



**FIDAMC**

**RECUBRIMIENTOS  
MULTIFUNCIONALES  
ANTI-HIELO**

**María Rodríguez Gude**  
**Silvia Calvo del Valle**  
**Francisco Carreño**  
**Noemí Carmona**  
**Óscar Rodríguez de la Fuente**

# MOTIVACIÓN

Tendencias actuales en aeronáutica:

- ✓ Reducción de costes (producción, operación, mantenimiento)
- ✓ Aviones más respetuosos con el medio ambiente



- Reducción de peso
- Incremento de la eficiencia energética



Fuente: <https://www.aviacionmexico.com/meteorologia-engelamiento/>

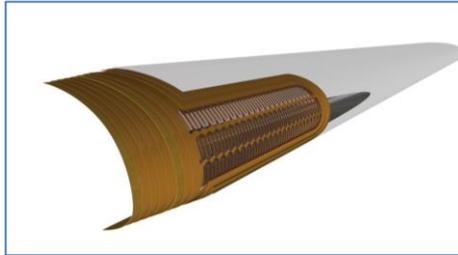


Fuente: [www.flickr.com](http://www.flickr.com) / Cory W. Watts



Fuente: <https://meteoiberia.es/asi-retiran-hielo-acumulado-los-aerogeneradores-suecia/>

# ENFOQUES ACTUALES DE PROTECCIÓN CONTRA EL HIELO



Fuente: <https://www.boldmethod.com/blog/lists/2020/01/types-of-deicing-systems-and-advantages-and-disadvantages/>

## ACTIVO

Sistemas térmicos

Sistemas mecánicos

Sistemas químicos

## PASIVO

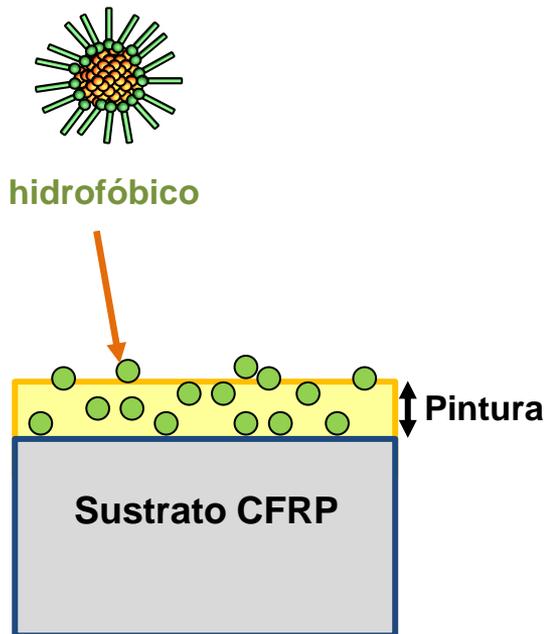
Sistemas que emplean superficies superhidrofóbicas de elevada rugosidad



Limitaciones de los sistemas de protección contra el hielo de aire caliente (sangrado de motores):

- **Incompatibilidad** con componentes de material compuesto debido a la elevada temperatura del aire
- **Baja eficiencia** → elevado consumo de energía eléctrica
- **Alta complejidad** → bajo nivel de integración
- No se pueden usar para deshielo en tierra

Desarrollo de un recubrimiento que actúe como superficie anti-hielo para estructuras de material compuesto que trabajan en condiciones ambientales severas



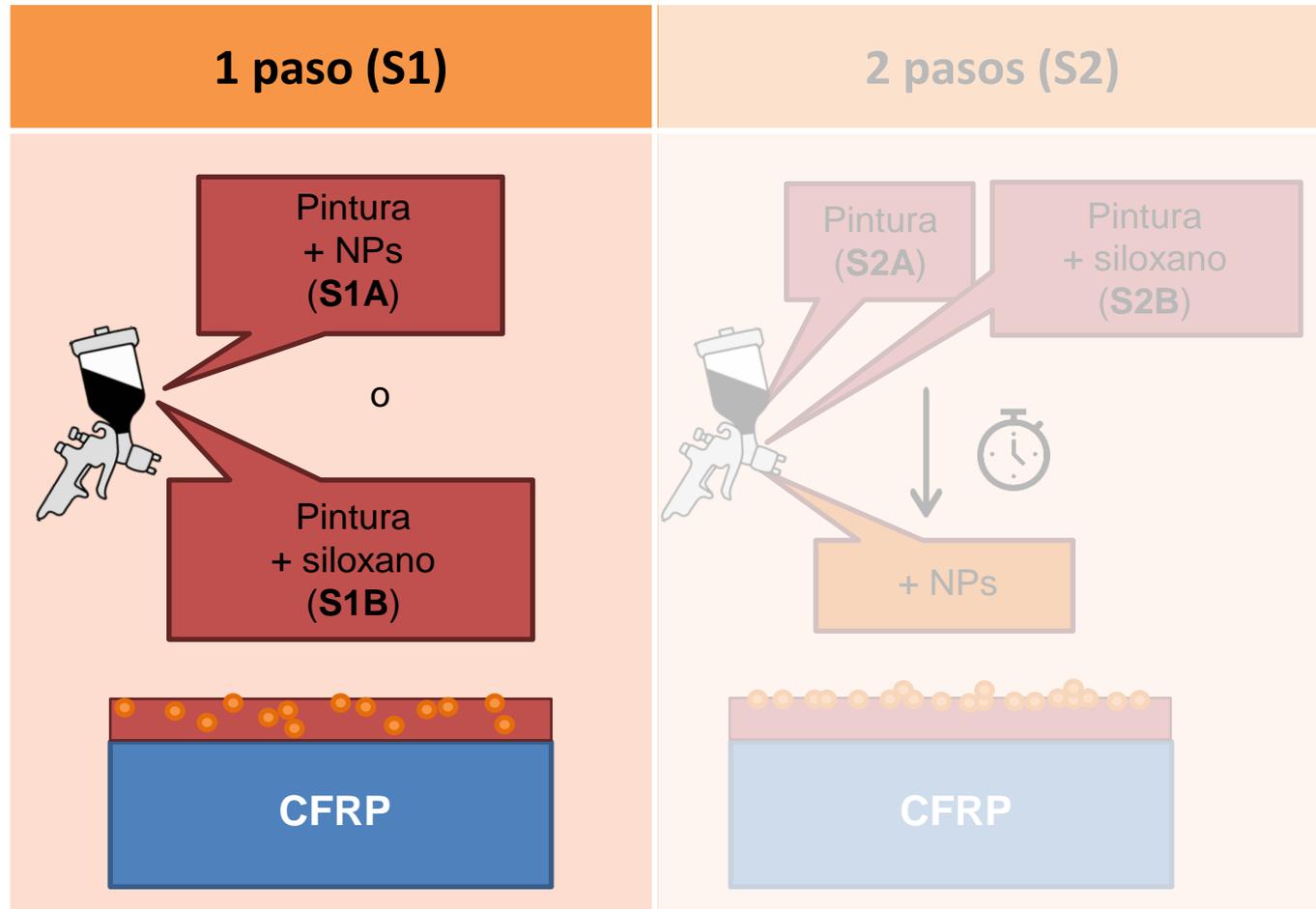
## Principales requerimientos

- ✓ Ángulo de contacto de agua (WCA)  $> 90^\circ$
- ✓ Ángulo de deslizamiento  $< 10^\circ$
- ✓ Adhesión de hielo ( $\tau_{ice}$ )  $< 100$  kPa\*

## Otros requerimientos

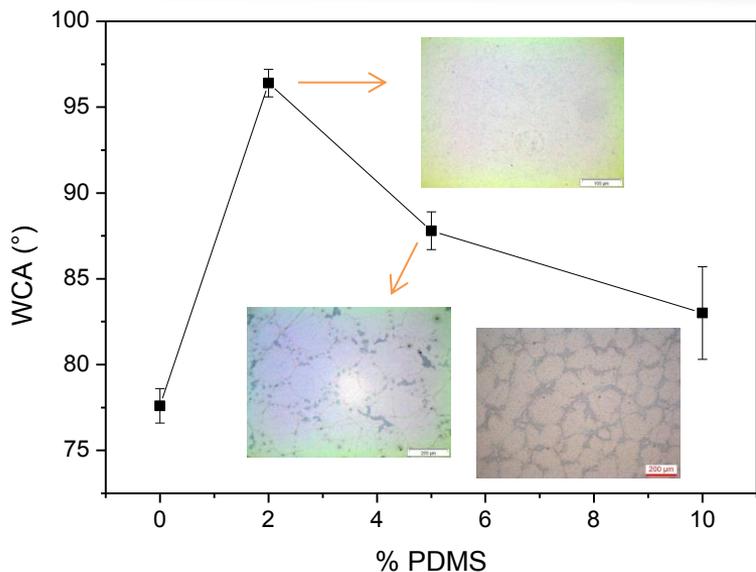
- Composición respetuosa con el medio ambiente
- Bajo coste
- Capacidad de producción y aplicación a escala industrial
- Superar los ensayos y requerimientos de la pintura comercial
- Mantener el comportamiento anti-hielo

## Estrategia 1: superhidrofobicidad



- Imprimación SEEVENAX 313-02 (Mankiewicz)
- Pintura ALEXIT 411-77 (Mankiewicz)
- Siloxano: PDMS
- Nanopartículas: SiO<sub>2</sub> Aerosil R812 (Evonik)

# ESTRATEGIA 1: SUPERHIDROFOBICIDAD

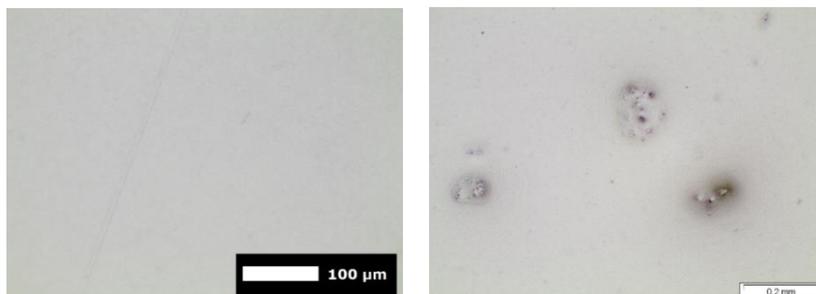


## Pintura + PDMS

- Morfología más homogénea y mayor WCA con menor concentración de siloxano.

## Pintura + NPs (un paso)

NPs inmersas en la capa de pintura



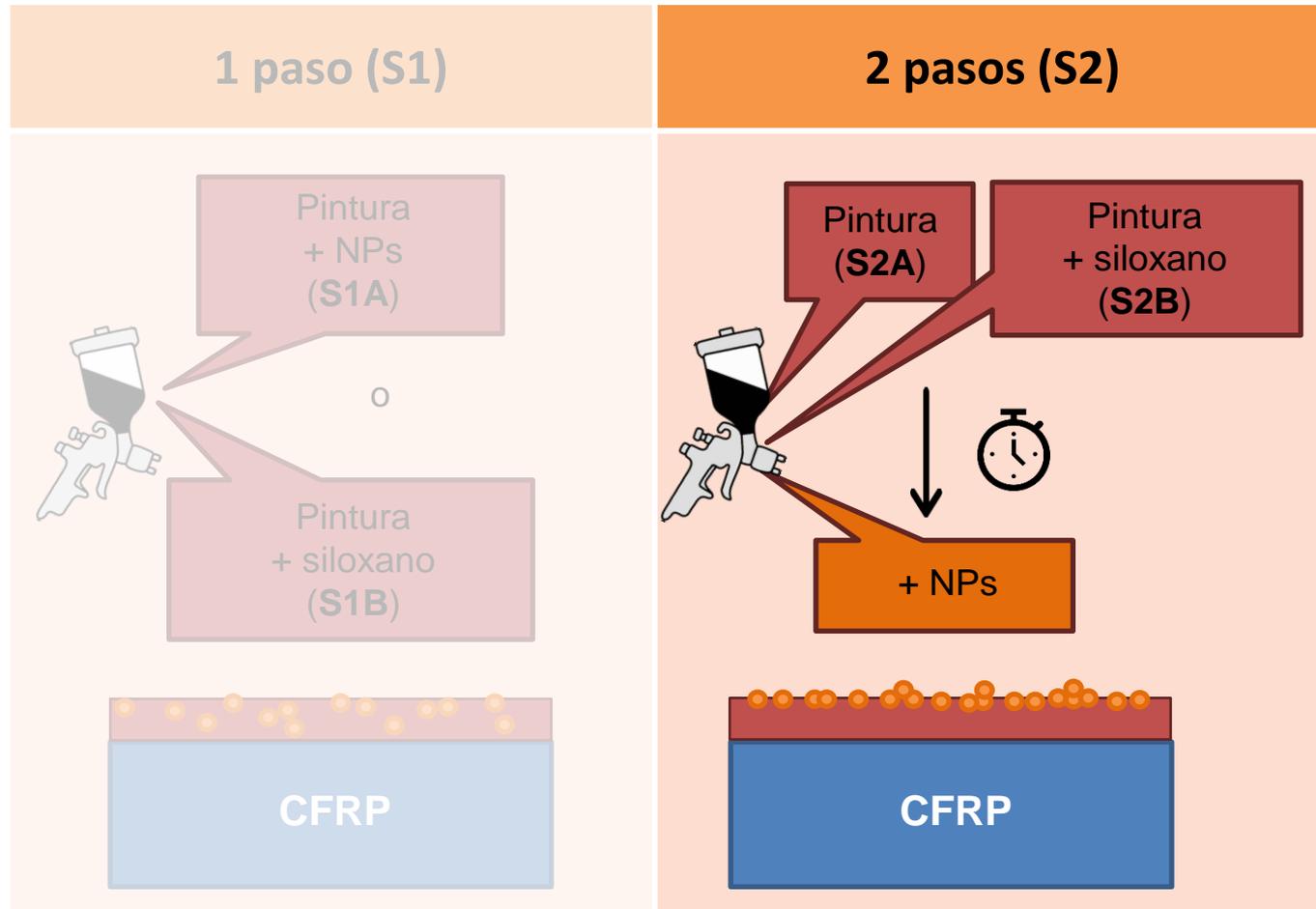
- Sin cambios en la morfología
- Pequeño aumento de rugosidad
- WCA = 75-80° (referencia 78°)



Estrategia en dos pasos

Adición de NPs a la pintura parcialmente curada

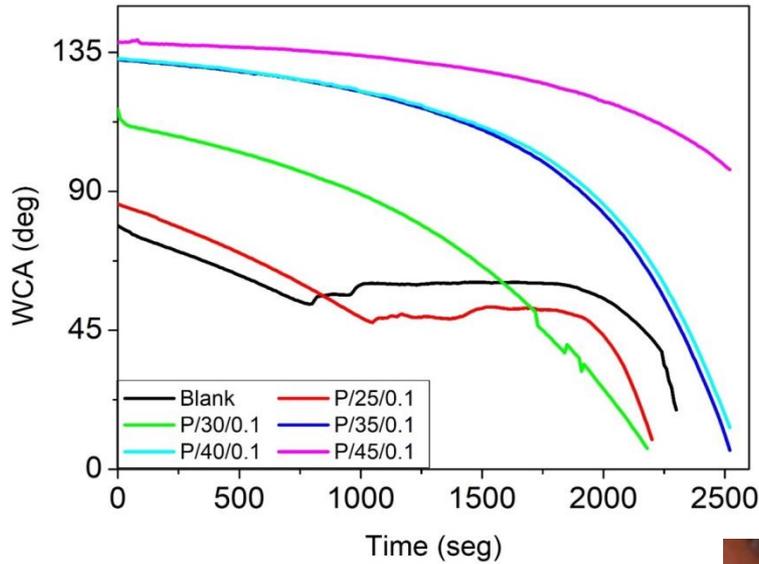
## Estrategia 1: superhidrofobicidad



- Imprimación SEEVENAX 313-02 (Mankiewicz)
- Pintura ALEXIT 411-77 (Mankiewicz)
- Siloxano: PDMS
- Nanopartículas: SiO<sub>2</sub> Aerosil R812 (Evonik)

# ESTRATEGIA 1: SUPERHIDROFOBICIDAD

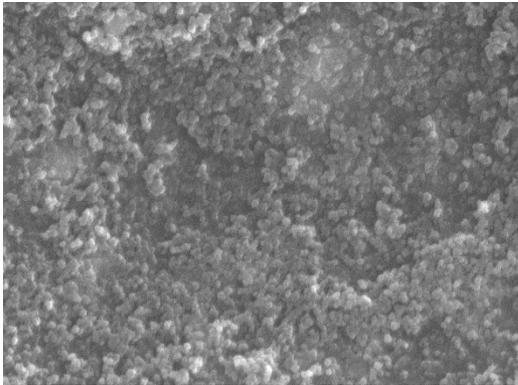
## Pintura + NPs (dos pasos)



- Evaporación de una gota de agua sobre muestras con NPs.
- Controlando la cantidad de NPs expuestas, es posible ajustar el comportamiento de la superficie de hidrofílico a superhidrofóbico.

$P/t/0.1$   $\rightarrow$   $t$  = tiempo de curado (min) a 70°C antes de pulverizar las NPs

$t_{gel} = 26$  min



Muestra P/35/0.1 (S2A)



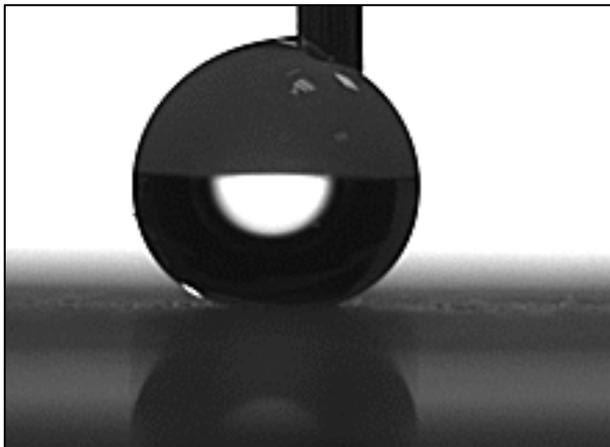
Pintura comercial aeronáutica (arriba) y muestra P/35/0.1 (abajo)

## ESTRATEGIA 1: SUPERHIDROFOBICIDAD

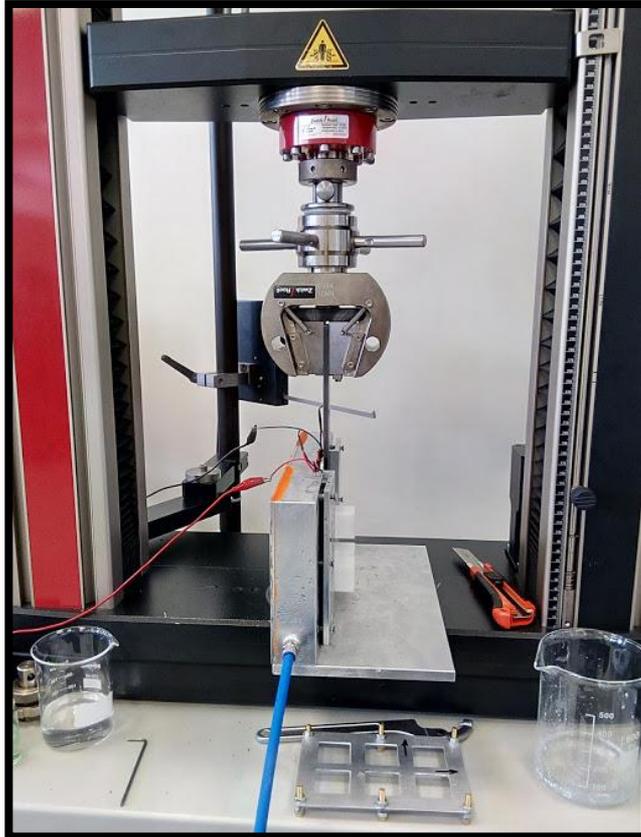
## Pintura + PDMS + NPs (2 pasos)

Muestra		WCA
Pintura comercial		78°
S2B	15 min	87°
	30 min	> 140°
	45 min	> 140°

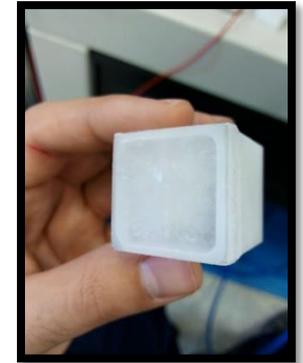
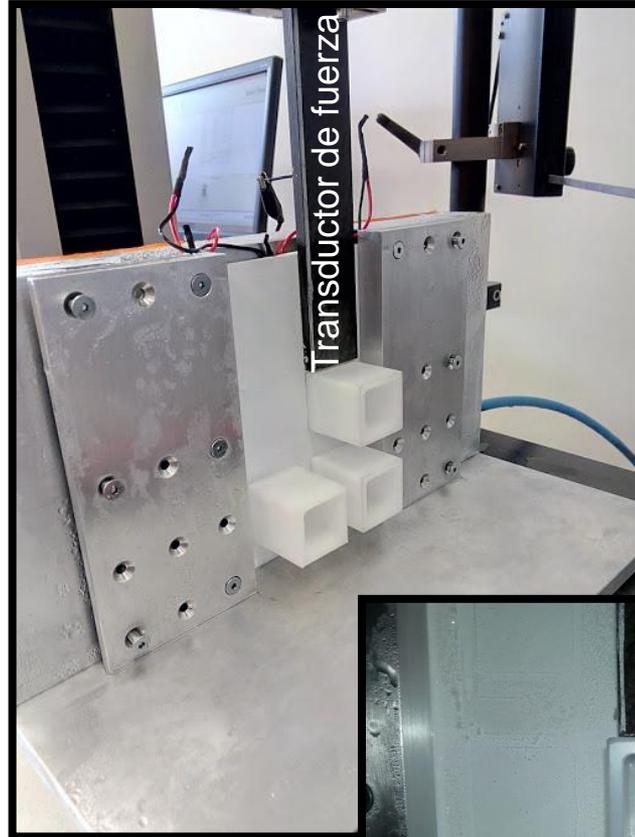
**Superhidrofobicidad  
+ alta rugosidad**



# MEDIDA DE LA ADHESIÓN DE HIELO



Máquina universal de ensayos (1 kN)



Cubetas



# ESTRATEGIA 1: SUPERHIDROFOBICIDAD

		Muestra	WCA [°]	$\tau_{hielo}$ [kPa]	$\Delta\tau_{hielo}$	
		Pintura comercial	78	576 ± 166	-	
1 paso	}	Pintura + NPs	77	385 ± 44	↓ 33%	
		Pintura + PDMS	P5	88	227 ± 64	↓ 61%
			P10	85	220 ± 108	↓ 62%
2 pasos	[	Pintura + PDMS + NPs *	> 130	≈ 40**	-	

\*  $t_{curado} > t_{gel}$

\*\* 1er ensayo, ≈ 380 kPa en el 4º ensayo

### Un paso (S1):

- No se obtiene comportamiento superhidrofóbico con siloxano ni con NPs embebidas en la pintura
- Reducción de la adhesión de hielo, pero no es suficiente

### Dos pasos (S2):

- Comportamiento superhidrofóbico en algunas formulaciones con NPs pulverizadas después de la gelificación
- Baja adhesión de hielo en el primer ensayo debido al arranque de NPs

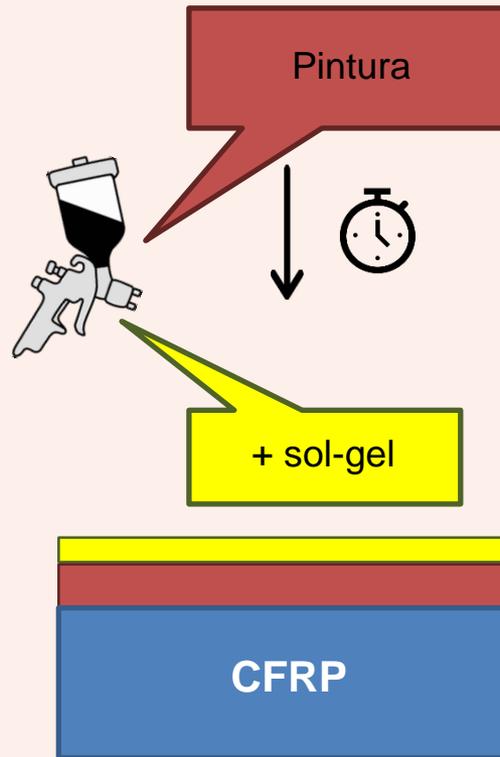


Estrategia 2

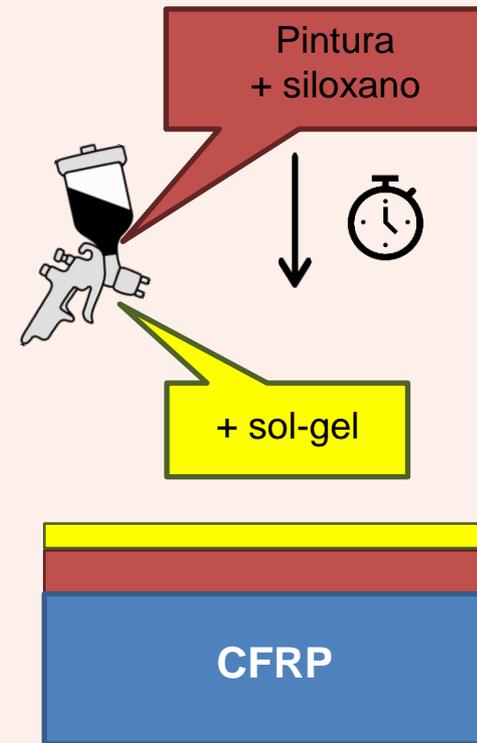
## Estrategia 2: rugosidad + hidrofobicidad

2 pasos (S3)

S3A



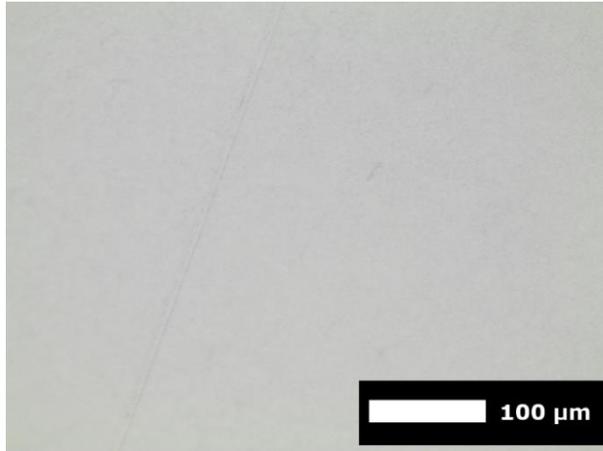
S3B



Morfología de la superficie

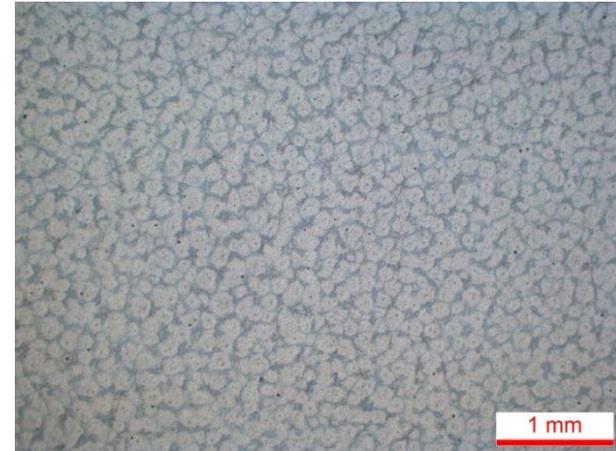
Pintura comercial

$R_a = 0,02 \mu\text{m}$



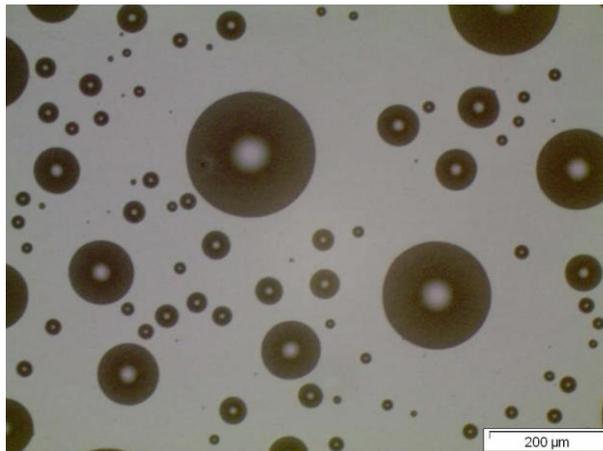
Pintura + PDMS

$R_a = 0,03 \mu\text{m}$



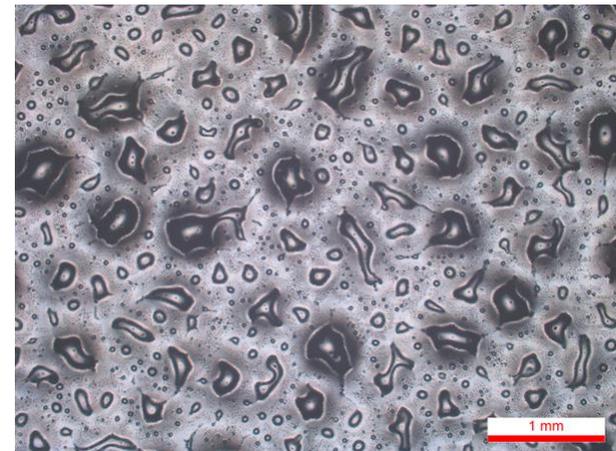
Pintura + sol-gel

$R_a = 1-7 \mu\text{m}$



Pintura + PDMS + sol-gel

$R_a = 1-7 \mu\text{m}$

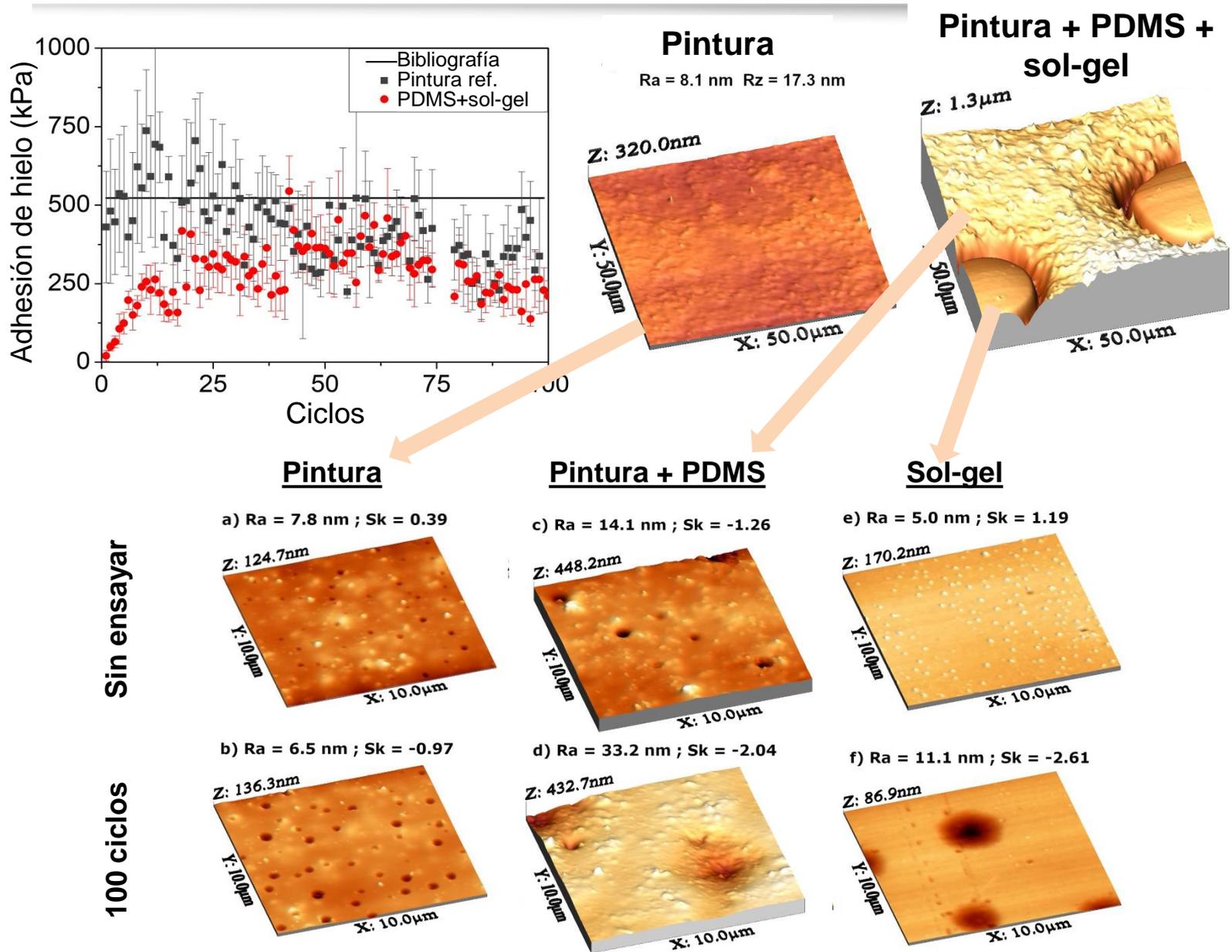


# ESTRATEGIA 2: RUGOSIDAD E HIDROFOBICIDAD

Muestra		WCA [°]	$\tau_{\text{hielo}}$ [kPa]	$\Delta\tau_{\text{hielo}}$
Pintura comercial		78	576 ± 166	--
Pintura + sol-gel	4.5	81	349 ± 88	↓ 39%
	4.6	89	367 ± 126	↓ 36%
	4.7	85	377 ± 84	↓ 34%
	4.8	79	320 ± 33	↓ 44%
Pintura + PDMS	P5	88	227 ± 64	↓ 61%
	P10	85	220 ± 108	↓ 62%
Pintura + PDMS + sol-gel	P5/4.8	84	113 ± 57	↓↓ 80%
	P10/4.1	83	135 ± 52	↓↓ 76%
	P10/4.2	84	≈ 60	↓↓ ≈ 90%

Formulaciones hidrofílicas con comportamiento anti-hielo  
(necesario modificar la pintura con siloxano)

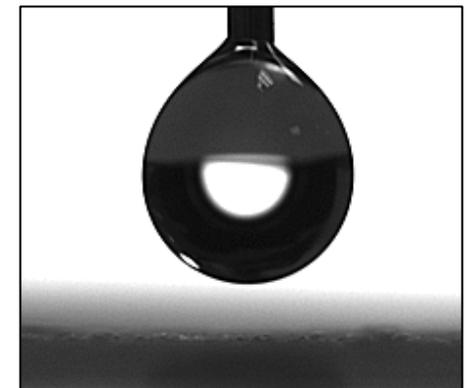
# ESTRATEGIA 2: RUGOSIDAD E HIDROFOBICIDAD



\*F. Carreño et al. *Materials Today Communications*, (2020) under review

## CONCLUSIONES

- ✓ Se han obtenido superficies **superhidrofóbicas** y **anti-hielo** partiendo de una pintura comercial.
- ✓ Estos recubrimientos tienen bajo coste y son respetuosos con el medio ambiente.
- ✓ La aplicación es sencilla y el procedimiento es escalable a la industria.
- ✓ Buena adhesión a la pintura.
- ✓ **PATENTE ES2734583**



## ACTIVIDADES FUTURAS Y EN PROCESO

- Ensayos convencionales para pinturas comerciales.
- Entender el proceso de degradación del recubrimiento
- Reparabilidad: ¿cuándo? ¿cómo?



- Comunidad de Madrid, Hubs de Innovación 2018, proyecto TEMACON
- Airbus D&S 
- Vestas 
- Beca UCM-2015-CT4/14

***¡Gracias por su  
atención!***

All rights reserved. Confidential and proprietary document. This document and all information contained herein is the sole property of FIDAMC. No intellectual property rights are granted by the delivery of this document or the disclosure of its content. This document shall not be reproduced or disclosed to a third party without the express written consent of FIDAMC. This document and its content shall not be used for any purpose other than that for which it is supplied. The statements made herein do not constitute an offer. They are based on the mentioned assumptions and are expressed in good faith. Where the supporting grounds for these statements are not shown, FIDAMC will be pleased to explain the basis thereof.