Síntesis de Materiales Gradiente Funcionales Ti-Al mediante sinterización solar reactiva

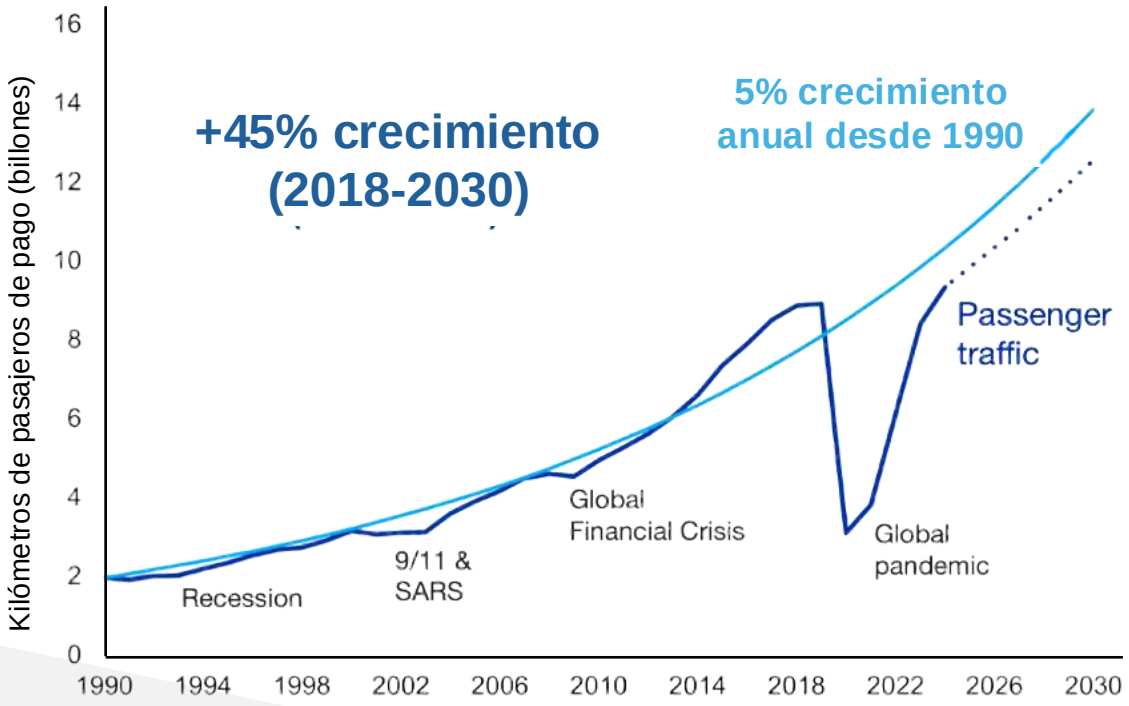
A. Sánchez Romero[1], A. Romero Gutiérrez[1], G.P. Rodríguez Donoso[2]

[1] Escuela de Ingeniería Industrial y Aeroespacial (EIIA), Instituto de Investigación Aplicada a la Industria Aeronáutica (INAIA), UCLM, Toledo, España

[2] Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial (ETSII), Instituto de Investigaciones Energéticas y Aplicaciones Industriales (INEI), UCLM, Ciudad Real, España

Abraham.Sanchez@uclm.es

Impacto de la aviación



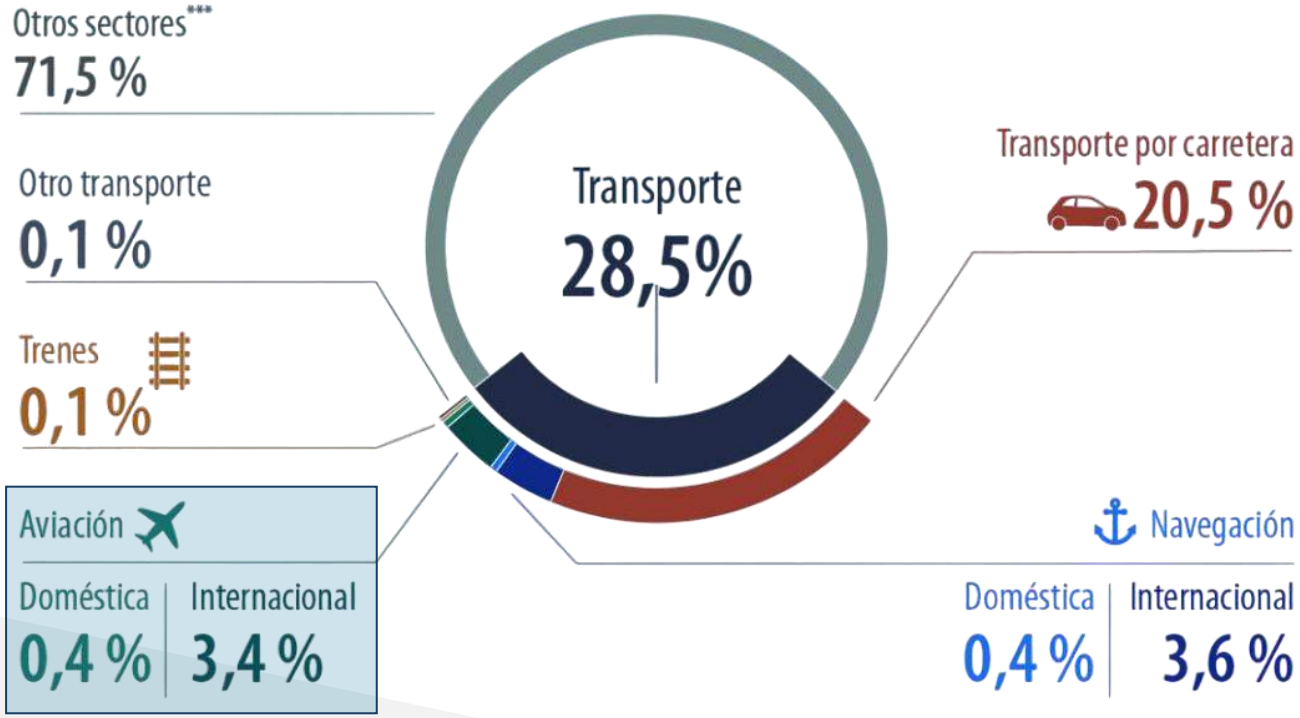
Fuente: Cirium, S&P Global Market Intelligence, Boeing Analysis

Datos del 2024

- ↑ 2.7% PIB a nivel mundial
- 4.8 mil millones de pasajeros
- 83.5% factor de ocupación

Fuente: Global Market Forecast Airbus 2025, IATA June 2025, S&P Global

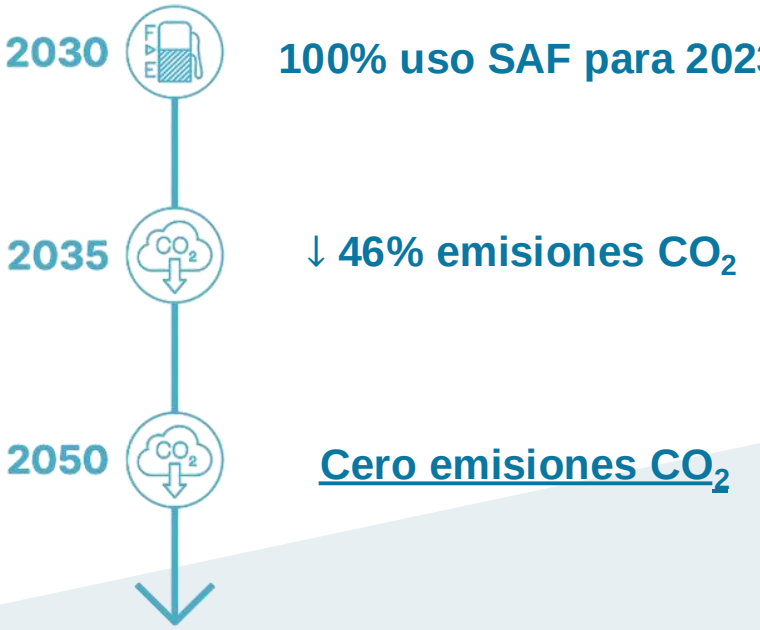
Camino hacia el carbono cero



Fuente: Agencia Europea del Medioambiente (2022)

Plan estratégico OACI 2026-2050

Aviación sostenible. Cero emisiones 2050



Fuente: Global Market Forecast Airbus 2025, IATA, Airbus GMF 2025

Rutas hacia la descarbonización

Directas

Usar menos **energía**

- **Aerodinámica**
- **Estructuras**
- **Propulsión**
- **Infraestructura/ Operaciones**

Uso de **energía** descarbonizada

- **SAF**
- **Hidrógeno como combustible**

Distribución de masas



- 1/3 Combustible
- 1/3 **Materiales**
- 1/3 Tripulación

Mayor rendimiento
Menor peso

Indirectas

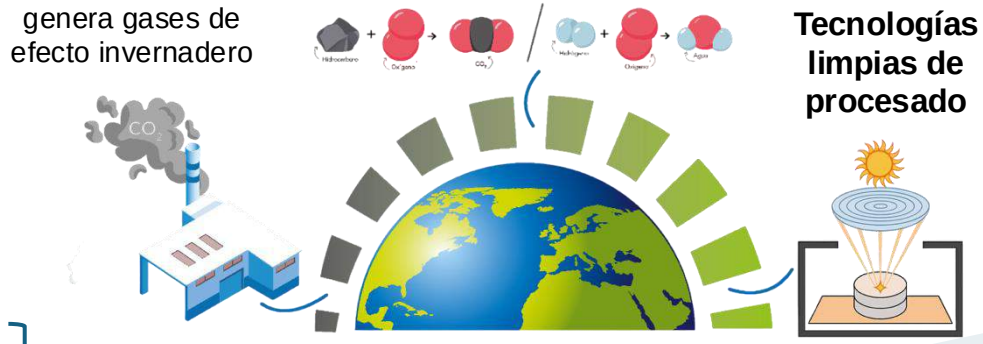
Pacto verde Europeo 2050

Procesos de fabricación **Sostenibles**

La industria manufacturera genera gases de efecto invernadero

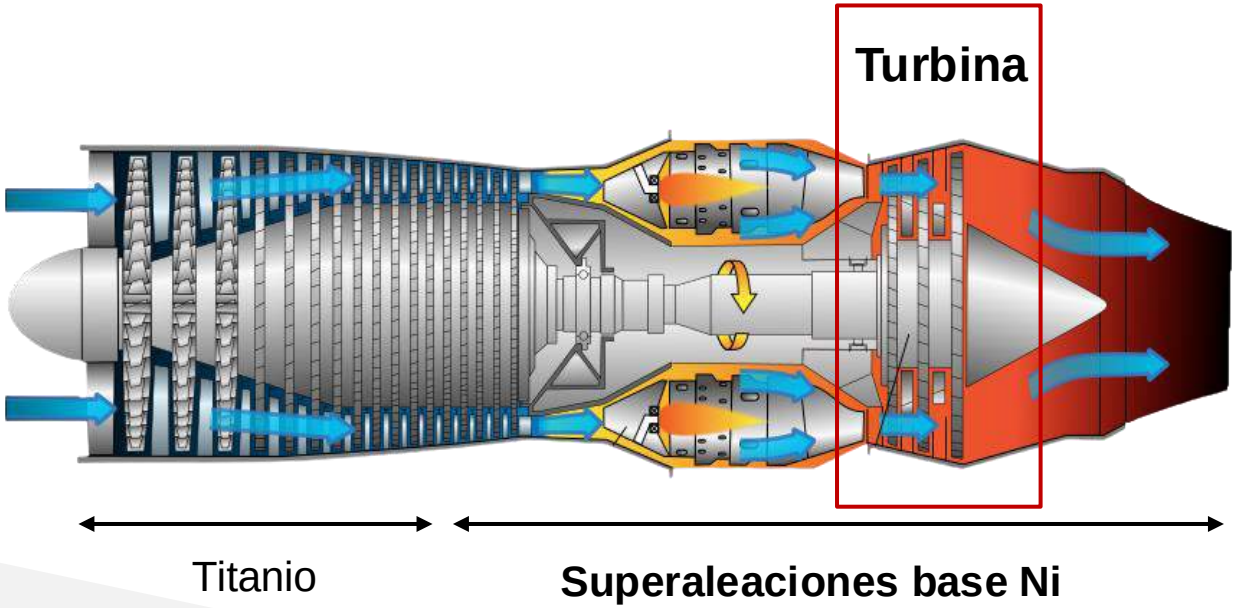
Nuevos procesos de combustión

Tecnologías limpias de procesado



Fuente: Kalfrisa

Materiales para aerorreactores

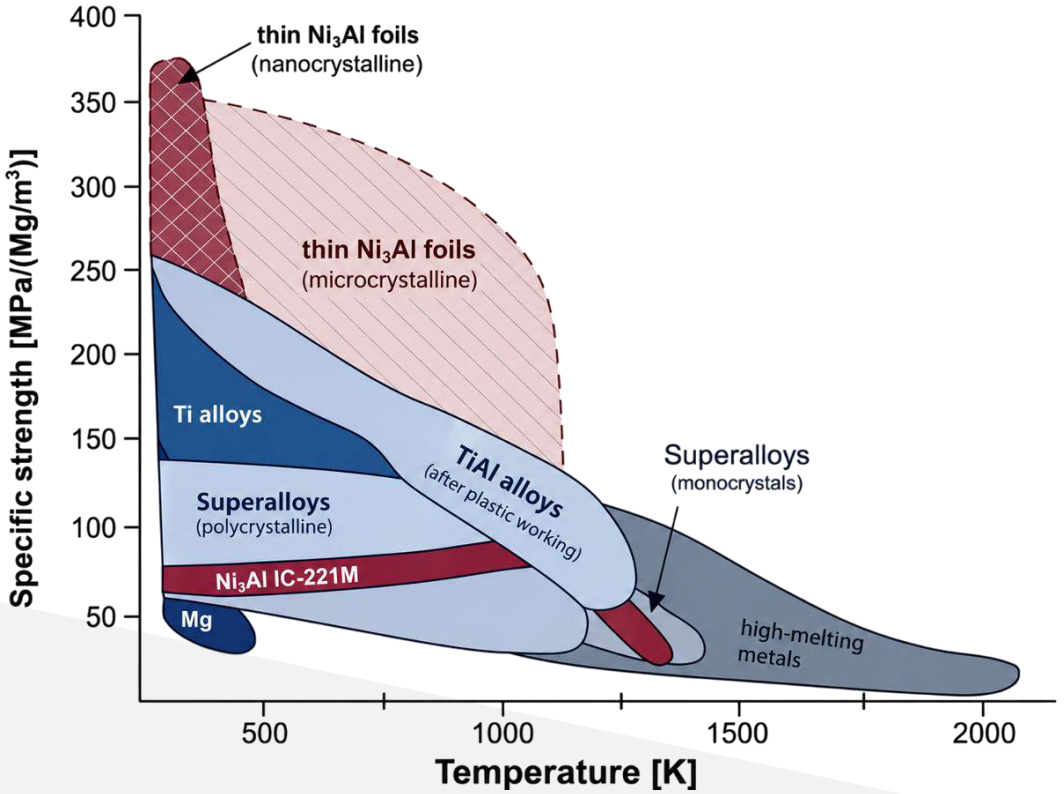


Requisitos de materiales

- Resistencia a altas temperaturas
- Baja densidad
- Resistencia a la oxidación y corrosión
- Dureza superficial
- Resistencia a la fatiga
- Buena conductividad térmica

TiAl vs Superaleaciones

Turbina Baja Presión (TBP): Temperaturas de operación ≈ 800 ºC



	Ti-Al	Inconel
Temperatura máxima de operación (ºC)	**800**	1050-1150
Resistencia a la fatiga	Moderada Formación de grietas por fragilidad	Alta
Densidad (g/cm^3)	**3.9-4.2**	8.2-8.9
Conductividad térmica (W/m^2)	**15-25**	10-15
Resistencia a la oxidación y corrosión	Buena, forma capa protectora de Al_2O_3	Muy alta
Dureza superficial	Alta	Alta
Coste	**Medio**	Alto

Fuente: S, Sampath; V.P, Ravi; S, Sundararajan. Crystals, An Overview on Synthesis, Processing and Applications of Nickel Aluminides: From Fundamentals to Current Prospects, **2023**, 13(3), 435.

TiAl vs Superaleaciones

GE Aerospace
https://www.geaerospace.com › g...

GE Aviation fired up on CMCs

The GEnx demonstrator engine will be rebuilt and run with the same combustor liners, HPT stage 1 shrouds and HPT stage 2 nozzles, **LPT TiAl blades** and the next- ...

Harvard University
https://ui.adsabs.harvard.edu › abs

TiAl alloys in commercial aircraft engines

de BP Bewlay · 2016 · Citado por 771 — The present article will describe aspects of the science and technology of **titanium aluminide (TiAl)** alloy system and summarise the low and high temperature ...

MTU Aero Engines
https://www.mtu.de › press-archive

MTU Aero Engines develops new turbine blade material

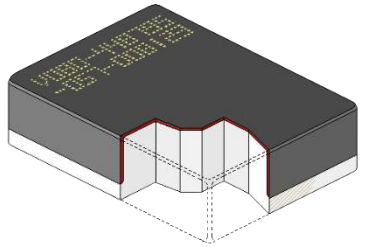
23 mar 2015 — **Titanium aluminide (TiAl)** is the name of the new lightweight material for turbine blades that combines the advantages of metallic and ceramic materials.

TiAl en el sector espacial



Escudo térmico nave tripulable Orion programa Artemis

Sistema de protección térmica (TPS)



TPS del transbordador espacial

Losetas refractarias: SiO_2
+
Materiales ablativos:
Corcho, resinas

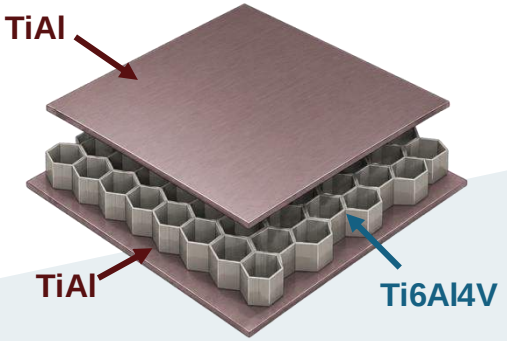
No reutilizables, baja tolerancia al impacto y fatiga térmica de los cerámicos y consumo sacrificial del material ablativo

Alternativa:

Sistemas de protección metálicos:



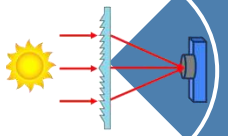
- **Reutilizables**
- **Mayor tolerancia al daño**
- **Estables a ↑ Temperaturas**
- **Núcleo tenaz**



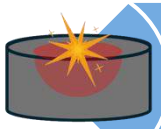
Fuente: Nieke, P., Chopovda, V., Rattenbury, N. J., Fedorov, M., Semkiv, M., & Mital, S. CEAS Space Journal, Analysis and optimisation of titanium alloy sandwich structures for thermal protection, **(2025),** 17, 1–10.

Fuente: Barrett, R. T. (Ed.). American Institute of Aeronautics and Astronautics , *Alloys and coating development for metallic TPS for reusable launch vehicles*, (**2002**).

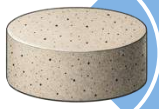
Objetivos



Uso de la ESC para la sinterización reactiva de FGM de intermetálicos TiAl



Activación de reacciones de Síntesis Autopropagadas a Altas Temperaturas (SHS)



Síntesis de intermetálicos TiAl con diferente estequiometría

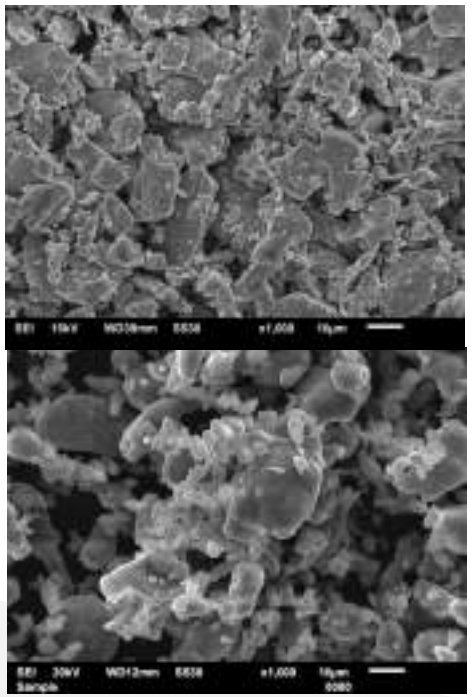


Sinterización reactiva de sistemas multicapa de intermetálicos TiAl

Metodología del proceso pulvimetalúrgico

Titanio

Aluminio

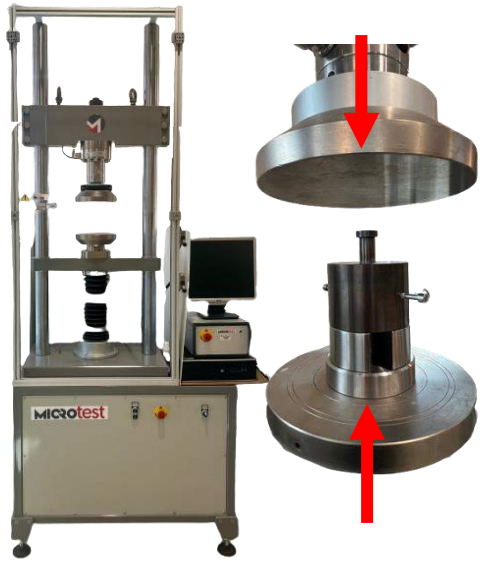


Tamaño de partícula < 45 μm

Mezclado



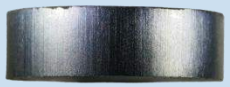
Compactación



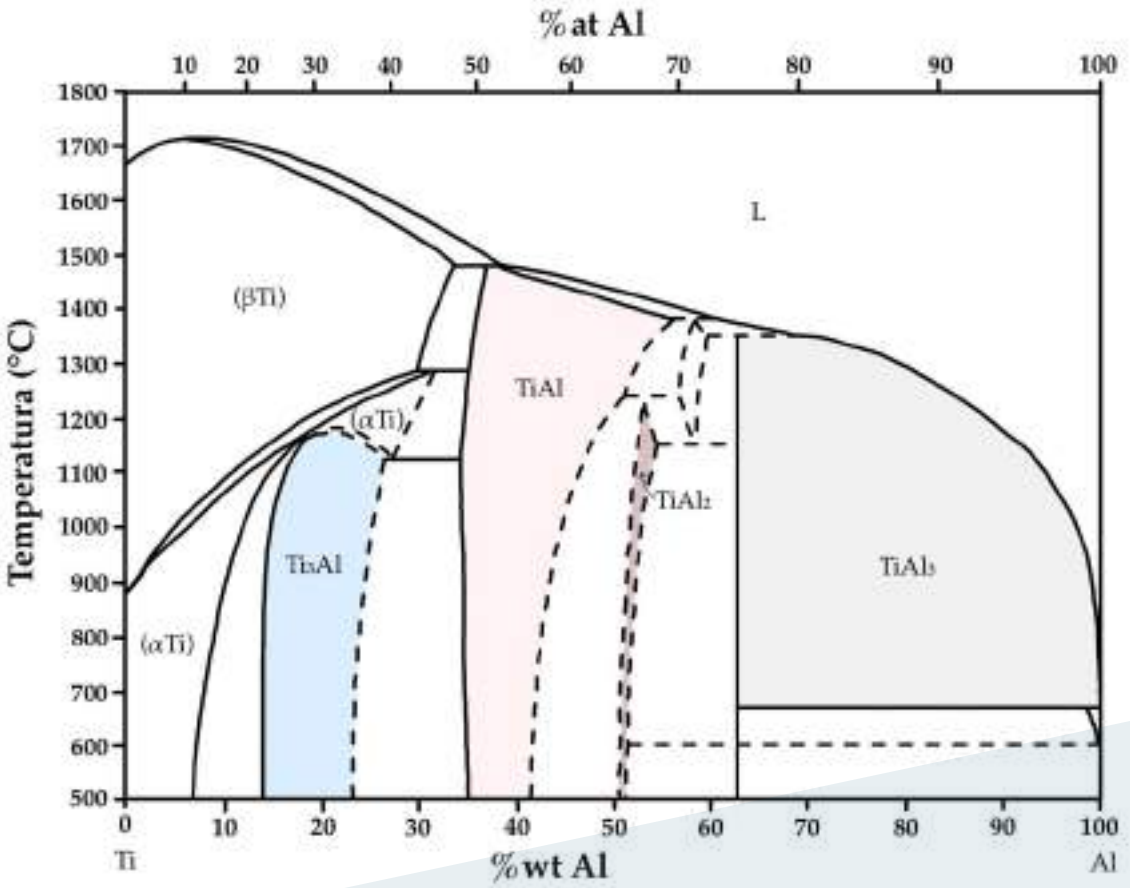
Sinterización Solar



Sistemas fabricados

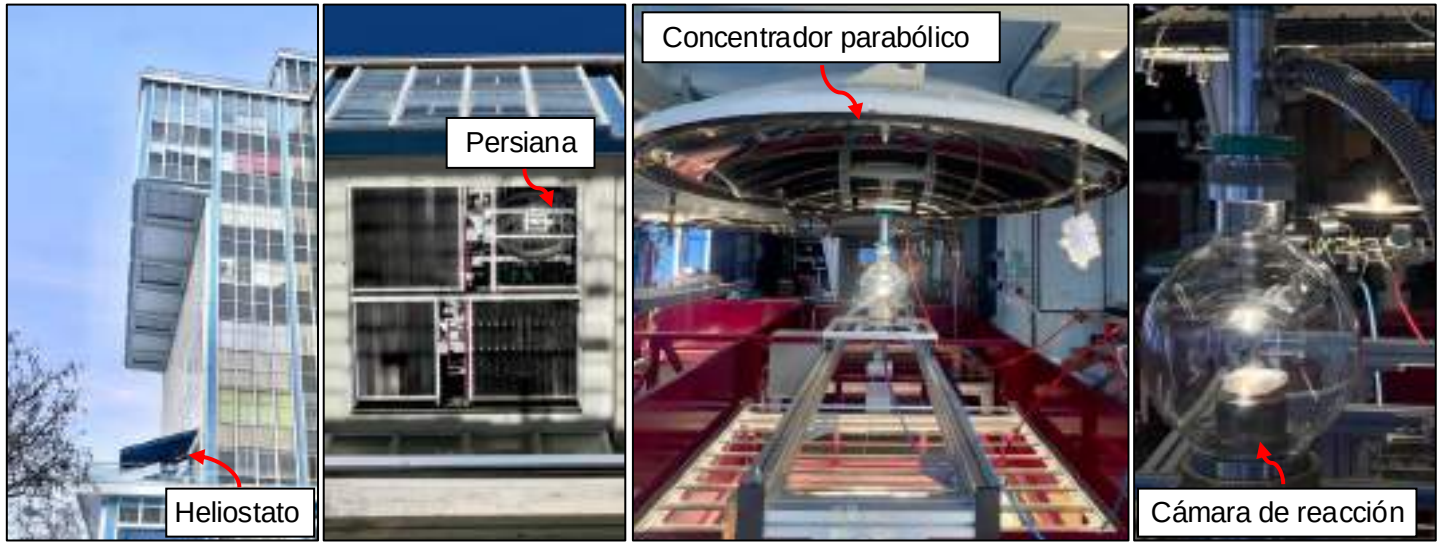
Monocapa	Multicapa	FGM
Ti_x-Al_y 	Ti/Ti_x-Al_y/Ti 	5 capas 

Atm argón; Composiciones expresadas en %wt; x: 87, 75, 62.
Gradiente Ti/87Ti-13Al/75Ti-25Al/62Ti-38Al/Al



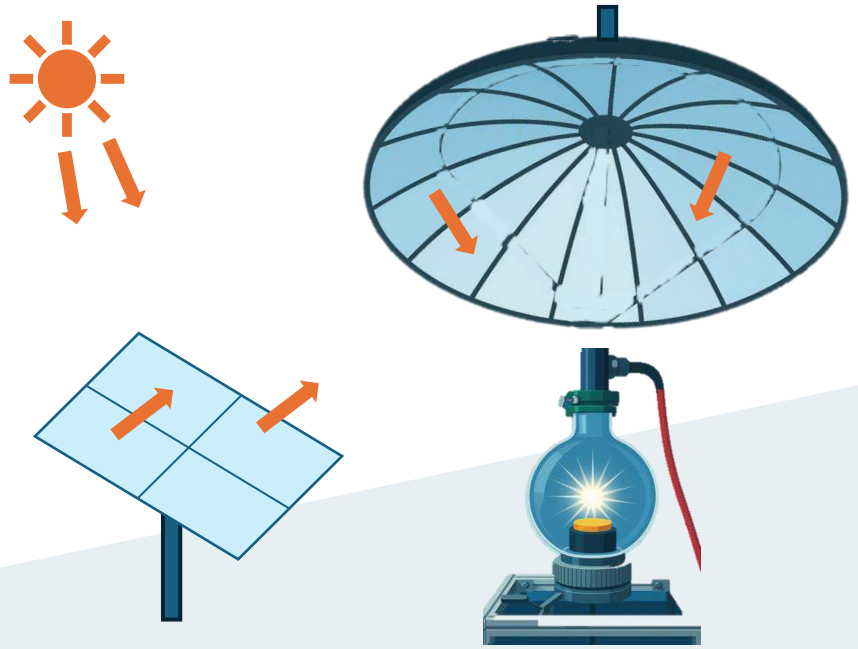
- γ – TiAl: elevada dureza, pero frágil.
- α_2 – Ti_3Al: mayor tenacidad con dureza moderada
- Bifásica $\gamma + \alpha_2$: Equilibrio entre dureza y tenacidad

Energía Solar Concentrada (ESC)

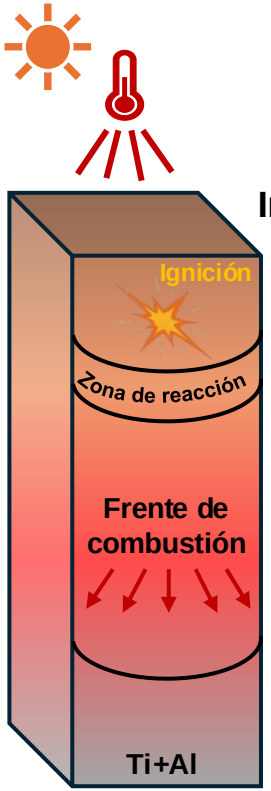


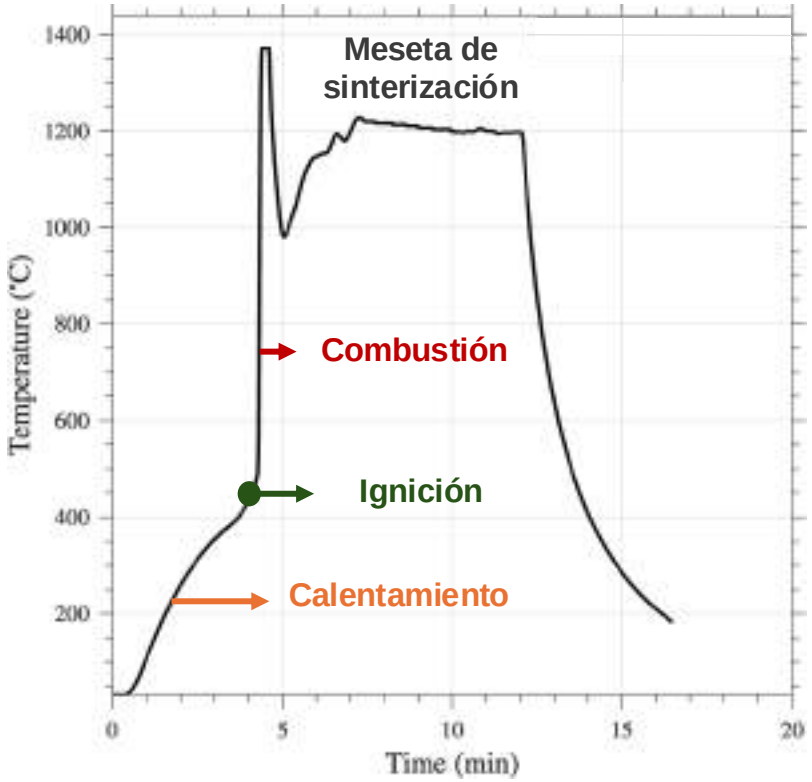
Horno solar de Odeillo: PROcédés Matériaux et Energy Solaire (Promes-CNRS)

- **Activación de reacciones exotérmicas**
- Mayor eficiencia energética
- Procesado sostenible de materiales metálicos en apenas unos minutos



Síntesis autopropagada a alta temperatura (SHS)





Permite llevar a cabo la sinterización reactiva del material:

Primera fase intermetálica

$$Ti + 3Al = TiAl_3 + \Delta H_1$$
$$TiAl_3 + 2Ti = 3TiAl + \Delta H_2$$ → Fase principal estable
$$3TiAl + Ti = Ti_3Al + \Delta H_3$$

Fase estable rica en Ti

$$\Delta G_{f1}(TiAl_3) = -40349 + 10{,}365 \cdot T$$
$$\Delta G_{f2}(TiAl) = -37445 + 16{,}793 \cdot T$$
$$\Delta G_{f3}(Ti_3Al) = -29233 + 6{,}708 \cdot T$$

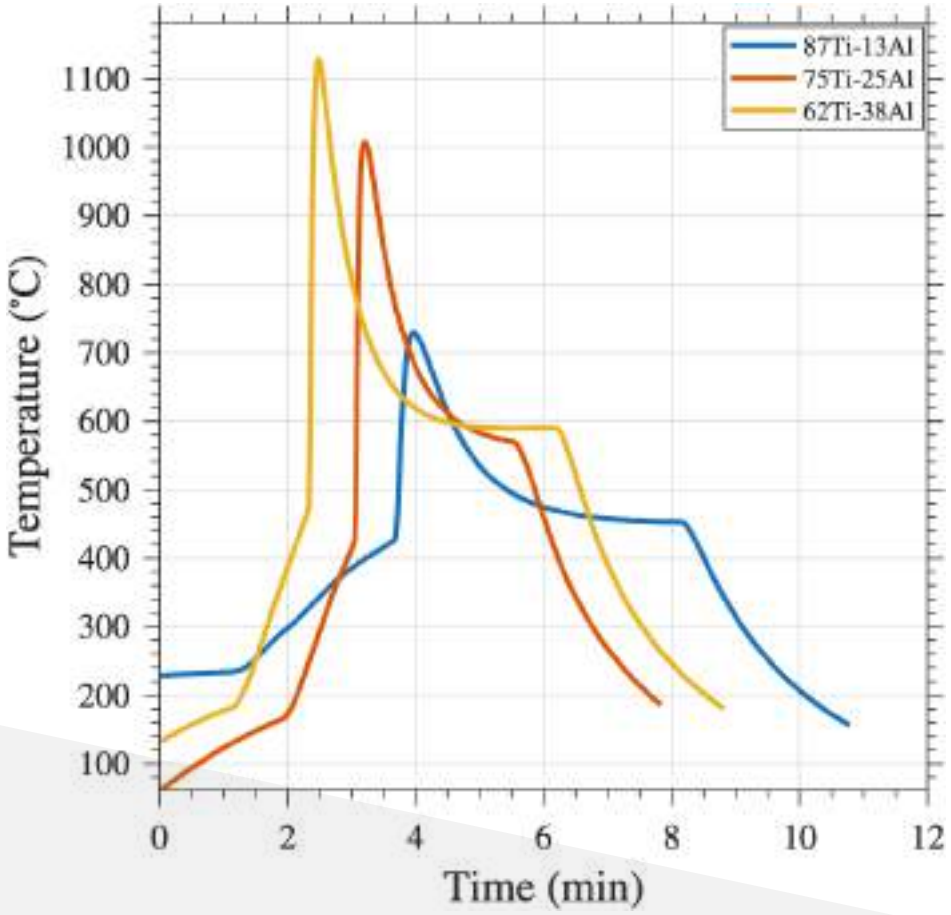
Unidades J/mol. Temperatura expresada en Kelvin

Fuente: H, Sina; S, Iyengar. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Reactive synthesis and characterization of titanium aluminides produced from elemental powder mixtures*, **2015**, *122, 689-698.*

Trabajos previos:

A, Romero; G.P, Rodríguez; E, Marjaliza *Journal of Alloys and Compounds, Processing of intermetallic laminates by Self-Propagating High–Temperature Synthesis initiated with concentrated solar energy*, **2021**, *891.*

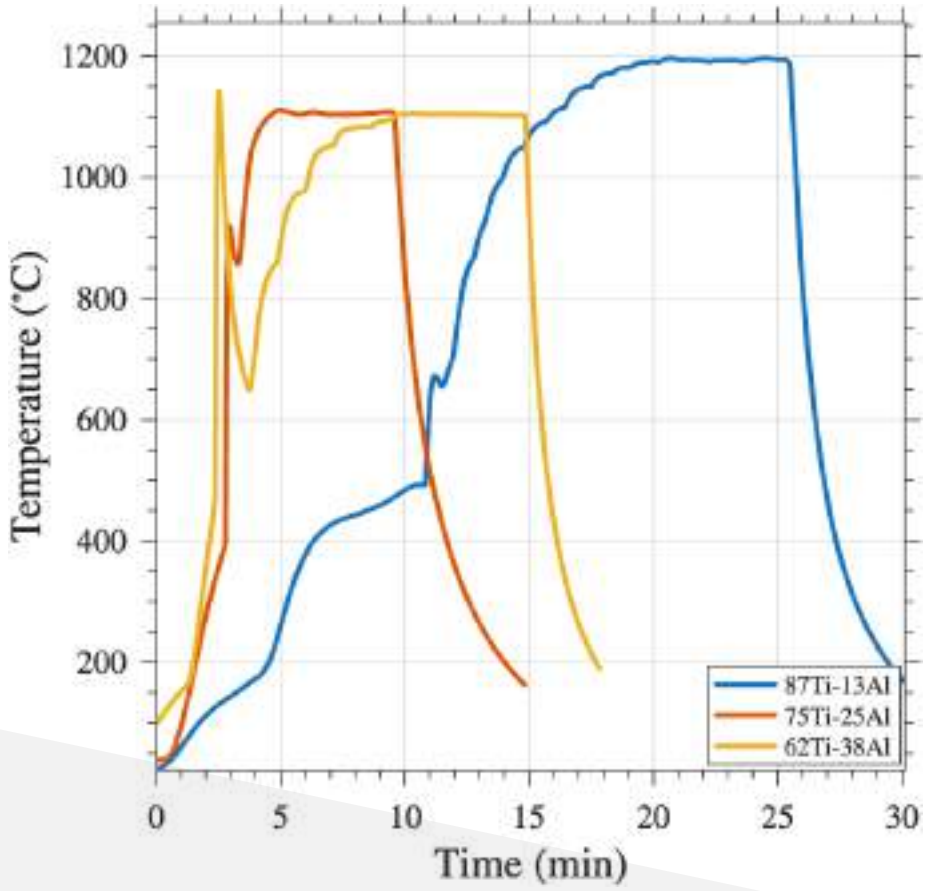
Síntesis autopropagada a alta temperatura (SHS)





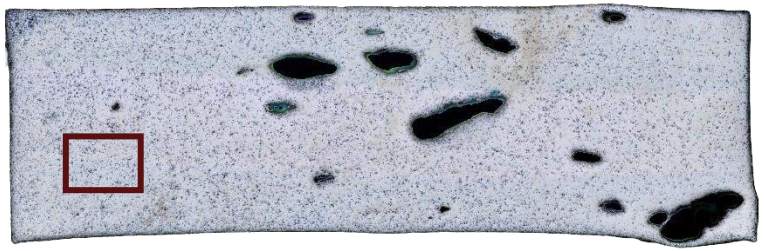
La energía liberada aumenta al incrementar el contenido en aluminio

Sinterización reactiva monocapa



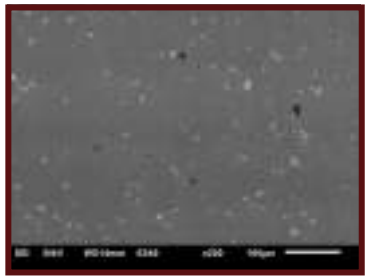
- **Alta densidad relativa**
- **Formación de macroporosidad en regiones más exotérmicas**

87Ti-13Al: 1200 ºC 5min

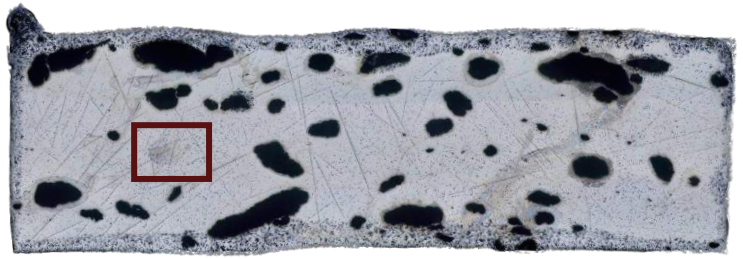


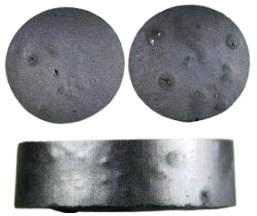


$\alpha\text{-}Ti + Ti_3Al$

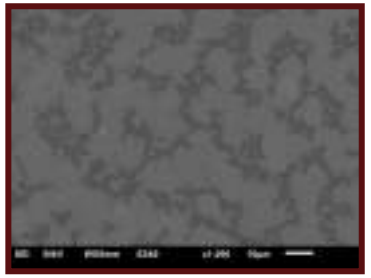


75Ti-25Al: 1100 ºC 5min

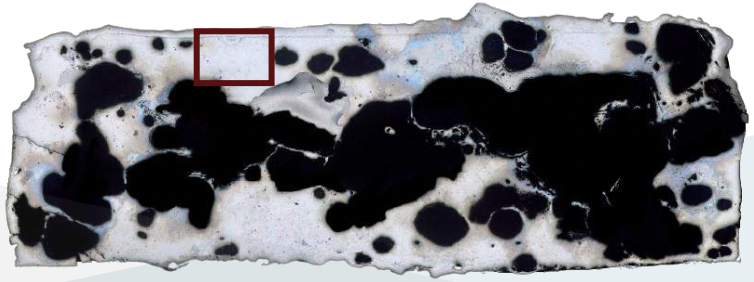


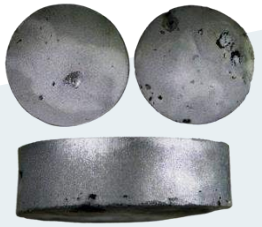


$Ti_3Al + TiAl$

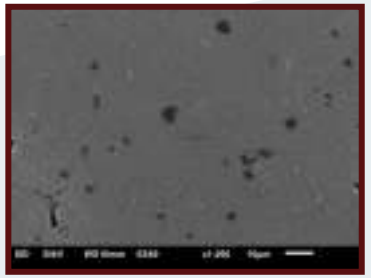


62Ti-38Al: 1100 ºC 5min

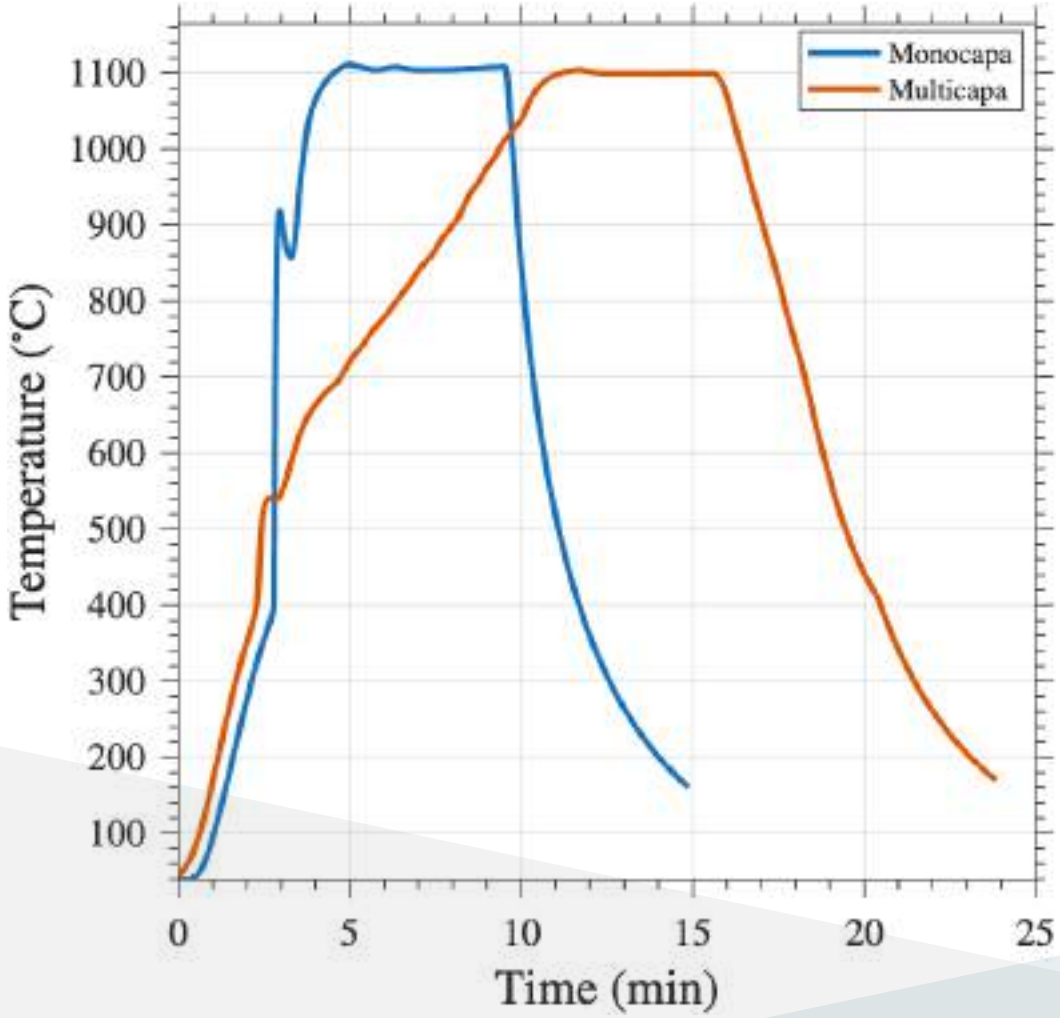




$TiAl$



Sinterización reactiva multicapa



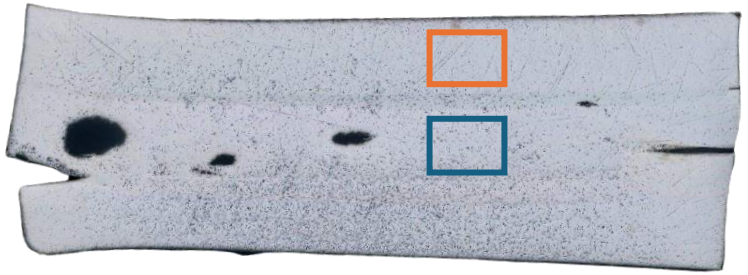
Reacción más controlada:

- Las capas externas de titanio actúan como sumideros de calor.
- También, impiden que la capa central se expanda debido a la menor densidad de los intermetálicos

Mayor calidad en la capa central

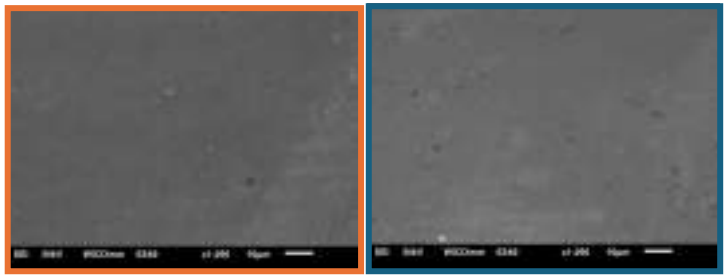
Sinterización reactiva multicapa

87Ti-13Al: 1100 ºC 5min

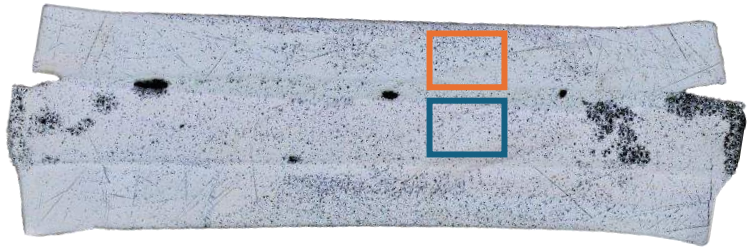




α–Ti | α-Ti + Ti_3Al

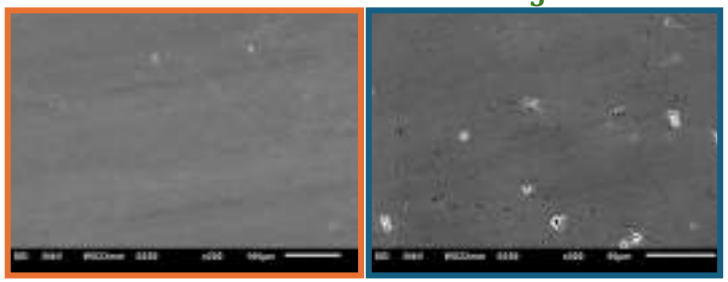


75Ti-25Al: 1000 ºC 5min

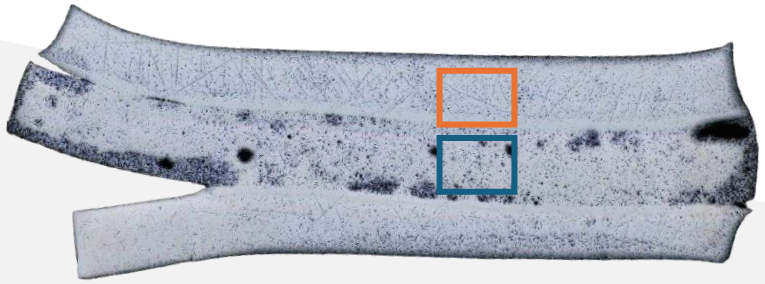




α–Ti | Ti_3Al

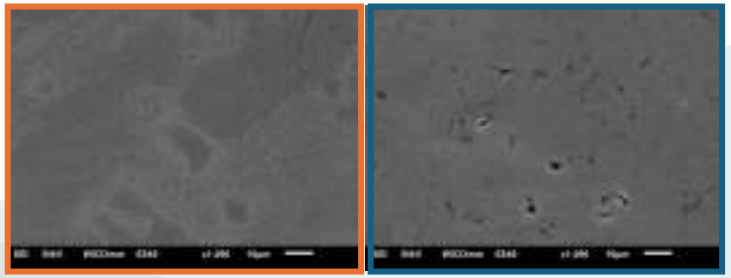


62Ti-38Al: 1000 ºC 5min

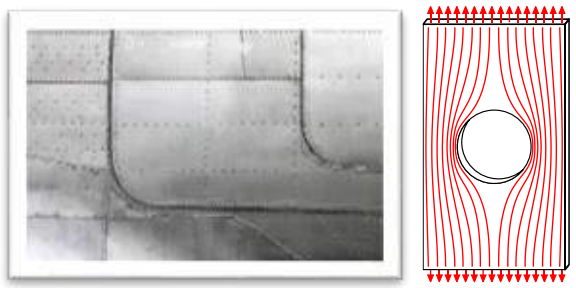




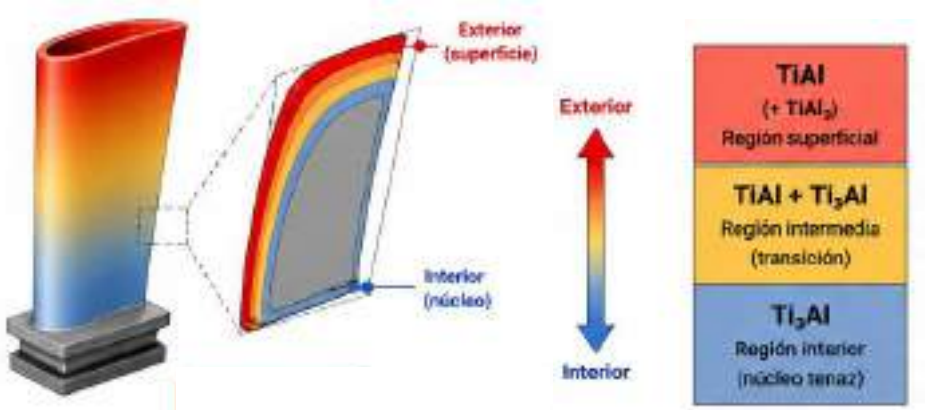
α–Ti | Ti_3Al + $TiAl$



Materiales con Gradiente Funcional

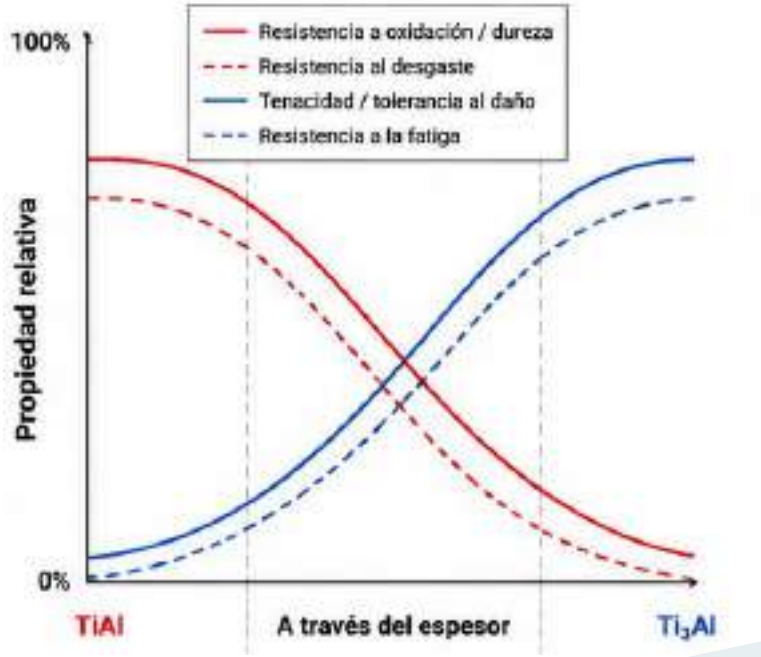


- Uniones mecánicas: 6% del peso total de la aeronave
- Regiones débiles debido a concentración de tensiones

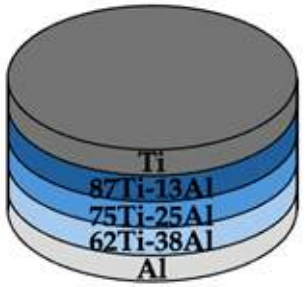


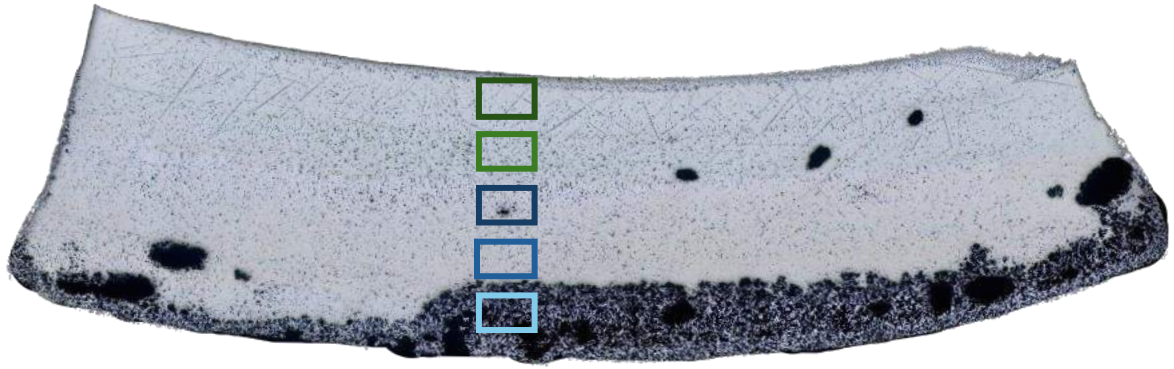
TiAl FGM

- **Propiedades adaptadas a las solicitaciones de cada parte de un mismo componente**
- **Disminución de peso y número de piezas**



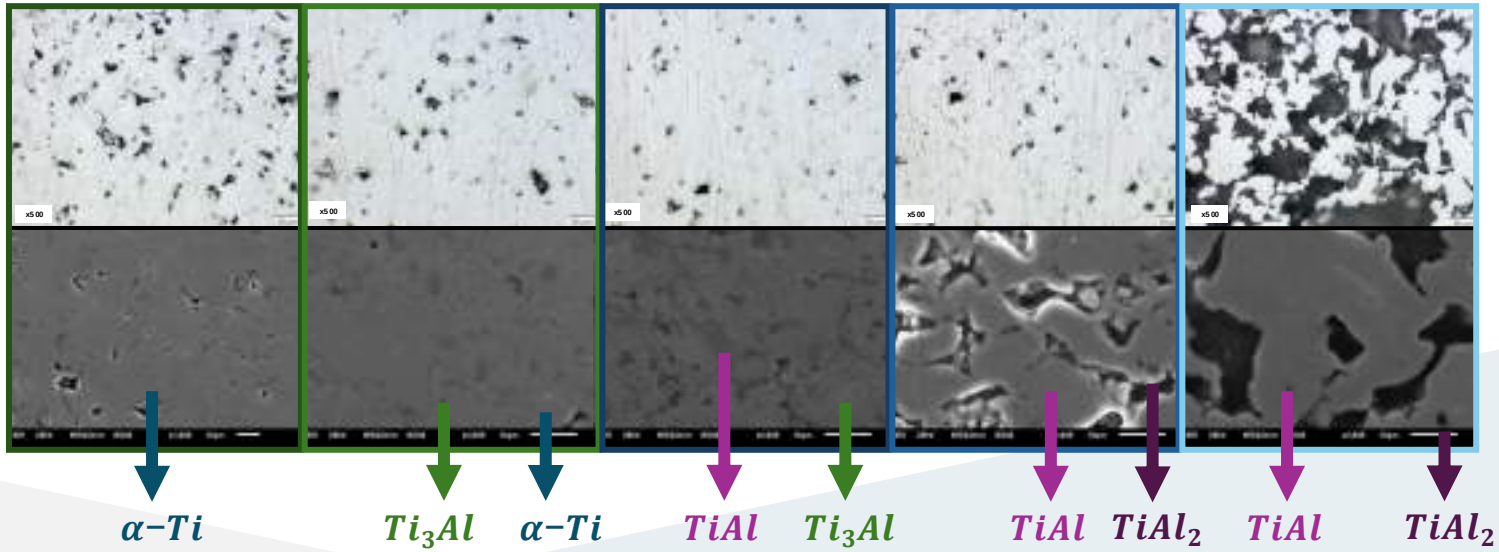
Intermetálicos TiAl con Gradiente Funcional





Microestructura y propiedades gradientes reguladas según la composición química

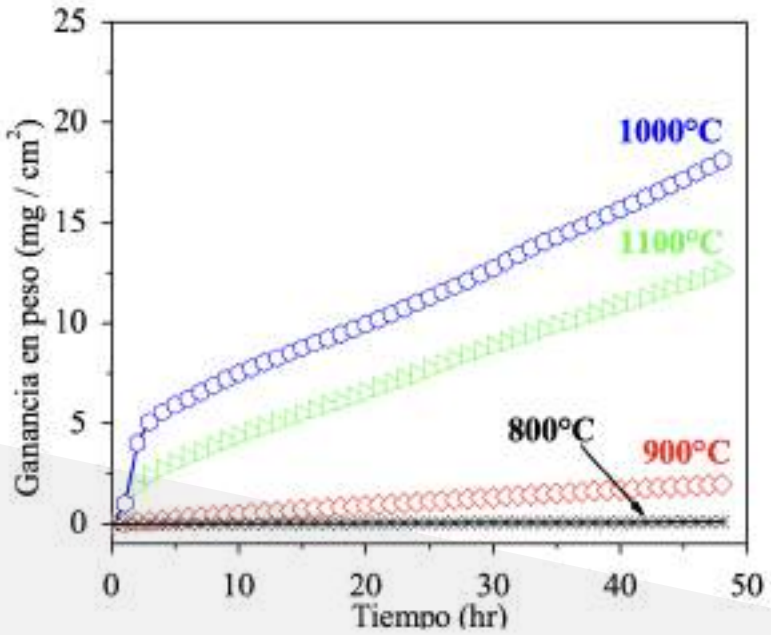
Unión entre capas de mayor calidad debido a propiedades termofísicas más similares



¿Cómo aumentar la resistencia a la oxidación?

La resistencia a la oxidación de los intermetálicos TiAl está controlada por la formación de una capa pasiva de alúmina en la superficie

Ganancia de masa TiAl



Fuente: E, Huape; M, Sánchez-Carrillo; J, Ríos; A, Medina; L, Béjar; J, Chacón-Nava. Oxidación en Alta Temperatura de Aluminuros de Titanio en Atmósfera de Aire, **2016**.

A partir de 800 ºC:

$D(O_2) > D(Al)$ en TiAl

El aluminio se consume y comienza la formación de una capa de óxido activa titanio (TiO_2)

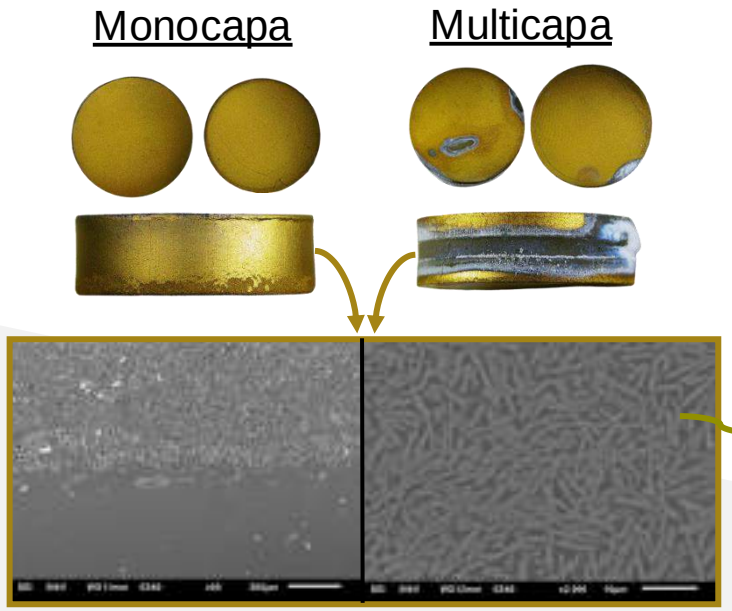
Solución: Disminuir la difusividad del oxígeno mediante la síntesis de capas nitruradas

Nitruración superficial

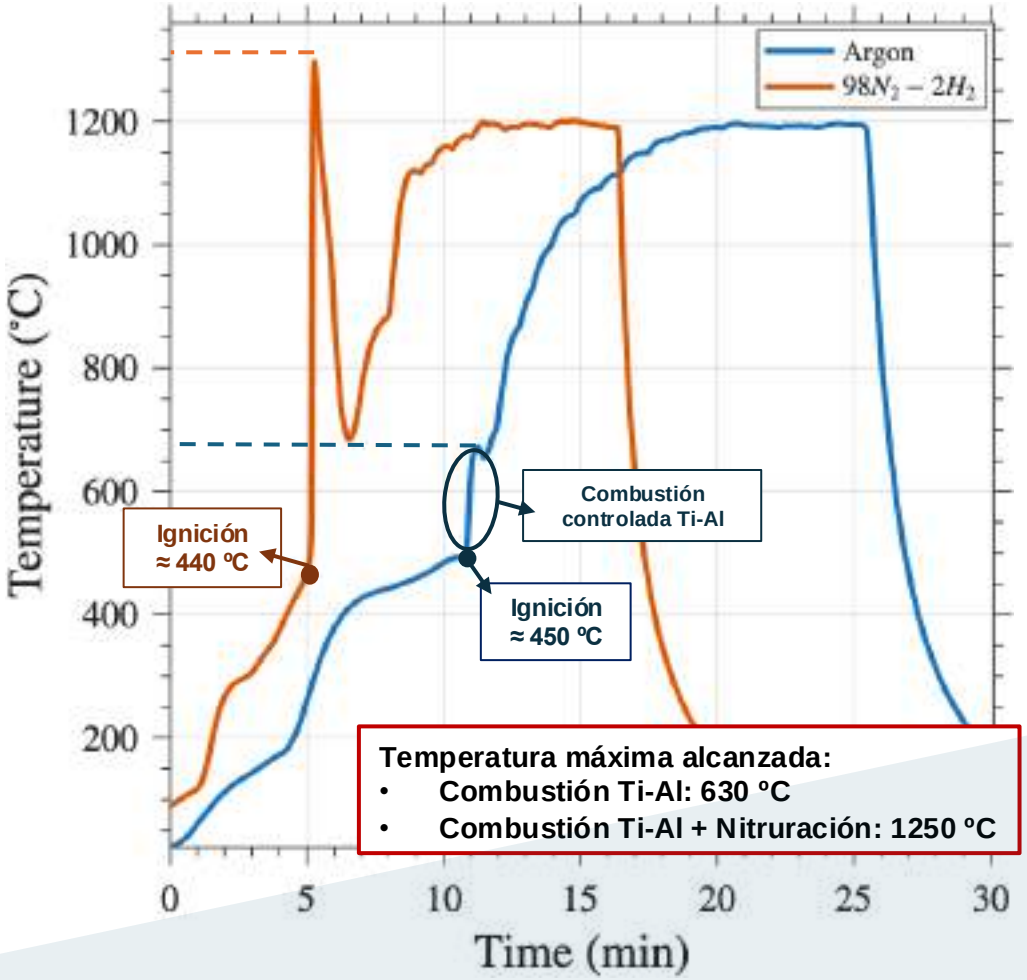
$$2Ti + N_2 = 2TiN + \Delta H_1$$

$$\Delta G_f(TIN) = -203553 + 65{,}29\ \left(\frac{J}{mol}\right)$$

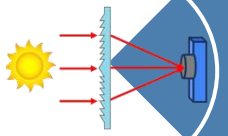
Un orden de magnitud mayor que la energía liberada en la reacción SHS entre Ti-Al



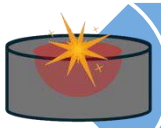
Frena la difusión del oxígeno y aporta a la sinterización reactiva energía superficial



Conclusiones



Se sinterizan reactivamente FGM de intermetálicos TiAl en solo 5 minutos mediante ESC



Se consigue la activación y el control de reacciones de Síntesis Autopropagadas a Altas Temperaturas (SHS)



Se controla la formación de intermetálicos Ti_3Al, TiAl y $TiAl_3$ según la composición de la mezcla



Se obtiene una excelente unión entre capas y se logra la nitruración superficial como método de protección frente a la oxidación

Agradecimientos

- Proyecto Europeo RISEnergy (SOL-AM, n.º 823802) financiado por el programa de Investigación e Innovación de la UE Horizonte 2020
- Proyecto de Investigación Científica y Transferencia Tecnológica, JCCM, 2024–2026 (SBPLY/23/180225/000201)

Síntesis de Materiales Gradiente Funcionales Ti-Al mediante sinterización solar reactiva

A. Sánchez Romero[1], A. Romero Gutiérrez[1], G.P. Rodríguez Donoso[2]

[1] Escuela de Ingeniería Industrial y Aeroespacial (EIIA), Instituto de Investigación Aplicada a la Industria Aeronáutica (INAIA), UCLM, Toledo, España

[2] Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial (ETSII), Instituto de Investigaciones Energéticas y Aplicaciones Industriales (INEI), UCLM, Ciudad Real, España

Abraham.Sanchez@uclm.es