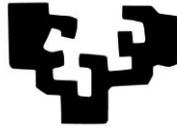




TIM

INSTITUTO
DE TECNOLOGÍA
MICROELECTRÓNICA
TEKNOLOGIA
MIKROELEKTRONIKOAREN
INSTITUTUA

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

Tesis Doctoral

Detección y Análisis de Grietas en Sustratos de Silicio Cristalino Originadas en Líneas Industriales de Fabricación de Células Solares

Tesis doctoral presentada para la
obtención del grado de Doctor

Autor: **Eneko Cereceda Moris**

Director: **José Rubén Gutiérrez Serrano**

2015

A mi familia

Agradecimientos

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la realización de esta Tesis Doctoral. Más concretamente al Instituto de Tecnología Microelectrónica y a todas las personas que forman o han formado parte de él durante todos estos años. De todos ellos he aprendido cosas y, de una u otra forma, son partícipes de este trabajo.

En primer lugar tengo que dar las gracias a mi director de Tesis Rubén Gutiérrez y al director del instituto Juan Carlos Jimeno por su ayuda y apoyo en la realización de todo el trabajo que se resume en este texto. Su apoyo ha ido más allá de sus obligaciones docentes y me han hecho crecer no solo como investigador, sino como persona.

Los estudios mecánicos han sido realizados por el personal de Centro de Modelado en Ingeniería Mecánica (CEMIM) y quiero agradecer más concretamente a Luntz Hermanns, Alberto Fraile y Josu Barredo por su trabajo en esta dura, y a veces tediosa, tarea.

Los trabajos de campo en líneas de producción se han llevado a cabo en las instalaciones de Isofotón S.A. Me gustaría agradecer la colaboración de todo el personal en estas pruebas y querría mencionar especialmente a Jesús Alonso, Miguel Ángel Vázquez, José Cándido Vázquez, José Antonio Montañez, Ángel Martínez y David J. Sánchez.

También quiero expresar mi agradecimiento al resto de docentes del TiM que siempre me han ayudado cuando les he necesitado; Carmen Ikarán, Federico Recart, Velia Rodríguez, Víctor Martínez, Fernando Hernando, Mari José Sáez, Joseba Ezquerria, Rosa Lago y Gorka Bueno.

No puedo olvidarme, y nunca lo haré, de mis compañeros de fatiga durante todos estos años. Gracias a Iratxe, Lourdes y Ken que tan buena acogida me dieron cuando no sabía nada de nada y con su infinita paciencia me fueron enseñando el mundo de la sala blanca. Gracias a los técnicos Pablo, Urko, Arkaitz e Ioritz por ir arreglando las cosas que yo iba rompiendo y por los “juguetes” que me han fabricado para mi investigación. Gracias a Jose Luis por su labor administrativa y su capacidad de moverse en los círculos burocráticos; cuántos que tantos quebraderos de cabeza me ha solucionado. Gracias a

Vanesa, Cristina, Nekane, Oskar, Aloña, Itziar, Jorge, Azam, Ahmed y Alena por compartir los momentos buenos y malos que hemos tenido que ir atravesando durante este tiempo. A todos ellos, compañeros y amigos, les tengo que agradecer su total disposición a echar una mano cada vez que era necesario y espero haberles ayudado yo a ellos en la misma medida. También debo dar las gracias a todas las personas que han pasado por el Instituto y de las que siempre he aprendido cosas nuevas; Efraín, Anahí, Jose Luis, Alejandro, Sebas, Gorka...

Agradecer también la paciencia y el apoyo que me han dado las personas más cercanas y las que más han sufrido este proceso. Gracias a mi esposa Irantzu y a mis hijos Urko y Ugaitz, a los que en ocasiones no he podido dedicarles el tiempo que merecían. Y gracias también a mis padres, sin cuyo esfuerzo hoy no estaría escribiendo estas líneas.

Por último, quisiera agradecer el interés, y a la vez pedir disculpas, a todas aquellas personas que he odiado (desde el cariño) cada vez que me preguntaban aquello de “¿Qué tal va la Tesis?”. A todas ellas un abrazo y contestarles, por fin, que muy bien.

Resumen

La industria fotovoltaica está haciendo un gran esfuerzo en la reducción de costes de fabricación, con el objetivo de alcanzar la paridad de red que impulse definitivamente la implantación de la energía solar a nivel global. La oblea de silicio cristalino es uno de los elementos más costosos del panel y muchas de las políticas de reducción de costes están orientadas a la misma; reducción del espesor, aumento de la superficie o reducción del índice de roturas. La rotura de una oblea de silicio en la línea de fabricación provoca una serie de costes añadidos al precio de la oblea en sí; hay que tener en cuenta el coste de los procesos aplicados a la oblea hasta el momento de su rotura, el coste de otras roturas que hayan sido provocadas por los restos de la primera o el coste de la posible parada de la línea productiva para eliminar estos restos.

El objetivo de esta tesis es comprender el proceso de fractura de las obleas de silicio cristalino en las líneas de fabricación de células solares fotovoltaicas y establecer las acciones necesarias para reducir el índice de roturas en estas líneas.

En un primer lugar se ha estudiado el proceso de la fractura frágil. El silicio cristalino, es un material frágil, y como tal, su fractura se produce sin apenas deformación plástica. La fractura frágil está caracterizada por la presencia de defectos que provocan que la ruptura se produzca a niveles de tensión mucho menores de los teóricos. La presencia de grietas, provoca una intensificación de tensiones en sus proximidades que facilitan la propagación de las mismas. Por lo tanto, la densidad y el tamaño de las grietas caracterizan la fragilidad de las obleas de silicio.

En las líneas de fabricación de células solares se ha comprobado que la mayor parte de las roturas se producen en los procesos que conllevan un alto nivel de estrés para las obleas. Este estrés se puede generar bien por procesos térmicos como en soldadura y quemado de pastas, o por procesos mecánicos como serigrafía y laminado de paneles. Pero para encontrar el origen de las grietas que han culminado con la rotura de la oblea hay que remontarse a pasos anteriores de la línea productiva.

Para detectar estos puntos en los que se dañan las obleas, se han procesado obleas muy delgadas por las mismas líneas. De esta forma, donde se generaban las grietas en las obleas más gruesas, se rompen estas obleas más delgadas. Con esta metodología se ha

observado que los procesos más críticos con las obleas son los procesos de manipulación de las mismas. Los alineadores activos y pasivos, los empujadores y la manipulación mediante ventosas son procesos que tienen una alta capacidad para generar grietas en las obleas y la rotura de las mismas.

Para evitar la rotura de las obleas en la línea de fabricación es necesario tener procesos que no generen grietas en las mismas. Pero, si por cualquier circunstancia, se daña una oblea, es necesario detectarla antes de que se provoque la rotura para extraerla del proceso productivo y que no genere pérdidas adicionales a las de la propia fractura. Con este objetivo se han analizado los diferentes métodos para la detección de grietas que se han encontrado en la bibliografía y se ha evaluado su capacidad para ser introducidos en las líneas de fabricación. De los métodos analizados, los potencialmente más adecuados para esta tarea son; los métodos de imagen luminiscente y el sistema de vibraciones ultrasónicas resonantes (RUV).

El sistema RUV se basa en las variaciones que se producen en las frecuencias de resonancia de las obleas cuando se produce una grieta en las mismas. Se han realizado varios estudios para evaluar la viabilidad de este sistema para la detección de grietas en línea.

En primer lugar se ha evaluado su capacidad para ser integrado en diferentes partes del proceso productivo, desde la oblea recién cortada, hasta la célula finalizada. Se ha observado cómo ciertos procesos influyen en los picos de resonancia. Los procesos de texturado y metalizado tienen una gran influencia en los mismos ya que modifican mecánicamente la oblea al modificar la superficie de la misma y al depositar contactos metálicos en ella.

Posteriormente se ha evaluado la capacidad del sistema para la detección de grietas. Uno de los mayores problemas para realizar estos estudios es la generación voluntaria de grietas en las obleas de forma controlada. Una vez analizadas las obleas con el sistema RUV, se han evaluado mecánicamente mediante ensayos de flexión para analizar la magnitud del daño que tenían.

En estos estudios se ha observado que la capacidad del sistema RUV para la detección de grietas es muy limitada ya que es muy difícil identificar las obleas dañadas a menos que el daño sea muy grande.

Debido a que en el instituto se empezó a trabajar con estructuras de células de contactos posteriores, y que surgió la problemática de la gran fragilidad de las mismas, se creó otra línea de investigación enfocada en el análisis del daño generado en estas obleas. Tanto en la célula Emitter Wrap Through (EWT) como en la Metal Wrap Through (MWT), se crea una matriz de agujeros en la superficie de la célula para conseguir que los portadores generados en el emisor frontal lleguen hasta los contactos situados en la parte posterior de las células. La generación de estos agujeros debilita estructuralmente las obleas y se ha analizado tanto el daño introducido como diferentes técnicas para la reducción del mismo.

La presencia de los agujeros provoca una concentración de tensiones a su alrededor que debilita la estructura. El tamaño de los agujeros y la densidad de los mismos son los parámetros fundamentales que caracterizan este debilitamiento. Pero se ha observado que, al crear una matriz de agujeros, el daño generado es mayor del que se podía esperar de la propia generación de los agujeros.

A parte de la presencia de los agujeros, el proceso láser para la generación de los mismos, introduce un daño adicional. Para la reducción de este daño, se ha estudiado el efecto de diferentes procesos químicos y se ha comprobado que un baño alcalino basado en $NaOH$ de corta duración mejora notablemente la estabilidad mecánica de las obleas.

Este estudio aporta herramientas para evitar la generación accidental de grietas en las obleas de silicio, detectar obleas dañadas y retirarlas de la cadena productiva, y reducir el daño mecánico que generan ciertos procesos sobre las obleas. De esta forma es posible reducir el índice de roturas en la fabricación de células solares, reduciendo a su vez los costes de fabricación y aumentando el rendimiento de las líneas de producción.

Laburpena

Industria fotovoltaikoa fabrikazio-kostuak murrizteko ahalegin handia egiten ari da, sarearen parekotasunera iristeko eta eguzki-energiaren ezarpena behin betiko bultzatzeko. Siliziozko olata paneleko elementu garestienetako bat da, horren ondorioz, kostu-murrizketa politika asko olata horietara zuzenduak dira; lodiera murrizteko, gainazala handitzeko edo hausкета-indizea gutxitzeko. Siliziozko olata bat fabrikazio-lerro barruan hautsiz gero, olatak berak duen prezioa baino kostu handiagoa eragin dezake; izan ere, kontuan hartu behar dira olata apurtu arteko prozesuen kostuak, olata horren aztarnak beste olata batzuk apurtu ditzakeela (eta horrek eragindako kostuak) edo aztarnak garbitzeko fabrikazio-lerroa gelditzearen kostua.

Tesi honen helburua siliziozko olataren hauste-prozesua ulertzea da, eguzki zelulen fabrikazio-lerroaren testuinguruan, eta hausкета-indizea murrizteko beharrezko neurriak ezartzea.

Lehenbizi, haustura hauskorren prozesua aztertu da. Izan ere, silizioa material hauskorra da, eta haren haustura, ia deformazio plastikorik gabe gertatzen da. Haustura hauskorra akatsen presentziaz bereizten da. Pitzaduren presentziak, estresa areagotzen du haren inguruan. Hori dela eta, maila teorikoa baino tentsio askoz txikiagorekin gertatzen da haustura. Pitzaduren tamainak eta dentsitateak siliziozko olataren hauskortasuna bereizten du.

Eguzki-zelulen fabrikazio-lerroan apurketa gehienak estres handiko prozesuetan gertatzen direla aztertu da. Estres hau prozesu termikoek (soldadurak edo ore-erreketak) eta prozesu mekanikoek (serigrafiak edo panel-ijezketak) eginga izan daiteke. Baina pitzaduren sorrera aurkitzeko, fabrikazio-lerroko aurreko prozesuak ikertu behar dira.

Olatak kaltetzen direneko tokiak bilatzeko, oso olata meheak prozesatu dira fabrikazio-lerroan. Horrela, olata arruntetan pitzadurak eragiten dituzten pausoek, olata mehe hauek apurtuko dituzte. Metodologia honen bitartez, olatak gehien kaltetzen dituzten prozesuak, hauek maneiatzen dituztenak direla ikusi da: lerrokagailu aktiboek eta pasiboek, bultzagailuek eta bentosa-maneiagailuek pitzadurak sortzeko gaitasun handia dute.

Olaten haustura ekiditeko, pitzadurarik eragiten ez duten prozesuak eduki behar dira. Baina, olata batean pitzadura bat sortzen bada, hau detektatu behar da, hautsi baino lehen fabrikazio-lerrotik ateratzeko eta galera gehigarriak ez eragiteko. Helburu honekin, pitzadurak detektatzeko sistemak aztertu dira, bibliografian aurkiturikoak, bai eta fabrikazio-lerroan txertatzeko duten gaitasuna ebaluatu. Azterturiko sistemetak, erraztasun handiena dutenak honako hauek dira: lumineszentzia-irudizko metodoak eta erresonantzia-ultrasoinu bibrizio-sistema (RUV).

Olata batek pitzadura bat daukanean bere erresonantzia-frekuentziak aldatu egiten dira. RUV sistemak aldaketa hauek aztertzen ditu pitzaturiko olatak detektatzeko. Fabrikazio-lerroan pitzadurak detektatzeko metodo honen bideragarritasuna aztertzeko zenbait ikerketa egin dira.

Lehenik eta behin, RUV sistemak fabrikazio-lerroaren leku ezberdinetan sartzeko daukan gaitasuna aztertu da; zerraz ebakitako olatatik hasita, bukatutako eguzki-zelularaino. Zenbait prozesuk erresonantzia-tontorrek aldatzeko gaitasuna daukate. Gainazalaren akabera eta metalizatze-prozesuak, adibidez, olaten gainazala mekanikoki aldatzen dutenez, eragin gehien daukaten prozesuak dira. Lehenengoak, gainazalean piramideak sortzen dituelako eta bigarrenak metal-kontaktuak gainezartzen dizkiolako.

Ondoren, RUV sistemak pitzadurak detektatzeko duen gaitasuna aztertu da. Hau burutzeko arazorik handienetarikoa bat kontrolatutako pitzadurak nahita sortzea izan da. Olatak, RUV sistemaren bitartez aztertu ondoren, flexio-saiakuntzen bidez mekanikoki aztertu dira pitzaduraren tamaina ezagutzeko.

Ikerketa hauetan RUV sistemak pitzadurak detektatzeko nahiko gaitasun urria duela ikusi da. Pitzaturiko olatak detektatzea oso zaila da, baldin eta pitzadurak oso handiak ez badira.

Institutuan atzealdeko kontaktuko zelulekin ikertzen hasi zenez, eta haien hauskortasun-arazoa agertu zenez, beste ikerketa lerro bat sortu zen kalte mekanikoak aztertzeko. Emitter Wrap Through (EWT) eta Metal Wrap Through (MWT) zeluletan, zulo-matrizea sortzen da olatetan. Aurrealdeko aurpegiko igorlean sortzen diren partikula eramaileak atzealdeko aurpegiko kontaktuetara iristeko egiten dira zuloak. Zulo hauek egiteak olata hauskortzen du. Sortutako kaltea eta kalte hori murrizteko teknikak aztertu dira.

Zuloen presentziak estres kontzentrazioa eragiten du haien inguruan, eta hortaz, olatak ahuldu. Zuloen tamaina eta dentsitatea dira ahulezia hori bereizten duten parametro garrantzitsuenak. Baina, zulo-matrizea sortzean egindako kaltea, teorikoa baino handiagoa da.

Zuloen presentziaz aparte, hauek gauzatzeko erabiltzen den laser-prozesuak gehigarriko kalte bat gaineratzen dio prozesuari. Kalte hau murrizteko zenbait prozesu kimiko aztertu dira: *NaOH*-n oinarritako bainu alkalino labur batek olaten egonkortasun-mekanikoa nabarmenki hobetzen duela aztertu da.

Tesi honek erremintak ematen ditu siliziozko olatetan ustekabeko pitzadurak sortzea eragozteko, kaltetutako olatak detektatu eta fabrikazio-lerrotik ateratzeko eta zenbait prozesuak olatetan eragindako kalteak murrizteko. Horrela, fabrikazio-lerroan eguzki-zelulen haustura-indizea murriztu daiteke, eta horren ondorioz fabrikazio-kostuak txikiagotu eta fabrikazio-lerroen etekina handitu.

Abstract

Photovoltaic industry is making great efforts in reducing manufacturing costs with the goal of achieving grid parity to definitely impulse solar energy implantation. Crystalline silicon wafer is one of the most expensive elements of a solar module and many cost reduction policies are focused to it; thickness reduction, area increase or breakage rate reduction. The breaking of a silicon wafer in the manufacturing line implies an important economical loss. To the cost of the wafer, it must be added the cost of processes applied to the wafer until breakage, fracture of other wafers caused by silicon debris and a possible line stop in order to cleaning.

The aim of this thesis is to understand the breaking process of crystalline solar cells in manufacturing lines and to establish the conditions for reducing the breaking rates.

First of all the brittle fracture process has been studied. Crystalline silicon is a brittle material, and its breakage is produced with almost no plastic deformation. The brittle fracture is characterized by the presence of defects that cause the breakage to occur at much lower stress levels than expected. The presence of cracks causes a stress concentration in the surrounding area that makes possible its propagation. Therefore, the density and size of cracks characterizes silicon wafers strength.

In solar cells manufacturing lines it has been found that most breakages occur in processes that involves a high level of stress for the wafers. This stress can be generated by thermal processes such soldering and contact firing, or by mechanical processes such screen printing and module lamination. To find the origin of the cracks that have end up with wafer breaking, we must go back to previous steps in the manufacturing line.

To detect the steps at which wafers are damaged, very thin wafers were processed along the same lines. Hence, the processes that generate cracks in thick wafers, would break these thinner wafers. With this methodology, it has been observed that manipulation processes are the most critical ones. Passive and active aligners, pushers and vacuum manipulators are processes that have a high probability to generate cracks on the wafers and their breakage.

To avoid breakage of the wafers in the manufacturing line it is necessary to have processes that do not generate cracks. However, if a wafer is damaged, it is necessary to detect it before it breaks. Detecting and removing this damaged wafer before it brakes could prevent stopping production process and generating additional losses. Several methods from bibliography for crack detection have been analyzed and their capacity to be introduced into the manufacturing lines has been assessed. From the methods analyzed, we have found the most suitable for this task; the luminescent image methods and the resonance ultrasonic vibration system (RUV).

RUV system is based on the deviations that occur in the resonance peaks parameters of the wafer when it has a crack. Several studies have been carried out to assess the viability of this system for detecting cracks in the manufacturing line.

First, its capacity to be integrated into different parts of the production process has been assessed; from the as-cut wafer to the finished cell. It has been observed that certain processes manipulate the resonance peaks. Texturing processes and metallization have a great influence on the peaks because the wafer is mechanically modified by modifying the surface or depositing metal contacts on it.

Subsequently, we have evaluated the capability of the system to detect cracks. One of the biggest problems for these studies is the controlled generation of cracks in the wafer. Once the wafers were analyzed with the RUV system, they were evaluated with mechanically bending tests to determine the extent of damage.

In these studies it has been observed that the capability of the RUV system for crack detection is quite limited because it is very difficult to identify damaged wafers unless this damage is very large.

Since the institute started to work with back contact cell structures, and the problem of the fragility of these emerged, another research line was focused on the analysis of the damage generated in the wafers when these structures are created. On Emitter Wrap Through (EWT) and the Metal Wrap Through (MWT) cells, a matrix of holes is created in the surface of the cell, to facilitate the collection of the carriers generated in the front emitter by the metallic contact placed in the rear surface. The generation of these holes structurally weakens the wafer and several techniques have been analyzed for the reduction of this damage

The presence of the holes creates a stress concentration area around them, weakening the structure. The size of the holes and their density characterizes this weakening. But it has been observed that, when this matrix of holes is created, the generated damage is greater than it could be expected from presence of the holes.

Besides the presence of the holes, the laser process for their formation, introduces additional damage. To reduce this damage, we have studied the effect of different chemical processes and it has been found that, a short alkaline bath based on *NaOH* improves mechanical stability of the wafers.

This study provides tools to prevent accidental generation of cracks in the silicon wafers, to detect and remove damaged wafers in the production chain, and to reduce mechanical damage generated by certain processes on the wafers. This enables to reduce the breakage rate in solar cells manufacturing lines, reducing manufacturing costs and increasing the yield of the production lines.

Índice de Contenidos

1	Introducción	1
1.1	Situación energética mundial	1
1.1.1	Situación energética mundial generación eléctrica	2
1.2	Situación energética y generación eléctrica en Europa	5
1.3	Situación energética y generación eléctrica en el estado español	7
1.4	En busca de la competitividad.....	9
1.5	Reducción del coste de la energía fotovoltaica	12
1.5.1	Ahorro en el silicio.....	13
1.5.2	Reducción del índice de roturas	14
2	Rotura de las Células Solares.....	19
2.1	Fractura del silicio.....	19
2.1.1	Concentración de tensiones en las grietas	20
2.1.2	El Balance de Energía de Griffith	21
2.1.3	Análisis atómico de la fractura.....	24
2.1.4	Tasa de liberación de Energía	25
2.1.5	La inestabilidad y la curva R.....	27
2.2	Origen de las grietas en las obleas de Silicio	29
2.2.1	Daño intrínseco en las obleas de silicio	29
2.2.2	Detección de puntos críticos en las líneas de fabricación actuales.....	33
3	Detección de Grietas en Obleas de Silicio	43
3.1	Necesidad de detección de grietas.....	43
3.2	Métodos de detección de grietas en obleas de silicio.....	44

3.2.1	Test de Flexión	44
3.2.2	Estresado con luz.....	48
3.2.3	Microscopio de Escaneo Acústico	48
3.2.4	Termografía Ultrasónica Lock-in.....	50
3.2.5	Transmisión Óptica	53
3.2.6	Imagen Luminiscente	55
3.2.7	Sistema de Resonancia de Vibraciones Ultrasónicas.....	61
4	Evaluación del Sistema RUV para la Detección de Grietas	65
4.1	Viabilidad RUV en Fabricación.....	65
4.1.1	Estudio realizado	66
4.1.2	Análisis de los Resultados.....	72
4.2	Efecto del espesor en la medida del RUV	75
4.2.1	Preparación de las muestras	76
4.2.2	Medidas realizadas	76
4.2.3	Resultados	77
4.2.4	Análisis de los resultados	81
4.3	Detección de grietas generadas por láser	83
4.3.1	Generación de grietas mediante láser.....	84
4.3.2	Medidas realizadas	85
4.3.3	Resultados	85
4.4	Detección de grietas generadas mecánicamente	88
4.4.1	Equipo de generación de grietas	88
4.4.2	Realización del estudio	89
4.4.3	Resultados	90
4.4.4	Análisis de los resultados	94

4.5	Detección de grietas de diferente tamaño generadas por láser.....	95
4.5.1	Estudio realizado.....	95
4.5.2	Resultados.....	96
4.5.3	Análisis de los resultados.....	101
4.6	Comparativa de equipos RUV.....	102
4.6.1	Preparación de muestras.....	102
4.6.2	Medidas Realizadas.....	103
4.6.3	Análisis de los resultados.....	104
4.7	Conclusiones sobre el sistema RUV.....	106
5	Evaluación Mecánica de Estructuras de Células Solares de	
	Contactos Posteriores.....	107
5.1	Introducción.....	107
5.2	Estudio Mecánico de Materiales Frágiles.....	109
5.2.1	Ensayo de Materiales Frágiles. Test de flexión.....	110
5.2.2	Obtención de la tensión de fractura.....	113
5.2.3	Análisis estadístico de los resultados. Modelo de Weibull.....	114
5.2.4	Aplicación de un estudio mecánico sobre estructuras de contactos posteriores.....	117
5.3	Daño generado sobre una célula al crear una estructura de contactos posteriores EWT.....	118
5.3.1	Preparación de muestras.....	119
5.3.2	Estudio mecánico.....	121
5.3.3	Resultados y conclusiones.....	123
5.4	Efecto de la densidad de agujeros.....	124
5.4.1	Preparación de las muestras.....	124
5.4.2	Estudio mecánico.....	126

5.4.3	Resultados y conclusiones.....	128
5.5	Efecto de la duración del segundo decapado	129
5.5.1	Preparación de muestras.....	129
5.5.2	Estudio mecánico	130
5.5.3	Resultados y conclusiones.....	131
5.6	Efecto del tamaño de los agujeros.....	133
5.6.1	Preparación de muestras.....	133
5.6.2	Estudio mecánico	136
5.6.3	Resultados y conclusiones.....	137
5.7	Efecto de diferentes tratamientos para la eliminación del daño tras taladrado.....	138
5.7.1	Preparación de muestras.....	139
5.7.2	Estudio mecánico	144
5.7.3	Resultados y conclusiones.....	144
5.8	Conclusiones	147
6	Conclusiones y Líneas Futuras	149
6.1	Conclusiones	149
6.2	Líneas Futuras	154
	Bibliografía	155
	Publicaciones y Patentes	163

1 Introducción

1.1 Situación energética mundial

Todas las sociedades requieren de energía para satisfacer las necesidades humanas (confort, cocinado de alimentos, iluminación, movilidad, comunicación, etc.) y para los procesos productivos. La situación energética mundial está basada fundamentalmente en la utilización de combustibles fósiles. En 2008, prácticamente el 85% de la energía utilizada provenía del petróleo (34,6%), del gas (22,1%) y del carbón (28,4%). Tan alta dependencia de los combustibles fósiles es altamente preocupante debido a:

- La escasez de petróleo: Los recursos petrolíferos de fácil extracción se van agotando con lo que cada vez es más difícil y caro extraerlo. Esto, unido a que los países productores se encuentran principalmente en una zona de escasa estabilidad política, hace que el precio del crudo lleve una tendencia alcista desde hace unos cuantos años.
- Dependencia energética: La producción de combustibles fósiles está limitada a unos pocos países. Entre Arabia Saudí, Estados Unidos, Rusia, China, Canadá, Irán, Emiratos Árabes, Irak, Méjico y Kuwait producen dos tercios del petróleo consumido en el mundo. La mayoría de los países desarrollados son importadores y su sistema energético es muy dependiente de los países productores.
- La concienciación ecológica de las sociedades desarrolladas: El problema del calentamiento global es un hecho del que cada vez se es más consciente. La única solución realista a este problema es la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero que se producen durante la combustión de combustibles fósiles. Para ello es necesario, reducir el consumo de este tipo de fuentes energéticas y buscar alternativas renovables a las mismas.

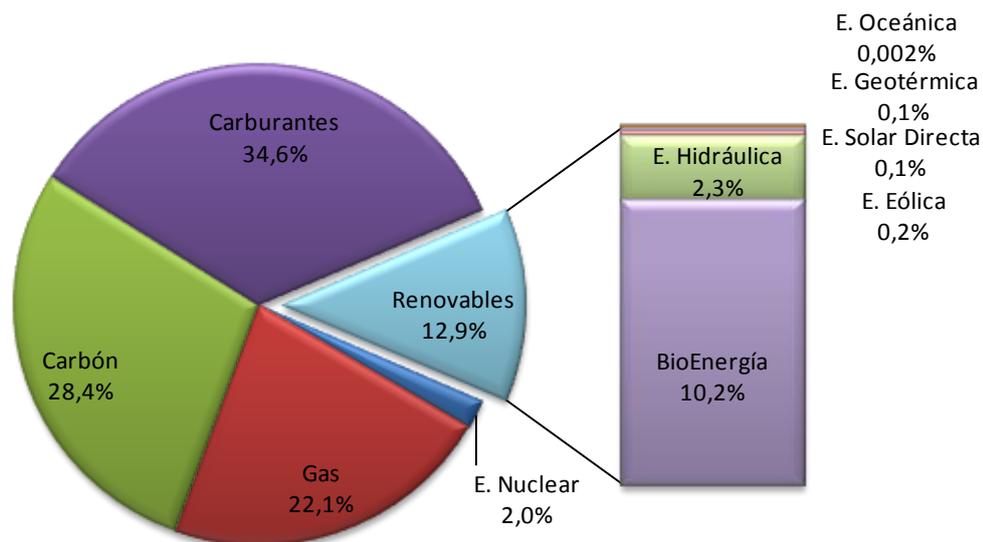


Figura 1.1 - Estructura de fuentes de energías sobre el total de suministro de energía primaria en 2008 [1]

En cuanto a la utilización de energías renovables como fuente primaria de energía observamos que su proporción ascendía al 12,9% del total. El principal origen de esta energía es la biomasa, siendo utilizada en su mayor parte (~60%) como combustible para cocinar o calefacción en países en desarrollo, aunque también se está observando un rápido incremento del uso de biomasa moderna como pueden ser los biocombustibles.

Entre el resto de energías renovables, la energía hidráulica supone el 2,3% de la energía primaria consumida, la energía eólica el 0,2%, la energía geotérmica el 0,1% y la energía solar directa el 0,1%.

1.1.1 Situación energética mundial generación eléctrica

La contribución de las energías renovables a la generación eléctrica está resumida en la siguiente figura.

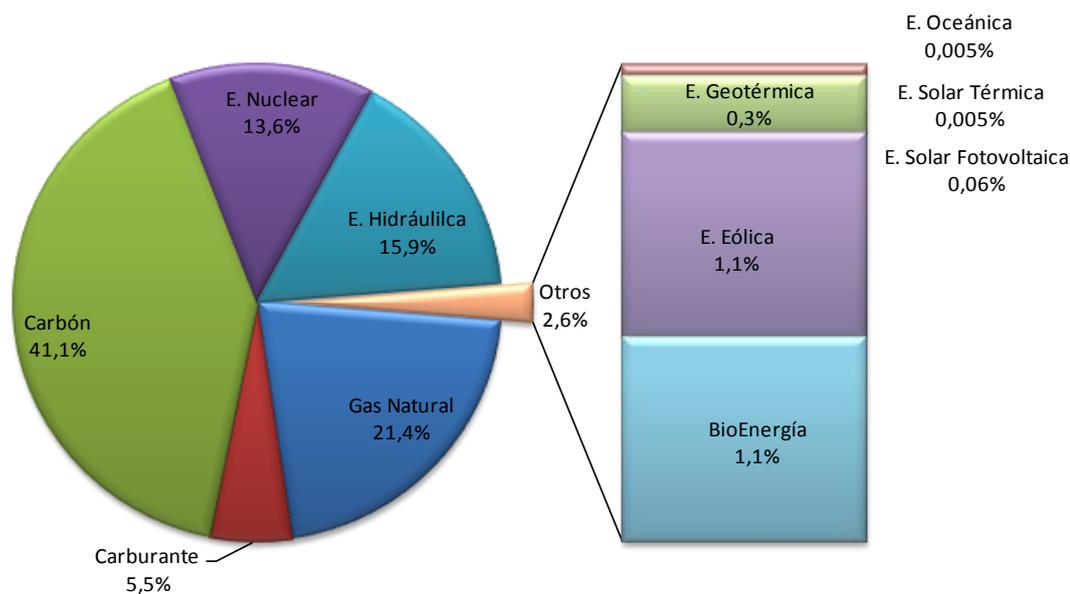


Figura 1.2 - Estructura de fuentes de energía primaria en la generación de energía eléctrica en 2008 [1]

La distribución de generación de energía eléctrica se puede dividir en tres grandes grupos:

- Combustibles fósiles (68%)
- Energía nuclear (13,6%)
- Energías Renovables (18,4%) proviniendo la mayor parte de ésta de la energía hidráulica (15,9%). El papel de la energía solar fotovoltaica aún era muy pequeño en este reparto (0,06%).

Aunque la aportación de las energías renovables tanto al sector eléctrico como en energía primaria es relativamente pequeña, su crecimiento se ha acelerado en los últimos años. Así, en 2009, aún con la crisis financiera a nivel mundial, la capacidad de las energías renovables ha seguido creciendo rápidamente. La energía eólica ha aumentado un 32% con 38 GW nuevos, la hidráulica un 3% con 31 GW y la energía fotovoltaica conectada a red a crecido un 54% con 7,5 GW nuevos.

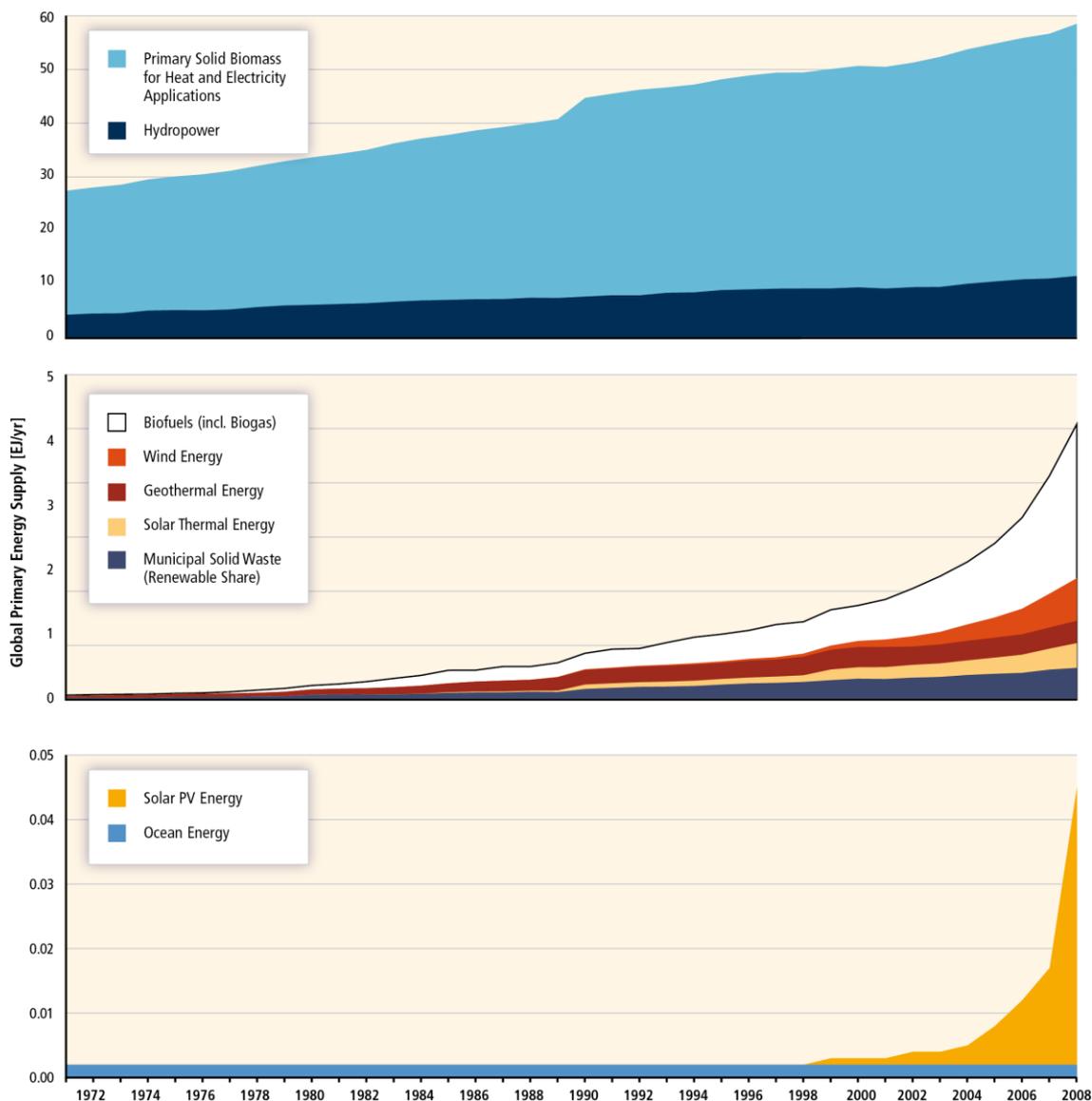


Figura 1.3 – Evolución histórica de la aportación de las diferentes energías primarias [1]

De hecho, de los aproximadamente 300 GW de capacidad generación de energía eléctrica instalados en los años 2008 y 2009, casi la mitad (140 GW) fueron aportaciones de las energías renovables.

El potencial teórico de las energías renovables excede sobradamente toda la energía usada por todas las economías del planeta, y no solo eso, sino que excede toda la energía que se podría llegar a necesitar en el futuro. De entre todas las fuentes de energía renovables, destaca el potencial técnico de la energía solar, ampliamente superior al resto.

1.2 Situación energética y generación eléctrica en Europa

El peso de la energía solar fotovoltaica en el mix energético de la Unión Europea es mucho más importante que en el resto del mundo. Si nos fijamos en la energía solar fotovoltaica instalada en las diferentes zonas del planeta se puede comprobar claramente el alto peso de los países de la Unión Europea.

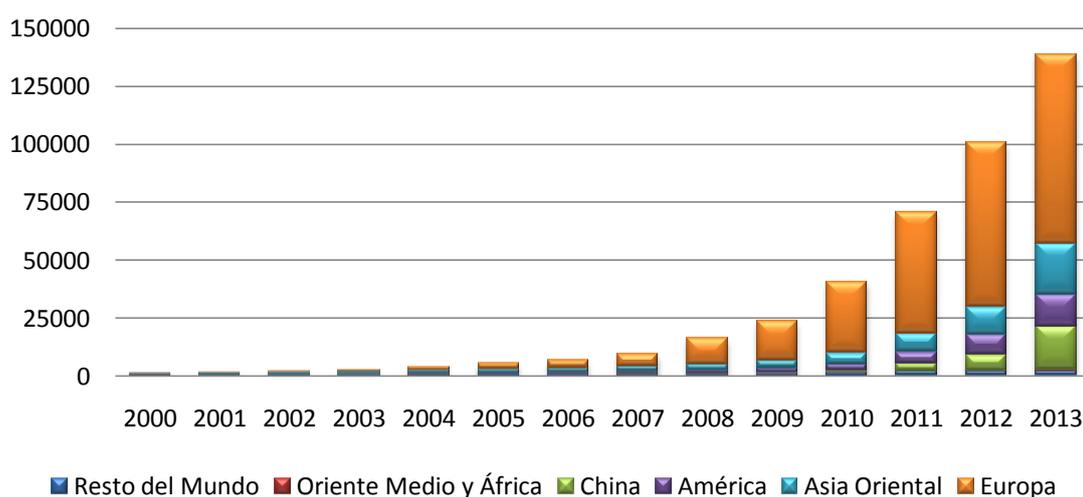


Figura 1.4 - Evolución acumulada de la capacidad fotovoltaica instalada (MW) [2]

En el año 2013 la producción energética debida a la fotovoltaica fue de más de 80 TWh [3] en Europa, aumentando en un 17% la producción del 2012 (68 TWh) [4]. Este ritmo de crecimiento es inferior al que se ha visto en los últimos años ya que del 2011 al 2012 el crecimiento fue del 50% (de 44,8 TWh a 68 TWh) y del 2010 al 2011 de casi el 100% (de 22,6 TWh a 44,8 TWh) [5]. Aún con esta ralentización del desarrollo fotovoltaico, esta fuente de energía ha contribuido al 2,4% de la producción de energía eléctrica de toda la Unión Europea.

Tras dos años seguidos siendo la fuente de energía más instalada en Europa, en el 2013 la energía fotovoltaica ha pasado a la segunda posición muy cerca de la energía eólica. En la Figura 1.5 se puede observar que, mientras el ritmo de instalación de energía eólica se mantiene prácticamente constante desde 2011, la energía fotovoltaica ha caído a la mitad en el mismo periodo.

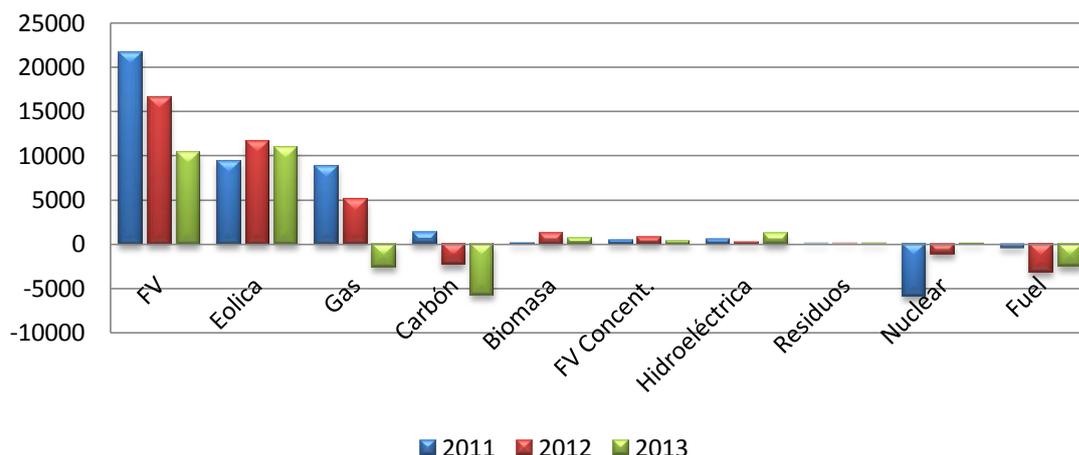


Figura 1.5 - Balance de potencia instalada en Europa entre los años 2011 y 2013 (MW) [6], [7], [2]

La contribución de los diferentes estados de la Unión Europea es muy diferente, siendo únicamente 9 los estados que aportaron en 2013 más de 1 TWh (Alemania (30), Italia (22,1), España (8,3), Francia (4,9), Grecia (3,6), Bélgica (2,3), Republica Checa (2,1), Gran Bretaña (1,8) y Bulgaria (1,3)) y aportando entre los tres primeros más del 75% de la electricidad producida por energía solar fotovoltaica [3].

Se espera que la evolución del mercado fotovoltaico en Europa siga con una tendencia creciente pero, debido a la crisis financiera y a unas políticas más restrictivas en el campo de las energías renovables, el ritmo de crecimiento ha disminuido.

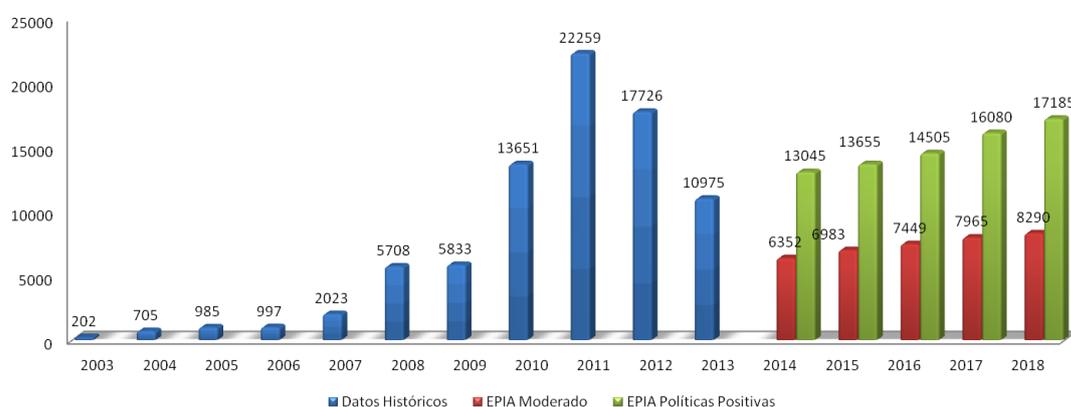


Figura 1.6 - Evolución histórica y escenario futuro del mercado anual fotovoltaico en Europa (MW) [2]

1.3 Situación energética y generación eléctrica en el estado español

La contribución de la energía solar al consumo total de energía primaria en España en el 2013 fue del 2,4% (energía solar fotovoltaica 0,6%), pero su contribución a la generación de energía eléctrica fue del 4,6% con 13.111GWh de los cuales 8.258GWh (2,9%) fueron producidos por energía solar fotovoltaica y 4.853GWh (1,7%) por energía solar termoeléctrica.

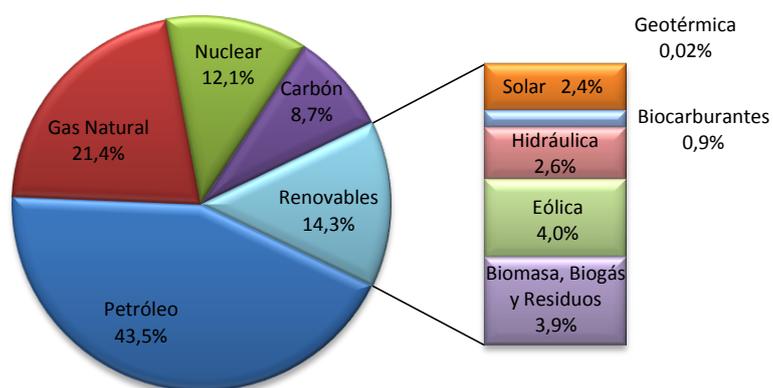


Figura 1.7 - Estructura energía primaria en España en 2013 [8]

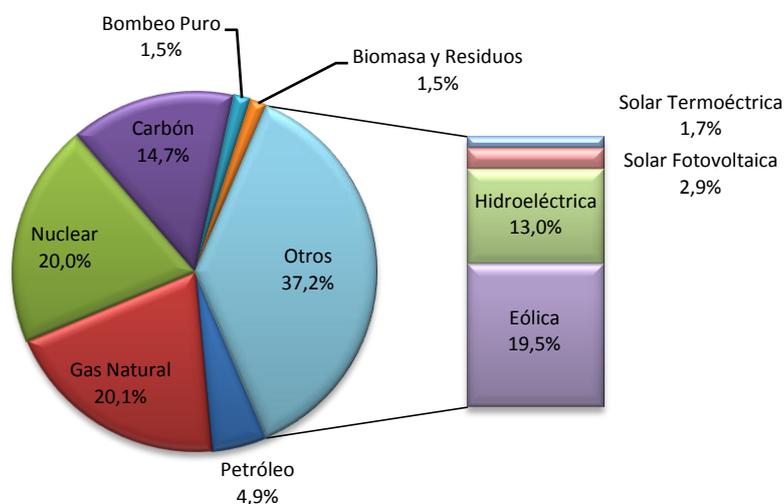


Figura 1.8 - Estructura de producción eléctrica en España en 2013 [8]

La situación de la energía solar fotovoltaica en el estado español no es buena debida a las restricciones a las que se ve sometida (reducción de ayudas y marco

regulatorio incierto). Se ha pasado de un escenario en el 2010 en el que era la 2ª a nivel mundial en potencia instalada a ser la 4ª en el 2011 y la 6ª en 2012.

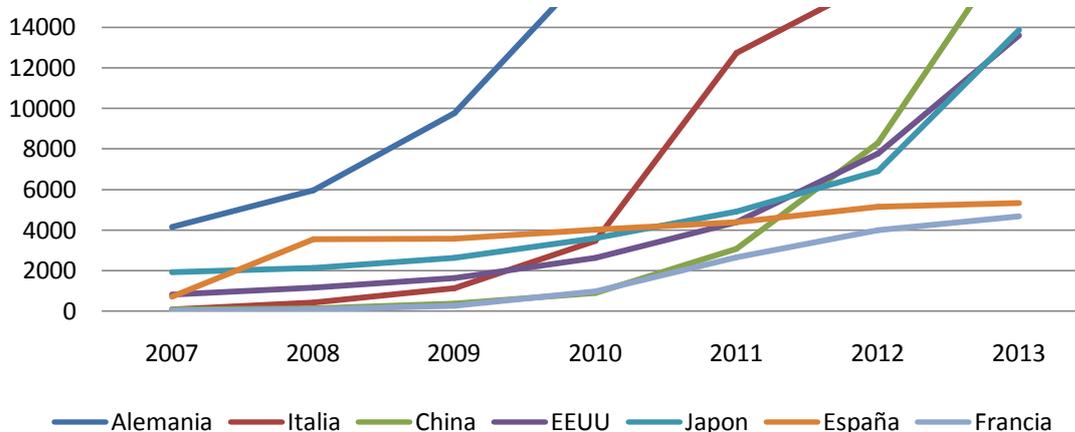


Figura 1.9 - Potencia fotovoltaica acumulada (MW) [7][6]

	Alemania	Italia	China	EEUU	Japon	España	Francia	Belgica	Australia	R. Checa
2007	4.170	93	100	831	1.917	724 (3º)	26	27	46	3
2008	5.979	432	145	1.173	2.147	3.568 (2º)	84	108	58	64
2009	9.785	1.144	373	1.650	2.627	3.588 (2º)	269	627	137	462
2010	17.193	3.470	893	2.628	3.618	4.029 (2º)	988	1.044	524	1.952
2011	24.678	12.754	3.093	4.383	4.914	4.400 (4º)	2.659	2.018	1.298	1.959
2012	32.441	16.361	8.300	7.777	6.914	5.166 (6º)	4.003	2.650	2.412	2.072
2013	35.715	17.928	18.600	13.600	13.883	5.340 (6º)	4.673	2.983	3.242	2.175

Tabla 1.1 - Potencia fotovoltaica acumulada (MW) [7][6][2]

El sector llevaba una tendencia positiva con crecimientos constantes y cercanos al 100% anual en la potencia instalada desde principios del siglo XXI pero en el año 2008 hubo un cambio en la legislación con la entrada en vigor del Real Decreto 1578/2008 [9] y en las instalaciones que se conectasen a la red a partir de esa fecha la remuneración del KWh producido descendió de forma importante. Es por ello que se produjo un boom ese año para tener instaladas el mayor número de MW antes de la fecha efectiva para seguir cobrando el KWh producido con la tarifa anterior al Real Decreto. A partir de ese momento el mercado se paralizó.

El objetivo de la nueva reglamentación era frenar el crecimiento de esta fuente de energía porque el pago de las primas estaba creando un agujero en las cuentas públicas debido a que el número de instalaciones había crecido muy por encima de las expectativas del gobierno. Con la nueva ley, el gobierno iba a ser capaz de controlar la capacidad que se iba a instalar cada año.

Las previsiones no son muy alentadoras pero la paridad de red está muy cerca y es probable que, una vez se alcance, el desarrollo del sector vuelva a relanzarse.

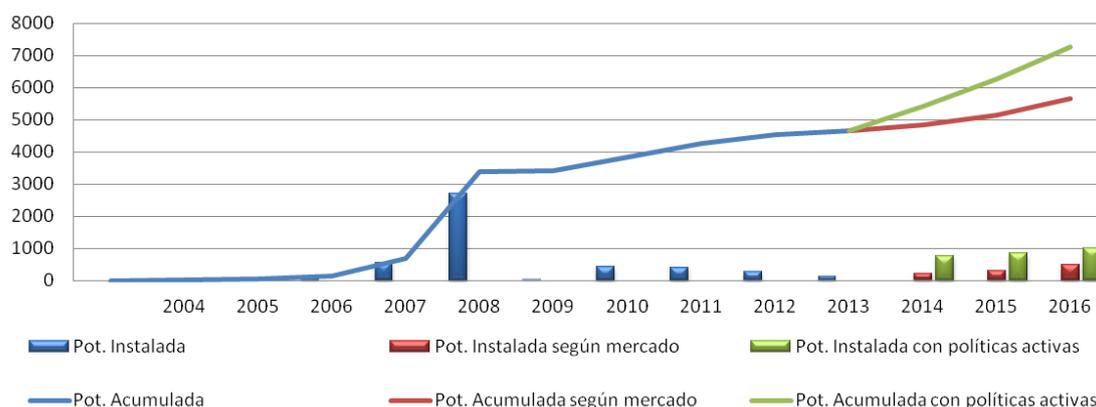


Figura 1.10 - Datos históricos y expectativas de potencia instalada y acumulada en España [6], [10]

1.4 En busca de la competitividad

Cuando se habla de la competitividad de la energía fotovoltaica en el mercado eléctrico, hay que entender esta competitividad de dos maneras diferentes:

- Paridad dinámica de red: se define como el momento en el cual, en un segmento particular del mercado y en un país concreto, el valor actual de los beneficios a largo plazo (considerando ingresos, ahorros, coste y depreciación) de un suministro eléctrico proveniente una instalación fotovoltaica es igual a los costes a largo plazo de recibir energía eléctrica de la red producida de forma tradicional.
- Competitividad de valor de generación: se define como el momento en el cual, en un determinado país, añadir la fotovoltaica a la cartera de generación se convierte en tan atractivo desde el punto de vista del

inversor que invertir en una tecnología tradicional basada en combustible fósil.

El instante en que estos eventos sucedan depende de la reducción de costes de la generación de energía eléctrica por medio de instalaciones fotovoltaicas y del incremento del precio de la energía eléctrica.

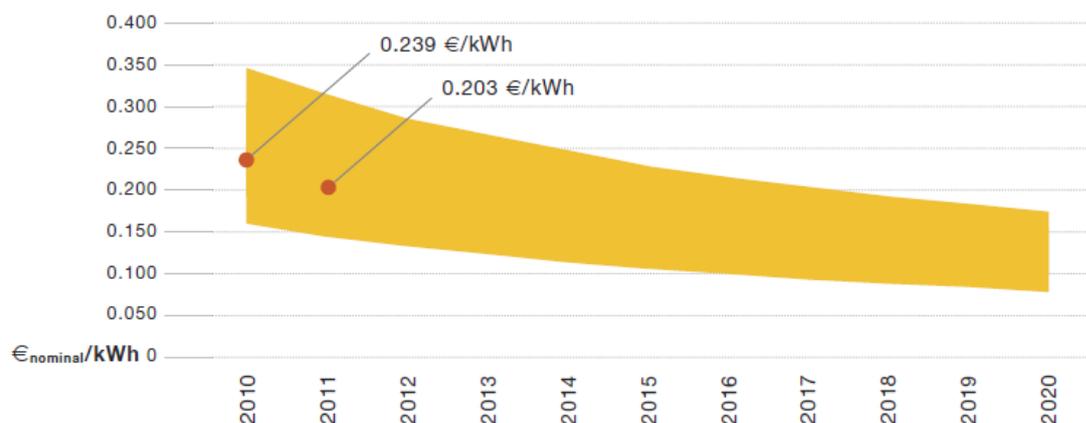


Figura 1.11 - Perspectiva de evolución del precio de la energía solar fotovoltaica [11]

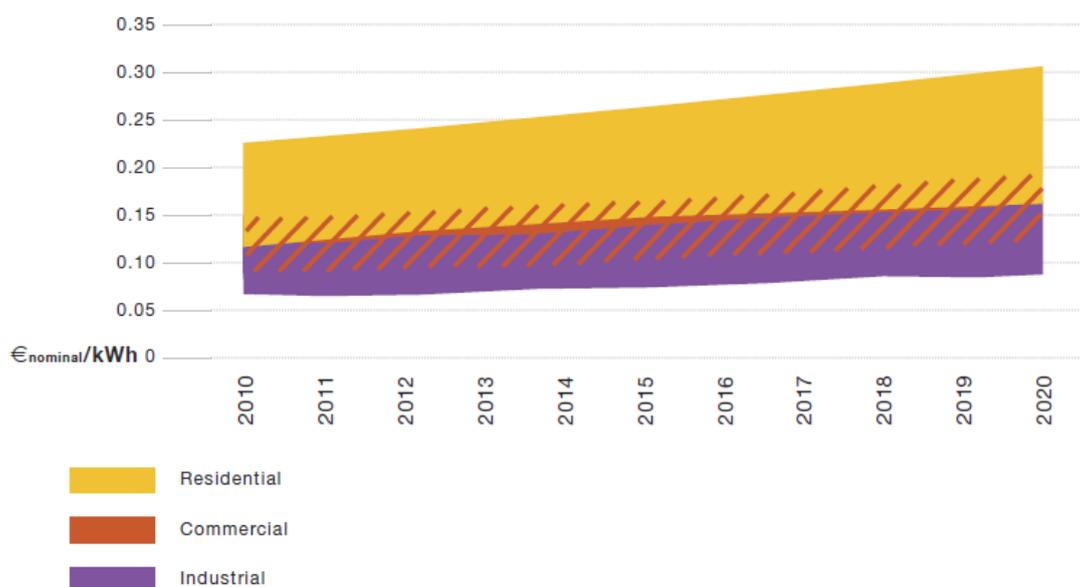


Figura 1.12 - Evolución esperada del precio de la energía eléctrica [11]

Con estas condiciones, en un estudio realizado por EPIA en 2011 [11] se esperaba que la paridad dinámica de red en el segmento comercial se alcanzase en 2013 en Italia y

en el 2014 en España y que posteriormente se fuese extendiendo al resto de países de la Unión Europea antes del año 2020.

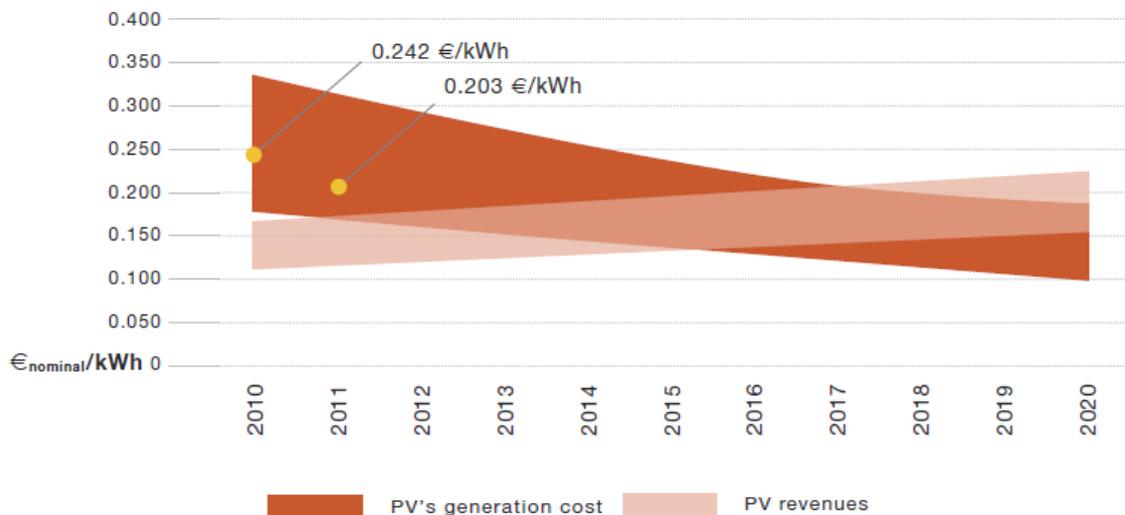


Figura 1.13 - Paridad de red dinámica para sistemas fotovoltaicos comerciales en Europa [11]

En cuanto a la competitividad de valor de generación y comparando el coste de generación de la energía solar fotovoltaica con el coste de generación de una central térmica de gas de ciclo combinado, se estimaba posible que se alcanzase en el segmento de instalaciones en suelo, en el 2014 en Italia y en el 2015 en España. Para el resto de países de la Unión Europea se esperaba alcanzar en años sucesivos y siempre antes de 2020.

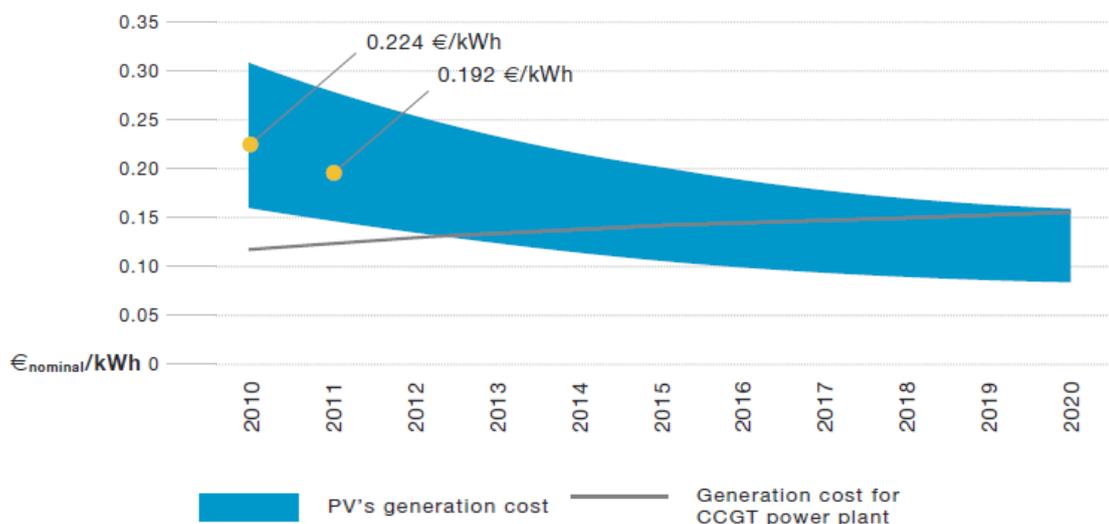


Figura 1.14 – Competitividad de grandes instalaciones solares de suelo en comparación con centrales de ciclo combinado en Europa [11]

1.5 Reducción del coste de la energía fotovoltaica

En la siguiente imagen se puede observar la curva de aprendizaje de la energía fotovoltaica mostrando el precio medio de venta de los módulos fotovoltaicos (US\$/Wp) en función del total de módulos vendidos (Wp). Mostrada esta gráfica escala logarítmica, la curva se convierte aproximadamente en una recta y muestra que cada vez que se duplica la potencia producida el precio decrece alrededor de un 21%

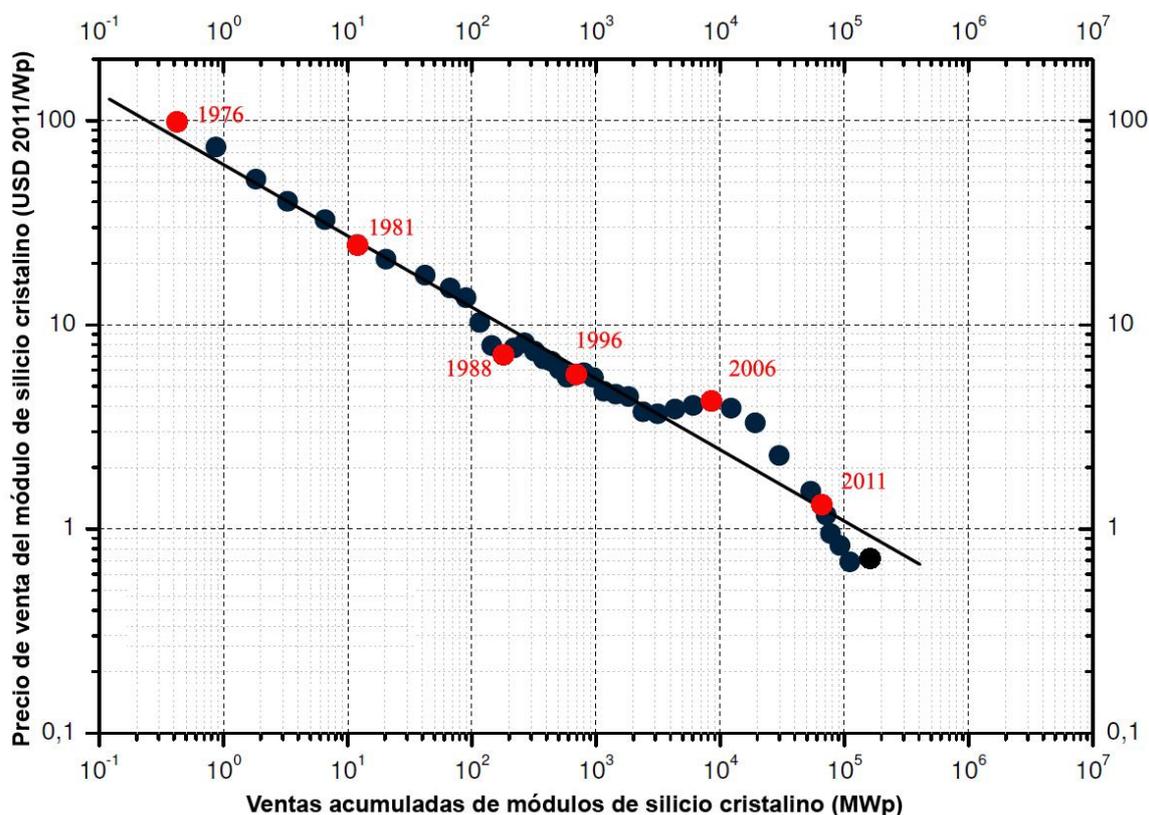


Figura 1.15 - Curva de aprendizaje del precio del módulo en función de la producción acumulada [14]

En esta curva hay algunas fechas señaladas cercanas a puntos de inflexión como:

- 1976, 1981 y 1988 coinciden con cambios en las políticas ante las renovables en EEUU cuando éste era el máximo productor y consumidor de tecnología fotovoltaica.
- 1996: A partir de este año en Japón, Alemania y otros países se hicieron cambios en las políticas renovables que llevaron al gran boom de la energía fotovoltaica y la disminución de la importancia del mercado de EEUU. Hasta 1996 el mercado fotovoltaico crecía un 11% anual y a partir de este momento empezó a crecer con ritmos de 47% anual.

- La mayor desviación de la curva de experiencia se da hacia el año 2006. El gran crecimiento en la producción de energía fotovoltaica que se estaba produciendo llevó a un aumento de las necesidades de silicio purificado al que no pudieron hacer frente los productores. Esta escasez de silicio hizo aumentar mucho su precio y con ello el de los sistemas fotovoltaicos.
- Para los años 2010-2011 se ha regresado a los precios que precedía la curva de experiencia debido a una desaceleración en los ritmos de crecimiento y a un aumento en la capacidad de producción de silicio purificado con su consiguiente reducción de precio.

1.5.1 Ahorro en el silicio

La evolución del precio del polisilicio puro durante los dos últimos años ha sido consecuencia de la situación del mercado [12]. Partiendo de un precio de 67 \$/kg en el inicio del 2010, bajó hasta los 50 \$/Kg en la primera mitad del año 2011, cayó hasta los 30 \$/kg en febrero de 2012 y hasta los 17 \$/kg en enero de 2013. A partir de ese momento el precio se ha estabilizada e incluso ha aumentado ligeramente hasta los 20,2 \$/kg en diciembre de 2014 [15].

Esta gran caída del precio indica que, una vez estabilizadas la oferta y la demanda, el precio se está acercando al coste real y reduciendo los márgenes.

Aunque el peso de la oblea de silicio en el precio final del módulo ha disminuido en los últimos años, aún representa el 57% del precio de la célula acabada y el 29% del módulo finalizado. La mayor capacidad de producción de silicio multicristalino ha llevado a una significativa reducción del precio de las obleas y, por lo tanto, se ha aliviado la presión para seguir disminuyendo el consumo de silicio reduciendo el espesor de las obleas. Pero aunque ahora el espesor de la oblea está estabilizado es una variable a tener en cuenta para la reducción de costes y se espera volver a esta tendencia descendente.

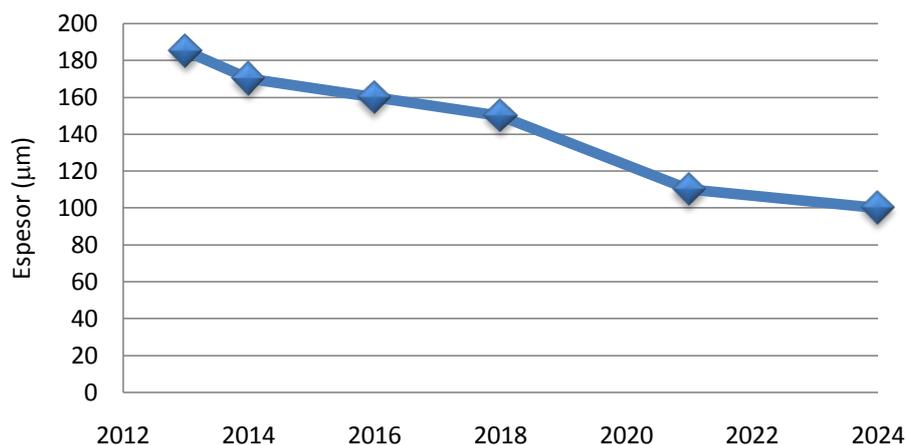


Figura 1.16 - Evolución prevista en el espesor de la obleas mono y multi-cristalinas [14]

La figura anterior muestra la tendencia esperada en el espesor de las obleas de silicio en las líneas de fabricación de células solares. Hoy día ya es posible cortar obleas con espesores de 100 µm desde el punto de vista tecnológico, pero los índices de roturas son inaceptables por el momento y hay que ir mejorando las tecnologías actuales de fabricación y desarrollar tecnologías alternativas para poder adaptarse a estos espesores

La reducción del espesor de las obleas conlleva las siguientes implicaciones:

- Reducción del coste debido al menor uso de polisilicio
- Nuevos conceptos de manipulación de células delgadas para reducir las roturas de obleas
- Nuevos conceptos de células solares adecuados para conseguir altos niveles de eficiencia en células muy delgadas
- Nuevos conceptos de interconexión y encapsulado adecuados para obleas muy delgadas.

En cuanto al tamaño de las obleas, el estándar actual es de células de 156x156 mm² que se espera que continúe hasta el 2020. Obleas de tamaños mayores (210x210 mm²) no se esperan que aparezcan en fabricación antes de 2017.

1.5.2 Reducción del índice de roturas

Actualmente el índice de roturas de obleas en la fabricación de células es del 1,3% y se espera que este índice se reduzca al 1% para 2017 teniendo en cuenta que para esa fecha está previsto el trabajar con obleas de espesores cercanos a los 150 µm.

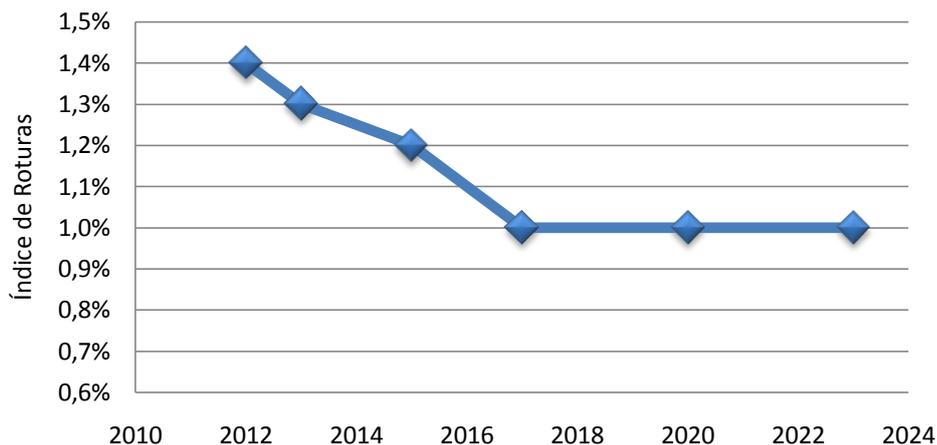


Figura 1.17 - Evolución prevista del índice de roturas en la fabricación de células solares [13]

Estas roturas se producen en los procesos de manipulación, en procesos en los que la oblea es sometida a tensiones y cargas como la serigrafía, y en procesos térmicos. En la siguiente imagen se puede observar el tiempo efectivo de trabajo, entendido como el tiempo en el que el equipamiento está en condiciones de trabajar sobre el total del tiempo que se requiere su funcionamiento, de los diferentes procesos de la fabricación de células solares. Se puede observar que en los procesos de metalización y clasificación el tiempo efectivo de trabajo es mucho menor que en el resto de procesos.

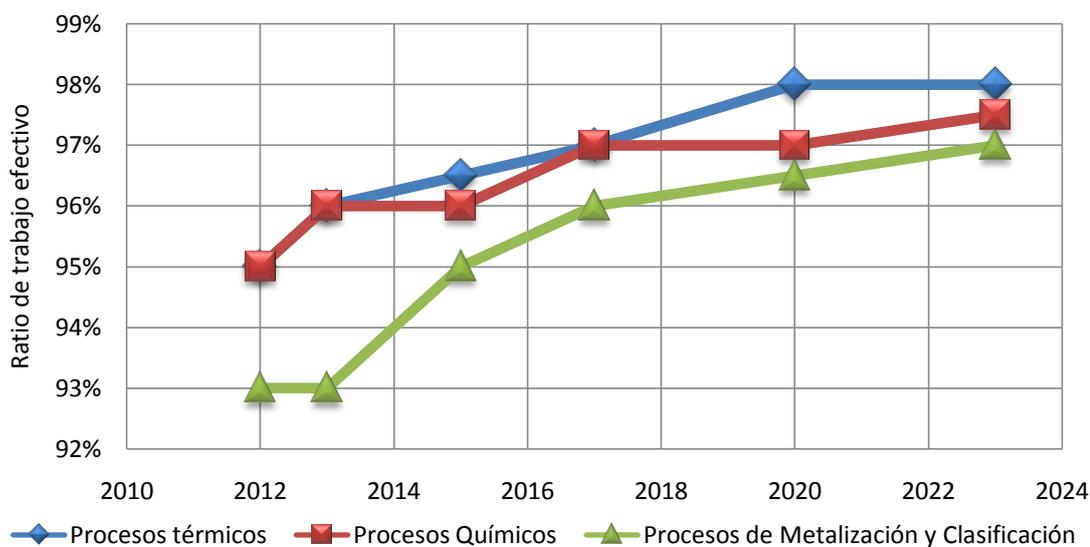


Figura 1.18 - Evolución prevista del ratio de trabajo efectivo de los diferentes procesos de fabricación de células solares [13]

Esto es debido a que estos procesos requieren de una alta manipulación de la oblea para realizar la serigrafía de los contactos metálicos o para realizar las medidas necesarias para la caracterización y clasificación de las células. Tanta manipulación conlleva un alto índice de roturas en estos puntos y, además, en caso de rotura es necesario realizar una limpieza del equipo para evitar que restos de silicio de la oblea rota provoquen más roturas en cadena. Es por ello que, aunque el índice de roturas está actualmente situado en el 2%, el coste que estas roturas conlleva el 5% sobre el total de costes de fabricación de células solares.

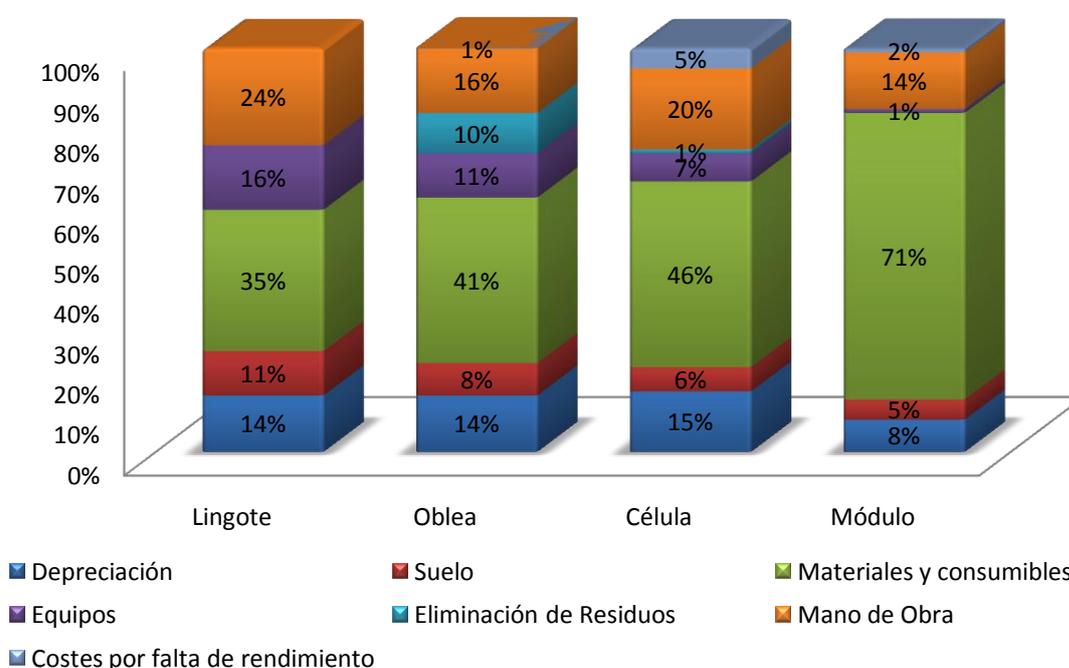


Figura 1.19 - Distribución relativa de costes de los diferentes pasos de fabricación de módulos fotovoltaicos de silicio cristalinos [12]

Otro punto crítico en cuanto a las roturas de las células es el proceso de fabricación de los módulos. En este proceso hay dos tareas críticas: la primera es la interconexión de las células que van a formar el módulo y la segunda es el laminado de los módulos. Actualmente el ratio rendimiento en la fabricación de módulos es del 99%, definiendo este ratio como el número de células buenas en módulos buenos, sobre el número de células buenas que entran en este proceso.

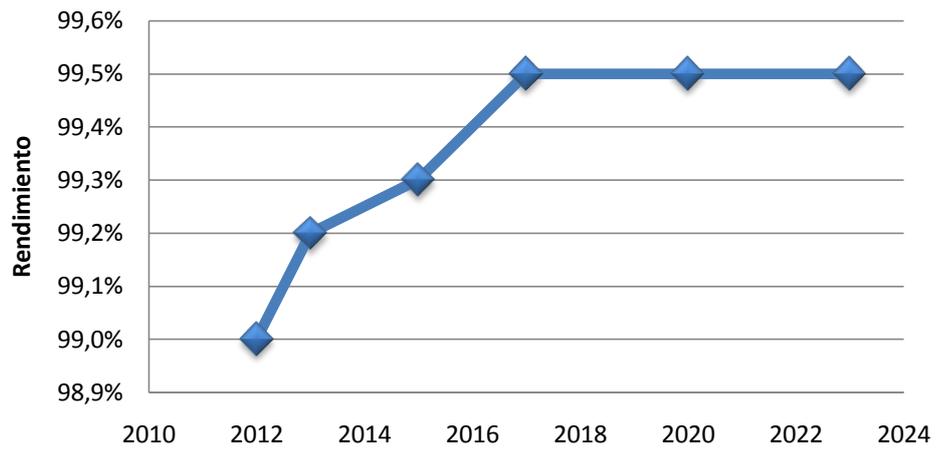


Figura 1.20 - Evolución prevista en la eficiencia en la fabricación de módulos [13]

2 Rotura de las Células Solares

2.1 Fractura del silicio

El 90% de las células solares están fabricadas partiendo de una oblea de silicio cristalino [16]. El silicio es un material frágil, es decir, a temperatura ambiente muestra un comportamiento elástico lineal y sin apenas deformación plástica antes de la rotura. Por lo tanto son aplicables los fundamentos de la mecánica de fractura elástica lineal (MFEL) para entender el comportamiento de las obleas de silicio durante su fractura.

En los materiales frágiles como el silicio, la fractura se da a lo largo de los planos cristalográficos cuando la tensión a la que se ve sometido el material es suficientemente alta como para romper los enlaces. Idealmente, la tensión necesaria para romper un enlace es:

$$\sigma^* = \frac{\gamma \cdot E}{r_0} \quad (2.1)$$

Dónde E es el módulo de Young, γ es la energía superficial del material y r_0 es la distancia en equilibrio de los centros de ambos átomos. Con esta ecuación se obtendrían valores entre 5 y 50 GPa para metales y materiales cerámicos. En la práctica, los valores medios de la tensión de fractura suelen ser mucho menores, del orden del 1% de la tensión ideal, y además, suele haber una dispersión de datos muy grande dentro del mismo material. Esto es debido a que, en los materiales frágiles, la fractura está dominada por el tamaño y distribución de defectos. En los defectos del material se concentran las tensiones y a partir de esos puntos se propagan las grietas a través de los planos cristalográficos.

2.1.1 Concentración de tensiones en las grietas

La primera evidencia del efecto de concentración de tensiones que se producen en las grietas fue enunciada por Inglis [17] cuando analizaba el efecto de la creación de agujeros elípticos en placas planas.

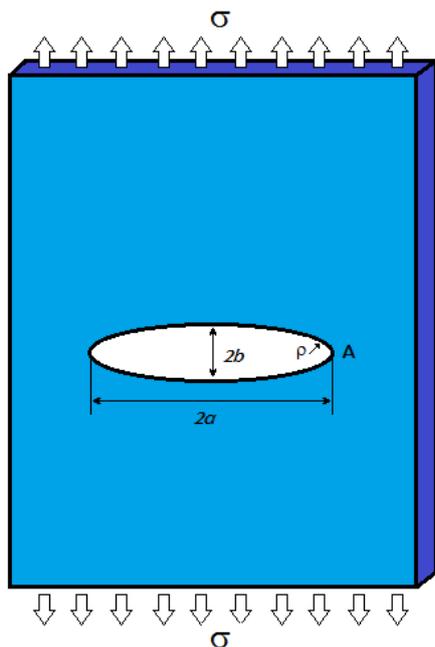


Figura 2.1 – Placa plana con un agujero elíptico

Asumiendo que el agujero no está influenciado por las condiciones de contorno de la placa, es decir, las dimensiones del agujero son mucho menores que las dimensiones de la placa, la tensión en el extremo del eje mayor es:

$$\sigma_A = \sigma \left(1 + \frac{2a}{b} \right) \quad (2.2)$$

Siendo la relación σ_A/σ el factor de concentración de tensiones k_t .

Cuando el eje mayor a es mucho mayor que el eje menor b el agujero elíptico empieza a tener el aspecto de una grieta. Para estos casos Inglis encontró más adecuado introducir una nueva ecuación en función del radio de curvatura ρ :

$$\sigma_A = \sigma \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \quad (2.3)$$

Siendo $\rho = b^2/a$. Cuando el agujero elíptico toma forma de grieta ($a \gg b$) la ecuación pasa a ser:

$$\sigma_A = 2\sigma \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (2.4)$$

Según la anterior fórmula, si una grieta es lo suficientemente aguda, su propio peso podría provocar la fractura debido a que la concentración de tensiones tendería a

infinito. Esto animó a Griffith a desarrollar su teoría basándose en la energía en lugar de la concentración de tensiones.

2.1.2 El Balance de Energía de Griffith

Griffith estudió las condiciones de fractura de cuerpos sólidos frágiles con grietas y, en 1921, estableció la teoría inicial en la que se sustenta la mecánica de la fractura [18]. *“Se puede formar una grieta (o una grieta existente puede crecer) solamente si el proceso origina una disminución de la energía total o ésta permanece constante”*.

Griffith establece que, para que una grieta introducida en un sólido cargado elásticamente, aumente de tamaño, la energía potencial disponible para la propagación en el sólido, debe ser suficiente para superar a la energía superficial del material. De esta forma se establece un equilibrio entre la disminución de la energía elástica almacenada en el cuerpo y el incremento de la energía superficial total, como consecuencia de la formación de la superficie libre de la grieta. La grieta crecerá y se producirá una fractura si la energía requerida para propagar la grieta (suma del trabajo desarrollado por la tensión aplicada y la energía elástica liberada al extenderse la grieta) puede ser suministrada por el sistema.

En una placa sin grieta, la aplicación de una tensión externa σ conlleva una elongación δ de la misma según la ley de Hooke.

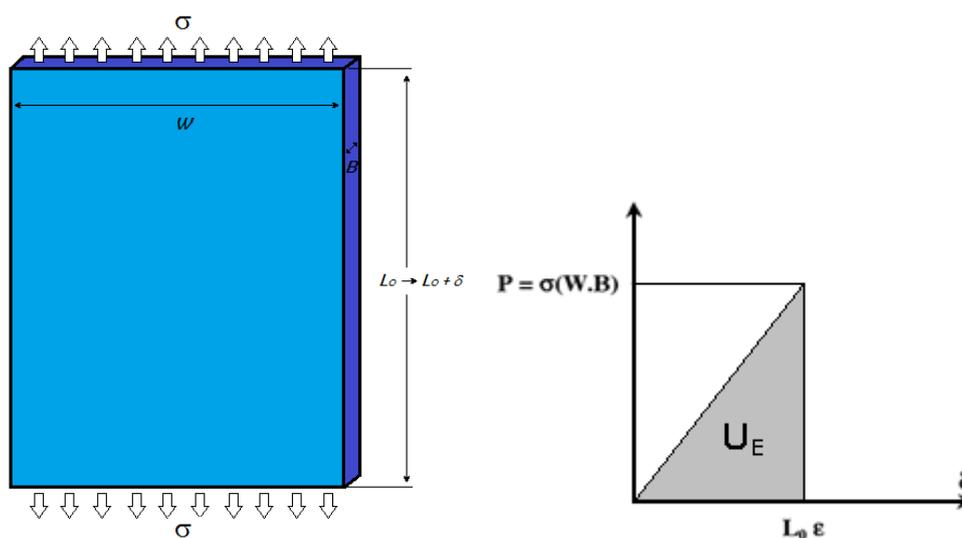


Figura 2.2 – Energía elástica almacenada en una placa sin grieta sometida a tensión

Con lo que la energía elástica (U_E) almacenada por la placa es:

$$U_E = \frac{1}{2} P \delta = \frac{1}{2} (\sigma \cdot B \cdot W) \cdot L_0 \cdot \varepsilon \quad (2.5)$$

$$U_E = \frac{1}{2} (\sigma \cdot B \cdot W) \cdot \left(L_0 \cdot \frac{\sigma}{E} \right) = \frac{\sigma^2}{2E} \cdot B \cdot W \cdot L_0 \quad (2.6)$$

En el caso de encontrarnos con una grieta en la placa, al aplicarle una tensión externa σ , la elongación va a ser mayor ya que la presencia de la grieta va a hacer disminuir su rigidez.

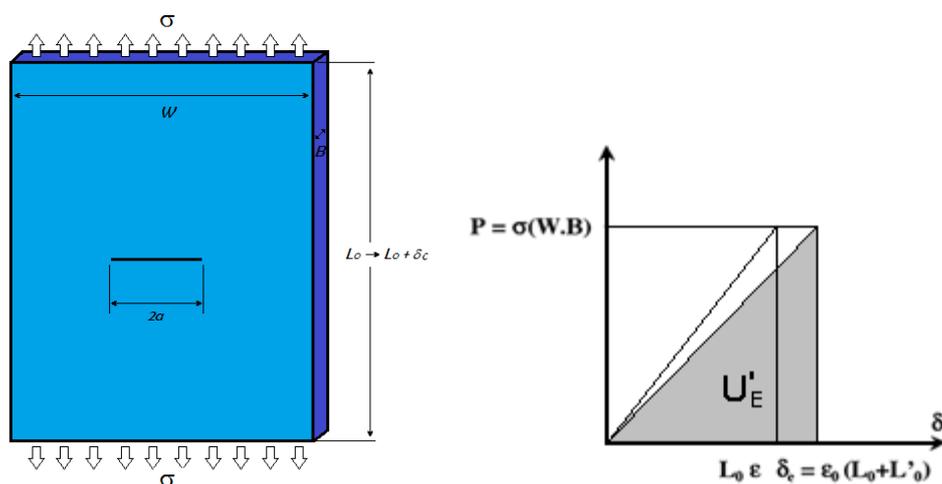


Figura 2.3 – Energía elástica almacenada en una placa con grieta sometida a tensión

En este caso, parte de la deformación va a ser debida a al propio material y otra parte va a ser debida a la presencia de la grieta.

$$\delta_c = \varepsilon_0 (L_0 + L'_0) = \varepsilon_0 \left(L_0 + \frac{2 \cdot \pi \cdot a^2}{W} \right) \quad (2.7)$$

Por lo tanto, la energía elástica almacenada será:

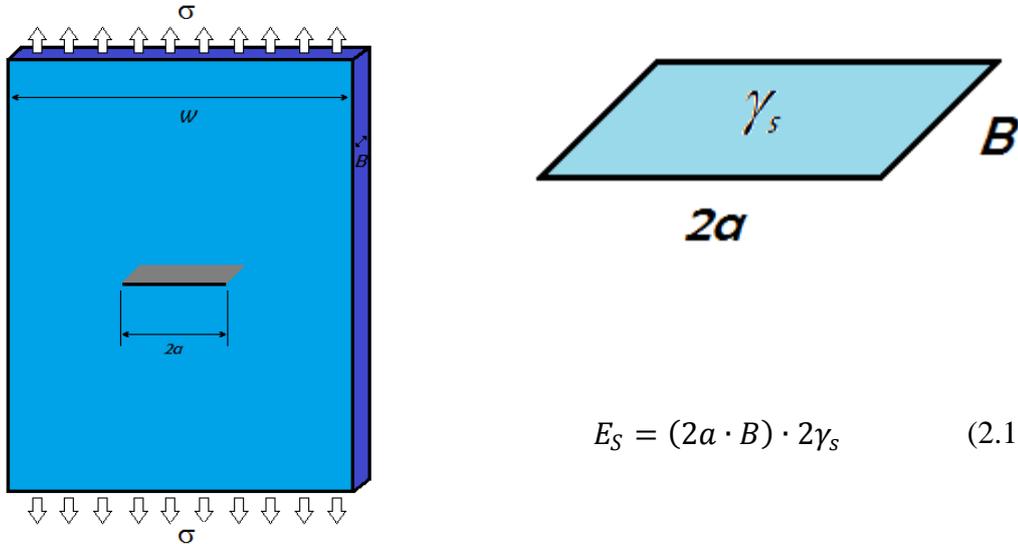
$$U_E = \frac{1}{2} P \delta = \frac{1}{2} (\sigma \cdot B \cdot W) \cdot [\varepsilon (L_0 + L'_0)] \quad (2.8)$$

$$U_E = \frac{1}{2} (\sigma \cdot B \cdot W) \cdot \frac{\sigma}{E} \left(L_0 + \frac{2 \cdot \pi \cdot a^2}{W} \right) = \frac{\sigma^2 \cdot B}{2E} [W \cdot L_0 + 2 \cdot \pi \cdot a^2] \quad (2.9)$$

$$U_E = U_{E, \text{sin fisura}} + \frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot a^2 \cdot B}{E} \quad (2.10)$$

La energía superficial γ_s es una constante característica de un material y sus unidades son energía/unidad de superficie. Se interpreta por el hecho de que los átomos que se encuentran en la superficie de cualquier sólido tienen un número de átomos vecinos inferior al correspondiente a los átomos interiores.

Por lo tanto, la energía superficial debida a la presencia de una grieta pasante de longitud $2a$ en una placa de espesor B , será igual al producto del área total libre de la grieta por la energía superficial del sólido:



$$E_S = (2a \cdot B) \cdot 2\gamma_s \quad (2.11)$$

Figura 2.4 – Evaluación de la energía superficial

Si llamamos U_0 a la energía del sólido sin grieta y U a la del mismo cuerpo con grieta, el cambio energético lo podemos expresar de la siguiente forma:

$$\Delta U = U - U_0 = -\frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot a^2 \cdot B}{E} + 4a \cdot B \cdot \gamma_s \quad (2.12)$$

Si la condición de equilibrio energético durante la rotura es que la energía disponible se consume en propagar la grieta:

$$\frac{d\Delta U}{da} = -\frac{2\pi \cdot \sigma^2 \cdot a \cdot B}{E} + 4B \cdot \gamma_s = 0 \quad (2.13)$$

De esta forma la tensión de fractura se obtiene como:

$$\sigma_c = \frac{E \cdot \lambda}{2\pi \cdot x_0} \quad (2.18)$$

Asumiendo que $\lambda/2$ es aproximadamente igual a la distancia interatómica x_0 :

$$\sigma_c \approx \frac{E}{\pi} \quad (2.19)$$

La energía superficial puede estimarse de la siguiente forma; la energía superficial es igual a la mitad de la energía de fractura de dos átomos porque cuando se rompe el material se crean dos superficies:

$$2\gamma_s = \int_0^{\lambda/2} \sigma_c \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot x}{\lambda}\right) dx = \sigma_c \frac{\lambda}{\pi} \Rightarrow \lambda = \frac{2\pi \cdot \gamma_s}{E} \quad (2.20)$$

Despejando λ de la ecuación de (2.20) y sustituyendo en la ecuación (2.18):

$$\gamma_s = \frac{\sigma_c^2 \cdot x_0}{E} \quad (2.21)$$

Tomando como radio de la grieta del orden de la magnitud de la distancia interatómica, $\rho = x_0$, y aplicando el valor de concentración de tensiones de Inglis:

$$\sigma_c = 2\sigma \sqrt{\frac{a}{x_0}} \Rightarrow \gamma_s = \frac{4a \cdot \sigma_f^2}{E} \Rightarrow \sigma_f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{E \cdot \gamma_s}{a}} \quad (2.22)$$

Obtenemos una expresión semejante a la obtenida de acuerdo al criterio de energía de Griffith, aunque no coincide exactamente.

2.1.4 Tasa de liberación de Energía

En 1956, Irwin [19] define el concepto de tasa de liberación de energía G , que es la medida de la energía disponible para la propagación de un incremento de grieta da . El incremento de longitud de grieta a carga constante se traduce en una tensión constante; el

trabajo suministrado al sistema se transforma en un incremento de energía elástica U_E y en energía consumida en la propagación U_R .

Tenemos una placa cargada con una tensión constante σ que tiene una grieta en su interior de dimensión $2a$. Con motivo de esa tensión y de la presencia de la grieta la placa se alarga siendo su longitud $L = L_0 + \delta_c$. Si se produce un incremento en la longitud de la grieta de da en cada extremo, su longitud final será $2(a + da)$, y este aumento en el tamaño de la grieta provocará un incremento en la longitud de la placa $L + d\delta$.

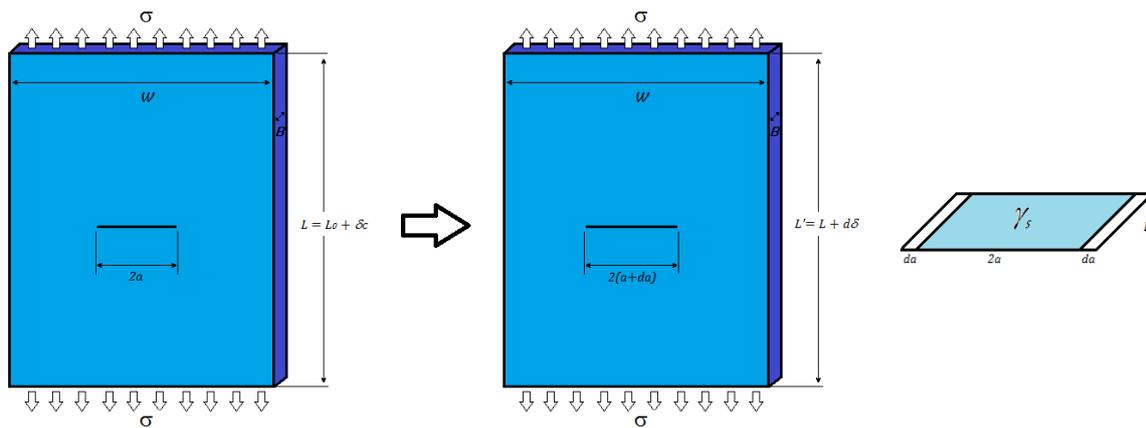
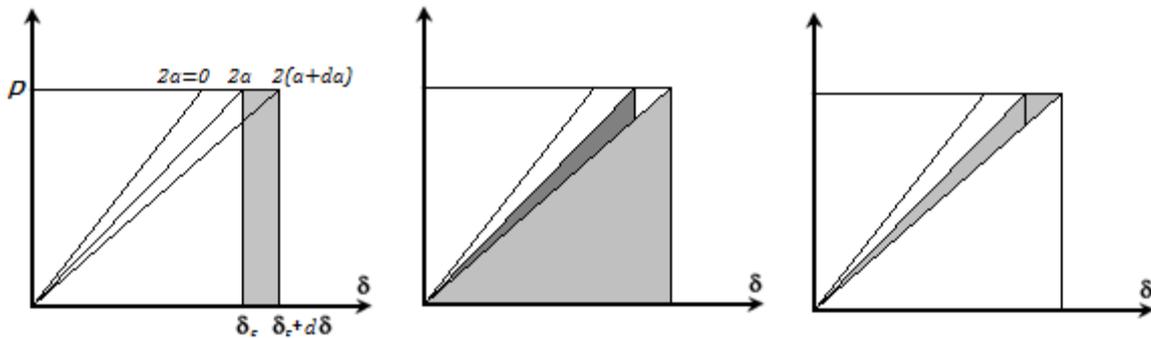


Figura 2.6 – Incremento de longitud da de la grieta

Por lo tanto, el trabajo suministrado al sistema es: $dU = P \cdot d\delta$



$$dU = P \cdot d \qquad \frac{1}{2}P(\delta_c + d\delta) - \frac{1}{2}P \cdot \delta_c = \frac{1}{2}P \cdot d\delta$$

Figura 2.7 – Esquema del cálculo de energía elástica y energía consumida en la propagación

La parte transformada en energía elástica es: $dU_E = \frac{1}{2}P \cdot d\delta$

Entonces, la energía consumida en la propagación será:

$$dU_R = dU - dU_E \quad (2.23)$$

$$dU_R = P \cdot d\delta - \frac{1}{2}P \cdot d\delta = \frac{1}{2}P \cdot d\delta \quad (2.24)$$

Por lo tanto, tomando el valor de U_E de (2.9):

$$dU_R = dU_E = d \left[\frac{\sigma^2 \cdot B}{2E} \cdot (W \cdot L_0 + 2\pi \cdot a^2) \right] = 2 \frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot a}{E} B \cdot da \quad (2.25)$$

Irwin también definió la resistencia a la fractura del material R , como la energía superficial por el área de grieta nueva aparecida por propagación da de la grieta.

$$R = 2\gamma_s \quad (2.26)$$

Si la tasa de liberación de energía G es:

$$G = \frac{dU_R}{dA} = \frac{1}{2B} \cdot \frac{dU_R}{da} = \frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot a}{E} \quad (2.27)$$

El criterio de equilibrio del sistema es que la tasa de liberación de energía sea igual a la resistencia a la fractura del material $G = R$:

$$\frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot a}{E} = 2\gamma_s \Rightarrow \sigma_f = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot \gamma_s}{\pi \cdot a}} \quad (2.28)$$

Encontrando de nuevo el valor de la tensión de rotura de Griffith.

2.1.5 La inestabilidad y la curva R

Como hemos visto anteriormente, la propagación de la grieta se produce cuando $G = R$, pero esta propagación de grieta puede ser estable o inestable en función de cómo varían G y R en función del crecimiento de la grieta. La curva que representa G en función de la propagación de la grieta es la curva de fuerza motriz.

Consideremos una placa con una grieta pasante de tamaño inicial $2a$, sometida a una tensión σ lejos de la grieta. La tasa de liberación de energía G varía linealmente respecto al tamaño de grieta.

$$G = \frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot a}{E} \tag{2.29}$$

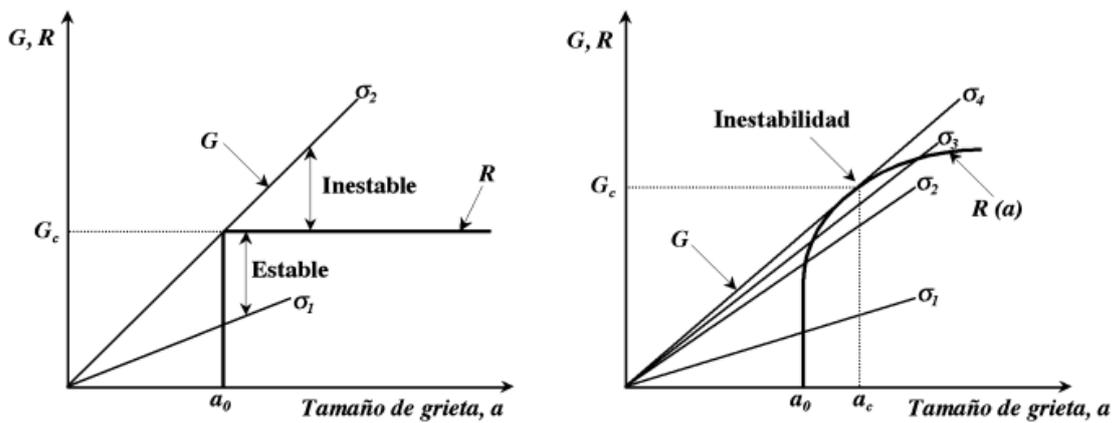


Figura 2.8 – Evolución de las curvas G y R de dos materiales en función de la longitud de grieta

En la figura se muestra el comportamiento de las curvas G y R para dos materiales con distinto tipo de comportamiento, con un valor de longitud de grieta inicial a_0 .

En el primer caso se muestra un material con una curva R plana, es decir, la resistencia del material a la propagación de la grieta es constante respecto al crecimiento de la grieta. En este caso, cuando la grieta está sometida a una tensión σ_1 , la grieta es estable y no crece ya que $G(a_0) < R(a_0)$. Si en cambio le aplicamos una tensión σ_2 la propagación de la grieta es inestable porque en este caso $G(a_0) > R(a_0)$ y, a medida que se va propagando la grieta el valor de G va aumentando mientras R permanece constante. Este es el caso de los materiales idealmente frágiles ya que la energía superficial es una propiedad invariante del mismo.

En el segundo caso encontramos una curva R creciente. La grieta crece ligeramente cuando la tensión crece de σ_1 a σ_2 , pero no puede crecer más mientras no aumente la tensión. Si la tensión aumenta a σ_3 la grieta se propaga un poco más pero permanece estable. Pero si alcanzamos un nivel de tensión σ_4 o superior, la grieta se vuelve inestable porque la tasa de crecimiento de la fuerza motriz es mayor que la

pendiente de la curva R . Este es el caso de los materiales dúctiles ya que la zona plástica del borde de la grieta aumenta en tamaño al mismo tiempo que la grieta crece.

Algunos materiales pueden presentar una curva R decreciente. La propagación por clivaje es normalmente inestable; el material cerca del vértice de la grieta de crecimiento está sometido a tensiones muy altas que impiden la deformación plástica.

2.2 Origen de las grietas en las obleas de Silicio

Como se ha visto en el apartado anterior, la resistencia a la fractura de las obleas de silicio viene condicionada por la distribución de defectos en las mismas. Estos defectos actúan como concentradores de tensiones, y en consecuencia, como puntos de arranque de las roturas.

Las grietas en las obleas de silicio se pueden generar por múltiples razones en un proceso productivo. Estas causas son analizables y, en la mayoría de los casos, solucionables ya que, generalmente, son producidas por una manipulación no adecuada de la oblea. En cambio, el fabricante de células solares debe hacer frente a un daño intrínseco de la oblea de silicio que no está bajo su control. Este daño intrínseco es el daño producido durante el serrado del lingote de silicio para la obtención de las obleas.

2.2.1 Daño intrínseco en las obleas de silicio

Para la obtención de las obleas de silicio para la fabricación de células solares se parte de un lingote de silicio monocristalino o policristalino. Este lingote es cortado en cientos de obleas simultáneamente a través de la técnica de serrado multi-hilo [20].

En la técnica de serrado multi-hilo, un hilo de serrado es enrollado a través de cuatro guías, con ranuras equidistantes. De esta forma se construye una malla de serrado de cientos de hilos paralelos separados a una distancia constante. Para realizar el serrado del lingote, éste es empujado contra la malla mientras el hilo se desplaza a una velocidad controlada y manteniendo una tensión del mismo constante.

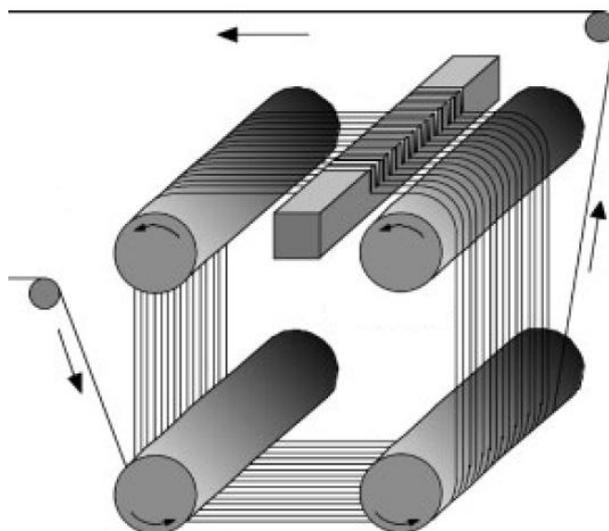


Figura 2.9 - Esquema del serrado multi-hilo [20]

En la técnica más extendida actualmente, no es el hilo de serrado el que hace el corte del lingote, sino que el hilo se encarga de introducir en los canales de corte unas partículas de un material duro que están en suspensión en un líquido de transporte. Estos abrasivos suelen ser de carburo de silicio (SiC) o de diamante que, al ser presionados por el hilo contra el silicio van arrancando pequeños cachos de material por indentado. El líquido de transporte suele ser polietilenglicol. Un esquema de este proceso se puede observar en la Figura 2.10.

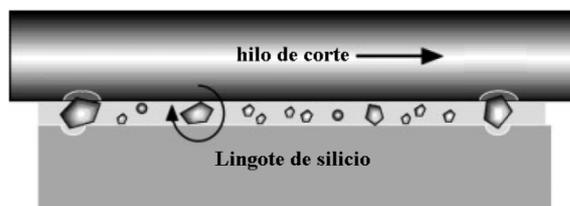


Figura 2.10 - Esquema del proceso de corte [20]

Al presionarse la partícula de abrasivo contra el silicio, ésta se clava en el mismo generando una zona de deformación plástica y una grieta perpendicular a la superficie. Cuando desaparece la presión del abrasivo sobre el silicio, el estrés residual de la deformación plástica puede generar grietas laterales paralelas a la superficie. Cuando estas grietas alcanzan la superficie del material hacen que se desprenda un chip del mismo pero la grieta perpendicular a la superficie permanece dejando un daño en la oblea.

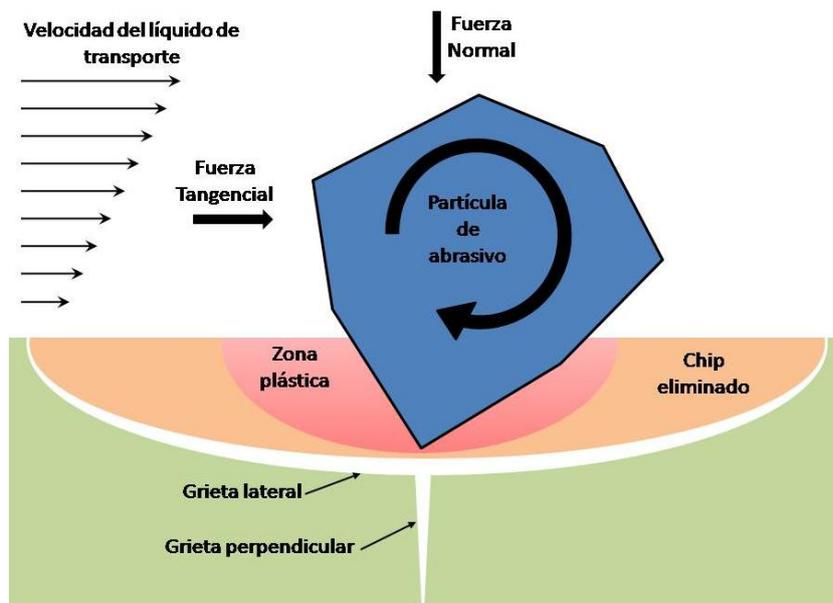


Figura 2.11 - Proceso de indentado de una partícula de abrasivo en el silicio [20]

Hay muchos factores que determinan la calidad de la superficie de las obleas como pueden ser el diámetro del hilo, el tamaño y distribución de abrasivos y las vibraciones transversales del hilo, la velocidad del hilo, la viscosidad del líquido de transporte, etc. Pero es un proceso que aún no se comprende completamente.

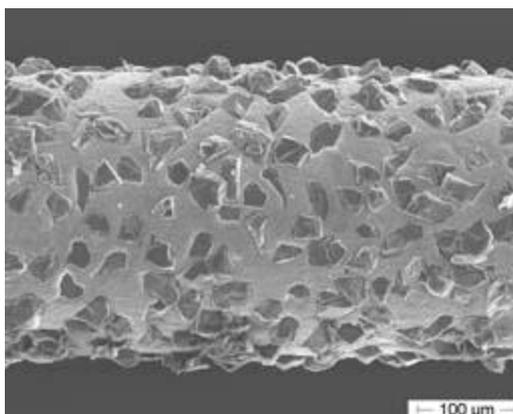


Figura 2.12 - Imagen bajo microscopio de un hilo diamantado

En los últimos años ha aparecido una variante del serrado multi-hilo que está empezando a instalarse en la industria fotovoltaica. Se trata del serrado multi-hilo de diamante. Este método es muy similar al anterior pero, en este caso, los abrasivos en lugar de ser partículas de SiC en suspensión en el líquido de transporte, son pequeños diamantes adheridos directamente al hilo de acero [21]. El líquido de transporte ya no es

necesario pero sí un líquido refrigerante que suele ser básicamente agua con algunos aditivos.

En esta nueva técnica, el proceso de corte lo realizan las partículas de diamante adheridas al hilo de corte que van creando surcos en el silicio. Si se compara la superficie de una oblea cortada con el sistema tradicional y con la de una oblea cortada con hilo diamantado se puede observar que la naturaleza del corte es diferente (Figura 2.13). En la primera se observa que su superficie es homogéneamente rugosa creada por el proceso de indentado, y en la segunda se pueden apreciar los surcos paralelos creados por las partículas de diamante. Estos surcos son interrumpidos por agujeros dejados por procesos ocasionales de indentado. Si se analiza esta superficie con más detenimiento se revela que se ha producido un cambio de fase en el silicio creando una pequeña capa de silicio amorfo en la superficie de los surcos de la oblea [22], [23].

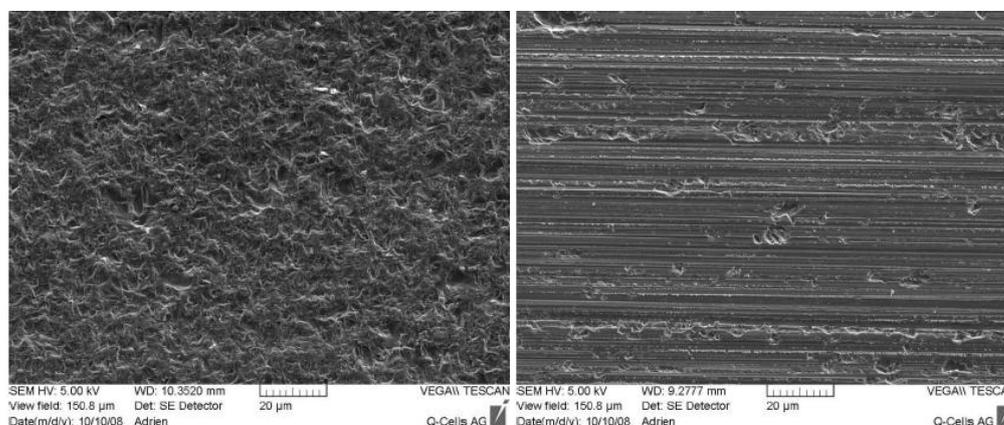


Figura 2.13 - Imagen SEM de la superficie de una oblea cortada por serrado multi-hilo y otra cortada por serrado multi-hilo de diamante [22]

Las ventajas del serrado multi-hilo de diamante son varias; el aumento de la velocidad de corte en más del doble, una variación total del espesor más reducida, la reducción de la rugosidad de la superficie de la oblea, reducción de defectos en los bordes de la oblea, mayor reutilizabilidad del hilo de diamante ya que su desgaste es menor y mayor posibilidad de reciclaje de las virutas de silicio y del líquido refrigerante. Entre los inconvenientes destacan; el alto precio del hilo de diamante y el cambio en la superficie material que puede requerir la adaptación de las líneas de fabricación de las células solares a estas nuevas obleas.

En cuanto al daño generado en las obleas por este proceso los datos son contradictorios. Mientras los estudios indican que la densidad y profundidad de las grietas generadas por el serrado con hilo diamantado son menores [21], [23], los ensayos mecánicos realizados sobre estas obleas dan como resultado tensiones de fractura mucho menores [23], [24]. Los fabricantes de obleas y vendedores de equipos de corte aseguran que la profundidad de las grietas es menor de 10-15 μm [21], [23], [25], [26], aunque otros estudios [27] sugieren que este daño puede ser mayor, llegando incluso a los 30 μm de profundidad.

2.2.2 Detección de puntos críticos en las líneas de fabricación actuales

Con el objetivo de detectar los puntos críticos en las líneas de fabricación actuales, se hizo un estudio en las instalaciones que la empresa Isofotón S.A. de Málaga que poseía una capacidad de producción anual de 230MW.

El estudio consistió en procesar obleas muy delgadas en líneas de producción preparadas para trabajar con obleas de 240 $\mu\text{m} \pm 30 \mu\text{m}$. Por entonces ya se conocía que los procesos de serigrafía y soldadura eran especialmente sensibles ya que había un gran número de roturas pero se sospechaba que el origen de estas roturas podía venir de grietas generadas en otros puntos del proceso. De esta forma, procesando obleas más delgadas y frágiles, se pretendía detectar los puntos críticos en donde se producían las grietas que posteriormente generaban la fractura.

Para realizar este estudio se partió de obleas de 240 μm de espesor que fueron decapadas en un baño basado en NaOH en las instalaciones del Instituto de Tecnología Microelectrónica (TiM) hasta unos espesores de 175 y 150 μm . En concreto se preparó un lote de 103 obleas de 175 μm de espesor y otro lote de 105 obleas con un espesor de 150 μm . Junto con estas obleas se procesaron otras 200 obleas del espesor habitual para completar el lote de fabricación de 400 obleas. Este lote seguiría el proceso de fabricación estándar consistente en:

- Texturado químico
- Difusión de fósforo en tubo de cuarzo

- Aislamiento de bordes en reactor de plasma
- Aplicación de capa anti reflexiva
- Metalización mediante serigrafía
- Clasificación de las células en función de su eficiencia

2.2.2.1 Descripción del proceso de fabricación

El proceso de texturado se inicia con la carga de las obleas, que están apiladas, en los carriers que se introducirán en los baños químicos. Para ello se dispone de un manipulador automático que va cogiendo las obleas con una ventosa de efecto Bernoulli, las alinea mecánicamente en una posición intermedia y las introduce en la posición correspondiente de carrier. Posteriormente los carriers son introducidos en una cesta donde se procesan 8 carriers simultáneamente en el baño de texturado. En este proceso las obleas pierden unos 25 μ m de espesor. Tras el texturado los carriers son introducidos en una centrifugadora para su secado.

En el proceso de difusión de fósforo, la carga de las obleas en las barquillas de cuarzo se realizó manualmente para evitar roturas ya que el manipulador automático estaba dando problemas. Tras la carga, las obleas se introducen en el horno de tubo para la creación del emisor tipo n. Finalmente las obleas son sacadas de la barquilla y apiladas de nuevo manualmente para el aislamiento de bordes en el reactor de plasma.

Tras el ataque de plasma las obleas son introducidas en casetes de producción con un manipulador automático similar al utilizado en el inicio del proceso. A partir de este punto, para realizar cada uno de los procesos posteriores siempre hay un proceso de descarga inicial y carga final de las obleas en los casetes. Esta carga y descarga se realiza mediante empujadores.

El siguiente proceso es la aplicación de capa anti-reflexiva. En este proceso se descargan las obleas en una cinta transportadora, se calientan y se crea en su superficie una capa de óxido de titanio.

Tras la aplicación de la capa AR se procede a la creación de los contactos metálicos de la oblea o metalización. Este proceso se realiza mediante serigrafía. Se crean los contactos de la cara frontal, se da la vuelta a la oblea, se crean los contactos de la cara

posterior y se queman los contactos en un horno con lámparas infrarrojas a temperaturas cercanas a los 900 °C.

Por último las obleas son clasificadas en función de su eficiencia. En este punto las obleas son descargadas, alineadas mecánicamente y se les realizan las medidas eléctricas necesarias para establecer su eficiencia. Una vez determinada su eficiencia se apilan en diferentes lotes en función de la misma.

2.2.2.2 Problemas encontrados

Durante todo el proceso, excepto la clasificación, la eficiencia de fabricación con obleas delgadas fue del 91% y 86% para obleas de 175 μm y 150 μm respectivamente. Los datos de cada uno de los procesos están resumidos en la siguiente tabla. Hay que matizar que la mayoría de las roturas se produjeron en las acciones de manipulación mecánica de la oblea.

<i>Proceso</i>	<i>Obleas Procesadas</i>		<i>Obleas Rotas</i>		<i>Eficiencia</i>	
	175 μm	150 μm	175 μm	150 μm	175 μm	150 μm
Texturado	103	105	1	3	99%	97%
Difusión	102	102	0	1	100%	99%
Ataque de plasma	102	101	0	1	100%	99%
Capa AR	102	100	3	5	97%	95%
Metalización	99	95	5	5	95%	95%
TOTAL	103	105	9	15	91%	86%

Tabla 2.1 - Eficiencia de los diferentes pasos del proceso con obleas delgadas

La carga y descarga de obleas en los casetes de producción se realiza a través de empujadores mecánicos. Si por un fallo de alineamiento, la oblea no está correctamente orientada hacia el casete, ésta se puede quedar trabada y romperse por la presión del empujador. Otro problema se detectó cuando las obleas están excesivamente combadas tras la metalización. Esta curvatura de la oblea puede provocar dos problemas: el primero es que el empujador no haga contacto con la oblea y el segundo es que si nos encontramos con dos obleas sucesivas con combados invertidos, pueden llegar a colisionar al introducir la segunda oblea en el casete.

Los alineadores mecánicos son especialmente dañinos. Estos alineadores se pueden dividir en dos grandes grupos; los alineadores activos y los pasivos. Los

alineadores activos utilizan elementos mecánicos móviles que desplazan el sustrato a su posición correcta. Los alineadores pasivos, en cambio, no tienen ninguna parte móvil y se encargan de orientar el sustrato mientras éste se desplaza a través una cinta transportadora u otro elemento similar.

Los alineadores activos someten a las obleas a impactos mecánicos y presiones que pueden hacer que se arqueen. Si la oblea está arqueada en el momento que va a ser sujeta por la ventosa del manipulador, es posible que la presión de la ventosa sobre la oblea haga que ésta se dañe.

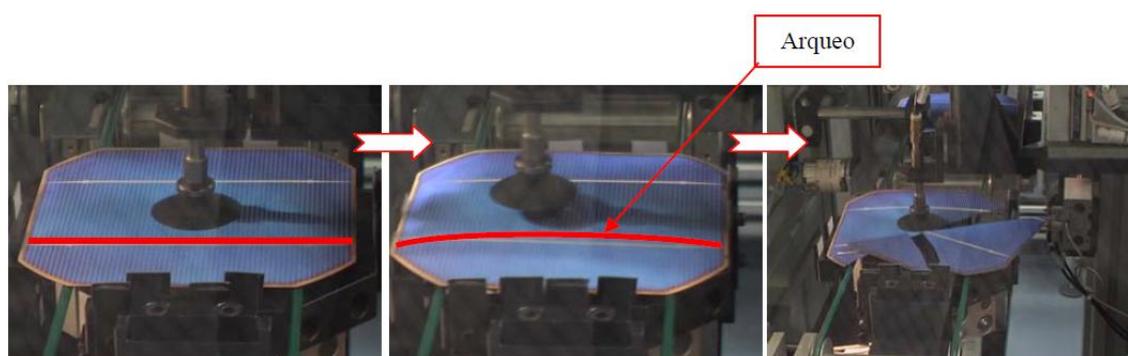


Figura 2.14 - Célula rota por la combinación de tensiones generadas por el alineador y la ventosa

Los alineadores pasivos en cintas transportadoras pueden provocar que las obleas se golpeen o se traben. Hay estudios que investigan sobre diferentes configuraciones y materiales para los alineadores pasivos [28], [29]. El material de los alineadores es crítico ya que si son demasiado blandos se van erosionando con el paso de las obleas y éstas se pueden llegar a trabar con los mismos, y si en cambio son demasiado duros, los golpes de las obleas pueden generar grietas que evolucionen en roturas.

El desplazamiento de la oblea por medio de ventosas también es crítico y ha sido estudiado con detenimiento [30]–[33]. En estos trabajos se estudian las virtudes y defectos de tres tecnologías de ventosas al manipular las obleas. Estas tecnologías de ventosas son; vacío puntual, vacío de área y efecto Bernoulli. Los puntos clave del proceso de manipulación de obleas con ventosa son los siguientes:

- La presión de vacío de la misma sobre la oblea. Una alta presión de vacío puede dañar las obleas

- Vibraciones durante el movimiento. Las aceleraciones en movimiento y la fuerza y superficie de agarre de la ventosa son factores determinantes para evitar grandes vibraciones
- Alineación de la oblea. Al igual que una alta fuerza de agarre puede generar daño en la oblea, una fuerza insuficiente puede provocar el deslizamiento de la oblea sobre la ventosa provocando errores de alineamiento y como consecuencia la rotura de la oblea.

2.2.2.3 Soluciones propuestas

Debido a que los problemas más graves se detectaron en los procesos de manipulación mecánica de los sustratos, se han diseñado dos herramientas con el objetivo de realizar estos procesos de la manera más inocua posible.

Paleta de manipulación de obleas delgadas

Con el fin de solucionar el problema de la carga y descarga de las obleas en los casetes de producción que se realizaba con empujadores mecánicos, se diseñó la herramienta de la Figura 2.15.

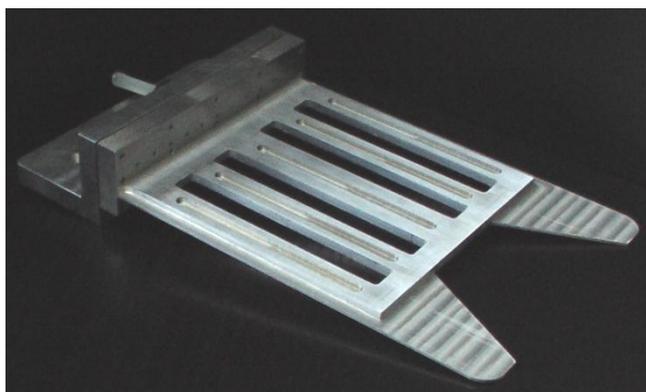


Figura 2.15 - Prototipo de manipulador de obleas delgadas

Esta herramienta consta de una base cuadrada con cinco áreas de vacío sobre la que se asienta la oblea. La base cuadrada tiene una anchura ligeramente inferior a la de la oblea para poder ser introducida en el casete y está unida a una plataforma inferior de anchura ligeramente superior a la de la oblea. La plataforma tiene dos salientes frontales que guían a la herramienta al introducirse en el casete. La herramienta tiene además una

fila de orificios sopladores que se pueden utilizar para eliminar posibles restos de silicio en el caso de que haya roto una oblea y así evitar roturas posteriores.

El proceso para introducir la oblea sería el siguiente:

- En primer lugar se coge la oblea con la paleta aplicando vacío. En este punto se observa que entre la oblea y la plataforma inferior de la herramienta hay un espacio por el que pasará la guía del casete. (Figura 2.16a)
- Se gira la herramienta dejando la oblea mirando hacia abajo y se introduce en el casete de forma que la plataforma se introduzca en una posición del casete superior a la que deseamos dejar la oblea. Los salientes frontales actúan de guías corrigiendo cualquier error de posicionamiento. (Figura 2.16b)
- Se introduce la herramienta completamente en el casete. Se observa que hasta este punto no hay posibilidad de contacto entre la oblea y el casete. (Figura 2.16c)
- Se desactiva el vacío y la oblea queda depositada. (Figura 2.16d)

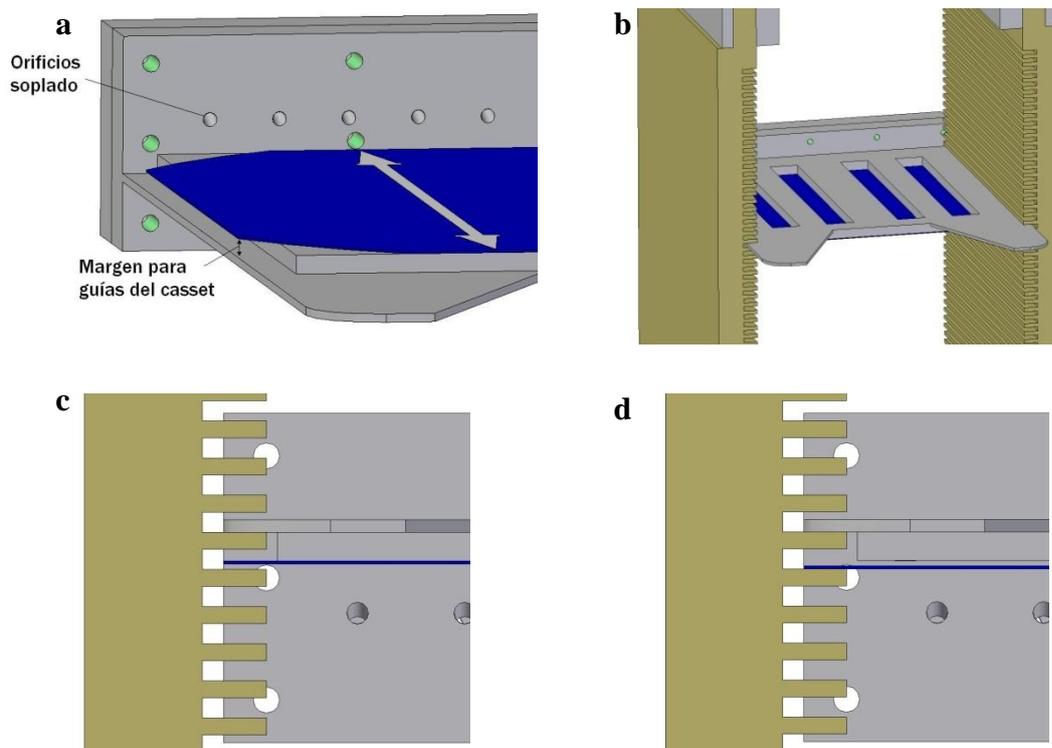


Figura 2.16 - Detalle del proceso de manipulación de la oblea con herramienta prototipo

Las ventajas que se obtendrían con la utilización de esta herramienta serían las siguientes:

- eliminar el daño en los bordes de la oblea al suprimir el contacto de ésta con cualquier tipo de empujador
- eliminar problemas relacionados con el combado de la oblea ya que al sujetarla con el vacío se aplana durante su manipulación
- Se elimina el contacto de la oblea con las paredes del casete durante la maniobra ya que la anchura de la plataforma del manipulador es mayor que la de la oblea.
- Se evita la rotura de la oblea por un defecto de alineamiento ya que los salientes frontales de la herramienta ejercen de guía durante la operación de carga.

Bandeja portaoblas de procesado

La utilización de herramientas más delicadas en la manipulación de las obleas es un avance muy importante en la batalla contra las roturas en las líneas de fabricación pero lo ideal sería eliminar, o al menos reducir al máximo, la manipulación directa de las obleas a lo largo del proceso. Para ello se ha diseñado una bandeja porta-oblas con la intención de que esta bandeja acompañe a la oblea a lo largo de todo el proceso productivo y que las manipulaciones se realicen sobre ésta en lugar de sobre la oblea en la medida de lo posible. Para que esta bandeja pudiese acompañar a la célula a lo largo de todo el proceso debería cumplir los siguientes requisitos:

- Debe soportar el ataque de productos químicos alcalinos ($NaOH$) a altas temperaturas cercanas a los 90 °C y ácidos (HF).
- Debe permitir el flujo de líquidos por ambas caras de la oblea minimizando en lo posible las marcas que pudiera producir una mala circulación.
- Debe soportar golpes típicos de la producción de células solares en los laterales (guías en cintas transportadoras, empujadores) sin deformarse para no dañar la oblea.

- Debe soportar las altas temperaturas (~ 900 °C) de los hornos de cinta durante el proceso de quemado de emisores y pastas metálicas.

Con estas premisas, y además buscando la posibilidad de ser fácilmente apiladas para el almacenaje y transporte de las obleas de una parte a otra de la fábrica, se ha diseñado la bandeja de la Figura 2.17.

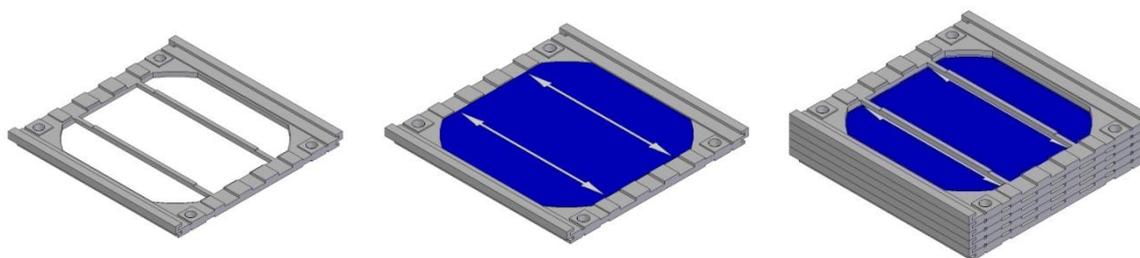


Figura 2.17 - Prototipo de bandeja portaoblas

Para que la bandeja cumpliera todos los requisitos mencionados se buscó un material adecuado. Los materiales que más se adecuaban a los requisitos de resistencia a ataques químicos y a las altas temperaturas son el carburo de silicio y la alúmina sinterizada, pero la fabricación de las bandejas en estos materiales es muy complicada. Son materiales tan duros que su mecanización es compleja y cara, y su fabricación directa es imposible ya que las tolerancias que se necesitan en las bandejas son mucho menores que las que se pueden obtener.

Por estas razones, los primeros prototipos se han creado en teflón para poder estudiar su viabilidad en los procesos químicos. Con estos prototipos se han decapado obleas en baño de $NaOH$ hasta las $50 \mu m$ con relativo éxito ya que si bien no hubo roturas, los soportes centrales de la bandeja impidieron el correcto decapado de esa parte de la oblea. Estos soportes están diseñados para que coincidan con los buses de la célula por lo que no se considera un fallo extremadamente grave.

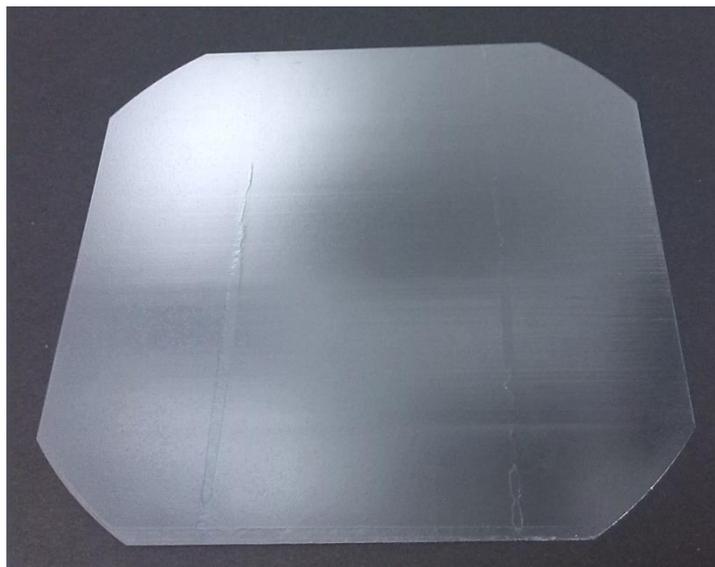


Figura 2.18 - Oblea decapada hasta los 50 μ m de espesor con marcas de los soportes del portaoblas

Para evitar estas marcas se realizó un decapado de una tanda eliminando los soportes centrales. El resultado no fue satisfactorio ya que al llegar a pequeños espesores de las obleas, éstas se doblaron bajo la presión del propio baño desplazándose dentro de la pila de bandejas y provocando la fractura de la gran mayoría.

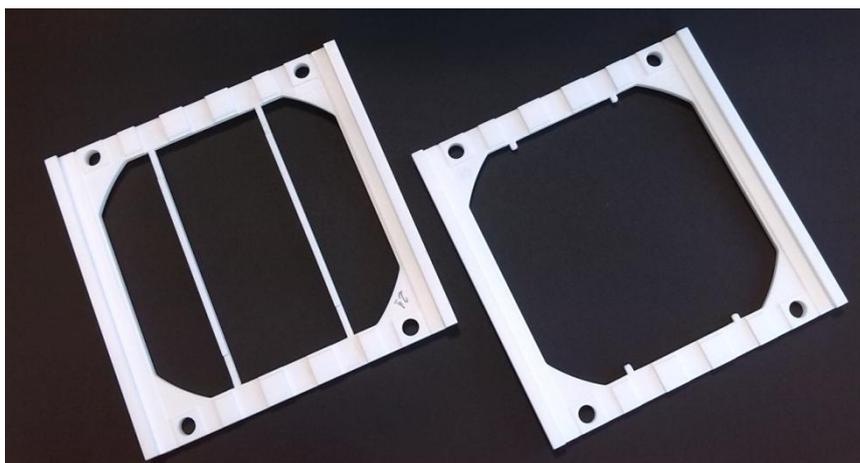


Figura 2.19 - Prototipo de bandeja de procesamiento con soportes centrales y sin ellos

3 Detección de Grietas en Obleas de Silicio

3.1 Necesidad de detección de grietas

Como se ha expuesto en el apartado 2.1, la presencia de defectos en materiales frágiles como las obleas de silicio determina su resistencia frente a la rotura. La presencia de obleas con daños en las líneas de fabricación es un riesgo que, en caso de rotura, puede generar una serie de costes que hay que intentar evitar en la medida de lo posible. Al coste de la oblea en sí hay que sumarle el coste correspondiente a los pasos productivos a los se había sometido la oblea, el coste de otras roturas que se produzcan en cadena a raíz de la primera, el coste de una posible parada de la línea para eliminar restos de la oblea...

Lo ideal para reducir los índices de rotura en línea sería detectar de forma precoz las obleas dañadas para extraerlas del proceso de fabricación antes de que se produzca su fractura. Estas obleas retiradas podrían ser inspeccionadas con más detenimiento y, en función de la magnitud de su daño, intentar “repararlas” o procesarlas por líneas de fabricación que sean más delicadas con los sustratos.

En la actualidad hay varios métodos desarrollados para la detección de grietas en obleas y células pero no todos ellos cumplen los requerimientos necesarios para ser integrados en las líneas de fabricación. Para que un método de detección de grietas pueda ser integrado en el proceso productivo debe cumplir los siguientes requerimientos por orden de importancia:

- Método no destructivo: Las muestras no pueden sufrir ningún deterioro con motivo de la inspección.
- Tiempo de procesado inferior a 2 segundos: Este es el tiempo aproximado que se tiene como referencia para el proceso ya que los ratios de fabricación actuales superan las 1800 células por hora.

- Buena discriminación de grietas: No deben pasar la inspección obleas dañadas ni sacar de la línea productiva obleas que no tengan ningún daño.
- Fácilmente integrable en línea productiva: El diseño del sistema de detección tiene que ser adecuado para que su integración en la línea productiva no implique problemas adicionales.
- Adaptable a diferentes pasos productivos: La generación de una grieta se puede dar en cualquier momento de la fabricación de la célula solar por lo que no solo hay que realizar una inspección inicial, sino que también es interesante realizarla tras los procesos que se consideren especialmente perjudiciales para la integridad de la oblea.

3.2 Métodos de detección de grietas en obleas de silicio

3.2.1 Test de Flexión

Los test de flexión son un tipo de ensayo de materiales que se utilizan para determinar sus características mecánicas. Consisten en someter a las muestras a unas fuerzas de forma controlada, teniendo conocimiento en todo momento de la fuerza aplicada y de la deformación de la muestra. Estos test se pueden realizar de forma destructiva o no destructiva. Es decir, se puede someter la muestra a una fuerza creciente hasta que se produzca su fractura o se le puede aplicar una fuerza hasta un determinado límite y, si la muestra no se rompe, se puede considerar que ha superado el test.

La aplicación de estos test a la detección de grietas se hace de forma no destructiva. Se establece un límite de fuerza que debe soportar la oblea para poder ser procesada y, en el caso de que la oblea no pueda soportar ese límite y se rompa, se considera que estaba dañada. Este tipo de test se basa en la concentración de tensiones que se producen en las grietas, de forma que una oblea agrietada alcanzará la tensión necesaria para la propagación de la grieta cuando se le aplica una fuerza exterior mucho más baja que si la oblea no estuviera dañada. Se ha comprobado que las obleas dañadas

no solo se rompen con una fuerza mucho menor, sino que además lo hacen en menos pedazos y más grandes [34].

Los test de flexión más habituales y sus respectivas distribuciones de tensiones son los siguientes [35]:

- **Point bending:** La fuerza se aplica en el centro de la parte superior de la oblea mientras se sostiene en 3 soportes situados a una distancia fija del centro. En este test se realiza un análisis puntual en el centro de la oblea.
- **Ball-on-Ring:** En este test la oblea se apoya en un anillo inferior y por la cara superior se aplica la carga con una bola en el centro de la oblea. En este test el área de máxima tensión es muy reducida y se encuentra justo bajo la bola. En este tipo de ensayo la zona del exterior del anillo inferior apenas es estresada por lo que los defectos del borde de la oblea no tienen un efecto importante en el test.
- **Ring-on-Ring:** Es muy similar al test Ball-on-Ring salvo que la carga es aplicada por un anillo superior en lugar de una bola. Este anillo tiene un diámetro menor que el anillo inferior. Esta configuración permite tener un área de estrés máximo más grande que incluye toda la superficie de la oblea situada en el interior del anillo más pequeño. Al igual que el test anterior la parte externa al anillo inferior tiene niveles de tensión muy bajo por lo que los defectos de borde no afectan al resultado del ensayo.
- **Flexión en tres puntos:** En este caso la oblea es soportada por dos barras paralelas y la carga se aplica a través de otra barra superior en la mitad de la oblea. Con esta técnica se consigue tensionar no solo la parte central de la oblea sino también sus bordes aunque la zona de máxima tensión es reducida y está localizada bajo la barra superior

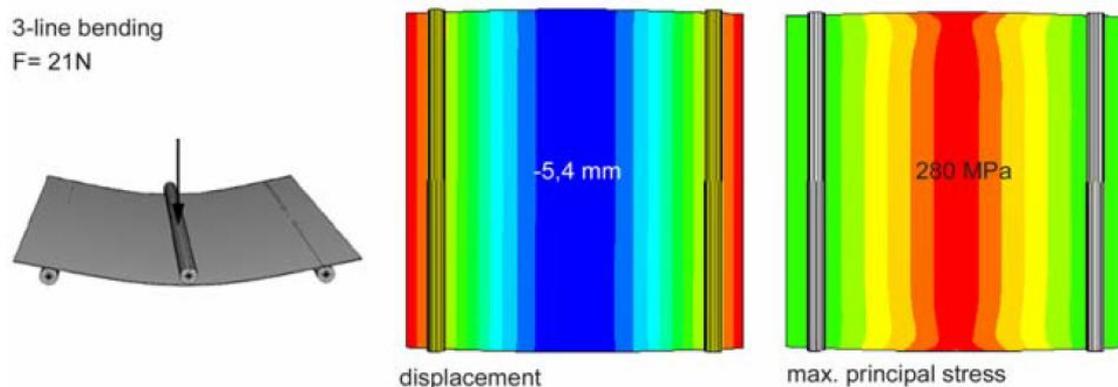


Figura 3.1 - Esquema y diagrama de desplazamientos y tensiones del test de flexión en 3 puntos

- Flexión en cuatro puntos: Este test es muy similar al anterior con la diferencia de que la carga es aplicada a través de otras dos barras paralelas en lugar de una. Con esto se consigue ampliar la zona de máxima tensión, situándose ésta en el área comprendida entre las dos barras superiores, incluyendo la parte central y los bordes de la oblea.

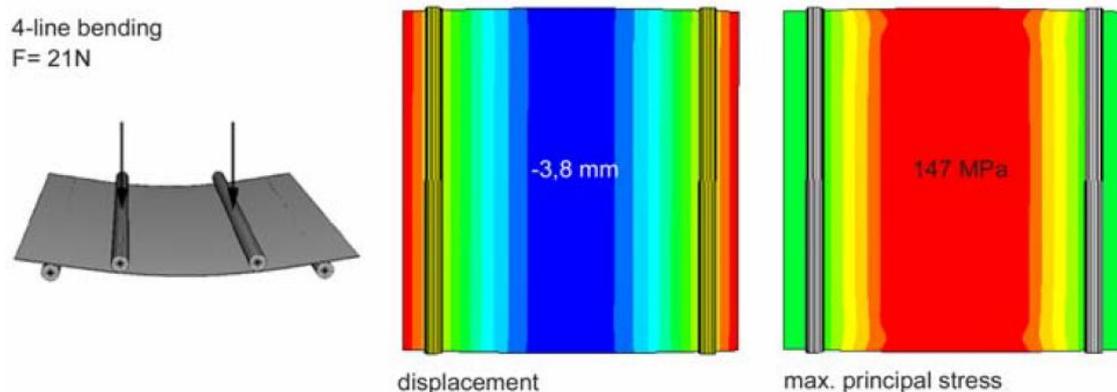


Figura 3.2 -Esquema y diagrama de desplazamientos y tensiones del test de flexión en 4 puntos

- Twist test o test de torsión: En este ensayo la oblea se sitúa sobre dos soportes situados en dos esquinas opuestas de la oblea y la carga se aplica en las esquinas situadas en la otra diagonal. Con este test se consigue tensionar tanto el centro como los bordes de la oblea, pero la principal característica de este test es que el nivel de estrés en todos sus bordes guarda cierta homogeneidad.

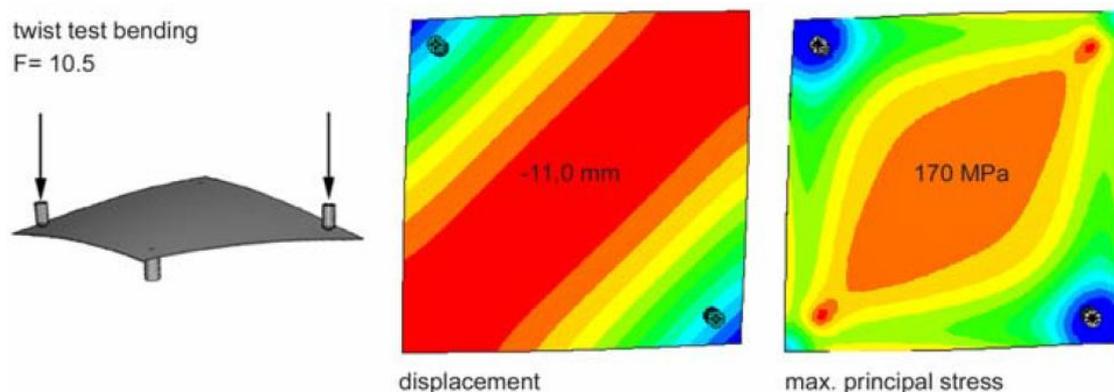


Figura 3.3 -Esquema y diagrama de desplazamientos y tensiones del test de torsión

La dificultad más importante de los test de flexión como método para la detección de grietas radica en establecer el límite de fuerza que debe soportar una oblea para que pase el test. Un límite muy alto puede hacer que se rompan obleas que inicialmente no tenían daño y un límite muy bajo permitirá que obleas dañadas pasen el test y se introduzcan en la línea de fabricación. Además en este tipo de test es imposible encontrar una configuración que estrese la oblea de forma homogénea. Cada tipo de test tiene su patrón de tensiones y, en función de la zona en la que se encuentre la posible grieta, la tensión a la que va a ser sometida puede variar considerablemente. Es decir, que para una determinada carga, en función de la posición de una grieta, puede que se rompa o no.

En cuanto a las características que debe cumplir para poder ser integrable en la línea de fabricación:

- Se trata de un método no destructivo para obleas no dañadas
- Es posible realizar el proceso en un tiempo inferior a 2 segundos
- La discriminación de grietas puede no ser buena y pasar al proceso productivo obleas que contengan grietas debido a que ningún test estresa la oblea de forma homogénea. Una solución a este problema podría ser realizar una combinación de varios test a cada muestra.
- Su integración en el proceso productivo es sencilla
- Se puede aplicar en cualquier paso del proceso.

3.2.2 Estresado con luz

Para solucionar el problema de la falta de homogeneidad de la distribución de tensiones de los test de flexión, Bhushan Sopori introdujo en 2006 un método para lograr distribuciones controladas de tensiones en la oblea [36]. Su intención es tener la capacidad de reproducir las distribuciones de estrés que va a soportar la oblea durante una secuencia de procesos de fabricación determinada. Para lograr estos patrones de tensiones se crea un perfil térmico en la oblea a partir de una excitación óptica.

Al iluminar parcialmente la oblea con una luz adecuada y con una intensidad en el rango de 4 a 8 W/cm², se genera un calentamiento no homogéneo en la oblea alcanzando temperaturas entre 400 y 1000 °C. Las diferencias de temperatura que se generan a lo largo de la superficie de la oblea crean un estrés térmico que varía en función del patrón de iluminación. El objetivo es que la distribución de tensiones generada sea tal que las obleas dañadas se rompan pero que las obleas que no posean grietas no sufran ningún daño.

3.2.3 Microscopio de Escaneo Acústico

El microscopio de escaneo acústico (o SAM por sus siglas en inglés) es un equipo que utiliza ondas acústicas enfocadas para investigar, medir o visualizar un objeto. Haciendo un barrido por toda la superficie del objeto es posible obtener una imagen que muestre ciertas características físicas del mismo. Habitualmente se utiliza en evaluaciones de materiales y en análisis de roturas, aunque también tiene aplicaciones biológicas y en investigaciones médicas. Se trata de una técnica no destructiva y en la que no es necesaria un contacto directo con la muestra, si bien es necesario sumergirla en un líquido para mejorar la propagación de las ondas. En la Figura 3.4 observamos un esquema de la tecnología SAM.

El principio de funcionamiento es el siguiente. El transductor produce una onda acústica de alta frecuencia que se enfoca en la muestra. Cuando la onda se encuentra con un cambio brusco en la impedancia acústica del objeto, por un cambio de material o algún tipo de defecto, una parte de la onda es reflejada mientras que el resto continúa propagándose.

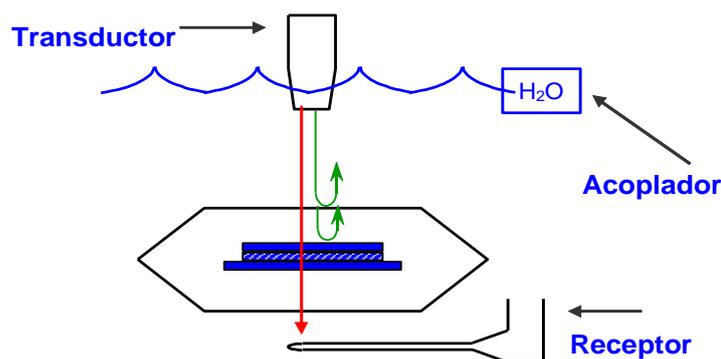


Figura 3.4 - Esquema de funcionamiento del SAM

Ambas ondas, tanto la reflejada como la propagada, contienen información del material por lo que es posible realizar dos tipos de inspecciones en función de la onda analizada:

- Si se analiza la onda reflejada se hace una medida del tipo Pulse Echo, es decir, se analiza el eco del pulso. En este caso el transductor y el receptor se encuentran en el mismo elemento.
- Si la onda analizada es la transmitida se realiza una medida del tipo Through Transmission, es decir, se analiza la onda propagada a lo largo del objeto. Para realizar esta medida el receptor debe situarse detrás de la muestra como se representa en la Figura 3.4.

Las características de la señal recibida que se analizan son las siguientes:

- La amplitud de pico: se utiliza cuando los defectos provocan cambios en la amplitud de la onda.
- Tiempo de vuelo (TOF): se analiza el tiempo que tarda la onda desde que es emitida hasta que es detectada. Se utiliza para medir distancias hasta un cambio de material o defecto.
- El desfase: se utiliza cuando los defectos provocan cambios en la fase de la onda.

En este tipo de medidas es muy importante elegir la frecuencia de la onda ultrasónica en función de las características de la muestra. Las frecuencias altas ofrecen una mayor resolución aunque la distancia focal es corta al igual que la penetración. Con

frecuencias más bajas se obtiene menor resolución pero la distancia focal es mayor y también la penetración de la onda en el material.

En la bibliografía, para obtener una medida de una oblea se utiliza un SAM que opera hasta una frecuencia de 250 MHz trabajando en modo pulsante. Se analiza el tiempo de vuelo para ver el espesor de la oblea y se hace un barrido en pasos de un mínimo de 5 μm [37]. Con estos parámetros se consiguen detectar microgrietas a partir de 10 μm de longitud aunque requiere de varios minutos para realizar el escaneo completo de toda la oblea.

3.2.4 Termografía Ultrasónica Lock-in

La termografía consiste en obtener una imagen que muestre la temperatura en las diferentes partes de un cuerpo. Las cámaras termográficas producen imágenes detectando la radiación infrarroja en dos rangos espectrales; longitudes de onda de 3 a 5 μm (rango medio) y de 8-10 μm (rango alto). Las cámaras están adaptadas a esos rangos de longitudes de onda ya que en ellas absorción de la atmósfera es mínima.

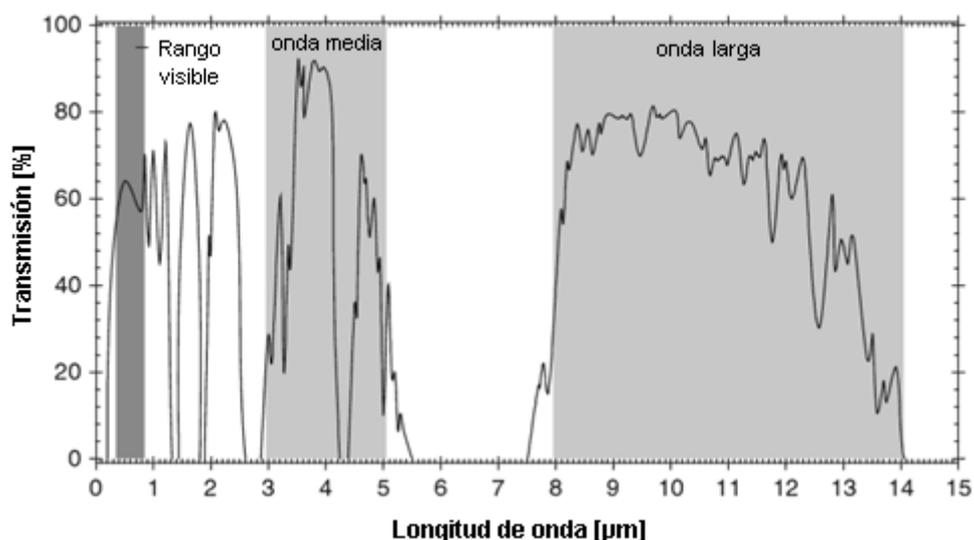


Figura 3.5 -Transmitancia de la atmósfera en el rango de longitudes de onda 0.2-14 μm

Las imágenes generadas con termografía toman el contraste de las emisiones locales de temperatura. Debido a la baja sensibilidad de las cámaras termográficas y a la

alta conductividad térmica del silicio, la resolución espacial efectiva de una imagen térmica en células solares y módulos es muy baja.

Para obtener mayores resoluciones se recurre a la termografía lock-in (LIT). En esta aplicación, la excitación de la oblea se realiza de una manera periódica (las frecuencias típicas para células solares son entre 1 y 25 Hz) que conlleva una modulación periódica de la temperatura superficial. El efecto del amplificador lock-in es extraer de las imágenes térmicas obtenidas, aquella parte de la señal que coincide con la frecuencia de la excitación. Debido al carácter dinámico de este procedimiento, la difusión lateral del calor es suprimida y la resolución espacial mejora de forma considerable.

En función de la característica de la oblea a analizar existen diferentes tecnologías en las que se varía la forma de excitar la muestra. La técnica LIT de oscuridad (DLIT) se ejecuta sobre células solares o módulos y se utiliza para obtener características electrónicas. La excitación se introduce a través de una corriente eléctrica que calienta la muestra en función de la densidad de la corriente de oscuridad de la unión. Con esta técnica se puede detectar shunts y visualizar distribuciones de corrientes de difusión (J_{01}) y de recombinación (J_{02}) [38]. En la Figura 3.6 se observa una imagen obtenida con esta técnica de una oblea de silicio multicristalino en la que se pueden observar dos shunts; uno en la parte superior y otro en la parte inferior.

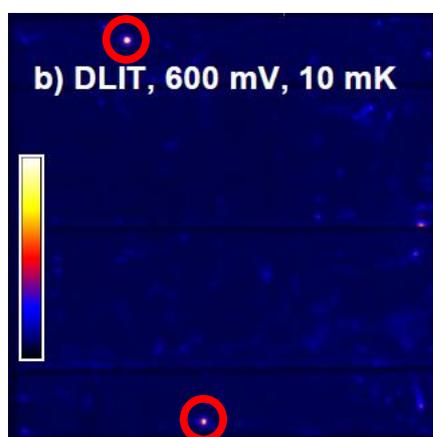


Figura 3.6 - Imagen DLIT de una oblea con una polarización de 600 mV [38]

La técnica LIT ultrasónico (ULT) se ejecuta sobre obleas o células y se utiliza para obtener características mecánicas y defectos. La excitación se introduce a través de ondas acústicas de alta frecuencia que se transforman en ondas elásticas dentro de la

muestra. La energía elástica se transforma en calor en áreas de concentración de estrés y defectos como grietas.

En la Figura 3.7 se observa una representación del equipo ULT en el que la fuente externa de energía modulada son ondas acústicas. Para la detección de grietas en células solares la energía ultrasónica se genera con un transductor comercial a una frecuencia fija. La fricción en los bordes de las grietas genera un calentamiento local periódico que es detectado por la cámara infrarroja y se convierte en una única imagen por el sistema termográfico lock-in (LIT). Dependiendo de la emisividad de la muestra, las medidas pueden necesitar un tiempo de integración desde unos pocos segundos hasta varios minutos [39].

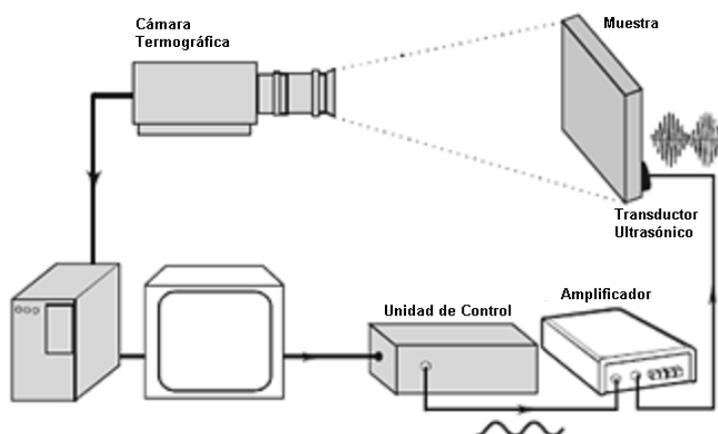


Figura 3.7 - Representación esquemática de un experimento ULT [40]

En la Figura 3.8 podemos observar una oblea multicristalina analizada con la técnica ULT. Se observa un fotograma captado por la cámara infrarroja (a), una imagen de la respuesta en amplitud de la termografía lock-in (b) y la correspondiente imagen en fase (c). En la parte central se observa la marca del transductor y en la parte superior derecha de las dos últimas imágenes, se observan grietas que no son visibles ni por la cámara infrarroja (sin procesado lock-in) ni por el ojo humano.

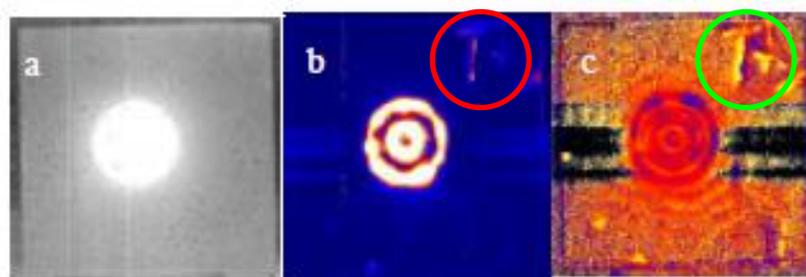


Figura 3.8 - Imágenes ULT de una oblea de silicio multicristalina [39]

Las células de silicio no procesadas son menos apropiadas para la termografía IR, ya que son prácticamente transparentes a estas longitudes de onda. La luz IR puede ser guiada a través de la oblea a distancias de varios cm y escapar hacia la cámara en posiciones donde no fue generada. Este efecto se puede evitar cubriendo la muestra con un capa de pintura que sea opaca y muestre una gran emisividad en la región IR, aunque de esta forma se elimina el carácter no destructivo de esta técnica. En la Figura 3.9 se observa un fotograma de la cámara infrarroja (a), la imagen en amplitud del ULT (b) y la imagen en amplitud del ULT una vez cubierta con pintura negra (c).

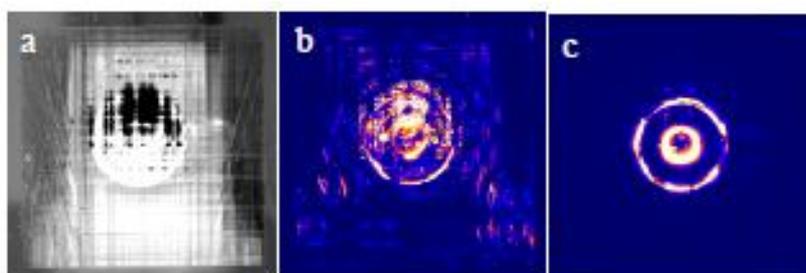


Figura 3.9 - Imágenes ULT de una oblea no procesada [39]

3.2.5 Transmisión Óptica

Esta técnica consiste en iluminar una oblea por su parte posterior con una luz de alta intensidad y analizar la luz que la atraviesa. En la Figura 3.10 se observa un esquema del proceso de medida con esta técnica. Analizando la luz infrarroja que atraviesa la oblea, se puede observar la cristalinidad y examinar el tamaño de los granos en el caso de obleas multicristalinas. En cambio, para detectar las posibles grietas, hay que desechar este rango de frecuencias ya que el silicio es prácticamente transparente ante este tipo de iluminación.

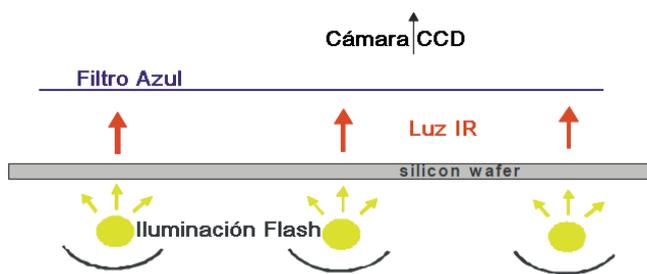


Figura 3.10 - Esquema del proceso de medida [41]

En la actualidad, hay propuestas varias técnicas de este tipo para la detección de grietas utilizando luz de diferentes longitudes de onda pero ninguna de ellas muestra potencial para detectar grietas por debajo de los 10 μm en un tiempo de procesado menor de 2 segundos. Se está desarrollando una técnica que sí puede alcanzar estos requisitos gracias a las nuevas cámaras CCD de alta resolución [42]. Para ello, se ilumina una oblea por su parte posterior con una luz de alta intensidad (>1000 soles), se utiliza un filtro azul para suprimir la luz infrarroja y se toma una imagen con un sistema especial basado en una cámara CCD.

Para que la capacidad de detección sea alta, la sensibilidad tiene que ser grande para detectar intensidades de iluminación muy pequeñas. Además, la intensidad del flash debe ser muy alta para permitir la grabación de microgrietas con múltiples reflexiones en los bordes de la grieta.

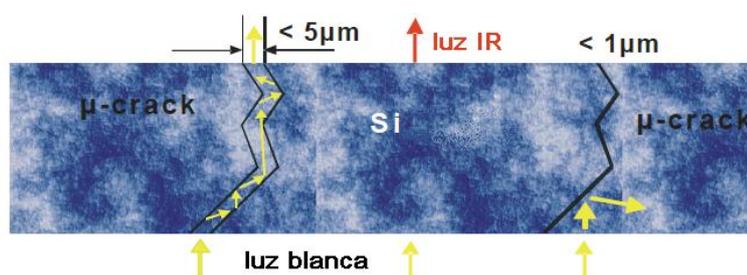


Figura 3.11 - Reflexión múltiple en microgrieta [41]

Como se observa en la Figura 3.11, la grieta no debe ser necesariamente perpendicular a la superficie de la oblea, aunque si es necesario que la atraviese por completo.

3.2.6 Imagen Luminiscente

La luminiscencia es la generación de luz de un cuerpo cuyo origen no radica exclusivamente en las altas temperaturas. Cuando un sólido recibe energía, ésta es absorbida por su estructura electrónica y posteriormente es de nuevo emitida en forma de radiación electromagnética cuando los electrones vuelven a su estado fundamental. En el caso de las obleas de silicio o células solares, se trata de polarizar la muestra para generar los pares electrón-hueco y, éstos al recombinarse, emiten fotones que se capturan con una cámara. En la electroluminiscencia, la célula se polariza aplicando una tensión entre sus polos y en el caso de la fotoluminiscencia, la polarización se logra iluminando la muestra.

Como se puede observar en la Figura 3.12 la longitud de onda de las emisiones luminiscentes del silicio se dan en el rango infrarrojo cercano (1000-1200 nm) con un pico cercano a los 1050 nm, por lo que no son visibles a simple vista. Para obtener una imagen de estas emisiones es necesaria una cámara que detecte la radiación en este rango de longitudes de onda. Las cámaras con detector de arseniuro de indio y galio (InGaAs) tienen una eficiencia cuántica superior al 80% en el rango infrarrojo cercano pero su precio es muy elevado y la resolución de estos detectores no suele llegar al megapíxel.

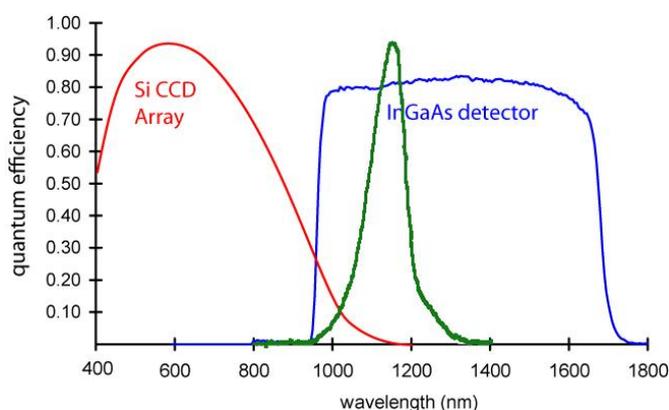


Figura 3.12 - Eficiencia cuántica de las cámaras con sensor CCD de silicio y con detector de InGaAs en comparación con la emisividad del silicio

La gran popularidad que han adquirido los métodos de imagen luminiscente ha venido por la utilización de cámaras con sensor CCD de silicio de alta sensibilidad. Estas cámaras tienen una eficiencia muy baja en el rango infrarrojo cercano pero su precio es significativamente menor al de las cámaras con detector de InGaAs y su resolución es

mucho mayor pudiéndose obtener imágenes con una gran definición. Estos sensores CCD están optimizados para mejorar el rendimiento en el rango infrarrojo cercano y son refrigerados para reducir el nivel de ruido.

3.2.6.1 Imagen Electroluminiscente

En el año 2005, Fuyuki et al. [43] introdujo la técnica de imagen electroluminiscente (EL) para analizar la distribución de la longitud de difusión de portadores minoritarios células solares de silicio.

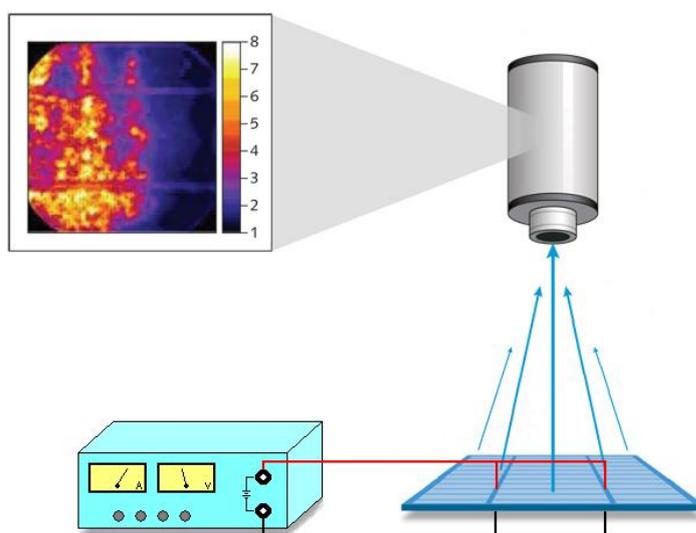


Figura 3.13 - Esquema de la técnica de Imagen Electroluminiscente

En este estudio se considera que, aunque la intensidad de la emisión está afectada por muchas propiedades físicas, ésta se puede considerar proporcional la cantidad de portadores minoritarios, que a su vez, está determinada por la longitud de difusión. Considerando una longitud de difusión efectiva L_e , que incluye el efecto de defectos, impurezas, recombinación superficial, etc, ésta longitud de difusión varía a lo largo de la superficie de la oblea pero se considera promediada y constante en todo el espesor de la oblea. El número de electrones en la capa p a una distancia x de la parte p de la unión pn será:

$$n(x) = n_0 \cdot e^{(-x/L_e)} \quad (3.1)$$

Entonces el número de electrones en la capa p será:

$$N = n_0 \int_0^W e^{(-x/L_e)} dx = n_0 L_e \left[1 - e^{(-W/L_e)} \right] \quad (3.2)$$

Cuando se considera el término $e^{(-W/L_e)}$ mucho menor que 1, el número de electrones N es prácticamente proporcional a L_e , y por lo tanto la intensidad de la emisión es proporcional a la longitud de difusión efectiva de los portadores minoritarios. Esta correspondencia se puede observar en la Figura 3.14 en la que se compara una imagen EL con la medida de la longitud de difusión de portadores minoritarios obtenida con la técnica de corriente inducida por haz de luz (LBIC) sobre una célula de 1 cm^2 . Se puede observar que aunque las zonas oscuras coinciden en ambas imágenes la resolución de la imagen EL ($50 \mu\text{m}$) es mucho mayor que la obtenida con LBIC ($250 \mu\text{m}$).

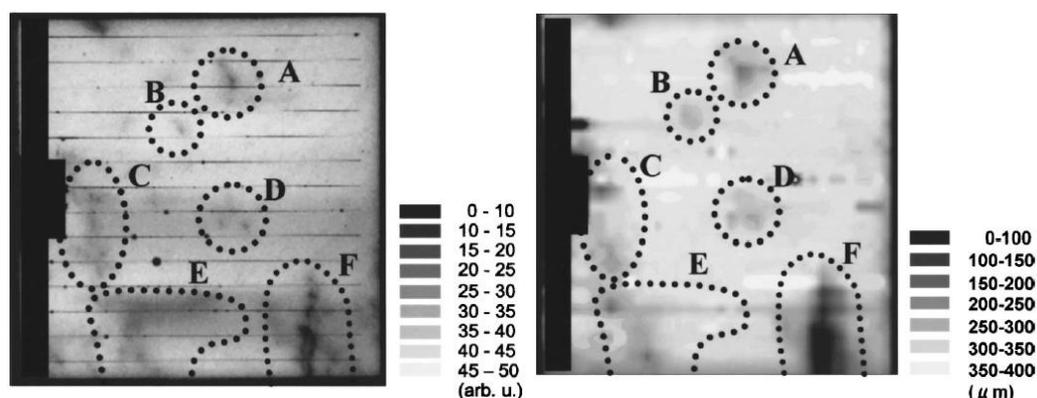


Figura 3.14 - Imagen obtenida con EL y longitud de difusión de portadores minoritarios obtenida por LBIC [43]

Observando punto a punto el nivel de luminosidad con diferentes niveles de polarización y comparándolo con la longitud de difusión de portadores minoritarios en ese punto obtenida con LBIC (Figura 3.15), se puede observar la proporcionalidad entre ambas medidas.

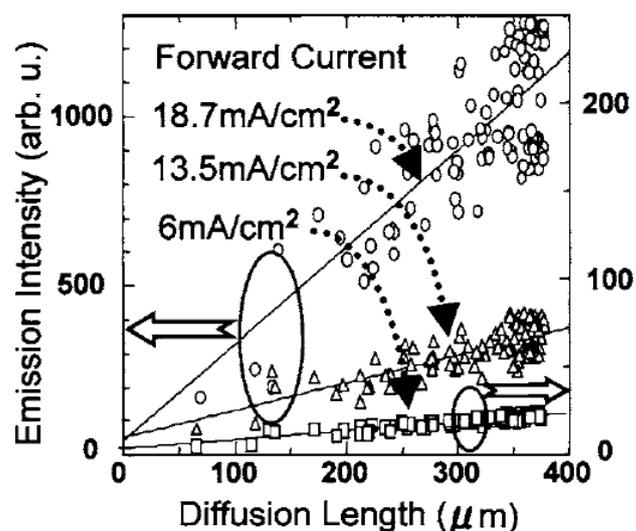


Figura 3.15 - Intensidad de emisión en función de la longitud de difusión [43]

La aplicación de esta técnica a la detección de grietas es directa, ya que en una grieta, el silicio queda directamente expuesto y su recombinación superficial es muy alta. Esto quiere decir que el tiempo de vida de los portadores minoritarios será muy bajo en las inmediaciones de la grieta y se representará como una línea oscura en la imagen obtenida. La identificación de esa línea como grieta, distinguiéndola de cualquier otro tipo de defecto, es muy sencilla en el caso de obleas de silicio monocristalino ya que siempre tienen forma de líneas rectas en la orientación de los planos cristalinos. Con las obleas de silicio multicristalinas la identificación es algo más compleja ya que la orientación de los planos cristalográficos cambia al cambiar de grano.

En la Figura 3.16 se observa una imagen EL de una célula monocristalina de 125x125 mm² polarizada con 3 A obtenida con una cámara CoolSamba HR-400 de Sensovation, de sensor CCD de silicio refrigerado. Para la obtención de esta imagen se ha empleado un tiempo de adquisición de 2,5 segundos. Se puede observar en la parte superior una grieta en forma de 'X' cuyas ramas siguen los planos cristalográficos a 45° con respecto a los bordes.

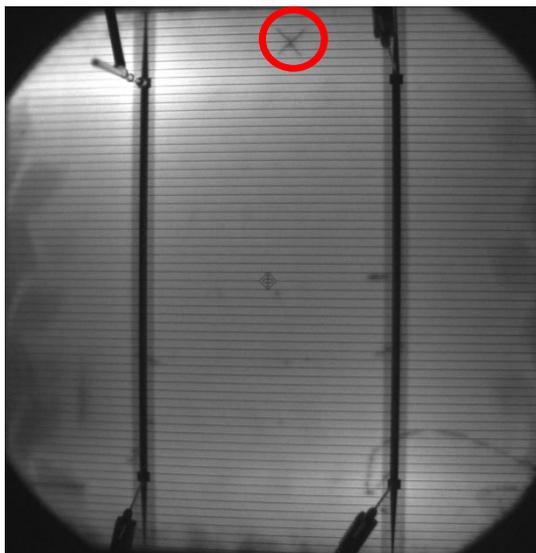


Figura 3.16 - Imagen EL de una oblea de 125 mm polarizada con 3A

La técnica de imagen EL es adecuada para su implantación en la línea de fabricación de células solares ya que los tiempos de procesado pueden situarse por debajo de los 2 segundos, la detección de grietas es muy buena y su integración en línea es relativamente sencilla. El principal inconveniente de este método es que la célula debe estar finalizada para poder excitarla eléctricamente y esto solamente es posible una vez que la célula está metalizada. Una posible solución a esta limitación es la utilización de la técnica de imagen fotoluminiscente.

3.2.6.2 Imagen Fotoluminiscente

La imagen fotoluminiscente (PL) para la caracterización de células solares haciendo un escaneado con un punto láser [44] se ha utilizado durante muchos años. Este procedimiento es muy lento ya que se realiza una medida secuencial, punto a punto, de toda la superficie de la oblea.

En 2006 se introdujo la imagen PL utilizando una excitación homogénea sobre la superficie total de la oblea y una cámara basada en un detector CCD de Silicio refrigerado [45]. En este caso la iluminación se realiza con un diodo láser de 15 W y una longitud de onda de 850 nm, para iluminar un sustrato de $8.5 \times 8.5 \text{ cm}^2$ con variaciones de intensidad en la superficie menores del 5%.

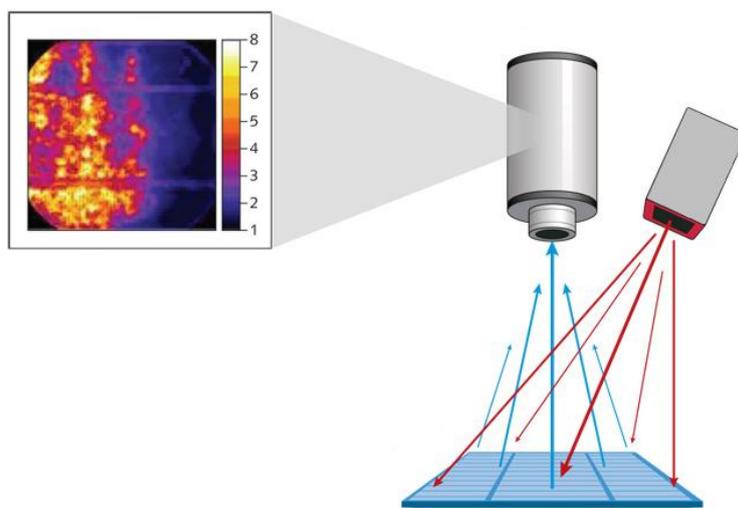


Figura 3.17 - Esquema de la técnica de Imagen Fotoluminiscente

La ubicación de la cámara tiene dos posibilidades; puede estar en la misma cara por la que se le aplica la iluminación a la oblea, o en la cara contraria. En ambos casos es recomendable utilizar un filtro entre la oblea y la cámara que evite que la iluminación reflejada en la oblea o transmitida a través de ella, llegue al sensor. Es habitual la utilización de filtros paso alto que bloqueen longitudes de onda por debajo de los 1000 nm.

El inconveniente de esta técnica con respecto a la EL es que el montaje es más complejo y es más difícil llegar a los niveles de polarización que se alcanzan con una excitación eléctrica. En cambio, la mayor ventaja que se obtiene con la PL es que no es necesario contactar la muestra, por lo que es posible tomar imágenes PL de obleas en cualquier paso del proceso productivo; desde obleas recién cortadas hasta células finalizadas.

La identificación de grietas con la técnica de imagen PL se basa en el mismo principio que con la imagen EL. Al producirse una grieta, queda expuesto el silicio desnudo y la alta recombinación superficial que se produce da lugar a bajos tiempos de vida en esa zona. Por lo tanto en la imagen obtenida aparecerá en forma de línea oscura. En la actualidad hay varios equipos comerciales, tanto para laboratorio como para la industria, que utilizan esta tecnología para el análisis de las obleas de silicio [46]–[48].

Las técnicas de imagen EL y PL no sólo son válidas para la medición de la distribución de longitudes de difusión de portadores minoritarios y la detección de grietas, sino que pueden ser utilizadas para obtener otras características de la células solares y detectar otros tipos de defectos. Utilizando la técnica de la imagen PL sobre células solares procesadas, tanto en condiciones de circuito abierto o aplicando diferentes grados de extracción de corriente, ha permitido obtener imágenes de la distribución de la resistencia serie R_S (en Ωcm^2) [49] y de la distribución de la corriente de saturación J_{01} [50]. También ha sido utilizada la técnica de imagen EL para la visualización de la distribución de R_S y J_{01} [51], [52], pero en estos casos sólo se obtienen valores relativos por lo que es necesario un parámetro de ajuste para la obtención de los valores absolutos.

3.2.7 Sistema de Resonancia de Vibraciones Ultrasónicas

El sistema de resonancia de vibraciones ultrasónicas (RUV, Resonance Ultrasonic Vibration System) se basa en la aplicación de vibraciones ultrasónicas, de frecuencia y amplitud regulables, a las obleas de silicio y observar su respuesta. Las obleas de silicio entran en resonancia a ciertas frecuencias en función de sus dimensiones. Estas frecuencias de resonancia también son afectadas por la presencia de grietas en las obleas por lo que analizando los perfiles de las resonancias es posible detectar estos defectos.

La aplicación de esta técnica para la detección de grietas fue presentada en el 2006 [53], [54] aunque anteriormente ya se había utilizado esta técnica para el estudio de estrés en las obleas [55]–[57].

El esquema del montaje del sistema RUV se puede observar en la Figura 3.18. La oblea a ensayar se acopla mediante vacío a un transductor piezoeléctrico a través del cual se introducen las vibraciones ultrasónicas en el rango de frecuencias de 20 a 90 kHz. Las vibraciones se propagan por la oblea y forman ondas acústicas estacionarias en las frecuencias de resonancia. Estas vibraciones son detectadas con una sonda ultrasónica de banda ancha que contacta la oblea por uno de sus extremos. Para realizar un análisis de las de las vibraciones transmitidas a través de la oblea se realiza una amplificación con un sistema lock-in estándar que filtra la señal.

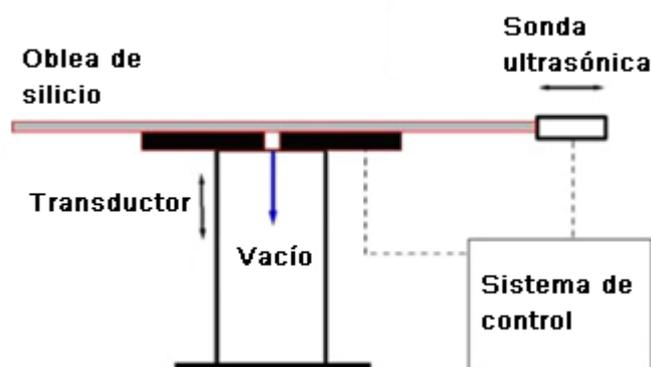


Figura 3.18 - Esquema del sistema RUV

Realizando un barrido de frecuencias alrededor de un modo de resonancia particular, el sistema RUV proporciona medidas precisas de la amplitud de la onda transmitida a través de la oblea a lo largo de todo el barrido. De esta forma se obtiene un perfil de la resonancia en el que se pueden medir; la frecuencia de resonancia, la amplitud máxima de la misma y su anchura. En la Figura 3.19 se muestra el resultado de una medida con el sistema RUV. Se puede observar la medida de la amplitud de la vibración en las diferentes frecuencias entre 64 y 72 kHz (rojo) y una aproximación numérica con una función de Lorentz (azul).

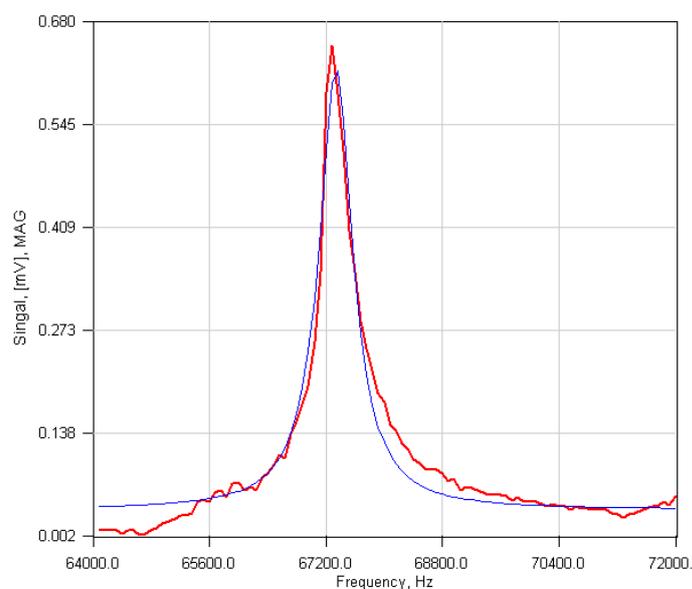


Figura 3.19 - Medida de un pico de resonancia de una oblea de 125x125 mm² obtenida con el sistema RUV

En la teoría, cuando una oblea tiene una grieta, la amplitud del pico disminuye, la frecuencia central de resonancia se desplaza hacia frecuencias más bajas y la anchura del pico aumenta [53]. Este efecto aumenta al aumentar el tamaño de la grieta. Además la posición de la grieta también afecta a la medida ya que su efecto puede ser mayor en unos modos de resonancia que en otros [58].

Uno de los retos tecnológicos del método RUV para su instalación en línea es el hecho de que las obleas, aun siendo del mismo tamaño y forma, no son idénticas. Muestran una variación estadística de las características del pico de resonancia causada por variaciones en el tamaño de la oblea, espesor, estrés interno, etc. Dando un margen de error de 3 veces la desviación estándar entre medidas de un único parámetro del pico RUV, se puede tener un alto número de falsos positivos.

Para solucionar este problema, se ha desarrollado un algoritmo estadístico que mejora la capacidad de decisión del sistema RUV [59]. Con este algoritmo, el software del RUV genera los valores medios y las desviaciones estándar de cada uno de los parámetros del pico de resonancia (frecuencia central, amplitud y anchura) según va tomando medidas, y calcula un margen para cada parámetro para aceptar o rechazar una oblea. Cuando en la medida de una oblea, dos de los tres parámetros caen fuera del margen establecido, se considerará que esa oblea es sospechosa de tener una grieta.

Aplicando este algoritmo estadístico, y apartando del proceso productivo aquellas obleas detectas como dañadas, se ha conseguido reducir el índice de roturas en un número aproximado al de obleas retiradas [60].

4 Evaluación del Sistema RUV para la Detección de Grietas

En este capítulo se describen los experimentos realizados con el objetivo de determinar la viabilidad del sistema RUV para la detección de grietas en sustratos de silicio.

En primer lugar se detalla un estudio realizado a lo largo del proceso productivo de una célula solar, a fin de definir el proceso de medida del sistema RUV en cada paso productivo y evaluar el efecto de cada uno de estos pasos en la respuesta que ofrece el sistema RUV. A continuación se analiza el efecto que pueda tener la variación del espesor de diferentes muestras sobre la medida. Posteriormente, se estudia la capacidad del sistema RUV para detectar grietas, para lo que se han analizado obleas con grietas creadas con láser y mecánicamente. Debido a las dudas que generan los resultados obtenidos hasta el momento se comparan medidas realizadas con el sistema RUV que dispone el Instituto de Tecnología Microelectrónica con otro sistema RUV propiedad de RUV Systems.

4.1 Viabilidad RUV en Fabricación

Con el fin de determinar la viabilidad del sistema RUV para la detección de grietas en el proceso productivo, se realizó un estudio en las instalaciones de Isofotón S.A. Los objetivos de este estudio eran los siguientes:

- Definir el proceso de medida del sistema RUV
- Caracterizar la medida RUV de las obleas después de cada proceso productivo
- Validar el sistema RUV para la detección de microgrietas.

4.1.1 Estudio realizado

Para la realización de este estudio se parten de 100 obleas pseudocuadradas de silicio monocristalino de dimensiones $125 \times 125 \text{ mm}^2$ y de $270 \pm 30 \text{ }\mu\text{m}$ de espesor. A estas 100 obleas se les realiza una inspección inicial con el sistema RUV antes de ser procesadas. Luego se introducen en el proceso de fabricación junto con otras 300 obleas para completar el lote. Tras cada paso productivo 50 obleas son evaluadas con el sistema RUV para detectar posibles obleas dañadas en cada paso y caracterizar la respuesta del RUV tras cada procedimiento.

4.1.1.1 Inspección Inicial

En primer lugar se hace una medida del espectro completo de varias obleas para determinar cuál va a ser el modo de resonancia sobre el que se va a hacer el estudio. El modo de resonancia deseado debe ser lo suficientemente alto y estrecho, y no debe estar influenciado por modos de resonancia adyacentes para que su análisis sea lo más sencillo posible.

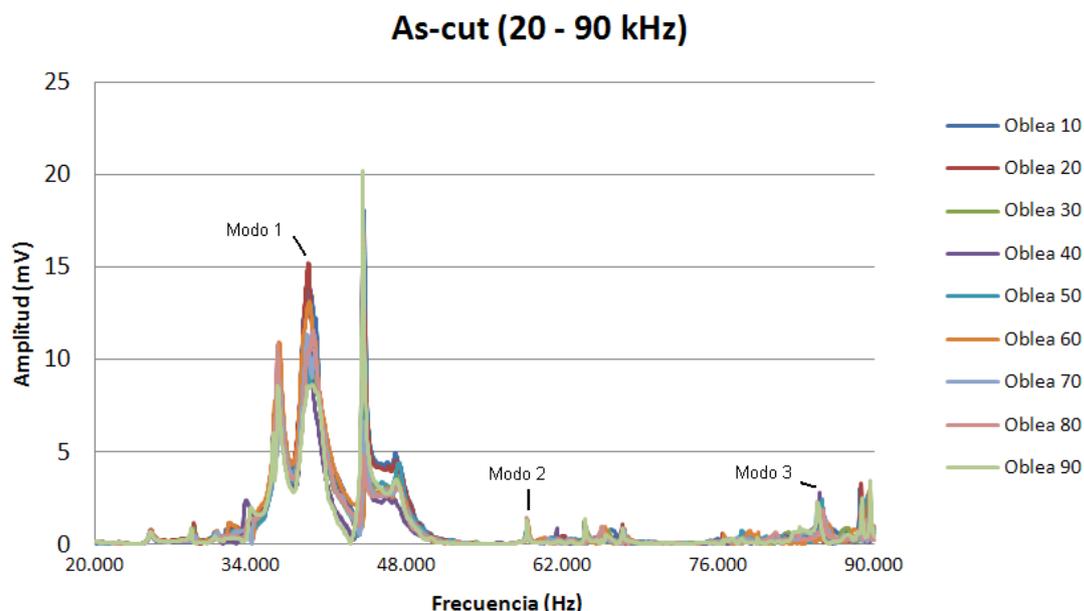


Figura 4.1 - Medida del RUV de 9 obleas en el espectro completo (20-90 kHz)

Se decide utilizar el modo 2 de resonancia ya que cumple las condiciones establecidas.

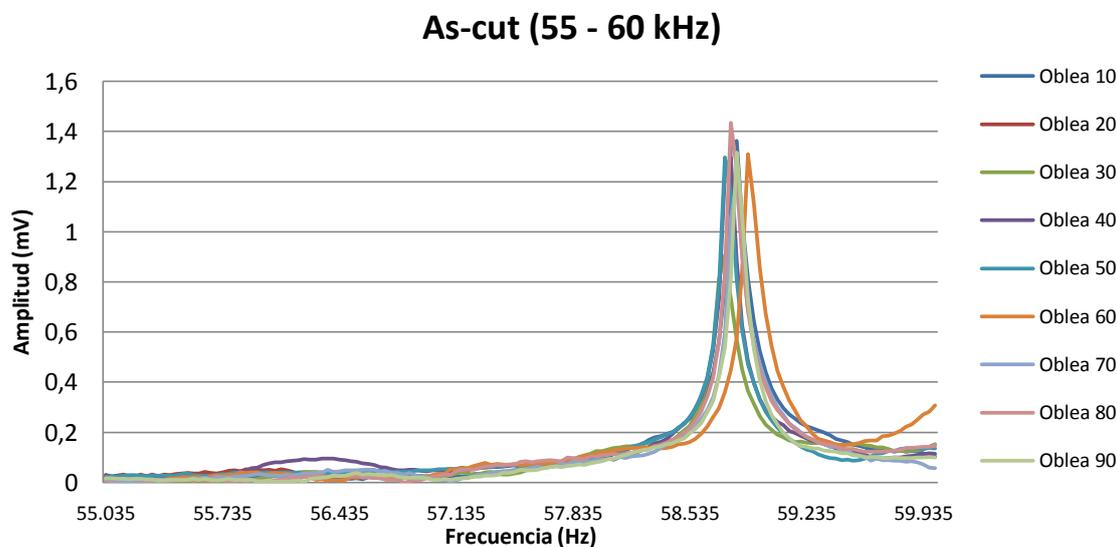


Figura 4.2 - Medida del RUV de 9 obleas en el modo de resonancia 2 (55-60 kHz)

Una vez establecido el modo de resonancia adecuado para el estudio se procede a la medida de las 100 obleas en este modo de resonancia, almacenando para cada una de ellas los valores de amplitud, anchura y frecuencia central del perfil de resonancia.

Entre las obleas medidas, la mayoría están en unos valores muy cercanos a la media, pero las obleas 29 y 30 obleas parecen tener algún tipo de daño ya que su frecuencia central es notablemente inferior, su anchura es superior a la media y su amplitud es menor. En la Tabla 4.1 se pueden observar los valores estadísticos de las medidas realizadas, así como los valores obtenidos y la desviación porcentual con respecto al valor medio de las obleas 29 y 30.

<i>Oblea n°</i>	<i>Amplitud</i>	<i>Anchura</i>	<i>Frecuencia Central</i>
Media (%Desv.Est)	0,474 (±18,20%)	122,34 (±11.05%)	58.617,1 (±0,121%)
29	0,235 (-50,4%)	154,145 (+26%)	58.477,0 (-0,23%)
30	0,245 (-48,3%)	179,075 (+46,4%)	58.426,3 (-0,33%)

Tabla 4.1- Datos estadísticos de las medidas RUV de obleas as-cut y medidas de las obleas 29 y 30

4.1.1.2 Análisis tras texturado

El proceso de texturado de las obleas incluye un proceso de carga manual de los sustratos en los carriers de química para poder ser procesados en los baños. Tras el proceso químico las obleas son secadas sin la utilización del centrifugador y a continuación son testeadas con el sistema RUV. Durante este proceso las muestras 2, 3, 4 y 41 se rompen y la oblea 1, que queda seriamente dañada, también se rompe tras la medida del RUV. Si observamos las medidas de estas obleas en el paso previo (Tabla 4.2) no parecen tener ningún tipo de daño.

<i>Oblea n°</i>	<i>Amplitud</i>	<i>Anchura</i>	<i>Frecuencia Central</i>
Media (%Desv.Est)	0,474 ($\pm 18,20\%$)	122,34 ($\pm 11,05\%$)	58.617,1 ($\pm 0,121\%$)
1	0,456 (-3,7%)	120,87 (-1,2%)	58.590,2 (-0,046%)
2	0,450 (-5,1%)	118,33 (-3,3%)	58.632,4 (-0,026%)
3	0,490 (+3,4%)	125,99 (+3,0%)	58.643,5 (+0,045%)
4	0,470 (-0,9%)	121,97 (-0,3%)	58.631,4 (+0,024%)
41	0,450 (-5,1%)	116,16 (-5,0%)	58.603,5 (-0,023%)

Tabla 4.2 -Datos estadísticos de las medidas RUV de obleas as-cut y medidas de las obleas 1, 2, 3, 4 y 41

Por el contrario, las obleas 29 y 30 que parecían estar dañadas, no se rompen y, aunque los datos pueden hacer pensar que pueden tener algún tipo de daño, ya no es tan evidente como en las medidas realizadas inicialmente. Las medidas de estas dos obleas y de la oblea 1 que estaba gravemente dañada se pueden observar en la Tabla 4.3.

<i>Oblea n°</i>	<i>Amplitud</i>	<i>Anchura</i>	<i>Frecuencia Central</i>
Media (%Desv.Est)	1,141 ($\pm 35,11\%$)	126,54 ($\pm 10,17\%$)	58.030,8 ($\pm 0,297\%$)
1	2,51 (+119,9%)	152,91 (+20,8%)	57.198,0 (-1,434%)
29	0,60 (-47,4%)	152,64 (+20,6%)	57.886,6 (-0,248%)
30	0,575 (-49,6%)	136,61 (+8,0%)	57.782,7 (-0,427%)

Tabla 4.3 -Datos estadísticos de las medidas RUV de obleas texturadas y medidas de las obleas 1, 29 y 30

4.1.1.3 Análisis tras secado en centrifugadora

El proceso de centrifugado se realiza habitualmente para secar las obleas inmediatamente después del procesado químico de las mismas. Los carriers se introducen en las centrifugadoras donde, aplicándoles calor y una alta velocidad de rotación se consigue eliminar todos los restos de líquido.

En este paso no se produce la rotura de ninguna de las obleas. Las obleas sospechosas de estar dañadas tampoco se rompen y sus medidas siguen indicando la posibilidad de que tengan algún tipo de grieta.

<i>Oblea n°</i>	<i>Amplitud</i>	<i>Anchura</i>	<i>Frecuencia Central</i>
Media (%Desv.Est)	0,953 ($\pm 34,7\%$)	111,26 ($\pm 18,6\%$)	58.000,0 ($\pm 0,212\%$)
29	0,505 (-47,0%)	122,01 (+9,7%)	57.806,6 (-0,333%)
30	0,485 (-49,1%)	138,99 (+24,9%)	57.795,3 (-0,353%)

Tabla 4.4 - Datos estadísticos de las medidas RUV de obleas centrifugadas y medidas de las obleas 29 y 30

4.1.1.4 Análisis tras difusión en tubo de cuarzo

Para realizar la difusión es necesario cambiar las obleas del carrier de química a unas barquillas adecuadas para el proceso. Una vez realizada la transferencia, se introducen las obleas en el tubo de cuarzo donde se realiza el proceso de difusión del emisor de fósforo. En este proceso las obleas alcanzan temperaturas cercanas a los 900°C lo que les puede generar estrés térmico y provocar su rotura.

Aunque en este proceso se producen varias roturas, ninguna de las obleas rotas está dentro de las 50 que estamos analizando. Las obleas 29 y 30 siguen sin romperse aunque sus medidas siguen indicando un posible daño.

<i>Oblea n°</i>	<i>Amplitud</i>	<i>Anchura</i>	<i>Frecuencia Central</i>
Media (%Desv.Est)	0,860 ($\pm 16,8\%$)	117,35 ($\pm 14,64\%$)	57.995,9 ($\pm 0,208\%$)
29	0,505 (-41,3%)	135,17 (+15,2%)	57.846,4 (-0,258%)
30	0,460 (-46,5%)	128,26 (+9,3%)	57.678,4 (-0,574%)
50	0,783 (-8,9%)	119,70 (+2,0%)	58.203,6 (+0,358%)

Tabla 4.5 - Datos estadísticos de las medidas RUV de obleas difundidas y medidas de las obleas 29, 30 y 50

4.1.1.5 Análisis tras aislamiento con ataque de plasma

El aislamiento con ataque de plasma consiste en introducir las obleas en un horno de plasma para atacar los bordes de las mismas y eliminar el emisor en esa zona. Para realizar este proceso es necesario descargar las obleas de los carriers y apilarlas para solamente dejar el borde expuesto al ataque. Durante el apilamiento se rompe la oblea 50 que, como se muestra en la Tabla 4.5 no había dado muestras de estar dañada.

<i>Oblea n°</i>	<i>Amplitud</i>	<i>Anchura</i>	<i>Frecuencia Central</i>
Media (%Desv.Est)	1,213 ($\pm 22,3\%$)	121,05 ($\pm 9,81\%$)	58.012,55 ($\pm 0,187\%$)
29	0,695 (-42,7%)	142,75 (+17,9%)	57.854,2 (-0,273%)
30	0,660 (-45,6%)	153,23 (+26,6%)	57.814,2 (-0,342%)

Tabla 4.6 -Datos estadísticos de las medidas RUV de obleas aisladas con ataque de plasma y medidas de las obleas 29 y 30

4.1.1.6 Análisis tras aplicación de capa anti reflexiva

La capa anti-reflexiva se crea por deposición de una pequeña capa de óxido de titanio en la superficie de la oblea. Este proceso requiere que las obleas estén cargadas en un casete que posteriormente es vaciado automáticamente oblea por oblea para realizarles el proceso de deposición. Este proceso de carga en el casete se realiza de forma manual. Tras este paso las obleas se vuelven a cargar automáticamente en otro casete. En este paso no se rompe ninguna oblea.

<i>Oblea n°</i>	<i>Amplitud</i>	<i>Anchura</i>	<i>Frecuencia Central</i>
Media (%Desv.Est)	0,757 ($\pm 10,0\%$)	107,62 ($\pm 9,3\%$)	57.963,5 ($\pm 0,161\%$)
29	0,615 (-18,8%)	136,92 (+27,2%)	57.871,9 (-0,158%)
30	0,660 (-12,8%)	128,47 (+19,4%)	57.804,4 (-0,274%)

Tabla 4.7 -Datos estadísticos de las medidas RUV de obleas con capa AR y medidas de las obleas 29 y 30

4.1.1.7 Análisis tras metalización

El proceso de metalización está compuesto por los siguientes pasos: descarga de la oblea del casete de transporte, impresión serigráfica del contacto frontal, secado del contacto frontal, volteado de la oblea, serigrafiado del contacto posterior, secado del contacto posterior y quemado simultáneo de ambos contactos. En un fallo de la máquina se rompió la oblea 29 y se extravió la oblea 46.

<i>Oblea n°</i>	<i>Amplitud</i>	<i>Anchura</i>	<i>Frecuencia Central</i>
Media (%Desv.Est)	0,496 ($\pm 15,8\%$)	203,75 ($\pm 10,9\%$)	55.907 ($\pm 0,166\%$)
20	0,515 (+3,9%)	195,80 (-3,9%)	55.902,8 (-0,009%)
30	0,440 (-11,3%)	273,03 (+34,0%)	55.788,5 (-0,214%)

Tabla 4.8 -Datos estadísticos de las medidas RUV de células metalizadas y medidas de las obleas 20 y 30

Durante la manipulación de las muestras al realizar las medidas también se rompió la célula 20 aunque en la medida realizada no se ha detectado ningún tipo de daño.

4.1.1.8 Análisis tras clasificación

Una vez finalizadas las células se procede a su clasificación en función de su rendimiento. Durante este proceso no se rompió ninguna oblea y, los resultados obtenidos con las células testeadas son similares a los obtenidos con el resto de obleas del lote. Esto sugiere que la realización de medidas con el sistema RUV no condiciona la calidad de las células fabricadas.

<i>Oblea n°</i>	<i>Amplitud</i>	<i>Anchura</i>	<i>Frecuencia Central</i>
Media (%Desv.Est)	0,541 ($\pm 11,2\%$)	207,70 ($\pm 9,0\%$)	55.939,8 ($\pm 0,165\%$)
6	0,565 (+4,3%)	221,98 (+6,9%)	55.839,2 (-0,180%)
10	0,560 (+3,4%)	215,76 (+3,9%)	56.036,6 (+0,173%)
13	0,540 (-0,3%)	196,53 (-5,4%)	55.913,8 (-0,046%)
30	0,475 (-12,3%)	262,92 (+26,6%)	55.825,6 (-0,204%)

Tabla 4.9 -Datos estadísticos de las medidas RUV de células clasificadas y medidas de las células 6, 10, 13 y 30

4.1.1.9 Análisis tras el soldado de los contactos

Tras la clasificación, las células pasan al proceso de soldadura para la realización de paneles fotovoltaicos. En este proceso se rompen las muestras 6, 10, 13 y 30, de las cuales la única sospechosa de estar dañada era la última de ellas.

Para realizar el ensayo de las células en el sistema RUV se procede al corte de los contactos o tabs soldados a las mismas. Al efectuar las medidas se observa una gran dispersión de los resultados obtenidos que probablemente dependa de la longitud de los tabs que han quedado en las células.

<i>Oblea n°</i>	<i>Amplitud</i>	<i>Anchura</i>	<i>Frecuencia Central</i>
Media (%Desv.Est)	0,194 (±66,3%)	334,7 (±48,1%)	55.217,8 (±0,462%)

Tabla 4.10 -Datos estadísticos de las medidas RUV de células soldadas

Esta dispersión de los datos tan grande hace que se deseché este paso del estudio.

4.1.2 Análisis de los Resultados

4.1.2.1 Procedimiento de medida del sistema RUV

Al inicio del estudio se estudió la respuesta de 9 muestras ante el espectro completo de frecuencias del sistema RUV, detectándose los 3 modos de resonancia que aparecen en la bibliografía [58]. De los 3 modos de resonancia se establece que el más adecuado para la realización del estudio es el modo 2 ya que su aspecto y repetitividad lo hacían el apropiado para esta tarea.

El rango de frecuencias en el que se debe realizar el ensayo en cada punto de proceso debe ser tal que se asegure la detección del pico de resonancia en cualquier circunstancia. Un rango de frecuencias muy pequeño puede provocar que el pico de resonancia de alguna oblea quede fuera de la medida, pero un rango muy amplio va a elevar el tiempo necesario para la realización del ensayo.

Para determinar un rango adecuado se establece una frecuencia inferior (f_{inf}) y una frecuencia superior (f_{sup}) que asegure, con cierto grado de seguridad, la detección del pico de resonancia. Utilizando el valor medio de la frecuencia central (\bar{f}_{pico}) y el valor

medio de la anchura de pico (\bar{w}_{pico}) para cada punto del proceso, se pueden establecer los siguientes valores para la frecuencia inferior y superior:

$$\begin{aligned} f_{inf} &= \bar{f}_{pico} - \frac{1}{2}\bar{w}_{pico} - \Delta_{inf} \\ f_{sup} &= \bar{f}_{pico} + \frac{1}{2}\bar{w}_{pico} + \Delta_{sup} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Teniendo en cuenta que, en caso de la presencia de una grieta, el pico de resonancia se va a desplazar hacia frecuencias inferiores, se puede establecer que el margen de seguridad inferior (Δ_{inf}) debe ser mayor que el margen superior (Δ_{sup}). Además, estos márgenes estarán relacionados con la desviación típica de la frecuencia central del pico (σ_{pico}).

$$\begin{aligned} \Delta_{inf} &= 4\sigma_{pico} \\ \Delta_{sup} &= 2\sigma_{pico} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Aplicando estos márgenes un único pico de resonancia quedaría fuera del rango de medida establecido. Dicho pico es el correspondiente a la oblea 1 después del paso del texturado, que tenía una grieta tan grande que era detectable a simple vista.

4.1.2.2 Efecto del punto de proceso en la medida RUV

A lo largo de este estudio se ha visto que la aplicación de algunos de los pasos productivos afecta a las medidas de los picos de resonancia obtenidas con el sistema RUV. En las gráficas que se encuentran a continuación se muestra la evolución de la frecuencia central, la anchura y la amplitud de los picos de resonancia, en función del paso productivo previo a cada medida.

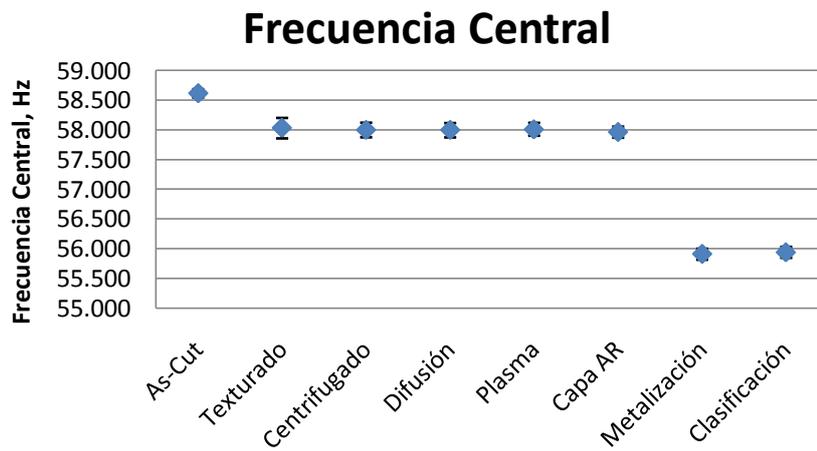


Figura 4.3 - Evolución de la frecuencia central del modo 2 de resonancia a lo largo del proceso de fabricación

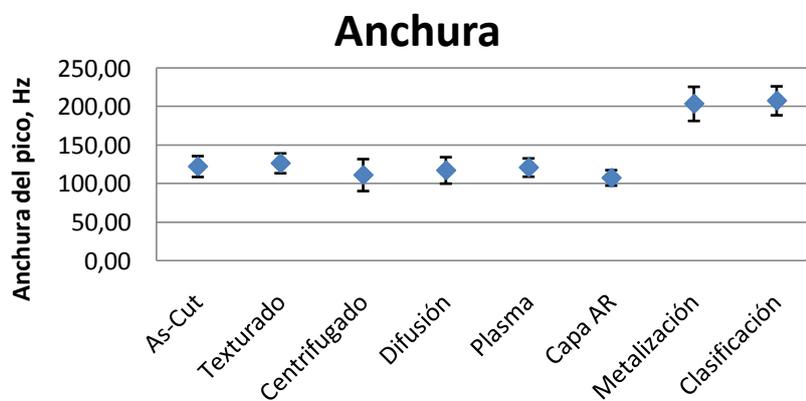


Figura 4.4 - Evolución de la anchura del modo 2 de resonancia a lo largo del proceso de fabricación

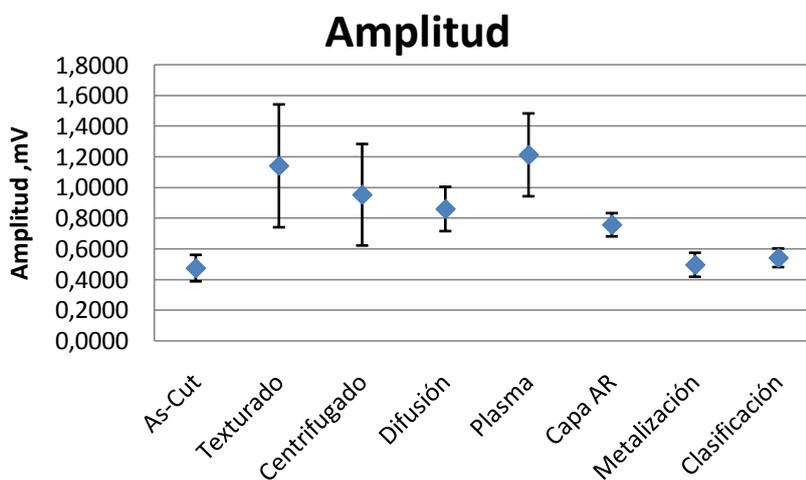


Figura 4.5 - Evolución de la amplitud del modo 2 de resonancia a lo largo del proceso de fabricación

Los pasos que más claramente afectan a la medida, y en concreto a la frecuencia central del pico de resonancia, son el texturado y la metalización. En ambos casos la estructura mecánica de la oblea es modificada. En el caso del texturado, el ataque químico elimina parte del silicio de la superficie creando una estructura piramidal. En la metalización se crea un patrón de pasta serigráfica en ambas caras de la oblea que, al ser quemadas en el horno de cinta, se adhieren al silicio.

4.1.2.3 Validación del sistema RUV para la detección de grietas

Como se puede ver en las figuras 4.3, 4.4 y 4.5, la desviación típica de la frecuencia central y de la anchura del pico de resonancia está bastante contenida y no sufre una gran variación en los distintos pasos productivos. En cambio, en el caso de la amplitud del pico, la desviación típica toma valores muy diferentes en cada uno de los pasos productivos. Es por esta razón que, para determinar si una oblea tiene una grieta o no, se considera más adecuado fijarse en primer lugar en la frecuencia central del pico, y en segundo lugar, en su anchura.

De las 12 obleas que se han roto a lo largo del estudio, una de ellas estaba claramente rota, otras dos tenían indicios de estar dañadas y las otras nueve no han dado señales previas de estar agrietadas. Aún así, las obleas que parecían estar dañadas han resistido varios pasos productivos sin romperse mientras que otras obleas aparentemente no dañadas sí se han fracturado.

Por lo tanto, la validez del sistema RUV para la detección de grietas en línea no ha podido ser establecida en este estudio.

4.2 Efecto del espesor en la medida del RUV

Una vez comprobado cómo afectan los diferentes pasos productivos a la respuesta del sistema RUV, se realiza este estudio para comprobar la influencia del espesor de las obleas en la medida. Teóricamente [37], al situarse el micrófono del RUV en el borde de la oblea, la onda que se está analizando es el modo longitudinal de vibración, y este modo es poco sensible a variaciones en el espesor de la muestra.

4.2.1 Preparación de las muestras

Para la realización de este estudio se parten de 45 obleas pseudocuatras de 125x125 mm² de silicio monocristalino, con espesores iniciales de 270±30 µm. Estas obleas son separadas en 3 lotes de 15 obleas que serán decapados en un baño alcalino. La duración del baño será diferente para cada uno de los 3 lotes para la obtención de diferentes espesores por lote, pero suficientemente largo para asegurarnos la eliminación del daño superficial generado durante el proceso de serrado del lingote [27]. En la siguiente tabla se muestra un resumen de las obleas analizadas en este estudio tras este proceso de decapado.

<i>Lote</i>	<i>Nº Muestras</i>	<i>Espesor medio</i>
1	13	138 µm
2	15	156 µm
3	13	187 µm

Tabla 4.11 - Resumen de las muestras a estudio

4.2.2 Medidas realizadas

Para cada oblea, en primer lugar se hace una medida en el espectro completo de frecuencias (20 kHz – 91 kHz) para identificar las posiciones de los diferentes modos de resonancia.

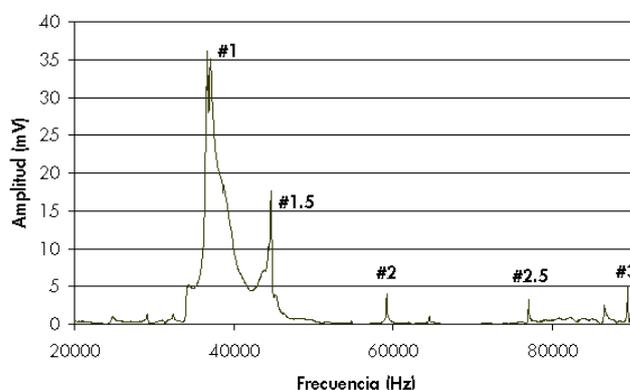


Figura 4.6 - Respuesta de una de las obleas a la medida RUV del espectro completo

En esta medida se identifican los modos de resonancia 1, 2 y 3 que vienen documentados en la bibliografía del sistema RUV [58]. A parte de estos modos, se han identificado otros dos picos de resonancia; uno que se encuentra entre el modo 1 y 2 que se ha denominado modo 1.5, y otro entre los modos 2 y 3 y que se ha nombrado como modo 2.5.

A continuación se realizan tres medidas sobre cada uno de los 5 modos de resonancia guardando, para cada medida, los datos de frecuencia central, anchura y amplitud del pico de resonancia. Un resumen de las medidas realizadas a cada oblea se puede observar en la siguiente tabla:

<i>Medida</i>	<i>Frec. Inicial (Hz)</i>	<i>Frec. Final (Hz)</i>	<i>Puntos de medida</i>	<i>Resolución (puntos/1000Hz)</i>
Completo	20.000	91.000	2.130	30
Modo1	34.000	42.000	240	30
Modo 1.5	43.000	46.000	90	30
Modo 2	58.000	61.000	90	30
Modo 2.5	76.000	79.000	90	30
Modo 3	88.000	91.000	90	30

Tabla 4.12 - Resumen de medidas realizadas a cada oblea

4.2.3 Resultados

Para la realización del análisis de los resultados, se van a examinar cada uno de los parámetros de los picos de resonancia (frecuencia central, anchura y amplitud) por separado. Se estudiará el efecto del espesor sobre cada uno de los parámetros y en los diferentes modos de resonancia encontrados.

4.2.3.1 Frecuencia central

En las gráficas que se encuentran a continuación se puede observar que el efecto del espesor sobre la frecuencia central de los diferentes modos de resonancia no es importante. Sí se observa una tendencia al aumento de la frecuencia central a medida que el espesor disminuye. Esta tendencia se observa más claramente en los modos 1.5 y 2, pero aún así, no parece importante en comparación con la dispersión de las medidas.

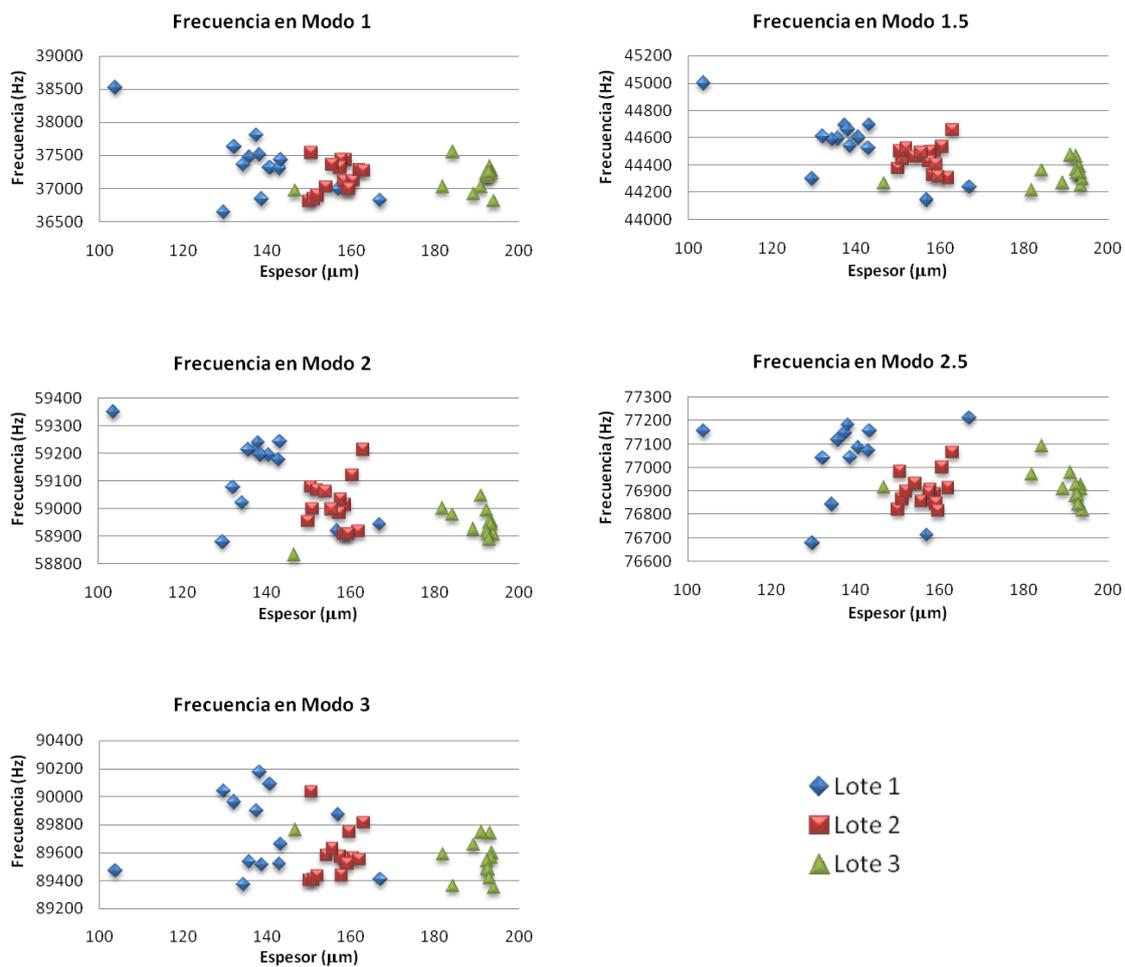


Figura 4.7 - Efecto del espesor sobre la frecuencia central de pico en los diferentes modos de resonancia

4.2.3.2 Anchura

La anchura tampoco se ve afectada claramente por el espesor de la oblea, como muestran las siguientes gráficas. Si bien se puede apreciar una pequeña tendencia a aumentar la anchura al descender el espesor de la oblea, esta tendencia no es muy importante en comparación con la dispersión de los datos de obleas con espesor similar.

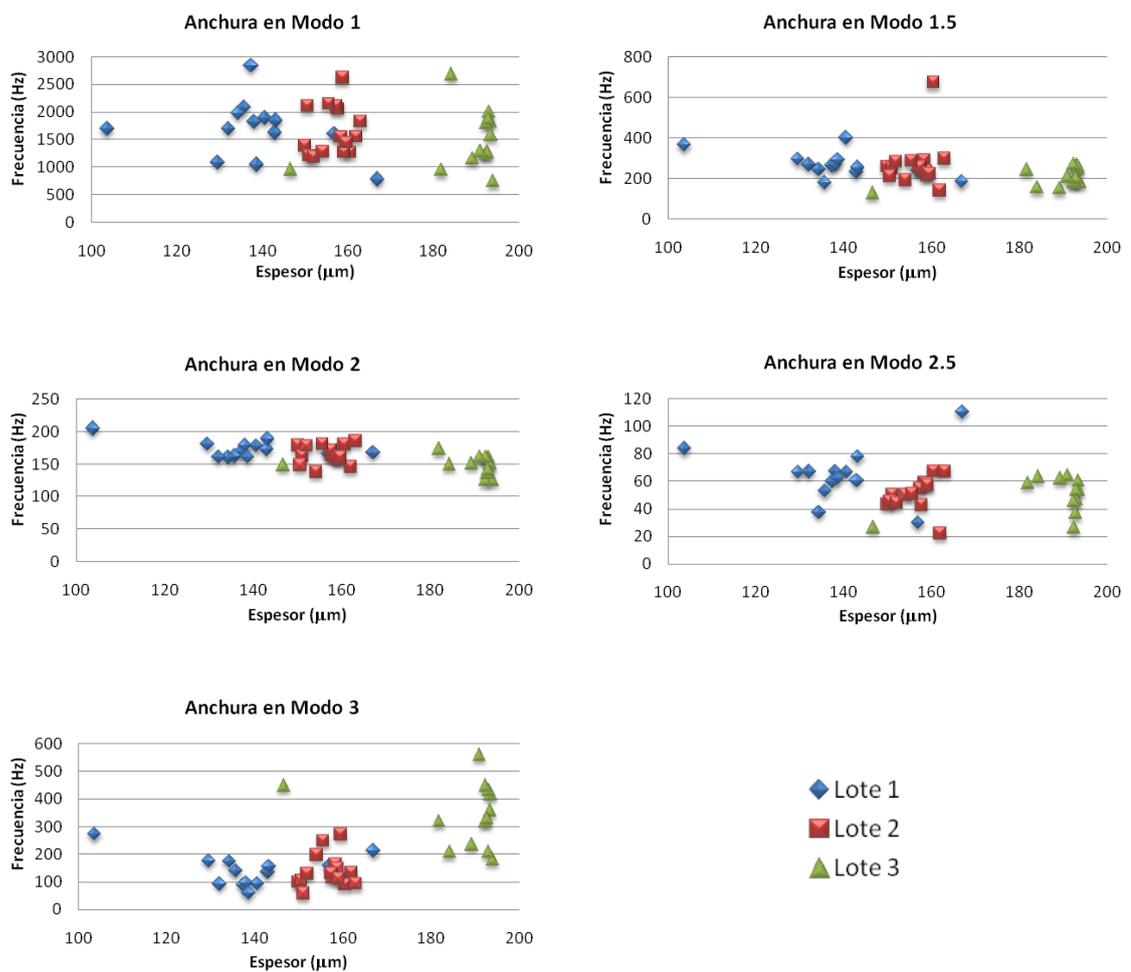


Figura 4.8 - Efecto del espesor sobre la anchura de pico en los diferentes modos de resonancia

4.2.3.3 Amplitud

Las gráficas que se muestran más abajo exponen la evolución de la amplitud del pico de resonancia en función del espesor de las obleas. No se observa ninguna tendencia clara salvo en el modo de resonancia 1, en el cual la amplitud disminuye a medida que las muestras se hacen más delgadas.

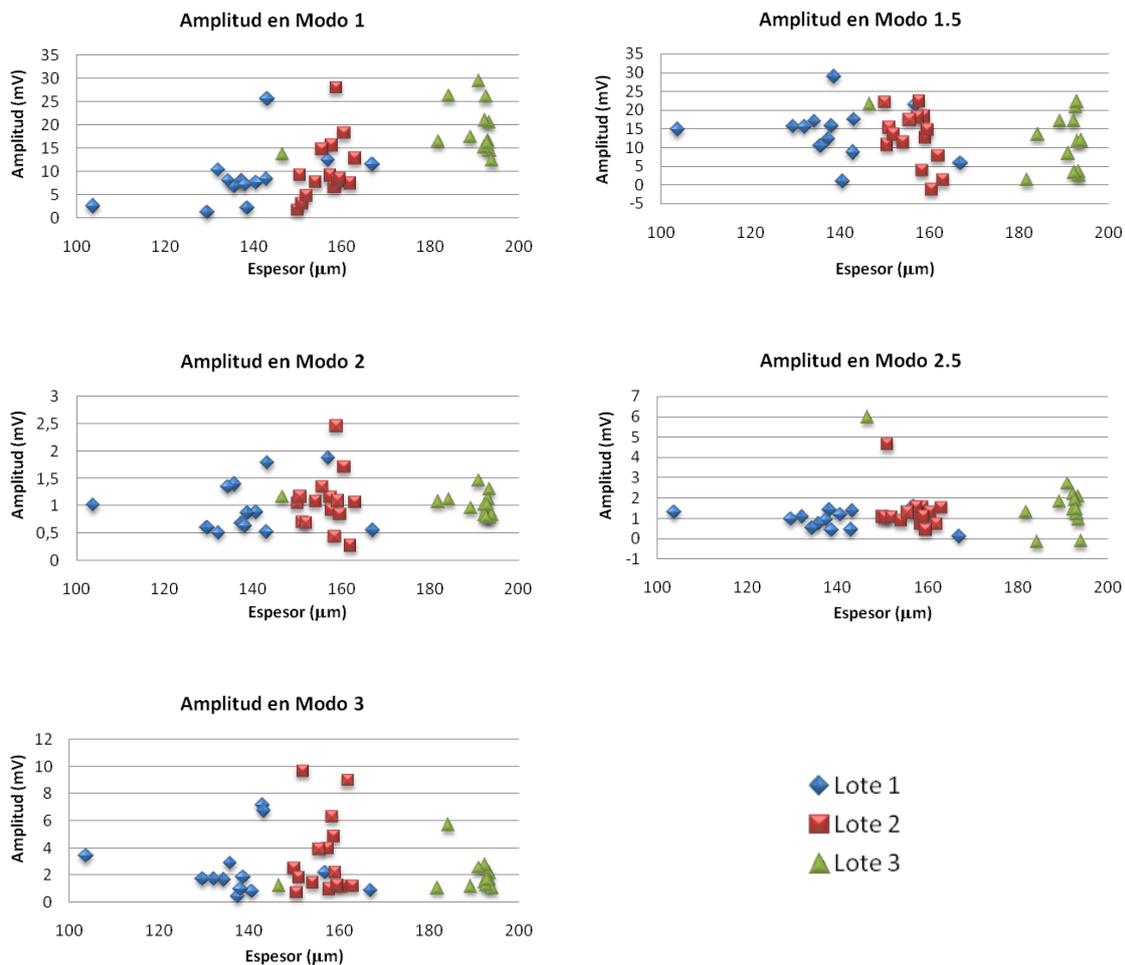


Figura 4.9 - Efecto del espesor sobre la amplitud de pico en los diferentes modos de resonancia

4.2.4 Análisis de los resultados

En las gráficas mostradas en los apartados anteriores se observan pequeñas variaciones en algunas características de algunos modos de resonancia en función del espesor de las obleas. Estas variaciones muestran indicios de que una reducción del espesor puede provocar que:

- la frecuencia central del pico de resonancia aumente,
- su amplitud disminuya
- su anchura aumente.

Pero estas tendencias ni son suficientemente acentuadas en comparación con la dispersión de las medidas, ni se dan en todos los modos de resonancia. Es por ello que se puede considerar que el efecto de las variaciones del espesor sobre las medidas del sistema RUV es despreciable.

Por otra parte se ha visto que ciertos modos de resonancia no son adecuados para realizar las medidas RUV.

- El pico de resonancia del modo 1 es muy ancho y de gran amplitud. El perfil no es el de un pico de resonancia puro y la dispersión de los datos que se obtiene en este modo es muy grande.

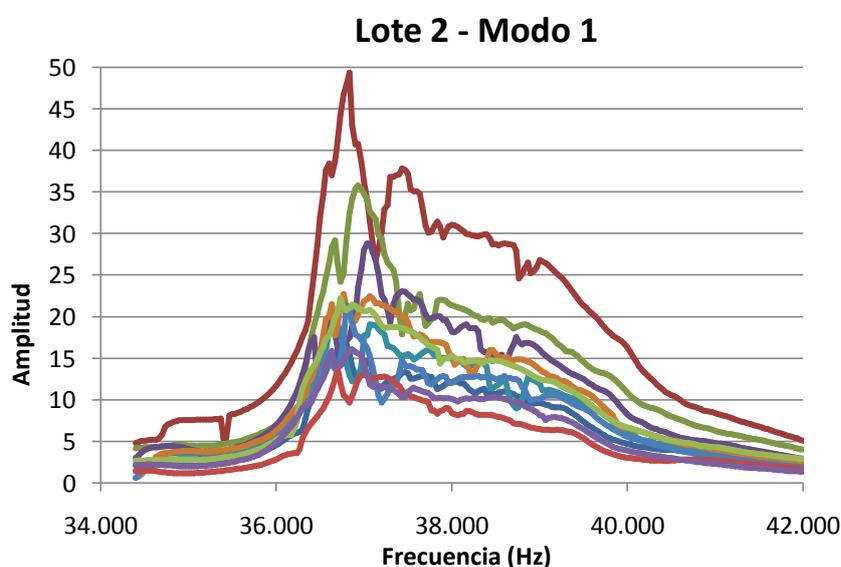


Figura 4.10 - Respuestas de las obleas del lote 2 en el modo 1 de resonancia

- En el modo de resonancia 3 encontramos que en muchos casos se presenta un pico doble. En algunos casos la amplitud del primer pico es mayor que el del segundo y en otros casos sucede lo contrario. Por ello es imposible comparar los resultados de las medidas ya que se comparan características de diferentes picos.

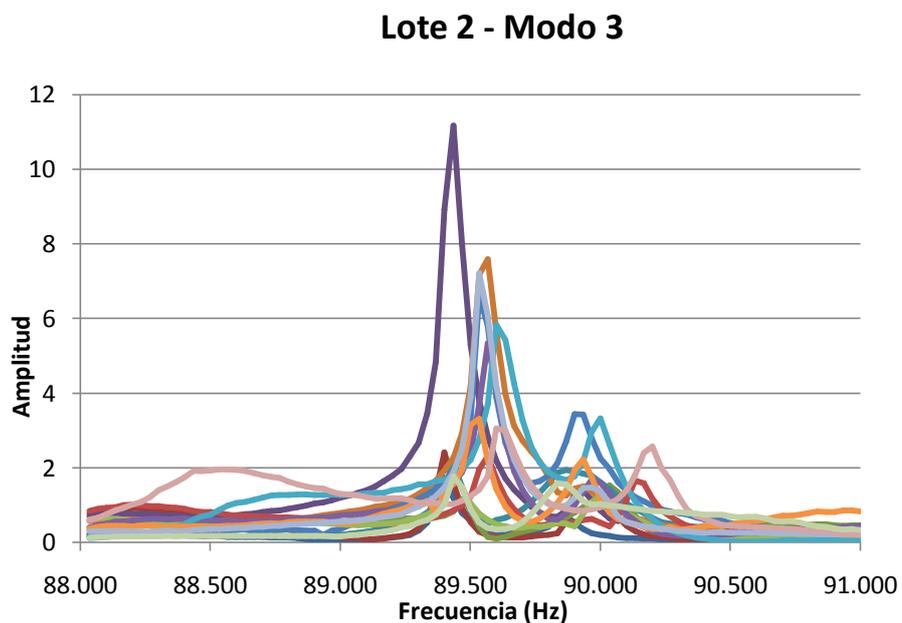


Figura 4.11 - Respuestas de las obleas del lote 2 en el modo 3 de resonancia

Otra problemática que se ha detectado es que si se compara la medida del espectro completo de frecuencias con las medidas de cada uno de los picos de forma individual, se observa un desplazamiento de las frecuencias centrales de los picos y una variación notable en la amplitud de los mismos.

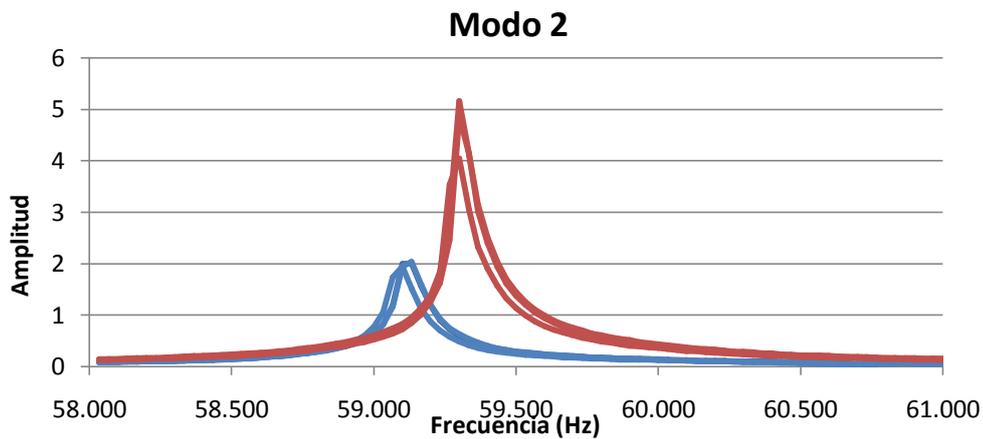


Figura 4.12 - Comparativa de medidas de espectro completo (rojo) y del pico individual (azul) en el modo 2 de resonancia

Esta desviación ha sido explicada por el creador del sistema RUV aludiendo al material viscoelástico colocado en la punta del detector piezoeléctrico con el que se contacta la oblea. La razón que alude es que este material tarda cierto tiempo en estabilizarse al inicio de una medida hasta que se acomoda al borde de la oblea que está estudiando. Dado que al realizar una medida completa el tiempo que tarda en alcanzar el modo 2 de resonancia es mucho mayor que si se analiza este modo por separado, el material viscoelástico ya está perfectamente acomodado y no absorbe más energía. Por lo tanto el transporte de la energía al transductor es más eficiente.

4.3 Detección de grietas generadas por láser

Uno de los mayores problemas para determinar la viabilidad del sistema RUV para la detección de grietas, es la dificultad de generar grietas en las obleas de silicio de forma controlada, para observar la respuesta en función de las características de la grieta. Debido a la fragilidad del material, en el momento que se genera una grieta, es muy probable que ésta se propague a lo largo de los planos cristalográficos y que la muestra termine fracturándose.

Como alternativa a la generación de grietas de forma controlada se ha estudiado la posibilidad de crear pseudogrietas basándose en cortes con láser de longitud determinada simulando una grieta.

4.3.1 Generación de grietas mediante láser

Para la realización de los cortes por láser que simulan las grietas se ha utilizado el equipo LM3 de Eolite Systems que hay en las instalaciones del TiM. Seleccionando la longitud de onda de 515 nm se ha realizado un corte pasante de 7 mm de longitud con un ángulo de 45° con respecto al borde de la oblea. Con esta configuración se quiere simular una grieta que sigue los planos cristalográficos del silicio. La mayor diferencia que nos encontramos de este corte con una grieta real es que la anchura. Debido a las características del corte por láser, la anchura de la pseudogrieta generada es de 30 μm. Esta anchura va a evitar que haya una fricción entre ambos bordes de la grieta al aplicarle las vibraciones ultrasónicas, por lo que es posible que la respuesta del sistema no sea el mismo que en el caso de una grieta real.

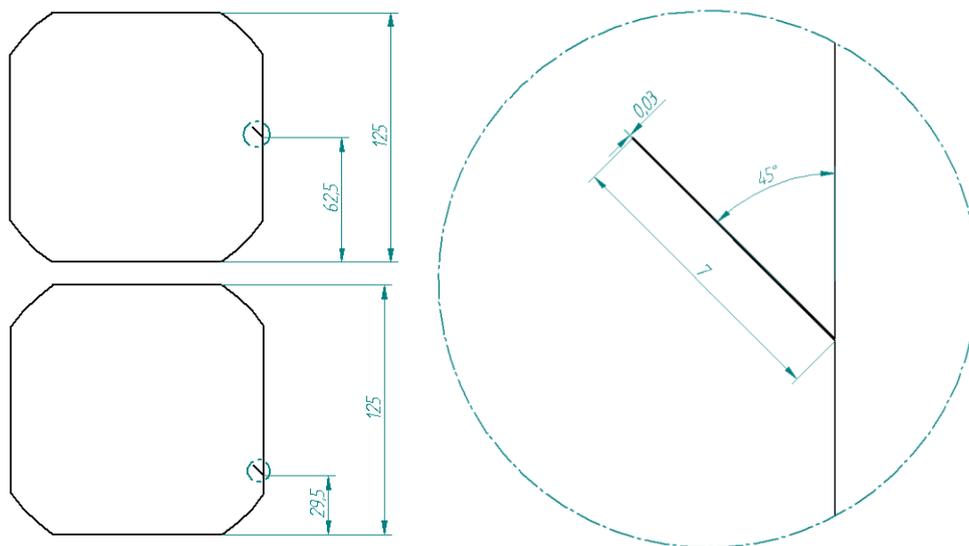


Figura 4.13 - Posición y dimensiones de los cortes realizados mediante láser a las muestras (en mm)

Para la realización de este estudio se toman dos obleas de silicio monocristalino de 125x125 mm² que han sido decapadas en un baño de *NaOH* para eliminar el daño superficial que pudieran tener debido al serrado del lingote. A continuación, a cada una de las muestras se le realiza un corte con el láser en diferentes posiciones. A la muestra n°1 el corte se le hace a partir del centro de uno de los bordes. En el caso de la muestra n°2, el corte se hace desplazado hacia una de las esquinas.

4.3.2 Medidas realizadas

Los puntos de medida son los mismos que en estudios anteriores (Tabla 4.13 -) y cada oblea es medida antes y después del corte. Además se analiza el efecto de la posición de la oblea al realizar la medida, colocando la sonda piezoeléctrica en los cuatro bordes de la oblea. En las medidas de las muestras tras el corte, la sonda se coloca en los tres bordes que no tienen grieta. De esta forma se pretende evitar que la oblea se rompa al medir por el borde frágil. Cada medida se repite tres veces.

<i>Medida</i>	<i>Frec. Inicial (Hz)</i>	<i>Frec. Final (Hz)</i>	<i>Puntos de medida</i>	<i>Resolución (puntos/1000Hz)</i>
Completo	20.000	91.000	2.130	30
Modo1	34.000	42.000	240	30
Modo 1.5	43.000	46.000	90	30
Modo 2	58.000	61.000	90	30
- con Grieta	57.000	60.000	90	30
Modo 2.5	76.000	79.000	90	30
- con Grieta	75.000	78.000	90	30
Modo 3	88.000	91.000	90	30

Tabla 4.13 - Medidas realizadas a cada oblea

4.3.3 Resultados

4.3.3.1 Efecto de la posición de medida

Las medidas del sistema RUV sobre los diferentes picos y en las diferentes posiciones, antes de la generación de la grieta, muestran que la posición de la oblea afecta a la medida. Este efecto no es el mismo en todos los modos de resonancia:

- Modo 1: gran variación en la amplitud de la señal pero no hay desplazamiento de frecuencias
- Modo 1.5: gran variación en amplitud y desplazamiento de frecuencia
- Modo 2: pequeñas variaciones en amplitud y frecuencia
- Modo 2.5: gran variación de amplitud pero no en frecuencia
- Modo 3: gran variación en amplitud, frecuencia y forma de la respuesta

4.3.3.2 Efecto de la grieta

Después de realizar las medidas tras la generación de la grieta, y comparándolas con las medidas realizadas sobre las obleas sin grietas, se observa un efecto diferente en función del modo de resonancia y de la posición de la grieta.

En los modos de resonancia 1, 1.5 y 3 no se observa un efecto claro de la grieta sobre la medida en ninguna de las dos muestras.

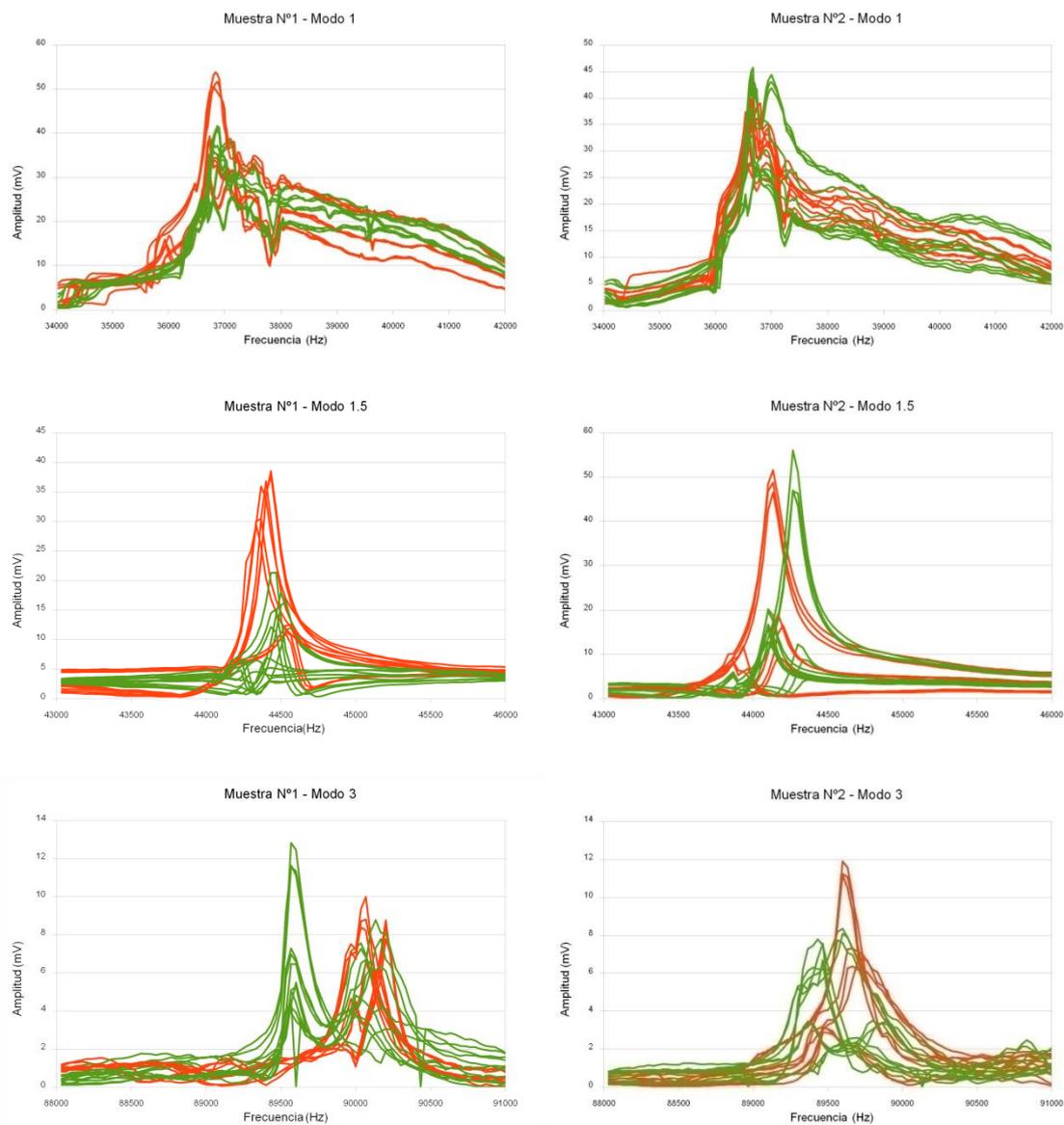


Figura 4.14 - Medidas RUV de las muestras n°1 y n°2 en los modos de resonancia 1, 1.5 y 3

En los modos de resonancia 2 y 2.5 hay un desplazamiento claro de la medida hacia frecuencias más bajas en las dos muestras. En la muestra 1, que tiene la grieta centrada en uno de sus bordes, el desplazamiento es muy pequeño en el modo 2, pero en el modo 2.5 este desplazamiento es mucho más claro. En la muestra 2, que tiene la grieta desplazada hacia una esquina, el desplazamiento es mayor tanto en el modo 2 como en el modo 2.5.

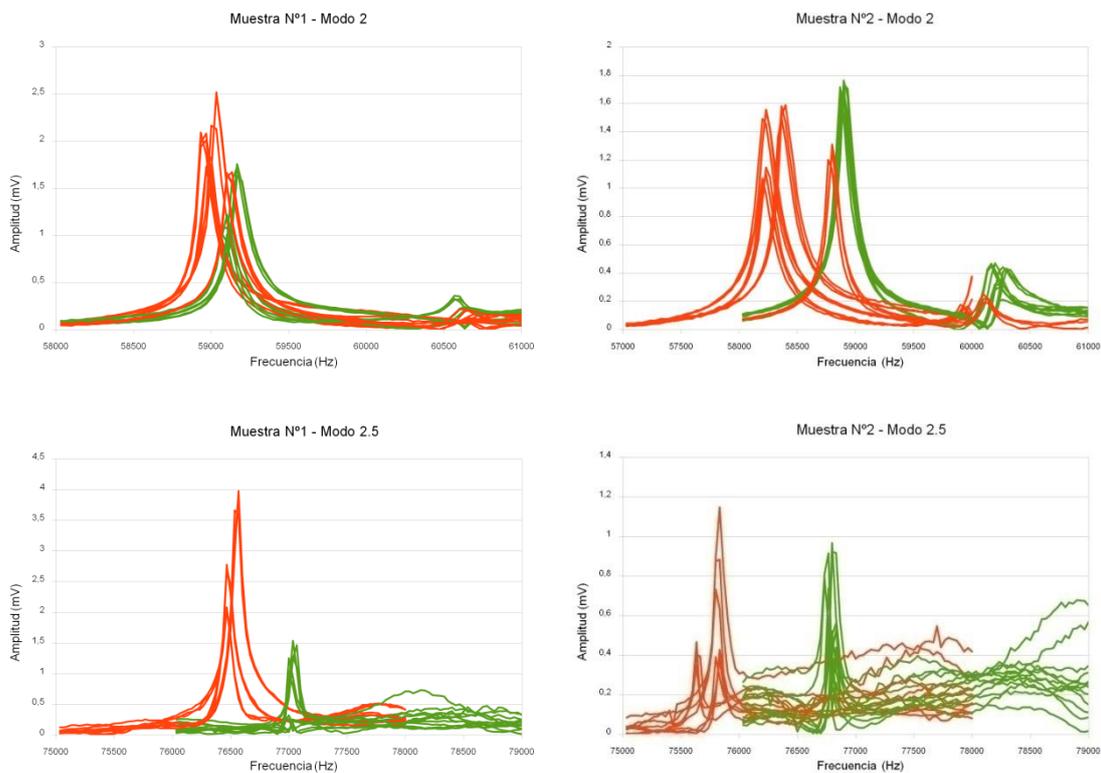


Figura 4.15 - Medidas RUV de las muestras n°1 y n°2 en los modos de resonancia 2 y 2.5

A la vista de los resultados obtenidos, aunque no está confirmado que el comportamiento sea el mismo para una muestra con una grieta real con respecto a una grieta generada por láser, parece más probable detectarlo en los modos de resonancia 2 y 2.5.

4.4 Detección de grietas generadas mecánicamente

Con la intención de generar grietas reales de forma controlada para seguir estudiando la viabilidad del sistema RUV en la detección de las mismas, se ha desarrollado un sencillo equipo de pruebas. El objetivo del equipo es golpear la oblea en uno de sus bordes con una energía controlada. De esta forma, se realizará un estudio comparando los efectos de diferentes energías de impacto a través del sistema RUV.

4.4.1 Equipo de generación de grietas

El sistema de generación de grietas es muy básico. Consiste en provocar un golpe entre el borde de la oblea y un material duro, de forma que la energía del impacto esté relativamente controlada, para poder realizar ensayos con cierta repetitividad. Para ello se ha desarrollado un equipo en el cual, una oblea se deja caer desde una altura controlada, sobre un objetivo. La altura de partida de la oblea determinará la energía del impacto.

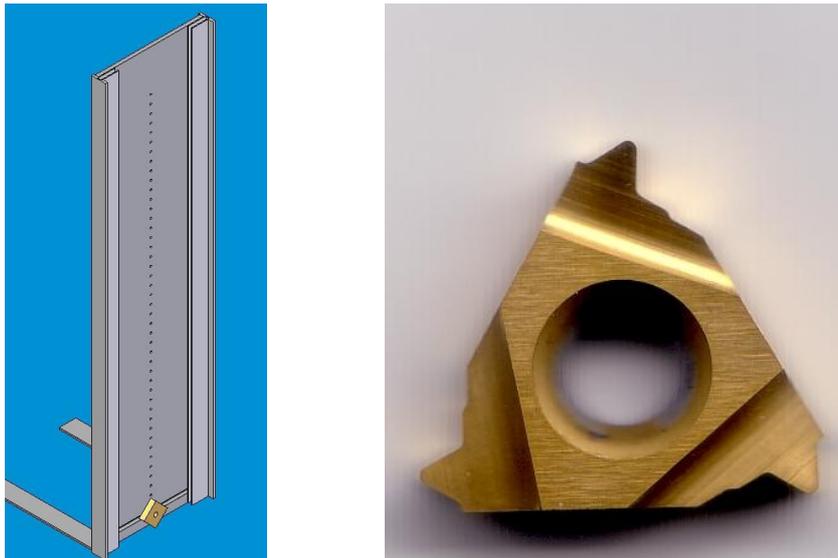


Figura 4.16 - Sistema de generación de grietas y detalle de la cuchilla de vidia utilizada

Para que la situación de la oblea en el momento del golpeo sea la misma en todos los ensayos, su posición durante la caída se controla a través de dos guías laterales que evitan su desplazamiento y su giro. Como objetivo contra el que golpea la oblea se ha seleccionado una cuchilla de mecanizado de vidia (Carburo de Wolframio) debido a su gran dureza (~9 en la escala de Mosh) muy superior a la del silicio (6.5).

4.4.2 Realización del estudio

Para realizar este estudio, se parte de 60 obleas pseudocuaadradas de $125 \times 125 \text{ mm}^2$ de silicio monocristalino. Estas obleas tienen un espesor inicial de $250 \pm 5 \text{ }\mu\text{m}$ y se les realiza un decapado inicial basado en *NaOH* para limpiar el daño superficial, eliminando aproximadamente $30 \text{ }\mu\text{m}$ por cara. Tras este primer decapado las obleas son analizadas con el sistema RUV para tener una primera referencia.

A continuación, 50 de estas obleas, son procesadas a través del generador de grietas, utilizando diferentes alturas de lanzamiento. Se crean 6 lotes de 10 obleas. El primer lote no es procesado y el resto de los lotes se procesan desde diferentes alturas (1, 2, 3, 4 y 5 cm). Posteriormente las muestras vuelven a ser analizadas con el sistema RUV para ver el efecto de esta operación sobre las mismas.

Finalmente, la mitad de las muestras de cada lote son decapadas mediante baño de *NaOH* otros $30 \mu\text{m}$ por cara. Con esta operación se pretende reducir el efecto de las grietas generadas sobre la estabilidad mecánica de las obleas. Tras este baño, las obleas son analizadas nuevamente con el sistema RUV.

<i>Nombre</i>	<i>Obleas</i>	<i>Lanzamiento</i>	<i>Nombre</i>	<i>Obleas</i>	<i>Decapado</i>
Lote 0	1-10	0 cm	Lote 01	1-5	-
			Lote 02	6-10	30 $\mu\text{m}/\text{cara}$
Lote 1	11-20	1 cm	Lote 11	11-15	-
			Lote 12	16-20	30 $\mu\text{m}/\text{cara}$
Lote 2	21-30	2 cm	Lote 21	21-25	-
			Lote 22	26-30	30 $\mu\text{m}/\text{cara}$
Lote 3	31-40	3 cm	Lote 31	31-35	-
			Lote 32	36-40	30 $\mu\text{m}/\text{cara}$
Lote 4	41-50	4 cm	Lote 41	41-45	-
			Lote 42	46-50	30 $\mu\text{m}/\text{cara}$
Lote 5	51-60	5 cm	Lote 51	51-55	-
			Lote 52	56-60	30 $\mu\text{m}/\text{cara}$

Tabla 4.14 - Resumen de lotes y procesos

Tras la realización de todas las medidas, las muestras son enviadas al departamento de mecánica de la Universidad Politécnica de Madrid para su evaluación mecánica.

4.4.3 Resultados

4.4.3.1 Medidas RUV

En las medidas realizadas con el sistema RUV observamos, al igual que en experimentos anteriores, que el análisis de ciertos modos de resonancia es imposible debido a la gran dispersión de las medidas. Es por ello que el análisis se va a centrar en el modo 2 de resonancia, y más concretamente en la frecuencia central del pico, ya que en estudios anteriores se ha observado que este modo es el más adecuado para la detección de grietas. En la siguiente gráfica se puede ver la evolución de la frecuencia central de pico de resonancia en el modo 2 tras el lanzamiento de las obleas desde diferentes alturas y tras el decapado posterior de las mismas:

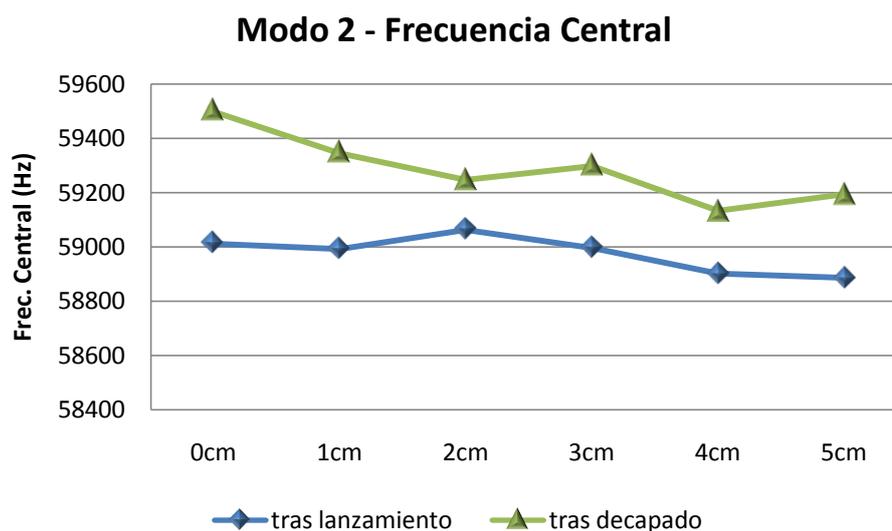


Figura 4.17 - Evolución de la frecuencia central de resonancia en función de la altura de golpeo

Lo primero que destaca en la misma es el claro desplazamiento hacia frecuencias más altas de las obleas tras el segundo decapado de las mismas. Este desplazamiento se da en todos los lotes de obleas, incluso en las obleas que no han sido golpeadas.

Por otro lado, a medida que la altura del golpeo va aumentando, se esperaría que la frecuencia central se fuera desplazando hacia frecuencias más bajas. Entre la altura de golpeo de 2 cm hasta los 5 cm sí se observa una débil tendencia en este sentido, pero también se observa que la frecuencia central de las obleas lanzadas desde 2 cm es superior a la inicial. A parte de eso, las diferencias entre las medidas que se observan entre los diferentes puntos, son muy pequeñas comparadas con la dispersión de las medidas que hay en cada punto. Esto se puede observar más claramente en la siguiente gráfica, en la que se muestra la frecuencia central de cada una de las obleas procesadas individualmente, en cada punto de proceso:

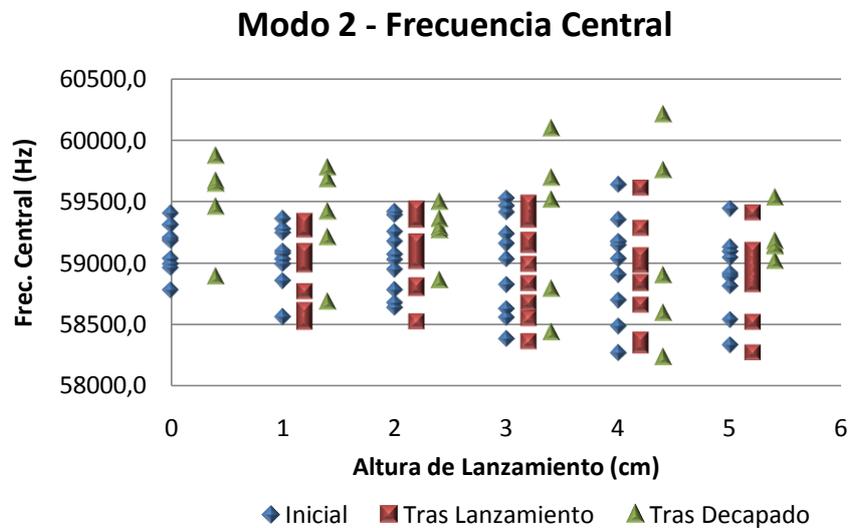


Figura 4.18 - Frecuencia central de resonancia de cada oblea en cada etapa del proceso

Se observa en esta gráfica que la dispersión de las medidas en cada punto se encuentran en un rango que puede llegar hasta los 1.500 Hz para las obleas en su estado inicial y golpeadas, y hasta los 2.000 Hz para las obleas que han sido tratadas con un segundo decapado. Esta dispersión en las medidas hace que una pequeña desviación de 100-200 Hz que pueda provocar la aparición de una grieta, no sea detectable con el sistema RUV.

4.4.3.2 Revelado de grietas

Una curiosidad observada durante el segundo proceso de decapado de obleas golpeadas ha sido la visualización de algunas de las grietas generadas tras el lanzamiento de las mismas.

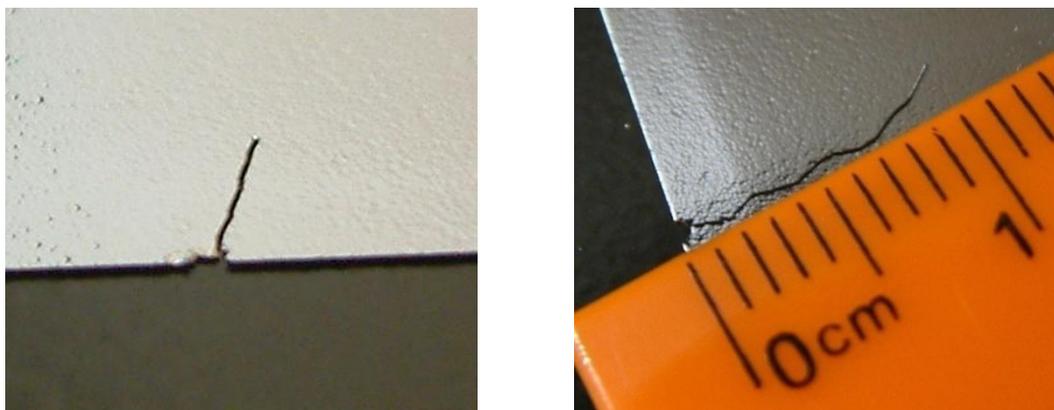


Figura 4.19 - Grietas reveladas durante el segundo proceso de decapado

Este revelado de grietas no se ha dado en todas las obleas decapadas por lo que es posible que no todos los golpes hayan provocado la generación de grietas. Las grietas visualizadas tienen unas longitudes de entre 1 y 10 mm y una anchura de 60 μm aproximadamente.

La visualización de las grietas nos da la oportunidad de tener medidas RUV de obleas que positivamente se sabe que tienen grietas.

OBLEA	Altura de Golpeo	Long. de Grieta	Frec. Inicial (Hz)	Frec. Tras Lanzamiento (Hz)	Despl. Frec (Hz)	Frec. Tras Decapado (Hz)	Despl. Frec (Hz)
19	2 cm	1 mm	58.780,5	58.796,73	16,20	58.855,17	58,43
20	2 cm	3 mm	59.064,7	59.050,50	-14,20	59.259,73	209,23
28	3 cm	2 mm	59.152,6	59.143,83	-8,73	59.506,57	362,73
29	3 cm	4 mm	59.517,6	59.485,67	-31,90	60.087,20	601,53
37	4 cm	3 mm	59.345,9	59.282,37	-63,50	59.748,37	466,00
40	4 cm	10 mm	59.165,4	58.844,17	-321,20	58.894,70	50,53
46	5 cm	3 mm	58.812,1	58.824,50	12,43	59.012,03	187,53
47	5 cm	4 mm	58.887,5	58.908,63	21,17	59.136,20	227,57
48	5 cm	3 mm	59.124,0	59.104,67	-19,33	59.526,13	421,47

Tabla 4.15 - Medidas RUV de obleas con grietas "reveladas"

En la tabla anterior aparecen listadas las obleas en las que se han revelado las grietas, con las características de las mismas, y sus valores iniciales, tras el golpeo y tras el decapado final de la frecuencia central de resonancia.

Analizando las medidas de estas obleas solamente se observa un desplazamiento de frecuencia apreciable tras el golpeo en la oblea 40 que tiene una grieta de 10 mm de longitud. El resto de obleas presentan un desplazamiento mucho inferior y algunas incluso positivo.

4.4.3.3 Fuerza de fractura

Con el objetivo de tener una medida fidedigna del daño que tienen las obleas tras los diferentes procesos, las muestras son sometidas a un test mecánico de flexión en el que las obleas son sometidas a una tensión creciente hasta que se rompen. En este caso las muestras son sometidas al test de flexión de cuatro barras y se toma nota de la fuerza que se está aplicando en el momento de la fractura.

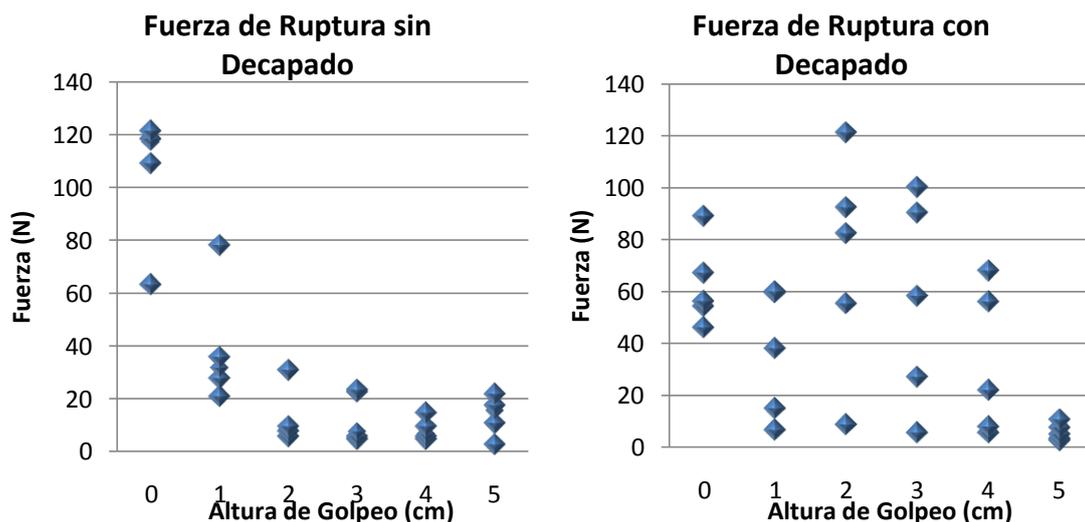


Figura 4.20 - Fuerza de ruptura de las obleas en función de la altura de golpeo con y sin decapado final

Se observa que en el caso de las muestras sin un segundo decapado, el efecto del daño generado en el golpeo debilita la oblea considerablemente. La fuerza de ruptura prácticamente se estabiliza con una altura de golpeo de apenas 2 cm. Por el contrario, con las muestras decapadas tras el golpeo, la fuerza de ruptura no muestra esta tendencia. La fuerza de ruptura de algunas de las obleas golpeadas muestra niveles de resistencia

similares a las obleas sin golpear mientras que otras sí se fracturan con valores de fuerza muy inferiores. Cuando la altura de golpeo llega a los 5 cm, ninguna de las muestras alcanza un nivel de resistencia significativo.

4.4.4 Análisis de los resultados

Aunque es posible que las grietas generadas tengan un efecto sobre la medida del RUV, este efecto es muy pequeño. Debido a la dispersión de medidas de las obleas teóricamente no dañadas, la detección de las pequeñas desviaciones que se producen es prácticamente imposible. Es necesario un daño muy grande para que la detección sea posible.

El aumento de la frecuencia central del modo de resonancia 2 tras el segundo decapado puede indicar dos cosas; o bien la medida del RUV es más sensible de lo que se esperaba al espesor de la oblea, o el daño inicial de las muestras era muy superior a los 30 μ m decapados inicialmente.

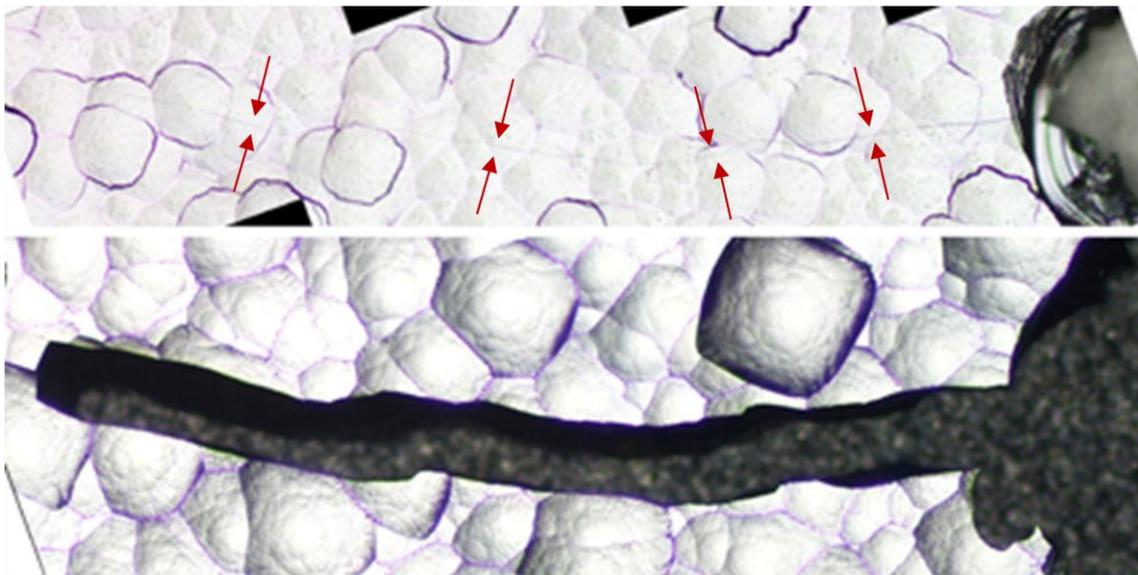


Figura 4.21 – Apariencia de una grieta antes y después del proceso de decapado en baño químico (*NaOH*)

El test de flexión revela que el decapado de obleas agrietadas mejora la resistencia mecánica de las mismas. Esto es debido al redondeo que se produce en el extremo de las grietas, que provoca una reducción de la concentración de tensiones que se produce en ese punto.

4.5 Detección de grietas de diferente tamaño generadas por láser

Paralelamente al estudio anterior, y con el objetivo de buscar una correlación entre la altura de golpeo y la longitud de las grietas generadas por láser, se ha realizado este estudio. En él, se realizan cortes mediante láser de diferentes longitudes en cinco lotes de obleas y posteriormente son analizados con el sistema RUV.

4.5.1 Estudio realizado

El punto de partida son 25 obleas del mismo lote que las obleas utilizadas en el estudio anterior. Se tratan de obleas de silicio monocristalino, pseudocuadradas, de dimensiones 125x125 mm². Su espesor inicial es de 250±5 µm y, para eliminar en gran parte el daño superficial procedente del serrado del lingote, son sometidas a un decapado inicial en baño de *NaOH* en el que se eliminan aproximadamente 30 µm por cara.

Tras el decapado inicial, las 25 obleas son sometidas a análisis por medio del sistema RUV para tener la referencia inicial con la que comparar las medidas que se obtendrán tras el proceso de corte. Cada una de las muestras será medida en los 5 modos de resonancia habituales y en el espectro completo.

A continuación las muestras son divididas en 5 lotes y a cada uno de los lotes se le generará un corte de una longitud diferente.

<i>Número de Lote</i>	<i>Obleas</i>	<i>Longitud de corte</i>
Lote 1	1-5	2.5 mm
Lote 2	6-10	5.0 mm
Lote 3	11-15	7.5 mm
Lote 4	16-20	10.0 mm
Lote 5	21-25	12.5 mm

Tabla 4.16 - Resumen de lotes

El corte se realiza en la misma posición a todas las muestras. En el centro de uno de los bordes de la misma y con una inclinación de 45°. Para la realización del corte se

utiliza el equipo LM3 de Eolite Systems que hay en las instalaciones del TiM utilizando la longitud de onda de 515 nm.

Tras la generación de las diferentes pseudogrietas, las muestras vuelven a ser analizadas con el sistema RUV realizando las mismas medidas que las efectuadas inicialmente.

4.5.2 Resultados

4.5.2.1 Apariencia de las pseudogrietas generadas

El corte por láser genera unas pseudogrietas cuya principal diferencia con las grietas reales es la anchura de las mismas. Mientras que en una grieta real, los bordes de la misma están tocándose, en una grieta generada por láser hay una eliminación de material. En este caso, ambos bordes de la grieta quedan separados por una distancia de unos 30 μm , y además, se produce una deposición de sedimentos en los mismos como consecuencia del proceso del láser.

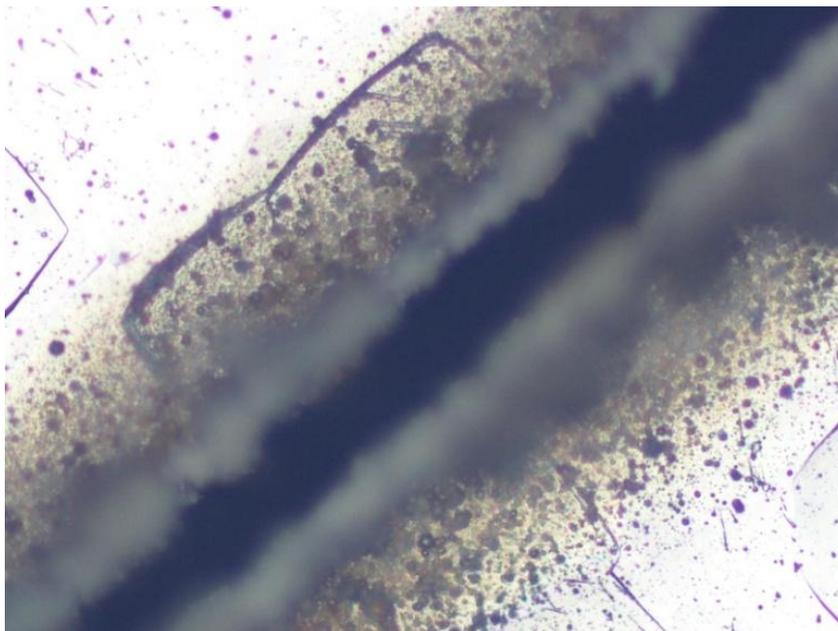


Figura 4.22 - Apariencia de una grieta generada por láser

A parte de esto, se ha podido comprobar que el daño generado por el láser no es simplemente superficial o estético, sino que es capaz de generar grietas debido a las altas

tensiones que se generan a causa de las altas temperaturas del proceso. Estas grietas han sido detectadas en varias muestras y algunas de ellas se han roto antes de poder ser analizadas nuevamente.

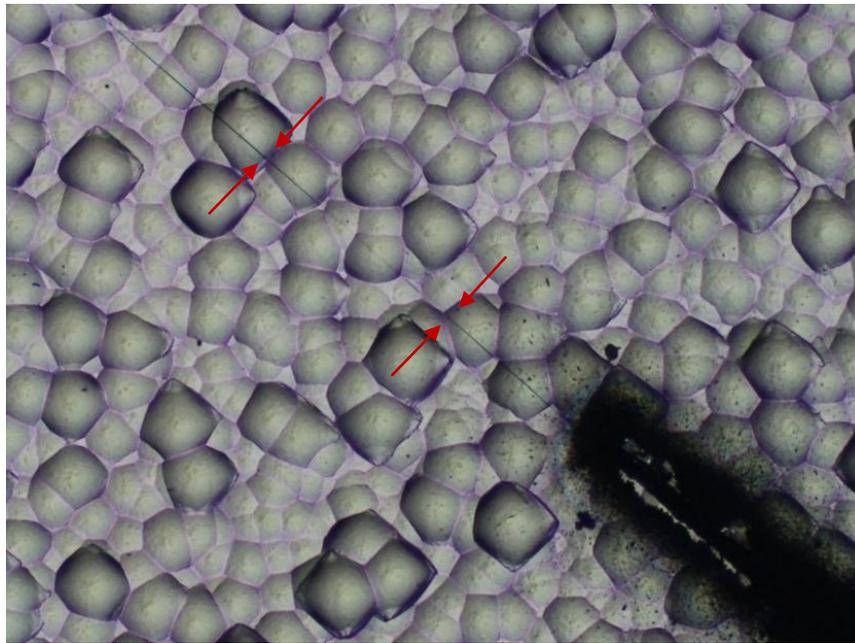


Figura 4.23 - Grieta generada durante el proceso láser en la muestra 16

4.5.2.2 Medidas RUV

De nuevo las medidas realizadas con el sistema RUV nos devuelve una gran dispersión en todos los picos salvo en el modo 2 de resonancia. El análisis de las medidas se centra en este modo, y fundamentalmente en la frecuencia central del mismo, aunque también se analizará la anchura y la amplitud de los picos.

Con un primer vistazo a las medidas obtenidas ya se puede ver el claro efecto de los cortes sobre el pico de resonancia para las diferentes longitudes de grieta.

En cada una de las gráficas siguientes se pueden ver tres medidas de una oblea antes de generar la grieta (**azul**) y otras tres tras la generación de la misma (**rojo**). Se observa claramente que al crear una grieta, el pico de resonancia se desplaza hacia frecuencias más bajas y disminuye su amplitud. Además, estos efectos aumentan al aumentar el tamaño de la grieta.

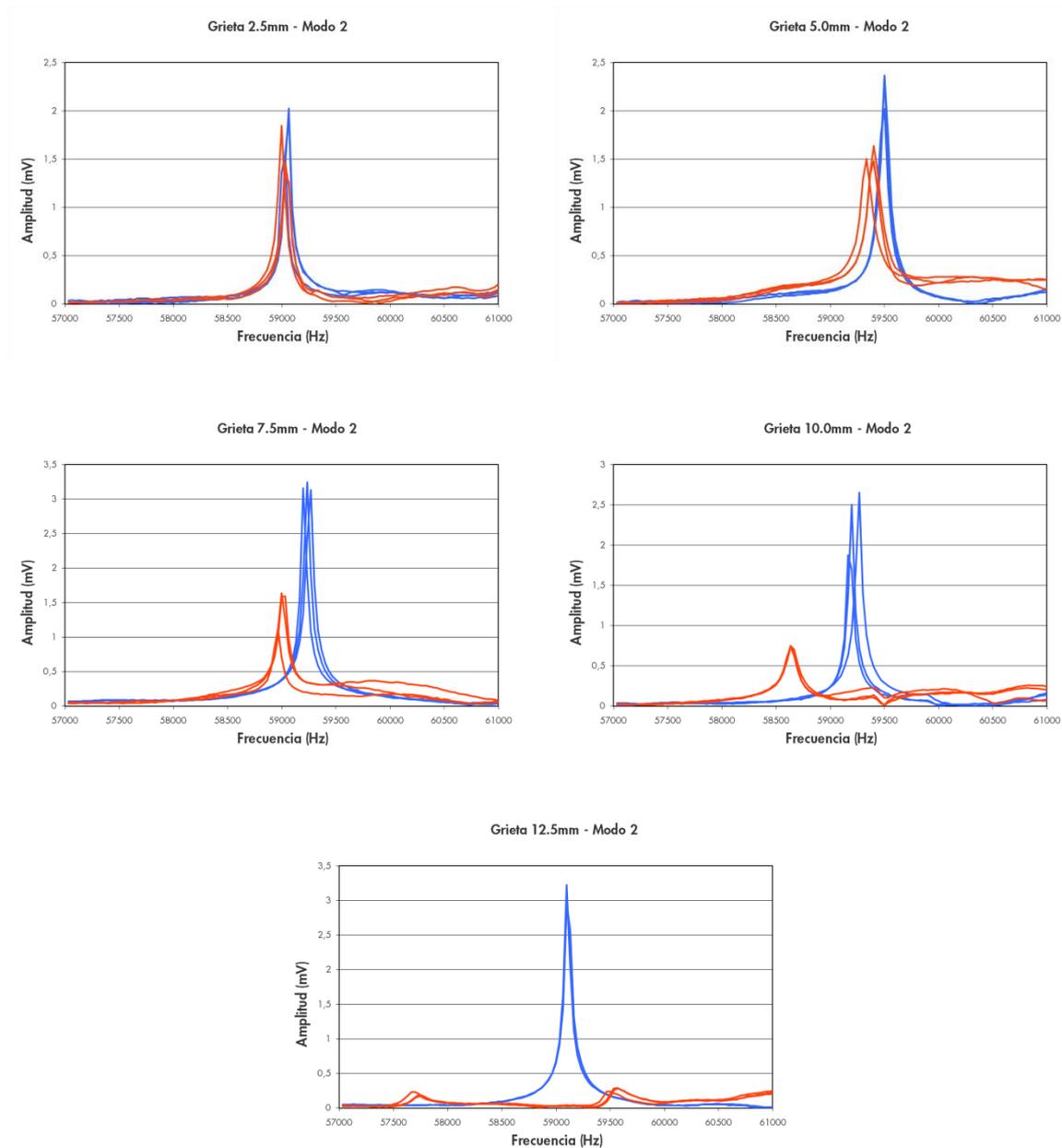


Figura 4.24 - Medida del modo 2 de resonancia con el sistema RUV, antes (azul) y después (rojo) de la generación de la grieta, para diferentes dimensiones de la misma

Estos resultados concuerdan con la teoría del sistema RUV, pero hay dos problemas en los resultados obtenidos:

- En primer lugar, se observa que cuando la grieta es muy grande, la amplitud del pico desciende en gran medida. La pequeña dimensión del pico hace que, picos secundarios cercanos tengan una amplitud mayor que

el pico principal. Esto provoca que el sistema informático tome los datos estadísticos del pico secundario en lugar del principal pudiéndose pensar que la frecuencia de resonancia ha aumentado en lugar de disminuir.

- En segundo lugar, hay que señalar la gran dispersión en las medidas de las muestras antes de la generación de la grieta. Esta dispersión provoca que, aunque individualmente para cada muestra se vea una disminución de la frecuencia central de resonancia, para grietas inferiores a 10 mm esta variación entraría dentro de los márgenes de tolerancia en los que la medida se podría dar como buena.

Estos dos efectos se pueden observar en la siguiente gráfica en la que se muestra la frecuencia central de resonancia de las diferentes muestras, en función de la longitud de la grieta, antes y después de la generación de la misma.

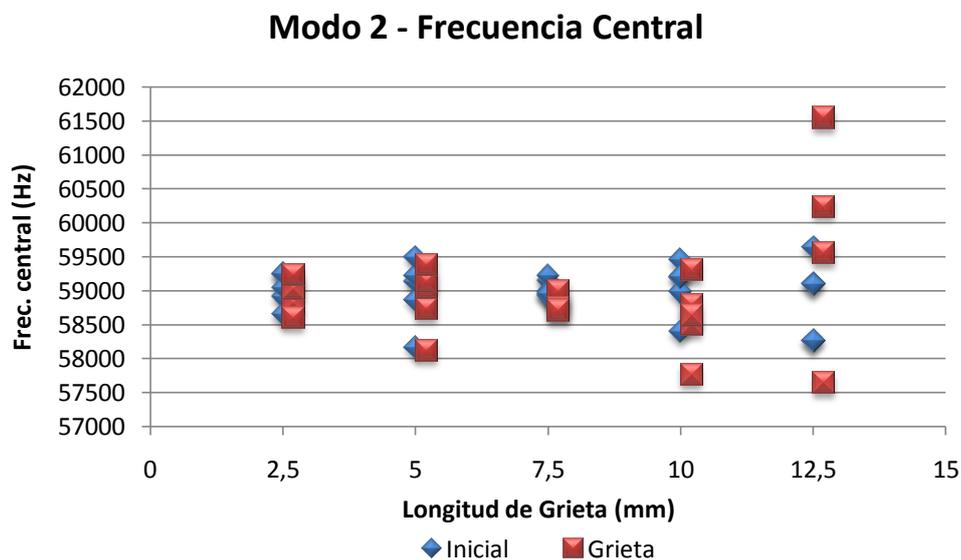


Figura 4.25 - Frecuencia central del modo 2 de resonancia, para diferentes longitudes de grieta, antes y después de la generación de la misma

4.5.2.3 Fuerza de fractura

Finalmente, las muestras son sometidas al test de flexión de cuatro barras para determinar la magnitud del daño introducido al generar la grieta. En este test se mide la fuerza necesaria para romper cada una de las muestras.

En la realización de este test se observó que al ir incrementando la carga sobre la oblea, hay un momento en el que la grieta se propaga hasta el punto en el que la oblea entra en contacto con alguna de las barras. En este momento se libera parte de la energía elástica acumulada por la oblea observándose una caída en la fuerza que soporta la muestra. El ensayo puede continuar hasta que la muestra se fractura pero éste es el punto en el que se debe tomar la medida.

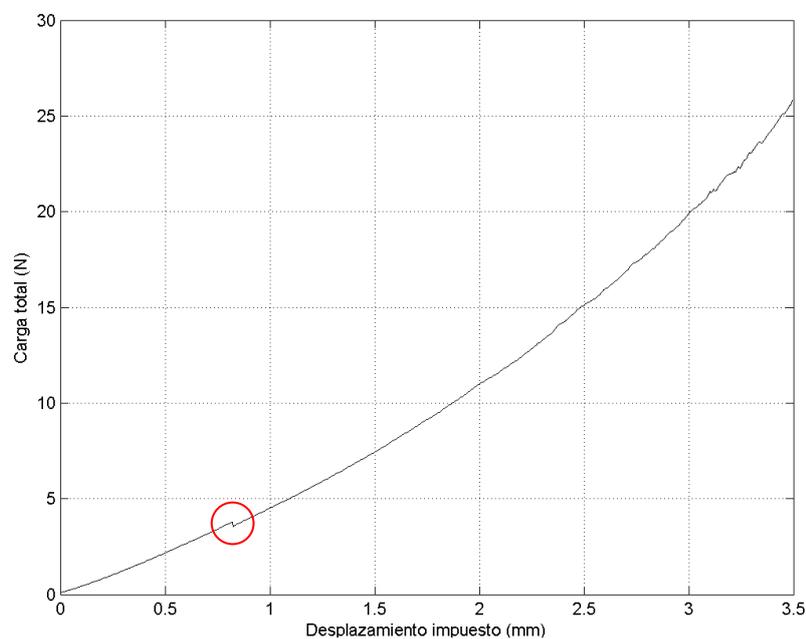


Figura 4.26 - Curva Fuerza/Desplazamiento del ensayo mecánico de la muestra 23. Se señala la caída en la carga debido a la propagación de la grieta

Se observan valores de fuerza de fractura bajos, muy inferiores a los detectados en el estudio de grietas generadas con el lanzador (apartado 4.4). Además, se observa que a mayor tamaño de grieta, menor es la rigidez estructural de la muestra. Hay que señalar, que los niveles de fuerza soportada por dos de las muestras con grietas de 12.5 mm, muestran la fuerza final de ruptura. Es decir, no se ha detectado la propagación de la

grieta. Esto puede ser debido a que la propagación de la grieta se ha producido para niveles de carga muy pequeños.

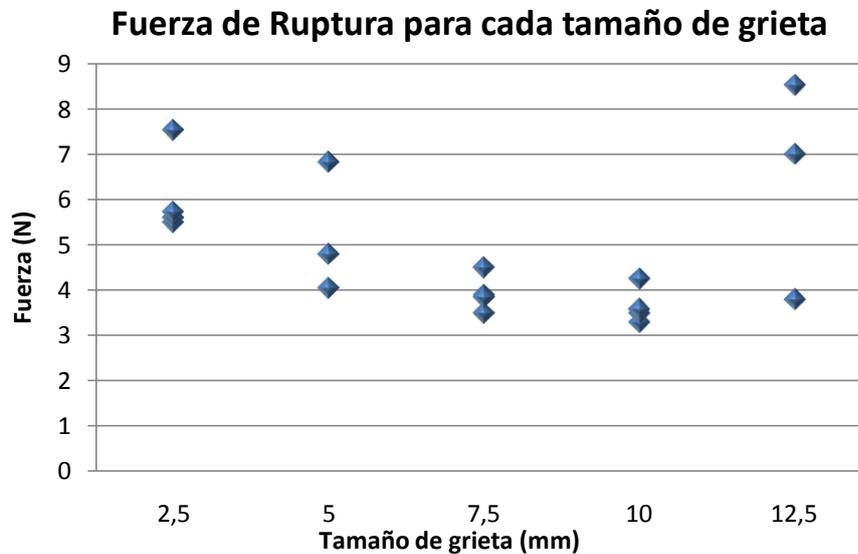


Figura 4.27 - Resultados del estudio mecánico

4.5.3 Análisis de los resultados

En este estudio se ha podido verificar la teoría del sistema RUV para la detección de grietas en el modo 2 de resonancia. Se ha observado que al introducir una pseudogrieta en la oblea, la frecuencia central del pico de resonancia se desplaza a frecuencias inferiores, su amplitud disminuye y su anchura aumenta. Estos efectos aumentan con la longitud de la pseudogrieta.

Por otra parte, se sigue observando una gran dispersión en las medidas de las muestras antes de generar las grietas. Esta amplia dispersión provoca que, aunque para cada muestra se vea que hay una variación en la medida tras la generación de la grieta, este desplazamiento no es lo suficientemente grande como para identificar esa oblea como dañada. Es necesario un corte mayor de 10 mm para que la variación en la medida pueda ser identificada como un daño en la oblea.

El estudio mecánico corrobora que el daño introducido es muy grande, mucho mayor que el generado con el lanzador de obleas, ya que las fuerzas de fractura obtenidas son mucho menores.

4.6 Comparativa de equipos RUV

Los resultados obtenidos de los estudios realizados, no son del todo concluyentes y hacen dudar sobre el correcto funcionamiento del equipo RUV que dispone el Instituto de Tecnología Microelectrónica. Es por ello que se establece contacto con la empresa comercializadora del sistema en Europa, RUV Systems BV (<http://www.ruvsystems.nl>) para poder comparar medidas obtenidas con nuestro equipo y con un equipo de su propiedad.

4.6.1 Preparación de muestras

Se parte de 5 obleas (denominadas 96-100) pseudocuadradas de silicio monocristalino, con unas dimensiones de $125 \times 125 \text{ mm}^2$ y un espesor inicial de $250 \pm 5 \text{ }\mu\text{m}$. Estas muestras son sometidas a un decapado químico en baño de NaOH en el que se eliminan aproximadamente $30 \text{ }\mu\text{m}$ por cara. El objetivo de este baño es eliminar el daño superficial generado durante el serrado del lingote.

Una de las obleas (96) es dañada voluntariamente con el golpeador con el objetivo de generarle una grieta que sea detectable con el sistema RUV. En otra de las muestras (98) se revela una grieta central en forma de T con el decapado. Esta grieta tiene una anchura máxima de $100 \text{ }\mu\text{m}$ y se va estrechando según se acerca a los extremos.

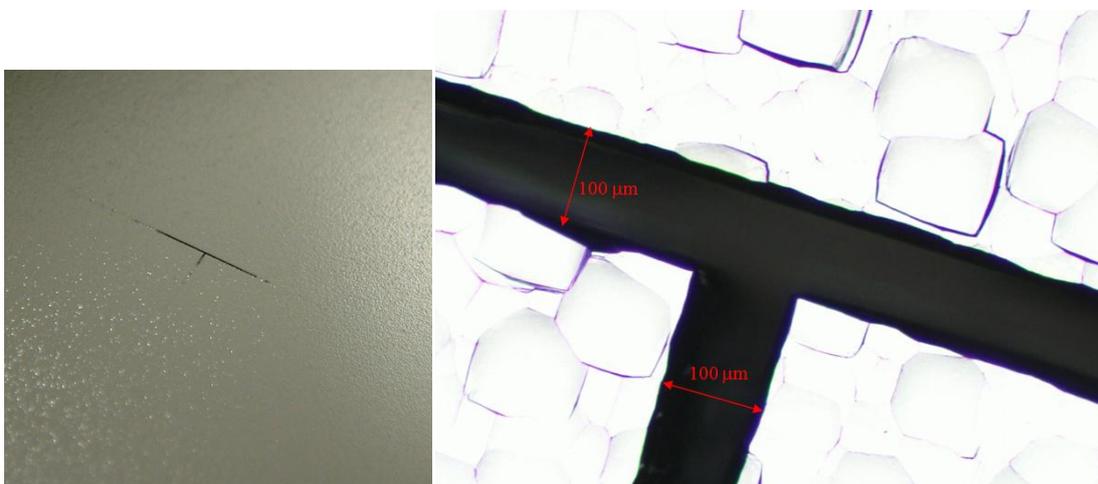


Figura 4.28 - Grieta en forma de T en la muestra 98 y detalle de la misma al microscopio

4.6.2 Medidas Realizadas

Estas obleas son sometidas a un análisis completo con el sistema RUV (medida de espectro completo y en los 5 modos de resonancia) en las instalaciones del TiM. Como ya es habitual, el modo más propicio para el análisis es el modo 2 ya que su dispersión de datos es menor.

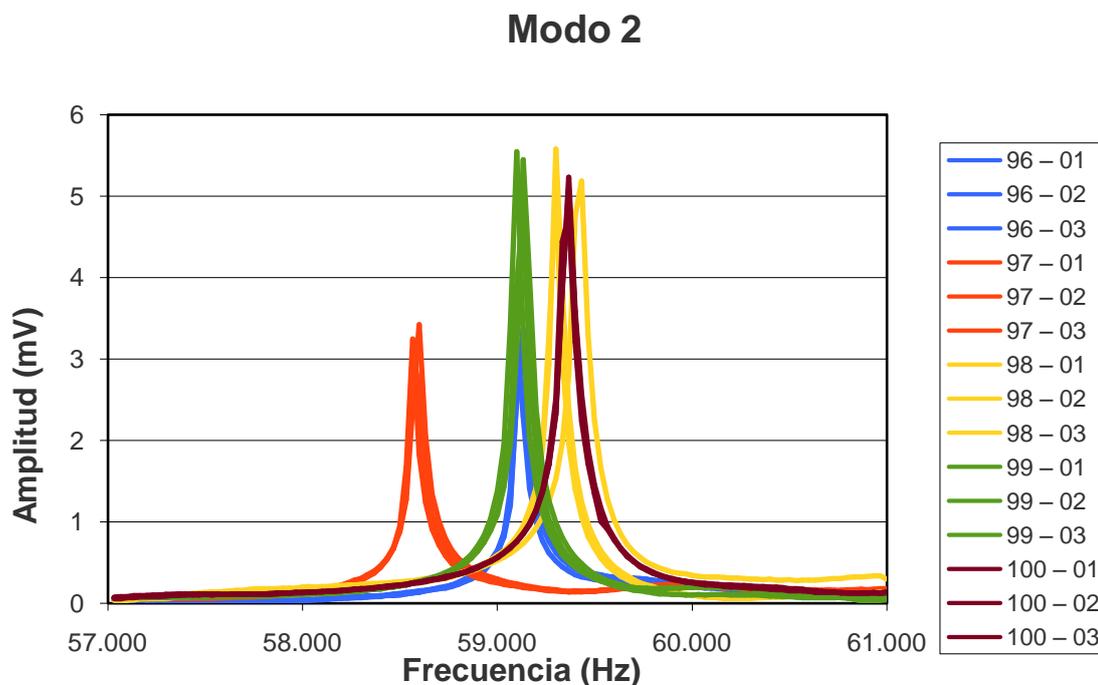


Figura 4.29 - Medidas del modo 2 de resonancia en las instalaciones del TiM

Se puede observar en las medidas realizadas que la muestra 97 destaca por su baja frecuencia central, mientras que las muestras 96 y 98 muestran unas frecuencias de resonancia aparentemente normales. En cuanto a amplitud, las muestras 96 y 97 muestran una amplitud ligeramente inferior. La anchura de los picos de las 5 obleas son similares.

Tras la realización de las medidas en las instalaciones del TiM, las muestras fueron puestas en manos de RUV Systems para la realización de las medidas oportunas. A parte de las obleas, se les envió los resultados de las medidas realizadas y se indicó la posición de las muestras al realizar las medidas. Todo con la intención de que la única diferencia entre ambas medidas fuera el equipo con que se realizasen.

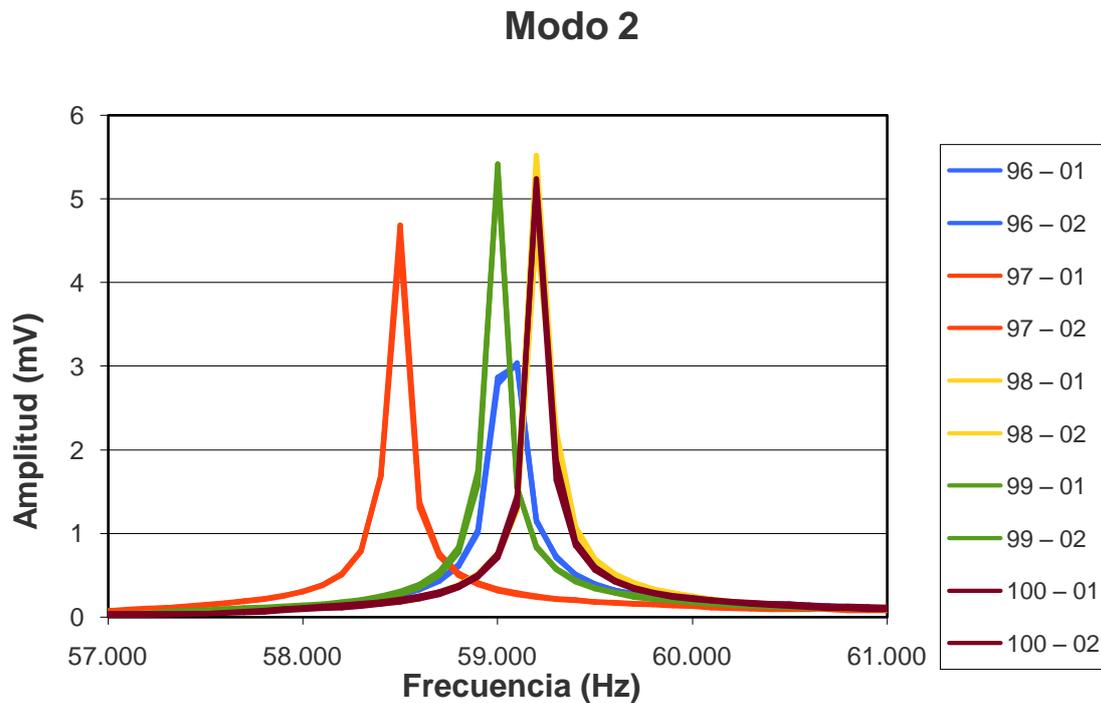


Figura 4.30 - Medidas del modo 2 de resonancia en las instalaciones de RUV Systems

Las medidas realizadas por RUV Systems concuerdan en gran medida con las realizadas en el TiM. Nuevamente la oblea 97 se muestra con una frecuencia central menor que el resto y las obleas 96 y 98 vuelven a mostrar frecuencias de resonancia similares a la del resto de las muestras. En este caso únicamente la muestra 96 muestra una amplitud menor a la del resto.

4.6.3 Análisis de los resultados

Las dudas acerca del correcto funcionamiento del sistema RUV ubicado en las instalaciones del TiM quedan despejadas. Las medidas realizadas con este equipo y el equipo de RUV Systems concuerdan en gran medida aunque existen pequeñas diferencias.

- Amplitud: El equipo del TiM es más sensible a frecuencias más bajas y el de RUV Systems es más sensible a altas frecuencias. La amplitud del modo 1 es mayor en el TiM y la amplitud del modo 2.5 es mayor en RUV Systems. En cambio en el modo 2 las amplitudes son similares.

- Frecuencia Central: Existe un pequeño desvío en todas las medidas hacia frecuencias más bajas en el equipo de RUV Systems. Este desvío se da en todos los modos y su magnitud parece constante.
- Modos: El modo 1.5 apenas es perceptible en las medidas realizadas por RUV Systems.

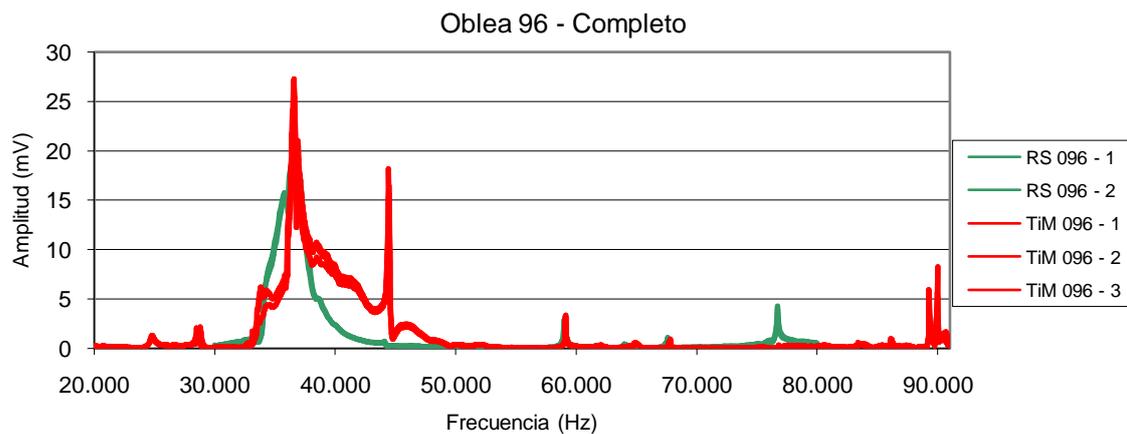


Figura 4.31 - Medidas de espectro completo de la muestra 96 en el TiM y en RUV Systems

Estas diferencias se pueden observar en la Figura 4.31, aunque su efecto para la detección de grietas debería ser despreciable.

En cuanto a la detección de obleas dañadas:

- La muestra 97, que teóricamente no estaba dañada, destaca por sus bajas frecuencias en las medidas realizadas. Según RUV Systems esta oblea está dañada.
- La muestra 96, que teóricamente estaba dañada, no muestra una respuesta como tal en las medidas realizadas. Es posible que el golpeo al que fue sometida no generase un daño suficientemente grande como para ser detectado.
- La muestra 98 que, como se observa en la Figura 4.28 tiene un daño importante, no muestra un comportamiento específico. Ninguno de los sistemas RUV empleados ha sido capaz de detectar el daño.

4.7 Conclusiones sobre el sistema RUV

Se ha establecido una metodología para la realización de un estudio en línea con el sistema RUV para la detección de grietas. Se ha estudiado la evolución de las características del modo de resonancia de las obleas tras cada paso productivo y se ha determinado un rango de frecuencias para la detección del pico de resonancia en función de las características del mismo a lo largo del proceso.

Se ha confirmado que el espesor de las obleas no afecta en gran medida al resultado de las medidas.

Observando las medidas de cada uno de los picos de resonancia y su sensibilidad a la aparición de grietas, se ha establecido el modo 2 de resonancia como el más adecuado para la detección de obleas dañadas. Su moderada amplitud, su pequeña anchura y, sobre todo, su baja dispersión en las medidas, hace de este modo el más fiable para la detección de grietas.

Aunque se ha descrito el sistema RUV como un buen método para la detección de grietas en líneas de fabricación de células solares [60], a nivel de laboratorio no nos ha dado buenos resultados. Esto puede ser debido a la necesidad de un gran número de medidas para obtener un algoritmo estadístico para la detección de obleas dañadas. A nivel de laboratorio no se dispone de este número de obleas para cada ensayo, por lo que establecer este algoritmo estadístico es imposible. Se ha detectado que la presencia de una grieta, provoca una desviación en los resultados del sistema RUV. Esta desviación es mayor cuanto mayor es el tamaño de la grieta. Debido a la dispersión de las medidas que obtenemos, para que dicha desviación se pueda discriminar del resto de medidas de obleas no dañadas, el daño debe ser de una dimensión muy grande.

5 Evaluación Mecánica de Estructuras de Células Solares de Contactos Posteriores

5.1 Introducción

La estructura de las células solares convencionales presenta ciertos inconvenientes que las células de contactos posteriores intentan subsanar.

En primer lugar, la presencia de unos contactos metálicos en la cara frontal de la célula limita la superficie activa de la misma. La parte de la célula que queda bajo estos contactos no es iluminada y no realiza ninguna aportación a la generación de corriente. Estos contactos son necesarios para la extracción de la corriente generada y, para su diseño, hay que buscar un compromiso entre la resistencia serie de los mismos y el efecto sombra que generan en la oblea. Si la red frontal de contactos es muy grande, se consigue reducir en gran medida la resistencia serie de la célula pero, por el contrario, el efecto sombra de la misma es muy grande. Si por el contrario, se reducen las dimensiones de esta red, el efecto sombra de la misma es menor pero aumenta su resistencia serie.

La interconexión de las células individuales para la formación de un panel fotovoltaico también se ve afectada por la posición de los contactos. Para unir las células en serie y conseguir tensiones más altas, es necesario interconectar las células de forma que la cara frontal de una célula se contacte con la cara posterior de la siguiente. Esta interconexión se realiza mediante tabs, que son soldados sobre los buses de las células. Las dimensiones de estos tabs vienen condicionadas, de nuevo, por la corriente que deben conducir y la sombra que proyectan sobre las células. Para reducir las pérdidas por resistencia, lo ideal es aumentar la sección de los tabs pero, si el tab se hace muy ancho proyectará más sombra sobre la oblea y se hace muy grueso pondrá en peligro la integridad de la célula en el proceso de laminado del módulo. Con el progresivo aumento

de la superficie de las células y su descenso en el espesor este problema no hace más que incrementarse, ya que la corriente generada es mayor y la célula más frágil.

Por último, al estar el contacto frontal soldado directamente al emisor, el dopado del mismo debe de ser diseñado de forma que haya un compromiso entre su capacidad para generar pares electrón-hueco y su capacidad para generar un buen contacto entre el emisor y el metal.

En una célula de contactos posteriores, al situarse ambos contactos en la parte posterior de la misma, se elimina el efecto sombra. De esta forma toda la superficie de la oblea es iluminada y la superficie efectiva de la célula es cercana al 100%. Además, los contactos pueden tomar dimensiones muy superiores para reducir considerablemente la resistencia serie de la oblea. La interconexión de las células en el panel se simplifica enormemente con esta disposición de los contactos y las dimensiones de los tabs pueden ser mucho mayores.

La dificultad de diseño de estas células de contactos posteriores es el transporte de los portadores generados en el emisor frontal, a los contactos situados en la cara posterior. Para realizar esta tarea se han desarrollado diferentes soluciones, dando lugar a diferentes conceptos de células.

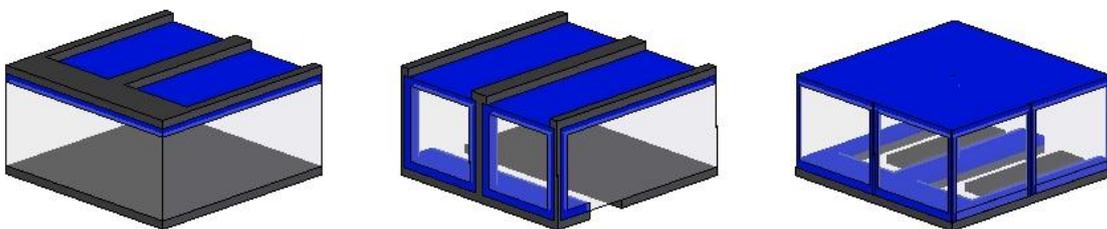


Figura 5.1 - Representación esquemática de una célula convencional, una célula MWT y una célula EWT

En el caso de la célula Metal Wrap Through (MWT) [61], la parte de la metalización que se elimina de la superficie son los buses pero los dedos metálicos permanecen para coleccionar los portadores. Para que estos portadores viajen a la cara posterior se realizan una serie de orificios en la célula que se rellenan de pasta metálica. Estos orificios metalizados conectan eléctricamente los dedos situados en la cara frontal con los buses situados en la cara posterior.

Otra solución para este problema es la que se utiliza en la célula Emitter Wrap Through (EWT) [62]. En este caso, se eliminan de la cara frontal tanto los buses como los dedos metálicos que se sitúan en la cara posterior. Para que los portadores viajen del emisor hasta los contactos metálicos se realizan una gran cantidad de diminutos agujeros que atraviesan la célula. Estos agujeros son dopados de forma que los portadores puedan viajar a través de ellos de la misma forma que se desplazan a través del emisor.

En ambos casos, la estructura mecánica de la oblea se ve alterada debido a la generación de los agujeros. En los estudios que se describen en este capítulo, se pretende analizar la magnitud de la degradación de las propiedades mecánicas de la oblea al generar este tipo de estructuras y en qué medida esta degradación puede ser reducida.

5.2 Estudio Mecánico de Materiales Frágiles

La determinación de la resistencia de un material frágil es complicada debido a la gran dispersión de los valores de resistencia obtenidos en los ensayos realizados. La causa de esta dispersión es debida a la escasa deformación plástica de estos materiales antes del fallo, que genera una alta concentración de tensiones en los defectos del material. El fallo se produce mediante la propagación rápida de grietas a partir de estos defectos y la variedad de los defectos por tipo, dimensión y orientación se traduce en la alta dispersión de los resultados que se obtienen.

Para el dimensionamiento de estos materiales como el silicio se utilizan métodos probabilísticos que caracterizan los defectos del material, y por tanto su resistencia, de manera estadística [63]. Para esta tarea hay dos métodos:

- Método directo: Caracteriza el material a partir del origen del fallo determinando una función estadística de tamaño máximo de defectos permitidos. En nuestro caso particular, no es posible utilizar este método porque para poder aplicarlo es necesario tener bien definido el criterio de rotura y distribución de defectos de nuestro material.

- Método indirecto: Caracteriza el material a partir de una medida indirecta de los defectos como puede ser la resistencia del material. Este es el método que se ha utilizado en los estudios mecánicos de esta tesis.

5.2.1 Ensayo de Materiales Frágiles. Test de flexión

Para realizar un estudio de la resistencia mecánica de un material frágil, hay que buscar un test mecánico que nos aporte una información veraz de las tensiones que está sufriendo el material a lo largo del test y, sobre todo, en el momento de la fractura. Existen varios test de flexión que tienen su aplicación en función de los tipos de defectos que queremos estudiar.

5.2.1.1 Test de 3 barras

En el test de flexión de 3 barras, la muestra es soportada por dos barras paralelas y la carga se aplica a través de otra barra desde la parte superior, equidistante a las barras inferiores. Como se puede observar en la Figura 5.2, este test tensiona tanto la parte interior como los bordes del área de la muestra situada entre las barras inferiores. Las tensiones generadas tienen carácter uniaxial en la dirección perpendicular a las barras, tiene su máximo bajo la barra superior y va descendiendo gradualmente según se acerca a las barras inferiores.

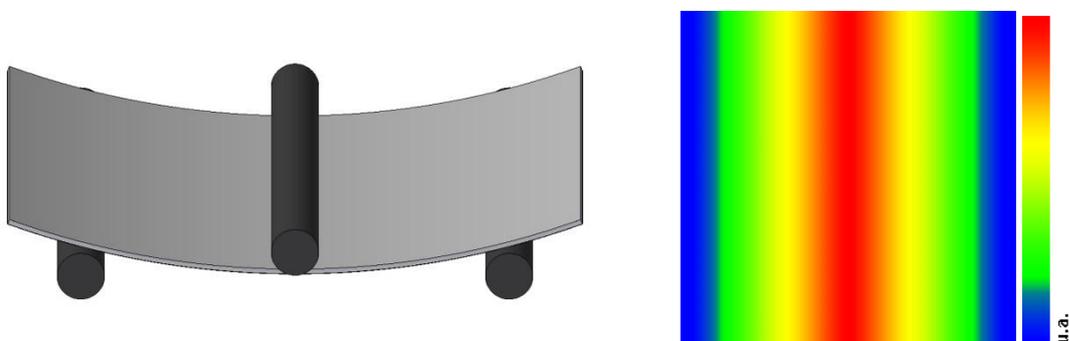


Figura 5.2 - Esquema del test de 3 líneas y su correspondiente esquema de distribución de tensiones

5.2.1.2 Test de 4 barras

En este test, la muestra se apoya sobre dos barras paralelas y, a través de otras dos barras paralelas centradas entre las barras de soporte, se aplica la carga. Como se puede

observar en el esquema de distribución de tensiones (Figura 5.3), con este test se obtiene una tensión máxima casi constante entre las barras interiores. Además, esta tensión máxima se da tanto en la parte interior de la muestra como en los bordes de la misma. La naturaleza de las tensiones sigue siendo uniaxial como en el test de tres barras.

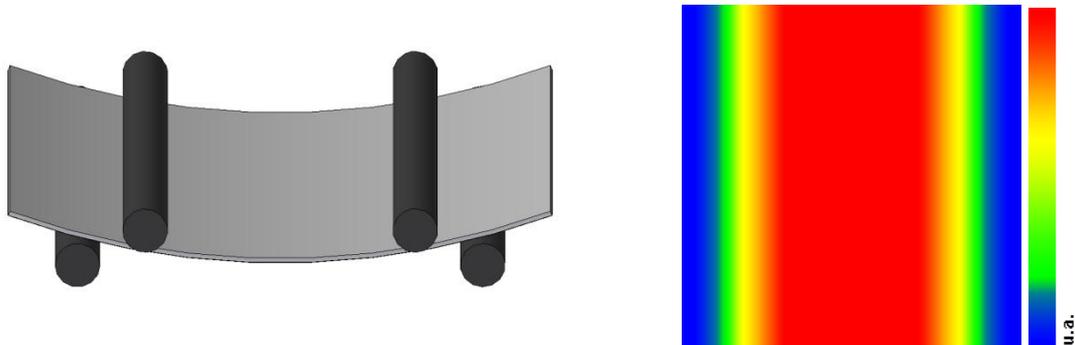


Figura 5.3 - Esquema del test de 4 líneas y su correspondiente esquema de distribución de tensiones

5.2.1.3 Ball on Ring

En este test la oblea se apoya en un anillo inferior y, por la cara superior, se aplica la carga a través de una bola en el centro del anillo. De esta forma se consigue tensionar únicamente la zona central de las muestras y se evita que los defectos que pudiera haber en los bordes provoquen la fractura de las mismas. Las tensiones generadas en este test tienen carácter multiaxial con un máximo bajo la bola central.

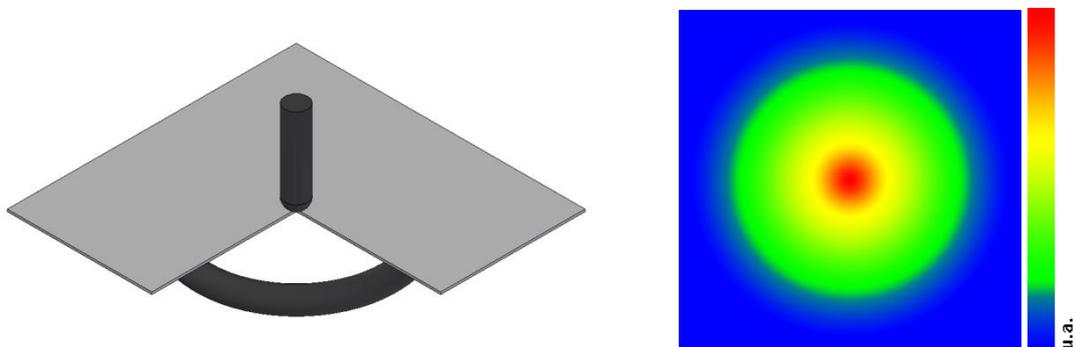


Figura 5.4 - Esquema del test de Ball on Ring y su correspondiente esquema de distribución de tensiones

5.2.1.4 Ring on Ring

El test de flexión Ring on Ring (RoR) es muy similar al test Ball on Ring (BoR). La muestra se apoya sobre un soporte en forma de anillo pero en este caso, la carga se aplica por la cara superior a través de un anillo de diámetro inferior. La distribución de tensiones (Figura 5.5) es muy similar a la del test anterior con la salvedad de que la tensión máxima se da en la zona central de la muestra, en el interior del anillo más pequeño, en lugar de en un único punto.

Este tipo de test se utiliza para estudiar la resistencia del volumen del material ya que, bajo esta distribución de tensiones, la fractura viene dada por defectos que se encuentran en el interior de la muestra, despreciando de alguna forma cualquier defecto que se encuentra en los bordes de la misma.

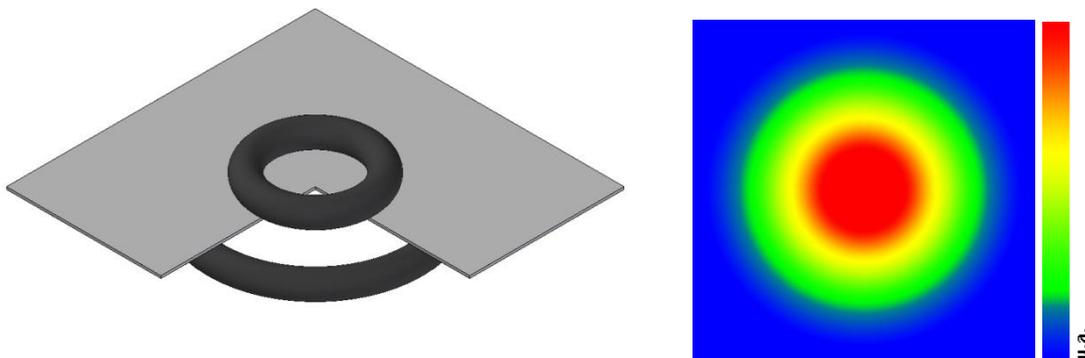


Figura 5.5 - Esquema del test Ring on Ring y su correspondiente esquema de distribución de tensiones

5.2.1.5 Test de torsión

En este test, la muestra se apoya sobre dos soportes situados en dos esquinas opuestas de la misma, mientras que la carga se aplica desde la parte superior sobre las esquinas situadas en la otra diagonal. Con este test se consigue tensionar prácticamente toda la superficie de la muestra aunque la distribución de tensiones generada es mucho más compleja (Figura 5.6).

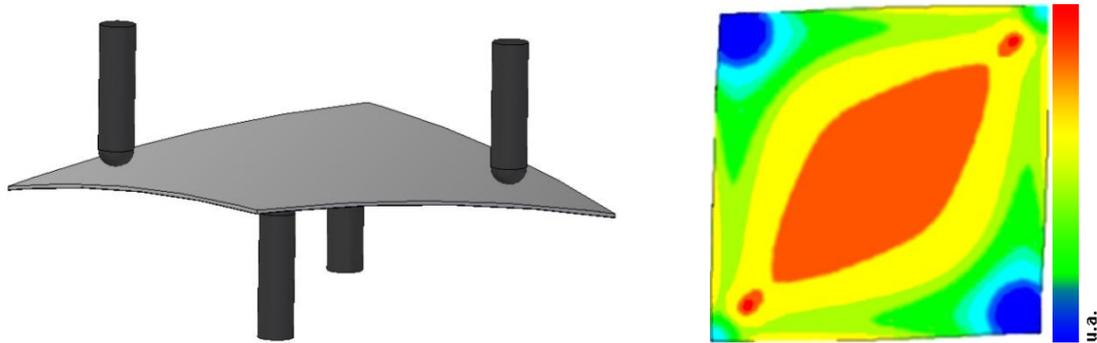


Figura 5.6 - Esquema del test de torsión y su correspondiente esquema de distribución de tensiones

5.2.2 Obtención de la tensión de fractura

Los datos que se obtienen de estos test son unas curvas en la que vemos la deformación que sufren las muestras a medida que se va aumentando la carga sobre las mismas. En la Figura 5.7 podemos ver las curvas carga-desplazamiento de un grupo de muestras sometidas al test de flexión RoR.

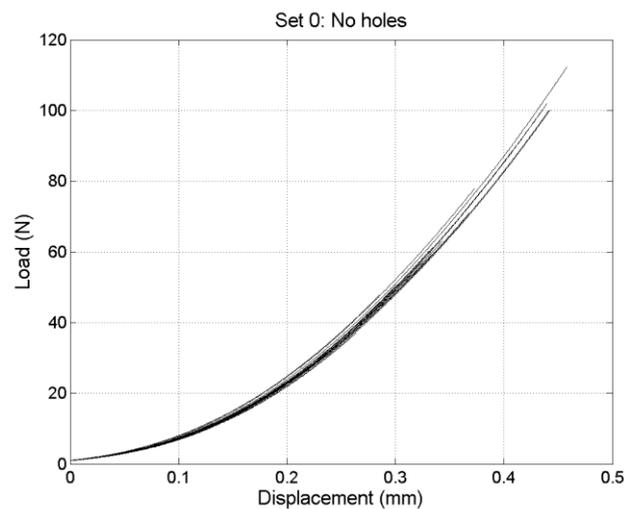


Figura 5.7 - Curvas Carga vs. Desplazamiento de muestras de obleas bajo el test RoR

Pero la carga no es el dato válido para poder caracterizar el material sino que es necesario calcular cuál es la tensión máxima que ha soportado el material antes de la ruptura. Para pequeños desplazamientos existen métodos analíticos para obtener la tensión máxima en el material en función de la carga aplicada y la configuración del

ensayo. Por ejemplo, para el test de 4 líneas y con pequeños desplazamientos, la tensión máxima en la muestra σ_m , en función de la carga aplicada F es:

$$\sigma_m = \frac{3F(L - L_i)}{2wt^2} \quad (5.1)$$

Donde L es la distancia de separación de las barras inferiores, L_i es la distancia entre las barras superiores, w es la anchura de la muestra y t es el espesor.

En el caso de materiales muy flexibles como las obleas de silicio, los desplazamientos son muy grandes por lo que no es posible utilizar métodos analíticos para la determinación de las tensiones internas. Además, estos métodos analíticos tampoco tienen en cuenta el contacto de la muestra con los apoyos ni la anisotropía de materiales como el silicio cristalino.

En estos casos es necesario realizar un modelo numérico que simule el ensayo correspondiente y que tenga en cuenta todos los aspectos mencionados anteriormente. A través de este modelo se puede conocer la distribución de tensiones dentro de la muestra y saber cuál es la tensión máxima en el momento del fallo.

5.2.3 Análisis estadístico de los resultados. Modelo de Weibull

Una vez realizados todos los ensayos y obtenidas las tensiones de rotura de todas las muestras, se puede pasar al estudio de los resultados. Como se ha comentado anteriormente, lo habitual es que haya una gran dispersión entre los datos debido a que la tensión de rotura viene condicionada por la magnitud del defecto que ha provocado el fallo. Por lo tanto es necesario realizar un análisis estadístico de los resultados que nos aporte la probabilidad de que una muestra se rompa en función de la tensión aplicada.

Para los estudios realizados en esta tesis se ha utilizado el modelo que Weibull desarrolló en 1939 [64] basándose en la teoría del eslabón más débil. En este modelo, Weibull propone la expresión (5.2) para calcular la probabilidad de fallo de un material cuya resistencia viene definida por los parámetros λ , δ y β , sometido a un estado uniaxial y uniforme de tensiones

$$P_{f,A}(\sigma) = 1 - e^{-\int_A \left(\frac{\sigma-\lambda}{\delta}\right)^\beta dA} \quad (5.2)$$

Donde:

- λ es el parámetro de localización y representa un umbral mínimo bajo el cual no se produce fallo. Si se considera que no existe un umbral mínimo bajo el cual no es posible que se produzca la fractura, se utiliza el valor 0 para este parámetro obteniéndose una distribución Weibull biparamétrica.
- δ es el parámetro escala y, sumado a λ da el valor de tensión para el cual el 63,2% de la muestras con área unidad fallarían. A este valor se le denomina tensión característica de fractura.
- β es el parámetro de forma o módulo de Weibull y da una medida de la variabilidad de la resistencia.

Por tanto se trata de buscar los valores λ , δ y β que mejor se ajusten a los valores obtenidos en los diferentes ensayos.

El problema es que en nuestros ensayos la distribución de tensiones no es uniforme ni uniaxial y, además, hay que tener en cuenta el efecto escala (size effect). Este efecto tiene en cuenta que cuanto mayor sea la zona sometida a tensión durante el ensayo, más probable es encontrar en esa zona un defecto crítico que produzca el fallo bajo esa tensión.

La problemática del estado de tensiones multiaxial puede ser abordada de diferentes formas, pero en este caso se ha utilizado el principio de acciones independientes (PIA). En este principio se supone que las tensiones principales actúan de manera independiente en cada dirección y, por tanto, la probabilidad de fallo se calcula a partir de las probabilidades de supervivencia individuales en cada una de las direcciones principales.

$$P_{s,A}(\sigma) = \exp \left[- \int_A \left[\left(\frac{\sigma_1 - \lambda}{\delta}\right)^m + \left(\frac{\sigma_2 - \lambda}{\delta}\right)^m + \left(\frac{\sigma_3 - \lambda}{\delta}\right)^m \right] dA \right] \quad (5.3)$$

Para abordar el problema de la distribución no uniforme de tensiones se define el área equivalente del ensayo i (A_{eq}) como el área de una probeta que en un ensayo de tracción sometida a la tensión máxima observada en el ensayo i , tenga la misma probabilidad de fallo que la del ensayo i . Cabe destacar que el área equivalente de cada ensayo depende de la distribución de tensiones a lo largo de la probeta, de la tensión máxima del ensayo y de los parámetros de localización y de forma de Weibull.

$$A_{eq} = \int_A \left(\frac{\sigma - \lambda}{\sigma_{max} - \lambda} \right)^m dA \quad (5.4)$$

Para calcular los parámetros de la distribución Weibull que defina la resistencia del material a partir de los ensayos realizados es necesario un proceso iterativo ya que, para obtener el área equivalente de un ensayo es necesario conocer los parámetros de la distribución Weibull del material, y para calcular los parámetros Weibull del material, es necesario conocer la probabilidad de fallo del material referido al área equivalente.

En la Figura 5.8 se pueden observar diferentes tensiones de rotura y las correspondientes curvas de Weibull ajustadas de tres grupos de muestras con diferentes características.

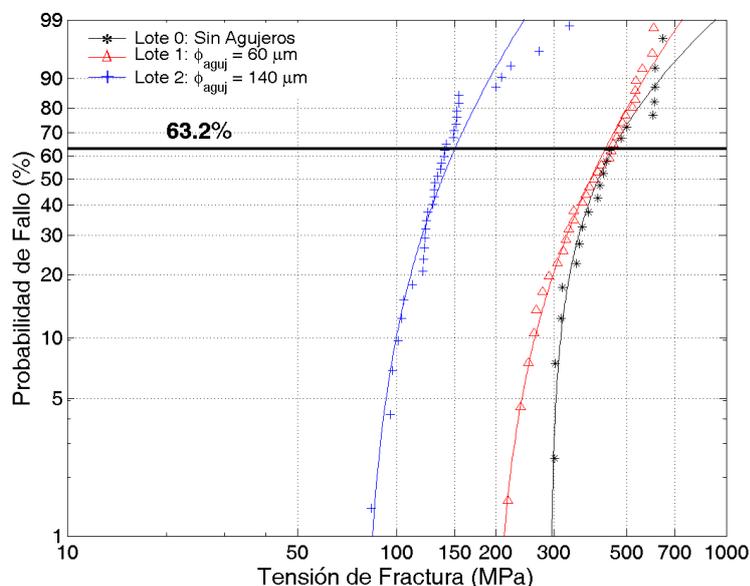


Figura 5.8 - Distribución de las tensiones de fallo de 3 grupos de muestras y su ajuste de Weibull

5.2.4 Aplicación de un estudio mecánico sobre estructuras de contactos posteriores.

El objetivo de los estudios que se describen en los apartados posteriores de este capítulo, es evaluar la degradación mecánica que sufre la oblea de silicio cristalino cuando se crea sobre ella una estructura de célula solar de contactos posteriores. Al generar una estructura de este tipo se generan agujeros en toda la superficie del sustrato pero los bordes del mismo no sufren ninguna modificación. Por este motivo, para la realización de un estudio mecánico que caracterice el daño introducido por el proceso de taladrado, es necesario elegir un test de flexión que analice el área central de las obleas pero no afecte a la medida el perímetro de las mismas. Como se ha visto en el apartado 5.2.1 tanto los test de flexión Ball-on-Ring como Ring-on-Ring cumplen esta premisa. En esta ocasión se ha decidido utilizar el segundo de ellos ya que el área de máxima tensión es superior y se obtiene una medida del daño de la muestra más realista.

En el montaje preparado para la realización de estos test, las obleas se apoyan en un anillo de 20 mm de diámetro y se les aplica la carga por la parte superior a través de otro anillo concéntrico de diámetro 10 mm. Durante la ejecución de cada ensayo se determina el avance del anillo superior y se van almacenando los datos de desplazamiento y fuerza aplicada. La velocidad de desplazamiento del anillo superior se establece a un valor muy pequeño (0,2 mm/min) para que la naturaleza del test sea cuasi estática y despreciar efectos dinámicos.

Debido a los grandes desplazamientos que se dan en estos ensayos, y al tener en cuenta las alinealidades descritas en el apartado 5.2.2, es imposible utilizar un método analítico para la obtención de las tensiones de fractura. Para obtener estos valores se han realizado modelos de elementos finitos para la simulación de cada grupo de obleas. Con estos modelos se simula el ensayo buscando una buena correlación entre la curva carga-desplazamiento obtenida en el ensayo, con la obtenida con el modelo de elementos finitos. Para reducir los cálculos, se simulan la muestra más delgada y la más gruesa de cada lote. El resto de valores se obtiene por interpolación lineal, teniendo en cuenta el espesor y la energía elástica almacenada en cada oblea en el momento de la fractura. En

la Figura 5.9 se muestran las mismas medidas que en la Figura 5.7 (negro) y se han añadido las simulaciones (rojo) de los ensayos de la muestra más delgada y la más gruesa.

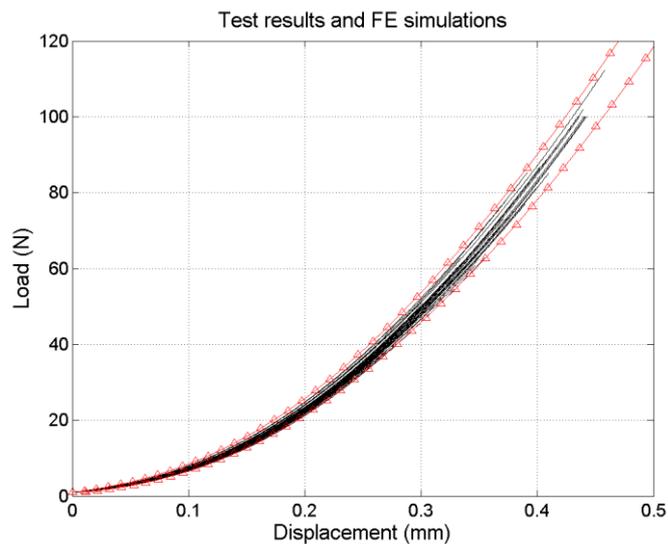


Figura 5.9 - Curvas Carga vs. Desplazamiento de medidas (negro) y simulaciones (rojo) bajo el test Ring on Ring

Finalmente, los valores de tensión de fractura obtenidos se agrupan por lotes y se ajustan a una distribución Weibull como se ha descrito en el apartado 5.2.3 para la realización del análisis estadístico.

5.3 Daño generado sobre una célula al crear una estructura de contactos posteriores EWT

El objetivo de este estudio es cuantificar el daño que se genera en una oblea de silicio al modificar su estructura mecánica para la fabricación de una oblea de contactos posteriores del tipo EWT. Este tipo de células se caracteriza por tener una serie de agujeros pasantes de pequeño diámetro con una densidad aproximada de 100 agujeros/cm². Estos agujeros están agrupados formando líneas bajo las cuales, posteriormente, se realizará la metalización del emisor.

5.3.1 Preparación de muestras

Para la realización del estudio, se prepararán tres lotes de obleas pseudocuastradas de silicio cristalino de $125 \times 125 \text{ mm}^2$. El primero de ellos representará los procesos de una célula EWT que afectan a la estructura mecánica de la oblea. En primer lugar, las obleas son sometidas a un decapado en baño químico para eliminar el daño superficial que haya sido generado durante el proceso de serrado del lingote. Este primer baño es aplicado a los tres lotes para tener, como punto de partida, obleas exentas de defectos.

A continuación se procede a la generación de los agujeros. Este proceso de taladrado se realiza mediante láser con un equipo de Eolite Systems. El equipo genera pulsos de 10ns y puede trabajar en tres longitudes de onda diferentes; rojo ($\lambda_1=1030 \text{ nm}$), verde ($\lambda_2=515 \text{ nm}$) y ultravioleta ($\lambda_3=343 \text{ nm}$). El equipo dispone además de un posicionador galvano-mecánico del haz de alta velocidad que permite operar con obleas de hasta $160 \times 160 \text{ mm}^2$. En este caso, se utiliza la longitud de onda de 515 nm trabajando un una energía de pico de 234 μJ .

El patrón de agujeros consiste en una matriz de diminutos orificios con una densidad aproximada de 100 agujeros/ cm^2 . La distancia entre agujeros es mucho menor en la dirección del eje Y con respecto al eje X dando el aspecto de líneas paralelas de agujeros. De esta forma, en el momento de realizar la metalización, bajo las líneas de agujeros quedarán los contactos correspondientes al emisor y, en el espacio que se encuentra entre las líneas de agujeros, se crearán los contactos correspondientes a la base.

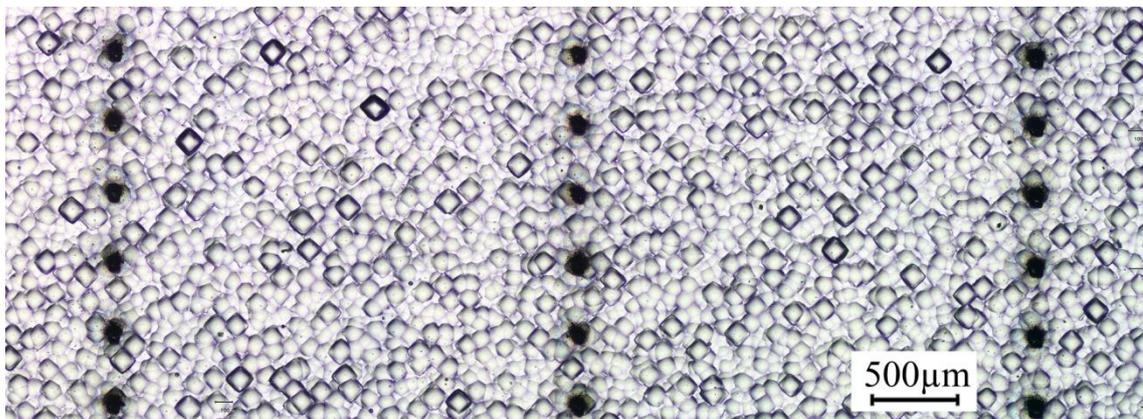


Figura 5.10 - Distribución de agujeros

Los agujeros generados tienen un diámetro medio en la cara frontal de la oblea de unos 50 μm (Figura 5.11a), mientras que en la parte posterior su diámetro medio aproximado es de 30 μm (Figura 5.11b). Se puede observar que en los alrededores de los agujeros hay muchos residuos debidos a al proceso de taladrado. Un ligero decapado en baño químico posterior a este paso elimina estos residuos dando a los agujeros un aspecto más definido. Este segundo decapado es muy leve y elimina 5 μm de silicio por cada cara aproximadamente. El proceso influye también en las dimensiones de los agujeros, que aumentan hasta los 60 μm de diámetro en la cara frontal (Figura 5.11c) y 40 μm en la cara posterior (Figura 5.11d).

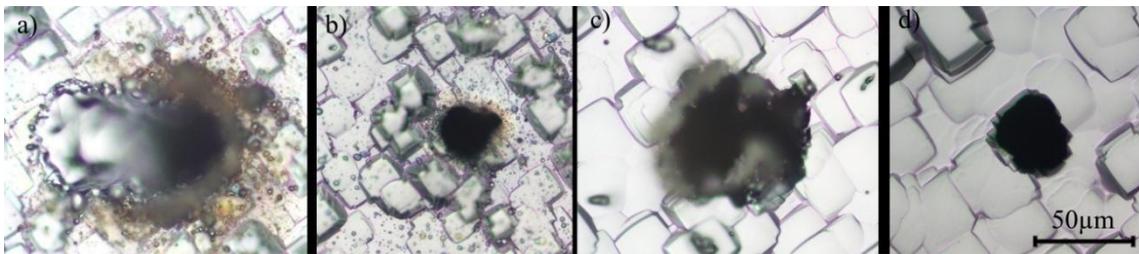


Figura 5.11 - Aspecto de los agujeros en la cara frontal y posterior antes y después del segundo decapado

El proceso seguido con el segundo lote de obleas es muy similar al primero, con la salvedad de que se ha omitido el segundo proceso de decapado. De esta forma, comparando la estabilidad mecánica del lote número dos con el número uno se puede establecer el beneficio de realizar un tratamiento de decapado tras la realización de los agujeros.

En el caso del tercer lote, el proceso omitido es el de la generación de los agujeros. De esta forma, comparando los resultados obtenidos tras el estudio del lote 3 con los del lote 1 se comprueba el daño introducido durante el proceso de taladrado láser.

En la siguiente tabla se puede observar un resumen de los pasos realizados con cada uno de los lotes de este estudio, remarcando el estado final de cada uno de los lotes.

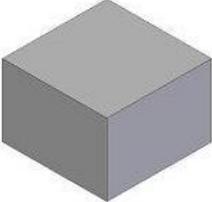
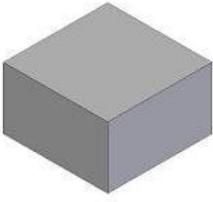
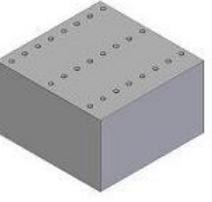
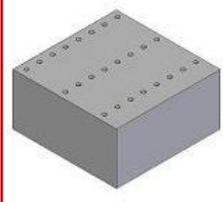
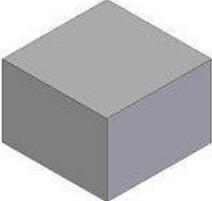
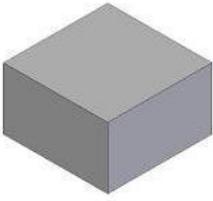
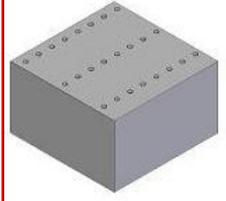
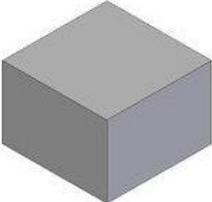
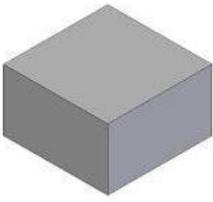
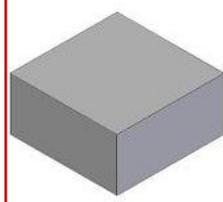
	Original	1 ^{er} Decapado	Taladrado	2 ^o Decapado
Lote 1				
Lote 2				
Lote 3				

Tabla 5.1 - Resumen de procesos de los 3 lotes

Finalmente cada oblea se corta con láser en cuatro muestras de 52,5x52,5 mm² con el objetivo de aumentar el número de ejemplares para el análisis estadístico. El posible daño introducido durante este corte no debería influir en los resultados del test mecánico ya que este test ha sido elegido para que los defectos que se encuentren en los bordes no influyan en el resultado.

5.3.2 Estudio mecánico

Una vez que las muestras ya están preparadas es el momento de realizar el estudio para la caracterización mecánica de cada uno de los lotes. Se someten todas las muestras al test de flexión Ring on Ring, se almacenan los datos de carga y desplazamiento de cada test y se realiza un modelo de elementos finitos de las obleas más delgadas y más gruesas de cada lote.

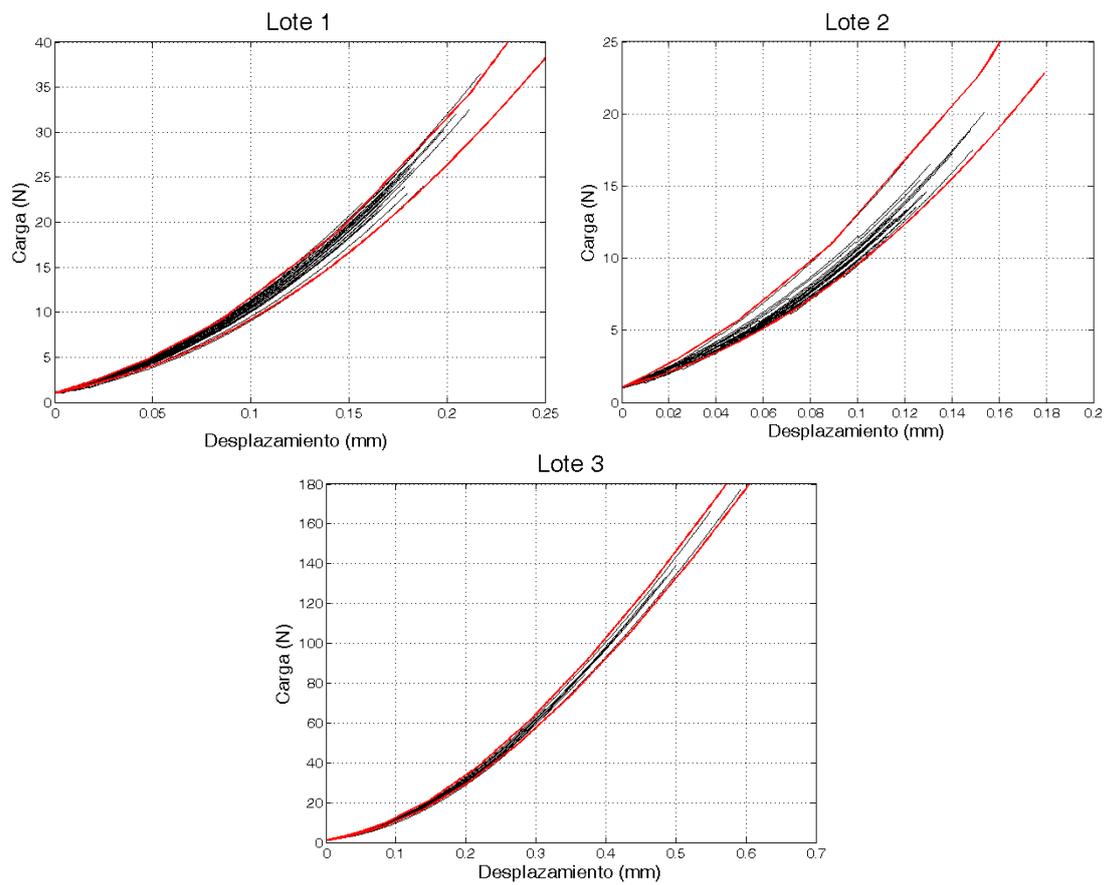


Figura 5.12 - Resultados de los test (negro) y modelos de Elementos Finitos (rojo) de las muestras

A través de estos modelos, y por interpolación se obtiene la tensión máxima de cada oblea en el momento de la fractura, y se realiza un análisis estadístico de las mismas. En las siguientes graficas se muestra la tensión de fractura de cada una de las muestras y las distribuciones Weibull biparamétricas a las que han sido ajustadas. Además se marca la tensión a la que el 63,2% de las muestras de cada lote se rompen. Esta tensión se denomina tensión característica de fractura σ_θ y se utiliza para determinar la rigidez mecánica.

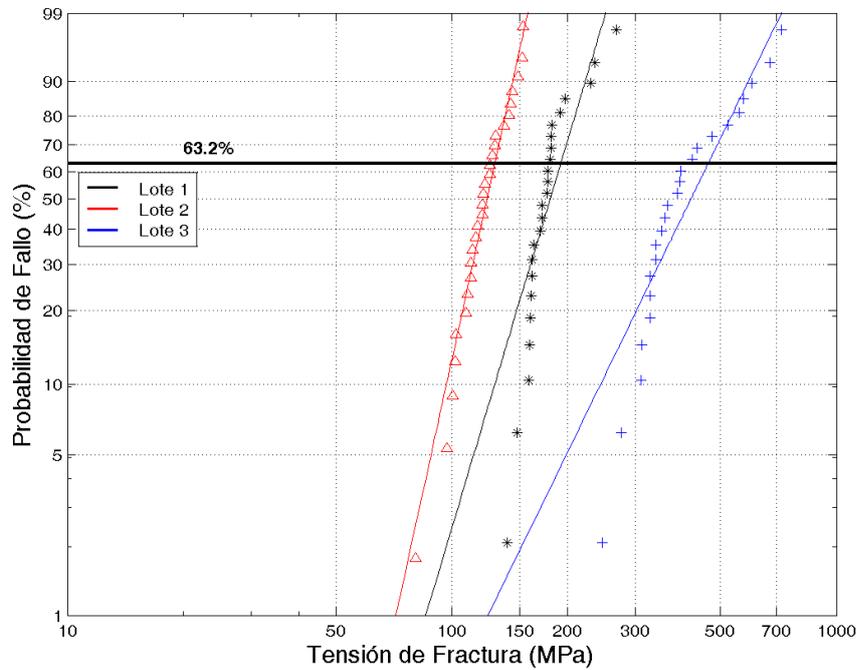


Figura 5.13 - Ajustes Weibull de las tensiones de fractura

5.3.3 Resultados y conclusiones

A la vista de los datos obtenidos tras el análisis estadístico de los resultados del test de flexión, se confirma que la presencia de los agujeros debilita considerablemente las muestras. Comparando los sets 1 y 3 se observa cómo la generación de los agujeros debilita la oblea más de un 50% pasando la tensión característica de fractura de 464,1 MPa a 191,8 MPa.

Lote	σ_{θ} (MPa)	m
1	191,8	5,69
2	129,2	7,77
3	464,1	3,49

Tabla 5.2 - Parámetros de los ajustes Weibull

Por otra parte, se evidencia la necesidad de un proceso de decapado posterior a la generación de los agujeros. Este decapado elimina parte del daño introducido durante el proceso de taladrado láser, mejorando la estabilidad mecánica de la oblea. Comparando

los datos de los lotes 2 y 3, se observa que la tensión característica de fractura se eleva de 129,2 MPa a 191,8 MPa tras este proceso de eliminación del daño.

Los resultados de este trabajo fueron publicados en el 25° European Photovoltaic Solar Energy Conference [P2].

5.4 Efecto de la densidad de agujeros

La resistencia serie de las células de contactos posteriores depende en parte de la capacidad de las mismas para conducir los portadores generados en el emisor de la cara frontal hasta los contactos metálicos situados en la cara posterior. En este sentido, cuantos más caminos tengan los portadores, menor será la resistencia serie de la célula. Aplicando este razonamiento a la célula EWT, cuantos más agujeros tenga, más fácil será el envío de los portadores a los contactos metálicos y, por lo tanto menor su resistencia.

Como contrapartida, cuantos más agujeros tenga la oblea, existirán más zonas de concentración de tensiones, y la estabilidad mecánica de la célula se verá más comprometida. Además, si los agujeros están lo suficientemente cerca, puede ocurrir que las zonas de concentración de tensiones lleguen a solaparse aumentando la superficie de la oblea que está sometida a valores altos de estrés.

Con el objetivo de examinar y cuantificar estos efectos, se ha realizado un estudio mecánico en el que se analizan muestras con diferentes densidades de agujeros.

5.4.1 Preparación de las muestras

En esta ocasión se han preparado tres lotes de muestras para el estudio, siendo la diferencia entre los mismos la densidad de agujeros.

Al igual que en el estudio anterior, se parte de 3 lotes de obleas pseudocadradas de silicio monocristalino de 125x125 mm². Estas obleas son sometidas a un decapado inicial en baño químico para eliminar cualquier rastro de daño superficial proveniente del proceso de serrado del lingote. De este modo, se puede considerar que el punto de partida de todas las muestras es una oblea sin defectos.

A continuación se procede a la realización de los agujeros mediante láser. Al igual que en el estudio anterior se utiliza el equipo de Eolite Systems que se dispone en las instalaciones el TiM. El lote 1 se utiliza como referencia y no se le somete al proceso de taladrado. Los lotes 2 y 3 son sometidos al proceso de taladrado siguiendo diferentes diseños. En ambos casos se realizan filas de agujeros paralelas separadas por una distancia de 2.5 mm, bajo las cuales se situarían los contactos metálicos del emisor. La diferencia se encuentra en la distancia de separación entre los agujeros de cada fila. En el caso del lote 2 la distancia entre agujeros es de 400 μm y en el lote 3 esta distancia se reduce a 200 μm , teniendo una densidad de agujeros de 100 y 200 agujeros por cm^2 respectivamente.

Posteriormente se procede a un segundo decapado en baño químico para eliminar el daño generado por el láser. Este baño no es solamente aplicado a los lotes 2 y 3, sino que el lote 1 también es procesado para que los datos obtenidos en el test de flexión sean comparables.

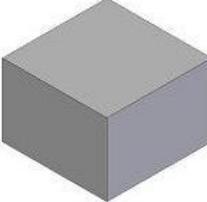
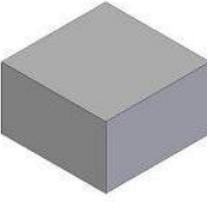
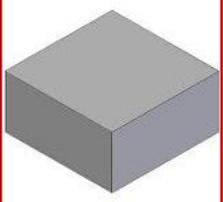
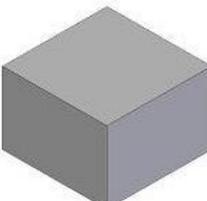
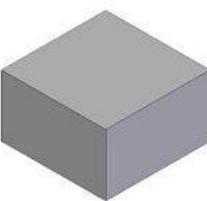
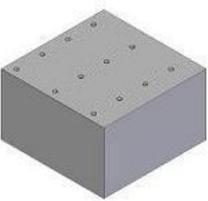
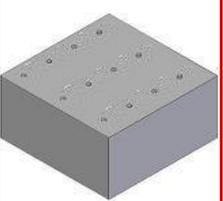
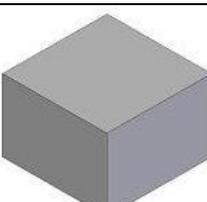
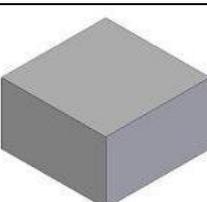
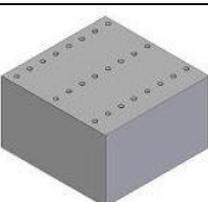
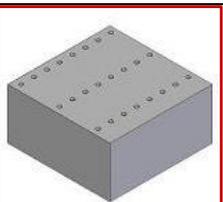
	Original	1 ^{er} Decapado	Taladrado	2 ^o Decapado
Lote 1				
Lote 2				
Lote 3				

Tabla 5.3 -Resumen de procesos de los 3 lotes

Finalmente, se obtienen cuatro muestras de $52.5 \times 52.5 \text{ mm}^2$ de cada oblea, cortándolas mediante láser.

5.4.2 Estudio mecánico

El estudio realizado sobre estas muestras es idéntico al descrito en el apartado anterior. En primer lugar se somete a las muestras al test de flexión RoR y una vez rotas todas las muestras, y habiendo obtenido los datos de carga y desplazamiento a lo largo del test, se realiza un estudio con modelos numéricos para obtener la tensión máxima en el momento de la ruptura para cada una de las muestras. Se realizan modelos de elementos finitos para las muestras más delgadas y gruesas de cada lote y la tensión de fractura para el resto de las muestras se obtiene mediante interpolación lineal basándonos en la energía elástica almacenada en las mismas en el momento de la fractura y su espesor.

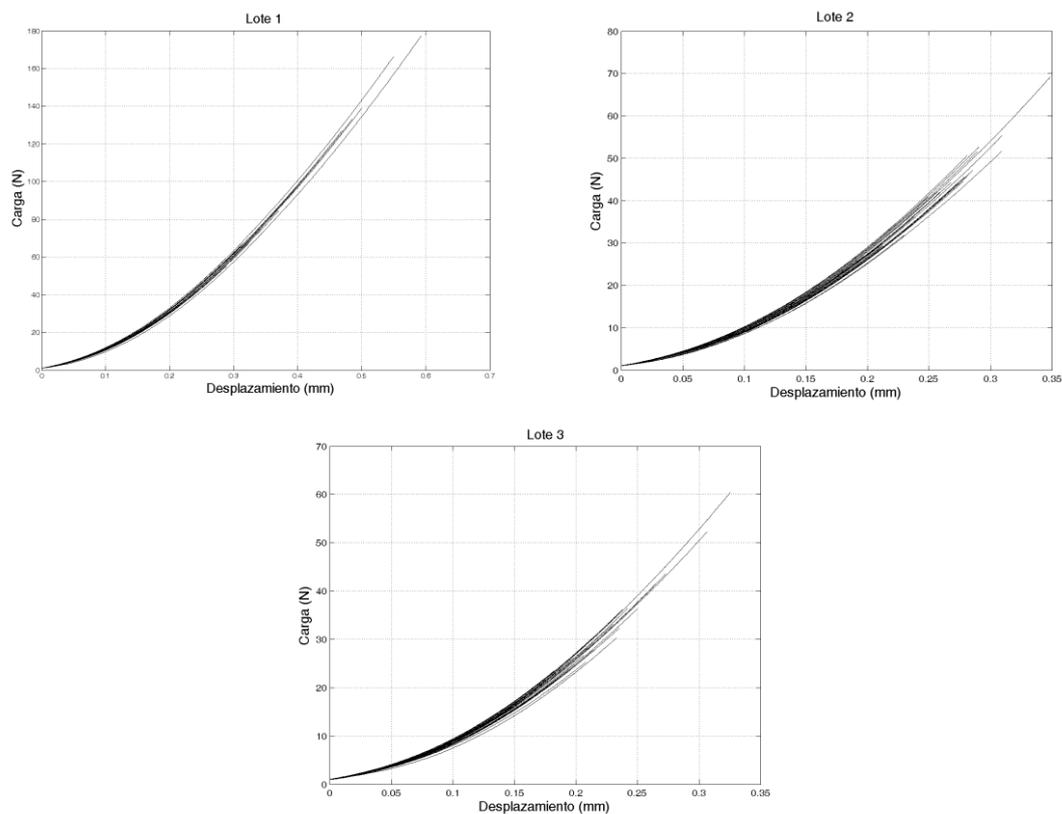


Figura 5.14 - Resultados del test de las muestras de los 3 lotes

Tras la obtención de los valores de tensión máxima en el momento de la ruptura para cada una de las muestras, se agrupan los datos de cada lote para la realización de un estudio estadístico de los valores. En este caso los valores se ajustan a una distribución Weibull biparamétrica. Esta distribución describe la probabilidad de fallo de un área ΔA uniaxialmente tensionada. La probabilidad de fallo entonces, para un área A_{eq} diferente de ΔA se puede expresar:

$$P_{f,Aeq}(\sigma) = 1 - e^{\left[-\frac{A_{eq}}{\Delta A} \left(\frac{\sigma}{\delta}\right)^\beta\right]} \quad (5.5)$$

Donde δ es el parámetro de escala y β es el parámetro de forma.

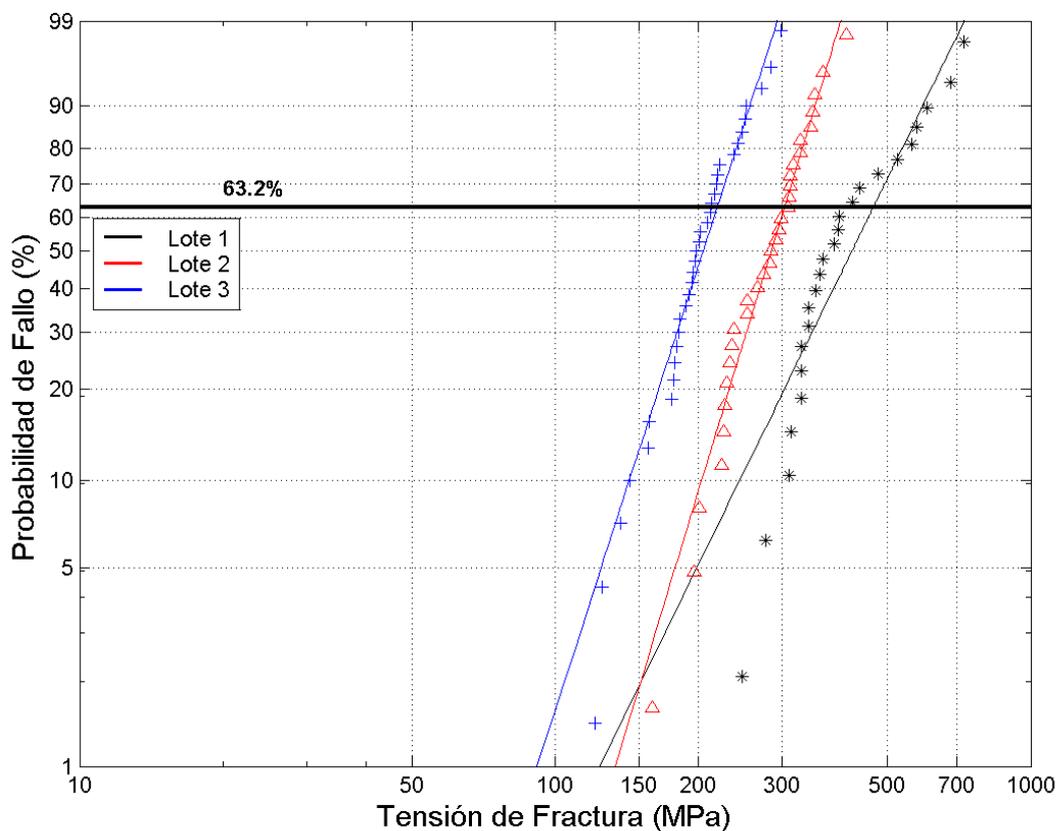


Figura 5.15 - Ajustes Weibull de los las tensiones de fractura

5.4.3 Resultados y conclusiones

Atendiendo a las curvas mostradas en la Figura 5.15, se observa que el aumento en la densidad de agujeros debilita la estructura mecánica de la oblea. Concretamente, la disminución de la tensión característica de fractura entre los lotes 2 y 3 es de un 27%. Existen principalmente dos causas que justifican estos resultados.

Lote	β	σ_{θ} (MPa)
1	3,47	466,5
2	5,60	303,3
3	5,27	219,2

Tabla 5.4 - Parámetros de los ajustes Weibull

Por una parte, cuantos más agujeros hay en la superficie estudiada, existen más zonas de concentración de tensiones y, por lo tanto, hay más probabilidades de que un defecto crítico de la muestra quede dentro de una zona de alto estrés, provocando su fractura.

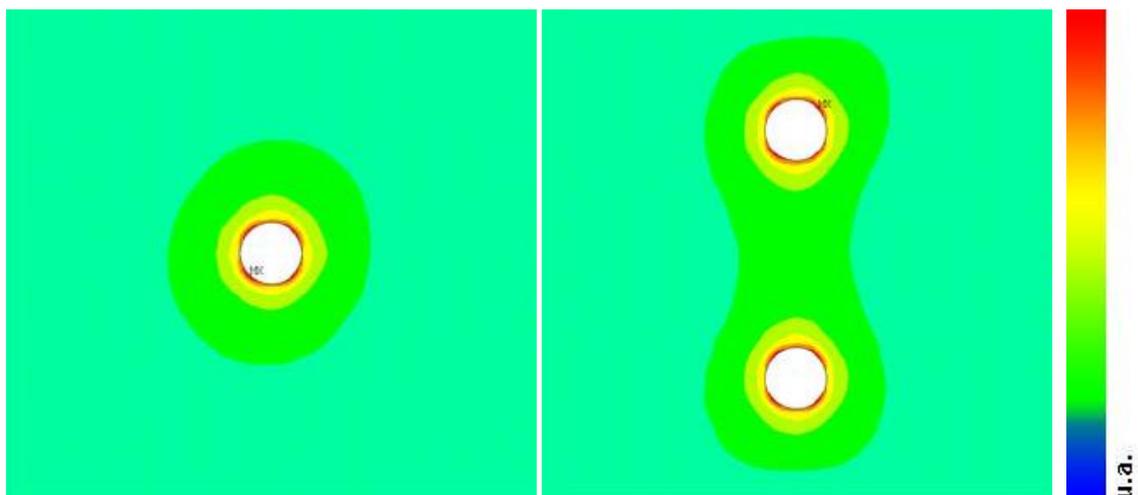


Figura 5.16 - Solapamiento de áreas de alta tensión en agujeros próximos

Otra causa que puede influir en el debilitamiento de las muestras es que, al disminuir la distancia que separa los agujeros, las áreas de concentración de tensiones de cada agujero interactúan con las de los agujeros vecinos. Este solapamiento de zonas de altas tensiones incrementa el área total de la muestra que está sometida a un alto estrés,

aumentando nuevamente la probabilidad de que un defecto crítico soporte una tensión suficientemente alta para provocar su propagación.

Los resultados de este trabajo fueron publicados en el 26° European Photovoltaic Solar Energy Conference [P3].

5.5 Efecto de la duración del segundo decapado

Tras el análisis de los resultados del estudio descrito en el apartado 5.3 se ha confirmado que un decapado en baño químico basado en $NaOH$ tras la realización de los agujeros, mejora la estabilidad de las obleas.

En el proceso de decapado entran en conflicto dos efectos. En primer lugar se ha demostrado que el decapado en baño alcalino elimina el daño superficial de las obleas de silicio, mejorando su resistencia mecánica. En principio, hasta eliminar completamente el daño superficial, cuanto mayor sea la duración del baño se mejorará en mayor medida la superficie de la oblea. Por el contrario, al aumentar la duración del baño, mayor será el espesor eliminado de la muestra y, al mismo tiempo, también se irá incrementando el diámetro de los agujeros. Este aumento de las dimensiones de los agujeros generará, a su vez, que la concentración estrés que se generará en su zona de influencia al tensionar la muestra sea mayor.

Con el objetivo de analizar el efecto de este segundo baño sobre las muestras de obleas taladradas, se realiza este estudio en el que varios lotes de muestras se someten a baños de $NaOH$ de diferente duración.

5.5.1 Preparación de muestras

Se preparan cinco lotes de muestras cuya única diferencia es la duración del decapado posterior a la generación de los agujeros. Para ello se parte de 25 obleas de silicio monocristalino pseudocuadradas de $125 \times 125 \text{ mm}^2$.

Un primer paso común para los cinco lotes es un decapado inicial en baño químico para eliminar el daño superficial procedente del serrado del lingote. Este primer

baño tiene una duración de 2'15'' y se eliminan 9.5 μm de espesor por cada cara de la oblea.

A continuación se procede al taladrado de todas las obleas mediante láser con una densidad de 100 agujeros/ cm^2 .

Finalmente se procede al segundo decapado de las muestras para reducir el daño generado por el láser. Este decapado final tiene una duración diferente para cada uno de los lotes de forma que el silicio eliminado de cada uno de ellos es diferente y, a su vez, el diámetro de los agujeros. El lote 1 servirá como referencia y no se le aplicará un segundo decapado. El resto de los lotes recibirán un según decapado de duración entre 1'45'' y 4'25'', de forma que se eliminarán entre 4.8 $\mu\text{m}/\text{cara}$ y 11.8 $\mu\text{m}/\text{cara}$ de silicio. En la siguiente tabla se muestran los datos relativos a este segundo decapado para cada uno de los lotes.

<i>Lote</i>	<i>Duración del baño (min)</i>	<i>Espesor medio (μm)</i>	<i>Espesor medio eliminado (μm)</i>	<i>Diámetro medio de los agujeros (μm)</i>
1	0:00	195,8	0,0	40
2	1:45	187,5	4,8	50
3	2:40	182,6	7,3	55
4	3:30	174,7	9,4	59
5	4:25	173,0	11,8	64

Tabla 5.5 - Datos del segundo decapado

Finalmente las obleas son cortadas con láser para obtener cuatro muestras de 52.5x52.5 mm^2 de cada una de ellas. De esta forma obtenemos más muestras para la realización del estudio estadístico.

5.5.2 Estudio mecánico

Como en los estudios anteriores, el test de flexión para la realización del estudio mecánico es el test Ring on Ring. Una vez obtenidos los datos de desplazamiento y carga de cada uno de los ensayos, se recurre al análisis numérico a través del método de elementos finitos para la obtención de los valores de tensión máxima en el momento de la fractura.

Finalmente, una vez obtenidas las tensiones de fractura de todas las muestras, se agrupan por lotes para la realización de un estudio estadístico de los resultados obtenidos. Los datos de cada lote se ajustan a una distribución Weibull biparamétrica. A continuación se muestran los ajustes estadísticos de los cinco lotes:

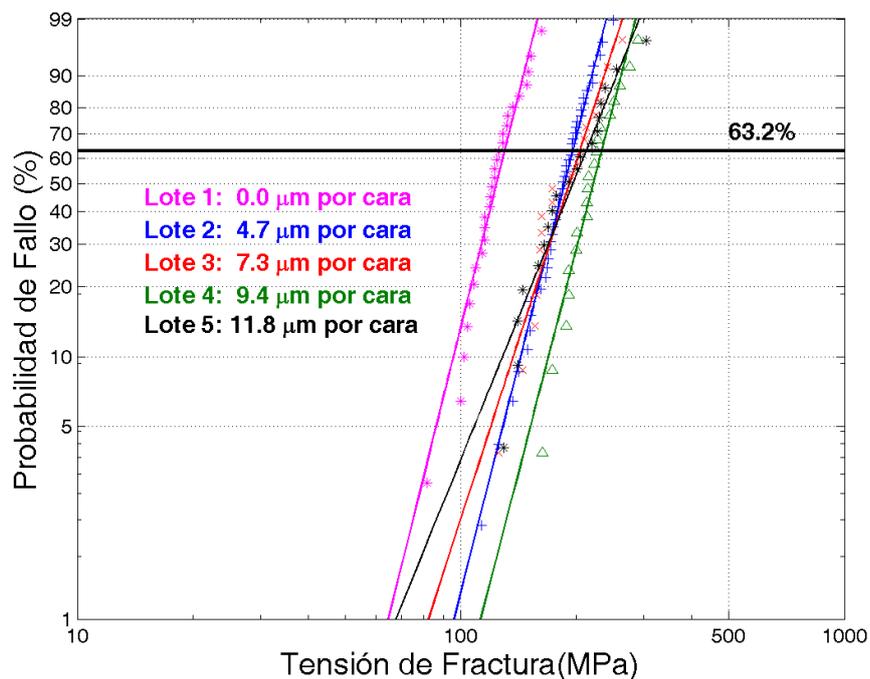


Figura 5.17 - Tensiones de fractura y ajustes Weibull de los cinco lotes

5.5.3 Resultados y conclusiones

Observando las gráficas de la Figura 5.17 se observa que las tensiones características de fractura de los lotes 2, 3, 4 y 5 se encuentran muy cercanos, mientras que la tensión característica de fractura del lote 1 se encuentra sensiblemente por debajo.

Lote	Duración del baño (min)	σ_{θ} (MPa)	m
1	0:00	130,5	7,42
2	1:45	196,4	7,27
3	2:40	205,0	5,71
4	3:30	233,5	7,14
5	4:25	212,8	4,54

Tabla 5.6 - Parámetros del ajuste Weibull

Analizando los parámetros obtenidos en el ajuste Weibull se aprecia claramente que el lote sin un segundo proceso de decapado tiene un valor notablemente inferior al resto de los lotes. Se observa que un procedimiento de decapado, por breve que éste sea, tiene un claro reflejo en la estabilidad mecánica de la oblea. Si la duración del decapado se va aumentando, la tensión característica de fractura sigue mejorando, alcanzando su máximo para un tiempo de decapado de 3'30''.

A partir de este valor, parece que la rigidez mecánica de la oblea empieza a deteriorarse. Esto puede ser debido a que, para un baño de 3'30'' ya se ha eliminado completamente el daño generado por el láser, y a partir de este punto, lo que se observa es el efecto producido por el aumento del tamaño de los agujeros, aumentando la concentración de tensiones que se produce en sus alrededores.

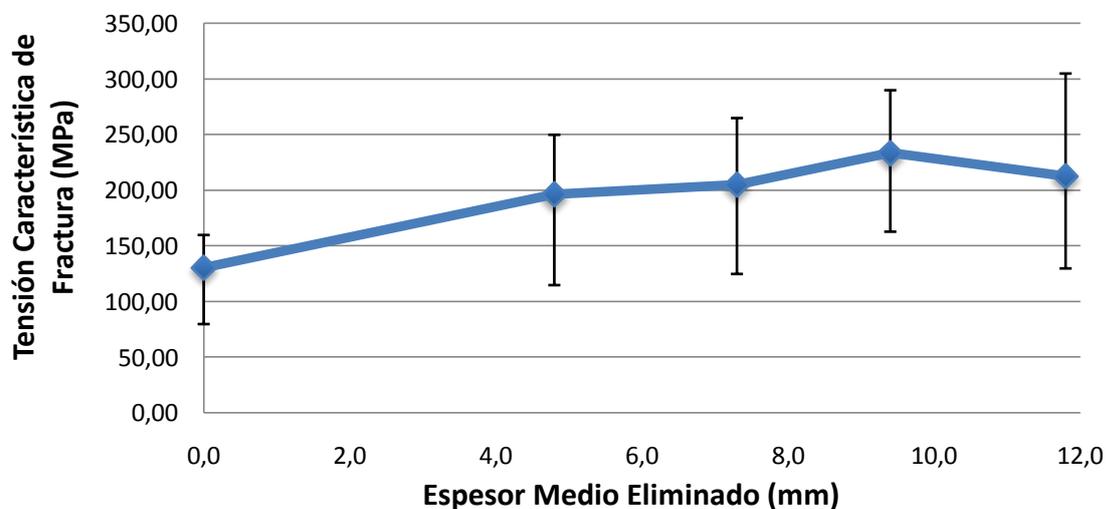


Figura 5.18 - Evolución de la tensión característica de fractura al aumentar el espesor eliminado

Los resultados de este trabajo fueron publicados en el 26° European Photovoltaic Solar Energy Conference [P4].

5.6 Efecto del tamaño de los agujeros

Del estudio anterior se concluye que, a partir de cierto grado de decapado, es posible que el efecto del tamaño de los agujeros afecte más a la estabilidad de la oblea que el daño generado sobre la misma al crearlos. Por este motivo se decide realizar un estudio para analizar este efecto.

Teóricamente, cuanto mayor es el agujero, mayor es la concentración de tensiones que se produce a su alrededor y, a su vez, mayor es la zona afectada por esta concentración de tensiones. Al haber una mayor área de alto estrés, mayor es la posibilidad de que un defecto crítico de la oblea se vea afectada por niveles altos de tensión y se produzca la fractura.

En este estudio se preparan varios lotes de muestras a las que se les hacen agujeros de diferentes diámetros mediante láser. Posteriormente se les aplica un tratamiento en baño químico para adelgazar las muestras un espesor suficiente como para que el efecto del tamaño de los agujeros sea más importante que el daño superficial que las muestras puedan tener.

Realizando un estudio mecánico sobre los diferentes lotes, se analiza la influencia del tamaño de los agujeros sobre la resistencia mecánica de las muestras.

5.6.1 Preparación de muestras

Para la realización de este estudio se parte de obleas de silicio monocristalino pseudocuadradas de 125x125 mm². Estas obleas son sometidas a un primer decapado en baño químico para eliminar el daño generado en las obleas durante el serrado del lingote. La duración del baño es de dos minutos y en este tiempo se eliminan aproximadamente 7 μm por cara.

A continuación se procede a la realización de los agujeros. Este paso ha dado lugar a muchos problemas que se describen en el apartado 5.6.1.1. Se han realizado cuatro tipos de agujeros mediante láser dando lugar a 5 lotes diferentes de muestras. En esta ocasión la distribución de los agujeros es regular en lugar de la distribución tipo EWT que se ha realizado en los estudios anteriores. Los agujeros de estas muestras están

equiespaciados en las direcciones X e Y, y separados los centros por una distancia de 2 mm.

Posteriormente se realiza un segundo decapado en baño alcalino para eliminar el daño generado durante el proceso láser. Según los datos recogidos en el estudio anterior, parece que a partir de un baño de 4'25'' la eliminación del daño que se pudiera conseguir no compensa el aumento del diámetro del agujero que se produce. Se considera entonces, que a partir de ese tiempo, el daño ya ha sido eliminado. Por esta razón la duración de este segundo baño se establece en 5 minutos, eliminando 14 μm de espesor por cada cara.

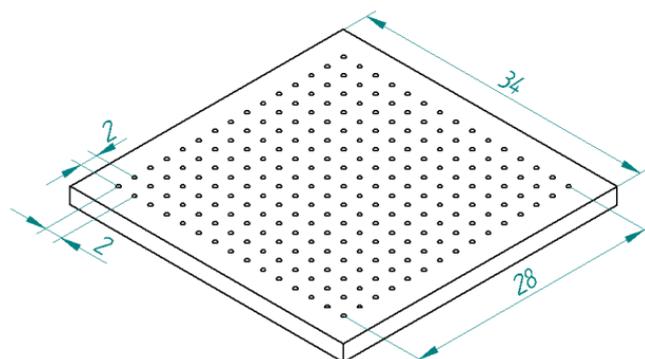


Figura 5.19 - Dimensiones de las muestras (mm)

Finalmente se procede al corte de las obleas mediante láser para obtener más muestras de cara al análisis estadístico del estudio mecánico. En esta ocasión las muestras se han cortado en un tamaño de 34x34 mm² obteniéndose 9 muestras de cada oblea. En la siguiente tabla se muestran los procesos a los que han sido sometidas las muestras de cada uno de los lotes.

Lote	1 ^{er} decapado	Tipo de agujero	2 ^o decapado	Diámetro final	
				Frontal	Posterior
1	7 μm /cara	Sin agujero	14 μm /cara	0 μm	0 μm
2	7 μm /cara	Puntual	14 μm /cara	60 μm	50 μm
3	7 μm /cara	Diámetro 100 μm	14 μm /cara	175 μm	110 μm
4	7 μm /cara	Diámetro 200 μm	14 μm /cara	280 μm	240 μm
5	7 μm /cara	Diámetro 400 μm	14 μm /cara	480 μm	430 μm

Tabla 5.7 - Resumen de procesos de cada lote

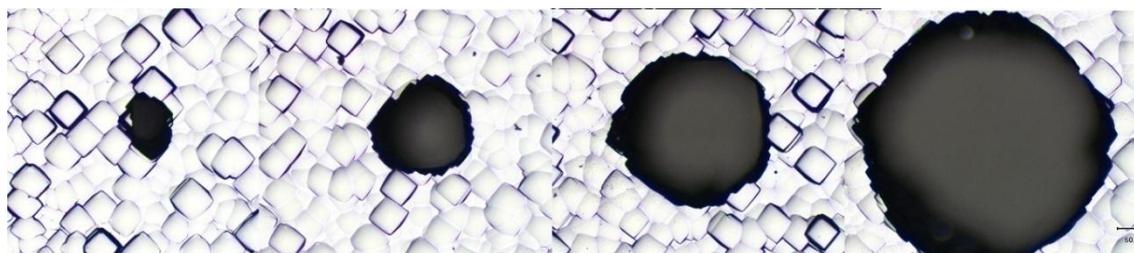


Figura 5.20 -Aspecto de los 4 tipos de agujeros realizados

5.6.1.1 Problemas encontrados en la realización de los agujeros

Como se ha introducido anteriormente, el proceso de taladrado de la oblea mediante el láser no ha sido sencillo. Por un lado, la homogeneidad del trabajo del láser no es constante a lo largo de todo el área de trabajo. En la parte inferior de la zona de trabajo el láser realiza correctamente los procesos pero, al irse desplazando hacia la zona superior va perdiendo efectividad. Por ello, se decide utilizar la parte inferior izquierda del área de trabajo para la realización de los agujeros. De esta forma se realizan los agujeros pertenecientes a las dos muestras de la parte inferior izquierda de la oblea y a continuación se gira la oblea 90° para repetir este proceso hasta 4 veces. Con este procedimiento, de cada oblea se obtienen 8 muestras agujereadas y una muestra (la central) que se utiliza como muestra del lote 1.

Por otra parte, ha surgido otro problema con las muestras de los lotes 4 y 5. Así como los agujeros de los lotes 2 y 3 los realiza el láser sin mayores problemas, con los lotes 4 y 5 esto no es así. Se ha detectado un problema de “fatiga” del láser que hace que los primeros agujeros los realice correctamente pero, según va avanzando, los agujeros van siendo cada vez peores.

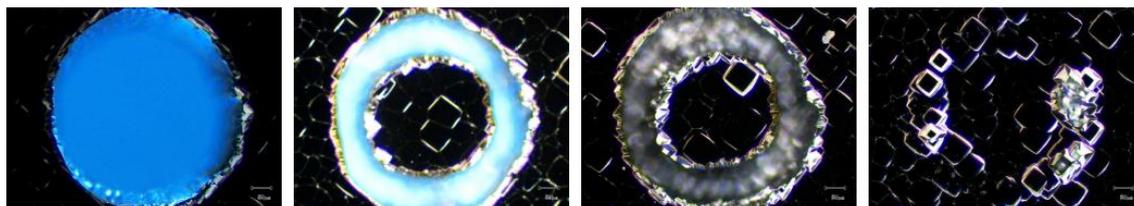


Figura 5.21 - Evolución de la calidad de los agujeros

Se han realizado pruebas con diferentes configuraciones del láser pero con ninguna se ha obtenido un buen resultado. Con la longitud de onda de láser verde

(515 nm), si se aumenta la potencia la fatiga del láser llega antes y si se utilizan configuraciones de potencia de láser más baja, el haz no tiene la energía suficiente para realizar el agujero. También se han realizado pruebas con la longitud de onda infrarroja del láser (1030 nm) con la que se puede obtener más potencia, pero los ensayos han sido infructuosos. Esta longitud de onda introduce mucho daño en la muestra generando roturas en las obleas.

5.6.2 Estudio mecánico

Debido a los problemas encontrados durante el proceso de generación de los agujeros de los lotes 4 y 5, se han desechado estos lotes para la realización del estudio mecánico. Estas muestras tienen agujeros no homogéneos a lo largo de su superficie e incluso hay zonas en las que no se han generado los agujeros. Por lo tanto se decide continuar con el estudio mecánico únicamente con los lotes 1, 2 y 3.

<i>Lote</i>	<i>Tipo de agujero</i>	<i>Diámetro final</i>		<i>Número de muestras</i>
		<i>Frontal</i>	<i>Posterior</i>	
1	Sin agujero	0 μm	0 μm	16
2	Puntual	60 μm	50 μm	32
3	Diámetro 100 μm	175 μm	110 μm	32

Tabla 5.8 - Muestras utilizadas en el estudio mecánico

Para la realización del test mecánico de nuevo se decide utilizar el test Ring on Ring por su característica distribución de tensiones generada. Todas las muestras de los lotes 1, 2 y 3 son sometidas a este test y los datos de carga y desplazamiento vertical son almacenados para la obtención de los valores de tensión de fractura a través de un análisis numérico. El análisis numérico, al igual que en los estudios anteriores, se realiza mediante modelos de elementos finitos. Se realiza un modelo de la oblea más delgada y más gruesa de cada lote. La tensión de fractura del resto de las muestras de cada lote se obtiene por interpolación lineal teniendo en cuenta el espesor y la energía elástica almacenada en cada espécimen en el momento de la fractura.

Una vez obtenidas las tensiones de fractura de todas las muestras, se realiza un análisis estadístico de estos datos, ajustando los valores de las muestras de cada lote a una

distribución Weibull triparamétrica. En la siguiente gráfica se puede muestran los ajustes Weibull para los diferentes lotes estudiados.

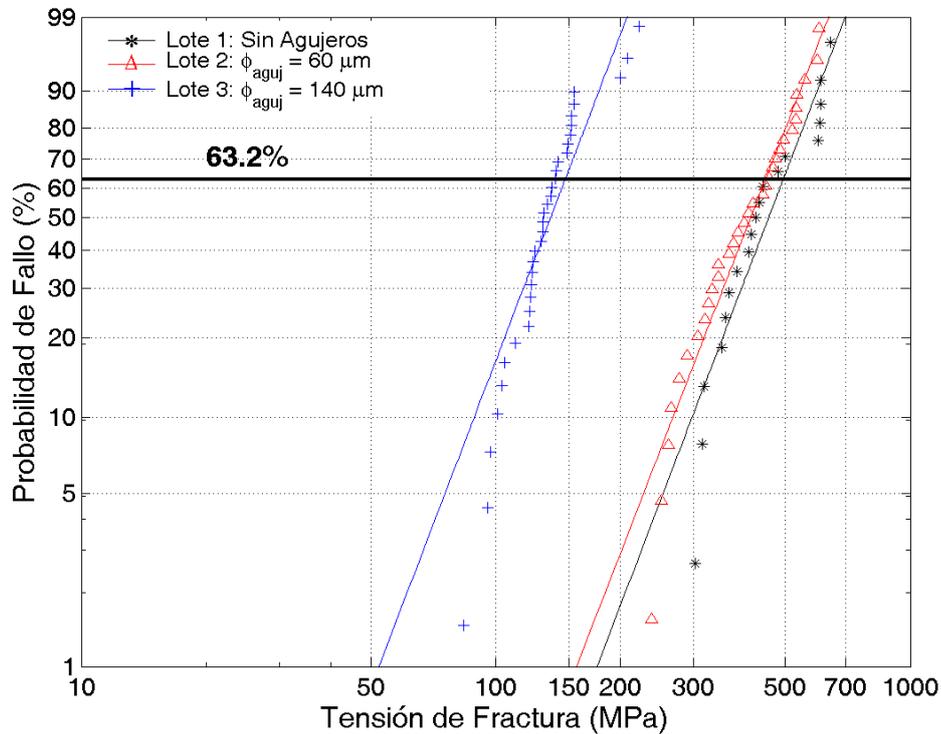


Figura 5.22 -Tensiones de fractura y ajustes Weibull de los lotes 1, 2 y 3

5.6.3 Resultados y conclusiones

En una primera vista de las gráficas se observa que las distribuciones Weibull de los lotes 1 y 2 están muy próximas y la distribución del lote 3 se encuentra en valores notablemente inferiores. Parece claro que la presencia de agujeros grandes en la oblea reduce sensiblemente la resistencia mecánica de la misma. Los agujeros pequeños también afectan a la resistencia mecánica de las muestras pero en una medida mucho menos importante.

Lote	β	σ_{θ} (MPa)
1	4,44	493,81
2	4,37	447,76
3	4,44	147,06

Tabla 5.9 - Parámetros de los ajustes Weibull de los lotes 1, 2 y 3

Atendiendo a los diferentes parámetros de las distribuciones Weibull se observa que la tensión característica de fractura (σ_θ) desciende ligeramente con la presencia de agujeros pequeños pero cae dramáticamente cuando los agujeros tienen un mayor tamaño. De hecho, la caída de este valor con la presencia de los agujeros pequeños es mucho menor que la observada en estudios anteriores. Existen dos posibles causas para explicar este efecto. Por un lado el decapado realizado sobre las muestras es mayor que en las ocasiones precedentes y, por consiguiente, se ha reducido el daño generado durante el proceso láser. Por otro lado, la densidad de agujeros es mucho menor y la mayor separación de los mismos hace que se eviten fenómenos de superposición de áreas de alta concentración de tensiones.

Los resultados de este trabajo fueron publicados en el 38° IEEE Photovoltaic Specialists Conference [P5].

5.7 Efecto de diferentes tratamientos para la eliminación del daño tras taladrado

A lo largo de los estudios realizados sobre estructuras de células de contactos posteriores se ha observado que un decapado posterior a la realización de los agujeros mejora en gran medida la estabilidad mecánica de las obleas. Hasta el momento se ha estudiado el decapado en baño químico basado en *NaOH* y se ha comprobado que, un baño corto mejora sensiblemente la estabilidad mecánica de la muestra y que, al aumentar la duración del baño, la rigidez mecánica sigue aumentando de forma más lenta. Hay un punto a partir del cual la estabilidad mecánica ya no aumenta más y puede empezar a disminuir debido al incremento del tamaño de los agujeros.

En este estudio se va a comparar la eficacia de este tratamiento con otros tratamientos químicos habituales en los procesos de fabricación de células solares. En concreto se va a analizar el efecto de un decapado químico en baño ácido y el proceso de texturizado alcalino.

5.7.1 Preparación de muestras

Para la realización del estudio se parte de 56 obleas de silicio monocristalinas pseudocuadradas de 125x125 mm². Todas las obleas son sometidas a un primer tratamiento químico en baño alcalino para la eliminación del daño superficial generado durante el proceso de serrado del lingote. Este primer baño tiene una duración de 6 minutos y en este tiempo se eliminan aproximadamente 17,5 μm de espesor por cada cara.

A continuación se procede a la realización de los agujeros en todas las obleas mediante láser. El diseño de agujeros es idéntico en todas las obleas; 9 matrices de 15x15 agujeros puntuales con una distancia entre ellos de 2 mm tanto en la dirección horizontal como en vertical. Cada una de estas matrices corresponderá a una muestra al final del proceso.

Una vez realizado el proceso de taladrado láser, se dividen las obleas en 14 lotes, para aplicarle a cada uno de ellos un tratamiento final diferente. Cada lote estará formado por 4 obleas para obtener un total de 36 muestras de cada lote. Los tratamientos a aplicar a los diferentes lotes son los siguientes:

- El lote 0 no recibe ningún tratamiento posterior al taladrado y servirá de referencia para cuantificar la mejora que produce cada uno de los tratamientos aplicados al resto de los lotes
- Los lotes 1, 2, 3 4 y 5 reciben un tratamiento en baño químico alcalino basado en una alta concentración de *NaOH* a alta temperatura. La duración del tratamiento es de 1, 2, 3, 4 y 5 minutos respectivamente.
- Los lotes 6, 7, 8 y 9 son tratados en baño químico ácido basado en *HF+NOH₃* (*CPX*). Este baño químico presenta un ataque isotrópico en el que la velocidad del ataque es independiente de la orientación cristalográfica. La duración del tratamiento será de 1, 2, 3 y 4 minutos respectivamente.
- Los lotes 10, 11 y 12 son sometidos a un tratamiento de texturizado alcalino basado en un baño de *NaOH* en baja concentración. Este

tratamiento es habitual en la industria solar ya que, se trata de un ataque claramente anisotrópico que genera una superficie de micropirámides en la célula que mejora el atrapamiento de la luz. La duración estándar de este proceso es de 40 minutos pero, para este estudio, la duración será de 40, 60 y 80 minutos para cada lote.

- Finalmente, el lote 13 recibe un tratamiento combinado de decapado en baño alcalino de 5 minutos más un proceso de texturizado de 40 minutos.

Por último cada oblea es cortada mediante láser para la obtención de 9 muestras de 34x34 mm² de cada una de ellas.

<i>Lote</i>	<i>1^{er} Decapado NaOH (min)</i>	<i>2^o Proceso</i>	<i>Duración (min)</i>
0	6:00	-	0:00
1	6:00	NaOH	1:00
2	6:00	NaOH	2:00
3	6:00	NaOH	3:00
4	6:00	NaOH	4:00
5	6:00	NaOH	5:00
6	6:00	CPX	1:00
7	6:00	CPX	2:00
8	6:00	CPX	3:00
9	6:00	CPX	4:00
10	6:00	Txt	40:00
11	6:00	Txt	60:00
12	6:00	Txt	80:00
13	6:00	NaOH+Txt	5:00+40:00

Tabla 5.10 - Resumen de procesos aplicados a cada lote

5.7.1.1 Aspecto de los agujeros tras casa proceso

A continuación se muestran los agujeros con su aspecto inicial tras el taladrado láser y tras los diferentes procesos a los que han sido sometidas las muestras.

Decapado alcalino (*NaOH*)

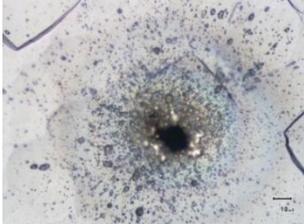
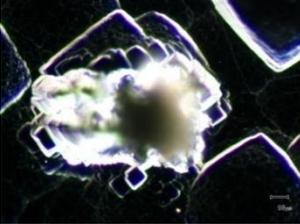
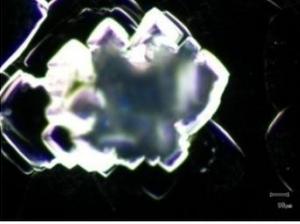
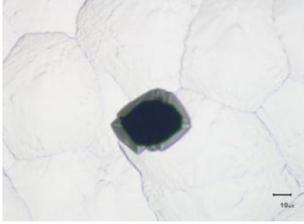
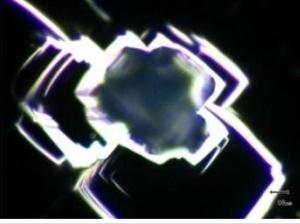
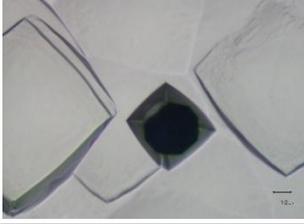
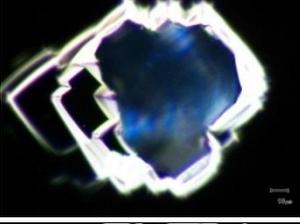
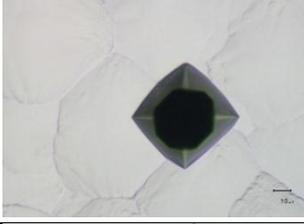
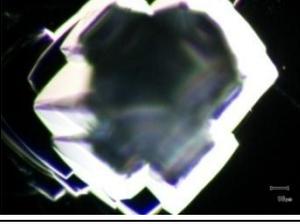
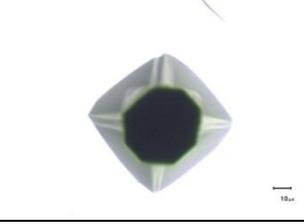
<i>Lote</i>	<i>Tiempo de Proceso</i>	<i>Espesor eliminado</i>	<i>Vista frontal</i>	<i>Vista posterior</i>
0	0:00	0 $\mu\text{m}/\text{cara}$		
1	1:00	1,7 $\mu\text{m}/\text{cara}$		
2	2:00	4,0 $\mu\text{m}/\text{cara}$		
3	3:00	6,6 $\mu\text{m}/\text{cara}$		
4	4:00	8,8 $\mu\text{m}/\text{cara}$		
5	5:00	11,3 $\mu\text{m}/\text{cara}$		

Tabla 5.11 - Características del proceso y aspecto de los agujeros de las muestras tratadas con *NaOH*

En primer lugar se observa que con un ataque muy corto ya se elimina la suciedad

generada en el proceso láser. También se observa la anisotropía del ataque y se ve claramente que tiene cierta preferencia sobre ciertos planos cristalográficos. Cuanto mayor es el tiempo del proceso más claramente se observa esta característica.

Al igual que en estudios anteriores, el ataque de *NaOH* no solo hace que descienda el espesor de la oblea, sino que también hace aumentar el diámetro de los agujeros.

Decapado ácido (CPX)

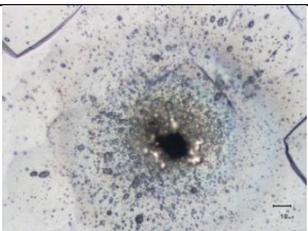
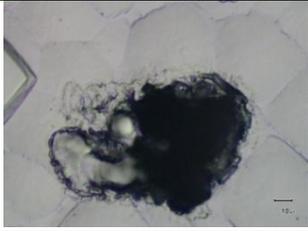
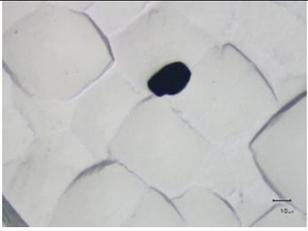
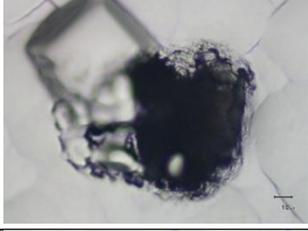
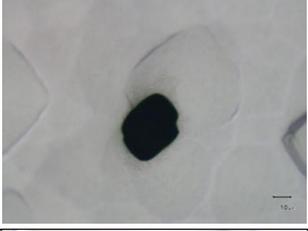
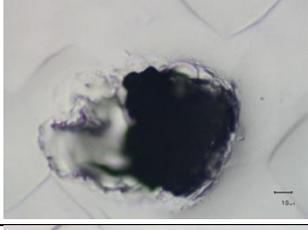
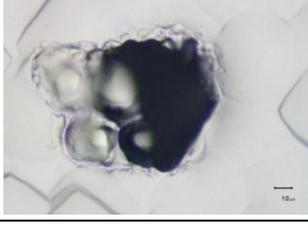
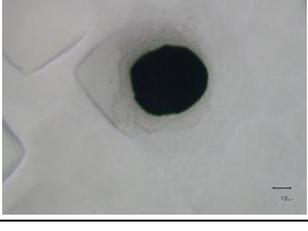
<i>Lote</i>	<i>Tiempo de Proceso</i>	<i>Espesor eliminado</i>	<i>Vista frontal</i>	<i>Vista posterior</i>
0	0:00	0 $\mu\text{m}/\text{cara}$		
6	1:00	2,5 $\mu\text{m}/\text{cara}$		
7	2:00	6,0 $\mu\text{m}/\text{cara}$		
8	3:00	8,5 $\mu\text{m}/\text{cara}$		
9	4:00	9,1 $\mu\text{m}/\text{cara}$		

Tabla 5.12 - Características del proceso y aspecto de los agujeros de las muestras tratadas con CPX

Al igual que el caso de baño de *NaOH*, un ataque corto es suficiente para eliminar la suciedad generada durante el proceso láser. Se observa que el ataque es completamente isotrópico no mostrando predilección por ninguno de los planos cristalográficos. El diámetro de los agujeros aumenta cuanto mayor es la duración del tratamiento.

Texturizado

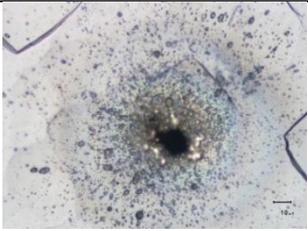
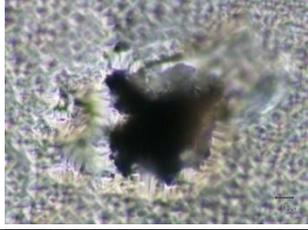
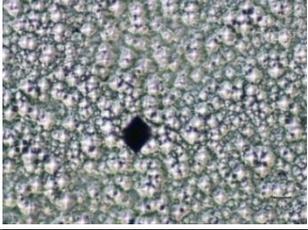
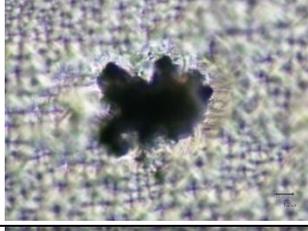
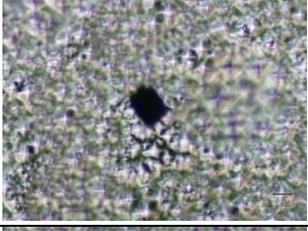
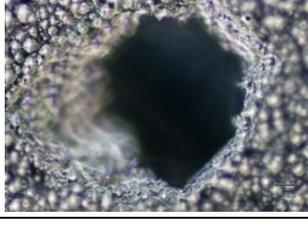
<i>Lote</i>	<i>Tiempo de Proceso</i>	<i>Espesor eliminado</i>	<i>Vista frontal</i>	<i>Vista posterior</i>
0	0:00	0 $\mu\text{m}/\text{cara}$		
10	40:00	6,3 $\mu\text{m}/\text{cara}$		
11	60:00	10,5 $\mu\text{m}/\text{cara}$		
12	80:00	18,2 $\mu\text{m}/\text{cara}$		
13	5:00 <i>NaOH</i> + 40:00	11,4 $\mu\text{m}/\text{cara}$ + 4,6 $\mu\text{m}/\text{cara}$		

Tabla 5.13 - Características del proceso y aspecto de los agujeros de las muestras texturizadas

A primera vista se observa que la anisotropía de este ataque genera una superficie cubierta de micropirámides. También se observa que el tamaño de los agujeros no varía significativamente con este ataque, salvo en el lote 13 que ha sido previamente atacado con un decapado alcalino.

5.7.2 Estudio mecánico

Una vez preparadas todas las muestras se procede al estudio mecánico de las mismas. Al igual que en estudios anteriores y debido a su escasa sensibilidad a defectos situados en la periferia de las muestras, se elige el ensayo Ring-on-Ring para realizar los test de flexión.

Tras la rotura de las muestras, para obtener los valores de tensión máxima en el momento de la fractura se vuelve recurrir a modelos de elementos finitos. Con los valores de desplazamiento en función de la carga obtenidos en los ensayos, se modelan las muestras más delgada y gruesa de cada lote. Para el resto de muestras de cada lote se obtienen los valores de tensión en el momento de la fractura realizando una interpolación lineal teniendo en cuenta la energía elástica acumulada.

Finalmente, una vez calculados los valores de tensión de fractura de todas las muestras, se hace un análisis estadístico de los resultados obtenidos, ajustando los datos de cada lote a una distribución Weibull biparamétrica.

5.7.3 Resultados y conclusiones

Atendiendo a los resultados de los ajustes mostrados en la Figura 5.23 se puede afirmar que el decapado alcalino mejora la resistencia mecánica de las muestras aunque el tiempo de procesado sea muy breve. Con un minuto de procesado la mejoría es evidente. Si se aumenta el tiempo de decapado a 2 minutos la tensión característica de fractura mejora sensiblemente. A partir de este punto, la mejora de la resistencia de la oblea no varía de forma significativa

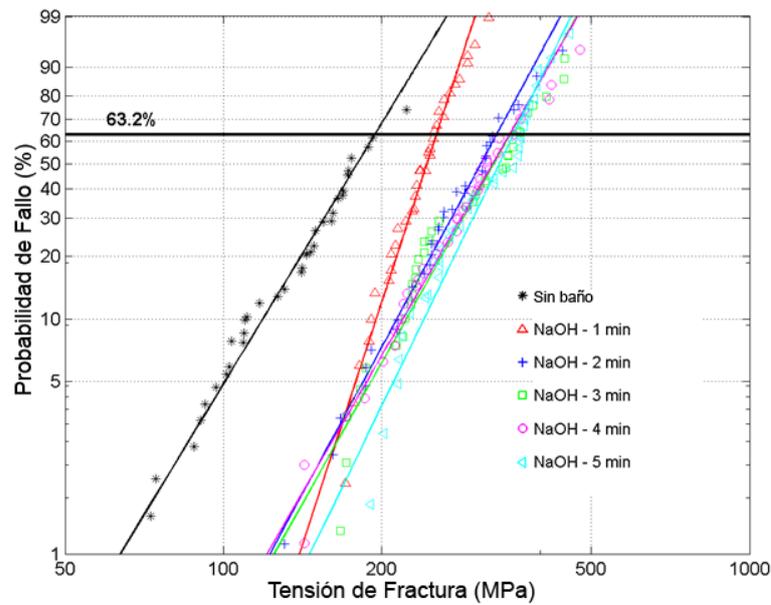


Figura 5.23 - Ajustes Weibull de las tensiones de fractura del lote de referencia (0) y los lotes procesados con decapado alcalino (1, 2, 3, 4 y 5)

En cuanto al decapado ácido (Figura 5.24), no parece que tenga un efecto positivo claro en la resistencia mecánica de las muestras. Si bien con 1, 3 y 4 minutos de procesado se observa una leve mejora, con el decapado de 2 minutos el comportamiento observado es el contrario.

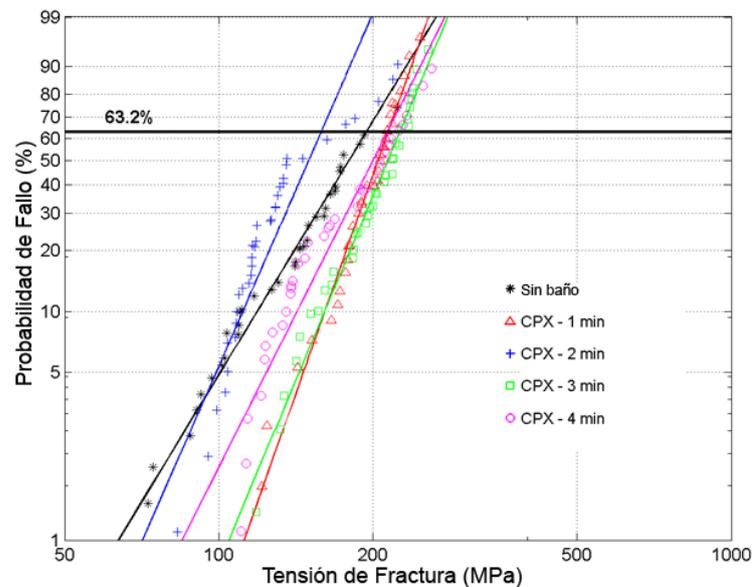


Figura 5.24 - Ajustes Weibull de las tensiones de fractura del lote de referencia (0) y los lotes procesados con decapado ácido (6, 7, 8 y 9)

Por último, las muestras procesadas en baño de texturado no muestran grandes diferencias en cuanto a resistencia mecánica con respecto a las muestras de referencia. La tensión característica de fractura permanece prácticamente constante salvo en el lote 11 (60 minutos de proceso) que experimenta un ligero aumento. Un análisis especial merece el comportamiento del lote 13 que ha sido decapado durante 5 minutos en baño alcalino antes de ser texturizado. Si bien se ha visto que el decapado mejora de forma sensible el comportamiento mecánico de las muestras, el texturado posterior ha devuelto a las muestras a un estado similar al inicial. Por lo tanto se puede afirmar que el texturado ha debilitado mecánicamente estas muestras.

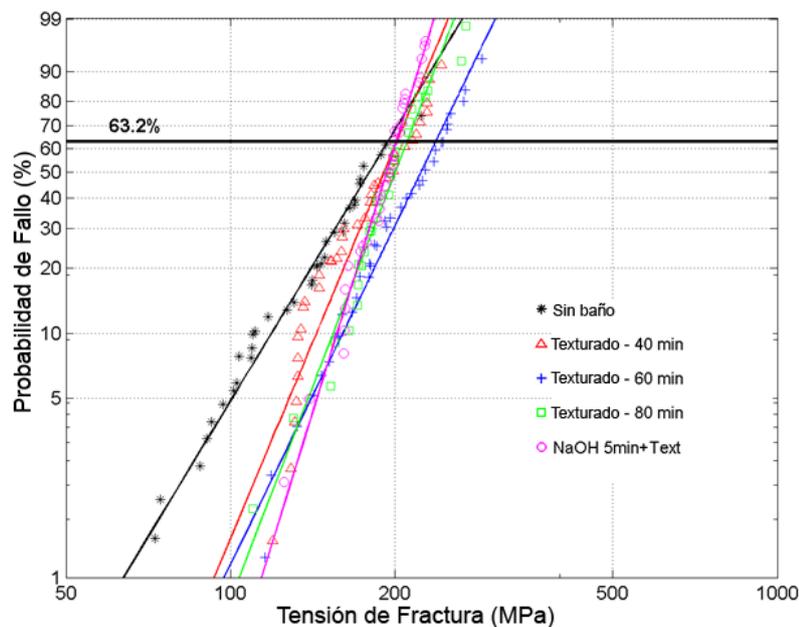


Figura 5.25 - Ajustes Weibull de las tensiones de fractura del lote de referencia (0) y los lotes procesados con texturado (10, 11, 12 y 13)

Analizando los datos en su conjunto se puede establecer que el único proceso válido para reducir el daño introducido durante la generación de los agujeros en células de contacto posteriores es el decapado en baño químico basado en *NaOH*.

<i>LOTE</i>	σ_{θ} (MPa)	<i>Módulo m</i>
0 - Sin baño	194,80	4,7
1 - NaOH – 1 min	254,54	8,7
2 - NaOH – 2 min	331,54	5,2
3 - NaOH – 3 min	351,87	5,0
4 - NaOH – 4 min	350,74	4,9
5 - NaOH – 5 min	356,82	5,8
6 - CPX – 1 min	214,35	8,0
7 - CPX – 2 min	158,76	6,5
8 - CPX – 3 min	225,94	6,8
9 - CPX – 4 min	213,81	5,6
10 - Txt– 40 min	201,81	6,7
11 - Txt– 60 min	237,92	5,8
12 - Txt– 80 min	210,68	7,3
13 - NaOH – 5 min + Txt	201,32	9,1

Tabla 5.14 - Parámetros de los ajustes Weibull

Con una duración de 2 minutos, eliminando 4 μm por cara, es suficiente para elevar drásticamente la tensión característica de fractura en un 70%. Si el proceso se alarga hasta los 3 minutos la mejora es del 80%, pero un decapado más largo no aporta una mejoría destacable.

Los resultados de este trabajo fueron publicados en el 27º European Photovoltaic Solar Energy Conference [P6].

5.8 Conclusiones

En estos estudios se ha comprobado cómo afecta la generación de una estructura mecánica de una célula de contactos posteriores a la integridad de una célula solar. Se ha analizado como afecta la presencia de agujeros en la oblea y qué características de los mismos tienen mayor efecto en la tensión característica de la misma. También se han estudiado diferentes procesos para reducir el daño introducido durante la generación de los agujeros.

La presencia de agujeros reduce en gran medida la estabilidad mecánica de las obleas. Este debilitamiento es debido a que, cuando una oblea con agujeros es tensionada, alrededor de los agujeros se produce una concentración de estrés que hace los niveles de tensión en esos puntos sean mucho más elevados que en una oblea sin agujeros. El nivel de concentración de tensiones depende, entre otros factores, del tamaño de los agujeros. Cuanto mayores son los agujeros, mayor es el grado de concentración de tensiones que se produce en su entorno.

Otro factor que influye en el debilitamiento de las obleas es la densidad de agujeros. Ya que alrededor de cada agujero se produce una zona de altas tensiones, si aumenta el número de agujeros se aumenta a su vez el área total de la oblea que, en caso de ser tensionada, se va a ver sometida a un alto nivel de estrés. La consecuencia de esto es que la probabilidad de que un defecto del material se encuentre bajo una zona de alta tensión es mayor y, por lo tanto, también será mayor la probabilidad de que se produzca la fractura de la oblea. También hay que tener en cuenta que, si la densidad de los agujeros aumenta, la distancia que los separa disminuye. Al encontrarse los agujeros más cerca, las áreas de concentración de tensiones que se producen en las inmediaciones de cada agujero pueden llegar a solaparse, aumentando el área total de la oblea sometida a altos valores de estrés.

El debilitamiento de las obleas al generar una superficie perforada sobre ellas no solamente es debido a los agujeros propiamente dichos, sino que también, el proceso de generación de los agujeros mediante láser, introduce un daño adicional. El proceso láser produce un gran estrés térmico sobre la oblea de forma muy localizada y puede dar lugar a la generación de microgrietas en las inmediaciones de los agujeros. Para reducir este daño se han estudiado diferentes tratamientos químicos y se ha llegado a la conclusión de que el tratamiento más efectivo es el decapado químico en baño de *NaOH*. Un procesado de 3 minutos de duración es suficiente para eliminar prácticamente el daño adicional generado por el láser. Por lo tanto se estima necesario un tratamiento de este tipo tras la generación de los agujeros para seguir procesando estas obleas y reducir el índice de roturas durante su fabricación.

6 Conclusiones y Líneas Futuras

6.1 Conclusiones

La capacidad de las obleas de silicio para soportar tensiones sin que se rompan, está caracterizada por la cantidad y magnitud de los defectos que haya en las mismas. Esto es debido a que cuando una oblea está sometida a una fuerza externa, las tensiones se concentran en los defectos de la oblea y es más fácil alcanzar el nivel crítico para que las grietas se propaguen.

Se ha comprobado que, en una línea de fabricación de células solares, las obleas se rompen generalmente en los procesos en los que son sometidas a mayores niveles de estrés.

- Estrés de origen térmico; procesos de difusión, quemado de contactos metálicos, soldado de células para su integración en paneles...
- Estrés de origen mecánico; manipulación de las obleas, laminado de paneles, presión de la oblea en el serigrafiado de los contactos...

Pero es posible que el origen de las grietas que han llevado a la fractura de la oblea esté en otros pasos del proceso. Tras un estudio de una línea de fabricación de células solares estándar, se han detectado los siguientes puntos de generación de grietas:

- Serrado del lingote: El serrado del lingote se basa en la repetición del proceso de indentado de partículas de abrasivo en el silicio. Este proceso genera la eliminación de una lasca de silicio, pero deja la superficie dañada con una distribución homogénea de pequeñas microgrietas.
- Carga y descarga de obleas: En ocasiones, el transporte de las obleas de un paso productivo al siguiente se realiza a través de cargadores. Estos cargadores se rellenan con obleas y se almacenan o se llevan hasta el siguiente proceso. Los métodos de carga y descarga de estos elementos pueden provocar daños en las obleas de silicio.

- Alineadores: Los elementos utilizados para una correcta alineación de las obleas en un proceso, provoca golpes en las obleas que pueden generar grietas en las mismas.
- Manipulación: El desplazamiento mediante manipuladores de vacío debe evitar un vacío excesivo que dañe la oblea, un vacío deficiente que provoque el deslizamiento de la misma, y grandes aceleraciones que induzcan el pandeo de obleas muy delgadas.

Para hacer frente a los problemas vistos en la cadena productiva, se han diseñado dos elementos que facilitan la manipulación de las obleas:

- Un portaobleas que evita el contacto directo entre las obleas y los manipuladores, y que puede ser apilado para su utilización en los procesos químicos en baño de la línea productiva.
- Una herramienta para la carga de los casetes de transporte de las obleas que evita el contacto entre la oblea y el caset durante los procesos de carga y descarga.

Una vez producida una grieta en una célula es importante una pronta detección de la misma. La identificación de una oblea dañada permite su extracción de la línea productiva para evitar los posibles prejuicios que pueda provocar su ruptura durante su procesado.

- Rotura en cadena de obleas no dañadas
- Parada de la línea de fabricación para eliminar restos de la oblea rota que generen el mal funcionamiento del equipamiento o la rotura de otras obleas.

Para que un sistema de detección pueda ser incorporado en la línea de producción de células solares, es necesario que cumpla una serie de requisitos:

- a) Método no destructivo ya que no debe dañar las obleas
- b) Tiempo de ciclo inferior a 2 segundos para adecuarse a los ratios de fabricación de 1.800 células a la hora
- c) Buena discriminación de grietas para evitar falsos positivos y negativos
- d) Fácil integración en la línea de producción

Se han analizado los diferentes métodos de detección de grietas presentes en la bibliografía, y se han comparado sus características con los requisitos que presenta la industria fotovoltaica:

- Los test de flexión se pueden utilizar como métodos no destructivos poniendo un límite de fuerza que debe superar las obleas para considerarlas libres de grietas. El tiempo de ciclo y la integración en línea no tienen que ser un problema para la utilización de este método. En cambio la discriminación de las grietas sí puede ser un inconveniente ya que no existe ninguna configuración que tensione la oblea por completo de forma homogénea. Una posible solución a este problema es realizar una combinación de test de flexión en cadena a cada oblea.
- Una variación de los test de flexión consiste en generar un patrón de tensiones homogéneo en la oblea calentándola de forma no uniforme mediante iluminación de alta potencia. No existe mucha bibliografía sobre este método pero es de suponer que la energía lumínica necesaria para calentar la oblea debe de ser excesivamente alta. Más si tenemos en cuenta que el silicio es prácticamente transparente al espectro infrarrojo.
- El microscopio de escaneo acústico (SAM) tiene una gran capacidad para la detección de grietas y defectos pero, el alto tiempo de procesamiento para una oblea hace imposible su aplicación en la industria fotovoltaica.
- La termografía ultrasónica lock-in necesita tiempos altos de proceso y además, para obtener una imagen mejor definida, es necesario cubrir la oblea con una capa de pintura opaca. De esta forma se elimina el carácter no destructivo de este método.
- El sistema de detección por transmisión óptica es un método perfectamente válido para la detección de grietas e incluso existen en el mercado varios equipos comerciales con este cometido. Este método puede tener problemas con grietas superficiales que no atraviesan la oblea completamente.
- Las técnicas de imagen luminiscente tienen una gran capacidad para detectar grietas en línea. La imagen electroluminiscente (EL) es más

sencilla de implementar ya que al excitar la célula con energía eléctrica se polariza más fácilmente. Por contra, solamente es aplicable para células finalizadas. La imagen fotoluminiscente (PL) es aplicable en cualquier paso del proceso productivo, pero alcanzar los niveles de polarización mediante iluminación es más complicado. Actualmente se comercializan varios equipos para la detección de grietas con estas técnicas.

- El sistema de vibración ultrasónica resonante (RUV) tiene potencial para una alta detección de grietas en línea, con un tiempo de procesado adecuado y en cualquier paso del proceso productivo.

Tras este estudio inicial se ha estudiado más a fondo el sistema RUV para la detección de grietas llegando a las siguientes conclusiones:

- Los modos de resonancia varían en función del paso productivo en el que se encuentre la oblea, siendo los mayores cambios tras el texturado y tras la metalización. Esto es entendible ya que ambos procesos modifican mecánicamente la estructura de la oblea.
- Se ha establecido el modo de resonancia más adecuado para el estudio de las obleas por sus características y su baja dispersión entre medidas.
- Se han estudiado varios métodos para la generación de grietas de forma controlada. Las grietas generadas con láser son mucho más anchas que las reales y, además, pueden generar grietas adicionales. Las grietas generadas por impacto tienen una apariencia de grieta real pero su dimensión no está del todo controlada.
- Así como hay varios estudios que corroboran una buena detección de grietas en línea en grandes lotes, en los estudios realizados en esta tesis no se ha llegado a la misma conclusión. Sí se han observado desviaciones en las medidas cuando una oblea tiene una grieta, pero éstas desviaciones son demasiado pequeñas como para destacar entre la dispersión de medidas de los lotes analizados.
- Se han comparado las medidas realizadas con el sistema RUV con un estudio mecánico de las obleas para determinar si las obleas analizadas estaban dañadas o no. Se ha comprobado mediante este método, que un

tratamiento en baño químico alcalino, mejora la resistencia mecánica de las obleas al redondearse la punta de las grietas y reduciendo la concentración de tensiones que se produce en ese punto.

Finalmente se ha analizado el daño generado en las obleas al crear una estructura de célula de contactos posteriores sobre ellas. Para ello se han generado diferentes estructuras MWT sobre varios lotes obleas y se han realizado estudios mecánicos basados en el test de flexión Ring on Ring sobre los lotes, llegando a las siguientes conclusiones:

- La generación de una matriz de agujeros sobre las obleas de silicio las debilita mecánicamente ya que, al generar estrés en la oblea perforada, las tensiones se intensifican en las proximidades de los agujeros.
- El diámetro de los agujeros afecta a este proceso de debilitamiento. Cuanto mayor es el diámetro del agujero, mayor es la concentración de tensiones que se produce en su entorno.
- La densidad de los agujeros también tiene un efecto claro sobre la estabilidad mecánica de la oblea, por dos motivos diferentes. En primer lugar porque a mayor cantidad de defectos, es más probable encontrar un defecto crítico que lleve a la fractura de la oblea con un nivel bajo de tensión. En segundo lugar, porque si los agujeros están lo suficientemente próximos, las áreas de concentración de tensiones que les rodean pueden llegar a solaparse, aumentándose el área efectiva sometida a niveles altos de tensión.
- El proceso de generación de los agujeros mediante láser añade un daño adicional a la presencia propia de los agujeros. El estrés térmico localizado que crea este paso puede generar microgrietas que debilitan la estructura. Para atenuar este daño, se han estudiado diferentes procesos químicos y se ha concluido que el decapado químico en baño alcalino ofrece el mejor resultado.

6.2 Líneas Futuras

El trabajo descrito en esta tesis deja abiertas futuras líneas de investigación de cara a la reducción de los índices de roturas en los procesos de fabricación de células solares. A continuación se enumeran algunas de ellas:

- Todos los estudios realizados en esta Tesis están basados en obleas de silicio monocristalino y se podría comprobar si los resultados obtenidos serían aplicables a obleas de silicio multicristalino. En estas obleas la propagación de las grietas es diferente ya que los planos cristalográficos de cada grano tienen orientaciones diferentes. Esto afecta a sus características mecánicas y a los sistemas de detección de grietas.
- Es necesario continuar realizando un trabajo coordinado con la industria fotovoltaica para encontrar y desarrollar un método eficaz para la detección de grietas en las líneas de fabricación de células solares.
- Una vez caracterizada mecánicamente la oblea de silicio cristalino y conociendo las tensiones que es capaz de soportar antes de su fractura, sería interesante caracterizar los procesos de producción de células solares de forma que se conociesen las tensiones que generan en las obleas. Esta información sería de gran utilidad a la hora de diseñar mejoras en las líneas de fabricación de cara a procesar obleas más delgadas y frágiles.
- Al igual que se ha estudiado el efecto de los agujeros en obleas para la fabricación de células EWT, es posible realizar estudios similares para otros tipos de células que modifiquen la estructura mecánica de las obleas; como la célula MWT o TWT (Transistor Wrap Through)
- Conocidos los efectos de la realización de una matriz de agujeros en una oblea y sabiendo cómo afecta su tamaño y densidad en la estabilidad mecánica de la misma, es posible introducir esta variable para el diseño de la célula. De esta forma no sólo se tendrán en cuenta criterios eléctricos, sino también criterios mecánicos para reducir las roturas que se produzcan durante su fabricación.

Bibliografía

- [1] IPCC, *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2011.
- [2] EPIA, “Global market outlook for photovoltaics 2014-2018.” Jun-2014.
- [3] Euroserv'er, “Photovoltaic Barometer.” Apr-2014.
- [4] Euroserv'er, “Photovoltaic Barometer.” Apr-2013.
- [5] Euroserv'er, “Photovoltaic Barometer.” Apr-2012.
- [6] EPIA, “Global market outlook for photovoltaics until 2016.” May-2012.
- [7] EPIA, “Global market outlook for photovoltaics 2013-2017.” May-2013.
- [8] Ministerio de Industria, Energía y Turismo, “La Energía en España 2013.” 2014.
- [9] Boletín Oficial del Estado, “Real Decreto 1578/2008.” Sep-2008.
- [10] UNEF, “La energía fotovoltaica conquista el mercado.” 2014.
- [11] EPIA, “Solar photovoltaics competing in the energy sector - On the road to competitiveness.” Sep-2011.
- [12] ITRPV, “International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV). Results 2011.” Mar-2012.
- [13] ITRPV, “International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV). Results 2012.” Mar-2013.
- [14] ITRPV, “International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV). Results 2013.” Mar-2014.
- [15] “pvinsights.com.” .
- [16] B. Burger and K. Kiefer, “Photovoltaics Report.” Fraunhofer ISE, Oct-2014.
- [17] C.E. Inglis, “Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners,” *Trans Inst Nav. Archit.*, vol. 44, pp. 219–241, Mar. 1913.

- [18] A. A. Griffith, “The Phenomena of Rupture and Flow in Solids,” *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. Contain. Pap. Math. Phys. Character*, vol. 221, no. 582–593, pp. 163–198, Jan. 1921.
- [19] G.R. Irwin, “Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate,” *J. Appl. Mech.*, vol. 24, pp. 361–364, 1957.
- [20] H. J. Möller, “Basic Mechanisms and Models of Multi-Wire Sawing,” *Adv. Eng. Mater.*, vol. 6, no. 7, pp. 501–513, 2004.
- [21] Y. Kondo, N. Watanabe, D. Ide, T. Matsuki, H. Takato, and I. Sakata, “Characterization of Multicrystalline Silicon Wafers for Solar Cell Applications Sliced With a Fixed Abrasive Wire,” in *Proceedings of 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Valencia, Spain, 2008, pp. 1297 – 1300.
- [22] A. Bidiville, K. Wasmer, R. Kraft, and C. Ballif, “Diamond Wire-Sawn Silicon Wafers – from the Lab to the Cell Production,” in *Proceedings of 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Hamburg, Germany, 2009, pp. 1400 – 1405.
- [23] A. Bidiville, J. Heiber, K. Wasmer, S. Habegger, and F. Assi, “Diamond Wire Wafering: Wafer Morphology in Comparison to Slurry Sawn Wafers,” in *Proceedings of 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Valencia, Spain, 2010, pp. 1673 – 1676.
- [24] C. Yang, S. Melkote, and S. Danyluk, “Strength Characteristics of Diamond Wire Sawn Wafers and their Relation to the Sawing Process,” in *Proceedings of 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, pp. 980 – 983.
- [25] I. Kao, V. Prasad, J. Li, and M. Bhagavat, “Wafer Slicing and wiresaw manufacturing technology,” in *Proceedings of the 1997 NSF Desing and Manufacturing Grantees Conference*, 1997, pp. 239–240.
- [26] O. Anspach, A. Stabel, A. Lawerenz, S. Riesner, R. Porytsky, and F.-W. Schulze, “Investigations on Single Wire Cuts in Silicon,” in *Proceedings of 23rd European*

- Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Valencia, Spain, 2008, pp. 1098 – 1103.
- [27] J. Barredo, A. Fraile, J. C. Jimeno, and E. Alarcón, “Mechanical characterization of monocrystalline silicon wafers,” in *Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Barcelona, Spain, 2005, pp. 298 – 301.
- [28] R. Wertz, F. Böttinger, C. Fischmann, M. Konstandin, and A. Verl, “Stress Potential Analysis of Solar Wafer and Cells during Conveyor Belt Handling,” in *Proceedings of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2011, pp. 2069 – 2071.
- [29] R. Wertz, T. Giesen, C. Fischmann, M. Konstandin, and A. Verl, “Passive Alignment of Wafers – Design and Impact,” in *Proceedings of 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2012, pp. 1175 – 1178.
- [30] C. Fischmann, T. Giesen, D. Goh, M. Hoffmeister, and R. Wertz, “Analysis and Evaluation of Thin-Wafer Handling Methods,” in *Proceedings of 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany*, 2009, pp. 1352 – 1355.
- [31] C. Fischmann, T. Giesen, F. Böttinger, R. Wertz, and M. Hoffmeister, “Automated Handling and Transport of Crystalline Photovoltaic Wafers,” in *Proceedings of 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 6-10 September 2010, Valencia, Spain*, 2010, pp. 1677 – 1681.
- [32] R. Koepge, S. Schoenfelder, T. Giesen, C. Fischmann, A. Verl, and J. Bagdahn, “The Influence of Transport Operations on the Wafer Strength and Breakage Rate,” in *Proceedings of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2011, pp. 2072 – 2077.
- [33] C. Fischmann, T. Giesen, R. Wertz, F. Böttinger, N. Böffert, and A. Verl, “Analysis of Influences on Solar Wafers during Pick-and-Place Operations,” in *Proceedings of 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Frankfurt, Germany, 2012, pp. 1171 – 1174.

- [34] G. Coletti, C. J. J. Tool, and L. J. Geerligs, “Quantifying surface damage by measuring mechanical strength of silicon wafers,” in *Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Barcelona, Spain, 2005, pp. 270–273.
- [35] H. Behnken, M. Apel, and D. Franke, “Simulation of mechanical stress during bending tests for crystalline wafers,” in *Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 12-16 May 2003*, 2003, vol. 2, pp. 1308–11.
- [36] B. L. Sopori, P. Sheldon, and P. Rupnowski, “Wafer breakage mechanism(s) and a Method for Screening Problem Wafers,” in *Proceedings of the 16th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules*, Denver, Colorado, U.S.A., 2006, pp. 129–138.
- [37] A. Belyaev, O. Polupan, S. Ostapenko, D. Hess, and J. P. Kalejs, “Resonance ultrasonic vibration diagnostics of elastic stress in full-size silicon wafers,” *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 21, pp. 254–260, Mar. 2006.
- [38] O. Breitenstein, “Lock-In Thermography and Related Topics in Photovoltaic Research,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 725, pp. 115–122, Jul. 2012.
- [39] J. P. Rakotoniaina, O. Breitenstein, M. H. Al Rifai, D. Franke, and A. Schneider, “Detection of cracks in silicon wafers and solar cells by lock-in ultrasound thermography,” in *Proceedings of 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Paris, France, 2004.
- [40] A. Dillenz, G. Busse, and D. Wu, “Ultrasound lock-in thermography: feasibilities and limitations,” in *Proceedings SPIE, Diagnostic Imaging Technologies and Industrial Applications*, 1999, vol. 3827, pp. 10–15.
- [41] E. Rueland, A. Herguth, A. Trummer, S. Wansleben, and P. Fath, “Optical uCrack detection in combination with stability testing for in-line-inspection of wafers and cells,” in *Proceedings of 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Barcelona, Spain, 2005.
- [42] E. Rueland, S. Recht, S. Wansleben, H. Feist, and P. Fath, “uCrack detection and other optical characterisation techniques for in-line inspection of wafers and

- cells,” in *Proceedings of 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Paris, France, 2004.
- [43] T. Fuyuki, H. Kondo, T. Yamazaki, Y. Takahashi, and Y. Uraoka, “Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon solar cells by electroluminescence,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, p. 262108, 2005.
- [44] S. Ostapenko, I. Tarasov, J. P. Kalejs, C. Haessler, and E.-U. Reisner, “Defect monitoring using scanning photoluminescence spectroscopy in multicrystalline silicon wafers,” *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 15, no. 8, p. 840, Aug. 2000.
- [45] T. Trupke, R. A. Bardos, M. C. Schubert, and W. Warta, “Photoluminescence imaging of silicon wafers,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, p. 044107, 2006.
- [46] BT Imaging Pty. Ltd., “<http://www.btimaging.com>.” .
- [47] SCHMID-YAYA Technology Co. Ltd., “<http://www.schmid-yaya.com>.” .
- [48] Nanometrics Inc., “<http://www.nanometrics.com>.” .
- [49] T. Trupke, E. Pink, R. A. Bardos, and M. D. Abbott, “Spatially resolved series resistance of silicon solar cells obtained from luminescence imaging,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 9, p. 093506, Feb. 2007.
- [50] M. Glatthaar, J. Haunschild, M. Kasemann, J. Giesecke, W. Warta, and S. Rein, “Spatially resolved determination of dark saturation current and series resistance of silicon solar cells,” *Phys. Status Solidi RRL – Rapid Res. Lett.*, vol. 4, no. 1–2, pp. 13–15, Feb. 2010.
- [51] J. Haunschild, M. Glatthaar, M. Kasemann, S. Rein, and E. R. Weber, “Fast series resistance imaging for silicon solar cells using electroluminescence,” *Phys. Status Solidi RRL – Rapid Res. Lett.*, vol. 3, no. 7–8, pp. 227–229, 2009.
- [52] O. Breitenstein, A. Khanna, Y. Augarten, J. Bauer, J.-M. Wagner, and K. Iwig, “Quantitative evaluation of electroluminescence images of solar cells,” *Phys. Status Solidi Rapid Res. Lett.*, vol. 4, pp. 7–9, Feb. 2010.
- [53] A. Belyaev, O. Polupan, W. Dallas, S. Ostapenko, D. Hess, and J. Wohlgemuth, “Crack detection and analyses using resonance ultrasonic vibrations in full-size crystalline silicon wafers,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, p. 111907, 2006.

- [54] S. Ostapenko, W. Dallas, D. Hess, O. Polupan, and J. Wohlgenuth, “Crack Detection and Analyses using Resonance Ultrasonic Vibrations in Crystalline Silicon Wafers,” *4th IEEE World Conf. Photovolt. Energy Convers.*, vol. 1, pp. 920–923, 2006.
- [55] S. Ostapenko and I. Tarasov, “Nonlinear resonance ultrasonic vibrations in Czochralski-silicon wafers,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, p. 2217, 2000.
- [56] A. Belyaev and S. Ostapenko, “Resonance ultrasonic diagnostics of defects in full-size silicon wafers,” *Phys. B Condens. Matter*, vol. 308–310, pp. 1137–1140, Diciembre 2001.
- [57] A. Belyaev, S. Lulu, I. Tarasov, S. Ostapenko, and J. P. Kalejs, “Stress diagnostics in multicrystalline silicon wafers using an acoustic technique,” in *Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002*, 2002, pp. 332–335.
- [58] W. Dallas, O. Polupan, and S. Ostapenko, “Resonance ultrasonic vibrations for crack detection in photovoltaic silicon wafers,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 18, pp. 852–858, Mar. 2007.
- [59] Monastyrskiy, S. Ostapenko, O. Polupan, H. Maeckel, and M. Vazquez, “Resonance Ultrasonic Vibrations for in-line crack detection in silicon wafers and solar cells,” *2008 33rd IEEE Photovoltaic Spec. Conf.*, pp. 1–6, 2008.
- [60] Belyaev, Y. U. Emirov, S. Ostapenko, I. Tarasov, V. Verstraten, M. Van Dooren, P. G. Fumei, G. Van Veghel, P. Bentz, and A. Van Der Heide, “Yield enhancement for solar cell manufacturing using resonance ultrasonic vibrations inspection,” *34th IEEE Photovolt. Spec. Conf. PVSC*, pp. 1918–1921, 2009.
- [61] E. Van Kerschnaver, R. Einhaus, J. Szlufcik, J. Nijs, and R. Mertens, “A novel silicon solar cell structure with both external polarity contacts on the back surface,” in *Proceedings of the Second World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Vienna (Austria), 1998, pp. 1479–1482.
- [62] J. M. Gee, W. K. Schubert, and P. A. Basore, “Emitter wrap-through solar cell,” in *Conference Record of the Twenty Third IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1993*, 1993, pp. 265–270.
-

- [63] P. Rupnowski and B. Sopori, “Strength of silicon wafers: fracture mechanics approach,” *Int. J. Fract.*, vol. 155, no. 1, pp. 67–74, Jan. 2009.
- [64] W. Weibull, *A statistical theory of the strength of materials*. Proceedings of the Royal Swedish Institute of Engineering Research Nr. 151, 1939.

Publicaciones y Patentes

Publicaciones

- [P1] E. Cereceda, J. R. Gutierrez, J. C. Jimeno, J. Barredo, A. Fraile, E. Alarcón, S. Ostapenko, A. Martínez and M.A. Vázquez, “Crack Origin and Detection in Thin Crystalline Solar Cells in a Production Line”, in *Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Milan, Italy, 2007, pp. 1168 – 1170.
- [P2] E. Cereceda, J. Barredo, J. R. Gutierrez, and J. C. Jimeno, “Mechanical Stability in Crystalline Silicon Solar Cells,” in *Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Valencia, Spain, 2010, pp. 1665 – 1668.
- [P3] J. Barredo, L. Hermanns, I. del Rey, A. Fraile, and E. Alarcón, “Optimizing the Density of Holes of EWT Solar Cells Taking into Consideration Mechanical Aspects,” in *Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Hamburg, Germany, 2011, pp. 1585 – 1588.
- [P4] G. Cueto-Felgueroso, J. Barredo, E. Cereceda, and L. Hermanns, “Study of the Mechanical Strength Improvement of Wafers for EWT Solar Cells by Chemical Etching After the Drilling Process,” in *Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Hamburg, Germany, 2011, pp. 1589 – 1592.
- [P5] E. Cereceda, J. Barredo, J. R. Gutierrez, J. C. Jimeno, A. Fraile, and L. Hermanns, “Study of the effect of different hole sizes on mechanical strength of wafers for back contact solar cells,” in *2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2012, pp. 000209–000212.
- [P6] E. Cereceda, J. Barredo Egusquiza, J. R. Gutiérrez, J. C. Jimeno, A. Fraile, and L. Hermanns, “Damage Reduction of the Laser Drilling Process on Back Contact Solar Cells by Chemical Treatment,” Oral Session in *Proceedings of 27th*

European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2012, pp. 832 – 835.

Patentes

TÍTULO: Dispositivo Fotovoltaico y Panel Fotovoltaico.

N. DE SOLICITUD: P200930844

N. APLICACIÓN: 10823096.2-1235

N. PATENTE: PCT/ES2010070661

SOLICITANTES: J.C. Jimeno Cuesta, A. Luque López, F. Recart Barañano, R. Lago aurrekoetxea, J.R. Gutiérrez Serrano, K. Varner, C. Ikarán Salegi, F. Hernando Briongos, M.J. Sáenz Novales, J. Ezquerro Ventosa, M.V. Rodríguez Cuesta, V. Martínez Santos, S. Uriarte del Río, V. Fano Lestón, N. Azkona Estefanía, E. Cereceda Moris, C. Montalbán Flórez, I. Hoces Fernández, L. Pérez Manzano, A. Otaegi Aizpeolea, J. Martín Real, I. Freire Velasco.