

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

# Estudio del proceso de laminación de módulos fotovoltaicos con materiales alternativos



Grado en Ingeniería  
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Ana Murillo Larrey

Director: Pablo Sanchis Gúrpide

Pamplona, 29 de Junio del 2016





## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas las personas que me han acompañado y me han ayudado a lo largo de todos estos años de carrera.

En primer lugar, desearía hacer una mención especial a todos los integrantes del Departamento de Energía Solar Fotovoltaica del Centro Nacional de Energías Renovables (CENER). Gracias a mi tutora de la empresa, Jaione Bengoechea Apezteguia, por ayudarme tanto en la realización como en la redacción de este Trabajo Fin de Grado. También quisiera agradecer a María Jesús Rodríguez Henche y Ana Belén Cueli Orradre por la confianza depositada en mí.

Por otro lado, agradecer a mi familia el apoyo que me han dado en los malos y en los buenos momentos, en especial mi madre, mi padre y mi hermana.

Tampoco puedo olvidarme de todos los amigos que me han acompañado tanto en la carrera como fuera. Su apoyo y consejo han sido, son y serán siempre de agradecer.

## RESUMEN

Este Trabajo Fin de Grado (TFG) desarrollará el proceso de laminación de módulos fotovoltaicos (FV) utilizando materiales alternativos a los de los módulos convencionales. Los materiales alternativos son el policarbonato (PC) y un entramado estructural, los cuales sustituyen al vidrio y al marco de aluminio. El objetivo de la utilización de estos materiales es la construcción de un módulo ligero y adaptable a diferentes superficies para facilitar su uso en integración arquitectónica.

Teniendo en cuenta las limitaciones impuestas por las especificaciones de estos materiales, se llevarán a cabo diferentes procesos de laminación y se utilizarán técnicas ópticas, mecánicas, químicas y eléctricas para caracterizar las muestras laminadas hasta obtener el proceso óptimo.

## LISTA DE PALABRAS CLAVE

- Fotovoltaica
- Módulos fotovoltaicos
- Laminación
- Policarbonato (PC)
- Entramado estructural
- EVA (Etileno Vinil Acetato)
- PPE (Poliéster/Poliéster/EVA)

# ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN.....	4
LISTA DE PALABRAS CLAVE.....	4
1. INTRODUCCIÓN .....	7
1.1. Energías renovables (EERR) .....	7
1.1.1. Ventajas y desventajas de las EERR .....	7
1.2. Energía Solar Fotovoltaica.....	9
1.2.1. Célula fotovoltaica .....	9
1.2.2. Módulo fotovoltaico .....	13
1.2.3. Ventajas y desventajas de la Energía Solar Fotovoltaica .....	15
1.3. Relación entre la producción de energía fotovoltaica y el clima .....	15
2. OBJETO.....	19
2.1. Integración arquitectónica .....	19
2.1.1. Características necesarias.....	20
2.2. Desarrollo de un proceso de laminado compatible con los nuevos materiales ..	21
3. LAMINACIÓN.....	23
3.1. Introducción.....	23
3.2. Descripción de la laminadora .....	25
3.2.1. Funcionamiento de la laminadora.....	26
3.3. Descripción de los materiales utilizados y sus especificaciones .....	28
3.3.1. Cubierta frontal .....	28
3.3.2. Encapsulante.....	29
3.3.3. Célula fotovoltaica .....	31
3.3.4. Entramado estructural .....	33
3.3.5. Cubierta trasera .....	34
3.4. Proceso de laminación .....	34
3.4.1. Requisitos previos .....	34
3.4.2. Equipos, instrumentos y patrones.....	35
3.4.3. Procedimiento .....	35
4. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN.....	41

4.1.	Inspección visual .....	41
4.2.	Grado de curado del encapsulante.....	42
4.2.1.	Differential Scanning Calorimetry (DSC) .....	43
4.2.2.	Relación entre el método primario y el DSC .....	45
4.3.	Test de pelado .....	45
4.3.1.	Principio de funcionamiento.....	46
4.3.2.	Máquina para la realización del test de pelado .....	46
4.3.3.	Funcionamiento .....	47
4.4.	Técnicas ópticas .....	50
4.4.1.	Transmitancia óptica .....	50
4.4.2.	Índice de amarilleamiento (Yellowness Index, YI).....	51
4.5.	Electroluminiscencia .....	52
5.	RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	54
5.1.	Laminaciones sencillas .....	55
5.1.1.	Inspección visual .....	56
5.1.2.	DSC .....	59
5.1.3.	Test de pelado .....	64
5.1.4.	Caracterización óptica .....	69
5.2.	Laminaciones con el sándwich completo.....	75
5.2.1.	Inspección visual .....	75
5.2.2.	DSC .....	77
5.2.3.	Test de pelado .....	79
5.2.4.	Diferencia de temperatura.....	81
5.2.5.	Electroluminiscencia .....	84
5.3.	Resultados óptimos .....	86
6.	CONCLUSIONES .....	88
7.	REFERENCIAS .....	90
8.	ANEXOS .....	91

# 1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo Fin de Grado (TFG) se ha desarrollado en el campo de las Energías Renovables (EERR), más concretamente en la Energía Solar Fotovoltaica. Forma parte del Proyecto AISOVol que está realizando el Centro Nacional de Energías Renovables (CENER) en colaboración con el Instituto Tecnológico de Energías Renovables de Canarias (ITER). En él se investiga el uso de materiales alternativos en la fabricación de módulos fotovoltaicos (FV) que proporcionen unas características semejantes a las de los módulos convencionales. Estos nuevos materiales serán más ligeros y adaptables a diferentes superficies para facilitar su uso en integración arquitectónica.

## 1.1. Energías renovables (EERR)

Las energías renovables son aquellas que se obtienen a través de recursos renovables como el sol, agua, viento y materia orgánica. Son inagotables ya sea por la inmensa cantidad que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Además, debido a que su impacto ambiental es prácticamente nulo se consideran energías limpias por lo que son respetuosas con el medio ambiente. Sin embargo, su gran desventaja es que su producción es intermitente, ya que dependen de las condiciones climatológicas.

Existen varios tipos de energía renovables, todas ellas originadas principalmente por el sol: energía solar, energía eólica, energía hidráulica, energía de la biomasa, energía geotérmica y energías marinas.

### 1.1.1. Ventajas y desventajas de las EERR

A continuación se describirán tanto las ventajas como las desventajas de las energías renovables de forma general, ya que aunque tengan muchos puntos a favor, también tienen sus inconvenientes.

#### Ventajas:

- Son respetuosas con el medioambiente ya que no emiten gases contaminantes por lo que disminuyen el efecto invernadero. Por lo tanto, son una alternativa limpia para la producción de energía.

- No generan residuos por lo que no es necesario ningún tipo de almacenamiento para su degradación como ocurre con la nuclear.
- Evitan la dependencia de otros países produciendo una mayor autonomía.
- Generan más puestos de trabajo que las energías convencionales.
- Sus fuentes de energía son inagotables.

### Desventajas:

- Es necesaria una inversión inicial elevada.
- Disponibilidad variable. El problema de las renovables es que son dependientes del recurso, siendo este muy variable según las condiciones climáticas.
- Es necesaria una gran superficie para obtener una cantidad de energía apreciable.

En el presente TFG nos vamos a centrar en la energía solar fotovoltaica. La energía solar es aquella que directamente hace uso de la radiación del sol, utilizando diferentes tecnologías para transformarla en electricidad. Existen dos tipos de energía solar en función de cómo se realiza ese aprovechamiento: energía solar fotovoltaica y energía solar térmica.



(a) *Energía Solar Fotovoltaica*

(b) *Energía Solar Térmica*

*Figura 1: Energía solar*

La energía solar fotovoltaica aprovecha la radiación solar para generar electricidad gracias a las características electrónicas de sus materiales. La energía solar térmica en cambio, se basa en la concentración de la energía solar para obtener energía térmica y posteriormente producir electricidad a través de una turbina. A partir de ahora nos centraremos en la energía solar fotovoltaica ya que es de lo que trata el presente TFG.



## 1.2. Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica se basa en la transformación de la radiación solar directamente en corriente continua de forma limpia y silenciosa, cuando los fotones del sol inciden sobre los materiales semiconductores de las células fotovoltaicas. Esta transformación se produce en un elemento semiconductor denominado célula fotovoltaica.

La cantidad de radiación solar que llega a la tierra es variable a lo largo del día y del año. Además depende de la nubosidad, del ángulo de incidencia y de la reflectancia de las superficies. Se distinguen tres tipos de radiaciones; directa, difusa y reflejada y a su vez, la radiación global que es la suma de las tres. La energía fotovoltaica hace uso de todos los tipos de radiaciones para la obtención de electricidad.

### 1.2.1. Célula fotovoltaica

La célula fotovoltaica es el elemento principal de una instalación fotovoltaica ya que es el que convierte la luz solar en corriente continua. Son obleas muy finas (aproximadamente 0,18 mm) de un material semiconductor que generalmente suele ser silicio. Su principio de funcionamiento se basa en el efecto fotovoltaico.

#### 1.2.1.1. Efecto fotovoltaico

El efecto fotovoltaico es el fenómeno físico que permite obtener electricidad a partir de la luz del sol. La luz solar está formada por fotones, que son partículas sin masa y con una determinada cantidad de energía. Las diferentes energías de los fotones corresponden con las diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético.

La célula se basa en una unión PN con un contacto en cada región, lo que permite la conexión con un circuito externo. Para formar la capa tipo N (exceso de electrones), el semiconductor se dopa con elementos químicos de 5 electrones de valencia (fósforo) y para formar la capa tipo P (exceso de huecos) el dopado se hace con elementos de 3 electrones de valencia (boro).

Al unir ambas capas se crea la unión PN cuyo funcionamiento es similar al de un diodo. Cuando los fotones del sol inciden sobre la célula, los electrones de la capa N tienden a dirigirse a la capa P. De esta manera, la región N queda cargada positivamente y la P negativamente, creando un campo eléctrico de la zona N hacia la zona P como se aprecia en la Figura 2.

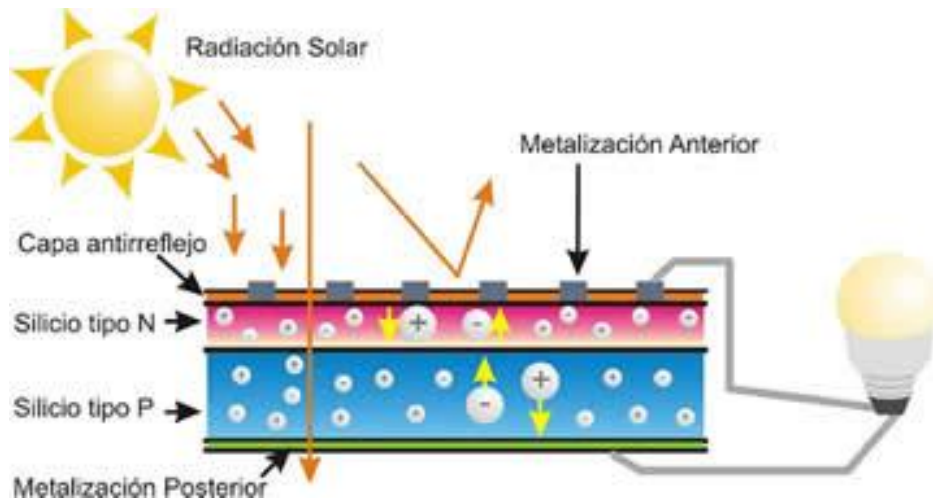


Figura 2: Estructura de una célula

Para poder extraer la corriente, se colocan contactos eléctricos en ambas capas. En la capa P al ser la cara no iluminada, se coloca una película metálica que cubre toda la superficie. En la capa N en cambio se coloca una malla metálica de láminas muy delgadas para dejar al descubierto la máxima superficie. Además, para evitar las pérdidas por reflexión, se texturiza su superficie y se coloca una capa fina de material anti reflectante.

### 1.2.1.2. Tecnología de células

Aunque el material más utilizado para la fabricación de células fotovoltaicas sea el silicio, en la actualidad existen diferentes tecnologías de células. A continuación se describe de manera breve cada una de ellas y su eficiencia [1].

- **Basada en silicio**

- Silicio monocristalino

A partir de un lingote de silicio se obtiene la oblea cuya estructura cristalina es uniforme. Partiendo de una oblea y tras varias etapas de fabricación, se obtiene la célula. Es una tecnología madura, por lo que su coste ha disminuido de manera significativa durante los últimos años. A continuación aparece su eficiencia tanto en laboratorio como en campo:



Figura 3: Célula de silicio monocristalino

- $\eta_{\max\_laboratorio} = 25.2\%$

- $\eta_{\text{condiciones STC}} = 22.2\% - 23.4\%$

- Silicio policristalino

Se obtiene una oblea a partir de un lingote de silicio, cuya estructura cristalina no es uniforme. Su coste es menor que el del silicio monocristalino pero su eficiencia también es menor. A continuación aparece su eficiencia tanto en laboratorio como en campo:



*Figura 4: Célula de silicio policristalino*

- $\eta_{\text{max\_laboratorio}} = 21.25\%$
- $\eta_{\text{condiciones STC}} = 18.8\% - 19.6\%$

- Células híbridas

Mezclan la tecnología de silicio cristalino en oblea con procesos de lámina delgada. A continuación aparece su eficiencia en laboratorio:



*Figura 5: Célula híbrida*

- $\eta_{\text{max\_laboratorio}} = 25.6\%$

- **Lámina delgada**

Se utilizan capas de material semiconductor muy finas ( $\mu\text{m}$ ). Esta tecnología requiere de un sustrato como soporte, que dependiendo de cuál sea el módulo tiene diferentes características. Su coste es menor que el de los módulos de silicio ya que la célula y el módulo se fabrican simultáneamente.

- Silicio amorfo (a-Si)

Utilizan sustratos rígidos (vidrio, metal) o flexibles (plásticos). Pueden ser de diferentes colores (marrón rojizo, azul, azul-violeta) y distintas transparencias. Su aspecto es uniforme. A continuación aparece su eficiencia en campo:



*Figura 6: Célula a-Si*

- $\eta_{\text{condiciones STC}} = 12\% - 12.6\%$

- CIS (Diseleniuro de Cobre e Indio)

Tienen un aspecto uniforme y suelen ser de color gris oscuro o negro. Su eficiencia es algo superior a las de silicio amorfo.



*Figura 7: Célula CIS*

- CIGS (Diseleniuro de Cobre, Indio y Galio)

Su eficiencia en campo es de:

- $\eta_{\text{condiciones STC}} = 15.2\% - 16.2\%$



*Figura 8: Célula CIGS*

- CdTe (Telururo de Cadmio)

Utilizan superestratos rígidos y su aspecto es uniforme. Suelen ser de color verde oscuro o negro. Su mayor inconveniente es la toxicidad que presenta el Cadmio.

Su eficiencia en campo es de:

- $\eta_{\text{condiciones STC}} = 18\% - 19.2\%$



*Figura 9: Célula CdTe*

- **Concentración fotovoltaica**

Se basan en elementos ópticos que enfocan la luz solar sobre la célula fotovoltaica. Únicamente utiliza radiación solar directa, por lo que es necesario el uso de seguidores y es importante que la situación geográfica sea la correcta. Al utilizar una cantidad menor de material semiconductor, los costes son menores. Se encuentra en estado inicial de comercialización. Su eficiencia máxima en laboratorio es de:



*Figura 10: Células de concentración FV*

- $\eta_{\text{max\_laboratorio}} = 46.0\%$

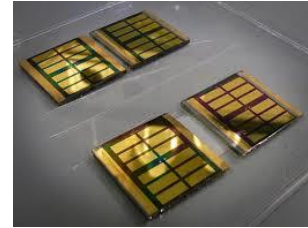
- **Perovskitas**

Se basan en un compuesto híbrido con estructura de perovskita formado por un material orgánico-inorgánico. Su proceso de producción es bastante simple y su coste es bajo. En los últimos 5 años han tenido un aumento espectacular de la eficiencia.

Son transparentes, ligeros, flexibles y eficientes.

Su punto negativo es que tienen problemas de durabilidad. Su eficiencia máxima en laboratorio es

de:



*Figura 11: Perovskitas*

- $\eta_{\max\_laboratorio} = 21.0\%$

### **1.2.2. Módulo fotovoltaico**

Un módulo fotovoltaico se forma uniendo diferentes células en serie y/o paralelo para obtener los valores de tensión y corriente deseados. La tensión e intensidad que es capaz de ofrecer un módulo fotovoltaico depende del número de células que disponga y de la interconexión entre ellas.

Las células que forman un módulo están interconectadas eléctricamente, lo que requiere un aislamiento adecuado. De la misma manera, dado que están expuestos a la intemperie, es necesario que tengan una cierta protección mecánica y una protección frente a agentes atmosféricos como la nieve, lluvia, etc.

#### **1.2.2.1. Componentes de un módulo fotovoltaico típico**

Un módulo fotovoltaico está compuesto por diferentes materiales, tal y como aparece en la Figura 12:

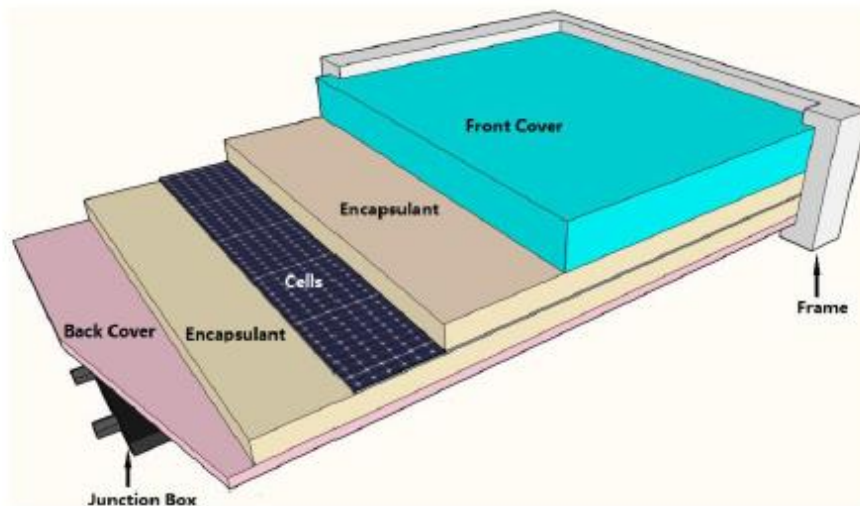


Figura 12: Estructura típica de un módulo fotovoltaico

- **Cubierta frontal:** Necesaria para proteger a las células fotovoltaicas. Es necesario que sea resistente frente a agentes atmosféricos (lluvia, granizo, nieve, etc.) y frente a impactos. Además, es importante que sea capaz de soportar largas exposiciones ante rayos ultravioleta y tener baja resistencia térmica.

Generalmente se utiliza el vidrio templado ya que tiene una gran resistencia frente a impactos y su transmisión a la radiación solar es excelente.

- **Encapsulante:** Su función es la unión de los diferentes componentes y la protección de las células. Las propiedades requeridas son; buena transmisión a la radiación solar, estabilidad a altas temperaturas, alta resistividad, baja absorción de la humedad, alta resistencia a los rayos UV y elevada adherencia. Para ello se utilizan polímeros termoplásticos y transparentes. Hoy en día el material más utilizado es el EVA (Etileno Vinil Acetato).
- **Células:** Tal y como se ha descrito anteriormente son el elemento principal ya que es el elemento responsable de convertir la radiación solar en electricidad. La conexión entre ellas se realiza soldando contactos metálicos sobre los buses, tanto por la cara superior como por la inferior. Para conseguir la interconexión entre ellas, se unen mediante hileras que van desde la zona N (cara frontal) de una célula hasta la zona P (cara posterior) de la siguiente.
- **Cubierta posterior:** Su función, al igual que la cubierta frontal es la protección del módulo. Es necesario que lo proteja frente a los diferentes agentes atmosféricos y la humedad. Los materiales más utilizados son los materiales acrílicos, siliconas o fluoruro de polivinilo (PVF), denominado comercialmente como Tedlar.

- **Marco:** Se utiliza para dar rigidez y resistencia mecánica al módulo. Para su fabricación se utiliza aluminio anodizado o acero inoxidable.
- **Conexión eléctrica:** Después de interconectar todas las células del módulo, se sacan por la parte posterior del módulo dos bornes de conexión (positivo y negativo). Suelen incorporarse en una caja fabricada con materiales plásticos y resistentes a altas temperaturas.

### 1.2.3. Ventajas y desventajas de la Energía Solar Fotovoltaica

Aunque anteriormente se han resumido de forma general las ventajas y desventajas de las energías renovables, a continuación se detallarán más concretamente las de la energía fotovoltaica. A parte de lo anteriormente nombrado, la fotovoltaica tiene las siguientes cualidades:

#### Ventajas:

- Es silenciosa ya que no produce ruidos.
- La mayor producción coincide con las horas de mayor consumo (mediodía).
- Los sistemas son sencillos y fáciles de instalar.
- Apenas necesita mantenimiento y su riesgo de avería es bajo.
- Los módulos tienen una larga vida útil (aproximadamente 25 años).
- El coste de los componentes disminuye a medida que va avanzando la tecnología.

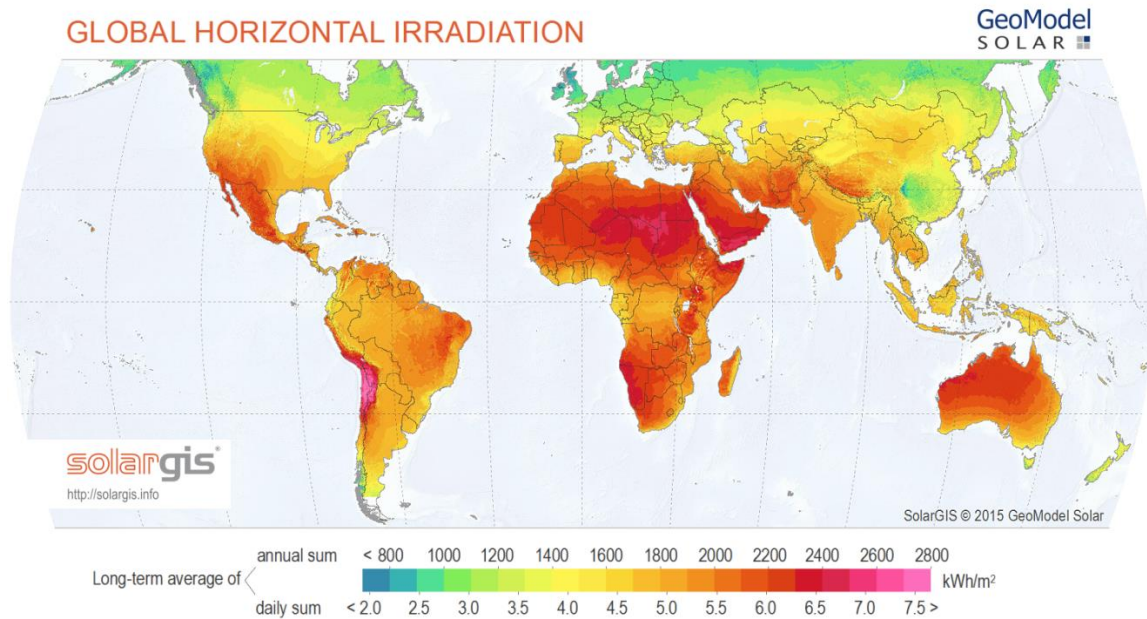
#### Desventajas:

- El impacto ambiental de los parques solares es bastante grande, ya que se necesitan grandes superficies para obtener una energía considerable.
- Únicamente se produce energía mientras haya luz.
- El rendimiento de las células es bastante bajo.

## 1.3. Relación entre la producción de energía fotovoltaica y el clima

La producción de energía solar fotovoltaica está relacionada directamente con la irradiancia que llega a una cierta superficie. Dependiendo de las horas de sol que tenga a lo largo del año una cierta región, de su situación en el mapa mundial y de las

diferentes condiciones climatológicas, el clima será diferente. En la siguiente figura se aprecia de manera visual el potencial de irradiancia horizontal disponible en el mundo.



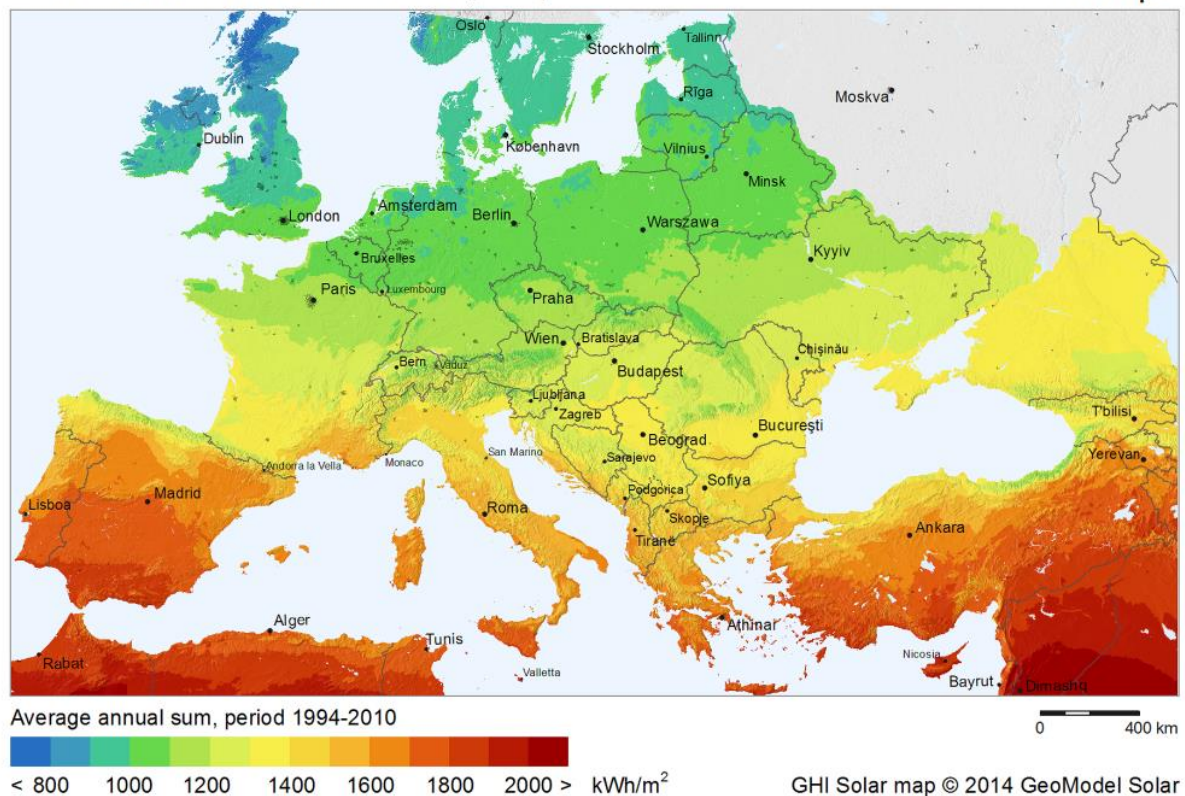
*Figura 13: Mapa mundial de radiación solar horizontal*

En la imagen se puede apreciar de color rojizo las zonas de mayor potencial solar, siendo las zonas de color verdoso las de menor potencial. Para analizar el potencial solar disponible en Europa se tiene el siguiente mapa.



## Global Horizontal Irradiation (GHI)

## Europe



*Figura 14: Mapa de Europa de radiación global horizontal*

En este caso se observa como España es una de las zonas con mayor potencial solar de Europa. Sin embargo, comparando estos datos con el potencial de energía solar fotovoltaica instalada en el año 2015, no es el país con la mayor capacidad fotovoltaica instalada.

En la Figura 15, se aprecia como Alemania es el país de la Unión Europea con mayor capacidad fotovoltaica instalada, seguido por Italia [2]. Sin embargo, observando en la Figura 14 la radiación global horizontal en Alemania, se aprecia que es uno de los países con menor radiación.

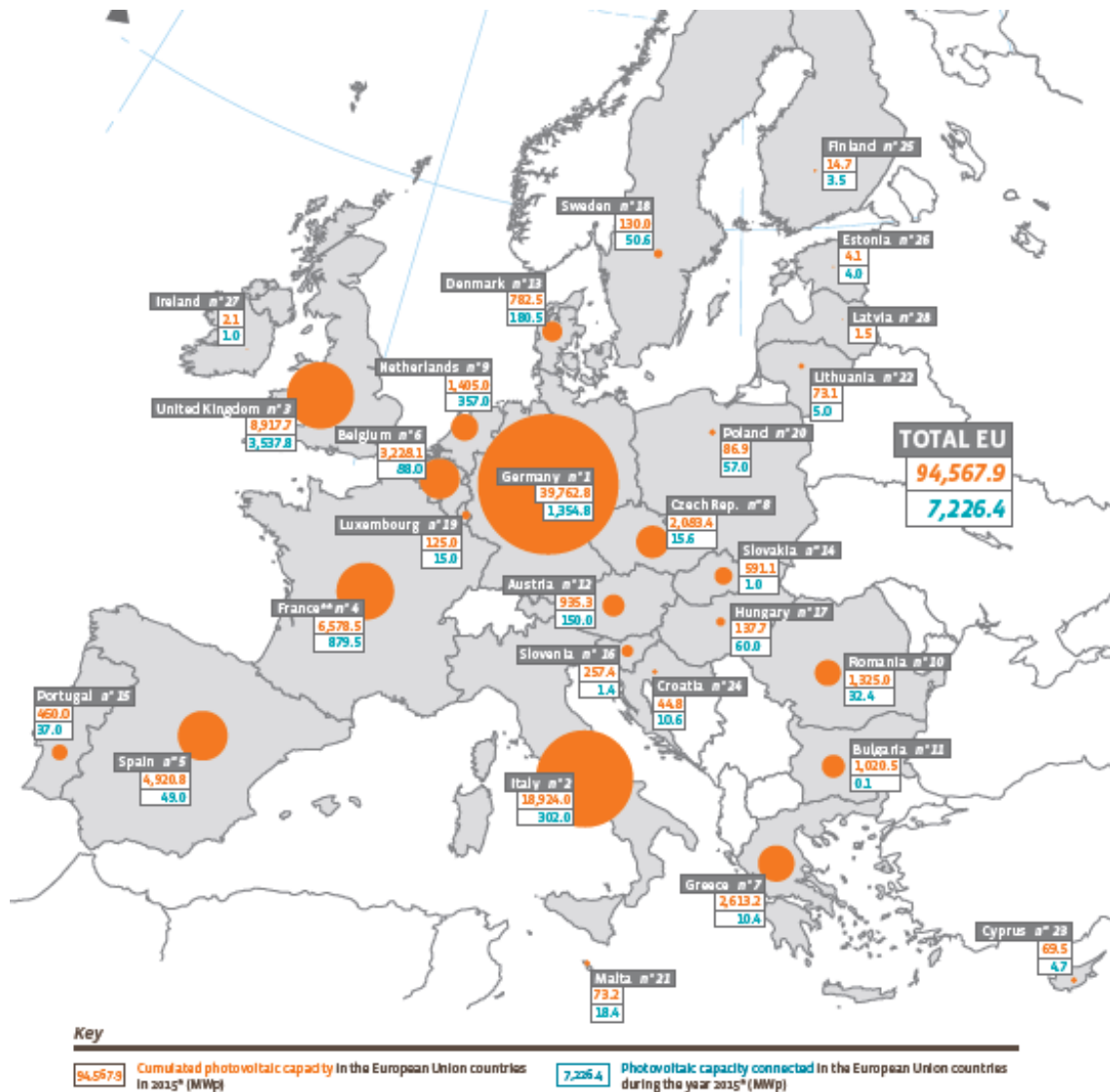


Figura 15: Capacidad fotovoltaica instalado en la Unión Europea en 2015 (MWp)

Por lo tanto, instalando más instalaciones fotovoltaicas en las zonas de color naranja-amarillento de la Figura 14, se lograría aprovechar el potencial solar disponible en estas zonas y producir así mucha más energía mediante instalaciones fotovoltaicas.

## 2. OBJETO

En este Trabajo Fin de Grado se ha estudiado el proceso de laminación de módulos fotovoltaicos utilizando materiales alternativos como el policarbonato en sustitución al vidrio y un entramado estructural en sustitución al marco de aluminio a fin de:

- Fabricar un módulo solar fotovoltaico “plug&play”, integrable y polivalente, que pueda utilizarse como elemento arquitectónico de fácil integración.
- Proveer a los arquitectos de recursos arquitectónicos según los requisitos necesarios, que permitan dar solución a las necesidades de integración que demanda el sector.

El proyecto recibe el nombre de *Solución de generación fotovoltaica para su uso como material constructivo alternativo en la edificación (AiSoVol)*. Está financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y cofinanciado por la Unión Europea, tras haber sido seleccionado dentro del Programa Estatal de I+D+i orientado a los retos de la Sociedad. Se enmarca en el RETO 3: “Reto energía segura, eficiente y limpia”.

### 2.1. Integración arquitectónica

Tal y como ya se ha explicado, durante los últimos años la energía solar fotovoltaica ha protagonizado una gran evolución e implantación, pero cabe destacar que la mayoría de la potencia instalada a nivel mundial se ha llevado a cabo mediante proyectos de gran capacidad. Sin embargo, la tendencia de futuro apunta hacia el desarrollo de instalaciones de pequeña y mediana potencia (generación distribuida, etc.).

Por ello, la implementación de sistemas fotovoltaicos en proyectos de integración arquitectónica está tomando cada vez mayor consideración. Aunque ya existan varias instalaciones fotovoltaicas en integración arquitectónica, la limitación que tienen es debido a su elevado coste y su compleja implementación por lo que no terminan de penetrar en el mercado. Por lo tanto, es necesario un estudio de diferentes técnicas y materiales para conseguir una implantación más sencilla, teniendo en cuenta que los criterios estéticos son fundamentales en el desarrollo de espacios arquitectónicos.

Las características que tienen los sistemas fotovoltaicos integrados en edificios son:

- No producen ruido

- No tienen partes móviles
- Son modulares y fácilmente manejables como elementos de construcción

Durante los últimos años, la industria de fabricación de módulos fotovoltaicos ha experimentado una gran evolución tecnológica y de reducción de costes. Entre los diferentes materiales que forman el módulo, el vidrio solar representa en torno a un 10% de los costes asociados y es el que menos variaciones ha sufrido a lo largo de los años. Por lo tanto, se ha creído conveniente estudiar el caso de sustituirlo por otro/s materiales que garantice/n las mismas o similares prestaciones.

Aunque el vidrio presenta propiedades ideales como su alta transmisividad y su rigidez estructural, también aporta al módulo un peso elevado y limita su aplicación a superficies planas, además de necesitar un marco y una estructura de soporte. Esta última característica reduce de manera notoria sus aplicaciones en cuanto a la integración arquitectónica ya que no puede doblarse.

Teniendo en cuenta todo lo mencionado, el presente proyecto propone el desarrollo experimental, la fabricación y el ensayo en un entorno controlado de un módulo solar fotovoltaico modular, integrable y polivalente, capaz de facilitar su utilización como elemento arquitectónico.

### 2.1.1. Características necesarias

Para dar al módulo las características y cualidades necesarias para que su integración arquitectónica sea más sencilla, se han modificado sus componentes para satisfacer las siguientes necesidades:

- **Flexibilidad:** Se sustituye el vidrio templado por el policarbonato compacto, un material termoplástico. Sus características son similares a las del vidrio ya que tiene una transmisibilidad adecuada en el espectro visible y una alta resistencia ultravioleta del 98%. En cuanto a la resistencia mecánica, es superior a la del vidrio, ya que su límite de elasticidad es superior a  $60 \text{ N/mm}^2$ . Sus principales características para integración arquitectónica son su flexibilidad y su ligereza, pudiendo utilizarlo en superficies curvas. Esto posibilita su integración en infinidad de aplicaciones como BAPV (adaptación de los módulos ya integradas en los edificios), BIPV (integración de los módulos como parte estructural del propio edificio), transporte y mobiliario urbano.
- **Entramado estructural:** Se elimina el marco de aluminio, que es lo que le da resistencia al módulo, por lo que es necesario un material que le aporte la

suficiente resistencia estructural. Para ello se utilizará un tejido entramado basado en fibras de poliéster con recubrimiento trenzado de polietileno de alta densidad (High Modulus Polyethylene, HMPE), ya que tiene una alta resistencia mecánica y a la radiación ultravioleta.

- **Ligereza:** La sustitución del vidrio templado y del marco de aluminio por una lámina de tejido entramado, convierte el módulo en un elemento mucho más ligero. Esto permite su utilización en estructuras más ligeras y facilita su manipulación, lo que supone una reducción de costes de transporte e instalación.
- **Geometría variable:** Debido a su ligereza y su fácil manipulación que permiten el corte y mecanizado a través de elementos comunes en el mercado, se puede variar su geometría para atender a las demandas estéticas de los diseñadores.
- **Elemento constructivo:** Para que el módulo fotovoltaico sea adecuado como elemento constructivo, se incorpora una lámina posterior de poliestireno extruido. De esta manera cumple los requisitos mínimos establecidos por el Documento Básico de Ahorro y Energía del CTE.
- **Caja de conexiones:** Debido a la sustitución de los materiales anteriormente nombrados, se reduce el espesor del módulo lo que hace necesario el diseño de un nuevo tipo de caja de conexión. Éstas deben adaptarse y mantener su funcionalidad y su grado de protección.

## 2.2. Desarrollo de un proceso de laminado compatible con los nuevos materiales

Por lo tanto, para cumplir con las características necesarias para la integración arquitectónica de un módulo fotovoltaico, se han elegido los siguientes materiales. En la Tabla 1 se pueden apreciar las diferencias entre los materiales utilizados en un módulo fotovoltaico típico y los propuestos en el presente proyecto.

Módulo FV típico	Módulo FV materiales alternativos
Vidrio templado	Policarbonato
EVA	EVA
Células fotovoltaicas	Células fotovoltaicas
EVA	EVA
PPE	Entramado
	EVA
	PPE

*Tabla 1: Diferencias entre los materiales utilizados*

En comparación con los módulos convencionales, los nuevos materiales son el Policarbonato y el entramado, que sustituyen al vidrio y al marco de aluminio.

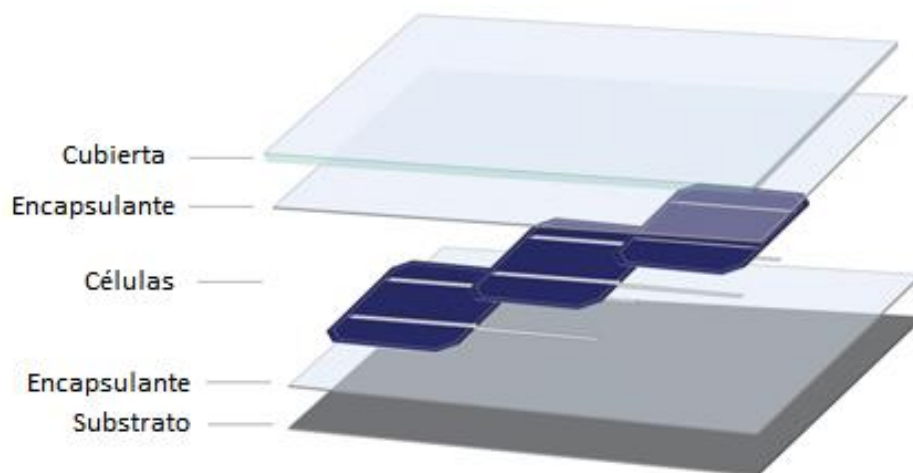
- **Policarbonato:** Es un material termoplástico cuyas propiedades son muy interesantes. Sus características principales para sustituirlo por el vidrio son: su ligereza, transparencia óptica y la posibilidad de doblarlo en frío.
- **Entramado estructural:** Debido a la eliminación del marco de aluminio de los módulos convencionales, es necesario un material que aporte una resistencia estructural necesaria pero que al mismo tiempo permita la flexibilidad requerida. Para ello, se ha introducido una lámina de entramado estructural que aporta el refuerzo necesario a los módulos fotovoltaicos.

### 3. LAMINACIÓN

#### 3.1. Introducción

La laminación o encapsulado es un paso crucial en el proceso de fabricación de módulos fotovoltaicos. Dado que los módulos fotovoltaicos tienen que soportar una exposición prolongada en el exterior, la encapsulación de las células solares por medio de la laminación es una etapa muy importante para asegurar un funcionamiento óptimo en el exterior.

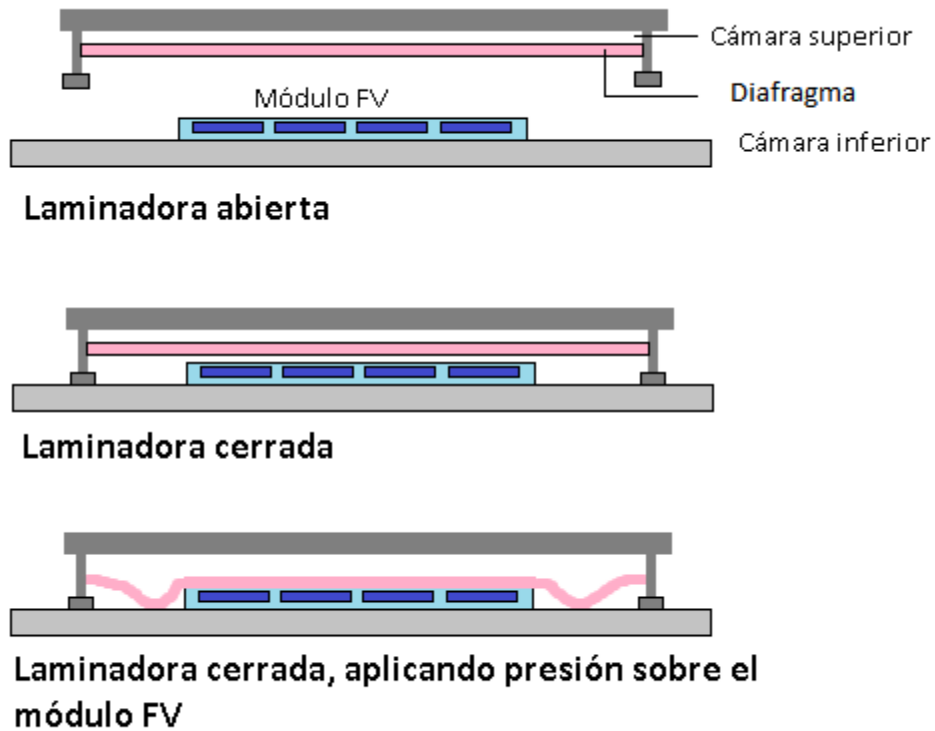
Durante el proceso de encapsulación en la fabricación de módulos fotovoltaicos por un lado se interconectan las células solares por soldadura, tanto en serie como en paralelo y por otro lado, se encapsulan en una estructura resistente a la intemperie y que a la vez proporcione un soporte mecánico. El encapsulado está compuesto por sustrato – encapsulante – células – encapsulante – cubierta, como se puede apreciar en la siguiente figura:



*Figura 16: Distintos componentes a laminar de un módulo fotovoltaico*

Hoy en día, la manera más común para laminar un módulo fotovoltaico de silicio cristalino en la industria es utilizando una laminadora. Esta máquina tiene diferentes parámetros como la temperatura, el vacío, la duración del proceso y la presión, que se controlan independientemente para proporcionar unas condiciones óptimas de proceso.

El proceso de laminado consiste en realizar vacío para extraer los posibles gases que se puedan encontrar en el módulo fotovoltaico y aplicar presión para asegurar que todos los materiales queden unidos. Este proceso se puede apreciar de manera sencilla y visual en la siguiente figura.



*Figura 17: Proceso de laminado*

La obtención de un buen encapsulado puede prevenir de manera significativa la degradación de las células solares. Una laminación correcta debe mantener las células solares en buen estado durante al menos 25 años.

Para controlar que el laminado es el correcto, debe cumplir las siguientes especificaciones:

- Inspección visual correcta
- Buena adherencia entre las diferentes capas
- Grado de curado del EVA suficiente

En el capítulo 4 se describirán estas técnicas en mayor profundidad.



### 3.2. Descripción de la laminadora

La laminadora es una máquina controlada por un operador en la que se lamina el material introducido en su interior, en este caso un módulo fotovoltaico. Tal y como se puede observar en la siguiente figura, está compuesta por dos cámaras, la cámara superior y la cámara inferior.

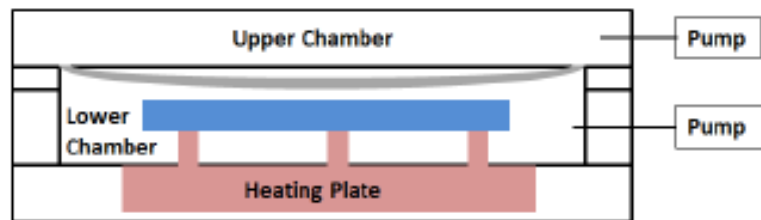


Figura 18: Esquema de una máquina laminadora

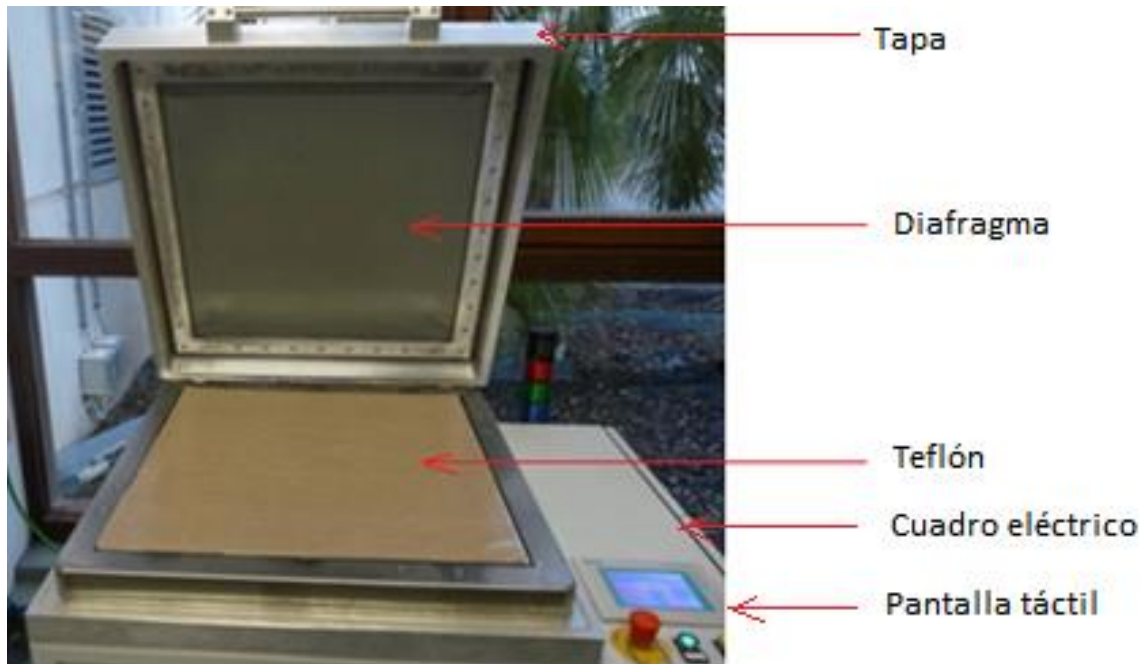
La máquina está provista de una tapa que cierra los bordes herméticamente. La tapa tiene una cámara interna y un diafragma que separa esa cámara (cámara superior) de la cámara que contiene el módulo (cámara inferior). En ambas cámaras se puede realizar vacío independientemente. La muestra se introduce en la cámara inferior, entre dos láminas de teflón. Esta configuración permite al módulo estar en vacío mientras se ejerce una presión mecánica sobre él.

Para aplicar calor a la muestra, la máquina está dotada de una placa de aluminio que se calienta a través de tres resistencias de acuerdo a la configuración de sus parámetros. Cabe la posibilidad de añadirle un circuito hidráulico para refrigerar la muestra laminada.

El cuadro eléctrico está situado en un lado de la máquina como se aprecia en la Figura 19. Debajo de la placa metálica se encuentra el circuito neumático, protegido por la caja de protección, que incluye la bomba de vacío y el circuito hidráulico. En la parte trasera se encuentra la alimentación eléctrica, hidráulica y neumática.

La laminadora se controla a través de una pantalla táctil LCD. Esta pantalla permite configurar, editar y controlar los valores de los parámetros del controlador, para supervisar y controlar las alarmas, gestionar recetas, etc.

En la siguiente figura se pueden apreciar las diferentes partes de la laminadora:



*Figura 19: Partes de la laminadora*

En el presente TFG se ha utilizado la laminadora L036A fabricada por la empresa P. Energy [3].

### **3.2.1. Funcionamiento de la laminadora**

Para comenzar, se debe abrir la bomba y encender la laminadora. A continuación, se debe introducir la receta deseada mediante la pantalla táctil con los parámetros de temperatura, presión y tiempo deseados. Una vez introducida la receta, se calentará la laminadora hasta que alcance la temperatura deseada. Al alcanzar la temperatura deseada, se introduce la muestra entre las dos láminas de teflón, se cierra la máquina y comienza el proceso de laminación como se describe en la Figura 20.

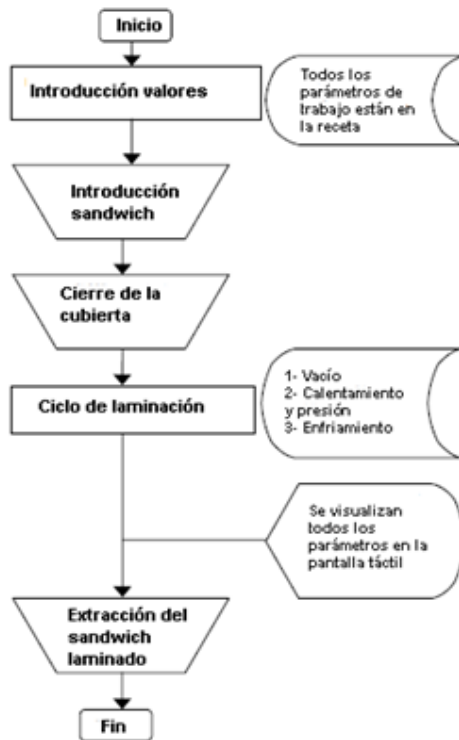


Figura 20: Descripción de los ciclos de trabajo

El proceso de laminación se puede descomponer en tres etapas (ver Figura 21):

- a. Se realiza vacío en las dos cámaras, obteniendo valores de 0-10 mB. Esta etapa es importante para extraer el aire, la humedad u otros gases que puedan encontrarse entre las diferentes capas del módulo. La duración de este proceso depende de la receta utilizada pero suele ser de unos pocos minutos.
- b. A continuación la cámara de arriba se llena de aire comprimido de forma que el diafragma presiona el material que se quiere laminar. Mientras tanto, tiene lugar el curado del EVA, que significa que se forman enlaces químicos transversalmente entre las moléculas largas, que antes del curado, solamente estaban unidas entre sí débilmente. El plástico entonces adquiere propiedades de elastómero, es decir, propiedades parecidas a las de la goma.
- c. Se realiza vacío en la cámara de arriba y se rompe el vacío en la cámara de abajo, de esta forma se puede abrir la cámara y finaliza el laminado.

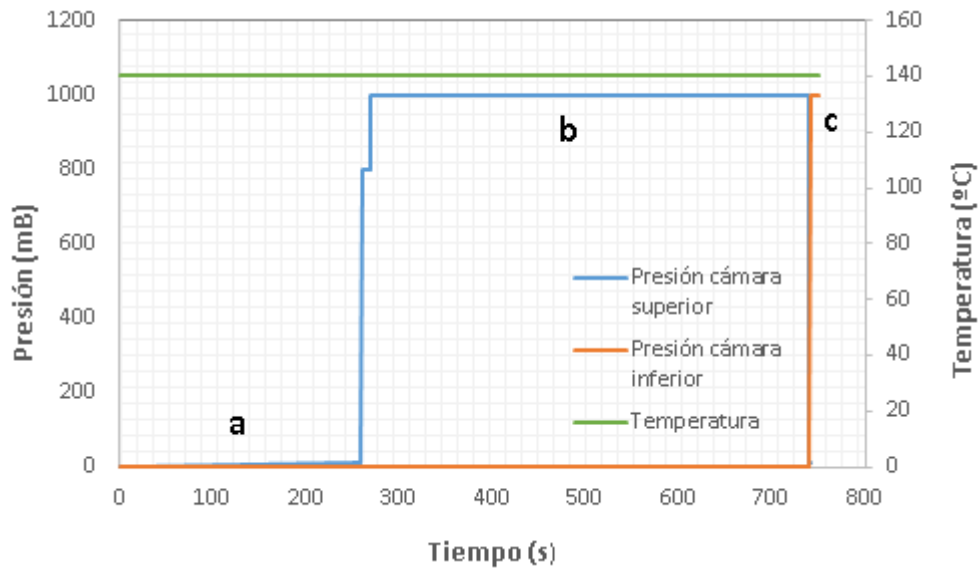


Figura 21: Temperatura y presión de la laminadora durante el proceso de laminación

La temperatura se mantiene constante a lo largo de todo el proceso, ya que la muestra se introduce cuando la laminadora ya ha alcanzado la temperatura deseada y se extrae cuando termina el proceso, que está a la misma temperatura.

### 3.3. Descripción de los materiales utilizados y sus especificaciones

#### 3.3.1. Cubierta frontal

La cubierta frontal, también denominada superestrato, es la capa superior del sándwich. Su función, al igual que la cubierta posterior, es proteger a la célula de impactos y diferentes agentes atmosféricos. En los módulos convencionales se utiliza vidrio templado con bajo contenido en hierro para garantizar una mayor protección frente a impactos e inclemencias en el tiempo. En el presente trabajo fin de grado se ha investigado la posibilidad de emplear policarbonato en sustitución al vidrio con el objetivo final de fabricar módulos fotovoltaicos aptos para su utilización como elemento arquitectónico de fácil integración. El policarbonato que se ha utilizado es el producido por la empresa Sabic [4] cuyas especificaciones aparecen en el Anexo 1.

Este producto es una lámina transparente de policarbonato con protección UV en ambas caras. Debido a su excelente resistencia al impacto (200-300 veces la del vidrio), es un buen candidato para una amplia variedad de aplicaciones de edificación y construcción. Además, es un material ligero (6 veces más ligero que el vidrio),

estable ante radiaciones ultravioleta y se puede doblar en frío con facilidad, lo que supone que pueda adoptar formas curvas.

El estudio se realizará para láminas de policarbonato de dos espesores diferentes, uno de ellos de 2 mm de espesor y el otro de 4 mm. El estudio se ha hecho utilizando láminas de policarbonato de dimensiones 165 mm x 165 mm.

### 3.3.2. Encapsulante

La función del encapsulante es unir las células tanto con la cubierta frontal como con la posterior, de forma que el sándwich de materiales quede sellado. Además, maximizan el acoplamiento óptico y protegen a las células de la humedad ya que constituye una barrera frente al oxígeno y vapor de agua. Su absorción óptica es baja y su índice de refracción está adaptado para minimizar la reflectancia producida en la interfaz. Asimismo relaja el estrés termomecánico generado entre las células y la cubierta frontal.

A lo largo de los años, en la industria fotovoltaica se han utilizado diferentes tipos de materiales poliméricos como etileno vinil acetato (EVA), la silicona, polivinil butiral (PVB), ionómeros y poliolefina termoplástica (TPO) [5]. El crecimiento del mercado fotovoltaico en los últimos años ha llevado a aumentar el número de proveedores de encapsulantes como el EVA. De la misma manera también ha aumentado el número de fabricantes de encapsulantes diferentes al EVA, logrando en 2013 los valores que aparecen en la siguiente figura.

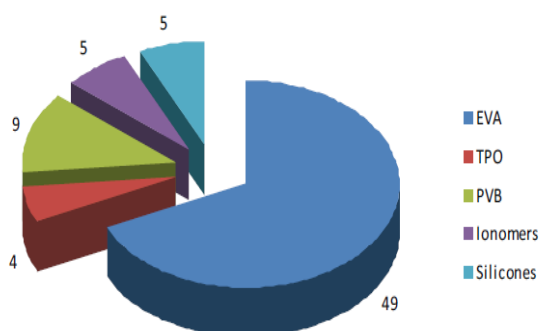


Figura 22: Número de productos de los diferentes encapsulantes en 2013

Como se puede observar, aunque existan diferentes tipos de encapsulantes, el predominante es el EVA, alcanzando un 80 % del mercado actual debido a su buena

resistencia a la intemperie, su alta transparencia óptica, su sencillo procesamiento y su bajo coste [6].



*Figura 23: Encapsulante EVA*

Se debe almacenar en oscuridad y con la menor cantidad posible de humedad, ya que la luz y la humedad hacen que se degrade rápidamente. Se recomienda almacenarlo a una temperatura inferior a 30 °C (óptima 22 °C) y una humedad relativa inferior al 50% por un tiempo que no supere los 6 meses después de su producción, sin luz solar directa y siempre envuelto en el material de embalaje original.

En el mercado existe una amplia selección de diferentes tipos de EVA según su fabricante (EVASA, Solutia, Mitsui, DuPont, Bridgestone, etc.). Cada uno de los fabricantes ofrece diferentes partículas con diferentes propiedades de curado y diferentes niveles de curado recomendados. Estos niveles de curado recomendados van desde el 70% hasta el 90% [7].

Debido a que el material encapsulante y la cubierta posterior representan costes importantes en la fabricación de módulos fotovoltaicos, se está investigando en su reducción, manteniendo al mismo tiempo las propiedades que garanticen una larga vida útil del módulo. La tendencia de las cuotas del mercado de los encapsulantes más utilizados se muestra en la siguiente figura.

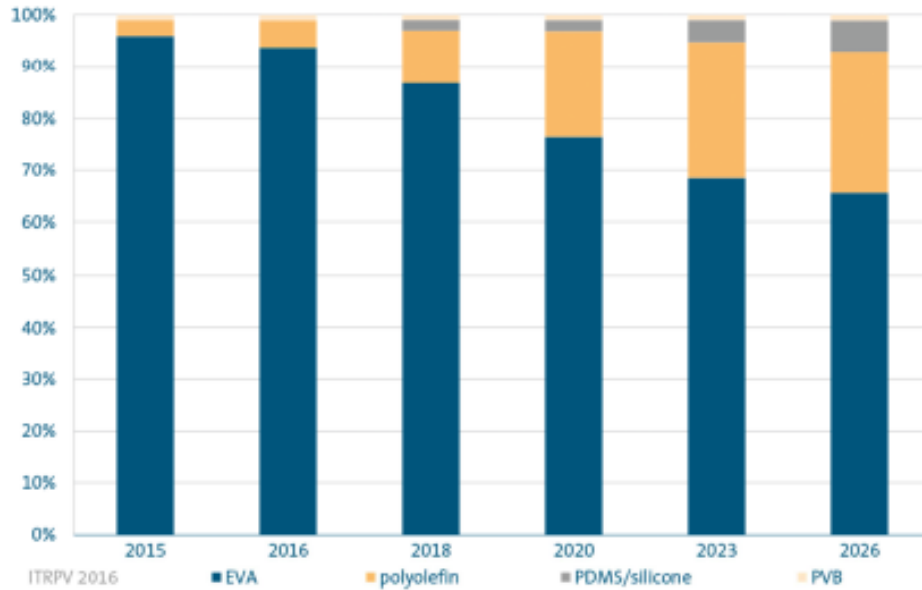


Figura 24: Tendencia de las cuotas de mercado de los distintos encapsulantes

En la figura se puede apreciar que la tendencia de la poliolefina como material encapsulante tiende a aumentar desde un 3% en 2015 hasta un 25% en 2026. De todas maneras, claramente se puede observar que el material predominante a lo largo de los años seguirá siendo el EVA [8].

El encapsulante utilizado en este TFG es EVA suministrado por la empresa STR y cuyas especificaciones aparecen en el *Anexo 2*. Las condiciones de laminación propuestas por el fabricante son: temperatura de 145 °C, 3 minutos de vacío y 12 minutos de curado. Estas condiciones dependen de la laminadora. En el caso de laminaciones industriales, se aumenta la temperatura hasta 150-152 °C reduciendo el tiempo con el objetivo de conseguir un mayor número de muestras en menor tiempo.

### 3.3.3. Célula fotovoltaica

La célula fotovoltaica es el elemento esencial de un módulo fotovoltaico, ya que es el componente que transforma la energía del sol en energía eléctrica. Las células más comunes en la industria son las de silicio cristalino (c-Si). Están basadas en una unión PN con un contacto en cada región, lo que hace que se pueda obtener electricidad a partir de ellas.

Para poder extraer la energía eléctrica están compuestas por *fingers* y *buses*, como se aprecia en la siguiente figura.

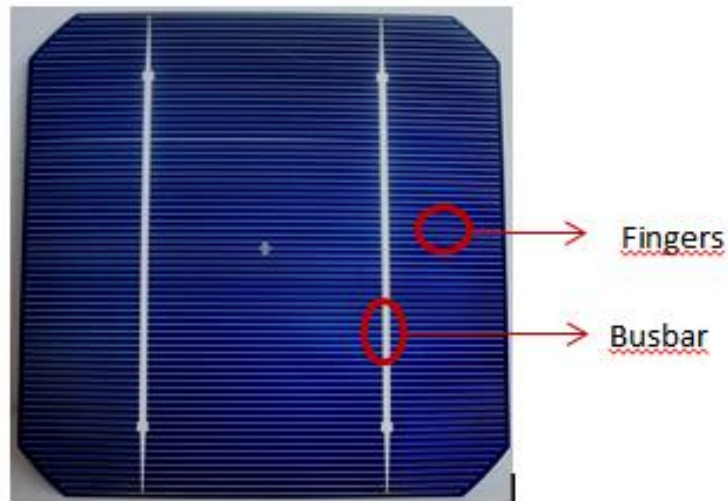


Figura 25: Cara frontal de una célula fotovoltaica con los contactos

Los *fingers* son las líneas blancas más estrechas de las células. Transportan la electricidad producida en cada punto hasta el *bus*. Por lo tanto, los *buses* son las líneas perpendiculares a los *fingers*. Ambos elementos están formados por plata. Dependiendo de la célula, el número de *buses* puede variar (normalmente 2-3). Sobre ellas se sueldan las cintas de *ribbon* que conectan todas las células, tal y como se aprecia en la siguiente figura:

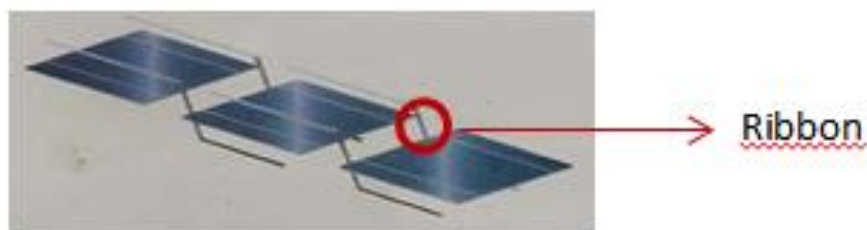


Figura 26: Interconexión de células

Al mismo tiempo, los *ribbon* van unidos por una cinta metálica llamada *interconexión de strings*. Esta parte suele estar situada en la parte superior o inferior de los módulos y es algo más gruesa que los *ribbon*.



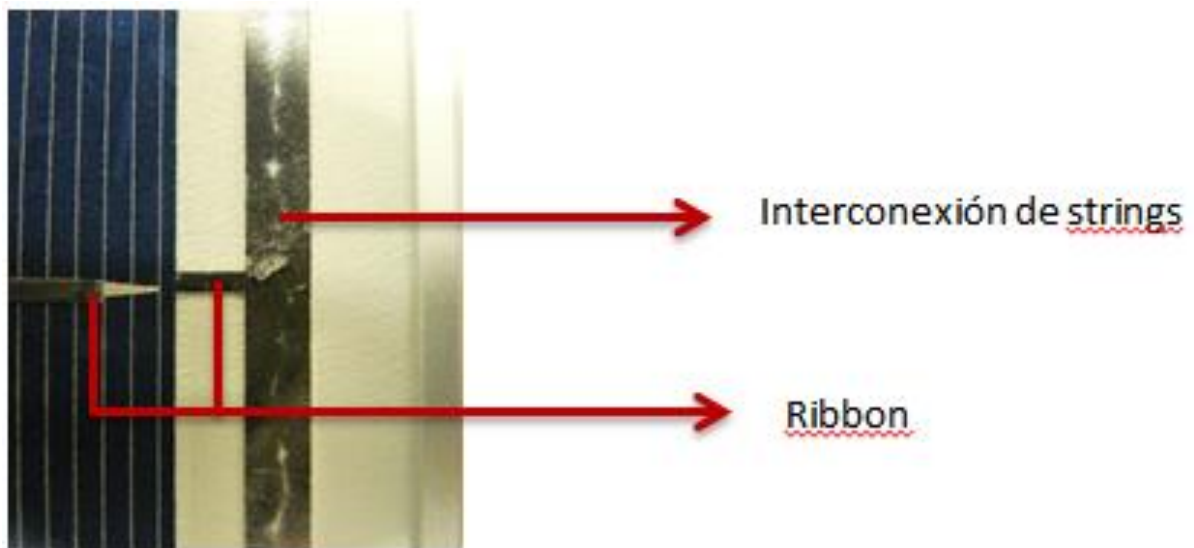


Figura 27: Detalles de los ribbon y la interconexión de strings

#### 3.3.4. Entramado estructural

Debido a la eliminación del marco de aluminio, el material que se utilizará para dar una cierta resistencia al módulo será un tejido entramado basado en fibras de poliéster con recubrimiento trenzado de polietileno de alta densidad (HMPE), laminado entre dos capas de tafetán de poliéster con tratamiento anti ultravioleta. Las fibras de este tejido van entrelazadas para que las fuerzas mecánicas que soportan el módulo se distribuyan de manera uniforme a lo largo de todo el módulo.

El entramado utilizado es un material que se utiliza en la fabricación de velas para la navegación, suministrado por la empresa *Sailcloth Technology* cuyas especificaciones aparecen en el Anexo 3. En la siguiente figura se puede apreciar una imagen de este material:



Figura 28: Entramado C648

### 3.3.5. Cubierta trasera

La cubierta posterior de un módulo fotovoltaico tiene como finalidad protegerlo de la humedad y los diferentes agentes atmosféricos, además de actuar como aislante eléctrico. En la mayoría de los casos es una lámina polimérica multicapa. Los materiales comúnmente usados son:

- TPT (Tedlar/Poliéster/Tedlar)
- TPE (Tedlar/Poliéster/EVA)
- PPE (Poliéster/Poliéster/EVA)
- PVDF (Fluoruro de polivinilideno)

En el presente TFG se ha utilizado como cubierta un PPE cuyas especificaciones aparecen en el *Anexo 4*.



*Figura 29: Rollo de PPE*

## 3.4. Proceso de laminación

### 3.4.1. Requisitos previos

#### a. Limpieza

El proceso de montaje del sándwich, se debe realizar sobre una superficie dura y completamente limpia, de mármol a ser posible. Para ello, se limpiará la superficie con un paño empapado en alcohol isopropílico (IPA).

De la misma manera, el proceso de soldado de la célula se debe realizar sobre una superficie dura (en este caso de madera, metal o metacrilato) y completamente limpia, limpiándola de la misma manera que en el caso anterior.

#### b. Estado de mantenimiento y calibración de los equipos

Los equipos utilizados deberán estar debidamente mantenidos de acuerdo con lo establecido en sus correspondientes instrucciones técnicas.

### 3.4.2. Equipos, instrumentos y patrones

Para poder llevar a cabo el proceso de laminación se necesitarán los siguientes equipos e instrumentos:

- Superficie de mármol: Necesaria para cortar las diferentes capas que forman el laminado y montar el sándwich.
- Regla rígida: Para realizar todas las medidas necesarias previas al corte de los materiales.
- Herramientas de corte: Para confeccionar a medida las diferentes partes del sándwich.
- Laminadora: Equipo controlado por un técnico cualificado que será capaz de controlar diferentes parámetros (temperatura, vacío y el tiempo de proceso).
- Equipo de soldadura: Para el soldado de las diferentes células. Necesario que alcance una temperatura entre 100-150 °C.
- Flux: Alcohol que se utiliza para limpiar los puntos a soldar y quitar el óxido para que la soldadura sea correcta y no quede fría. La temperatura a la que los componentes del flux se vuelven activos es de 100-120 °C. Se verterá una pequeña cantidad en un recipiente de vidrio para facilitar su aplicación.
- Pincel: Necesario para aplicar el flux.
- Bobina de *ribbon*: Elemento a soldar en la célula que permite la unión de varias de ellas.

### 3.4.3. Procedimiento

#### a. Laminado

Para comenzar con el proceso de laminación, se pondrá en marcha la laminadora y se eliminarán todas las alarmas que aparezcan. A continuación, se arrancará la bomba 1-2 horas antes de comenzar a laminar. Esta bomba sirve para poder realizar vacío y aplicar presión durante el proceso de laminación.

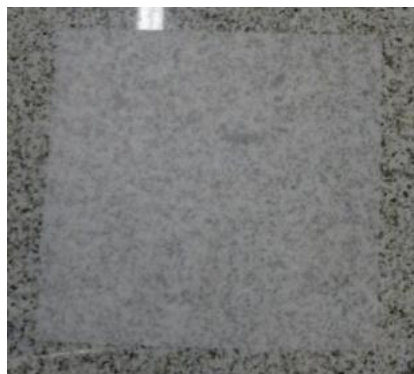
En primer lugar y antes de nada se debe elegir el tamaño del módulo que se vaya a laminar. En función de su dimensión se recortarán las diferentes capas del sándwich. El substrato PPE se recortará de su mismo tamaño. Para ello, se puede utilizar un

cúter o tijeras con una regla, o una guillotina de papel. Éste último método es con el que mejor resultado se obtiene.



*Figura 30: Lámina de PPE*

A continuación, se cortarán mediante un cúter tres capas EVA de tamaño ligeramente superior al del PPE (3-4mm).



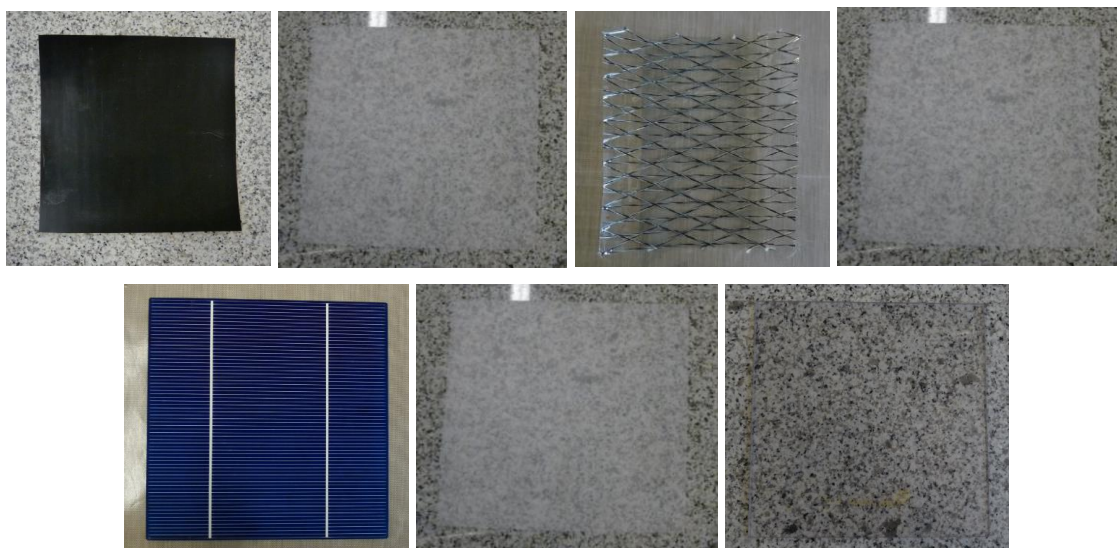
*Figura 31: Lámina de EVA*

De la misma manera, se recortará una lámina de entramado estructural del mismo tamaño que las láminas de EVA.

Una vez recortados los diferentes materiales del sándwich, se procederá a su limpieza. En el caso del policarbonato y el sustrato, se limpiarán por ambas caras con IPA y a continuación con una pistola de nitrógeno. En el caso del encapsulante y del entramado en cambio, no se debe limpiar con IPA por lo que únicamente se limpiará con la pistola de nitrógeno.

Después de limpiar todos los materiales a utilizar, se comenzará con la preparación del sándwich. Para ello, se irán colocando las diferentes capas desde la cubierta posterior, hasta el policarbonato, tal y como aparece a continuación.

PPE → EVA → Entramado → EVA → Células → EVA → PC



*Figura 32: Orden de los materiales utilizados para realizar el sándwich completo*

Por lo tanto, la primera capa es el substrato PPE. Las dos caras de este material son diferentes, ya que una es más brillante que la otra. Para preparar el sándwich, la cara más brillante, que al tacto es la más adherente, debe quedar hacia el encapsulante EVA. Antes de colocar la segunda capa, se cortarán 4 tiras de cello que irán colocadas en cada esquina del substrato (en la cara menos brillante), cuya función es sellar el sándwich una vez colocadas todas las capas y evitar que se produzca su desplazamiento. A continuación, se coloca la primera capa de EVA. Las caras de este material también son diferentes, siendo una más brillante que la otra. En este caso, la cara menos brillante del EVA debe quedar en contacto con el PPE. La tercera capa es el entramado, que tiene las mismas propiedades por ambas caras, de forma que su posición es irrelevante. Posteriormente, se coloca otra capa de EVA, quedando su cara menos brillante en contacto con el entramado. Después se coloca la célula y a continuación otra lámina de EVA, esta vez con la cara brillante en contacto con la célula. Para finalizar, se coloca la lámina de policarbonato, el cual no importa hacia qué lado colocarlo ya que por ambas caras es idéntico. Tras colocar esta última capa, se cierra el sándwich con los 4 cellos colocados al principio.

Cabe destacar, que también se han realizado laminaciones más sencillas en el presente TFG para la caracterización de diferentes técnicas. El sándwich sencillo está formado por los siguientes materiales:

PPE → EVA → EVA → PC

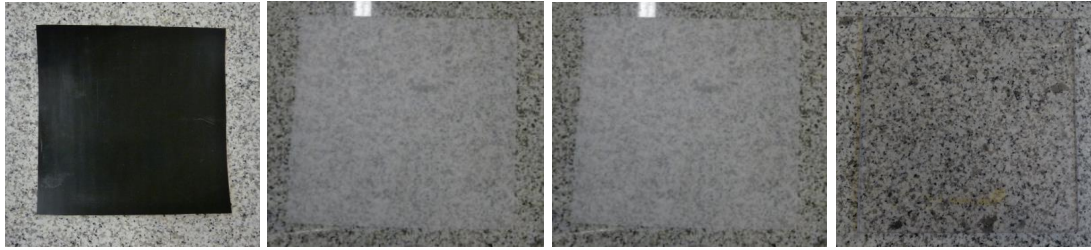


Figura 33: Orden de los materiales necesarios para realizar el sándwich sencillo

Su proceso de construcción es idéntico, pero más sencillo. Lo único a tener en cuenta es que las dos caras brillantes del EVA queden en contacto.

Una vez que se ha finalizado con el montaje del sándwich, éste se introduce en la laminadora entre las dos láminas de teflón. Es importante su colocación ya que el policarbonato al ser la capa rígida, debe estar en la parte inferior de la laminadora, en contacto con la lámina de teflón inferior la cual está en contacto con la placa de aluminio para evitar la ruptura de las células. Es importante que al introducir el sándwich en la laminadora, debe estar a la temperatura a la que se vaya a realizar la laminación, para que toda la placa esté a la misma temperatura y tenga lugar el curado del EVA. Al finalizar el laminado, se extraerá la muestra mediante guantes térmicos para evitar cualquier tipo de quemadura y se dejará enfriar sobre la superficie de mármol.

#### **b. Soldadura de la célula**

Antes de realizar el proceso de laminación, es importante realizar la soldadura de la célula, para posteriormente poder extraer energía de ella.

El primer paso a llevar a cabo es el soldado del *ribbon* a la célula. Para ello es importante tener el mayor cuidado posible ya que la célula es un elemento muy frágil. Principalmente se corta una tira de *ribbon* de longitud superior al bus para poder manejarla con facilidad. Para facilitar la soldadura, se va aplicando flux en el *ribbon* en pequeñas cantidades, evitando que pueda caer alguna gota sobre la célula, ya que afecta a la capa antireflectante.

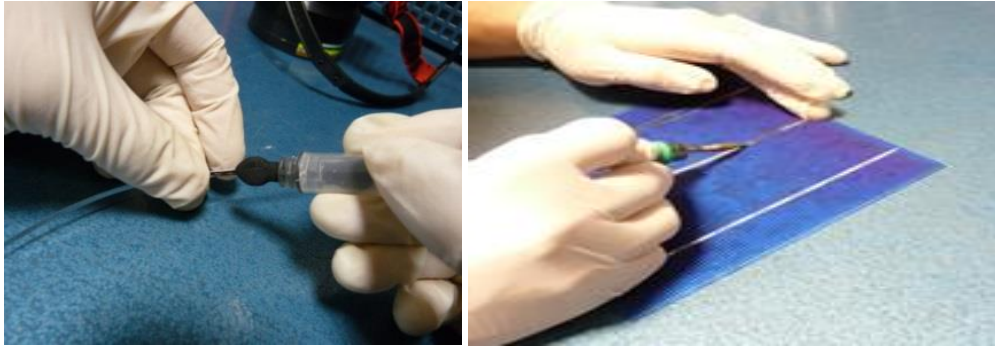


Figura 34: Soldadura de la parte superior de la célula

Durante la soldadura, se deberá colocar una máscara para protegerse de los posibles gases que deriven del soldado.

Existen varios factores a tener en cuenta durante el proceso:

- Asegurar que la tira de *ribbon* queda soldada a la célula.
- No ejercer una fuerte presión, evitando que la célula se agriete.
- Dejar un pequeño espacio entre el extremo del *ribbon* y el de la célula para evitar que se produzcan cortocircuitos con la parte posterior de la célula.

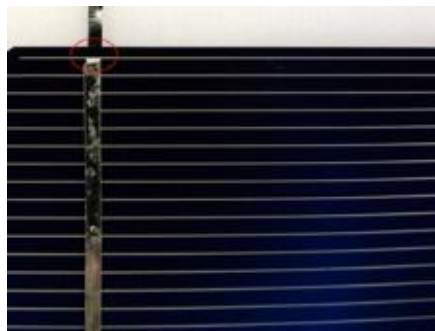
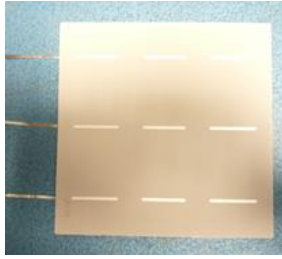


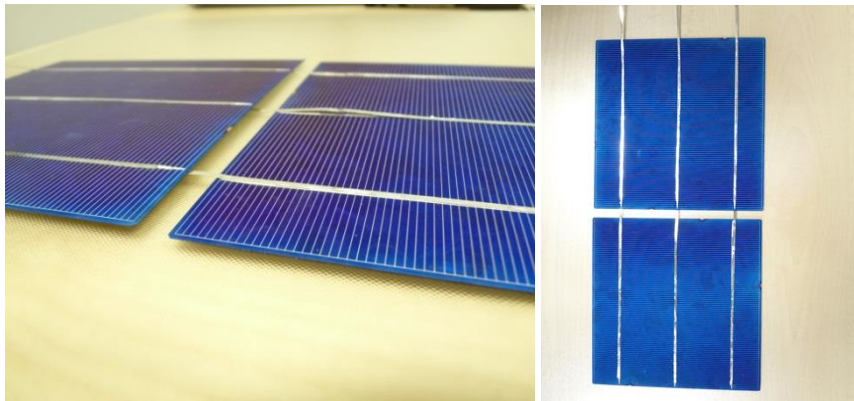
Figura 35: Extremo entre el ribbon y el extremo de la célula

La soldadura se debe realizar tanto por la cara superior como por la inferior de la célula. Además es importante que al realizar la soldadura del *ribbon* por la cara superior, queden excedentes de éste por un lado de la célula, mientras que al realizar la soldadura por la cara inferior, los excedentes queden por el lado contrario.



*Figura 36: Parte posterior de la célula*

Para finalizar con el proceso de soldadura, se deberán soldar los *ribbon* de cada cara, ya que cada uno es un polo de la célula. La técnica de soldado es la misma que en el caso anterior (aplicar flux y estañar). También se podrían extraer directamente los dos bordes del laminado sin la necesidad de soldar. En este caso, la resistencia serie del laminado sería inferior por tener menos soldaduras.



*Figura 37: Unión mediante ribbon de dos célula*



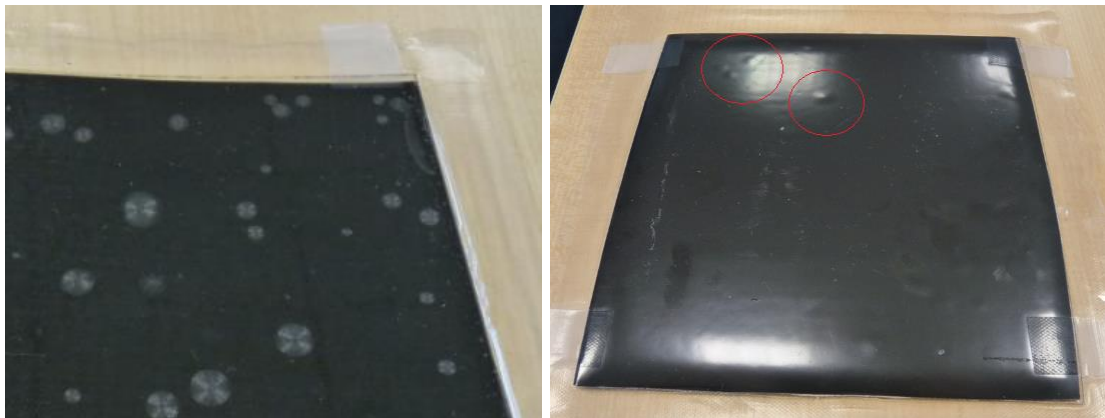
## 4. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

En el presente capítulo se describen las diferentes técnicas que se han llevado a cabo para caracterizar si el proceso de laminación ha sido el adecuado o no. Las técnicas que se describen a continuación son; la inspección visual, DSC, test de pelado, caracterización óptica y electroluminiscencia.

### 4.1. Inspección visual

Una vez hecha la laminación de una muestra, la primera e indispensable técnica de caracterización que se debe hacer es la inspección visual. En el caso de que los parámetros de laminación como la temperatura, el tiempo o el vacío no sean adecuados, a simple vista se observará que la laminación no ha sido la correcta.

Uno de los indicadores de una mala laminación es la aparición de burbujas o de estructuras estriadas del encapsulante. Las burbujas se deben a que el tiempo o la temperatura de laminación han sido o bien demasiado altos o demasiado bajos y pueden aparecer tanto en la parte frontal como en la posterior del módulo. Las estructuras estriadas en cambio, aparecen cuando el tiempo o la temperatura de laminación han sido demasiado altos.



(a) Estructuras estriadas en la parte frontal      (b) Burbujas en la parte posterior del módulo

Figura 38: Ejemplo de una mala laminación

Además de estos defectos, es necesario observar que el módulo haya quedado totalmente sellado después de la laminación y que no se haya producido ningún tipo de ruptura o grieta en las células ni en ninguno de los materiales.

## 4.2. Grado de curado del encapsulante

Para garantizar una buena laminación de un módulo fotovoltaico y por lo tanto, una larga vida útil del mismo es necesario que el grado de curado del encapsulante se encuentre entre el 65% - 90%. El proceso de curado es una reacción química que tiene lugar al incrementar la temperatura durante el proceso de laminación. Durante esta reacción, se forman enlaces químicos transversalmente entre las moléculas largas del EVA, las cuales antes de la reacción estaban unidas entre sí débilmente. Por lo tanto, los porcentajes del grado de curado significan el porcentaje de material en el que ha tenido lugar dicha reacción.

El grado de curado se puede relacionar con el contenido en gel, siendo este el porcentaje de masa insoluble de la muestra. Dado que en el presente TFG se ha utilizado EVA como encapsulante, a continuación se resumirán las especificaciones que debe cumplir para que el grado de curado sea aceptable.

El encapsulante EVA inicialmente es un termoplástico, pero se le añade un agente de curado llamado peróxido para que pueda tener lugar el curado. Aunque no existan requerimientos del grado de curado estandarizados, los fabricantes recomiendan un nivel de curado que varía desde el 60% hasta el 90% [6]. Es esencial superar el nivel mínimo de curado para garantizar una larga vida útil del módulo fotovoltaico. Con el fin de comprobar que el grado de curado es suficiente, es necesario realizar ensayos químicos del EVA una vez laminado (Extracción Soxhlet, DSC, etc.).

La forma tradicional de medir el grado de curado del encapsulante es utilizando el método primario (extracción Soxhlet). Las desventajas de este método son la necesidad del uso de sustancias tóxicas como el tolueno y la duración del ensayo, ya que se necesitan varios días para su realización. Para poder medir el grado de curado de una manera más rápida y sencilla, se utiliza el método secundario (DSC, etc.). Sin embargo, hay que tener en cuenta que el método secundario debe calibrarse con el método primario.

El método primario consiste en disolver el EVA en un disolvente, de manera que el EVA que está curado no se disuelve ya que es insoluble en cualquier disolvente. Por lo tanto, para calcular el grado de curado, se divide la cantidad de residuo insoluble entre la masa inicial. El método secundario (DSC) en cambio, consiste en calentar una muestra de EVA y una referencia a la misma velocidad, midiendo la diferencia del flujo de calor entre ambas. Para calcular el grado de curado en este caso, se mide la

diferencia entre las transiciones energéticas que sufren el encapsulante y la referencia. A continuación se describirá el método con más detalle.

#### 4.2.1. Differential Scanning Calorimetry (DSC)

El DSC (calorimetría diferencial de barrido) es un método secundario para analizar el grado de curado de un polímero, basado en una técnica de análisis térmico. Al ser un método secundario, para diferentes formulaciones de EVA debe de calibrarse con el método primario ya que este es más lento y universal. Mediante este ensayo se puede cuantificar las diferentes transiciones energéticas que sufre el encapsulante EVA. Para llevar a cabo el ensayo DSC, se ha utilizado como referencia la versión preliminar de la norma IEC 62788-1-6 © IEC 2016 [9].

Una vez hecha la laminación y dado que ha tenido lugar el curado del EVA, se lleva a cabo el ensayo de DSC. Para ello, se extraen muestras de 5 – 10 mg de EVA de distintas zonas de la muestra. Se utiliza para ello el material separado en el test de pelado.

Para la realización de los ensayos se utiliza un Calorímetro Diferencial de Barrido de la marca Mettler-Toledo, concretamente el modelo DSC823e. La máquina está dotada de dos crisoles de aluminio. En uno de ellos se coloca la muestra de EVA a medir y el otro en cambio se deja vacío, ya que sirve como referencia. Durante el análisis la muestra y la referencia se calientan de manera separada a través de elementos calefactores que son controlados de manera individual. Para conseguir que la temperatura en los dos crisoles aumente a la misma velocidad, será necesario aportar más calor en el crisol que contiene la muestra, ya que contiene un material “extra”. Debido a esto, el calefactor que calienta la muestra deberá suministrar más calor. Mediante el DSC, lo que se mide es esta diferencia de calor adicional que debe suministrarse. Por lo tanto, la diferencia de potencia requerida se representa en función de la temperatura del sistema, dando lugar a una gráfica típica de DSC.

El proceso se lleva a cabo bajo un flujo de nitrógeno para crear una atmósfera inerte y seca. El ensayo consiste en calentar desde temperatura ambiente (25 °C) hasta 250 °C a una velocidad constante de 10 °C/min.

Es importante que desde que se haya realizado la laminación hasta que se haga el ensayo DSC haya transcurrido el menor tiempo posible, a poder ser un periodo inferior a un día para que los resultados sean fiables, ya que con el paso del tiempo el peróxido que contiene el EVA se degrada. Por ello, desde la laminación hasta realizar

el análisis DSC, las muestras deben de almacenarse en ambientes secos, con una humedad relativa (RH) inferior al 50%, a temperatura ambiente y en oscuridad. Además toda persona que esté en contacto o manipule las muestras tiene que llevar guantes limpios para evitar contaminarla. A continuación se aprecia una curva típica DSC.

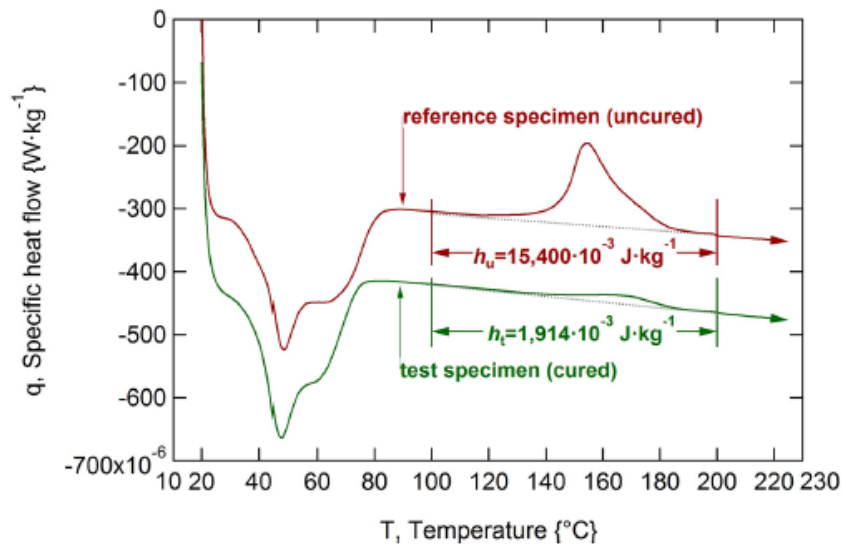


Figura 39: Curva típica DSC

Se puede observar como a lo largo del test tienen lugar varios picos de transición. Analizando la muestra de referencia, se aprecia que el curado del EVA ocurre en una cierta región (entre 100-200 °C) donde se puede apreciar un amplio pico exotérmico ya que tiene lugar una cesión de calor. Para el cálculo de la energía cedida, es necesario el cálculo del área del pico exotérmico, es decir, de la entalpía  $h$  (J/g).

La entalpía de este pico es proporcional a la cantidad de peróxido residual en el EVA que no está contribuyendo al proceso de curado durante la laminación. Este método se utiliza como comprobación rápida del estado de curado del EVA y se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$G = \frac{h_u - h_t}{h_u} \cdot 100 \quad (1)$$

Donde:

- $G$ : grado de curado para el método de entalpía [%]
- $h_u$ : entalpía específica de la referencia de EVA sin curar [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]
- $h_t$ : entalpía específica de la muestra curada [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]

#### 4.2.2. Relación entre el método primario y el DSC

En varios artículos [6], [10], [11] se ha estudiado la relación entre el método primario y el secundario. Se puede observar como el estado de curado mediante el método secundario (DSC), es inferior al del método primario (extracción Soxhleet). Esta desviación no es inesperada ya que cada método tiene diferentes principios: el método Soxhleet determina la cantidad de polímero curado y por lo tanto, insoluble. Sin embargo el DSC mide la cantidad de agente de curado que queda en el polímero después de la laminación y estima la cantidad de agente de curado que se ha consumido. Hay que tener en cuenta que cualquier correlación de este tipo puede estar influenciada por las características químicas del material y por la cantidad de peróxido inicial.

De la revisión bibliográfica se ha concluido que utilizando el método primario se consiguen resultados del grado de curado un 10% superiores a los calculados mediante el DSC. Por lo tanto, niveles de curado superiores al 55-60% utilizando el DSC suponen en realidad un grado de curado de 65-70%.

#### 4.3. Test de pelado

El test de pelado es un ensayo utilizado en la industria de módulos fotovoltaicos para medir la fuerza de adherencia (N) entre las diferentes capas de los módulos. Un módulo fotovoltaico es un sistema multicapa con diferentes interfaces que deben tener una buena adherencia entre ellas para prevenir la delaminación, posibles corrientes de fuga o trayectos de contaminantes. Por lo tanto, una buena adherencia entre las diferentes interfaces es esencial para garantizar una cierta fiabilidad del módulo.

Antes de realizar el test de pelado, es necesario preparar la muestra y llevar a cabo el proceso de laminación. A continuación, para llevar a cabo el test de pelado, se utiliza una máquina específica que aplica una fuerza sobre una de las pestañas con el objetivo de separar dos capas laminadas a una velocidad constante. El valor de la fuerza obtenido se utiliza para determinar si la unión entre los dos materiales es lo suficientemente fuerte o no.

Para llevar a cabo el test de pelado, se ha utilizado la norma ISO 813 [12], que determina la fuerza de adherencia entre materiales poliméricos unidos sobre un sustrato rígido.

#### 4.3.1. Principio de funcionamiento

Su principio de funcionamiento se puede apreciar en la Figura 40. La pestaña es una tira flexible de espesor  $h$  y anchura  $b$  situada en la parte trasera del módulo fotovoltaico, la cual es arrancada del sustrato en el que se desea medir la adhesión mediante la aplicación de una fuerza  $F$  en un ángulo determinado.

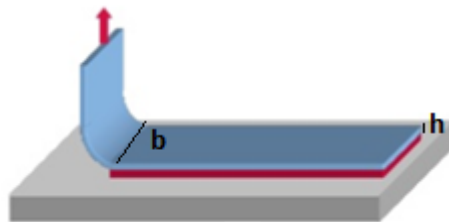
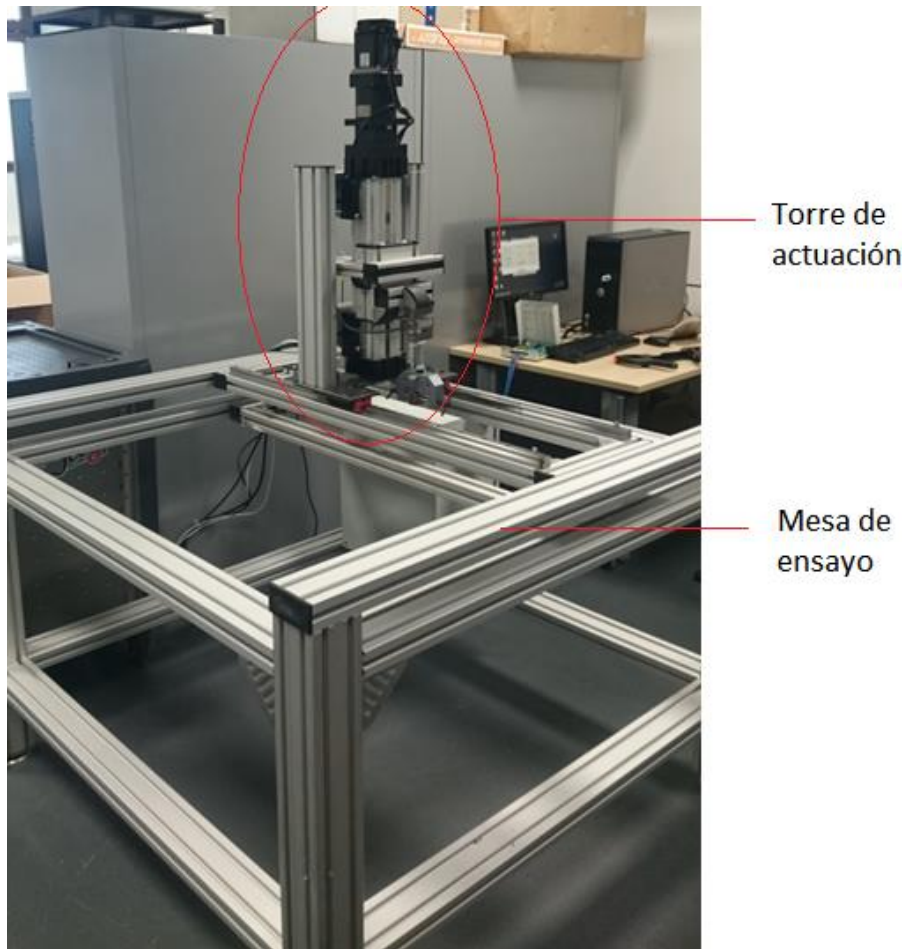


Figura 40: Ensayo de pelado a 90 grados

El ensayo de pelado que se ha realizado ha sido a  $90^\circ$ , al igual que en la Figura 40. Tal y como su nombre indica, el ángulo entre la superficie de la muestra y la dirección de la fuerza se mantiene a  $90^\circ$  a lo largo de todo el test.

#### 4.3.2. Máquina para la realización del test de pelado

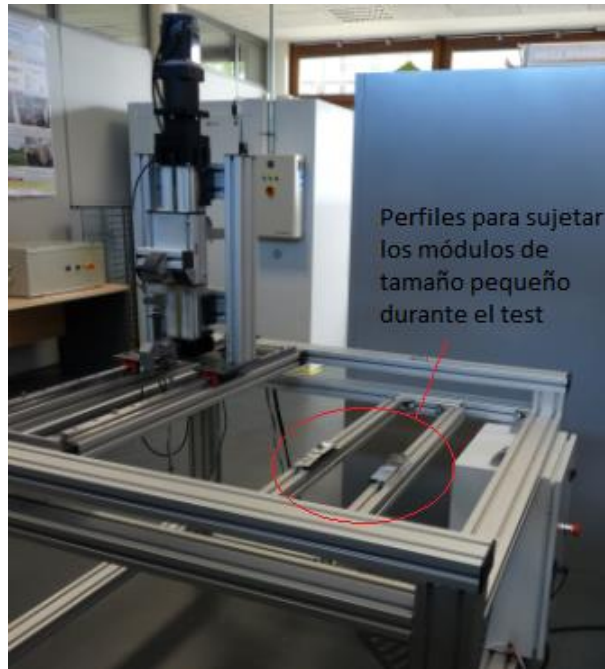
En el mercado existen diversas máquinas comerciales para la realización de ensayos de adherencia. En este caso CENER dispone de una máquina de ensayo de test de pelado a 90 grados de diseño propio. Está compuesta principalmente por dos partes: la torre de actuación y la mesa de ensayo como se aprecia en la Figura 41.



*Figura 41: Máquina de ensayo de pelado de CENER*

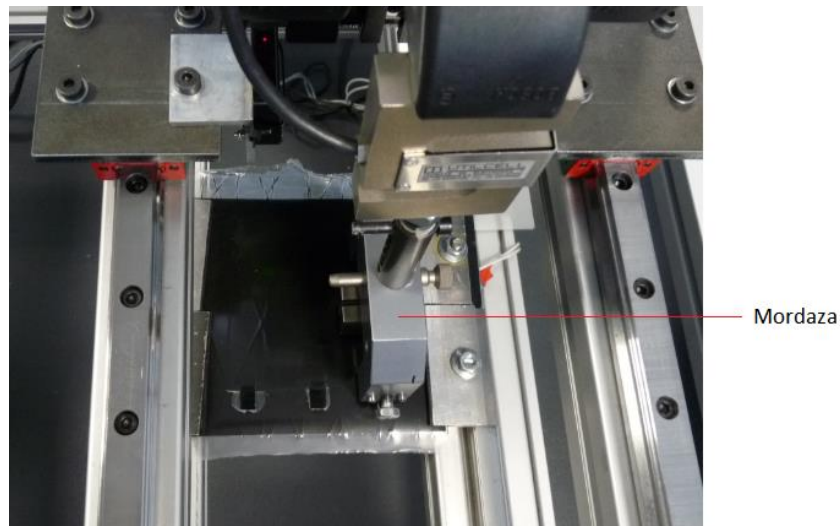
#### **4.3.3. Funcionamiento**

Antes de poner en marcha la máquina, se coloca el módulo sobre la estructura de soporte con la cubierta frontal mirando hacia el suelo sujeta a los perfiles horizontales que mejor convenga según sus dimensiones.



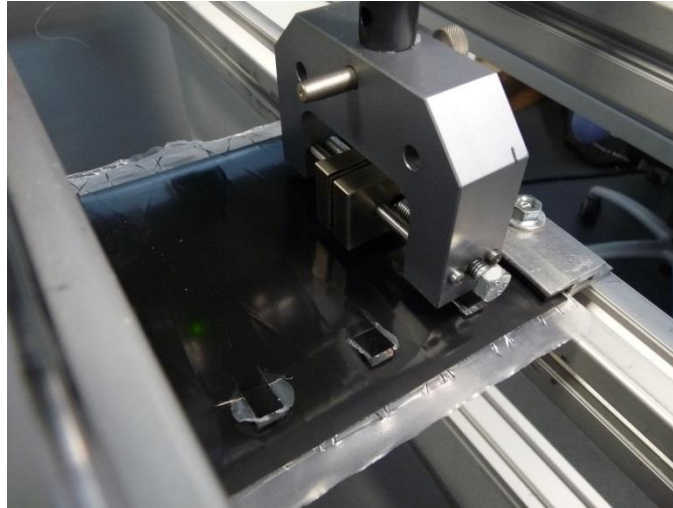
*Figura 42: Estructura de soporte del módulo*

A continuación, se coloca la torre de actuación encima de la muestra a ensayar y se agarra con la mordaza una de las pestañas preparadas en la parte posterior del módulo. Es importante que durante el ensayo la mordaza quede lo más próxima posible al módulo para formar un ángulo de 90 grados entre la pestaña y el plano del módulo.



*Figura 43: Vista superior de la posición de la muestra durante el test de pelado*





*Figura 44: Vista superior de la posición de la muestra durante el test de pelado*

Después, se procede a accionar la máquina a través del servomotor. La mordaza móvil va tirando de la pestaña verticalmente y a una velocidad constante como aparece en la Figura 45, lo que a su vez produce un movimiento horizontal de la torre a través del sistema de poleas para mantener el ángulo de 90 grados entre la pestaña y el plano del módulo que la contiene. La fuerza de adherencia se va midiendo mientras la mordaza móvil tira verticalmente de la muestra a ensayar, produciendo a su vez un movimiento horizontal de la probeta.



*Figura 45: Mordaza tirando de la pestaña verticalmente durante el test de pelado*

Hoy en día todavía no existe un valor estándar para el ensayo de pelado. Valores de adherencia de 75-100 N/cm son normales en el caso de Vidrio – EVA [13].

## 4.4. Técnicas ópticas

### 4.4.1. Transmitancia óptica

La transmitancia óptica es la fracción de luz que atraviesa un cuerpo. Cuando la luz incide sobre un cuerpo, parte de esa luz es absorbida por el mismo, otra parte es reflejada y la fracción restante es transmitida. En la siguiente figura se puede observar que  $I_0$  es la cantidad de luz que incide sobre el cuerpo e  $I_1$  la cantidad que lo atraviesa.

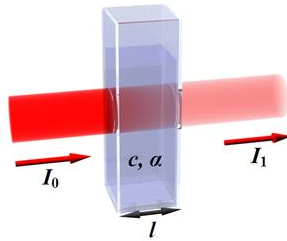


Figura 46: Transmitancia óptica

La transmitancia de un cuerpo se ha medido en este caso en el rango espectral de 300 nm – 1600 nm, en varios lugares del componente óptico y se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2)$$

Siendo:

- $I$ : Irradiancia transmitida a través de la muestra [ $W/(m^2 \cdot Hz)$ ]
- $I_0$ : Irradiancia incidente sobre la muestra [ $W/(m^2 \cdot Hz)$ ]

En el caso de sistemas fotovoltaicos es necesaria la medida de la transmitancia de la cubierta frontal ya que es la capa sobre la cual inciden los fotones del sol, influyendo directamente en la energía que generan los módulos fotovoltaicos. Por ello, es importante que el material utilizado tenga una buena transmitancia.

Para medir la transmitancia, se ha utilizado un sistema experimental formado por los siguientes componentes y cuyo esquema se aprecia en la Figura 47.

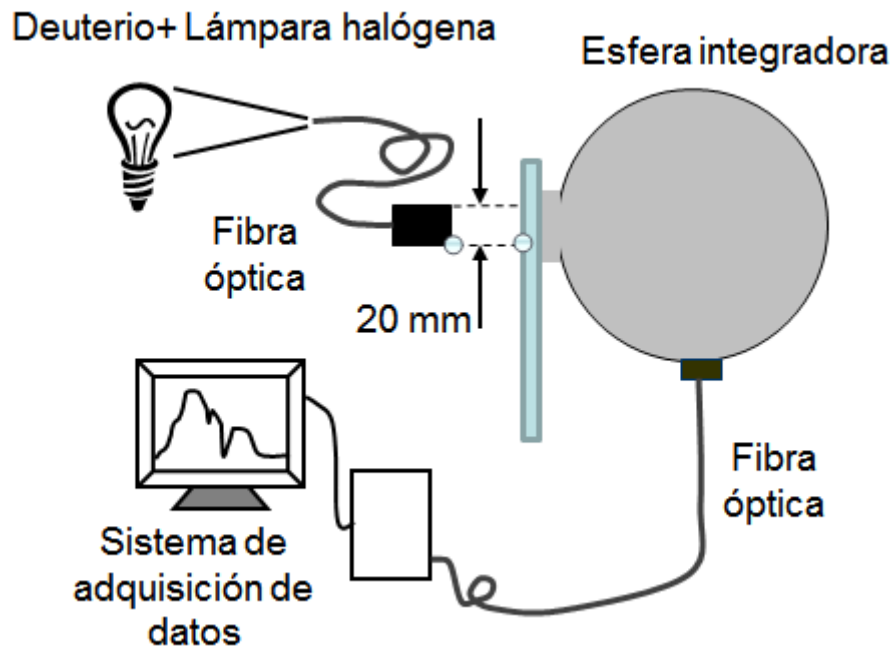


Figura 47: Sistema experimental para la medida de la transmitancia

#### 4.4.2. Índice de amarilleamiento (Yellowness Index, YI)

El índice de amarilleamiento es un dato de espectrometría adimensional que se utiliza para describir un cambio de color en una muestra. Es un parámetro relevante en la caracterización de los polímeros, ya que se relaciona con su degradación en el exterior debido a la influencia de la radiación ultravioleta del sol. Como referencia, el vidrio está caracterizado por un YI de aproximadamente 0.2, mientras que el YI del vidrio laminado con EVA varía entre 0.5 y 0.6.

Se calcula de la siguiente manera:

$$YI = \frac{C_x \cdot X - C_z \cdot Z}{Y} \cdot 100 \quad (3)$$

Siendo:

- $C_x = 1,3013$
- $C_z = 1,1498$
- X,Y,Z: Coeficientes triestímulos

Los coeficientes triestímulos se calculan de la siguiente manera:

$$X = k \int T[\lambda] S_{D65}[\lambda] \bar{x}[\lambda] d\lambda \quad (4)$$

$$Y = k \int T[\lambda] S_{D65}[\lambda] \bar{y}[\lambda] d\lambda \quad (5)$$

$$Z = k \int T[\lambda] S_{D65}[\lambda] \bar{z}[\lambda] d\lambda \quad (6)$$

Siendo:

- k: Factor de normalización
- T: Transmitancia de la muestra medida
- $\lambda$ : Longitud de onda de la luz
- $S_{D65}$ : Potencia relativa espectral del iluminante
- $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$ : Funciones de ajuste de color. Describen numéricamente la respuesta cromática de un observador estándar. (Tabuladas por el CIE)

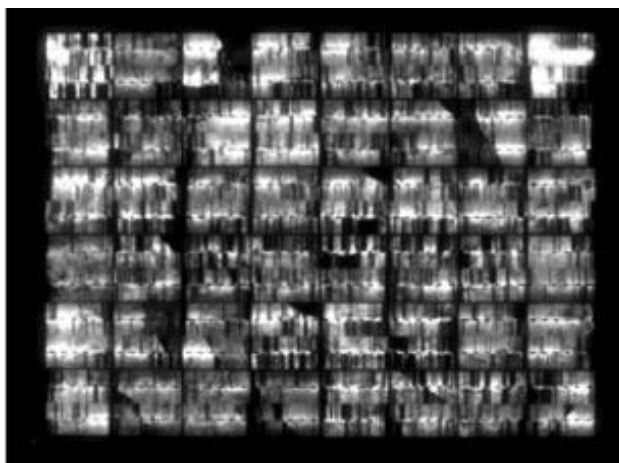
El factor de normalización se determina mediante:

$$k = \int S_{D65}[\lambda] \bar{y}[\lambda] d\lambda \quad (7)$$

#### 4.5. Electroluminiscencia

Las células fotovoltaicas transforman la radiación electromagnética emitida por el sol en energía eléctrica. Si se invierte el proceso, es decir, si se hace circular una corriente a través de la célula, ésta emite radiación [14]. Este fenómeno se denomina electroluminiscencia (EL). Los fotones que emite la célula tienen lugar en una longitud de onda de aproximadamente de 1100 nm. Para poder detectar este fenómeno se usan cámaras sensibles al infrarrojo (Si- CCDs, SWIR con InGaAs, etc.). Como la electroluminiscencia es una fuente de luz débil, es necesario un ambiente oscuro durante la medición.

En la siguiente figura aparece una imagen tomada mediante electroluminiscencia de un panel fotovoltaico. Como se puede apreciar, las zonas oscuras de las células son zonas dañadas que no están funcionando en correcto estado.



*Figura 48: Electroluminiscencia*

De esta manera, la medición de electroluminiscencia permite detectar cualquier fallo (microrroturas, contactos defectuosos, cortes eléctricos, contactos rotos, fragmentos de células rotas, etc.) de las células. Es una de las mejores técnicas para comprobar el estado de los paneles fotovoltaicos y está recibiendo cada vez mayor interés.

## 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este apartado se optimiza el proceso de laminación, variando para ello los parámetros de temperatura y tiempo, a fin de obtener una receta que proporcione unos valores de grado de curado, test de pelado y aspecto visual adecuados y que a su vez sea compatible con el uso del policarbonato, teniendo en cuenta que la temperatura máxima que soporta este material es de 145 °C según el fabricante. Por otro lado, se ha medido la transmitancia óptica de dicho material antes y después de laminarlo con una capa de EVA con el objetivo de investigar su degradación en campo.

Para comenzar, es importante tener en cuenta que se dispone de láminas de policarbonato de diferentes espesores (2 mm y 4 mm) ya que es un parámetro a tener en cuenta a la hora de la laminación porque puede influir en la transmisión de calor dentro del sándwich durante el proceso de laminación. Por ello, se ha desarrollado una receta específica para cada uno de estos espesores de policarbonato. Tal y como se ha explicado anteriormente, los nuevos materiales del módulo fotovoltaico a estudiar son el policarbonato y el entramado estructural, de manera que el sándwich completo será el siguiente:

policarbonato + EVA + Célula fotovoltaica + EVA + Entramado estructural + EVA + PPE.

En cuanto a la laminación de módulos fotovoltaicos, los fabricantes de EVA aconsejan un tiempo y una temperatura de laminación para su producto. Generalmente estas recetas son adecuadas para líneas de producción a gran escala, en las cuales su interés es invertir el menor tiempo posible para conseguir un mayor número de laminaciones. Por ello, suelen aconsejar temperaturas altas de laminación (~150 °C) y tiempos reducidos (~10 min) que son soportados por el vidrio. En el presente TFG se ha decidido disminuir la temperatura y aumentar el tiempo de laminación, debido a que la temperatura máxima que soporta el policarbonato no es tan elevada como la soportada por el vidrio.

A la hora de realizar las laminaciones, en primer lugar se han realizado laminaciones sencillas ya que es lo empleado en la industria para ajustar el proceso. Estas laminaciones se han realizado utilizando el siguiente sándwich, tal y como se aprecia en la Figura 49: policarbonato – EVA – EVA – PPE



Figura 49: Laminación sencilla

Una vez ajustado el proceso, se han añadido los materiales restantes, esto es, la célula y el entramado estructural, dando lugar al siguiente sándwich: policarbonato - EVA - Célula fotovoltaica - EVA - Entramado estructural - EVA – PPE que se muestra en la Figura 50.



Figura 50: Laminación completa

## 5.1. Laminaciones sencillas

Tal y como se ha comentado anteriormente, para ajustar el proceso no se han introducido inicialmente todas las capas del módulo final ya que no es necesario. En este apartado las laminaciones están formadas por policarbonato – EVA – EVA – PPE.

En estas laminaciones se ha variado la temperatura de laminación desde 115 °C hasta 140 °C y el tiempo de laminación desde 12,5 minutos hasta 30 minutos. Durante el proceso de laminación, la presión se ha mantenido constante al igual que aparece en el gráfico de la Figura 21. Una vez laminadas las muestras se han utilizado las técnicas de caracterización descritas en el Capítulo 4 para comprobar si la muestra cumple con las especificaciones deseadas.

### 5.1.1. Inspección visual

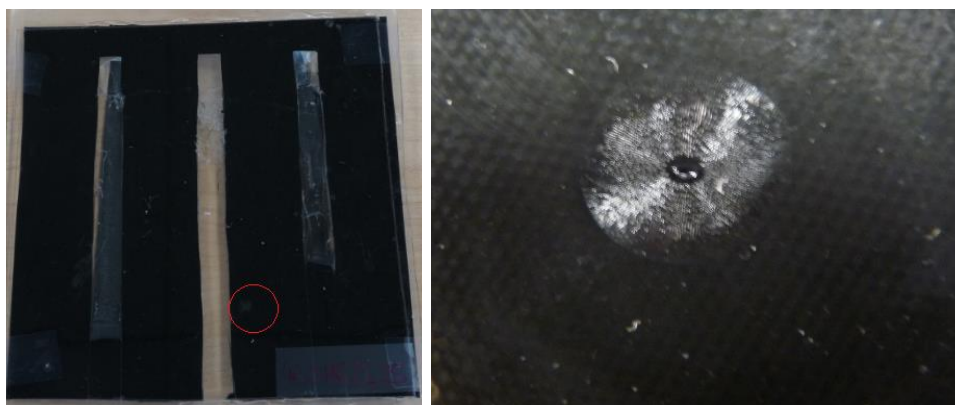
A todas las muestras laminadas, se les ha realizado una inspección visual. En algunos casos se han detectado pequeñas burbujas y estructuras estriadas, por lo que en estos casos se han optimizado los parámetros del proceso de laminación hasta obtener una laminación satisfactoria.

En el caso del policarbonato de 2 mm, se ha hecho un pequeño barrido del tiempo de laminación fijando una temperatura de 135 °C, obteniendo los siguientes resultados.

Código de la muestra	Receta de laminación		Inspección visual
	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	
46.0116.0_23	135	12,5	Pequeñas burbujas
46.0116.0_24	135	17,5	OK
46.0116.0_25	135	22,5	Estructuras estriadas

*Tabla 2: Inspección visual de muestras laminadas a la misma temperatura y diferentes tiempos*

Por ejemplo, en el caso de una muestra 46.0116.0\_25 se han apreciado varias estructuras estriadas tal y como aparece en la Figura 51.



(a) *Imagen completa de la muestra*

(b) *Detalle de la estructura estriada*

*Figura 51: Estructura estriada de la muestra 46.0116.0\_25*

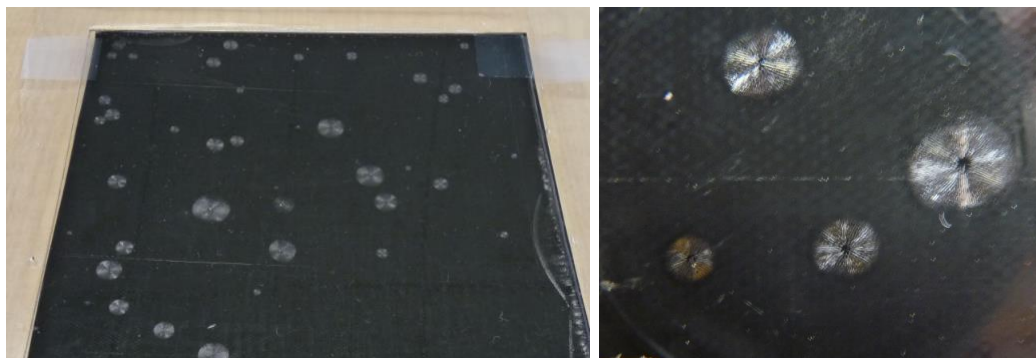
A la hora de hacer el test de pelado y extraer la tira en la que se encontraba una estructura estriada, se ha comprobado cómo efectivamente son estructuras formadas en el EVA. En la Figura 52 se puede apreciar este fenómeno en mayor detalle.





*Figura 52: Detalle de la estructura estriada de la muestra 46.0116.0\_25*

Como se aprecia en la Tabla 2, este fenómeno aparece al aumentar el tiempo de laminación. Para comprobar si sucede lo mismo aumentando la temperatura, se ha realizado una laminación a 140 °C durante 12,5 minutos y el resultado obtenido ha sido el siguiente:

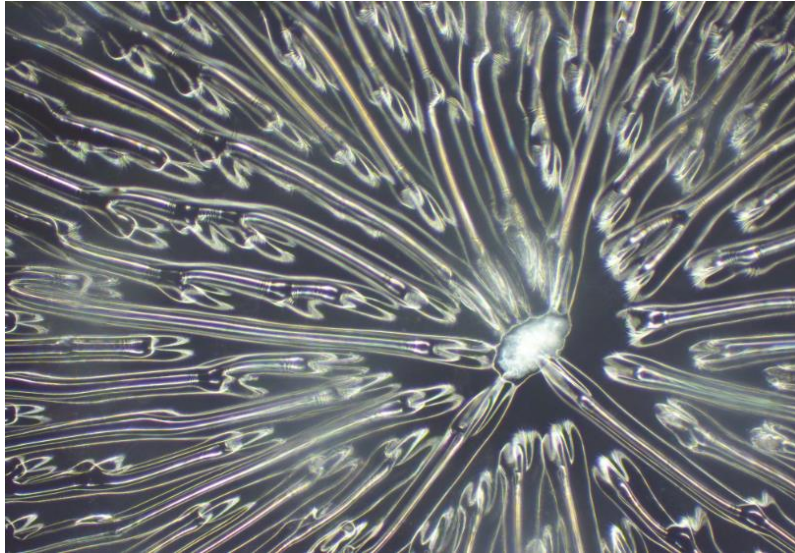


*(a) Imagen de la muestra completa*

*(b) Detalle de las estructuras estriadas*

*Figura 53: Estructuras estriadas en una muestra tras aumentar la temperatura de laminación*

Como se puede apreciar en la Figura 53, han vuelto a aparecer estructuras estriadas, y en este caso en mayor tamaño. Por lo tanto, efectivamente las estructuras estriadas del EVA aparecen cuando la temperatura de laminación o el tiempo de laminación son demasiado elevados. Para analizar con más detalle este fenómeno, se ha utilizado el microscopio óptico con el que se ha obtenido la siguiente imagen.



*Figura 54: Estructura estriada del EVA utilizando el microscopio*

Otro efecto que se ha detectado en todas las muestras ha sido el pandeo. El policarbonato es un material flexible que alcanza una temperatura alta durante el proceso de laminación. Cuando termina la laminación, se deja enfriar a temperatura ambiente por lo que sufre una deformación. Esta deformación puede deberse a que los distintos materiales que forman el módulo tengan diferentes coeficientes de deformación térmica. Se ha detectado una diferencia significativa en el pandeo que sufren las muestras en relación con su espesor, siendo mayor el pandeo en las muestras de menor espesor.

En la muestra de tamaño 165 mm x 165 mm utilizando el policarbonato de 2 mm de grosor, el pandeo aproximadamente es de 5 mm tal y como se aprecia en la Figura 55.



*Figura 55: Pandeo de una muestra de 165 mm x 165 mm y policarbonato de 2 mm de grosor*

Utilizando el policarbonato de 4 mm de espesor en cambio el pandeo es menor, siendo aproximadamente de 2-3 mm. A lo largo de este capítulo se estudiará también si el pandeo influye o no en la formación de grietas en la célula una vez laminada. Una

posibilidad para evitar que la muestra sufra este pandeo es utilizar el sistema de refrigeración de la propia laminadora, pero como ya se ha comentado anteriormente, la laminadora utilizada en el presente TFG no dispone de este suplemento.

### 5.1.2. DSC

El método DSC es una técnica utilizada para determinar el grado de curado del EVA. Para que el módulo laminado tenga una cierta fiabilidad, es necesario que el grado de curado del encapsulante sea superior al 65-70% e inferior al 90%. Como el DSC es un método secundario, para analizar el grado de curado es necesario calibrar los resultados con el método primario. Tras analizar varios estudios y tal y como se ha explicado en el Capítulo 4, valores de grado del curado superiores a 55% - 60% mediante el método DSC, suponen un grado de curado del 65% - 70% utilizando el método primario.

- Muestra de referencia

Para comenzar, se ha aplicado el método DSC a muestras de EVA virgen para posteriormente compararlo con las muestras laminadas. Se han tomado tres muestras de EVA virgen y se ha realizado la medida de las tres para obtener el valor de referencia necesario para calcular el grado de curado mediante la fórmula (1).

A continuación se muestran las gráficas típicas del ensayo de DSC (flujo de calor específico (W/g) frente a la temperatura (°C)) de las tres muestras de EVA virgen. Dado que es el mismo tipo de EVA, las tres gráficas son prácticamente iguales.

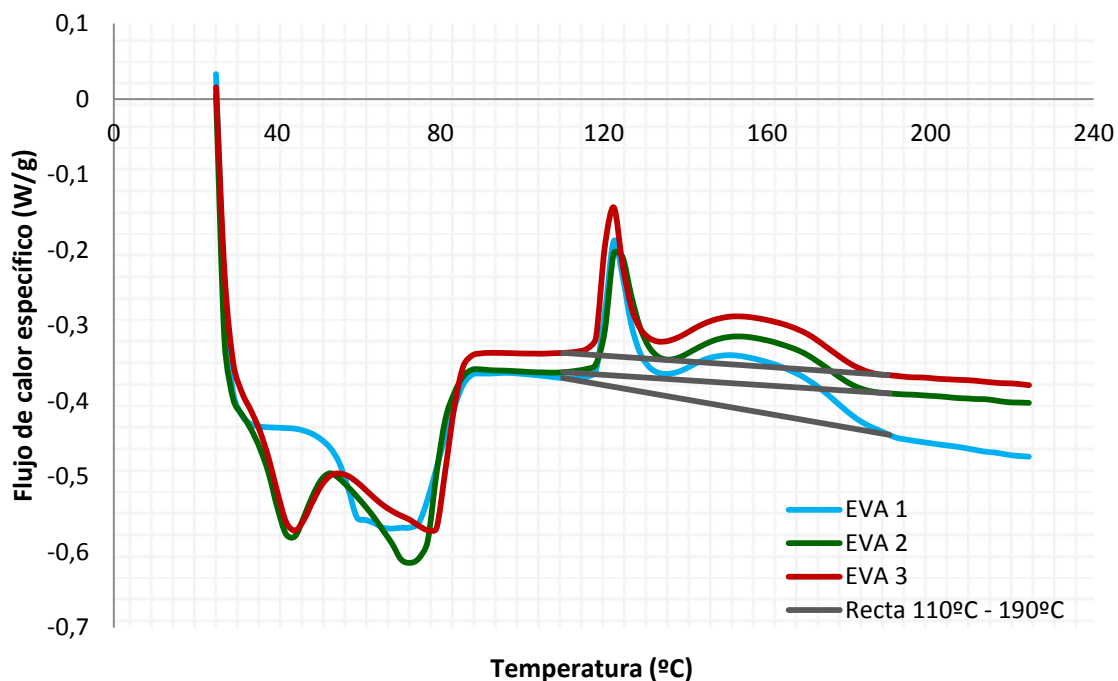


Figura 56: Curvas típicas DSC de tres especímenes distintos de EVA virgen

El EVA es un material polimérico cuyo proceso de curado comienza una vez que se alcanza una temperatura mínima o umbral, lo que se traduce en una cesión de calor dando lugar a una reacción exotérmica. Analizando las tres gráficas se observa que esta reacción tiene lugar en el rango de temperaturas entre 110 °C – 190 °C aproximadamente. Por lo tanto, para calcular la energía cedida se ha calculado la integral bajo la curva en ese tramo, es decir, la entalpía  $h$  (J/g).

Muestra	$h$ (J/g)
EVA 1	19,1
EVA 2	16,8
EVA 3	17,5
<b>EVA promedio</b>	<b>17,8</b>

Tabla 3: Entalpía de las diferentes muestras de EVA virgen

Por otro lado, cabe destacar que una vez que el EVA ha polimerizado a una temperatura determinada, aumentando el tiempo no se consigue un grado de curado superior. Esto queda muy bien reflejado en las siguientes gráficas isotermas, en las que una porción de EVA se calienta a la temperatura nominal, mientras se mide el flujo de calor específico en función del tiempo. Este análisis se ha realizado calentando tres

muestras distintas de EVA virgen a temperaturas de 130 °C, 135 °C y 140 °C durante una hora, y los resultados se muestran en la siguiente figura.

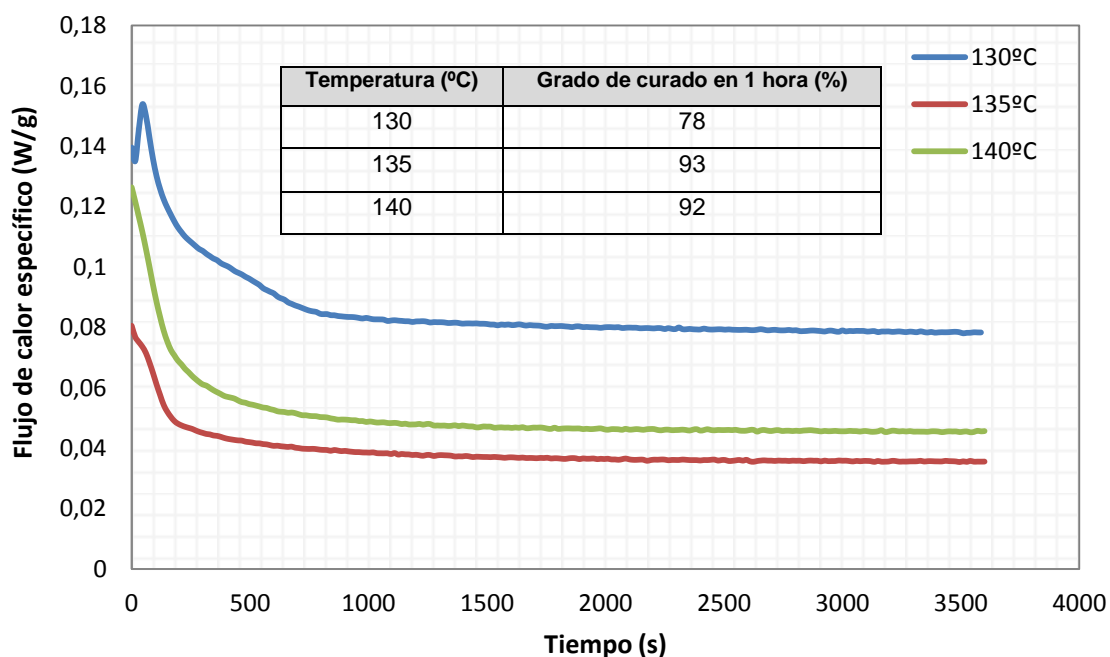


Figura 57: Isotermas de tres especímenes de EVA a diferentes temperaturas y su grado de curado

Se puede concluir que para obtener un determinado grado de curado no es necesario prolongar mucho el tiempo de laminación, ya que una vez transcurrido cierto tiempo se estabiliza. Por otro lado, se ha comprobado en la tabla que para una temperatura determinada, existe un máximo grado de curado. Por ambas razones, no es conveniente aumentar el tiempo de laminación hasta aproximadamente una hora para lograr grados de curado elevados.

- Muestras de EVA laminado

Una vez que se tiene el valor de referencia, se han analizado varias muestras de EVA de las diferentes laminaciones realizadas, en las que se ha variado la temperatura desde 115 °C hasta 140 °C y el tiempo de laminación desde 12,5 min hasta 30 min. Dado que es importante que transcurra el menor tiempo posible entre la laminación y el análisis DSC, en todas las muestras analizadas el tiempo transcurrido ha sido inferior a 24 horas. Los resultados obtenidos han sido los siguientes:

- Policarbonato de 2 mm

Código de la muestra	Receta de laminación		G (%)
	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	
46.0116.0_16	115	20,5	38
46.0116.0_23	135	12,5	60
46.0116.0_24	135	17,5	72
46.0116.0_25	135	22,5	80
46.0116.0_45	131	17,5	58

*Tabla 4: Grado de curado del EVA para diferentes recetas de laminación utilizando el policarbonato de 2 mm de grosor*

- Policarbonato de 4 mm

Código de la muestra	Receta de laminación		G (%)
	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	
46.0116.0_15	125	12,5	44
46.0116.0_26	140	12,5	69

*Tabla 5: Grado de curado del EVA para diferentes recetas de laminación utilizando el policarbonato de 4 mm de grosor*

Analizando los resultados, queda claro que las primeras laminaciones (46.0116.0\_15,16) no son de buena calidad, ya que aunque visualmente sean correctas, su grado de curado es inferior al mínimo necesario de 55%. Esto significa que el tiempo o la temperatura han sido demasiado bajos durante el proceso de laminación. Además se aprecia que en la mayoría de los casos aumentando tanto el tiempo como la temperatura, el grado de curado aumenta tal y como se esperaba.

En la siguiente gráfica se puede apreciar claramente la influencia del tiempo en el grado de curado de una muestra a una misma temperatura. En el rango de tiempos analizados en la figura, la variación del grado de curado con el tiempo es aproximadamente lineal, aumentando este un 20% (absoluto) en un aumento de 10 minutos de laminación. Por lo tanto, la relación del grado de curado con el tiempo es de 2%/min.

Además se aprecia la diferencia del grado de curado en función de la temperatura. Para un mismo tiempo de 17,5 minutos, laminando una muestra a 131 °C, se obtiene un estado de curado del 58% mientras que a 135 °C el grado de curado es del 72%. Por lo tanto, tras una variación de la temperatura de 4 °C, el estado de curado varía un 14%, lo que supone una variación de 3,5%/°C.

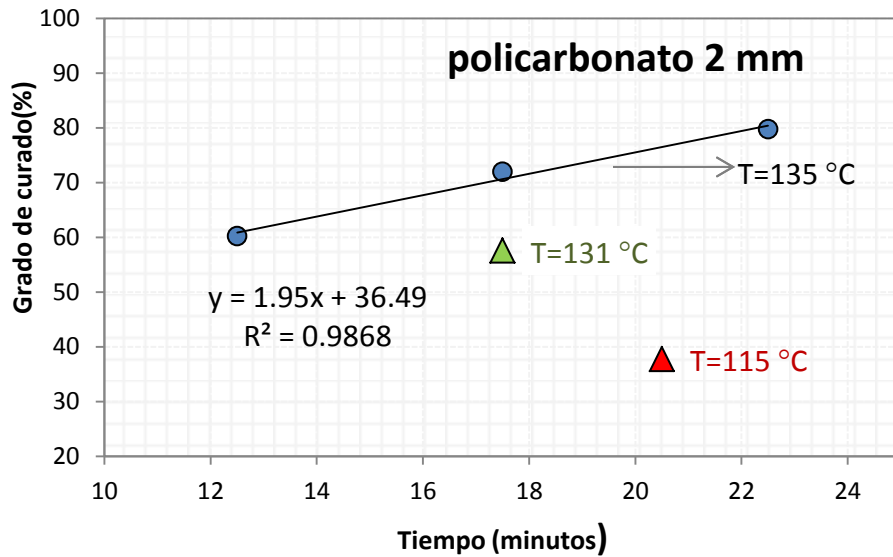


Figura 58: Grado de curado del EVA a 135°C y utilizando el policarbonato de 2 mm de grosor para distintos tiempos

Lo mismo ocurre en el sándwich cuyo policarbonato es de 4mm. En este caso, se puede ver el efecto de la temperatura para un tiempo de laminación determinado. En este caso, aumentando la temperatura 15 °C, el grado de curado aumenta un 25%.

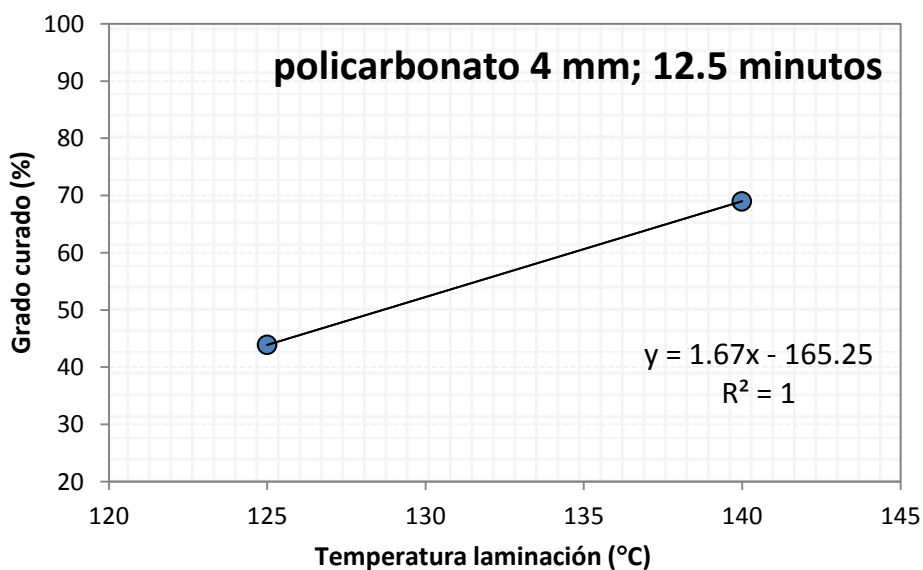


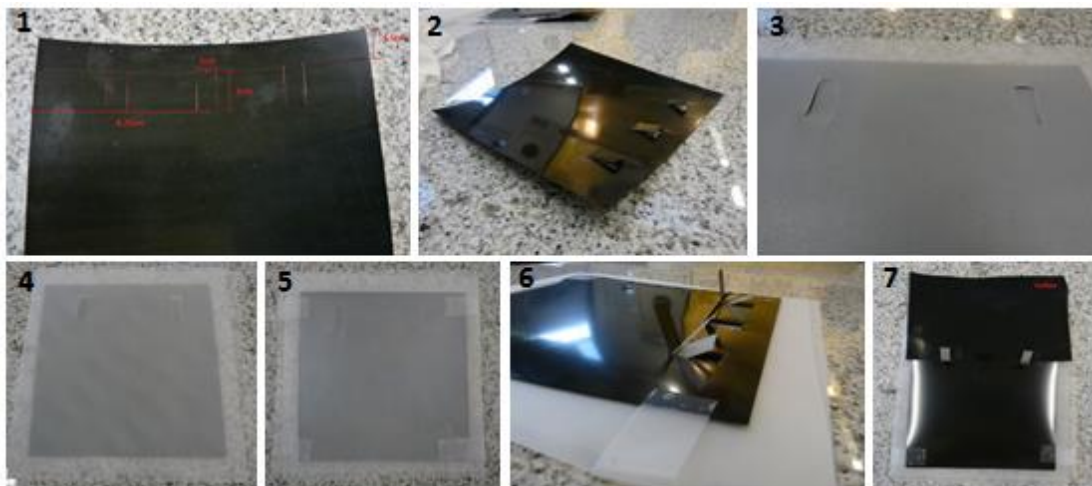
Figura 59: Grado de curado del EVA a 17,5 min y utilizando el policarbonato de 4 mm de grosor

Por lo tanto, basándonos en estos resultados se ha llegado a la conclusión de que hay una relación entre el grado de curado y el tiempo de 2%/min y el grado de curado y la temperatura de 3,5%/°C. Analizando los resultados obtenidos del grado de curado, se ha elegido la receta óptima para cada uno de los espesores de policarbonato. En el caso del policarbonato 2 mm, se ha elegido como receta óptima 135 °C y 17,5 minutos. Para el policarbonato de 4 mm en cambio, su receta óptima será 140 °C y 12,5 minutos.

### 5.1.3. Test de pelado

Como ya se ha explicado anteriormente, el test de pelado es una técnica utilizada para caracterizar la adhesión entre los diferentes materiales que conforman un módulo fotovoltaico y es necesaria la preparación de la muestra sobre la cual se vaya a realizar el test de pelado. Para ello, se recortan diferentes pestañas entre las interfaces de las cuales se desea medir la fuerza de adherencia. En todos los casos se han recortado tres pestañas con el objetivo de medir la adherencia entre distintas interfaces y además observar si los resultados de adherencia son repetitivos a lo largo del módulo.

Para poder entender mejor como se prepara la muestra, en la siguiente secuencia de imágenes aparece un ejemplo. En este caso el sándwich está formado por: policarbonato + EVA + EVA +PPE con 3 pestañas (la central sirve para medir la adherencia EVA – PPE y las esquinas para medir la adherencia policarbonato – EVA).



*Figura 60: Preparación de la muestra para el test de pelado*

Pasos:



1. Se marcan con un bolígrafo 3 pestañas de 1cm x 2 cm centradas en la lámina de PPE.
2. Se recortan utilizando un cúter.
3. Se recortan en la primera capa de EVA las dos pestañas de los laterales, ya que la pestaña del centro ya está preparada para medir la adherencia PPE-EVA.
4. Se recortan en la segunda capa de EVA las dos pestañas de los laterales.
5. Se coloca la lámina de policarbonato y se cierra el sándwich.
6. Se le da la vuelta al sándwich y se extraen las pestañas recortadas.
7. Se añade una lámina de teflón entre las capas de las cuales se desea medir la adherencia ya que al ser un material aislante térmico, evita la unión de los distintos materiales. En la siguiente figura se puede analizar esto con más detalle.



*Figura 61: Muestra con la lámina de teflón antes de la laminación*

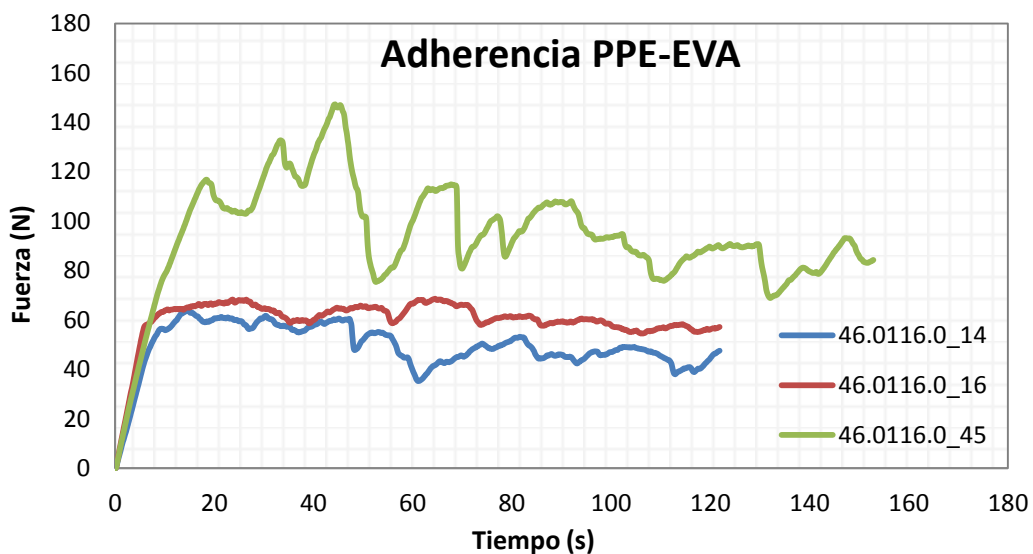
Los pasos a tener en cuenta para preparar la muestra son los mismos en todos los sándwiches aunque estén formados por diferentes materiales. Lo único que hay que tener en cuenta es colocar las pestañas entre las capas que se desea medir la adherencia.

Durante el test de pelado, al aplicar la fuerza sobre la muestra a lo largo de su longitud, se produce su pandeo. Dado que los materiales utilizados en este apartado son ligeramente flexibles, no se ha producido ningún tipo de rotura. En el caso del vidrio en cambio, al ser un material rígido en muchos casos se produce su ruptura al

realizar el test de pelado. Como el sándwich está formado por policarbonato + EVA + EVA + PPE, se ha medido la adherencia de dos interfaces: policarbonato – EVA y EVA – PPE. A continuación se presentan los resultados obtenidos para este sándwich, utilizando diferentes recetas de laminación presentadas anteriormente en función del espesor del policarbonato.

- Policarbonato de 2 mm

Se han laminado varias muestras utilizando diferentes recetas de laminación a fin de estudiar la influencia del tiempo y la temperatura sobre la adherencia de los materiales. Las muestras se han preparado con tres pestañas, dos de ellas para medir la adherencia policarbonato – EVA y una para medir la adherencia PPE – EVA. En la siguiente gráfica se puede apreciar el valor de adherencia PPE – EVA de cada muestra en función del tiempo obtenido durante el test de pelado.



*Figura 62: Fuerza de adherencia PPE-EVA en función del tiempo*

En el caso de la adherencia policarbonato – EVA, como se tienen dos valores de cada muestra, se ha realizado el promedio de ambas, obteniendo los siguientes resultados.

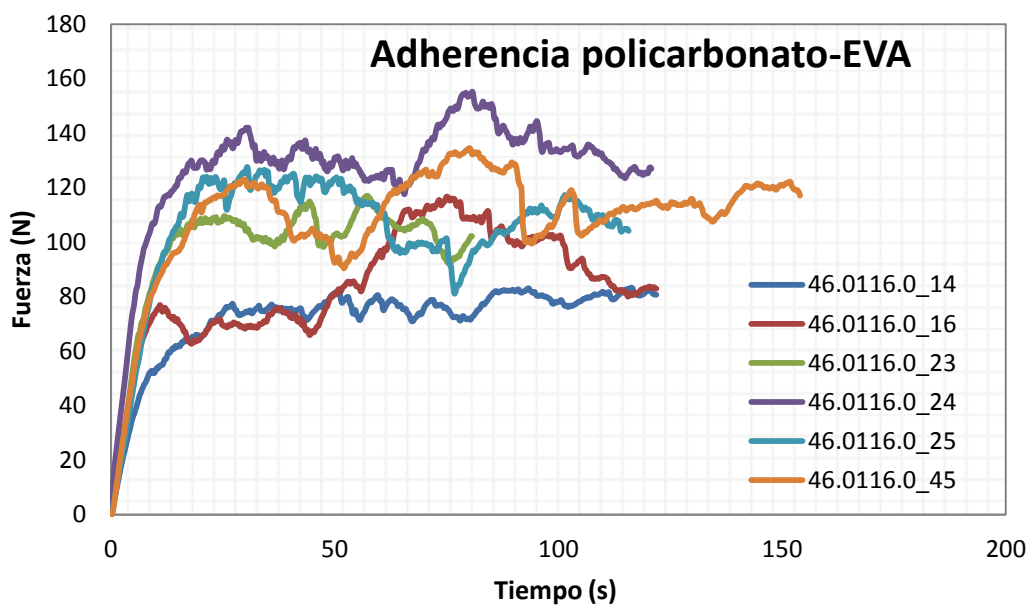


Figura 63: Fuerza de adherencia policarbonato -EVA en función del tiempo

En las gráficas se puede apreciar que la fuerza a lo largo del tiempo es variable y se estabiliza en la mayoría de los casos en torno a un valor.

Para calcular la fuerza promedio que es necesaria para separar los materiales, se ha elegido de manera crítica el rango de valores en los que la fuerza es aproximadamente estable y se ha tenido en cuenta que durante el test no haya sucedido ningún tipo de fallo (ruptura de la pestaña, etc.). A continuación se presentan los resultados del test de pelado obtenidos para cada receta utilizando el policarbonato de 2 mm de espesor.

Código de la muestra	Receta de laminación		Fuerza promedio (N)	
	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	PC – EVA	PPE – EVA
46.0116.0_14	115	20,5	75	51
46.0116.0_16	115	30	88	62
46.0116.0_23	135	12,5	104	-
46.0116.0_24	135	17,5	133	-
46.0116.0_25	135	22,5	111	-
46.0116.0_45	131	17,5	114	98

Tabla 6: Medidas del test de pelado utilizando diferentes recetas de laminado

Analizando los resultados se puede observar claramente que aumentando tanto la temperatura como el tiempo de laminación, la fuerza de adherencia entre los diferentes materiales aumenta en la mayoría de los casos.

La adherencia entre PPE – EVA, únicamente se ha podido medir en tres muestras ya que en las demás el EVA estaba muy adherido al PPE y no ha sido posible conseguir una medida. Como conclusión se obtiene que a temperaturas menores, es posible separar estas capas, mientras que a temperaturas altas no. Por lo tanto, a mayor temperatura y tiempo la fuerza de adhesión entre las diferentes interfaces del módulo es mayor.

Comparando la fuerza necesaria para separar las diferentes interfaces, se aprecia claramente que se tiene una mayor adherencia entre policarbonato – EVA que entre PPE – EVA. Comparando estos resultados con los del vidrio, en los que la adherencia Vidrio – EVA suele ser de en torno a 70 N – 100 N, se aprecia cómo los valores de adherencia obtenidos entre policarbonato – EVA están en torno a los mismos valores, concretamente entre 75 N – 115 N. Por lo tanto, los valores de adherencia obtenidos entre policarbonato – EVA cumplen con las especificaciones. En el caso de la adherencia entre PPE – EVA en cambio, no se tienen valores de referencia por lo que no se pueden comparar. De todas maneras, las fuerzas obtenidas están en torno a 50 N – 100 N por lo que se asume que son valores aceptables.

- Policarbonato de 4mm

De la misma manera que se ha medido la adherencia en el sándwich con el policarbonato de 2 mm, se ha realizado con el policarbonato de 4 mm. Para ello, se han laminado dos muestras utilizando diferentes recetas que aparecen a continuación.

Código de la muestra	Receta de laminación		Fuerza promedio (N)	
	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	PC – EVA	PPE – EVA
46.0116.0_15	125	12,5	52	79
46.0116.0_26	140	12,5	127	120

*Tabla 7: Medidas del test de pelado para diferentes recetas de laminado*

Los resultados son semejantes a los presentados anteriormente para el caso del policarbonato de 2 mm. Se aprecia que al incrementar la temperatura o el tiempo, los valores de adherencia aumentan excepto la adherencia PPE – EVA de la muestra 46.0116.0\_17. Esto puede deberse a que al realizar la medida de adherencia PPE – EVA en la muestra 46.0116.0\_15, el EVA empieza a despegarse del policarbonato, por lo que está influyendo en la medida añadiendo una fuerza extra que en realidad no tiene que ver con la adherencia PPE – EVA.

#### 5.1.4. Caracterización óptica

En este apartado se ha caracterizado la transmitancia óptica (T) y el índice de amarilleamiento (YI) del policarbonato antes y después de laminarlo con EVA. Además, para estudiar la degradación en campo se ha realizado un test de radiación ultravioleta (UV).

##### 5.1.4.1. Transmitancia, YI

➤ **Policarbonato**

En primer lugar y antes de realizar ninguna laminación, se ha medido la transmitancia de los diferentes espesores de las láminas de policarbonato, ya que es un parámetro importante a tener en cuenta debido a que influye directamente en el rendimiento de los módulos fotovoltaicos. Los resultados de la medida de la transmitancia promediada para los distintos rangos de longitudes de onda para las muestras de policarbonato y vidrio se pueden apreciar en la Tabla 8.

	<b>PC 2 mm</b>	<b>PC 4 mm</b>	<b>Vidrio</b>
T promedio 385 -1600 nm	87,4%	84,9%	92,4%
T promedio 385 – 800 nm	86,4%	83,9%	92,7%
T promedio 800-1600 nm	87,9%	85,4%	92,3%
YI	0,88	0,63	0,38

*Tabla 8: Transmitancia promedio del policarbonato y el vidrio*

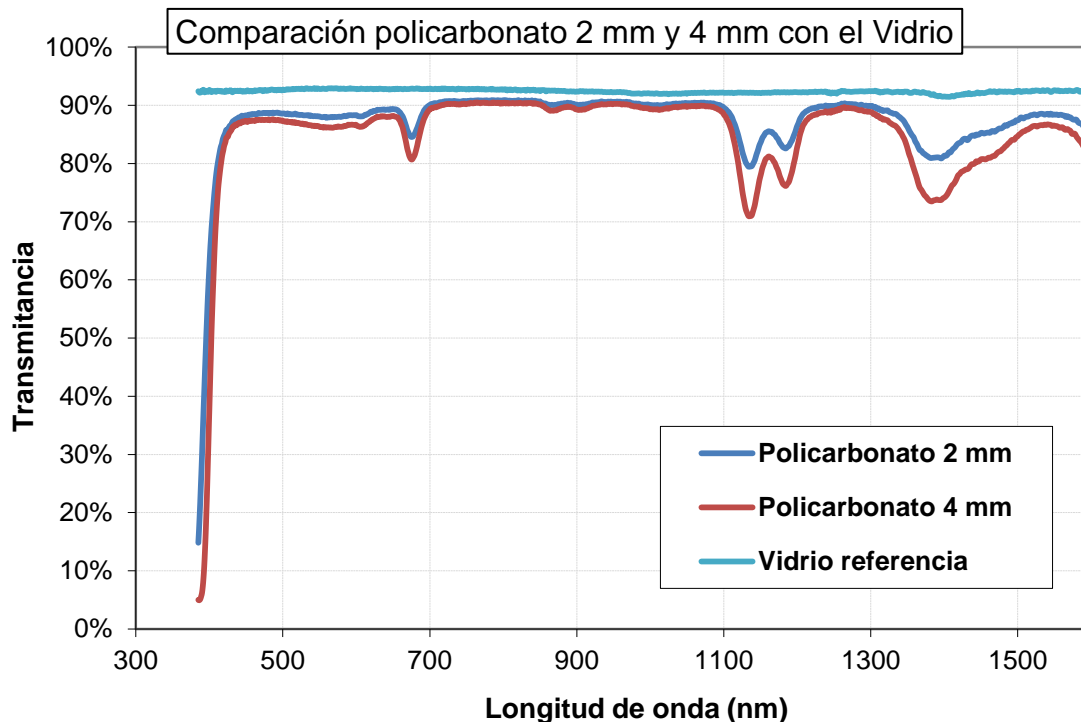


Figura 64: Comparación de la transmitancia espectral de los distintos espesores de policarbonato y el vidrio

Debido a la baja intensidad de la luz recibida por el detector desde 300 nm hasta 385 nm, los datos de transmitancia medidos en esta zona espectral son erróneos, por lo que han sido eliminados del análisis.

Analizando los datos se puede apreciar que la transmitancia del policarbonato 4mm es algo inferior a la del policarbonato de 2 mm, esto se debe a que al ser un material de mayor espesor, absorbe una pequeña fracción (~2,5%) más de la luz que incide sobre él. Por otro lado, se han comparado ambos resultados con la transmitancia de un vidrio templado obteniendo como resultado una gran diferencia entre ambos materiales. La transmitancia óptica del vidrio es aproximadamente un 5% superior a la del policarbonato de 2 mm y un 7,5% a la del policarbonato de 4 mm. Esto supone una gran desventaja para el policarbonato, ya que la diferencia entre ambos materiales es bastante notoria, lo que se traduce directamente en pérdidas.

➤ **Policarbonato + EVA**

Una vez comparados ambos materiales, se ha medido la transmitancia del policarbonato una vez laminado con EVA, ya que son las dos capas situadas antes de la célula y por lo tanto, las que influyen en la cantidad de luz que llega a las células fotovoltaicas.

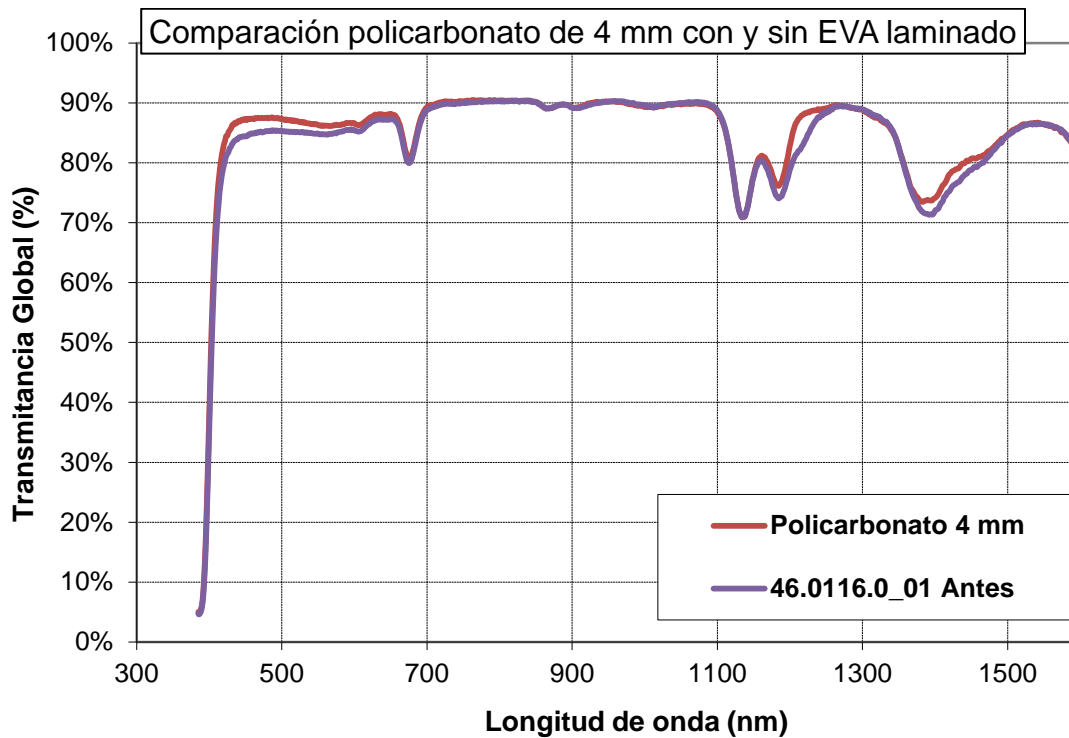


Figura 65: Comparación de la transmitancia espectral del policarbonato 4mm con y sin EVA laminado

Analizando la gráfica, se verifica que la transmitancia óptica después de laminar el policarbonato con EVA decrece. Esta bajada tiene lugar en unas longitudes de onda concretas que se corresponden con la absorción del EVA.

➤ **Policarbonato + EVA + EVA + PPE**

El siguiente paso ha sido introducir más materiales además del EVA. Se ha realizado la laminación de un sándwich formado por policarbonato + EVA + EVA + PPE.

Al ser el PPE un material opaco, no es posible medir la transmitancia a través de él, por lo que se ha recortado un pequeño cuadrado de 30 mm x 30 mm en uno de sus laterales para poder obtener la medida de transmitancia.

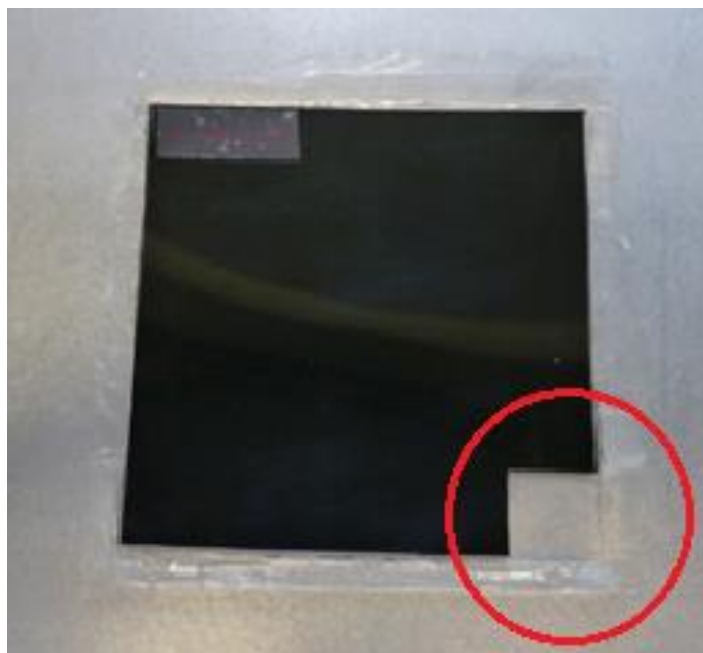


Figura 66: Recuadro para medir la transmitancia

Se han realizado tres laminaciones con diferentes recetas y se han medido sus características ópticas.

Código de la muestra	Receta de laminación	
	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
46.0116.0_07	125	12,5
46.0116.0_08	120	20,5
46.0116.0_09	115	20,5

Tabla 9: Recetas de laminación para diferentes muestras

A continuación se muestran los resultados comparando estas muestras con las del policarbonato de 2mm antes de su laminación.

	PC 2 mm	46.0116.0_07	46.0116.0_08	46.0116.0_09
T promedio 385-1600 nm	87,4%	86,2 %	86,0 %	85,8 %
T promedio 385-800 nm	86,4%	85,3 %	85,0 %	84,8 %
T promedio 800-1600 nm	87,9%	86,7 %	86,5 %	86,4 %
YI	0,88	2,5	2,59	2,51

Tabla 10: Parámetros ópticos de diferentes muestras de policarbonato de 2 mm



La transmitancia entre las diferentes muestras es similar y en todos los casos inferior a la de la lámina de policarbonato solo. El índice de amarilleamiento en cambio, aumenta en gran medida tras el proceso de laminación. Comparando el YI del vidrio laminado con EVA que tiene un valor en torno a 0,5-0,6 con el policarbonato laminado con EVA (~2.5) hay una gran diferencia.

#### 5.1.4.2. Influencia de la radiación UV

La radiación ultravioleta es uno de los factores que afecta a la vida útil de los módulos fotovoltaicos expuestos en campo. A lo largo de los años, los módulos están expuestos a elevados índices de radiación ultravioleta. Para ver el modo en el que afecta la radiación ultravioleta al policarbonato, se han sometido las muestras a una o varias dosis de radiación ultravioleta.

En primer lugar, se ha sometido la muestra 46.0116.0\_01 a una doble dosis de radiación UV, cada una de ellas aproximadamente de 30 kWh/m<sup>2</sup> (94% de UVA y 6% de UVB). Después de la dosis recibida se ha medido la transmitancia y los resultados que se han obtenido son los siguientes:

	46.0116.0_01 Antes	46.0116.0_01 Tras 30 kWh/m <sup>2</sup> UV	Variación Tras 30 kWh/m <sup>2</sup> UV	46.0116.0_01 Tras 58 kWh/m <sup>2</sup> UV	Variación Tras 58 kWh/m <sup>2</sup> UV
T promedio 385-1600 nm	84,1 %	84,3 %	0,2 %	83,9 %	-0,2 %
T promedio 385 – 800 nm	82,6 %	82,6%	0,0 %	82,2 %	-0,4%
T promedio 800-1600 nm	84,9 %	85,1 %	0,2 %	84,8 %	-0,1 %
YI	2,38	3,41	1,03	4,20	1,82

Tabla 11: Parámetros ópticos tras varias dosis de radiación UV

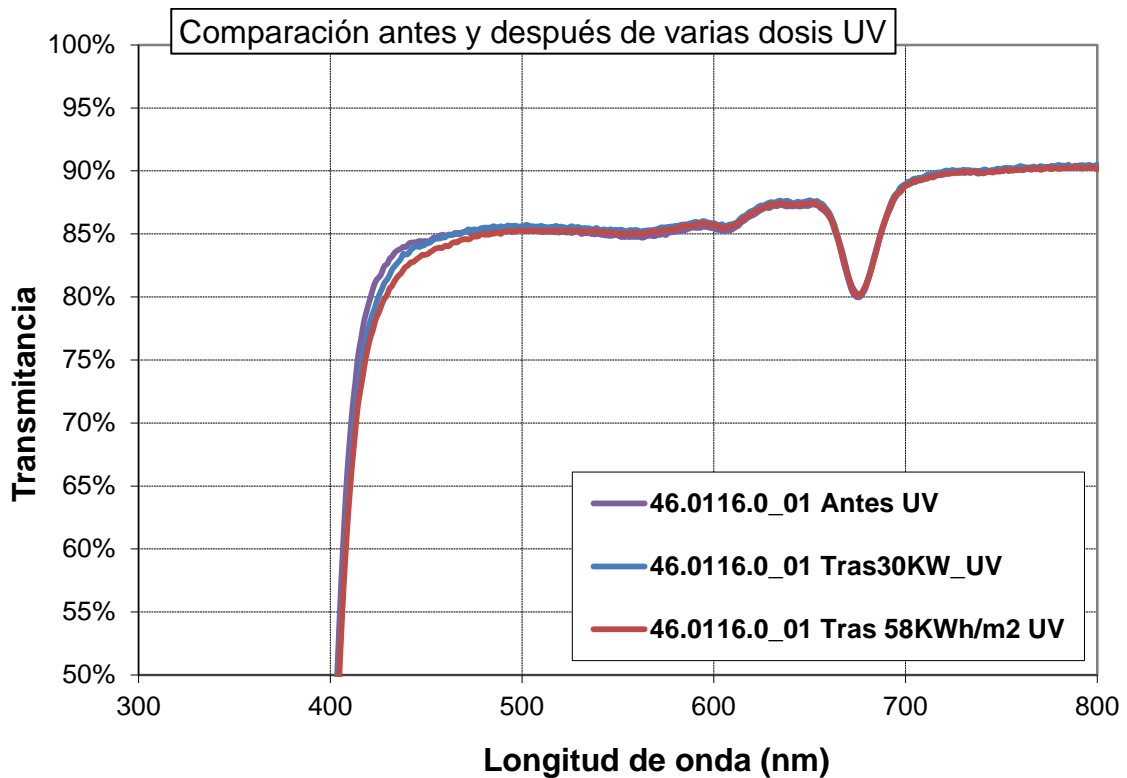


Figura 67: Comparación de la transmittancia espectral antes y después de varias radiaciones UV

Analizando tanto los datos como la gráfica, se aprecia que la transmittancia tras las dosis de radiación UV decrece en un determinado rango. Esta disminución como se puede apreciar en la gráfica se produce mayoritariamente en un rango de longitudes de onda entre 385 nm – 445 nm, en el cual tras dos dosis se produce una bajada de un 2,5%. En el resto del espectro en cambio, se mantiene prácticamente constante.

En cuanto al índice de amarilleamiento, se incrementa de manera significativa tras cada dosis de radiación UV, por lo que está claramente influenciado por la radiación UV.

Las muestras 46.0116.0\_07, 46.0116.0\_08 y 46.0116.0\_09 también se han sometido a una dosis de radiación UV de 30 kWh/m<sup>2</sup> obteniendo los siguientes resultados:

	46.0116.0_07 Antes	46.0116.0_07 Tras 30 kWh/m <sup>2</sup> UV	Variación	46.0116.0_08 Antes	46.0116.0_08 Tras 30 kWh/m <sup>2</sup> UV	Variación	46.0116.0_09 Antes	46.0116.0_09 Tras 30 kWh/m <sup>2</sup> UV	Variación
T promedio 385-1600 nm	86,2 %	85,3 %	-0,9 %	86,0 %	85,9 %	-0,1 %	85,8 %	85,9 %	0,1 %
T promedio 385-1600 nm	85,3 %	84,2 %	-1,1 %	85,0 %	84,8 %	-0,2 %	84,8 %	84,9 %	0,1 %
T promedio 385-1600 nm	86,7 %	85,9 %	-0,8 %	86,5 %	86,5 %	0,0 %	86,4 %	86,5 %	0,1 %
YI	2,5	3,18	0,68	2,59	3,05	0,46	2,51	3,09	0,58

*Tabla 12: Parámetros ópticos de varias muestras tras una dosis de radiación UV*

Una vez comparados los resultados, se ha observado que la radiación UV no afecta apenas a la transmitancia de los módulos, aunque es importante tener en cuenta que afecta sobre todo a longitudes de onda entre 385 – 445 nm.

Un dato a tener en cuenta es el índice de amarilleamiento, que aumenta en una proporción considerable tras la radiación UV. En las tres muestras el YI aumenta aproximadamente 0.6 tras recibir una dosis de radiación UV.

## 5.2. Laminaciones con el sándwich completo

Una vez medidos los diferentes parámetros del sándwich policarbonato + EVA + EVA + PPE, se han realizado laminaciones del sándwich completo utilizando la receta óptima elegida para cada espesor. 135 °C durante 17,5 minutos para el caso del policarbonato de 2 mm y 140 °C durante 12,5 minutos para el policarbonato de 4 mm.

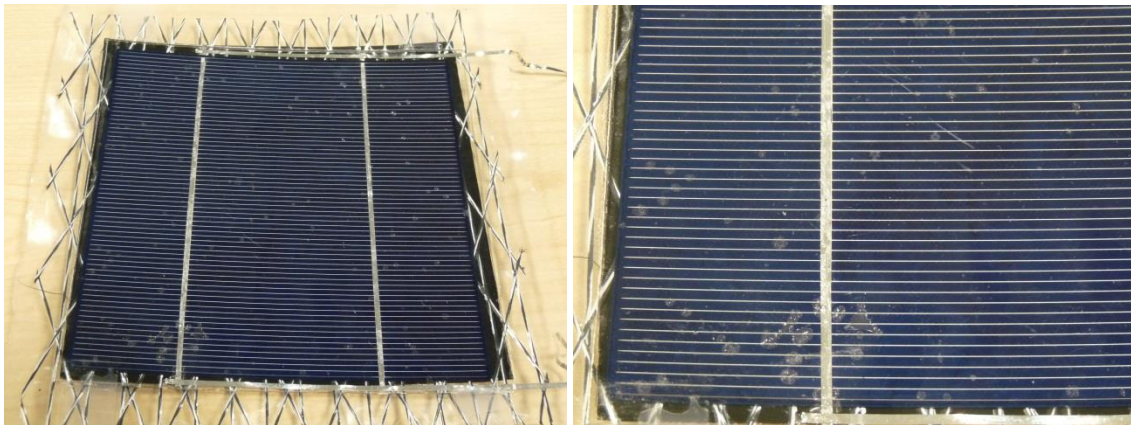
### 5.2.1. Inspección visual

Una vez que se han elegido las recetas óptimas para cada espesor de policarbonato, se ha laminado el módulo con todas las capas: policarbonato + EVA + Célula + EVA + Entramado estructural + EVA + PPE.

Espesor del PC	Receta óptima de laminación		Inspección visual
	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	
2 mm	135	17,5	Estructuras estriadas
4 mm	140	12,5	OK

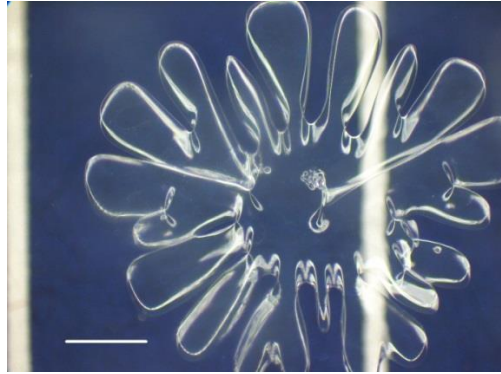
*Tabla 13: Recetas óptimas para cada espesor de policarbonato*

Desafortunadamente, uno de los problemas encontrados en la inspección visual en el sándwich completo del policarbonato de 2 mm ha sido la aparición de estructuras estriadas. En las laminaciones anteriores en las que el sándwich estaba formado por policarbonato + EVA + EVA + PPE, la laminación era correcta ya que visualmente estaba bien y los valores del test de pelado y del DSC eran buenos. Al incluir los nuevos materiales (Célula, Entramado estructural y una capa de EVA) sin embargo, la laminación no es visualmente correcta ya que aparecen estructuras estriadas del EVA como se aprecia en la siguiente figura.



*Figura 68: Inspección visual del sándwich completo utilizando el policarbonato de 2 mm de espesor 135 °C y 17,5 min*

Estas estructuras son semejantes a las de la Figura 53 pero de menor tamaño. De la misma manera que se ha hecho anteriormente, se han analizado utilizando el microscopio óptico obteniendo la siguiente imagen.



*Figura 69: Estructura estriada del policarbonato de 2 mm de espesor 135 °C y 17,5 min utilizando el microscopio*

La imagen es parecida a la de la Figura 54 pero de menor tamaño. Al parecer cuando la temperatura sobrepasa un valor umbral, estas estructuras comienzan a formarse y van aumentando con el incremento de la temperatura. Por eso en este caso las estructuras estriadas son menores que en la Figura 54 ya que se ha utilizado una temperatura de 135 °C mientras que en la Figura 54 una temperatura de 140°C. Lo mismo ocurre con el incremento de la temperatura ocurre con el incremento del tiempo.

No se sabe cuál es la causa exacta de la aparición de las estructuras estriadas en este caso pero analizando lo explicado en el apartado de laminaciones sencillas, se ha concluido que se deben a un tiempo o temperatura de laminación elevados. Por lo tanto, se puede concluir que tras la adición de nuevos materiales, la temperatura durante el proceso de laminación dentro del propio sándwich aumenta, dando como resultado estas estructuras. Aunque la inspección visual de la muestra no sea la correcta, se han analizado sus resultados del test de pelado y DSC. La laminación utilizando la receta óptima para el policarbonato de 4 mm en cambio, es buena.

En cuanto al pandeo de las muestras, también aparece pero en menor medida cuyo valor es aproximadamente de 3 mm – 4 mm en las muestras de 165 mm x 165 mm utilizando el policarbonato de 2 mm de espesor. En el caso del policarbonato 4 mm el pandeo es un poco inferior (~2 mm).

### **5.2.2. DSC**

Las muestras de EVA que se han extraído para realizar el método DSC y así medir su grado de curado, han sido del EVA que se encuentra en la última capa, es decir, entre el Entramado estructural y el PPE. Teniendo en cuenta que el sándwich es el que

aparece a continuación, el EVA de color rojo es el que se ha utilizado para la técnica DSC:

Policarbonato + EVA + Célula + EVA + Entramado estructural + EVA + PPE.

A la hora de introducir el sándwich en la laminadora, el policarbonato es el material que está en el lado que se encuentra la placa metálica, por lo que es el material que recibe más calor. Teniendo esto en cuenta, el EVA que se está analizando es el que más lejano está, por lo que se calentará menos y consecuentemente su grado de curado puede que sea menor. Por ello, para comparar si las diferentes capas del sándwich afectan o no al grado de curado, se han realizado los ensayos de DSC y se han comparado con los anteriormente medidos.

- Policarbonato de 2 mm

Se han hecho dos laminaciones con la misma receta (135 °C y 17,5 min), una del sándwich completo y otra del sándwich sencillo para poder compararlas. El EVA analizado es el que aparece de color rojo en la siguiente tabla.

Código de la muestra	Sándwich	G (%)
46.0116.0_24	PC + EVA + EVA + PPE	72
46.0116.0_37	PC + EVA + Célula + EVA + Entramado estructural + EVA + PPE	68
46.0116.0_39	PC + EVA + EVA + PPE	72

*Tabla 14: Diferencias del estado de curado entre laminación sencilla y completa*

Tal y como se puede apreciar, no hay una gran diferencia entre el grado de curado del sándwich completo al otro.

Debido a que con este sándwich la inspección visual no es la esperada, se ha decidido realizar una laminación completa bajando la temperatura a 131 °C durante el mismo tiempo (17,5 minutos) obteniendo los siguientes resultados.

Código de la muestra	Sándwich	G (%)
46.0116.0_45	PC + EVA + Célula + EVA + Entramado estructural + EVA + PPE	61

*Tabla 15: Estado de curado del sándwich completo de la muestra 46.0116.0\_16*

- Policarbonato de 4 mm

En este caso también se ha comparado el grado de curado mediante la laminación completa y la sencilla, utilizando la receta óptima obtenida en las laminaciones sencillas, esto es, 140 °C durante 12,5 minutos.

Código de la muestra	Sándwich	G(%)
46.0116.0_26	PC + EVA + EVA + PPE	69
46.0116.0_38	PC + EVA + Célula + EVA + Entramado estructural + EVA + PPE	60

*Tabla 16: Diferencias del estado de curado entre laminación sencilla y completa*

En este caso en cambio, la diferencia es más notoria, siendo aproximadamente de un 9%. Esto puede ser debido a que al tener un mayor espesor de policarbonato, la transmisión de calor a través de él es menor siendo el calor que llega a la última capa menor y provocando un menor grado de curado del EVA.

### 5.2.3. Test de pelado

A la hora de realizar el test de pelado, en las primeras laminaciones no se ha incluido la célula para evitar su ruptura. Por lo tanto, se han laminado todas las diferentes capas del módulo exceptuando la célula. Se ha querido medir la fuerza de adherencia entre policarbonato – EVA y PPE – EVA para comparar estos valores con los obtenidos en la laminación sencilla.

- Policarbonato + EVA + EVA + Entramado estructural + EVA + PPE

A la hora de realizar el test, se ha encontrado un problema debido a la lámina de entramado estructural (refuerzo), ya que distorsiona los resultados obtenidos. Una de las razones es que al estar formado por dos materiales (fibras de poliéster y un recubrimiento trenzado de HMPE) se produce la separación entre ambas capas y la medida obtenida no es válida. Por ello, no se han podido obtener los valores deseados (policarbonato – EVA y PPE – EVA) y la única fuerza de adherencia que se ha logrado medir ha sido entre el Entramado estructural y el EVA. Esta lámina de entramado está formada por hilos trenzados, como se aprecia en la Figura 70. Estos hilos se oponen a la fuerza de pelado y hacen que se incremente la fuerza tras su paso. Por ello, los resultados que se obtienen tras el test de pelado tienen muchos picos, ya que al pasar por un hilo la fuerza sube y en cuanto lo pasa, la fuerza baja.



*Figura 70: Test de pelado EVA – Entramado estructural*

- Policarbonato + EVA + Célula + EVA + Entramado estructural + EVA + PPE

De todos modos, para poder extraer el EVA de la muestra final, se ha decidido realizar el test de pelado con el sándwich completo. Durante el test de pelado la interfaz que primero se despega es la correspondiente al Entramado - EVA y los datos se muestran en la Tabla 17.

Código de la muestra	Receta de laminación		Fuerza promedio Entramado - EVA (N)
	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	
46.0116.0_37 (PC 2mm)	135	17,5	35
46.0116.0_38 (PC 4mm)	140	12,5	45

*Tabla 17: Resultados del test de pelado de las recetas óptimas para cada espesor de policarbonato*

Comparando estos resultados de fuerza de adherencia con los obtenidos anteriormente, queda claro que la adherencia entre el EVA – Entramado es mucho menor que la medida entre policarbonato – EVA y PPE – EVA.

Para observar como es la adherencia en función del tiempo de estos materiales, se muestra la siguiente gráfica. En ella se puede apreciar que la Fuerza realizada por el test de pelado tiene muchos picos. Su causa son los hilos que forman la capa de entramado. Cuando la tira despega el EVA del entramado estructural, en las zonas en las que hay un hilo la fuerza es mayor, bajando tras su paso.



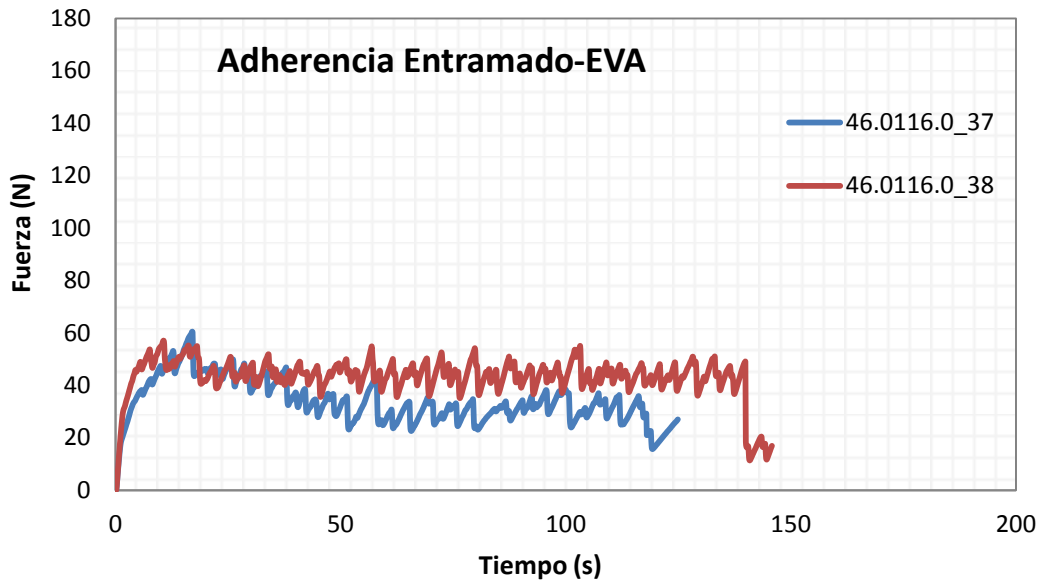


Figura 71: Fuerza de adherencia entre Entramado – EVA

#### 5.2.4. Diferencia de temperatura

Tras la aparición de las estructuras en el sándwich completo de policarbonato de 2 mm utilizando la receta óptima, se ha creído conveniente medir la temperatura mediante unas etiquetas termosensibles irreversibles adhesivas. Estas etiquetas sirven para medir la temperatura entre 116 °C y 154 °C en los siguientes rangos:



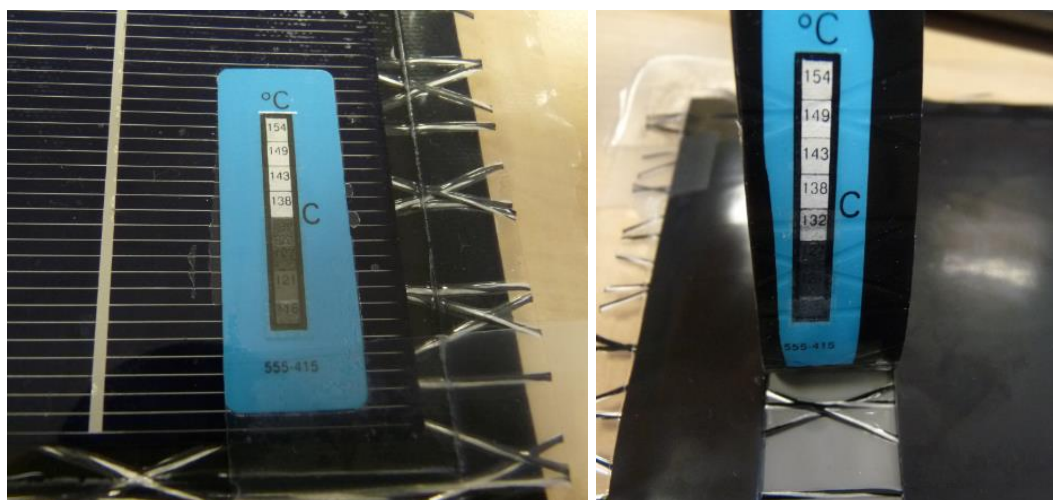
Figura 72: Etiqueta termosensible irreversible

Según la temperatura máxima que haya alcanzado la etiqueta adhesiva, el recuadro se colorea de color negro. Aunque los intervalos sean de 5 °C – 6 °C, estos adhesivos pueden proporcionar mucha información.

Para comprobar si existe una diferencia de temperaturas dentro de un mismo módulo debido a sus diferentes capas, se han introducido estas etiquetas adhesivas termosensibles en diferentes interfaces para analizar la temperatura que alcanzan. Este estudio se ha realizado con los dos espesores de policarbonato, cada uno de ellos con la receta óptima.

- Policarbonato de 2 mm (131 °C y 17,5 minutos)

En este caso para comprobar la diferencia de temperatura entre las diferentes zonas, se han introducido dos etiquetas adhesivas en el sándwich completo. Una de ellas entre el policarbonato – EVA y la otra entre EVA – PPE. Se ha llevado a cabo la laminación y los resultados obtenidos son los siguientes.



*Figura 73: Diferencia de temperatura entre las distintas interfaces con la receta óptima del policarbonato de 2 mm*

Tal y como se puede observar, la etiqueta que está entre el policarbonato – EVA, registra una temperatura en el rango de 132 °C – 137 °C mientras que en la situada entre PPE – EVA entre 127 °C – 131 °C. Por lo tanto, queda demostrado que existe una diferencia de temperatura dentro del sándwich, alcanzando mayores temperaturas en las zonas más cercanas al policarbonato.

- Policarbonato de 2 mm (135 °C y 17,5 minutos)

Para analizar con más detalle este gradiente, se ha realizado una laminación del sándwich completo con etiquetas adhesivas en las mismas interfaces utilizando en este caso 135 °C durante 17,5 minutos. La temperatura alcanzada en este caso ha sido la misma en ambas etiquetas, cuyo rango está entre 132 °C – 137 °C tanto en la

interfaz PPE – EVA como en policarbonato – EVA. Por lo tanto, una bajada de 4 °C supone el salto del rango de temperaturas en la etiqueta adhesiva.

Teniendo en cuenta que tras aumentar 4 °C la temperatura, una de la etiquetas entre PPE-EVA no ha variado, esto significa que al laminarlo a 131 °C la temperatura máxima que puede tener es de 133 °C ya que al laminarlo a 135 °C esta temperatura sigue en el mismo rango y su límite son 137 °C. De la misma manera, observando el límite inferior de la temperatura, al laminarlo a 131 °C su temperatura mínima sería de 128 °C ya que al incrementar la temperatura de laminación a 135 °C, el rango de la etiqueta adhesiva varía. Por lo tanto, la diferencia de temperaturas que tienen lugar en la muestra puede variar desde los 128 °C hasta los 133 °C, es decir un valor de 5 °C.

- Policarbonato de 4 mm (140 °C y 12,5 minutos)

En el caso del policarbonato de 4 mm se ha realizado el mismo estudio. En este caso también se han introducido 2 adhesivos como en el caso anterior (entre policarbonato – EVA y EVA – PPE) y un último en la zona posterior del PPE. Se ha laminado la muestra a 140 °C durante 12,5 minutos y las etiquetas termosensibles han registrado la misma temperatura. En todas las zonas la temperatura está entre 132 °C y 137 °C. De esta muestra se puede concluir que el espesor del policarbonato influye en la temperatura que alcanza el sándwich, ya que la primera etiqueta (entre policarbonato - EVA), alcanza la misma temperatura que la que alcanza la misma etiqueta del policarbonato de 2 mm, siendo la temperatura nominal del proceso de laminación 9 °C superior.



*Figura 74: Diferencia de temperaturas con la receta óptima del policarbonato de 4 mm*

Como conclusión del apartado, se afirma que efectivamente existe una diferencia de temperatura inferior a 5 °C dentro del sándwich con el policarbonato de 2 mm.

Utilizando el policarbonato de 4 mm en cambio no se ha medido esta diferencia de temperaturas pero es de suponer que existe.

Aunque la medida de la temperatura no es muy precisa y en algunos casos no se pueda apreciar, la diferencia de temperaturas está presente en todos los módulos y es un parámetro a tener en cuenta. Por lo tanto, a la hora de analizar el estado de curado del EVA del sándwich completo, hay que tener en cuenta que se ha analizado el EVA que está en la última capa, es decir, el que menos temperatura alcanza por lo que será el que menos curado está de los tres. Cumpliendo la condición de que el estado de curado de este EVA sea el mínimo (55%-60%) se puede asegurar que el estado de curado de las otras dos capas es superior ya que alcanzan temperaturas mayores.

### 5.2.5. Electroluminiscencia

La técnica de electroluminiscencia se ha realizado para detectar cualquier tipo de fallo que puedan sufrir las células durante el proceso de laminación. De esta manera se puede comprobar también si el pandeo que sufren los módulos afecta a las células o no.

- Muestra 46.0116.0\_27

Se ha realizado la laminación completa utilizando como receta de laminación 135 °C durante 17,5 minutos y el policarbonato de 2 mm de espesor. Haciendo circular 8 A, a través de la célula la electroluminiscencia proporciona la siguiente imagen:

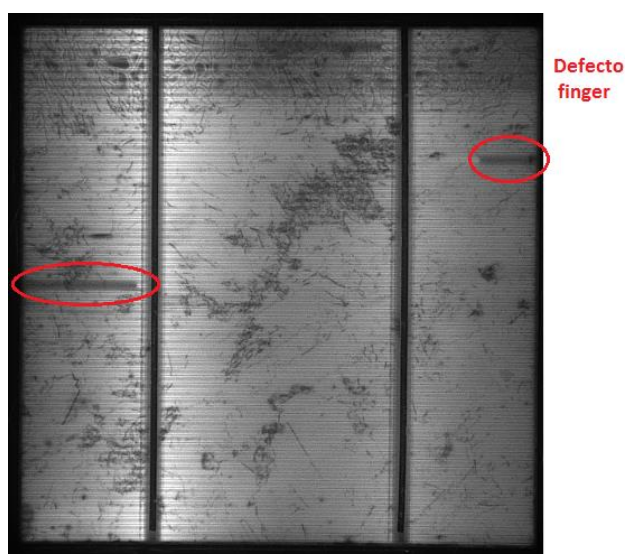


Figura 75: EL de la muestra 46.0116.0\_27

Observando la figura, no se aprecian grietas ya que las zonas más oscuras son debidas a la estructura del silicio policristalino o a defectos de la célula.

- Muestra 46.0116.0\_28

Al igual que la muestra anterior, se ha llevado a cabo la laminación completa durante 17,5 minutos a 135 °C y el policarbonato de 2 mm de espesor.



*Figura 76: EL de la muestra 46.0116.0\_28*

En esta muestra se aprecia una imagen prácticamente igual a la muestra anterior. Mediante la EL se puede apreciar que ambas células pertenecen al mismo lingote de silicio ya que tienen la misma estructura.

- Muestra 46.0116.0\_29: En este caso se ha utilizado el policarbonato de 4mm de espesor y la receta de laminación utilizada ha sido 140 °C durante 12,5 minutos. Al igual que en las muestras anteriores, en esta muestra se aprecia lo mismo

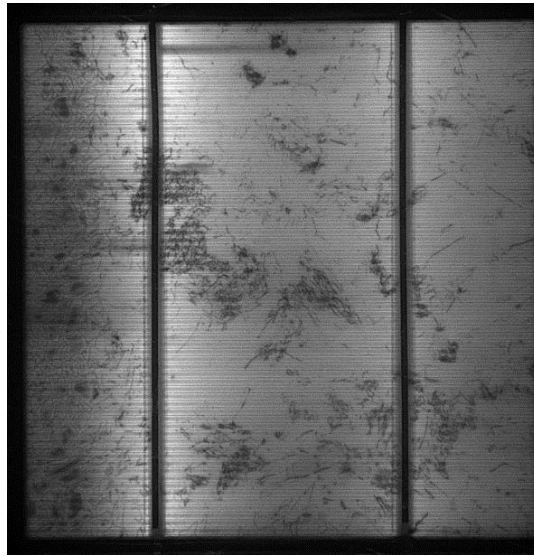


Figura 77: EL de la muestra 46.0116.0\_30

Por lo tanto, una vez analizadas las imágenes tomadas mediante EL de las muestras laminadas, se puede concluir que el pandeo que sufren los mini-módulos no afecta a las células ya que no se aprecian grietas.

### 5.3. Resultados óptimos

Una vez analizados tanto los resultados del sándwich sencillo como del completo, se ha elegido una receta óptima de laminación para cada espesor de policarbonato. En la siguiente tabla aparecen los valores de las diferentes técnicas obtenidos utilizando la receta óptima.

- Policarbonato de 2 mm

	Receta de laminación óptima	Inspección visual	Fuerza de adherencia (N)			G (%)
			PC – EVA	PPE - EVA	Entramado - EVA	
Laminación sencilla	131 °C	OK	114	98	-	58 %
Laminación completa	17,5 min	OK	-	-	-	61 %

Tabla 18: Resultados del sándwich sencillo y completo con policarbonato 2 mm utilizando la receta óptima definitiva

- Policarbonato de 4 mm

	Receta de laminación óptima	Inspección visual	Fuerza de adherencia (N)			G (%)
			PC – EVA	PPE - EVA	Entramado - EVA	
Laminación sencilla	140 °C 12,5 min	OK	127	120	-	69 %
Laminación completa		OK	-	-	44,8	60 %

*Tabla 19: Resultados del sándwich sencillo y completo con policarbonato de 4 mm utilizando la receta óptima definitiva*

## 6. CONCLUSIONES

En este Trabajo Fin de Grado se ha estudiado el proceso de laminación de módulos fotovoltaicos utilizando materiales alternativos como el policarbonato y un entramado estructural. El objetivo de la sustitución de dichos materiales es obtener módulos fotovoltaicos más ligeros y adaptables a diferentes superficies para facilitar su uso en integración arquitectónica.

Las laminaciones realizadas han sido de muestras de tamaño 165 mm x 165 mm, utilizando láminas de policarbonato de dos espesores diferentes (2 mm y 4 mm). Después de utilizar diferentes recetas de laminación y caracterizar las muestras mediante diversas técnicas, se ha determinado para cada uno de los espesores de policarbonato una receta de laminación óptima. En el caso del policarbonato de 2 mm de espesor, la receta de laminación óptima ha sido 131 °C durante 17,5 minutos y en el caso del policarbonato de 4 mm de espesor, 140 °C durante 12,5 minutos. Además de una buena laminación, se ha logrado que los mini-módulos fabricados utilizando estas recetas cumplan con las especificaciones necesarias que debe cumplir un módulo fotovoltaico. Mediante la receta óptima para el policarbonato de 2 mm de espesor y el sándwich sencillo se ha obtenido un grado de curado del 58% mediante el DSC, una fuerza de adherencia de 114 N entre policarbonato – EVA y 98 N entre PPE – EVA. Mediante la receta óptima y utilizando el policarbonato de 4 mm de espesor se ha logrado un grado de curado del 69% y una fuerza de adherencia de 127 N entre policarbonato – EVA y 120 N entre PPE – EVA.

Por lo tanto, la principal conclusión del presente TFG es que existe un proceso de laminación que se ajusta a estos materiales alternativos, siendo una alternativa a los módulos convencionales para integración arquitectónica.

Por otro lado, se ha llegado a diferentes conclusiones parciales. Se han realizado dos tipos de laminaciones a lo largo del TFG (sencillas y completas). Las laminaciones sencillas están formadas por policarbonato, 2 capas de EVA y la cubierta posterior PPE. Las laminaciones completas, en cambio, están formadas por policarbonato, 3 capas de EVA, Células fotovoltaicas, un entramado estructural y la cubierta posterior PPE. Tras los diferentes resultados obtenidos mediante el sándwich completo y el sencillo, se ha llegado a la conclusión de la existencia de un gradiente de temperaturas en las laminaciones del sándwich completo. Mediante el uso de etiquetas termosensibles, se ha medido este gradiente de temperaturas cuyo valor es inferior a 5 °C a lo largo de las diferentes capas del sándwich.



Como ya se ha comentado anteriormente, se ha encontrado una receta óptima para cada espesor de policarbonato. En el caso del policarbonato de 2 mm de espesor la receta óptima ha sido 131 °C durante 17,5 minutos y en el caso del policarbonato de 4 mm de espesor, 140 °C durante 12,5 minutos. Aumentando tanto la temperatura como el tiempo de laminación, aparecen estructuras estriadas en la capa de EVA que está en contacto con el policarbonato. Por ello estos valores han sido el límite encontrado y no se ha podido aumentar la temperatura ni el tiempo.

Por otro lado, cabe destacar que el grado de curado del encapsulante es función de la temperatura y del tiempo. La variación del grado de curado con la temperatura es de aproximadamente 2%/°C y con el tiempo de 3,5%/min.

En cuanto a la capa de entramado estructural, tras realizar el test de pelado se ha concluido que es la capa más débil ya que no se adhiere muy bien al EVA y distorsiona los resultados. Por ello, se ha asumido que quitando esta lámina de entramado, los resultados del test de pelado son semejantes ya que lo que interesa medir es la adherencia entre policarbonato – EVA y PPE – EVA.

Con el objetivo de investigar la degradación en campo, se han sometido tres muestras de policarbonato de 2 mm de espesor laminadas con EVA utilizando diferentes recetas de laminación a una dosis de radiación UV de 28 kWh/m<sup>2</sup> (94% UVA y 6% UVB). Por otro lado también se ha sometido a una radiación UV de 58 kWh/ m<sup>2</sup> una muestra de policarbonato de 4 mm de espesor laminada con EVA. Como resultado se ha obtenido una ligera disminución de la transmitancia tras el test UV en todas las muestras. El índice de amarilleamiento (YI) en cambio, aumenta de manera significativa tras el test, por lo que está claramente influenciado por la radiación UV.

Para finalizar, las medidas obtenidas mediante electroluminiscencia indican que no se aprecian indicios de grietas ni otros aspectos negativos en la célula tras el proceso de laminación.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Martin Green et al., "Solar cell efficiency tables (version 47)," in *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. Sidney, Australia, 2015.
- [2] EurObserv'ER (Abril 2016). *Photovoltaic Barometer* [Online]
- [3] <http://www.penergy.it>
- [4] <https://www.sabic-ip.com>
- [5] C. Peike et al., "Overview of PV module encapsulation materials" in *Photovoltaics International*, Freiburg, pp. 85-91.
- [6] D. Wu (Junio 2015), "Investigation of the Reliability of the Encapsulation System of Photovoltaic Modules" PhD. Dissertation, Loughborough University, June 2015.
- [7] S. Krauter et al. "PV Module Lamination Durability", Berlin, 2011.
- [8] "International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) (7<sup>th</sup> edition)", Marzo 2016
- [9] IEC FDIS 62788-1-6© IEC 2016. Materials used in PV modules-Measurement procedures. Part 1-6: Encapsulants-Test methods for determining the degree of cure in Ethylene-Vinyl Acetate (Pendiente de publicación)
- [10] Yen-Shan Hsu et al., "Thermoanalytical Characterization of Ethylene Vinyl Acetate Copolymer (EVA) for Lamination Process Simulation and Gel Content Determination in Photovoltaic Modules", 2012 Module Reliability Workshop. Golden, Colorado, USA, 2012.
- [11] Ch. Hirschl et al. "Determining the degree of crosslinking of ethylene vinyl acetate photovoltaic module encapsulants", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, pp. 494-502, 2015.
- [12] ISO 813:2016. Rubber, vulcanized or thermoplastic –Determination of adhesion to a rigid substrate -90 degree peel method
- [13] S. Krauter et al., "PV Module Laminación Durability", Photovoltaic Institute Berlin, Berlin, Germany, 2011.
- [14] A. Petraglia and V. Nardone. "Electroluminescence in photovoltaic cell", *Phys. Educ*, 2011, pp 46-511.

## **8. ANEXOS**

ANEXO 1: Policarbonato

ANEXO 2: Encapsulante EVA

ANEXO 3: Entramado estructural

ANEXO 4: Cubierta posterior PPE

ANEXO 5: Artículo AISOVOL

## **ANEXO 1: Policarbonato**

# LEXAN EXELL™ D SHEET

## PRODUCT DATASHEET

### DESCRIPTION

LEXAN EXELL™ D sheet is a transparent polycarbonate sheet with proprietary UV protection on both sides offering excellent weathering properties. With its excellent impact resistance it is a good candidate for a wide variety of building and construction applications. LEXAN EXELL D sheet can be easily cold formed into gentle curves which makes it a good material choice for skylights, covered walkways, barrel vaults etc. LEXAN EXELL D sheet is thermoformable and can be thermoformed into the desired geometry whilst retaining the UV resistant protection specially developed for weather resistant applications.

### TYPICAL PROPERTY VALUES

PROPERTY	TEST METHOD	UNITS	VALUE
<b>PHYSICAL</b>			
Density	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1.20
Water absorption, 50% RH, 23 °C	ISO 62	%	0.15
Water absorption, saturation, 23°C	ISO 62	%	0.35
<b>MECHANICAL</b>			
Yield stress 50 mm/min	ISO 527	MPa	>60
Yield strain 50 mm/min	ISO 527	%	6
Nominal strain at break 50 mm/min	ISO 527	%	>100
Tensile modulus 1 mm/min	ISO 527	MPa	2300
Flexural strength 2 mm/min	ISO 178	MPa	90
Flexural modulus 2 mm/min	ISO 178	MPa	2300
<b>IMPACT</b>			
Charpy impact, notched 23°C, 3.0 mm	ISO 179/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	75
Izod impact, unnotched 23°C, 3.0 mm	ISO 180/1U	kJ/m <sup>2</sup>	NB
Izod impact, notched 23°C, 3.0 mm	ISO 180/1A	kJ/m <sup>2</sup>	70
<b>THERMAL</b>			
Vicat softening temperature, rate B/120	ISO 306	°C	145
Temperature of deflection under load (type A), 1.8 MPa, flat	ISO 75-2	°C	127
Thermal conductivity	ISO 8302	W/m.°C	0.2
Coefficient of linear thermal expansion, 23-55°C	ISO 11359-2	1/°C	7x 10 <sup>-5</sup>
Ball pressure test 125 ±2°C	IEC 60695-10-2	-	Pass
<b>ELECTRICAL</b>			
Volume resistivity	IEC 60093	Ohm.cm	>10 <sup>15</sup>
Dielectric strength, in oil, 3.2 mm	IEC 60243-1	kV/mm	18
<b>FIRE RATINGS</b>			
<b>Building &amp; Construction</b>			
Europe	EN13501-1	-	b,s1,d0 (2-6mm)

◆ These property values have been derived from LEXAN™ resin data for the material used to produce this sheet product. Variation within normal tolerances are possible for various colors. These typical values are not intended for specification purposes. If minimum certifiable properties are required please contact your local SABIC, Specialty Film & Sheet representative. All values are measured at least after 48 hours storage at 23°C/50% relative humidity. All properties are measured on injection molded samples. All samples are prepared according ISO 294.

™ Trademarks of SABIC.

---

## LIGHT TRANSMISSION

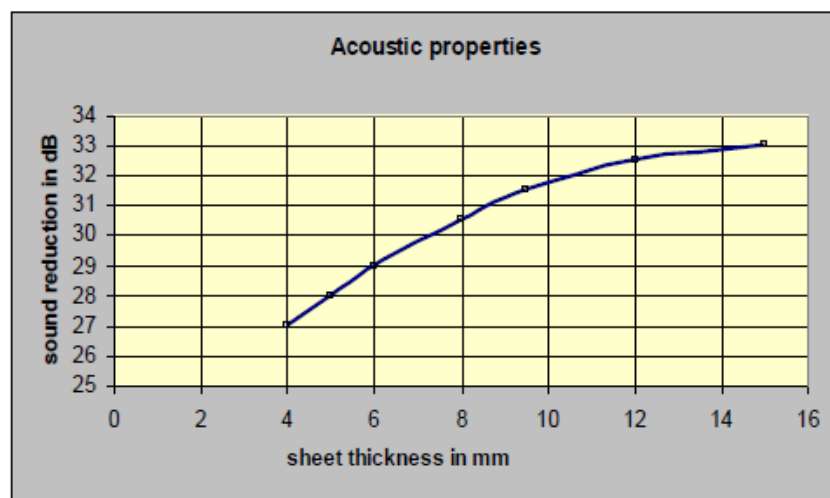
Transparent LEXAN EXELL D sheet have excellent light transmission, between 84 and 87%. However for buildings in hot climates or with south facing aspects, LEXAN EXELL D sheet is available in translucent bronze, grey and opal white. LEXAN EXELL D is essential opaque to all wave lengths below 385 nanometers. This useful shielding property can help prevent discoloration of sensitive materials placed under or behind LEXAN EXELL D sheet.

## UV PROTECTION

LEXAN EXELL D sheet has proprietary UV protected surfaces, giving excellent durability to outdoor weathering. This superior UV resistance and toughness of LEXAN EXELL D sheet is backed by a 10 years limited written warranty against yellowing, loss of light transmission and breakage.

## SOUND REDUCTION

Below graph shows the acoustic properties for different thicknesses of the sheet:



## PERFORMANCE

LEXAN EXELL D sheet has a good fire performance against many national fire codes dependant on thickness and color; please check with the local sales office for details.

## PRODUCT AVAILABILITY

LEXAN EXELL D sheet is normally manufactured in the standard sizes listed below. Deliveries from stock or cut to size can be ordered via our customer service organisation.

<b>Standard gauge in mm:</b>	2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 8 - 9.5 - 12- 15
<b>Standard sizes:</b>	2050 x 3050 mm (is max. size for 15mm), 2050 x 6100 mm
<b>Masking:</b>	Top side: Coex. opal white PE/purple print, Bottom side: Coex. transparent PE
<b>Standard colors:</b>	clear code 112, solar bronze code 5109, solar grey code 713, opal white code WH7D2870 (max. 8 mm), opal white code WH4D3480.

---

## CONTACT US:

### Middle East and Africa

SABIC Global Headquarters  
PO Box 5101  
Riyadh 11422  
Saudi Arabia  
T +966 (0) 1 225 8000  
F +966 (0) 1 225 9000  
E [info@sabic.com](mailto:info@sabic.com)

### Email

[sfs.info@sabic-ip.com](mailto:sfs.info@sabic-ip.com)

### Americas

Specialty Film & Sheet  
1 Plastics Avenue  
Pittsfield, MA 01201  
USA  
Toll-free 1 800 323 3783  
T 1 413 448 6655  
F (888) 443 2033  
E [Spinside.sales@sabic-ip.com](mailto:Spinside.sales@sabic-ip.com)

### Europe

Specialty Film & Sheet  
Plasticslaan 1  
4612 PX  
Bergen op Zoom  
The Netherlands  
T +31 (0)164 293678  
F +31 (0)164 293272  
E [sfs.info@sabic-ip.com](mailto:sfs.info@sabic-ip.com)

### Asia Pacific

Specialty Film & Sheet  
2550 Xiupu Road  
Pudong  
201319 Shanghai  
China  
T +86 21 2037 8188  
F +86 21 2037 8288  
E [sfs.info@sabic-ip.com](mailto:sfs.info@sabic-ip.com)

DISCLAIMER: THE MATERIALS, PRODUCTS AND SERVICES OF SAUDI BASIC INDUSTRIES CORPORATION (SABIC) OR ITS SUBSIDIARIES OR AFFILIATES ("SELLER") ARE SOLD SUBJECT TO SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, WHICH ARE AVAILABLE UPON REQUEST. INFORMATION AND RECOMMENDATIONS CONTAINED IN THIS DOCUMENT ARE GIVEN IN GOOD FAITH. HOWEVER, SELLER MAKES NO EXPRESS OR IMPLIED REPRESENTATION, WARRANTY OR GUARANTEE (i) THAT ANY RESULTS DESCRIBED IN THIS DOCUMENT WILL BE OBTAINED UNDER END-USE CONDITIONS, OR (ii) AS TO THE EFFECTIVENESS OR SAFETY OF ANY DESIGN OR APPLICATION INCORPORATING SELLER'S MATERIALS, PRODUCTS, SERVICES OR RECOMMENDATIONS. UNLESS OTHERWISE PROVIDED IN SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, SELLER SHALL NOT BE RESPONSIBLE FOR ANY LOSS RESULTING FROM ANY USE OF ITS MATERIALS, PRODUCTS, SERVICES OR RECOMMENDATIONS DESCRIBED IN THIS DOCUMENT. Each user is responsible for making its own determination as to the suitability of Seller's materials, products, services or recommendations for the user's particular use through appropriate end-use and other testing and analysis. Nothing in any document or oral statement shall be deemed to alter or waive any provision of Seller's Standard Conditions of Sale or this Disclaimer, unless it is specifically agreed to in a writing signed by Seller. Statements by Seller concerning a possible use of any material, product, service or design do not, are not intended to, and should not be construed to grant any license under any patent or other intellectual property right of Seller or as a recommendation for the use of any material, product, service or design in a manner that infringes any patent or other intellectual property right.

SABIC and brands marked with ™ are trademarks of SABIC or its subsidiaries or affiliates.  
© 2014 Saudi Basic Industries Corporation (SABIC). All Rights Reserved.

\* Any brands, products or services of other companies referenced in this document are the trademarks, service marks and/or trade names of their respective holders.

[www.sabic.com/sfs](http://www.sabic.com/sfs)



## **ANEXO 2: Encapsulante EVA**



## Technical Data

## PHOTOCAP<sup>®</sup> 15585P HLT<sup>™</sup>

PHOTOCAP<sup>®</sup> 15585P HLT<sup>™</sup> is an ultra fast cure EVA (ethylene vinyl acetate copolymer) photovoltaic encapsulating film with HLT<sup>™</sup> higher light transmission in the UV wavelength region to allow greater power generation with blue light sensitive photovoltaic devices.

PHOTOCAP 15585P HLT is intended for applications in any crystalline silicon photovoltaic module construction and for many thin film photovoltaic designs. PHOTOCAP 15585P HLT is provided as rolled film ready for use in thermal lamination processes. The material is self-priming for adhesion to glass. The same process equipment and conditions used for other ultra-fast cure PHOTOCAP EVA encapsulant can be used for this product.

Properties	Test Method	Units	Condition	Results
	ASTM			
<b>Physical Mechanical</b>				
Tensile Strength	D638	MPa	23 °C, 250 mm/min elongation rate	15
Ultimate Elongation	D638	%	23 °C, 250 mm/min elongation rate	530
10% Secant Modulus	D638	MPa	23 °C, 250 mm/min elongation rate	24
Hardness	D2240	Shore A/D	23 °C	80 / 25
Adhesion to Glass	STR	N/cm	23 °C	130
MVTR	F1249	g/m <sup>2</sup> /day	25 °C/100sccm flow, 100%RH	18
Water Absorption	D570	wt%	23 °C	< 0.1
<b>Optical</b>				
Optical Transmission	E424	%	23 °C, 0.46 mm thickness	91
UV Cutoff Wavelength	E424	nm	23 °C, 0.46 mm thickness	305
Refractive Index	D542	-	23 °C, 0.46 mm thickness	1.48
<b>Electrical</b>				
Volume Resistivity	D257	ohm cm	23 °C/50%RH	>1 x 10 <sup>15</sup>
Dielectric Strength	D149	kV/mm	23 °C/50% RH, 500V/sec	>20

*Tests are made in accordance with the current issue of the ASTM, or other cited test method. Test data reported here are nominal values measured on extruded films, 0.5 mm thick, or compression molded sheets and test bars, which have been cured at 150 °C for 7 minutes with a laboratory press. Optical measurements made with glass-EVA coupons with high transmission solar glass.*

Americas	Europe	Asia
Specialized Technology Resources, Inc. 18 Craftsman Road East Windsor, CT 06088 USA Phone: +1 860 763 7014 Email: <a href="mailto:sales@STRSolar.com">sales@STRSolar.com</a>	Specialized Technology Resources, España Parque Tecnológico de Asturias, parcela 36 33428 Llanera, Asturias SPAIN Phone: +34 985 73 23 33 Email: <a href="mailto:sales@STRsolar.com">sales@STRsolar.com</a>	Specialized Technology Resources, Malaysia Plot 20, Jalan Tanjung A/3 Port of Tanjung Pelepas 81560 – Gelang Patah, Johor MALAYSIA Phone: +607 507 3185 Email: <a href="mailto:sales@STRSolar.com">sales@STRSolar.com</a>

WWW.STRSOLAR.COM

REV A 2013-01

**Technical Data**  
 page 2

**PHOTOCAP<sup>®</sup> 15585P HLT<sup>™</sup>**
**AGENCY APPROVALS:**

PHOTOCAP 15585P HLT is a UL listed product in category QIHE2 Photovoltaic Polymeric Materials. Each STR manufacturing plant maintains a separate UL file. Please refer to UL file numbers E349543, E335471 and E335472.

**PRODUCT VARIATIONS:**

Suffix	Release Paper	Shrinkage	Notes
15585P/UF HLT	Yes	Zero	STR's User Friendly (UF) technology allows sheets to be cut closer to size, resulting in less voids and shifting of ribbon and cells
15585P/UFP HLT	No	Minimal	Paperless UF option, resulting in minimal shrinkage
15585P/PL HLT	No	Higher than UF or UFP	Possesses a greater tendency to shrink but perfectly acceptable for use in most applications

**PROCESS GUIDELINES:**

Vacuum Lamination Step		Heat Cure Cycle	
Nominal Temperature	145 - 150 °C	Platen Temperature	145 - 150 °C
Vacuum Range	< 60 mbar	Cure Time	8 min
Evacuation Time	4 min	Applied Bladder Pressure	910 mbar
EVA Melting Range Via DSC	65 - 75 °C	Target Temperature within the Encapsulant	140 °C
		Time Above the Target Temperature	> 3 min

*Processing conditions shown here are a recommended starting point for a crystalline silicon photovoltaic module processed with a typical 2-step vacuum lamination system. Actual values required to achieve desired cure levels will depend on the specific PV module design and the lamination process used.*

*The temperature of the encapsulant should be at or above the EVA melting range before pressure is applied for the cure cycle. The encapsulant should reach the target temperature during the cure cycle, and should remain above that target temperature for the time shown. Temperatures within encapsulant should be periodically measured with embedded thermocouples to assess temperature uniformity of the laminator heating plate and the rate of heat transfer to the PV module. More information about how to laminate PV modules with PHOTOCAP encapsulants is available from STR.*

**All PHOTOCAP grades are based upon over 30 years of STR's commercial experience in the photovoltaic market.**




**For further information, please contact the nearest Specialized Technology Resources office or agent.**

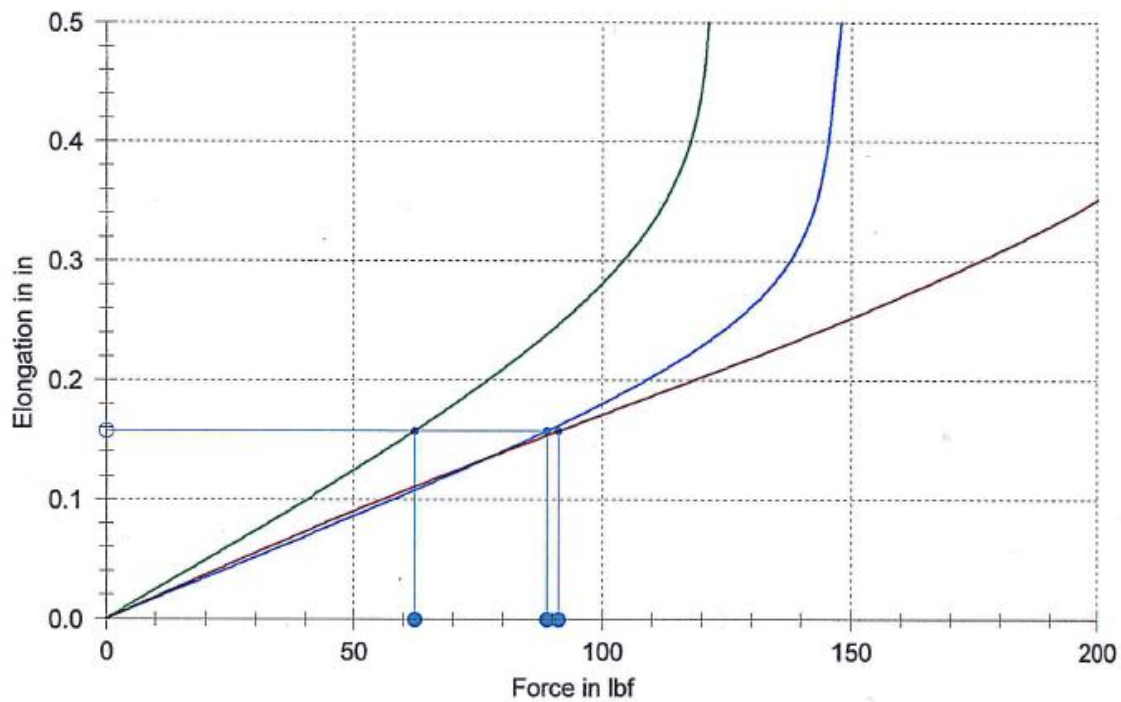
PHOTOCAP<sup>®</sup> is a registered trademark of Specialized Technology Resources, Inc. The data set forth above is believed to be accurate. It is for informational purposes only and is not to be used for specification purposes. Neither Specialized Technology Resources, Inc., nor any of its affiliates, makes any representation or warranty as to, and disclaims all liability for, the information herein. PHOTOCAP is to be used by technically skilled persons at their own discretion and risk.

## **ANEXO 3: Entramado estructural**

## Laminate Stretch Test Report

Style : C648 4 MIL      Act. Weight : 208 g/m<sup>2</sup>  
 Lot-No.: : 53020      Act. Weight : 4.86 sm oz  
 Color: :

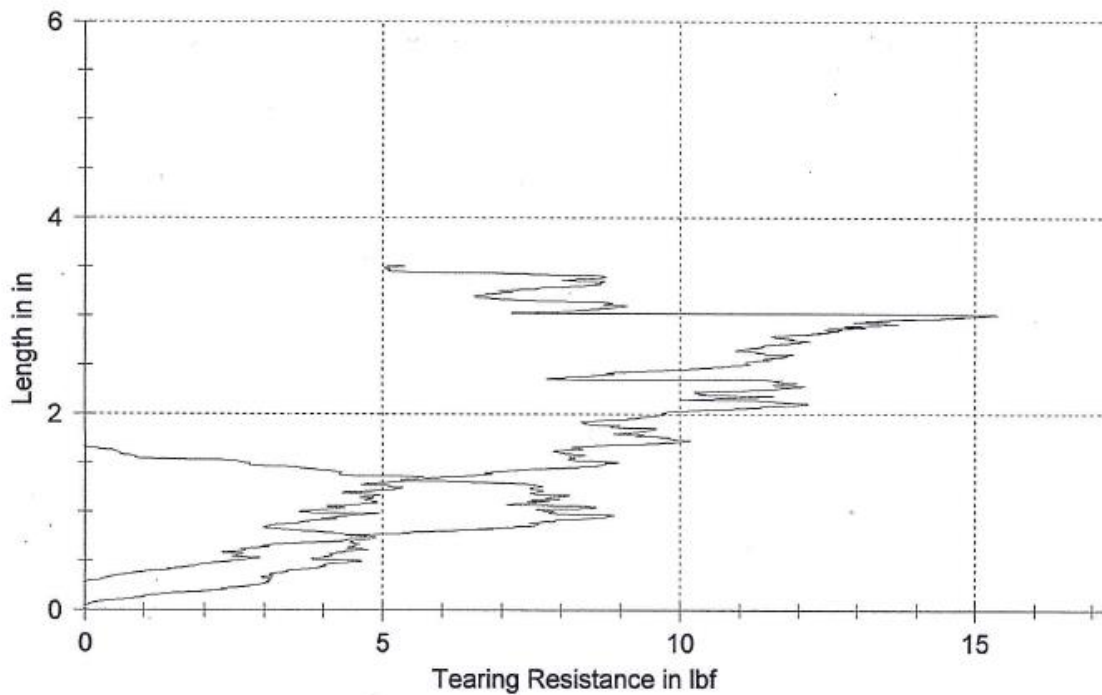
Legends	warp 0° Nr	condition	10 lbf	25 lbf	50 lbf	100 lbf	200 lbf	ε 1% lbf
	1	Lab	1.9	4.6	9.0	17.1	35.1	91.3
Legends	fill 90° Nr	condition	10 lbf	25 lbf	50 lbf	100 lbf	200 lbf	ε 1% lbf
	2	Lab	2.5	6.2	12.5	28.1	-	62.2
Legends	bias 45° Nr	condition	10 lbf	25 lbf	50 lbf	100 lbf	200 lbf	ε 1% lbf
	3	Lab	1.8	4.4	8.6	18.0	-	88.8



## Tearing Strength Test Report


Item Number : W/C64840002  
 Style : C648 4 MIL  
 Lot Number : 53020  
 Piece Number : 201  
 Identifier : 00  
 Test Date :  
 Color :  
 Act. Weight : 208 g/m<sup>2</sup>  
 Finish :  
 Coating - Side 1 :  
 Coating - Side 2 :  
 UV Protection :  
 Remarks :


Nr	Direction	Date	Fmax. Lvm lbf	Faverage Lm lbf	Fmax Lm lbf	No. of Fmax. peaks	AverageVal Fmax Sp lbf
1	Warp	01/15/2016	0.0	2.9	5.7	5	5.2
2	Fill	01/15/2016	-0.0	8.5	12.2	5	10.4

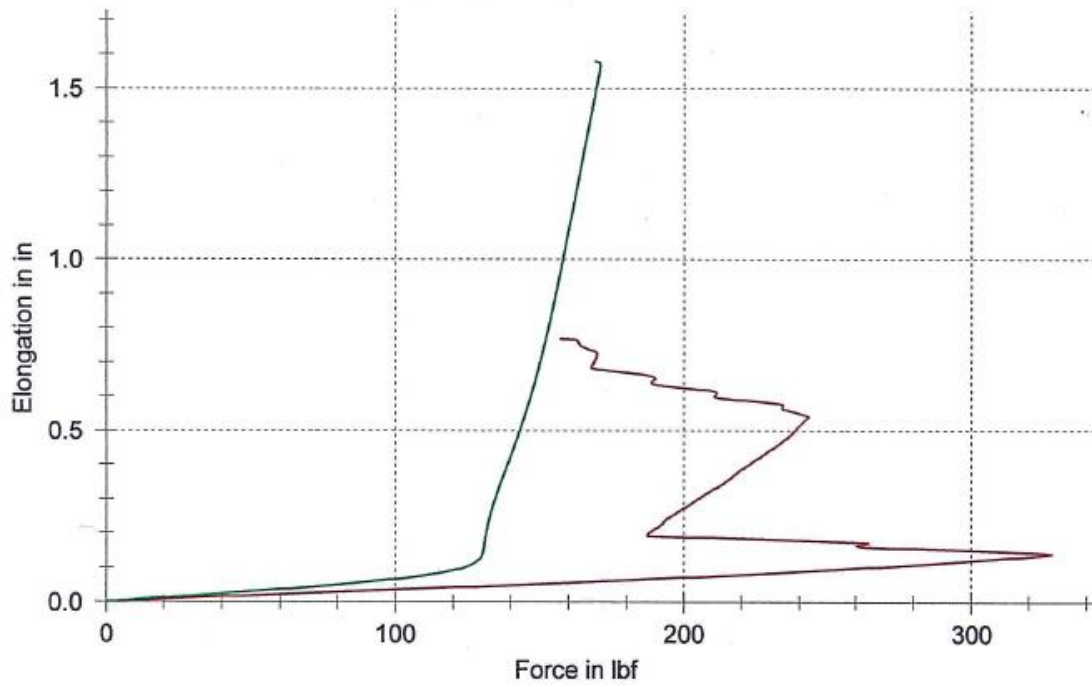


## Tensile Strength Test Report

Style : C648 4 MIL      Act. Weight : 208 g/m<sup>2</sup>  
 Lot-No.: : 53020      Act. Weight : 4.86 sm oz  
 Color: :

Legends	Warp 0° Nr	condition	Fmax pro 5cm lbf	L Fmax in
	1	Lab	327.76	0.14

Legends	Fill 90° Nr	condition	Fmax pro 5cm lbf	L Fmax in
	2	Lab	170.78	1.56



## **ANEXO 4: Cubierta posterior PPE**

# AKALIGHT ECS® 385 b

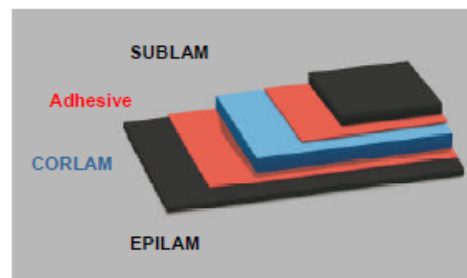
## General

AKALIGHT ECS® 385 b is a black colored UV-stable and hydrolytic resistant multilayer insulating material. It has been developed for the specific application as a backsheet of a Photovoltaic Module which minimum requirements are described in the International Standard IEC 61730-1.

Electrical, mechanical and optical properties of AKALIGHT ECS® 385 b remain at high level when exposed to UV radiation or to rough combined temperature/humidity conditions (e.g. 2000 h, 85%rh, 85°C).

The new product line AKALIGHT ECS® is designed to exceed the requirements for different applications of PV systems. Therefore AKALIGHT ECS® incorporates three basic layers with different functional importance. CORLAM is carrying mainly the electrical and mechanical properties of the structure. The white EPILAM on the outside and the black SUBLAM on the cell side are both providing high bonding either to the encapsulant or to the polymers used as pottings, sealants or adhesives. The design of both protective top layers responds to an evaluation of particular conditions.

All tests including accelerating tests are performed on plain back sheet.



## Required properties in accordance to IEC 61730-1

Property	Unit	Test method	Results	Testing laboratory
Max. system voltage (tested in air)	V <sub>DC</sub>	IEC 60664-1	1084	VDE, Offenbach
UV resistance	-	EN 4892-3	Passed <sup>1)</sup>	KREMPEL
Flame spread index	-	ASTM E 162-09	60 <sup>3)</sup>	TÜV Rheinland® LGA
- tested without primer	-	ASTM E 162-09	5.1 <sup>3)</sup>	TÜV Rheinland® LGA
Relative Thermal Index (RTI)	°C	IEC 60216-5	≥ 105 <sup>2)</sup>	UL
Relative Thermal Index (RTI)	°C	IEC 61730-1	130 <sup>4)</sup>	JET

1) 2000h UV exposure with 0.68 W/m<sup>2</sup> at 340 nm; 60°C; 500 min. wetting; 1000h condensation. Total exposure time 3000h. Tested on both sides.

2) Generic thermal index according UL 746B table 7.1

3) Tested with white version, black in process at UL.

4) RTI from electrical temperature rating of outer PET film, mechanical temperature rating is 130°C, impact rating is 105°C.

## Certificates



AKALIGHT ECS® b is an UL Recognized Component (File No. QIHE2.E312459)



KREMPEL GmbH Quality Standards: ISO/TS 16949 (Reg.No.068224) and ISO 9001 (Reg.No.003915).



## AKALIGHT ECS® 385 b

### Additional properties not required by IEC 61730-1

Property	Unit	Test method	Typical values
Thickness	mm	EN 60674-2	0.30
Area weight	g/m <sup>2</sup>	EN 60674-2	380
Water vapour permeability 38°C/90%rh	g/m <sup>2</sup> · d	ISO 15106-3 Test condition 2	2.1
Dimensional stability, MD + TD (30 min. / 150 °C)	%	EN 60674-2	≤ 1.2
Reflection of visible light (380 – 780nm) <sup>1)</sup>	%	EN 410	5.0
Reflection of radiation (280 – 2500nm) <sup>4)</sup>	%	EN 410	4.9
Volume resistivity	Ω · cm	UL 746A	10 <sup>16</sup>
Dielectric strength	kV/mm	UL 746A	70
High-current arc ignition	PLC	UL 746A	1

1) Tested at Primer side = cell side; direct solar radiation. Test equipment: Perkin Elmer Lambda 900 (Ulbrichtkugel) Tested at Fraunhofer ISE, Freiburg, Germany

## **ANEXO 5: Artículo AISOVOL**

(Pendiente de publicación)

## AISOVOL PROJECT: A PHOTOVOLTAIC GENERATION SOLUTION AS AN ALTERNATIVE CONSTRUCTION MATERIAL

A.B. Cueli<sup>1</sup>, J. Bengoechea<sup>1</sup>, A. Murillo<sup>(1,4)</sup>, M.J. Rodríguez<sup>1</sup>, A.R. Lagunas<sup>1</sup>, C. Montes<sup>2</sup>, A. Linares<sup>3</sup>, E. Llarena<sup>2</sup>, O. González<sup>2</sup>, D. Molina<sup>2</sup>, A. Pio<sup>2</sup>, L. Ocaña<sup>2</sup>, C. Quinto<sup>2</sup>, M. Friend<sup>2</sup> & M. Cendagorta<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>NATIONAL RENEWABLE ENERGY CENTRE (CENER)

C/ Ciudad de la Innovación 7, 31621 Sarriguren (Navarra), Spain

Telephone: +34 948 25 28 00; Fax: +34 948 27 07 74

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico y de Energías Renovables, S. A. (ITER)

<sup>3</sup>Agencia Insular de Energía de Tenerife (AIET)

Pol. Industrial de Granadilla, s/n

E 38600 Granadilla de Abona, Spain

<sup>4</sup>Universidad Pública de Navarra

C/Sadar, s/n, 31006 Pamplona, Navarra

Email: abcueli@cener.com

**ABSTRACT:** AiSoVol project consists on the development, manufacturing and testing in a controlled environment of a new concept of photovoltaic modules, conceived for facilitating their use as architectural elements. Thus, the modules will be fabricated by encapsulating its constituent electrical elements (cells and interconnections) with lamination techniques at low curing temperatures and using transparent thermoplastic instead of tempered glass, as well as binding materials structurally strengthened by a grid made of high-tenacity yarns, such as the ones used in sail technologies and thus avoiding the need for aluminum frames. This type of solution will provide, due to the nature of the constituent materials, lighter PV modules which can adapt easier to different surfaces. In this paper the methodology followed to define a suitable lamination process compatible to obtain reliable AiSoVol photovoltaic modules is described. Results achieved from materials and processes validation will pave the way for manufacturing the prototypes in next project phase.

**Keywords:** BIPV, encapsulation, polymer film, polycarbonate.

### 1. INTRODUCTION

At this initial phase of the AiSoVol project the focus has been put on the materials validation and its compatibility with processes involved in PV module manufacturing. Study of thermal, optical, physical, electrical and mechanical properties of several transparent thermoplastics raised the polycarbonate (PC) as best option to be used as superstrate for the AiSoVol BIPV modules. The rest of the package constituent materials are the encapsulant, PV cells, reinforcement grid made of high-tenacity yarns and the backsheet. The sublayer structure of this new BIPV product differs notably from that of conventional PV modules. What is investigated in this work is the degree of compatibility among combinations of these materials when laminated together employing the same techniques and equipment available at PV module manufacturing lines.

### 2. EXPERIMENTAL

Two different lines are used to study the feasibility of manufacturing reliable BIPV crystalline silicon modules based on alternative packaging materials. First approach is focused on defining the lamination process required to produce samples fulfilling minimum requirements regarding cure degree of the encapsulant, adhesion force between layers and visual aspect.

The second aspect studied in this work is the susceptibility of polymeric materials to suffer UV degradation when used for outdoor applications. This effect has been quantified by determining the evolution of the optical properties on artificially aged AiSoVol samples.

#### 2.1. Adjustment of lamination process

The lamination parameters must be set taking into account the limitations posed by the use of polycarbonate as front cover. The polymeric films used as encapsulant and backsheets are products widely used in conventional modules: the encapsulant used in this study is an ultra-fast cure commercial EVA (ethylene vinyl acetate) and the backsheet is a black colored PPE (polyester-polyester-EVA). The reinforcement grid is made of Polyester and HMPE (High Modulus Polyethylene) fibers embedded between two layers of polyester taffeta. A picture of this material is shown in figure 1.



**Figure 1.** Reinforcement grid

Regarding EVA, the curing process guidelines provided by manufacturers are generally specified for typical PV modules with glass as front cover and no information is available for other concept designs, so recommended curing times and temperatures must be reconsidered. Different sets of samples have been produced varying temperature and time in the lamination process. Polycarbonate sheets of two different thicknesses, namely 2 mm and 4 mm, have been used and lamination parameters have been specifically fixed for each material.

Three diagnosis tests are conducted to evaluate the quality of the samples obtained by changing lamination parameters (temperature and time):

a) **Visual appearance:** A detailed visual inspection is carried out to detect the presence of visual defects detectable by naked eye as bubbles, wrinkles, delaminations, cracks and any other conspicuous condition.

b) **Peel-off test:** The procedure followed to measure the adhesive interlayer force is based on standard ISO 813 which determines the adhesive strength between polymeric materials bonded on a rigid substrate.

Sample preparation includes pre-cutting a strip of 10 mm width and at least 100 mm length with a release sheet inserted into the bonded interface to be analyzed. The moving grip of the peel-off machine is fixed to the release sheet and the pull force is applied at a moving rate of  $(50 \pm 5)$  mm/min making an angle of  $90^\circ$  with the surface.

c) **Degree of cure of EVA:** Differential Scanning Calorimetry (DSC) technique is used to characterize the degree of crosslinking within EVA encapsulant. The residual enthalpy method, described in future standard as IEC 62788-1-6 Ed.1 currently in draft version, has been used as guidance. According to this method the exothermic peak (around  $130^\circ\text{C}$  to  $160^\circ\text{C}$  in our fast cure EVA) is due to the heat release from crosslinking reaction in EVA and the area below the curve relates to the percentage of un-crosslinked EVA. Therefore, the gel fraction of crosslinked EVA can be estimated using the following equation:

$$Ge = \frac{hu - ht}{hu} 100$$

Where,  $Ge$  represents the degree of cure for the enthalpy method (%),  $hu$  the measured specific enthalpy of EVA of an uncured reference specimen ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) and  $ht$  the measured specific enthalpy of EVA of the test specimen ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). The recommended low and high limits of integration stated in IEC document are  $100^\circ\text{C}$  and  $200^\circ\text{C}$  respectively, however the DSC analysis for the uncured EVA employed in this study shows that a  $(110-190)^\circ\text{C}$  range matches better with its specific thermal properties.

Although there are not standardized criteria regarding minimum EVA crosslinking degree and peel-off force, it is well accepted by PV industry that EVA gel content above 70% (measured using the primary method) and EVA-glass adhesion strength higher than 60 N/cm are good enough to obtain PV modules suitable for long term operation. The DSC technique used in this work is a secondary method that can be directly applied for quality control when the same EVA formulations are used. In case that DSC results of different encapsulants are to be compared the use of the primary method is recommended. DSC correlation to the gel content primary method can be obtained for encapsulants with curing degrees above 60% so this would be considered as minimum threshold for crosslinking analysis.

## 2.2. Optical characterization

Polycarbonate samples laminated with EVA have been optically characterized, including the measurement of the spectral transmittance (from 385 nm to 1600 nm) and the yellowness index (YI), which was obtained from it. This optical characterization allowed quantifying the influence of ultraviolet weathering on polycarbonate samples laminated with EVA.

## 3 RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1 Lamination process

The lamination process has been evaluated in two different steps depending on the number of layers present in each sample. Initially the process is validated for type A laminates which include the PC superstrate, two EVA foils and the backsheet (PPE). Once the laminate fulfills the quality requirements defined through visual, mechanical (peel test) and curing degree (DSC), the rest of the materials (solar cell, extra EVA sheet and reinforcement grid) are included in the package system to obtain the adequate process parameters for the type B multilayer configuration.



**Figure 2:** Multilayer architectures used for testing: laminate type A (left side) and type B (right side).

For the purpose of this work, all samples have been manufactured in a  $(16.5 \times 16.5)$  cm size format. The PC sheets studied are 2 mm and 4 mm thick consequently, different processes times and temperatures are used. They are shown in the text table.

Sample Code	Process	Package
16	$115^\circ\text{C}-20.5'$	Type A (2mm PC)
15	$125^\circ\text{C}-12.5'$	Type A (4mm PC)
17	$125^\circ\text{C}-30'$	Type A (4mm PC)

**Table I:** Process parameters and package description for the first set of laminates

Id. Code No.	Inspection Visual aspect	DSC (%) Cure degree	Peel test (N/cm)	
			PC- EVA	PPE- EVA
16	OK	37	84	60
15	OK	44	50	-
17	OK	48	100	65

**Table II:** Results on first set of laminates evaluated

Analysis of the diagnostic tests conducted over samples 15 to 17 shows that there is not enough crosslinking degree of the encapsulant for the selected process temperatures. Even increasing cycle time, the curing degree of EVA does not increase further. The peel test performed over two interfaces shows that minimum adhesion force of 50 N/cm has been achieved in all cases.

A second set of samples is laminated using higher temperatures for the curing cycle:  $135^\circ\text{C}$  for samples with 2 mm thick PC sheet and  $140^\circ\text{C}$  for the 4 mm thickness.

Sample Code	Process	Package
23	$135^\circ\text{C}-12.5'$	Type A (2mm PC)
24	$135^\circ\text{C}-17.5'$	Type A (2mm PC)
25	$135^\circ\text{C}-22.5'$	Type A (2mm PC)
26	$140^\circ\text{C}-12.5'$	Type A (4mm PC)

**Table III:** Process parameters and package description for the second set of laminates

Id. Code No.	Inspection Visual aspect	DSC (%) Cure degree	Peel test (N/cm)	
			PC- EVA	PPE- EVA
23	OK	60	99	-
24	OK	72	138	-
25	Bubbles	80	112	-
26	OK	69	120	117

**Table IV:** Results on second set of laminates evaluated

Characterization results from this second round (samples 23 to 26) show that the more suitable lamination processes for each package system are 135 °C and 17.5 minutes for the sample with 2 mm thick PC sheet and 140°C during 12.5 minutes for the one with the 4mm thick PC sheet. For these two recipes the DSC results meet the acceptance criteria established and the adhesion force PC-EVA is above the minimum required for glass-EVA interfaces. A maximum curing degree of 80% is reached for sample 25 but visual defects appear in the encapsulant. The adhesion force between encapsulant and backsheets has been measured only for one sample and the value is similar to the one obtained for EVA-PC.

Later on, these processes are reproduced for type B laminates including the rest of material layers and components in each package: solar cells, extra EVA sheet and reinforcement grid. The characterization of the samples is restricted, in this case, to visual inspection and DSC analysis of the EVA foil extracted between the reinforcement grid and the backsheets.

Sample Code	Process	Package
37	135 °C-17.5'	Type B (2mm PC)
38	140 °C-12.5'	Type B (4mm PC)

**Table V:** Process parameters and package description for the third set of laminates

Id. Code No.	Inspection Visual aspect	DSC (%)
		Cure degree
37	Bubbles	68
38	OK	60

**Table VI:** Results on third set of laminates evaluated

The sample laminated with the 2 mm thick PC sheet does not meet the visual criteria. The presence of bubbles indicates that temperature of the EVA layer bonded to the PC frontsheet is higher than before even though the same lamination process parameter has been used. Value of crosslinking degree attained for the EVA analyzed is however lower than the one measured for the type A sample laminated using the same parameters what evidences the presence of a temperature gradient across the stack during lamination process.

In order to determine the temperature differences among front (hotter) and back (colder) side of the encapsulant, irreversible temperature labels are placed at each interface during lamination. These indicators are valid to establish temperature ratings in 6 °C steps, the results show that differences among front and back EVA sheets could range from 1 °C to 5 °C.

A final tuning recipe is proposed to define proper lamination parameters for each complete package. The curing time is increased to 15 minutes for the sample with 4 mm thick PC to obtain higher crosslinking degree in the cold side of the sample. In the case of the package

with 2 mm thick frontsheet, the curing temperature is lowered to 131 °C and both configurations (type A and type B) are constructed to perform all diagnosis tests over them.

Sample Code	Process	Package
44	140 °C-15'	Type B (4mm PC)
45	131 °C-17.5'	Type A (2mm PC)
46	131 °C-17.5'	Type B (2mm PC)

**Table VII:** Process parameters and package description for the fourth set of laminates

Id. Code No.	Inspection Visual aspect	DSC (%) Cure degree	Peel test (N/cm)	
			PC- EVA	PPE- EVA
44	Bubbles	-	-	-
45	OK	58	114	97
46	OK	61	-	-

**Table VIII:** Results on fourth round of laminates tested

Visual defects appear between PC and solar cell (hotter EVA) in sample 44 so the previous process, at 140°C and 12.5 minutes, is chosen as the best one. No DSC analysis is carried out over this sample.

The results of peel-off test conducted on sample 45 fulfill minimum adhesion strength requirements for PC-EVA (114 N/cm) and PPE-EVA (97 N/cm) interlayers.

The laminate 46 obtained does not present bubbles and the curing degree measured by DSC is 61%. The picture below shows small bubbles detected around buses of sample 44.



**Figure 3:** Presence of bubbles in sample 44

Evaluation of type B packages for both PC thicknesses show that maximum degree of cure measured for the EVA bonded to the backsheets (colder side) is around 60%. The attempts to increase this value either using longer lamination times or higher temperatures, cause the bubbles to appear in the hotter side of EVA. In previous laminates experiments the presence of bubbles has been detected for a curing degree around 80%.

In order to estimate the curing degree of the encapsulant adhered to the frontsheet in type B packages where EVA extraction is not possible further analysis are performed.

In the following graph it is presented the curing degree attained for each lamination process used for type A laminates with 2mm thick PC sheet as front cover.

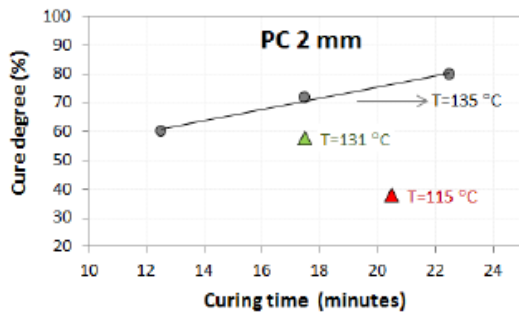


Figure 4: DSC results for different lamination process

Results presented in figure 4 show a linear behavior of curing degree versus lamination time for the same target temperature (135 °C). For the specific case studied, every 5 minutes step in curing time represents a 10% increment in crosslinking degree determined by DSC. On the other hand, a temperature decrement of 4 °C for the same lamination time (17.5 minutes) results in a 14% reduction of the curing degree what represents a 3.5% variation per °C. Taking into account that temperature differences between both EVA sides in type B packages could range from 1°C up to 5 °C it is expected curing degrees to vary accordingly.

### 3.2 Effect of ultraviolet weathering

Polymers often show high sensitivity to ultraviolet light, and as a result they suffer significant degradations when exposed to sunlight. With the aim of investigating durability aspects of outdoor exposure, 3 polycarbonate samples (2mm thick) laminated with EVA using different lamination conditions have received a total ultraviolet irradiation of 28 kWh/m<sup>2</sup> (94% corresponding to UVA and 6% to UVB). Polycarbonate side was placed facing the incident ultraviolet irradiation.

In the following table the lamination conditions for each sample together with the results of the optical characterization before and after the ultraviolet weathering test are shown. The transmittance (T) corresponds to the averaged values between 385nm and 1600nm.

Id.	Lamination	Before		After UV	
		T(%)	YI	T(%)	YI
07	125 °C 12.5'	86.2	2.50	85.8	3.18
08	120 °C 20.5'	86.0	2.59	85.9	3.05
09	115 °C 20.5'	85.8	2.51	85.9	3.09

Table IX: Lamination conditions and optical characterization of polycarbonate samples laminated with EVA before and after UV irradiation

As can be appreciated from the previous table, the initial transmittance shows minor differences among 3 different lamination conditions examined and slight decrease of this parameter is observed after the ultraviolet test. On the other hand, the yellowness index was clearly influenced by the ultraviolet weathering test, increasing its value for the 3 samples. The different lamination conditions did not show relevant influence in the optical characteristics of the 3 samples or in the ultraviolet test effect.

## 4 CONCLUSIONS

The BIPV module lamination processes for 2mm and 4mm thick polycarbonate (PC) frontsheets proposed in the AiSoVol project have been adjusted and validated.

A fine control of the lamination parameters has been achieved for each specific package so that time and temperature can be individually set in order to obtain specific curing degrees of the encapsulants.

Selected processes for each package system are 131 °C and 17.5 minutes for the sample with 2 mm thick PC sheet and 140°C during 12.5 minutes for the one with the 4mm thick PC sheet. The results of the peel test for type A samples laminated with these parameters are 114 N/cm in the PC(2mm)-EVA interlayer and 97 N/cm and 117 N/cm in the EVA-backsheet with 2mm PC as frontsheets. The peel forces measured in the type A sample with 4mm thick PC are 120 N/cm and 117 N/cm for the same interfaces. The degree of cure for the type B laminates is around 60% for both PC thicknesses analysed.

Temperature gradients through the complete package during lamination processes have been measured. Correlation between lamination parameters (time and temperature) and the curing degree for type A laminates with 2mm thick PC sheet has been quantified. An increase of one °C in lamination temperature implies 3.5% improvement in the curing degree and 5 minutes longer cycles at a fixed temperature represents 10% higher curing rates.

With the aim of investigating durability aspects of outdoor exposure, polycarbonate samples laminated with EVA have undergone an ultraviolet weathering test. In this case, 3 polycarbonate samples (2mm thick) laminated with EVA using different lamination conditions have received a total ultraviolet irradiation of 28 kWh/m<sup>2</sup>, (94% corresponding to UVA and 6% to UVB). As a result of this test the transmittance showed a slight decrease after the ultraviolet test. On the other hand, the yellowness index was clearly influenced by the ultraviolet weathering test, increasing its average value for the 3 samples. The different lamination conditions applied in this case did not show relevant influence in the optical characteristics of the 3 samples or in the ultraviolet test effect.

## 5 ACKNOWLEDGEMENT

The AiSoVol project is funded by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness, having been selected from R & D + i State Program oriented to societal challenges. The authors would like to acknowledge Marcos del Rio and Asier Turumbay for their support with chemical and mechanical measurements respectively.

## 5 REFERENCES

- [1] C. Hirschl *et al.*, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 116, pp. 203 – 218, (2013).
- [2] Wu, Dan. Doctoral Thesis: Investigation of the reliability of the encapsulation system of photovoltaic modules. <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/18051> (2016)
- [3] IEC FDIS 62788-1-6© IEC 2016. Materials used in PV modules-Measurement procedures. Part 1-6: Encapsulants-Test methods for determining the degree of cure in Ethylene-Vinyl Acetate

