

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 728 524**

51 Int. Cl.:

F24S 23/70 (2008.01)

F24S 23/79 (2008.01)

G02B 5/10 (2006.01)

G02B 7/18 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.12.2015 E 15382611 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.03.2019 EP 3179176**

54 Título: **Faceta solar de tipo sándwich termobalanceada**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
25.10.2019

73 Titular/es:

LOZANO PEÑA, RICARDO (100.0%)
Avenida del Papa Negro, 129 - 5ºE
28043 Madrid, ES

72 Inventor/es:

LOZANO PEÑA, RICARDO

74 Agente/Representante:

TEMIÑO CENICEROS, Ignacio

ES 2 728 524 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Faceta solar de tipo sándwich termobalanceada

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere a las facetas solares tipo sándwich usadas en heliostatos, reflectores Fresnel y colectores cilindroparábolicos que se instalan en plantas termosolares de producción de energía térmica.

La invención también puede aplicarse a otros campos que requieren elementos de superficie reflectantes de elevada prestación, así como otros campos que requieran concentración de luz solar, como concentración fotovoltaica (CPV), tratamiento de aguas, reactores fotoquímicos, generadores de vapor o procesos que aprovechen la energía solar para el calentamiento de materiales.

10 Técnica anterior

Uno de los objetivos principales de muchas de las diversas tecnologías de concentración y aprovechamiento de la energía solar es aumentar la intensidad de la radiación solar concentrada, obteniendo así conversiones termodinámicas de mayor eficiencia y rendimiento energético. Dentro de dichas tecnologías, son especialmente relevantes los sistemas concentración solar de torre central, que constan de un campo solar usualmente compuesto por estructuras con múltiples espejos individuales, que configuran un gran casquete esférico o paraboloide, en cuyo foco se sitúa el receptor fijo. Mediante estos sistemas, la radiación solar incidente en los elementos reflectores que siguen el movimiento solar (denominados dichos elementos reflectores como heliostatos) es concentrada y enfocada sobre el receptor, situado en lo alto de una torre. De este modo, el receptor absorbe la radiación recibida y la transfiere, en forma de energía térmica, a un fluido de transporte, denominado fluido caloportador, bien para ser usada directamente en el proceso térmico o termodinámico correspondiente, o bien para ser almacenada como energía térmica, para usarse posteriormente.

La reflexión de la radiación incidente en los elementos receptores depende, en gran medida, de las características materiales y geométricas de dichos elementos, así como de la variación de dichas características en condiciones de trabajo o debido al paso del tiempo. Algunas de las características a considerar en la calidad de la reflexión de la radiación son, entre otras, la reflectividad de los elementos reflectores, su calidad óptica, curvatura, peso, rigidez, su resistencia a impactos o sus dimensiones.

La reflectividad es un parámetro que indica la cantidad porcentual de la radiación incidente que es reflejada por el reflector. Este parámetro incide directamente en el rendimiento global del campo solar.

La calidad óptica de la superficie reflectante indica la desviación angular de la radiación reflejada en cada elemento de superficie respecto a su dirección de reflexión teórica. Este parámetro influye directamente en la calidad y forma del haz de radiación reflejado, pudiendo generar la dispersión de la radiación y el incremento del tamaño o deformación de la mancha solar (forma definida al impactar el haz reflejado sobre una superficie) cuando el valor de la desviación angular aumenta (es decir, disminuye la calidad óptica). Cabe recordar que un pequeño error angular en la inclinación de la superficie se percibe como una desviación del haz reflejado dependiente de la distancia al receptor y del error angular.

La curvatura del elemento reflectante es un parámetro de gran importancia ya que, según la óptica geométrica, la radiación se concentrará en el punto focal del espejo. Por tanto, en un campo solar es importante definir una curvatura adecuada de los reflectores en función de su distancia al reflector.

El peso del elemento reflector incide directamente en el coste de la estructura soporte, ya que ésta deberá ser más rígida para sostenerlo. Sin embargo, el diseño del elemento reflector puede aportar rigidez a la estructura, aliviando parte de la carga que ésta recibe.

Adicionalmente a las propiedades mecánicas de los reflectores ya comentadas, es importante que los reflectores presenten una resistencia a impactos suficiente para que el campo solar resista una tormenta de granizo o proyectiles arrastrados por el viento.

45 Dentro de los reflectores aptos para su uso en campos solares de heliostatos, es conocido el uso de facetas, configuradas como una pluralidad de subelementos reflectores, que se disponen en sucesión formando la superficie reflectora efectiva del heliostato. Dentro de las diferentes tecnologías de facetas empleadas en el estado de la técnica, las facetas solares de tipo sándwich son estructuras multicapa, constituidas por superposición de varias capas formando un sándwich, empleadas para concentrar la radiación del sol en plantas termosolares o en otras aplicaciones (hornos solares, etc.). Sin embargo, también existen otros tipos de faceta sin estructura tipo sándwich, como las enunciadas a continuación:

50 La solicitud de patente BR PI/0616180 (Novatec Biosol AG) consiste en una faceta conformada por adhesivado en molde del espejo a un sustrato rígido.

La solicitud de patente ES 2326586 (Sener Ingeniería y Sistemas, S.A.) divulga una faceta de espejo adhesivada sobre un soporte estampado.

Ambas propuestas son similares y, en ambas, su baja rigidez deteriora drásticamente las prestaciones ópticas ante la acción de su propio peso o del viento, resultando así inadecuadas para el fin perseguido.

5 La solicitud de patente EP 2538152 (Kobe Steel, LTD.) propone una faceta con marco incorporado, cuya curvatura es generada mecánicamente tensando desde su parte trasera con un sistema espárrago-tuerca-muelle. Esta técnica tiene el inconveniente de la dificultad de la regulación de la curvatura, la variación de la curvatura al destensarse el sistema y la variación de la curvatura por la elongación del espárrago debida a la dilatación térmica del mismo, así como el elevado peso del dispositivo.

10 En las facetas multicapa de tipo sándwich, la capa anterior, enfrentada al sol, comprende un espejo que refleja y concentra la radiación en un objetivo situado a una cierta distancia (en el caso de una planta termosolar de torre, en el receptor central). Además de la capa anterior, se añaden otras capas posteriores al espejo, principalmente para aportar rigidez durante su uso.

15 Normalmente, la rigidez de la faceta se logra mediante el uso de dos capas externas rígidas, separadas por una capa intermedia de menor densidad, logrando así una estructura tipo sándwich de elevado momento de inercia y rigidez.

La calidad óptica de las facetas es determinante en el rendimiento de la instalación solar. Por ello, resulta crucial mantener la misma con independencia de las cargas térmicas y mecánicas aplicadas, a fin de lograr un rendimiento elevado en condiciones reales de operación.

20 Debido al modo de uso natural de las facetas, éstas tienen una de sus caras expuesta a la radiación directa, mientras que la otra cara permanecerá, normalmente, a la sombra. Debido a la naturaleza de los materiales que conforman la faceta, parte de la radiación incidente es absorbida por la cara anterior expuesta al sol, incrementando su temperatura. A título de ejemplo, si la reflectividad de la faceta es del 94%, ésta absorberá, en consecuencia, el 6% de la radiación incidente, incrementándose la radiación absorbida cuanto menor sea la reflectividad. Este
25 incremento térmico en una de las caras genera constantemente una diferencia de temperatura entre ambas caras, induciendo una deformación variable y una serie de tensiones internas que pueden reducir la estabilidad y durabilidad de las facetas.

30 Además del efecto anterior, también hay que considerar la posibilidad de bloqueos ocasionales entre heliostatos, es decir, un heliostato que se interpone en la trayectoria del haz concentrado por otro heliostato. Cuando se producen bloqueos, la radiación incide normalmente por la parte trasera de la faceta, y no en toda su superficie, por lo que la distribución de temperatura resultante tiene un importante factor geométrico.

35 Otro problema a considerar es la presencia de deslizamiento (o, en su designación en inglés, "creep") por efecto de tensiones continuas o temperatura en las facetas, por ejemplo en aquellas que presentan componentes poliméricos. Cuando se produce el *creep* en una faceta, ésta ve modificada su geometría de modo permanente. La reducción de las tensiones residuales y de las inducidas por gradientes térmicos incrementará, así, la durabilidad de las facetas.

La solicitud de patente WO 2010/115237 (Wizard Power PTY, LTD.) propone una faceta sándwich conformada por una lámina reflectante, una chapa metálica y una capa intermedia de madera y resina o de polímero plástico, adhesivadas en caliente sobre un molde con la curvatura adecuada.

40 La solicitud de patente ES 0473355 (Sener Ingeniería y Sistemas, S.A.) consiste en una faceta sándwich en la que se une mediante adhesivo el espejo curvado en un molde a una plancha de espuma deformable, cortando el exceso y reforzando la parte trasera mediante una chapa.

La solicitud de patente WO 2012/123611 (Rioglass Solar, S.A.) presenta una faceta sándwich que comprende una capa reflectante de vidrio espejado, poliuretano inyectado y una trasera de chapa, cuya temperatura se mantiene controlada durante el conformado en el molde y el enfriamiento para que no varíe su geometría.

45 Las facetas de las solicitudes mencionadas disponen de una parte delantera reflectante y una trasera de chapa, esto conlleva que, independientemente de la calidad óptica y de la precisión geométrica a la temperatura de diseño, la diferencia de propiedades entre ambas capas genera, según se ha comprobado por modelización por elementos finitos (FEM), una degradación de la calidad óptica de unos 0,7 mrad por eje (proyectado a cada eje principal de la faceta), por cada 10 °C de diferencia respecto a la temperatura nominal a la que se le ha dado la curvatura.
50 Considerando que un valor típico de la amplitud térmica media anual en los emplazamientos de campos solares es de unos 20 °C, el efecto de la temperatura en este tipo de diseños degrada la prestación media de la faceta y puede acelerar la degradación del material por fatiga térmica.

55 Además, la inyección del polímero puede, y suele, generar diferencias locales en la densificación de la espuma, que pueden transmitirse como tensiones internas residuales en el polímero e, incluso, generar ligeras ondulaciones en la faceta.

5 La solicitud de patente WO 2013/135757 (Termopower, S.L.) hace referencia a una faceta con una cara reflectante y una cara trasera, estando configuradas ambas caras de tal modo que el producto del módulo elástico y del momento de inercia (designado como E·I, haciendo referencia a cada magnitud respectivamente) y el coeficiente de dilatación de las capas sea sustancialmente igual en ambas capas, estando ambas capas unidas por una espuma de poliuretano o policarbonato. No obstante, si bien el equilibrio mecánico, cuando la carga es homogénea sobre toda la superficie, está debidamente justificado, la faceta descrita por dicha solicitud presenta degradación de sus prestaciones ópticas en condiciones de operación, dado que la temperatura de ambas caras no será la misma, al estar una de ellas sometida a irradiación directa (la cara anterior expuesta al sol) y se calienta al absorber parte de la radiación, mientras que la otra capa está simplemente expuesta a la temperatura ambiente.

10 Finalmente, la solicitud de patente ES 8306688 (Glaverbel) propone una faceta sándwich con polímero plástico inyectado entre dos láminas, preferiblemente metálicas, con el pegado previo de un espejo a la cara delantera. Las dos caras externas son del mismo material, y toda la diferencia de dilataciones entre el espejo y la lámina soporte lo debe compensar el adhesivo presente entre el espejo y dichas láminas.

15 El documento WO 2013/051999 A1 divulga una faceta solar que comprende una capa reflectante en su cara frontal, y una capa intermedia, en la que la capa reflectante de la cara frontal es un espejo de calidad solar.

En resumen, los problemas fundamentales presentes en los diseños de facetas tipo sándwich en el estado de la técnica son:

- 20 - Degradación de la calidad óptica en condiciones de operación debido a un diseño no equilibrado termo-mecánicamente para dichas condiciones, incluyendo la existencia de diferente temperatura entre las capas que conforman el sándwich.
- Pérdida de prestaciones por el envejecimiento de los materiales, ya sea causado por el ciclado térmico o por los gradientes térmicos generados por los bloqueos.
- Insuficientes prestaciones mecánicas para facetas de gran tamaño.
- Tensiones residuales debidas al proceso de fabricación.
- 25 - Densificación desigual del polímero de la capa intermedia.

La presente invención se presenta como una solución y mejora a los problemas del estado de la técnica antes mencionados.

Divulgación de la invención

30 El objeto de la invención es una faceta tipo sándwich de elevada rigidez, diseñada de tal modo que las variaciones de su calidad óptica y curvatura, debidas a la influencia de las condiciones de trabajo, resultan minimizadas frente a otras facetas conocidas. La faceta de la invención está preferentemente conformada por dos capas de espejo, unidas por una espuma polimérica de formulación y diseño específico, que es depositada en fase crema sobre una de dichas capas de espejo.

35 En una realización preferente de la invención, el diseño de las capas de espejo de la faceta se lleva a cabo según unas condiciones determinadas. Por una parte, la capa reflectante de la cara anterior y la capa reflectante de la cara posterior poseen diferentes valores de inercia $I_{(XX,YY)}$ respecto a los ejes de flexión XX,YY de la faceta, de forma que:

$$I_{XX \text{ anterior}} < I_{XX \text{ posterior}},$$

$$I_{YY \text{ anterior}} < I_{YY \text{ posterior}}.$$

40 Asimismo, el espesor (e) de la capa de espejo anterior será, preferentemente, inferior al de la capa posterior, de forma que $e_{\text{anterior}} < e_{\text{posterior}}$. Con ello se conseguirá conformar un sándwich rígido en su conjunto pero flexible, que pueda ser sometido a flexión en sus zonas reflectantes antes de realizar la integración de los componentes del sistema reflector. Por su parte, el radio de curvatura (R) de la capa anterior será, preferentemente, menor que el radio de curvatura de la capa posterior, cumpliéndose que $R_{\text{anterior}} < R_{\text{posterior}}$.

45 Finalmente, los coeficientes de dilatación térmica (α) de ambas capas serán, preferentemente, sustancialmente iguales, de modo que $\alpha_{\text{anterior}} \sim \alpha_{\text{posterior}}$. En el contexto de la presente invención, la expresión "sustancialmente igual", aplicado a la relación entre diferentes valores de magnitudes, debe interpretarse como idénticamente igual, o comprendida en un rango de variación de $\pm 10\%$.

50 El significado físico de las relaciones anteriores es el equilibrio de las deformaciones y tensiones internas de la faceta, originadas por desviaciones de la temperatura desde las condiciones de trabajo y, en especial, el gradiente térmico existente entre las caras en condiciones de trabajo, maximizando así la inercia mecánica de la faceta con el fin de mejorar la rigidez de la misma. Con ello se consigue i) poder obtener un reflector de alta rigidez curvado a radios esféricos muy pequeños, de hasta 15 m; ii) disponer de una capa trasera con la rigidez suficiente para que no se vea afectada por deformaciones locales provenientes de la fijación del reflector a la estructura, y iii) poder

controlar la curvatura en operación a través del radio de fabricación y el incremento de curvatura que se produce al alcanzar la diferencia de temperatura de operación entre las caras de la faceta.

5 La rigidez incrementada permite que las facetas realizadas según la presente invención reciban parte de la carga a la que se ve sometida la estructura soporte, sin que se vea degradada su calidad óptica, abaratando así la estructura de següimiento.

10 Las facetas en condiciones de trabajo disponen de una de sus caras orientada de tal modo que reciba la radiación directa del sol y la refleje hacia el receptor. Como ya se ha indicado, la faceta absorbe parte de esta energía radiante, por lo que sus diferentes capas no estarán exactamente a la misma temperatura. Esta temperatura depende en gran medida de la reflectividad del espejo, siendo ésta más próxima a la temperatura ambiente cuanto mayor sea la reflectividad de éste. Debido a la mayor temperatura superficial de una de las caras, habrá un perfil determinado de temperatura en el interior de la faceta que ha sido determinado para las diferentes condiciones de trabajo posible.

15 Otro problema que aparece de modo habitual en la vida útil de las instalaciones solares de torre es la aparición de bloqueos. Es decir, un heliostato que se interpone en la trayectoria de la radiación reflejada por otro. Esto genera que las facetas reciban radiación concentrada en un área indeterminada y, a priori, no preparado para recibir dicha irradiación.

20 La faceta objeto de esta invención soluciona este problema usando como capa posterior un espejo. Aunque este espejo no sea de la misma calidad que el presente en la parte frontal de la faceta, reflejara gran parte de la radiación recibida, por lo que el incremento local de temperatura será sustancialmente menor al producido con otros materiales que no sean buenos reflectantes de la radiación infrarroja. Además, las propiedades mecánicas del vidrio serán muy similares a las de la cara anterior y con muy buen comportamiento bajo cargas de compresión. Adicionalmente, el uso de un espejo como capa posterior de la faceta proporciona características adicionales como barrera a la radiación ultravioleta (UV) que podría dañar la espuma polimérica central, aumentando al mismo tiempo la radiación indirecta disponible en el campo, que podría ser usada para otros fines.

25 En la presente invención, la capa reflectante anterior de la faceta es un espejo de entre 0,4 y 5 mm de espesor. Por su parte, la capa intermedia posee un espesor de entre 15 y 70 mm y la capa reflectante posterior tiene un espesor de entre 2,2 mm y 10 mm.

30 En una realización preferente de la faceta objeto de la invención, la espuma polimérica que une sus caras externas es de una formulación especialmente desarrollada para garantizar una baja absorción de vapor de agua, bajo peso, elevadas prestaciones mecánicas y buena resistencia a la degradación por la radiación UV. Además, esta espuma polimérica está preferentemente dopada con nanopartículas que le confieren unas propiedades mecánicas mejoradas respecto a las que tiene la formulación por sí misma. Entre las mejoras de las características mecánicas, cabe destacar el aumento de la resistencia a la aparición de *creep*, factor que mejora de gran modo uno de los defectos fundamentales que presentaban las primeras facetas tipo sándwich con núcleo de poliuretano utilizadas en aplicaciones solares.

35 Si bien es posible el uso de nanopartículas de diferente tamaño, forma y naturaleza para la realización del dopaje, en una realización preferente de la invención se selecciona una carga optimizada de carbonato cálcico, carbono, sílice, fibra de vidrio y monómeros plásticos.

40 Se utiliza una carga específica de partículas dopantes o refuerzo que mejoran, así, las prestaciones de la faceta según las condiciones ambientales. Las partículas que se usan como aditivos en la elaboración de la espuma polimérica comprenden, en función de las necesidades, los siguientes materiales: nanotubos de carbono monocapa (o SWNT, que proporcionan rigidez a la faceta), dióxido de silicio y/o óxido de aluminio (para mejorar su resistencia a la corrosión), óxido de zinc (que hace de barrera física a la radiación UV), microtubos de celulosa (resistencia a tensiones), óxido de titanio (hace de barrera UV, cuando se presenta en forma de nanopartículas), óxido de circonio (resistencia a la abrasión y estabilidad térmica), zeolita, colinita y/o arcillas (que hacen de anclaje molecular), opcionalmente en conjunción de dispersores como el citrato de amoniaco o el alcohol oleico, para evitar su aglomeración.

50 En una realización preferente de la invención, la espuma polimérica que conforma la capa intermedia de la faceta posee una carga de partículas, variable en función de las necesidades de diseño, de hasta un 10% de nanotubos de carbono monocapa, hasta un 15% de óxido de silicio, hasta un 5% de óxido de zinc, hasta un 20% de celulosa, hasta un 9% de micropartículas de óxido de titanio, hasta un 12% de óxido de circonio, hasta un 14% de zeolitas, hasta un 25% de arcillas y hasta un 18% de partículas, normalmente dendrímeros, de naturaleza polimérica.

55 Adicionalmente, el proceso de fabricación de la faceta objeto de la invención usa un proceso de deposición de la mezcla reaccionante, que formará la espuma polimérica, y que se realiza de tal modo que la capa de crema polimérica presenta un espesor aproximadamente constante respecto a la superficie sobre la que se apoya, por lo que su densificación es homogénea y se evita, de ese modo, trasladar tensiones y deformaciones locales a la superficie reflectante causadas por una espumación desigual.

En resumen, la faceta solar tipo sándwich objeto de la invención minimiza los problemas presentes en el estado de la técnica, ya comentados anteriormente, siendo la base de su diseño y configuración la optimización de la calidad óptica y curvatura de la faceta en las condiciones de trabajo de cada emplazamiento.

Descripción de las figuras

5 Se complementa la presente memoria descriptiva, con un juego de figuras, ilustrativas del ejemplo preferente, y no limitativas frente a otras realizaciones de la invención.

La Figura 1 representa un explotado en perspectiva de las capas de la faceta objeto de la invención.

Las Figuras 2 y 3 muestran una faceta plana y otra curvada, respectivamente.

10 La Figura 4 muestra un caso extremo de faceta curvada, en el que se indican las distancias máxima y mínima entre las caras anterior y posterior.

Los elementos referenciados en las Figuras se enumeran a continuación:

- (1) Superficie reflectante, espejo.
- (2) Núcleo de espuma polimérica.
- (3) Soporte trasero de la faceta.

15 **Divulgación detallada de la invención**

A continuación se expone la divulgación detallada de la invención, referida a una realización preferente de la misma. Tal y como se ha indicado previamente, la faceta de la invención es una faceta de tipo sándwich de elevada rigidez, diseñada de tal modo que las variaciones de su calidad óptica y curvatura debidas a la influencia de las condiciones de trabajo han sido minimizadas. La faceta está conformada por dos capas (1, 3) de espejo, siendo dichas capas las capas externas de la faceta en sus caras anterior y posterior. En la presente invención, la capa anterior (1) (aquella que se orienta hacia el colector de torre) es un espejo de calidad solar (cuyas prestaciones ópticas estén específicamente adaptadas para su aplicación en el campo solar), mientras que la capa posterior (3) es un espejo comercial estándar. Ambas capas (1, 3) están unidas por una espuma polimérica (2) que tienen una formulación y diseño específicos, estando preferentemente depositadas en fase de crema sobre una de las capas (1, 3) de espejo.

25 Una realización preferente de la presente invención comprende un diseño específico de las diferentes capas reflectantes de la cara anterior (1) y posterior (3) de la faceta, cumpliéndose dos o más de las siguientes ecuaciones:

30

$$\begin{aligned}
 I_{XX \text{ anterior}} &< I_{XX \text{ posterior}}, \\
 I_{YY \text{ anterior}} &< I_{YY \text{ posterior}}, \\
 e_{\text{anterior}} &< e_{\text{posterior}}, \\
 R_{\text{anterior}} &< R_{\text{posterior}}, \\
 \alpha_{\text{anterior}} &\sim \alpha_{\text{posterior}}.
 \end{aligned}$$

La satisfacción de los requisitos impuestos por estas ecuaciones proporciona a la faceta equilibrio frente a deformaciones y tensiones internas de la misma, originadas por desviaciones de la temperatura desde las condiciones de trabajo y, en especial, por el gradiente térmico existente entre las caras en condiciones de trabajo. Se consigue, además, maximizar la inercia mecánica de la faceta, mejorando su rigidez. Las dimensiones externas de la faceta, así como los espesores de las diferentes capas (1, 2, 3) y la densificación y carga de partículas de la espuma polimérica (2) del núcleo central se definen en función de las condiciones ambientales y de trabajo del emplazamiento satisfaciendo, en su diseño, la ecuación descrita anteriormente para realizar esta definición de dimensiones y características mecánicas. Además, la rigidez incrementada de la faceta permite, adicionalmente, que el conjunto de las facetas que conforman la superficie efectiva del heliostato reciban parte de las cargas mecánicas a las que se ve sometida la estructura soporte de dicho heliostato, sin ver degradada su calidad óptica, abaratando así la estructura de seguimiento del mismo.

Asimismo, el espesor de la capa anterior (e_{anterior}) de la faceta se ajusta, preferentemente, en función de la distancia focal de trabajo del reflector, teniendo en cuenta la siguiente relación:

45

$$e_{\text{anterior}} = \sqrt[3]{\frac{48 \cdot q \cdot a^4 \cdot (1 - \theta^2)}{\pi^5 \cdot E_{\text{anterior}} \left[2 \cdot D_{\text{Focal}} - \left(4 \cdot D_{\text{Focal}}^2 - \frac{a^2}{4} \right)^{0.5} \right]}}$$

donde q es un parámetro de carga (N/m²) que toma valores dentro del rango de ajuste definido por:

$$\gamma \cdot e_{\text{anterior}} \leq q \leq 0,5 \cdot q_{\text{Rotura}}$$

donde γ es el peso específico (N/m^3) de la capa anterior reflectante de la faceta, y q_{rotura} es la carga distribuida de rotura (N/m^2) sobre la capa anterior. Asimismo, a es la longitud característica (m) de la faceta, E_{anterior} es el módulo de Young (N/m^2) de la capa anterior, D_{focal} es la distancia focal (m) de diseño de la faceta, y ν es el coeficiente de Poisson de la capa anterior reflectante.

La longitud característica (a) de la faceta es la mayor distancia en la faceta paralela al eje en el que se evalúa la curvatura. Es decir, la altura de la faceta para la curvatura del lado largo y su anchura para la curvatura del lado menor.

La distancia focal de la faceta es la distancia entre la superficie de la misma y el punto focal en el espacio en el que concentra los rayos reflejados que han incidido en ella paralelos a su eje (paraxiales). Esta distancia corresponde a la mitad de su radio de curvatura.

Además, el radio de curvatura (R_{Focal}) de la cara reflectante anterior es corregido durante el proceso de fabricación con respecto al radio de diseño, considerando la rigidez de la capa superior y a las fuerzas tangenciales sobre la misma durante las condiciones promedio de operación. De este modo, se modifica el radio de curvatura (R_{Focal}) mediante la adición de una corrección de radio de curvatura correspondiente a la variación del radio que se produce en operación ($\Delta R_{\text{Operación}}$), obteniéndose el radio de curvatura de la cara anterior de la faceta durante su fabricación ($R_{\text{Fabricación}}$).

$$R_{\text{Fabricación}} = R_{\text{Focal}} + \Delta R_{\text{Operación}}$$

La variación del radio que se produce en operación ($\Delta R_{\text{Operación}}$) se evalúa en función de las condiciones de operación de la faceta en cada emplazamiento. Para ello, se relaciona la flecha máxima inducida sobre la cara anterior con la ecuación de una esfera en el casquete esférico que corresponde a la dimensión de la faceta con ayuda del teorema de Pitágoras y la ecuación cartesiana de una esfera. La flecha máxima inducida se evalúa mediante la resolución de un sistema de ecuaciones correspondiente a la deformación de placas por aplicación de la Teoría de Mindlin–Reissner.

De este modo, se obtienen ecuaciones como las que se muestran a continuación, que muestran la fuerza tangencial que soporta la cara anterior de la faceta durante su fabricación y la flecha máxima de una placa sometida a una carga distribuida, respectivamente.

$$F_{Tg} = \frac{E_{\text{núcleo}} \cdot \alpha_{\text{anterior}} \cdot \Delta T \cdot a \cdot (h_{\text{max}} + h_{\text{min}})}{4}$$

$$(h_{\text{max}} - h_{\text{min}}) = \frac{12 \cdot (1 - \nu^2)}{E \cdot e^3} \frac{16 \cdot q \cdot a^4}{\pi^6} \frac{\lambda^2}{(1 + \lambda^2)^2}$$

donde F_{Tg} es la fuerza tangencial en la cara anterior de la faceta, λ es la relación entre el lado mayor y menor de la faceta, $E_{\text{núcleo}}$ es el módulo elástico del núcleo polimérico que une ambas caras de la faceta, α_{anterior} es el coeficiente de dilatación de la cara anterior, ΔT la diferencia de temperatura entre las caras de la faceta y h_{max} y h_{min} son la distancia máxima y mínima entre las caras anterior y posterior de la faceta, respectivamente (véase la Figura 4).

Cuando se encuentran en condiciones de trabajo, las facetas se disponen de forma que su cara anterior (1) reciba la radiación directa del sol y la refleje hacia el receptor de la torre. Como ya se ha indicado, la faceta absorbe parte de esta energía radiante, por lo que sus diferentes capas no estarán exactamente a la misma temperatura. Esta temperatura depende en gran medida de la reflectividad del espejo, siendo ésta más próxima a la temperatura ambiente cuanto mayor sea la reflectividad de éste. Debido a la mayor temperatura superficial de una de las caras, habrá un perfil determinado de temperatura en el interior de la faceta que ha sido determinado para las diferentes condiciones de trabajo posible.

Otro problema que aparece de modo habitual durante la vida útil de las instalaciones solares de torre es la aparición de bloqueos. Es decir, la situación de que un heliostato se interponga en la trayectoria de la radiación reflejada por otro. Esto genera que las facetas reciban radiación concentrada en un área indeterminada y, a priori, no preparada para recibir dicha irradiación.

Como se ha mencionado en apartados precedentes, la faceta objeto de esta invención soluciona este problema usando un espejo como capa posterior (3). Aunque no resulta necesario que dicho espejo sea de la misma calidad que el presente en la capa anterior (1) de la faceta, el espejo de la capa posterior reflejará una gran parte de la radiación recibida, por lo que el incremento local de temperatura será sustancialmente menor al producido con otros materiales que no sean buenos reflectantes de la radiación infrarroja. Además, las propiedades mecánicas del vidrio serán muy similares a las de la cara anterior, y por tanto presentarán un comportamiento mejorado bajo cargas de

compresión. Adicionalmente, el uso de un espejo como capa posterior (3) de la faceta proporciona características adicionales como barrera a la radiación ultravioleta (UV), impidiendo que dicha radiación degrade la espuma polimérica central, y aumentando además la radiación indirecta disponible en el campo, permitiendo que pueda ser usada para otros fines. En lugar de un espejo, podría usarse cualquier otro material reflectante como capa posterior (3), depositado o fijado a ésta.

El espesor de la capa posterior (3) está entre 2,2 y 10 mm, el espesor de la capa intermedia (2) entre 15 y 70 mm, y el espesor de la capa anterior (1) entre 0,4 y 2,2 mm. Más preferentemente, el espesor de la capa intermedia (2) está entre 25 y 55 mm y el espesor de la capa anterior (1) entre 0,9 y 2,2 mm, espesores que se muestran como efectivos, especialmente en dimensiones de facetas convencionales tales como 2000 mm x 1600 mm o 3000 mm x 1600 mm.

Otra de las características específicas de la faceta objeto de la invención es que la espuma polimérica (2) que une las caras externas es de una formulación especialmente desarrollada para garantizar una baja absorción de vapor de agua, bajo peso, elevadas prestaciones mecánicas y buena resistencia a la degradación por la radiación UV. Además, esta espuma polimérica ha sido dopada con nanopartículas que le confieren unas propiedades mecánicas mejoradas respecto a las que tiene la formulación por sí misma. Entre las mejoras de dichas características mecánicas cabe destacar el aumento de la resistencia a la aparición de *creep*, factor que mejora de gran modo uno de los defectos fundamentales que presentaban las primeras facetas tipo sándwich con núcleo de poliuretano que se probaron en aplicaciones solares.

La degradación de esta espuma polimérica causada por la radiación UV es superficial, y supera con éxito los ensayos de radiación UV para una vida útil de 30 años, por lo que la capa intermedia (3) no precisa de protección o barrera UV en el perímetro de la faceta, aunque no hay ningún impedimento en su pintado o protección mediante una barrera física como, por ejemplo, un marco, si se desea evitar cualquier tipo de degradación.

Se ha probado el uso de nanopartículas de diferente tamaño, forma y naturaleza para la realización del dopaje. Habiéndose seleccionado una mezcla optimizada de carbonato cálcico, carbono, sílice, fibra de vidrio y monómeros plásticos.

El dopaje utilizado se define como una composición de uno o varios tipos de partículas, con una de sus dimensiones principales entre 10 y 250 nm, suspendidas en la mezcla de reactivos, denominada crema, que reacciona hasta formar la espuma polimérica. Dichos tipos de partículas pueden ser: nanotubos de carbono monocapa (SWNT), dióxido de silicio, óxido de aluminio, óxido de zinc, microtubos de celulosa, óxido de titanio, óxido de circonio, zeolita, arcillas y partículas de natura polimérica, en conjunción de dispersores tales como el citrato de amoníaco o el alcohol oleico para evitar su aglomeración. Las nanopartículas pueden ser añadidas en forma de fibra, partícula esférica o esferoide o dendrímeros, según la función deseada y la naturaleza del aditivo.

La carga de nanopartículas preferida en la faceta objeto de la invención es, según las necesidades de cada caso particular la siguiente:

- Hasta un 10% de SWNT.
- Hasta un 15% de óxido de silicio.
- Hasta un 5% de óxido de zinc.
- Hasta un 20% de celulosa.
- Hasta un 9% de micropartículas de óxido de titanio.
- Hasta un 12% de óxido de circonio.
- Hasta un 14% de zeolitas.
- Hasta un 25% de arcillas.
- Hasta un 18% de partículas, normalmente dendrímeros, de naturaleza polimérica.

Los dispersores utilizados varían en composición y material en función de la mezcla y carga de nanopartículas utilizadas.

Adicionalmente, el proceso de fabricación de la faceta objeto de la invención usa un proceso de deposición de la mezcla reaccionante, que formará la espuma polimérica, de tal modo que la capa de crema polimérica presenta un espesor aproximadamente constante respecto a la superficie sobre la que se apoya, por lo que la densificación es homogénea y se evita trasladar tensiones y deformaciones locales a la superficie reflectante causadas por una espumación desigual. Una vez depositada la mezcla reaccionante, el molde de conformado se cierra para inducir la densificación deseada de la espuma polimérica, regulable en función de la cantidad de mezcla añadida para el volumen de capa intermedia existente.

En resumen, la faceta solar tipo sándwich objeto de la invención minimiza los problemas presentes en el estado de la técnica, ya comentados anteriormente, siendo la base de su diseño y configuración la optimización de la calidad óptica y curvatura de la faceta en las condiciones de trabajo de cada emplazamiento en base al cálculo, mediante la fórmula citada, de las dimensiones y características de cada una de sus partes.

REIVINDICACIONES

1. Una faceta solar tipo sándwich caracterizada porque comprende capas reflectantes en sus caras anterior (1) y posterior (3), y una capa intermedia (2) de espuma polimérica; en donde:

5 la capa reflectante de la cara anterior (1) es un espejo de calidad solar, cuya prestación óptica está adaptada para su aplicación a un campo solar, con un valor de espesor entre 0,4 mm y 2,2 mm;

- la capa reflectante de la cara posterior (3) es un espejo de calidad no solar, con un valor de espesor entre 2,2 mm y 10 mm; y

- la capa intermedia (2) tiene un espesor entre 15 y 70 mm;

10 en donde el grosor (e) de la capa reflectante de la cara anterior (1) es menor que el de la capa reflectante de la cara posterior (3), de tal manera que al $e_{anterior} < e_{posterior}$.

2. La faceta según la reivindicación anterior, en donde las capas reflectantes de la cara anterior (1) y la cara posterior (3) poseen diferentes valores de inercia $I_{(XX,YY)}$ respecto a los ejes de flexión XX,YY de la faceta, de tal manera que $I_{XX anterior} < I_{XX posterior}$, $I_{YY anterior} < I_{YY posterior}$.

15 3. La faceta según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde se cumple al menos una de las siguientes relaciones:

- el radio de curvatura (R) de la capa reflectante de la cara anterior (1) es menor que el de la capa reflectante de la cara posterior (3), de tal manera que $R_{anterior} < R_{posterior}$;

- los coeficientes de dilatación térmica (α) de las capas reflectantes de la cara anterior (1) y de la cara posterior (3) son sustancialmente iguales, de tal manera que $\alpha_{anterior} \sim \alpha_{posterior}$.

20 4. La faceta según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el espesor de la capa reflectante de la cara anterior ($e_{anterior}$) cumple la siguiente relación:

$$e_{anterior} = \sqrt[3]{\frac{48 \cdot q \cdot a^4 \cdot (1 - \theta^2)}{\pi^6 \cdot E_{anterior} \cdot \left[2 \cdot D_{focal} - \left(4 \cdot D_{focal}^2 - \frac{a^2}{4} \right)^{0,5} \right]}}$$

donde q es un parámetro de carga que toma valores dentro del rango de ajuste definido por:

$$\gamma \cdot e_{anterior} \leq q \leq 0,5 \cdot q_{Rotura}$$

25 5. La faceta según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde su curvatura de fabricación ($R_{Fabricación}$) es sustancialmente igual al radio de curvatura (R_{Focal}) de la cara reflectante anterior, más una corrección de radio de curvatura correspondiente a la variación del radio que se produce en operación ($\Delta R_{Operación}$), de tal manera que $R_{Fabricación} = R_{Focal} + \Delta R_{Operación}$.

30 6. La faceta según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la capa intermedia (2) comprende una espuma polimérica de precursores de poliuretano.

35 7. La faceta según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la espuma polimérica que conforma la capa intermedia (2) comprende agentes dopantes formados por uno o varios tipos de partículas, estando al menos una de sus dimensiones principales comprendida entre 10 y 250 nm, y comprendiendo dichos tipos de partículas uno o más de los siguientes compuestos: carbonato cálcico, carbono, sílice, fibra de vidrio y/o monómeros plásticos.

40 8. La faceta según la reivindicación anterior, donde la espuma polimérica comprende uno o más de los siguientes aditivos: nanotubos de carbono monocapa (SWNT), dióxido de silicio, óxido de aluminio, óxido de zinc, microtubos de celulosa, óxido de titanio, óxido de circonio, zeolita, o partículas de naturaleza polimérica en conjunción con uno o más dispersores.

45 9. La faceta según la reivindicación anterior, donde los dispersores comprenden citrato de amoniaco o alcohol oleico.

10. La faceta según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la espuma polimérica que conforma la capa intermedia (2) posee una carga de partículas de hasta un 10% de nanotubos de carbono monocapa, hasta un 15% de óxido de silicio, hasta un 5% de óxido de zinc, hasta un 20% de celulosa, hasta un 9% de micropartículas de

óxido de titanio, hasta un 12% de óxido de circonio, hasta un 14% de zeolitas, hasta un 25% de arcillas y hasta un 18% de partículas de naturaleza polimérica.

11. La faceta según la reivindicación anterior, donde las partículas de naturaleza polimérica son dendrímeros, fibras, partículas esféricas o esferoides.

- 5 12. Uso de una faceta según cualquiera de las reivindicaciones anteriores para reducir la pérdida de rendimiento debido a los gradientes térmicos generados por el bloqueo de heliostatos cercanos en un campo de heliostato.

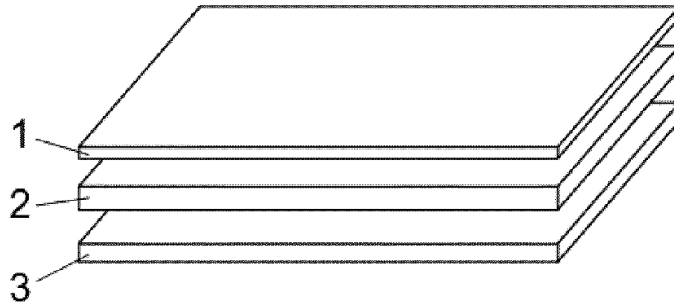


FIG. 1

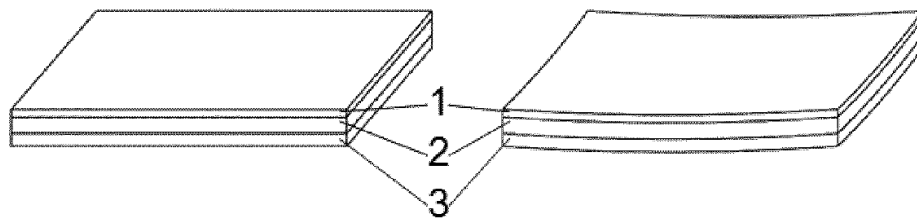


FIG. 2

FIG. 3

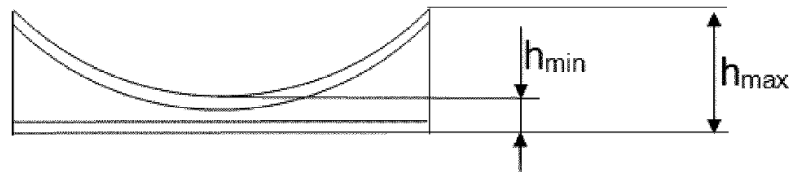


FIG. 4