp. Fusión (°C)	Temp. Fusión (°C)	Temp. Fusión (°C)	Temp. Fusión (°C)
		1ª run	2ª run	1ª run	2ª run
MT1	15.4				
MT2	12.1	129.5	127.7	216.7	221.6
MT3	9.2	129.6	127.7	216.8	221.4
Prom.		130.0	127.7	216.9	221.8
Desv. St.		0.7	0.6	0.3	0.5

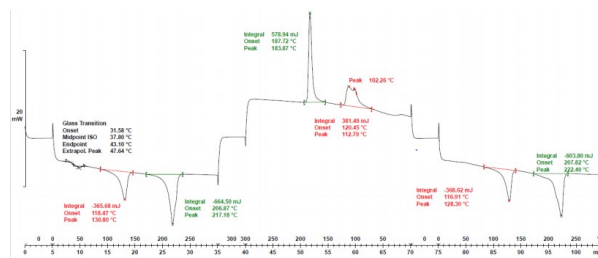


Figura 6. Calorimetría diferencial de barrido - potencia térmica frente a perfil de temperatura

3 Metodología Experimental

Tras un exhaustivo estudio de diversas formulaciones de materiales, se logró desarrollar un material que satisface todas las necesidades requeridas para actuar como material deslizante en apoyos estructurales. Sin embargo, dado que este material no está contemplado dentro de los materiales especificados por la normativa EAD^[2] existente para apoyos esféricos y cilíndricos, fue necesario emprender el desarrollo de un nuevo Documento de Evaluación Europeo (EAD^[2]) que incluya las propiedades y parámetros de diseño específicos del MKSM.

Para cumplir con este objetivo, se diseñó y ejecutó una amplia campaña de ensayos conforme a los requisitos de la normativa EN 1337^{[1][3][4]} y los principios establecidos para el desarrollo de EAD^[2]. Esta campaña se presenta a continuación.

3.1 Caracterización Mecánica del Material

Se realizaron los siguientes ensayos para evaluar las propiedades mecánicas del MKSM, garantizando su rendimiento estructural bajo condiciones extremas:

3.1.1 Resistencia a la tracción y elongación a la rotura

El ensayo de resistencia a la tracción y elongación a la rotura se llevó a cabo siguiendo los procedimientos establecidos por la norma EN ISO 527-3^[5], adaptada para materiales plásticos delgados y flexibles, como es el caso del

material deslizante MKSM. El procedimiento es el siguiente:

- Preparación de las Muestras:

Se seleccionaron láminas del material, fabricadas según las especificaciones para garantizar uniformidad.

Las muestras fueron cortadas con una geometría tipo 5B según lo indicado por la norma. Las dimensiones de la sección transversal de cada muestra (ancho y grosor) se midieron con precisión antes del ensayo.

Las muestras se acondicionaron durante 24 horas a $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa de $50\% \pm 5\%$ para garantizar estabilidad dimensional antes del ensayo.

- Velocidad de separación de mordazas:

1 mm/min para medir el módulo elástico y el límite de fluencia.

50 mm/min para determinar la resistencia máxima y la elongación a la rotura.

- Realización del Ensayo

Carga aplicada:

Se aplicó una fuerza uniaxial creciente sobre las muestras, registrando simultáneamente la carga aplicada y el alargamiento resultante (figura 7).

Cálculo de propiedades mecánicas:

Módulo elástico: Relación entre la tensión y la deformación en la zona lineal del gráfico tensión-deformación.

Resistencia máxima: Máxima tensión soportada por la muestra antes de la rotura.

Elongación a la rotura: Porcentaje de alargamiento en el punto de rotura.

Tabla 4. Resultados de ensayo según EN ISO 527-3^[5]

Ref.	σ_{ys} (MPa)	ϵ_{ys} (%)	σ_u (MPa)	ϵ_u (%)
23.1	38.99	1.75	33.09	42.2
23.2	39.45	2.51	34.44	20.7
23.3	39.23	0.36	33.26	59.0
23.4	39.33	1.01	33.09	45.4
23.5	39.70	0.05	34.02	28.2
Prom.	39.34	1.14	33.61	39.1
Desv. St.	0.27	1.01	0.6	15.0

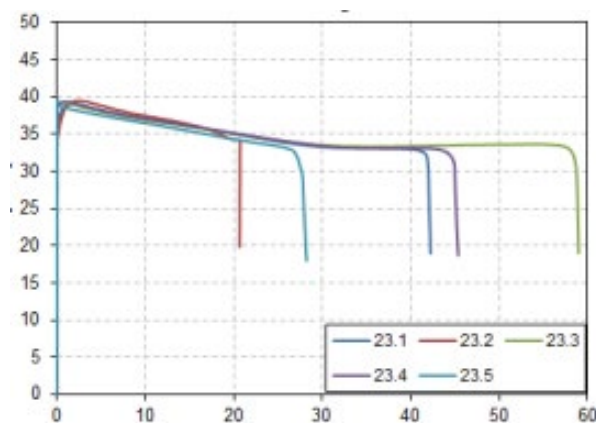


Figura 7. Diagrama tensión – deformación - MKSM

3.1.2 Resistencia a la compresión

El ensayo de resistencia a la compresión fue realizado siguiendo los lineamientos del EAD 050078-00-0301^[2]. Este ensayo se llevó a cabo tanto en láminas con alveolos como sin alveolos para evaluar el comportamiento bajo cargas compresivas. A continuación, se describe el procedimiento detallado:

- Preparación de las Muestras

Se utilizaron láminas de material MKSM con dimensiones estandarizadas para garantizar uniformidad.

Las muestras incluían dos tipos: láminas con alveolos y sin alveolos, fabricadas según las especificaciones del material y las normativas aplicables. Se registraron las dimensiones de cada muestra (ancho, largo y espesor) con micrómetros de precisión antes del ensayo.

- Condicionamiento previo:

Las muestras fueron acondicionadas durante 24 horas a $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa de $50\% \pm 5\%$ para estabilizar sus propiedades antes del ensayo.

- Realización del Ensayo

Carga aplicada:

Las muestras fueron sometidas a una carga de compresión uniaxial creciente aplicada perpendicularmente a sus superficies planas.

La fuerza aplicada y el desplazamiento resultante fueron registrados continuamente (figura 8).

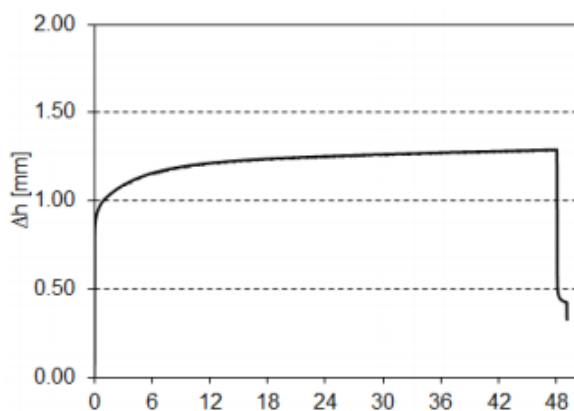


Figura 8. Curva de reducción de Δh en el tiempo – muestra alveolada

Se llevaron a cabo ensayos para evaluar el comportamiento del material bajo diferentes condiciones térmicas, abarcando desde temperatura ambiente hasta 80°C. Estos ensayos permitieron analizar su desempeño en escenarios extremos, asegurando su estabilidad y funcionalidad en aplicaciones donde las variaciones de temperatura son críticas.

Tabla 5. Resistencia a compresión - MKSM

Superficie deslizante	Resist. característica a la compresión $f_k(T)$ [MPa]				
	$f_k(T_0)$ $T_0 \leq 35^\circ\text{C}$	$f_k(T_{48})$ $T = 48^\circ\text{C}$	$f_k(T_{60})$ $T = 60^\circ\text{C}$	$f_k(T_{70})$ $T = 70^\circ\text{C}$	$f_k(T_{80})$ $T = 80^\circ\text{C}$
Superficie deslizante principal	190	190	160	160	80
Guías	63.3	63.3	53.3	53.3	26.7
Superficie deslizante principal y guías	80	80	-	-	-

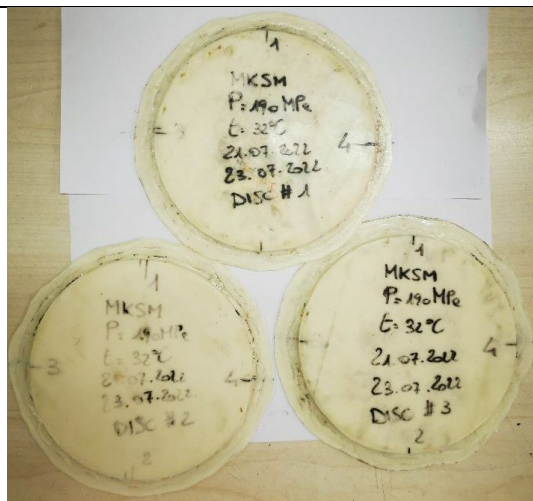


Figura 9. Muestras alveoladas después del ensayo



Figura 10. Muestras no alveoladas después del ensayo

Se puede concluir que el material demuestra un comportamiento excepcional, evidenciado tanto por su alta capacidad para soportar cargas extremas como por la ausencia de fisuras o daños estructurales tras la descarga de las muestras, lo que refuerza su idoneidad para aplicaciones exigentes (figuras 9 y 10).

3.1.3 Rigidez bajo compresión

El ensayo de rigidez bajo compresión se realizó conforme a los procedimientos definidos en el EAD 050078-00-0301^[2], evaluando específicamente el comportamiento elástico del material en aplicaciones con carga dinámica. Este ensayo se centró en láminas alveoladas del material MKSM para analizar su capacidad de adaptación a deformaciones bajo compresión y garantizar un rendimiento estructural óptimo.

- Preparación de las Muestras

Las muestras consistieron en láminas alveoladas con dimensiones estandarizadas, diseñadas para reproducir condiciones de carga reales. Se registraron las dimensiones de cada muestra (ancho, largo y espesor) con micrómetros de precisión antes del ensayo.

- Condicionamiento previo:

Las muestras fueron acondicionadas durante 24 horas a $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ y una humedad relativa de $50\% \pm 5\%$ para estabilizar sus propiedades mecánicas antes del ensayo.

- Configuración del ensayo:

Velocidad de compresión: 1 mm/min, según los requisitos normativos para evaluar propiedades elásticas en la zona inicial de carga.

- Condiciones de carga:

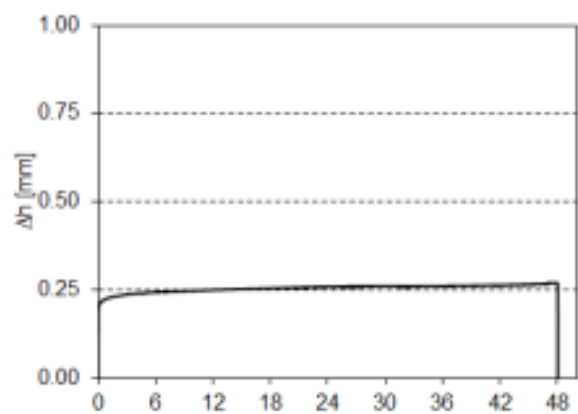
Ensayos realizados bajo compresión uniaxial, con una distribución uniforme de la carga sobre la superficie alveolada.

- Realización del Ensayo

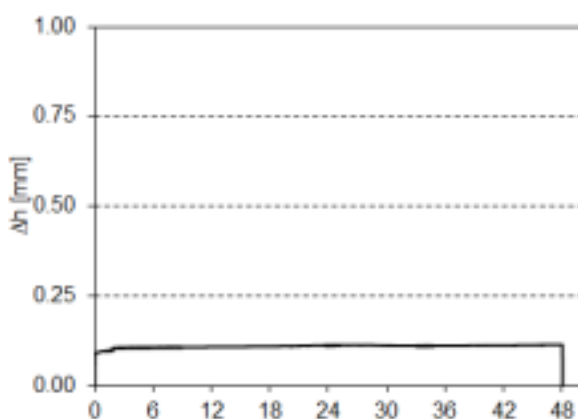
Carga aplicada:

La carga se aplicó gradualmente, registrando la relación entre la fuerza aplicada y la deformación obtenida en la muestra. Se aplicaron 2 porcentajes de carga respecto a la tensión característica medida en el ensayo de compresión según EAD 050078-00-0301^[2]. En la figura 11 (a y b) se pueden ver los diagramas de deformación durante las 48 horas que dura el ensayo.

Se analizaron las primeras fases de compresión, donde el material presenta comportamiento elástico, para determinar su rigidez inicial.



(a) 0.25% tensión característica



(b) 0.5% tensión característica

Figura 11. Curva de reducción de Δh en el tiempo – muestra alveolada

- Cálculo de propiedades mecánicas:

Para la evaluación del valor fractal del 95% de la rigidez k se supone una distribución normal logarítmica. De acuerdo con la tabla D1 del anexo D de la norma EN 1990^[7], el factor de fractura característico k_n es igual a 3,37 para una variación desconocida V_x y tres resultados de ensayos numéricos.

Siendo conservadores, se supone una dependencia lineal de la presión de $k_{50\%}$ y $k_{95\%}$ y de $E_{tp,50\%}$ con respecto a la presión, por tanto, los resultados obtenidos son:

$$k_{95\%} = \frac{p-47.5}{262} + 0.140 \quad (1)$$

$$k_{50\%} = \frac{p-47.5}{263.4} + 0.134 \quad (2)$$

$$E_{tp,50\%} = 3300 - 10.53 \times (p - 47.5) \quad (3)$$

De estas expresiones se concluye que estos resultados cumplen con Anexo C.2 de la EAD 050078-00-0301^[2].

3.1.4 Resistencia al envejecimiento térmico y químico

Los ensayos realizados en el material deslizante MKSM fueron diseñados para evaluar su resistencia al envejecimiento térmico y químico conforme a las normativas relevantes, como EN ISO 527-1^[8], ISO 175^[9] y el EAD 050078-00-0301^[2]. Las pruebas incluyeron:

- Envejecimiento Térmico:

Las muestras fueron sometidas a 168 horas a 80°C en un horno ventilado conforme al método especificado en la norma EN ISO 2039-1^[10].

- Envejecimiento Químico:

Las muestras fueron sumergidas en diferentes medios químicos durante 60 días a 23°C, incluyendo agua destilada, grasas de silicona y soluciones de cloruros (sódico, férrico, crómico y de zinc).

La resistencia frente a influencias químicas y ambientales se evalúa según el EAD 050078-00-0301^[2]. La variación (%) de las probetas ensayadas en relación con probetas de referencia se indica en la siguiente tabla.

Tabla 6. Resistencia frente a influencias químicas y ambientales de las láminas MKSM

Exposición	Variación (%)		
	De volumen	De masa	De alarg. a rotura
Grasa	-0.58	-0.10	+644
Agua destilada	+2.90	+3.46	+688
Cloruro de sodio (solución acuosa saturada)	+0.54	+1.53	+649
Cloruro de cromo (sol. acuosa saturada)	+0.99	+2.12	+626
Cloruro férrico (sol. acuosa saturada)	-0.72	+0.37	+56
Cloruro de zinc (sol. acuosa saturada)	+0.26	+2.26	+130
Grasa + 14 días a 70 °C	-0.55	-0.99	+78
Grasa + 90 días a T _{max} + 21 días a T _{max} +10 °C	-0.19	-0.93	+40

3.1.5 Ensayos de Fricción a Largo Plazo

Estos ensayos se realizaron en láminas con alveolos como sin alveolos.

3.1.5.1 Muestras sin alveolos

Dimensiones de la muestra: 200 mm x 15 mm x 8 mm.

Las láminas sin alveolos fueron combinadas con dos superficies metálicas. En un caso con acero austenítico y otro con aleación de aluminio según (EN 1337-2:2004^[3] y EAD 050078-00-0301^[2]).

- Condiciones de Ensayo:

Presión de contacto: 63 MPa.

Distancia de deslizamiento acumulada: 14,088 m.

Ciclos de temperatura: -50°C a +35°C, controlado a 1°C/min.



Figura 12. Probeta durante el ensayo LTFT

- Resultados:

Al final del ensayo de fricción de larga duración (figura 12), se desmontó la pieza de ensayo y se examinó visualmente:

(a) lámina MKSM sin marcas: la superficie de deslizamiento estaba libre de abrasión, y sólo presentaba algún arañazo muy superficial alineado con la dirección de deslizamiento.

(b) superficie de contacto de acero austenítico: la superficie de contacto presentaba algún arañazo poco profundo alineado con la dirección de deslizamiento; dentro de la zona de deslizamiento la superficie de acero austenítico estaba recubierta por una fina película de lubricante.

(c) superficie de contacto de aleación de aluminio: se observaron rayaduras superficiales alineadas con la dirección del deslizamiento en el área atravesada por las muestras de láminas MKSM; fuera del área de deslizamiento, la superficie estaba recubierta por lubricante expulsado del material deslizante.

La figura 13 muestra el aspecto de la probeta de material MKSM sin alveolos y de la superficie de contacto de acero austenítico al final del ensayo de fricción de larga duración en un recorrido de deslizamiento acumulado de más 14 000 m.

La figura 14 muestra el aspecto de la probeta de material MKSM con alveolos y de la superficie de contacto de aleación de aluminio al final del ensayo de fricción de larga duración.

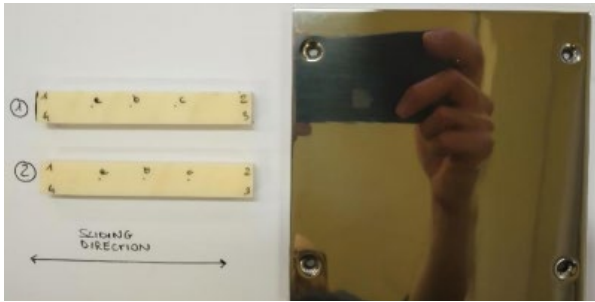


Figura 13. Probetas después del ensayo LTFT (MKSM s/a – Acero austenítico)

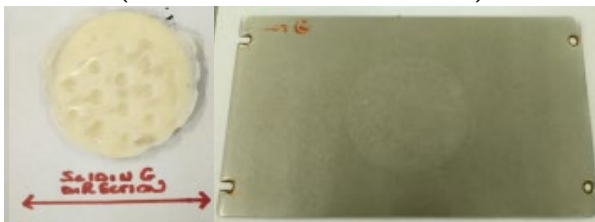


Figura 14. Probetas después del ensayo LTFT (MKSM c/a – Aleación aluminio)

- Conclusión:

Inspección visual: ambas superficies mostraron rayaduras muy superficiales. El material demostró resistencia sobresaliente bajo condiciones extremas.

Coefficiente de fricción bastante inferior a materiales como PTFE, CM1.

Desgaste acumulado durante el ensayo fricción inferior a materiales como PTFE, CM1, UHMWPE.

3.1.5.2 Muestras con alveolos

Dimensiones de la muestra: disco de 75 mm de diámetro y 8 mm de espesor, con patrón de alveolos conforme a EN 1337-2:2004^[3] y EAD 050078-00-0301^[2].

- Condiciones de Ensayo (figura 15):

Presión de contacto: 63 MPa, 31.5 MPa y 15.75 MPa.

Distancia de deslizamiento acumulada: 70 396 m.

Ciclos de temperatura: -50°C a +35°C.

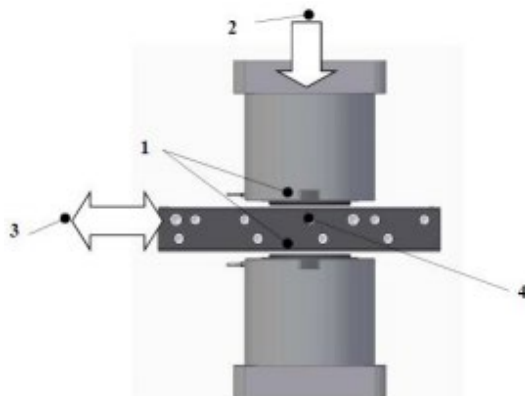


Figura 15. Aplicación de cargas en ensayo LTFT

- Resultados:

Al final del ensayo de fricción de larga duración, se desmontó la pieza de ensayo y se examinó visualmente

(a) las láminas de MKSM con alveolos: prácticamente no se produjo abrasión de las láminas de MKSM. El patrón de hoyuelos se mantuvo intacto, y los alveolos del centro de la probeta aún conservaban una cantidad significativa de lubricante.

(b) superficie de contacto de acero austenítico: la superficie de contacto no presentaba desgaste práctico ni abrasión.

La figura 16 muestra el aspecto de las muestras de MKSM con alveolos.

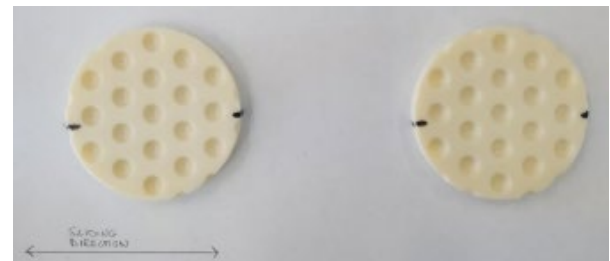


Figura 16. Probetas alveoladas de MKSM después del ensayo LTFT

- Conclusión:

Se preservó el patrón alveolado con desgaste uniforme, y el material demostró resistencia sobresaliente bajo condiciones extremas.

El material presenta un desgaste significativamente menor en comparación con otros materiales deslizantes utilizados en esta aplicación. Gracias a su reducida tasa de desgaste, incluso tras más de 70.000 m de uso, se puede asegurar una vida útil de 70 años.

7 Conclusiones

El desarrollo y caracterización del material deslizante MKSM ha demostrado resultados sobresalientes, posicionándolo como una alternativa técnicamente superior y garantizando su sostenibilidad ambiental frente a los materiales tradicionales utilizados en apoyos estructurales, como el PTFE. A continuación, se resumen las principales conclusiones:

- *Alta capacidad portante:* mostró un comportamiento excepcional bajo cargas compresivas extremas, con una resistencia característica mayor de 190 MPa.

Mantiene su desempeño incluso a temperaturas externas adversas, desde -50°C hasta +80°C, asegurando su funcionalidad en una amplia variedad de aplicaciones estructurales.

- *Propiedades sobresalientes al desgaste:* los ensayos de fricción a largo y corto plazo, realizados tanto en láminas con alveolos como sin ellos, confirmaron un coeficiente de fricción significativamente bajo y estable.

El material MKSM ha demostrado una vida útil de 70 años.

- *Resistencia al envejecimiento térmico y químico:* Los estudios evidenciaron una excelente resistencia frente a la degradación en ambientes agresivos, como exposición a grasas de silicona y soluciones químicas corrosivas.

También demostró una baja absorción de humedad.

El material deslizante MKSM, protegido por la Patente Europea EP4290011, se posiciona como una solución estructural avanzada, eficiente y ambientalmente responsable, que responde a las crecientes demandas de sostenibilidad e infraestructura moderna.

Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo y colaboración de diversas personas e instituciones a quienes queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento.

En primer lugar, agradecemos al Sr. *Norbert Hodrius* por su valiosa orientación técnica y su constante compromiso en el desarrollo de este proyecto.

Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento al *Politécnico de Milán*, específicamente a su Laboratorio de Ensayos de Materiales, por proporcionar las instalaciones y el conocimiento técnico necesarios para realizar los complejos ensayos mecánicos y de fricción requeridos en este estudio.

Finalmente, agradecemos al Centro Tecnológico Applus⁺Laboratories, en especial al Laboratorio de Estructuras por su contribución en la etapa inicial de caracterización del material.

A todos ellos, nuestro más profundo agradecimiento por su colaboración y apoyo en cada etapa de este desarrollo.

Referencias

- [1] UNE-EN 1337-1: Apoyos estructurales. Parte 1: Reglas generales del deslizamiento.
- [2] EAD 050078-00-0301: Apoyo esférico y cilíndrico con material deslizante especial de una aleación de poliamida y polietileno modificada.
- [3] UNE-EN 1337-2: Apoyos estructurales. Parte 2: Elementos de deslizamiento.
- [4] UNE-EN 1337-7: Apoyos estructurales. Parte 7: Apoyos de PTFE cilíndricos y esféricos.
- [5] EN ISO 527-3: Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 3: Condiciones de ensayo para películas y hojas.
- [6] UNE EN ISO 15512: Determinación del contenido en agua
- [7] EN 1990 - Eurocódigo: Bases de diseño estructural.
- [8] UNE EN ISO 527-1: Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales.
- [9] UNE EN ISO 175: Plásticos. Métodos de ensayo para la determinación de los efectos de la inmersión en productos químicos líquidos.
- [10] UNE EN ISO 2039-1: Plásticos. Determinación de la dureza. Parte 1: Método de penetración de bola.