

Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

TRABAJO FIN DE MASTER

Optimización de bandejas de EPS y PET. Caracterización de las propiedades del material y diseño mediante MEF

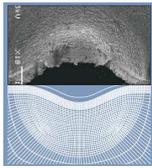
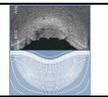
Tutor industrial o externo: Ana Fernández Lavandero

Tutor académico: Inés Peñuelas Sánchez

Departamento: Construcción e Ingeniería de Fabricación

Universidad de Oviedo

Julio de 2013



**Máster interuniversitario en integridad estructural y
durabilidad de materiales, componentes y estructuras**

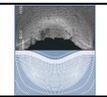
TRABAJO FIN DE MASTER

***Optimización de bandejas de EPS y PET. Caracterización de las
propiedades del material y diseño mediante MEF***

Ana Fernández Lavandero Inés Peñuelas Sánchez Javier Martínez Villa

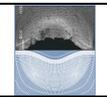
Universidad de Oviedo

Julio de 2013

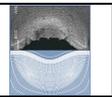


Índice de contenidos

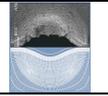
Introducción	7
Objetivos	7
Envase para uso alimentario	8
Evolución del sector del envasado	10
Historia del envase	11
Definición de PS y PET	13
Descripción del proceso de fabricación de bandejas de PET	17
Secado del material	17
Extrusión	17
Componentes de la extrusora	18
Tornillo	18
Cilindro	19
Garganta de alimentación	20
Tolva	21
Plato rompedor y filtros	21
Cabezal y boquilla	22
Desgasificado	22
Equipos auxiliares	23
Recubrimientos	25
Laminación	25
Coextrusión	26
Recubrimientos (coatings)	26
Termoformado	27
Partes de la línea de termoformado	28
Sujeción del bastidor	28
Hornos formadores	28
Molde	29
Troquel	29
Descripción del proceso de fabricación de bandejas de PS	31
Extrusión	31
Extrusoras monohusillo	32
Extrusoras con venteo	33
Extrusoras tándem	33
Partes de la extrusora tándem	33
Extrusora primaria	33
Extrusora secundaria	34
Boquilla	35
Mandrill	36
Rodillos tractores	36
Bobinadores	37
Curado	38
Termoformado	39
Análisis de mercado	42
PS	43
EPS	45
PET	46
Evolución del precio de las materias primas	47
Procedimiento experimental	48



Caracterización de los materiales	48
Preparación de las probetas de PET	48
Obtención de probetas sobre lámina	48
Obtención de probetas sobre bandeja	49
Descripción del ensayo	50
Preparación de las probetas de PS	54
Obtención de probetas sobre lámina	54
Obtención de probetas sobre bandeja	55
Descripción del ensayo	56
Diseño mediante Elementos Finitos	59
Bandejas de PS	59
Simulación del ensayo de flexión	61
Diseño de los modelos	63
Sin refuerzo en contorno lateral	64
Con refuerzo en contorno	64
Con dos refuerzos en contorno	64
Con nervios laterales	65
Con menor ángulo de pared	65
Con mayor ángulo de pared	65
Bandejas de PET	66
Simulación del ensayo de tracción	67
Diseño de los modelos	69
Bandeja sin nervios	69
Bandeja con cuatro nervios	70
Bandeja con cinco nervios	70
Bandeja STD	70
Bandeja con cuello de 3,5 mm	70
Resultados y su discusión	71
Caracterización de los materiales	71
PET	71
PS	73
Diseño mediante Elementos Finitos	74
Simulación del ensayo de flexión	75
Tensiones	75
Deformaciones	75
Modelos de PS	77
Sin refuerzo en contorno lateral	77
Con refuerzo en contorno	77
Con dos refuerzos en contorno	78
Con nervios laterales	79
Con menor ángulo de pared	79
Con mayor ángulo de pared	80
Simulación del ensayo de tracción	82
Tensiones	82
Deformaciones	82
Modelos de PET	84
Bandeja sin nervios	84
Bandeja con cuatro nervios	84
Bandeja con cinco nervios	85
Bandeja STD	86



	Bandeja con cuello de 3,5 mm	86
Conclusiones		89
Presupuesto		90
Planificación		90
Cálculo del presupuesto		90
Costes de caracterización de materiales		91
Costes de hardware		91
Costes de software		92
Costes de personal		92
Costes de transporte		92
Coste total del Proyecto		93
Futuras líneas de trabajo		94
Bibliografía		95



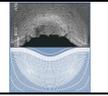
Este Proyecto constituye el último paso para la obtención del título de *Máster en Integridad y Durabilidad de Materiales, Componentes y Estructuras*.

Ha sido un año difícil, compaginando trabajo y estudios. Aprovecho la ocasión para agradecer, una vez más, a *Ana Fernández*, cotutora por la parte empresarial de éste Proyecto, por haberme permitido realizarlo.

Me gustaría agradecer especialmente a todos los que, con sus aportaciones, han contribuido a la realización de éste Proyecto.

A *Antonio David López Sánchez*, por su amistad dentro y fuera de las aulas.

A todos ellos, y también a los que se alegran de mis éxitos, muchas gracias.



Introducción

El PS y PET son materiales derivados del petróleo de uso generalizado en la industria alimentaria, pues mediante su manipulación, en procesos de extrusión y de termoformado, es posible obtener bandejas aptas para el envasado de alimentos.

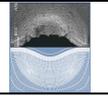
Las bandejas deben contener, presentar e identificar el producto que albergan en su interior, pero además deben protegerlo frente a posibles esfuerzos externos propios de su manipulación y transporte, por lo que deben presentar valores resistentes que eviten su rotura y, consecuentemente, el desecho del producto que contienen. Además, debido a la alta competitividad experimentada en el sector, las bandejas han de mostrar matices diferenciadores que hagan decantarse por su elección al consumidor final.

En los últimos años, las materias primas empleadas para la fabricación de estos productos, han experimentado un considerable aumento de precio, por lo que se hace necesario revisar el diseño de las bandejas con el objetivo de conseguir maximizar sus propiedades resistentes minimizando su peso. Atendiendo a esto, el empleo de herramientas avanzadas, como es el caso del Método de los Elementos Finitos, se hace necesario.

Objetivos

Los objetivos de este Proyecto son los siguientes:

- ✓ La descripción general de los procesos de fabricación de las bandejas de PS y PET.
- ✓ La obtención de las propiedades de ambos materiales.
- ✓ El estudio de los factores más determinantes en el diseño mediante el programa comercial *ABAQUS CAE*.



Envase para uso alimentario

El envase puede definirse como un producto manufacturado que consiste en un material o combinación de materiales empleados para presentar, contener, proteger, manipular y distribuir bienes, desde materiales de origen hasta productos finales en cada una de las fases de la cadena de distribución. Por lo tanto, las principales funciones del envase pueden resumirse en las que se describen a continuación:

- Contención del producto.
- Presentar e identificar el producto.
- Proteger la integridad física del producto.
- Preservar las propiedades del producto y sus características de calidad.
- Preparar el producto para la manipulación durante su transporte y distribución comercial.
- Informar al consumidor.

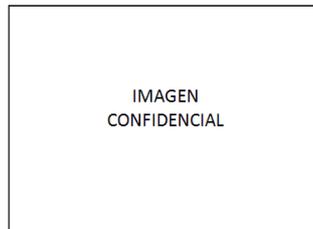
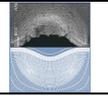


Imagen 1. Detalle de bandeja para pollo comercializada en el mercado noruego.

Los envases han ido evolucionando con el transcurso del tiempo como respuesta a los siguientes factores:

- Crecimiento de la población.
- Urbanización.
- Necesidad de eliminar la pérdida y el deterioro de los alimentos.
- La incorporación de las mujeres al entorno laboral.
- La internacionalización de los comercios.
- Mayor conciencia sobre higiene.
- Mayor consumo de alimentos naturales.
- El deterioro medioambiental.

Como resultado, los primitivos envases como cáscaras de calabaza, pieles y contenedores cerámicos han sido reemplazados, en una evolución tecnológica progresiva, por nuevos materiales como papel, vidrio, hojalata y plástico.



Hoy en día, se dispone de un amplio y diversificado suministro de materiales para envasado y diseños para satisfacer los diferentes requerimientos de la industria y de los consumidores. Los materiales de envasado pueden agruparse de la forma siguiente:

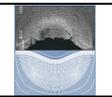
- Materiales metálicos (hojalata, aluminio, etc...).
- Vidrios.
- Papel y cartón.
- Plásticos.
- Madera.
- Otros materiales (cerámicos, fibras naturales, etc...).
- Combinaciones de los anteriormente mencionados.

La mayoría de los envases han sido desarrollados con estos materiales con el objetivo de satisfacer los requerimientos de los diversos productos comercializados en sociedades urbanas. Sin embargo, estos envases pueden agruparse en tipos de contenedores: contenedores rígidos, tambores de metal y plástico, vidrio y botellas y frascos de plástico, cartones y cestas de madera, y envases flexibles confeccionados a partir de cartón, papel, plástico y estructuras complejas, como bolsas y recubrimientos.

Con un mercado con tanta variedad de productos, es obvio que un tipo de envase no encajará en todos los requerimientos de todos los productos alimenticios. El envase más adecuado debe ser elegido para el uso específico, teniendo en cuenta diversos parámetros que se describen a continuación:

- Características del producto (naturaleza, composición y sensibilidad a factores atmosféricos).
- Posibles interacciones entre el producto y el envase.
- Transporte y distribución comercial.
- Tipo de consumidor.
- Vida útil del producto.
- Costes.
- Reutilización de materiales, reciclado e impacto ambiental.

En el caso que nos corresponde, las bandejas de plástico son recipientes relativamente poco profundos cuyo uso se ha extendido debido a su disponibilidad a gran escala, su relativo bajo coste de producción, su ligereza, su gran versatilidad y sus relativamente buenas propiedades barrera.



Evolución del sector del envasado

En las últimas dos o tres décadas el sector del envasado ha experimentado un enorme crecimiento fundamentalmente debido a los avances en los materiales y la maquinaria. No sólo es un recipiente, sino que “el envase debe proteger lo que vende, y vender lo que protege” (Briston – Neill 1972).

Hay una amplia interacción entre el envasado por un lado y la distribución de la venta al detalle y al por mayor por el otro. Esto, junto con la creciente integración del envasado con el diseño del producto, la fabricación, el marketing y la distribución, implica que su desarrollo es vital para la dirección empresarial.

El envase de un producto, desde la perspectiva empresarial, se basa principalmente en cinco criterios. La *aparición* es el aspecto del envase más importante desde el auge de los supermercados. Identifica el producto en la cadena de distribución y especialmente cuando llega al consumidor – ya sea por su transparencia y/o por su etiquetado. Informa sobre su composición y sobre las instrucciones de uso, según sean los requerimientos legales, y sobre la marca y el nombre del fabricante. Además, puede ayudar a promover la venta.

La *protección* que ofrece varía en función del tipo de producto y del sistema de distribución. El envase actúa como protector del producto contra influencias perjudiciales como son: captación de agua, absorción de vapor de agua, desecación, penetración de aire, polvo y microorganismos, contaminación por insectos y por animales domésticos, y acción de la luz.

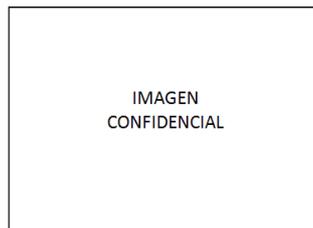
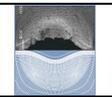


Imagen 2. Deformación de las paredes de la bandeja debido a acciones externas.

La *funcionalidad* del envase facilita el uso del producto, desde abrirlo hasta, en algunos casos, cocinarlo. El *coste* debe incluir el del transporte y el del almacenamiento de los envases vacío, el de su reutilización – así como el control de calidad de los envases devueltos para ello – y el de las pérdidas debidas a la rotura del envase. La finalidad del envase es que el producto llegue al consumidor en buen estado y al mínimo coste.



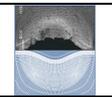
La *desechabilidad* del envase es el tema más polémico de todos. El uso de envases desechables contribuye a aumentar la contaminación ambiental y representa un gasto importante de los recursos del planeta. Algunos de los factores que contribuyen a aumentar la cantidad de basura formada por envases vacíos son la existencia de productos hiper-envueltos y la proliferación de envases sin retorno. En el caso de los primeros, el material de envasado podría reducirse haciendo un cambio de diseño, con lo que se gastarían menos recursos y se reduciría el coste de dicho envasado. En caso de los envases sin retorno es más delicado ya que al fabricante le resultan más económicos que los retornables.

Estos últimos no siempre se devuelven en buen estado, pues los consumidores le dan otra utilidad, porque se rompen o porque se almacenan en casa, suelen ser más pesados y más costosos que los no retornables, y además presentan gastos de acondicionamiento. Los fabricantes consideran que los envases sin retorno tienen cada vez mayor aceptación por parte de los compradores, ya que son más higiénicos y más cómodos porque son de un solo viaje. La tendencia actual indica que el consumo de envases alimentarios no retornables va en aumento, especialmente porque favorecen la economía de la industria alimentaria, aunque hay que tener en cuenta que su proliferación presenta el inconveniente de que aumenta el volumen de los vertidos y que las soluciones dadas hasta la fecha son insuficientes.

Historia del envase

La breve historia de la entrega y conservación de los alimentos sugiere que la primera función que tiene el envase es la de permitir que el comerciante adquiera el producto – si no lo fabrica él mismo – y que lo entregue a su cliente. Se trata de envolver los alimentos para evitar tocarlos directamente hasta llegar a casa. Esto va acompañado por el hecho de que el cliente se deja asesorar por el tendero: los productos de venta no están siempre a la vista, y el tendero sirve al cliente un producto determinado en función de la calidad o precio que éste le pida. El trato es diario y personal, ya que por lo general la gente compra siempre en el mismo establecimiento, que suele ser el que está más cerca de su casa.

Los envases alimentarios empiezan a transformarse cuando mejoran las vías de comunicación y las técnicas de conservación de alimentos. Estos deben estar preparados para poder ser transportados a mayores distancias que las habituales, con lo cual, transportes y envases encarecen el producto al mismo tiempo, a pesar de que en esta época de reconstrucción económica para la vida española no se puede permitir el desprenderse de los envases sin reutilizarlos. No sólo cambian los envases, que además deben ser más adecuados, sino que empiezan a utilizarse todo tipo de aditivos que permitan conservar los alimentos durante más tiempo. A estos factores hay que añadir el hecho de que esto supone un aumento de la variedad de alimentos disponibles, tanto a nivel geográfico como estacional.



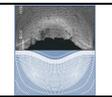
A finales de los años sesenta, un nuevo tipo de establecimientos empieza a surgir en las grandes ciudades españolas: el autoservicio y el supermercado, diferenciándose éste último por su mayor volumen de ventas. Todos los productos alimenticios están a la vista del cliente, y éste debe decidir si compra sin el consejo del tendero. Conscientes de ello, los fabricantes empiezan a utilizar envases que llamen la atención del cliente. Hacen mayores descuentos a los comerciantes si sitúan sus productos en lugares estratégicos del autoservicio o supermercado. Es aquí cuando la presentación del alimento cobra importancia y cuando comienza la función publicitaria del envase.

Esta función va a más cuando se supera el fracaso inicial de este tipo de establecimientos, que no sucede en los núcleos urbanos hasta principios de los años setenta. En esta época confluyen dos fenómenos importantes. En primer lugar, la entrada en una proporción ya apreciable de la mujer en el mundo laboral: cuando ésta empieza a trabajar fuera de casa, deja de disponer del tiempo que tenía anteriormente para hacer la compra diaria. En segundo lugar, la aparición en el mercado de las primeras neveras familiares, que permiten conservar durante más tiempo los alimentos o lo que es lo mismo, permiten comprar los alimentos en cantidades mayores.

Los supermercados son aceptados por las personas que ya se relacionan socialmente en su actividad laboral, y para quienes comprar no es más que un trámite. Por el contrario, hay personas para quienes la compra de alimentos es un buen momento para las relaciones sociales.

La competencia entre fabricantes del mismo ramo ya no es únicamente por la calidad del producto, sino por presentarlo en un envase que lo venda mejor. Aquí confluyen diversos factores: primero, la importante función publicitaria a la que se ha hecho referencia. Segundo, la evolución de los envases permite presentar los alimentos en paquetes de distintos formatos y que los fabricantes empiecen a jugar con el factor tamaño-peso: la apariencia del envase ya no es sólo por su colorido y por sus letras, sino por su tamaño que puede dar la sensación de mayor peso que el que tiene en realidad. Tercero, la introducción de los combinados de cartón y plástico sustituye a las antiguas latas retornables, que además de incorporar una mayor higiene, mejora la conservación de los alimentos.

Cuarto, así empieza la era de los envases desechables; la gente prefiere pagar un poco más y no tener que almacenar y cargar de vuelta al supermercado con los envases vacíos. Es el auge de las botellas de plástico, de los envases tetra-brik, que paulatinamente sustituyen a las pesadas botellas de cristal y de las bandejas para la contención de carne, pescado y frutas.



Definición del PS y del PET

El poliestireno (PS) y el polietileno-tereftalato (PET) son dos polímeros de uso generalizado en la industria alimentaria y representan dos de los siete plásticos estándares de mayor importancia junto con el polietileno de alta densidad (HDPE), el polietileno de baja densidad (LDPE), el polipropileno (PP), el policloruro de vinilo (PVC) y el etilvinilacetato (EVA).



Imagen 3. Códigos de identificación de resinas de plástico.

Por su parte, el PS, es un polímero termoplástico amorfo que se obtiene de la polimerización del estireno, que presenta las siguientes propiedades:

- Elevada claridad.
- Incoloro.
- Duro.
- Frágil, con baja resistencia a impacto.

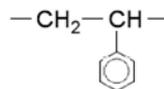


Imagen 4. Unidad de repetición del poliestireno.

La naturaleza amorfa y otras propiedades que se derivan de la estructura química aromática y una temperatura de transición vítrea (T_g) alrededor de 100°C le diferencian de otro tipo de poliolefinas como el polietileno.

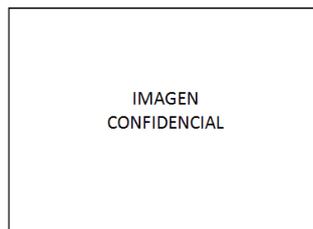
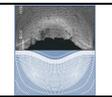


Imagen 5. Poliestireno Cristal 1160.



En algunos casos, para contrarrestar la fragilidad del PS cristal no orientado, se puede hacer reaccionar con las partículas de estireno, cauchos sintéticos de butadieno (en proporciones que varían entre un 5 y un 14%) durante la polimerización, para crear HIPS (*High Impact PS*).

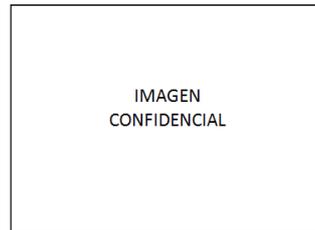


Imagen 6. HIPS.

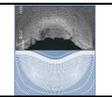
El PS y el HIPS se fabrican con aditivos diversos, los cuales incluyen antioxidantes, colorantes, agentes liberadores de molde, facilitando su procesado. Los antioxidantes, presentes generalmente en concentraciones por debajo del 1%, cuentan con valores en torno al 0,1%. Uno de los principales agentes liberadores de molde es el estearato de zinc, que se añade en bajas concentraciones y alrededor del 0,05%. Como agentes que facilitan el proceso se emplean aceites minerales blancos y promotores de flujo en concentraciones variables entre el 0,5 y el 6% en peso, con un valor promedio del 2%.

El HIPS presenta mayor resistencia al impacto que el PS cristal, pero es menor claro, lo que le vuelve translúcido u opaco, menos resistente a esfuerzos de tracción, pero presenta mayor resistencia al agrietamiento causado por los líquidos orgánicos, aceites y grasas. El HIPS se emplea para fabricar contenedores de productos lácteos como yogures, vasos dispensables de bebidas como café, té, chocolate, sopa, así como para la fabricación de contenedores de huevos.

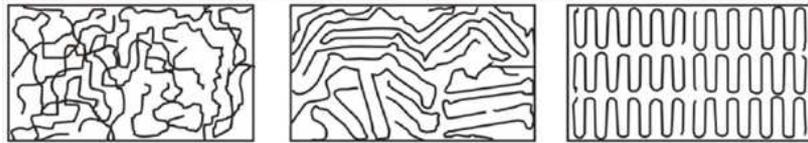
Algunos contenedores presentan estructuras multicapa, consistentes en una capa de HIPS entre capas de PS cristal (estructura tipo sándwich), que mejoran la apariencia externa del envase.

El PS y el HIPS presentan pobres propiedades barrera al vapor de agua y los gases como el oxígeno y el dióxido de carbono. Las propiedades físicas y el rendimiento del PS y el HIPS establecen limitaciones en su uso para aplicaciones alimentarias. A modo de ejemplo, no resisten altas temperaturas, y no pueden ser empleados para contener alimentos que necesiten ser calentados por encima de 80°C en microondas (para esto se emplea PP).

En los últimos años, PP ha sustituido al HIPS en muchas de las aplicaciones mencionadas anteriormente, pero en otras ha ocurrido el efecto inverso, debido a su facilidad de procesado y al bajo grado de contracción de los PS. Así mismo, cuando se hace necesario el calentamiento de los alimentos en hornos convencionales, el material de contención óptimo es el CPET.



Por su parte, el PET es un polímero termoplástico de cadena larga, perteneciente a la familia genérica de los poliésteres. El PET se forma desde el ácido tereftalático (TPA) y el glicoletileno (EG), ambos derivados del petróleo. En su forma más pura es un material amorfo.



Imágenes 7,8 y 9. Estructura amorfa (izquierda), semicristalina (centro) y cristalina (derecha).

Bajo la influencia directa de aditivos modificadores desarrolla cristalinidad, propiedad que puede ser también mediante tratamientos de calor de la mezcla polimérica.



Imagen 10. Unidad de repetición del PET.

Los poliésteres se crean por la reacción de ácidos bifuncionales y alcoholes, en presencia de un metal catalítico. La etapa clave en la polimerización se conoce como reacción de condensación, en la cual las moléculas reaccionan y liberan agua. A continuación, se lleva a cabo una segunda reacción de polimerización, que discurre en fase sólida. Cuando el TPA y el EG se calientan juntos, se produce una mezcla de monómero (BHET) y polímero de peso molecular bajo, que reacciona, elimina el exceso de EG y forma el PET. En este punto, el PET es un líquido viscoso que se extruye dando lugar a un material amorfo semejante al vidrio.

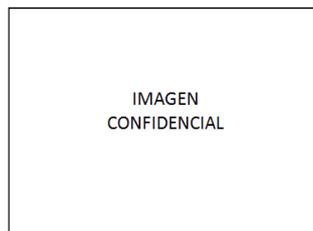
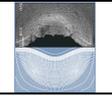


Imagen 11. PET virgen.

El PET de elevado peso molecular se crea en una segunda etapa de polimerización que se lleva a cabo en estado sólido a bajas temperaturas de forma que se eliminan todas las impurezas volátiles, tales como acetaldehídos, glicoles libres y agua. El elevado peso molecular es esencial para obtener buenas propiedades mecánicas como tenacidad y resistencia a la deformación, y al mismo tiempo, proporcionar la flexibilidad necesaria para resistir la rotura bajo tensión.

Una vez que el polímero se forma es muy difícil purificarlo y por esa razón la purificación de los materiales de partida son claves para conseguir el polímero con la calidad requerida para el envasado alimentario.



Para facilitar las reacciones, se emplean catalizadores en bajas concentraciones. El catalizador más común es el trióxido de antimonio, pero también se emplean pequeñas cantidades de sales de titanio, germanio, cobalto, magnesio, manganeso y zinc que permanecen retenidas en la matriz polimérica.

En la década de los cincuenta el PET fue desarrollado como un film. En primera instancia fue empleado para películas de video, fotográficas y de rayos-x, así como usos en envase flexible. Posteriormente el PET fue modificado para su uso en moldes de inyección y artículos extruidos, en un inicio reforzados con fibra de vidrio. En la década de los setenta el PET fue empleado en técnicas de moldeo por soplado, dando lugar a estructuras dimensionales triorientadas, iniciándose la rápida explotación/aprovechamiento del PET como un material ligero, duro e irrompible (contraposición con la botella de vidrio).

El PET cuenta con interesantes propiedades físicas, presentando su temperatura de transición vítrea (T_g) a los 72°C. El PET cristaliza de dos formas diferenciadas; la primera de ellas es debida a la temperatura, donde una vez rebasada su T_g , si se deja enfriar se vuelve opaco, de modo que puede resistir temperaturas de hasta 240°C. En este estado cristalino, se vuelve duro, frágil y muy resistente a elevada temperatura, y se conoce comúnmente bajo el nombre de CPET.

La segunda forma de obtener PET cristalino es mediante el estiramiento de su estructura en dos dimensiones. A diferencia de la anterior forma de cristalización descrita, no se vuelve opaco, de modo que es posible obtener un PET cristalino, que resiste elevadas temperaturas, pero que presenta la limitación de que no es posible obtener productos de espesor superior a las 100 micras, por lo que su uso queda limitado a la producción de films.

Dentro de la industria del envasado alimentario, se distinguen tres áreas fundamentales de aplicación del PET:

- Contenedores (botellas, frascos y cubas). Generalmente se elaboran mediante procesos de moldeo por inyección.
- Lámina semirrígida para termoformado (bandejas y blísteres).
- Films orientados de pequeño espesor (bolsas y envoltorios de aperitivos). Son inertes químicamente y presentan buenas propiedades barrera.

Mediante la coinyección, la coextrusión, la laminación y las tecnologías de coating el PET se puede combinar con otros plásticos para aumentar sus aplicaciones, destacando la obtención de mayor protección frente al oxígeno y la humedad, previniendo de este modo la ranciedad y otras pérdidas de sabor en los alimentos.

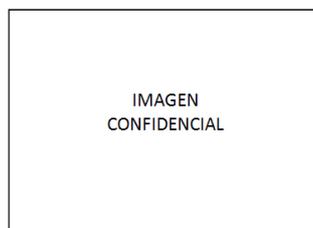
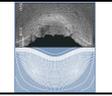


Imagen 12. Bandeja bicolor coextruida.



Descripción del proceso de fabricación de bandejas de PET

El proceso de fabricación de las bandejas de PET, puede resumirse en los siguientes puntos:

- Secado del material.
- Extrusión de la lámina de PET.
- Termoformado de la lámina de PET.

Secado del material

El PET es un material higroscópico, de modo que la grana de material almacenada absorbe humedad del medio ambiente con suma facilidad. Dependiendo de las condiciones de su almacenado, el valor de la humedad puede alcanzar el 0,6% en peso, pero en la práctica, el polímero no absorbe niveles de humedad mayores al 0,2%.

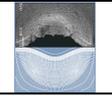
En el caso del PET, la humedad contenida no sólo se encuentra en su superficie, sino que alcanza su interior debido al fenómeno de difusión. El secado del material constituye una vía para eliminar dicho contenido de humedad, proceso que requiere tiempos de secado relativamente largos a elevadas temperaturas. En la práctica, las mejores condiciones de secado se alcanzan entre 165°C y 170°C y un tiempo de residencia entre 4 y 6 horas.

Hay que tener en consideración que a temperaturas superiores a las del punto de fusión, el agua presente en el PET hidroliza rápidamente el polímero, reduciendo su peso molecular y variando sus propiedades. Por este motivo, una de las condiciones necesarias para fabricar una buena lámina de PET, y consecuentemente, obtener una buena bandeja de PET, es reducir el contenido de humedad a porcentajes menores del 0,004% (40 ppm) antes de iniciar el procesado del material.

Extrusión

En una definición amplia el proceso de extrusión hace referencia a cualquier operación de transformación en la que un material fundido es forzado a atravesar una boquilla para producir un artículo de sección transversal constante, y en principio, longitud indefinida.

En el proceso de extrusión, por lo general, el polímero se alimenta en forma sólida, y sale de la extrusora en estado fundido. En algunas ocasiones el polímero se puede alimentar fundido, procedente de un reactor, actuando en éste caso la extrusora a modo de bomba, proporcionando la presión necesaria para hacer pasar al polímero a través de la boquilla.



Retomando la descripción del caso más habitual, la extrusora realiza las siguientes funciones:

- Transporte del material sólido hacia la zona de fusión.
- Fusión o plastificación del material.
- Transporte o bombeo y presurización del fundido.
- Mezclado.
- Desgasificado.
- Conformado.

Componentes de la extrusora

El tornillo de extrusión

El tornillo o husillo consiste en un cilindro largo que se encuentra rodeado de un filete helicoidal. El tornillo constituye una de las partes más importantes ya que contribuye a realizar las funciones de transportar, calentar, fundir y mezclar el material.

La estabilidad del proceso y la calidad del producto que se obtiene dependen en gran medida del diseño del tornillo. Los parámetros más importantes en el diseño del tornillo son la longitud (L), el diámetro (D), el ángulo del filete (θ) y el paso de rosca (w).

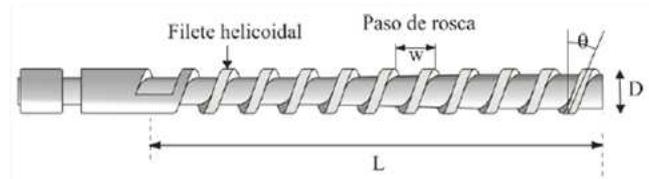


Imagen 13. Parámetros más importantes en el diseño de un tornillo de extrusión.

El material se va presurizando a medida que avanza por el tornillo, comenzando con presión atmosférica en la tolva y aumentando hasta la salida por la boquilla. La sección de paso del tornillo no es constante, si no que es mayor en la zona de alimentación (mayor profundidad de canal). Normalmente el tornillo no viene acompañado de ningún sistema de calentamiento o enfriamiento, aunque en algunos casos se emplean tornillos huecos por los que se hace circular un fluido refrigerante o calefactor.

Los materiales termoplásticos que se usan en el proceso de extrusión difieren notablemente entre sí. La elasticidad, calor específico, coeficiente de fricción, temperatura de fusión, etc, cubren un amplio rango de valores, y puesto que todas las propiedades tienen su importancia en el momento de diseñar el tornillo, es lógico que sea necesario utilizar diferentes tipos de tornillos para trabajar adecuadamente cada material. En la práctica es muy raro que un tornillo determinado sea adecuado para trabajar con materiales muy diversos, de hecho, cada tornillo se diseña o elige para trabajar con una determinada combinación boquilla/material.

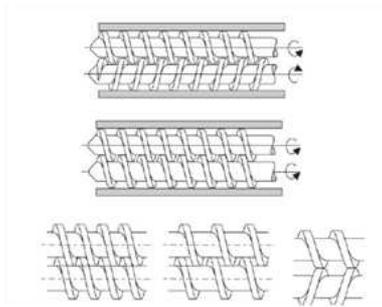
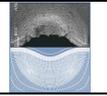


Imagen 14. Disposición de husillos en extrusoras de doble husillo.

Cilindro

El cilindro de calefacción alberga en su interior al tornillo, como puede apreciarse en la imagen siguiente:

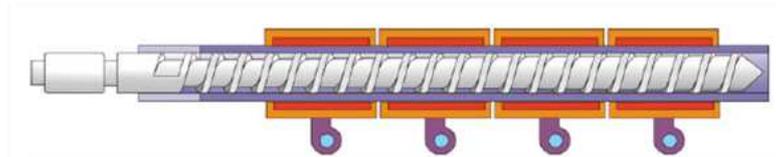


Imagen 15. Cilindro de calefacción con tornillo en su interior.

La superficie del cilindro debe lo más lisa posible para aumentar las fuerzas de cizalla que soportará el material y permitir así que éste fluya a lo largo de la extrusora. Para evitar la corrosión y el desgaste mecánico, el cilindro suele construirse en aceros muy resistentes y en algunos casos viene equipado con un revestimiento bimetálico que le confiere una elevada resistencia, en la mayoría de los casos superior a la del tornillo, ya que éste es mucho más fácil de reemplazar.

El cilindro por lo general posee sistemas de transferencia de calor. El calentamiento se puede realizar mediante resistencias eléctricas circulares localizadas en toda su longitud, y también, aunque menos usual, mediante radiación o encamisado con fluidos refrigerantes o calefactores. El cilindro suele dividirse en varias zonas de calefacción, al menos tres, con control independiente en cada una de ellas, lo que permite conseguir un gradiente de temperatura razonable desde la tolva hasta la boquilla.

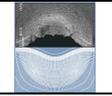


IMAGEN
CONFIDENCIAL

Imagen 16. Zonas de calefacción del cilindro de extrusión.

El cilindro debe enfriarse si como consecuencia de la generación interna de calor originada por la cizalla a la que se ve sometido el plástico se rebasa la temperatura nominal del proceso. El enfriamiento en la menor parte de las ocasiones se hace con líquidos, ya que aunque tengan mayor capacidad para eliminar calor al aire, la temperatura es más difícil de controlar, por lo que se hace conveniente el empleo de soplante. Hay que tener en cuenta que los sensores de control de temperatura quedan situados en el cilindro, por lo que la temperatura del material será siempre superior a la que indican los controles.

Garganta de alimentación

El cilindro puede estar constituido en dos partes, la primera se sitúa debajo de la tolva y se denomina garganta de alimentación. Suele estar provista de un sistema de refrigeración para mantener la temperatura de esta zona lo suficientemente baja para que las partículas de grana no se adhieran a las paredes internas de la extrusora.

La garganta de alimentación está conectada con la tolva a través de la boquilla de entrada o alimentación. Esta boquilla suele tener una longitud 1,5 veces el diámetro del cilindro y una anchura 0,7 veces el mismo, y suele estar desplazada del eje del tornillo para facilitar la caída del material a la máquina.

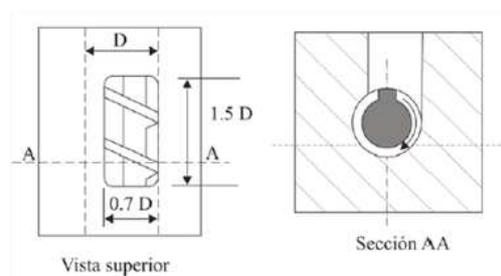
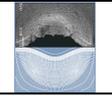


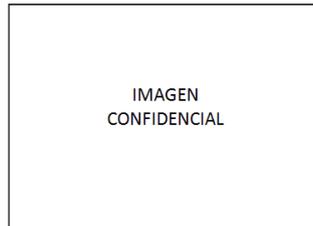
Imagen 17. Garganta de alimentación.



Tolva

La tolva es el contenedor que se utiliza para introducir el material en la máquina. Tolva, garganta de alimentación y boquilla de entrada deben estar ensambladas perfectamente y diseñadas de manera que proporcionen un flujo constante de material.

En ocasiones, para asegurar un flujo de material constante, se emplean dispositivos de vibración, agitadores e incluso tornillos, como se muestra en la imagen siguiente:



Imágenes 18 y 19. Representación del tornillo de alimentación (izquierda) y alimentación del material (derecha).

Plato rompedor y filtros

El plato rompedor se encuentra al final del cilindro. Se trata de un disco delgado de metal con agujeros, cuya forma puede apreciarse en la imagen siguiente:

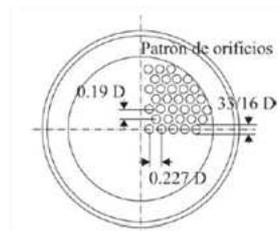
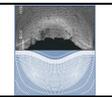


Imagen 20. Plato rompedor.

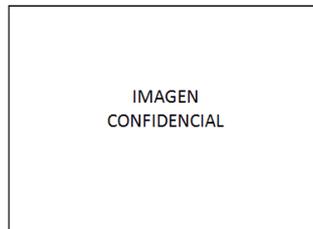
El propósito del plato es servir de soporte a un paquete de filtros cuyo fin principal es atrapar los contaminantes para que no salgan con el producto extruido. Los filtros además mejoran el mezclado y homogenizan el fundido.

Los filtros van apilados delante del plato rompedor y primero se sitúan los de malla más ancha, reduciéndose el tamaño de malla progresivamente. Detrás se sitúa un último filtro también de malla ancha y finalmente el plato rompedor que soporta los filtros.

Conforme se saturan las mallas, es necesario sustituirlas para evitar una caída de presión excesiva que disminuya la producción. Por ello, el diseño del plato debe ser tal que pueda ser reemplazado con facilidad.



En los últimos años se ha experimentado una evolución notable en este apartado, apareciendo los denominados cambiadores continuos y los cambiadores con limpieza de malla, cuyo control automático facilita el control constante de la presión.



Imágenes 21, 22 y 23. Cambiadores discontinuos (izquierda), continuos (centro) y con limpieza de malla (derecha).

Cabezal y boquilla

El cabezal es la pieza situada al final del cilindro, que se encuentra sujetando la boquilla y por lo general manteniendo el plato rompedor. De forma habitual, va atornillado al cilindro.

El perfil interno del cabezal debe facilitar en la medida de lo posible el flujo del material hacia la boquilla.

La función de la boquilla es la de moldear el plástico. Para la extrusión de lámina de PET se emplean boquillas planas, como la que se aprecia en la imagen siguiente:

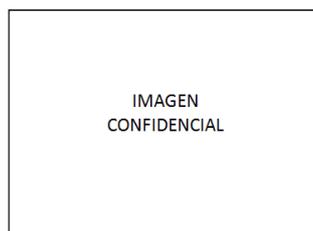
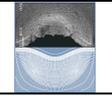


Imagen 24. Detalle de boquilla plana.

Desgasificado

El desgasificado es necesario sólo en los plásticos que retienen gran cantidad de componentes volátiles o materiales muy higroscópicos, como es el caso del PET.

Los materiales que presentan humedades de equilibrio muy elevadas, es posible secarlos antes de introducirlos en la extrusora, si bien el proceso de secado es lento (puede durar entre 4 y 40 horas), por lo que se suelen degasificar directamente en la extrusora, de forma mucho más rápida.



El desgasificado se produce a través de un orificio de venteo practicado sobre el cilindro. Las extrusoras con zona de desgasificado, deben tener un diseño especial del tornillo, que asegure que la presión en esta zona coincida con la presión atmosférica, de forma que el material no tienda a escapar por el orificio de venteo. En estas extrusoras los gránulos de sólido atraviesan las zonas de alimentación y transición donde son aglomerados, transportados y fundidos.

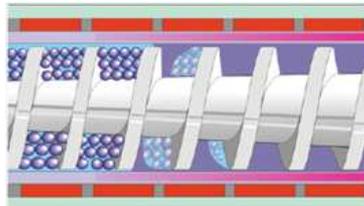


Imagen 25. Transporte de la mezcla polimérica en el tornillo.

A continuación pasan a una zona de descompresión en la que los productos volátiles son evacuados a través del orificio de venteo. El material fundido y desgasificado se vuelve a comprimir en una nueva zona de transición, como se muestra en la figura siguiente:

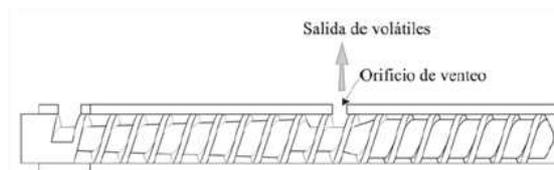


Imagen 26. Extrusora con sección de desgasificado.

Equipos auxiliares

Para fabricar un producto extruido, además de una extrusora se necesitan una serie de equipos auxiliares, que en algunos casos son comunes a todas las líneas de extrusión y en otros son característicos de un producto concreto. En general, todas las líneas constan de unidades de refrigeración, calibrado, tensionado, recogida y corte.

Cuando el material fundido sale de la extrusora debe enfriarse inmediatamente para que conserve la forma y adquiera la rigidez necesaria. Para ello es necesario un sistema de enfriamiento. Sea cual sea el elegido, el enfriamiento debe ser lo más uniforme posible a lo largo de toda la sección de la pieza, y en ocasiones también gradual, de modo que no existan gradientes de temperaturas importantes en puntos cercanos de material. En el caso de las láminas de PET, el enfriamiento se suele hacer empleando rodillos metálicos fríos, por los cuales en su interior circula un fluido refrigerante.

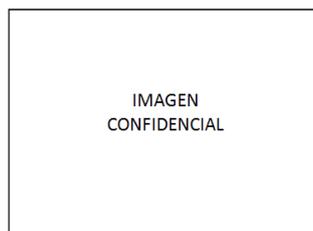
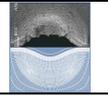


Imagen 27. Salida del material por la boquilla.



Cuando la tolerancia de las dimensiones de las piezas es pequeña debe existir un sistema de calibrado que determine el espesor en el caso de piezas planas. Generalmente estas mediciones se realizan mediante equipos de ultrasonidos ó láser.

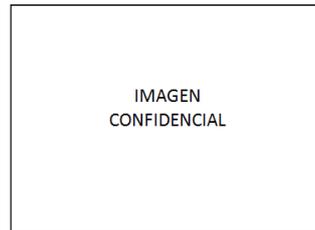


Imagen 28. Sistema de medida sobre la lámina extruida.

El equipo de tensionado y recogida determina la velocidad lineal que el material debe ser extruido. Hasta cierto punto el espesor del producto extruido depende de la relación entre el caudal del material extruido y la velocidad de recogida. El estiramiento o tensionado provocado por el equipo de recogida sirve en ocasiones para mejorar determinadas propiedades mecánicas del producto en la dirección de estirado.

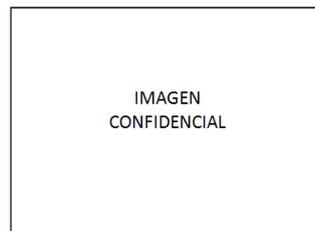
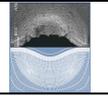


Imagen 29. Bobinado de la lámina de PET.



El equipo de corte consiste en cuchillas estacionarias si la velocidad de extrusión es suficientemente baja o el material es flexible, o en cuchillas transportables, o en el caso de materiales suficientemente rígidos, de tipo guillotina.

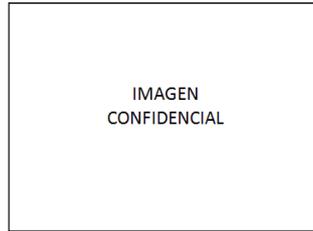


Imagen 30. Sistema de corte de la lámina de PET.

Recubrimientos

Los requerimientos de muchos productos, generalmente en aplicaciones para envases, son tales que no se puede emplear un único material, si no que deben combinarse dos o más materiales.

Laminado

Se recurre a este tipo de recubrimiento cuando el producto obtenido debe presentar buenas propiedades barrera (permeabilidad a los gases), resistencia química, una determinada apariencia, etc.

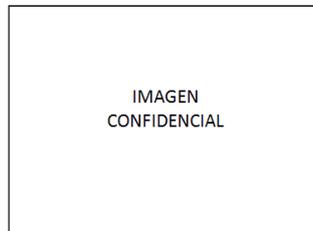
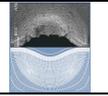


Imagen 31. Unión de film y lámina de PET.



Coextrusión

La coextrusión consiste en combinar dos o más materiales haciéndolos pasar por una boquilla de extrusión. Cada material se procesa en una extrusora diferente, compartiendo todas las extrusoras la misma boquilla.

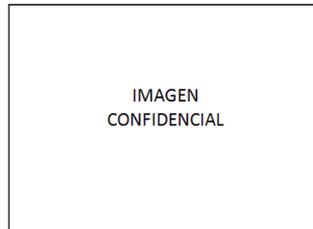
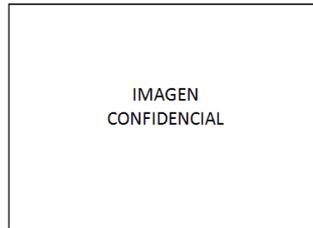


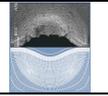
Imagen 32. Ejemplo de boquilla multiconducto.

Recubrimientos (coatings)

Sobre una lámina extruida se deposita una capa de material proveniente de otra extrusora, que se adhiera a la primera mediante el empleo de temperatura y/o presión.



Imágenes 33 y 34. Diferentes representaciones esquemáticas de recubrimientos.



Termoformado:

El proceso de termoformado consiste en convertir una lámina plana a una forma contorneada, de modo que se calienta la lámina hasta la temperatura óptima para su formado (cuando se supera el punto de reblandecimiento del material) y se estira con ayuda de presión y aire, forzando al material a adoptar la forma del molde.

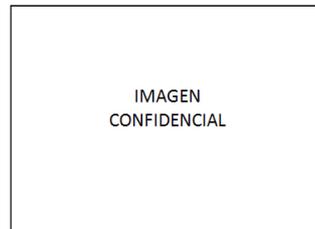


Imagen 35. Vista de una de las líneas de termoformado de PET de Linpac Packaging Pravia.

El proceso de termoformado es muy versátil, pudiendo obtenerse formas muy variadas, pero debe tenerse en cuenta que es un proceso complejo, ya que un calentamiento desigual de la lámina puede ocasionar un reparto desigual de material, lo que implica una deficiencia en el espesor, que lleva aparejado una zona de debilidad en la bandeja.

A pesar de que existen gran variedad de procesos de termoformado, en el caso del PET se realiza únicamente con moldes hembra, ayudando a obtener la forma del molde mediante vacío y aire.

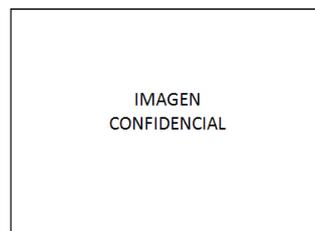


Imagen 36. Proceso de termoformado de lámina de PET mediante vacío.

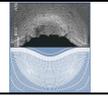


IMAGEN
CONFIDENCIAL

Imagen 37. Proceso de termoformado de lámina de PET mediante presión y vacío.

Partes de la línea de termoformado:

Sujeción del bastidor:

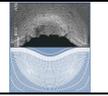
Es el encargado de sujetar la lámina mientras se calienta.

Hornos formadores:

Son las cámaras que proporcionan el calor necesario para reblandecer la lámina. Constan generalmente de una estación superior y otra inferior, con abertura en forma de bisagra, de modo que la lámina de PET discurre entre ellos.

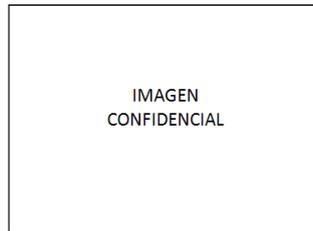
IMAGEN
CONFIDENCIAL

Imagen 38. Zona del horno de la termoformadora.



Molde:

Es el encargado de reproducir la forma de bandeja deseada.



Imágenes 39 y 40. Zona de moldeo de la termoformadora. Molde cerrado (izquierda) y abierto (derecha).

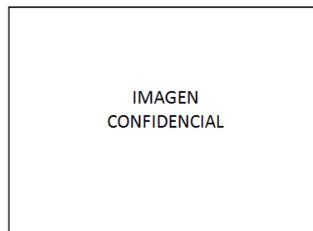


Imagen 41. Bandejas termoformadas a la salida de la zona de moldeo.

Troquel:

Es el encargado del corte de la bandeja, separándola de esta manera de la lámina inicial.

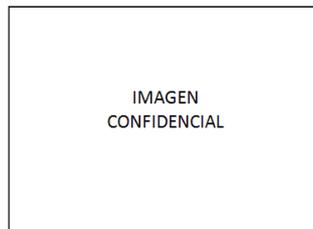


Imagen 42. Salida de las bandejas después de su troquelado.

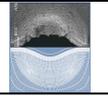
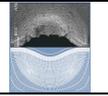


IMAGEN
CONFIDENCIAL

Imagen 43. Bandejas de PET dispuestas en los lineales de una gran superficie.

Se hace necesario mencionar el elevado grado de reciclabilidad que presentan los distintos materiales empleados en la fabricación de las bandejas de PET, por lo que durante los procesos de extrusión y termoformado, las bobinas que no presentan los requerimientos necesarios para su posterior termoformado, así como los rebordes de lámina que resultan del troquelado de la misma en el momento de obtener el producto final, son objeto de molienda y reciclado, de forma que se consigue un material reciclado de forma interna, que se emplea en posteriores ocasiones como aditivo reciclado en el proceso de extrusión, y que supone un importante ahorro económico para el proceso.



Descripción del proceso de fabricación de bandejas de PS

El proceso de fabricación de bandejas de PS comprende las siguientes etapas:

- Extrusión de la lámina de PS.
- Curado de la lámina de PS.
- Termoformado de la lámina de PS.

Extrusión

Un gas, denominado agente espumante, se disuelve en una mezcla de PS, agente nucleante y aditivos de forma continua, a elevada temperatura y presión, por el paso de éstos a través del tornillo sin-fin de la extrusora. La mezcla fundida se enfría para aumentar su viscosidad y su resistencia, y posteriormente, se hace salir al exterior forzándola al paso a través de la boquilla, con una separación muy reducida, hasta alcanzar la presión atmosférica.

El gas forma burbujas, llamadas celdas, en aquellos lugares donde el agente nucleante se ha situado. De ésta forma, la cantidad de agente nucleante junto con el perfil de temperaturas de la línea de extrusión, constituyen los factores principales para controlar el número de celdas de la espuma, así como su tamaño.

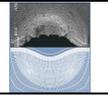
Cuando la mezcla fundida sale por la boquilla de la extrusora, se sopla aire frío sobre su superficie (tanto externa como interna), con el objetivo de formar una fina capa de espuma densa que se denomina piel. Esta piel, que mejora el aspecto visual de la lámina, proporciona una resistencia superficial añadida.

La lámina extruida se estira en tres dimensiones:

- Transversal, por efecto del paso de la espuma a través del mandril.
- Máquina, por efecto de los rodillos tractores (*Pull-Roll*).
- En dirección del espesor, por efecto del agente espumante.

Estas deformaciones, junto con la temperatura a la que se produce esa deformación, originan una serie de tensiones en la lámina de PS denominadas orientación.

La lámina se enfría (gracias al paso a través del mandril y el anillo de aire), por lo que se fijan sus dimensiones finales, se estira de manera constante y se recoge en forma de bobina para facilitar su manipulación y almacenamiento.



La principal característica del proceso de extrusión es que se consigue aumentar el espesor del producto, sin aumentar su peso, lo que se traduce en un aumento de la rigidez sin incremento alguno en el coste de la materia prima.

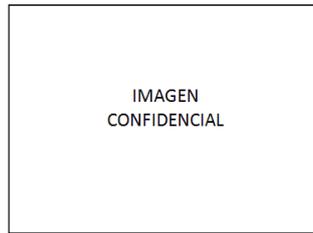


Imagen 44. Espumado de material plástico.

La extrusión puede hacerse en extrusoras de un único husillo, extrusoras con venteo o extrusoras tándem, siendo estas últimas las más comúnmente empleadas.

Extrusora monohusillo:

Consta esencialmente de un cilindro de calefacción con un tornillo en su interior, cuyo control se efectúa mediante un motor. El tornillo alimenta de material a la unidad, facilita la mezcla de los componentes y hace que la mezcla polimérica avance y se presurice.

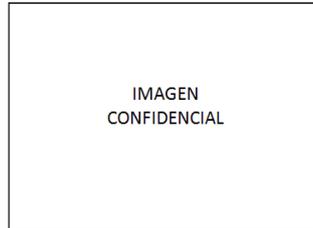
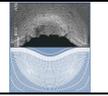


Imagen 45. Representación esquemática de sistema de extrusión.

El paso y el diámetro del tornillo permanecen generalmente constantes a lo largo de toda la longitud, variándose la profundidad de los filetes, de forma que pueden considerarse 3 zonas diferenciadas para llevar a cabo las funciones descritas anteriormente.

En la zona de alimentación del material, se tiene la máxima profundidad, pues la densidad del material en este estado es la menor. En esta zona la grana se introduce en el cilindro de calefacción y se precalienta. Parte del calor proviene de los calentadores, pero la mayor parte proviene de la fricción que se ocasiona en la compresión.



En la zona de mezcla, la profundidad de los filetes se reduce progresivamente. Esto favorece la compresión de la granza contra las paredes del cilindro de calefacción, posibilitando la mezcla del fundido.

La zona final se conoce como zona de dosificación. La profundidad es superficial y constante, y el polímero restante se mezcla y presuriza hasta las condiciones requeridas en la salida.

Extrusoras con venteo

Al final de la primera sección de dosificación, la profundidad del canal aumenta notablemente. De esta forma, la mezcla polimérica no rellena el canal por lo que puede alojarse una zona de venteo. En esta zona sin presión, facilita que el gas y la humedad sean eliminados de la mezcla polimérica.

Una segunda zona de transición, denominada formalmente zona de dosificación, recomprime la mezcla y acondiciona la presión hasta la zona de la boquilla.

Extrusoras tándem:

Son el resultado del acople de dos tornillos en serie.

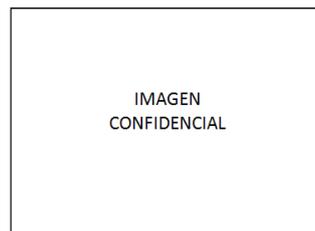


Imagen 46. Representación esquemática d sistema de extrusión tándem.

En una extrusora tipo tándem, se distinguen las siguientes partes:

i) Extrusora primaria:

La extrusora primaria tiene las siguientes funciones:

- Alimentación del material a lo largo de la línea de extrusión.
- Fusión y presurización del material.
- Inyección y mezcla del agente espumante.
- Fijar el output de la máquina.

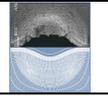


IMAGEN
CONFIDENCIAL

Imagen 47. Tornillo y zonas de la extrusora primaria.

ii) Extrusora secundaria:

La extrusora secundaria tiene las principales funciones de enfriar y acondicionar el material. La extrusora secundaria presenta siempre mayor diámetro que la primaria, lo que hace que el material fluya por la boquilla de forma más sencilla.

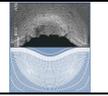
IMAGEN
CONFIDENCIAL

Imagen 48. Tornillo y zonas de la extrusora secundaria.

Dependiendo de las condiciones de temperatura y presión empleadas en las extrusoras primaria y secundaria, valores que pueden oscilar dependiendo del modelo de extrusora empleado, se obtienen láminas con características diferentes.

IMAGEN
CONFIDENCIAL

Imágenes 49 y 50. Micrografías obtenidas mediante MEB de estructura de celda cerrada (izquierda) y celda abierta (derecha).



iii) Boquilla:

De forma circular, tiene la función de presentar el fundido en el mandril de forma que se obtengan las mejores propiedades en la lámina.

Consta de 2 coronas, la externa, que permanece fija, y la interna, que es móvil, a través de las cuales pasa el material fundido. Desplazando la corona interior de forma adecuada se actúa sobre el peso y el espesor de la lámina.

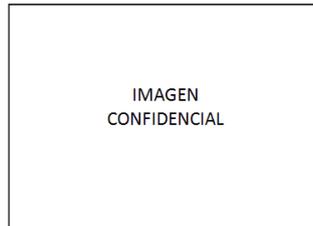


Imagen 51. Movimiento de los labios de la boquilla.

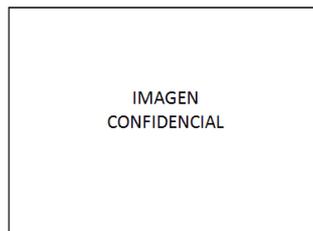
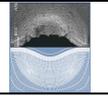


Imagen 52. Salida del material por la boquilla hacia el mandril.



iv) Mandril:

Es el encargado de fijar el ancho de la lámina, así como de liberar calor de la lámina espumada. Adicionalmente y acoplado a él, se dispone de un sistema de corte para producir 2 ó más láminas de forma simultánea.

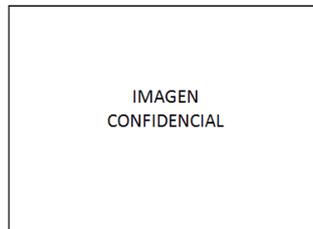


Imagen 53. Mandriles de la línea de extrusión número 3 de Linpac Packaging Pravia.

v) Rodillos tractores (*Pull – Roll*):

Proporciona una velocidad de arrastre constante en la lámina, determinando el peso básico de la lámina para un determinado output.

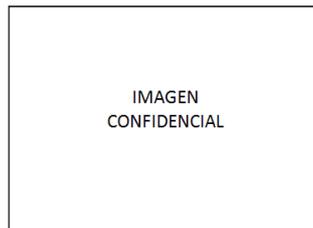
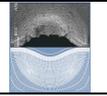


Imagen 54. Pull-roll de la línea número 1 de Linpac Packaging Pravia.



vi) Bobinadores:

Aplican la fuerza necesaria para mantener la tensión de bobinado constante. No ejercen influencia sobre el peso básico de la lámina. Su función es almacenar/recoger de la forma más sencilla posible la lámina extruída.

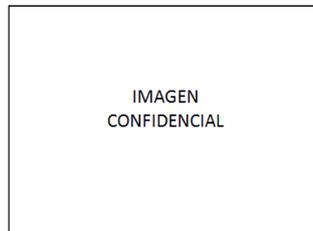


Imagen 55. Bobinador.

El producto resultante del proceso de extrusión es la lámina de PS.

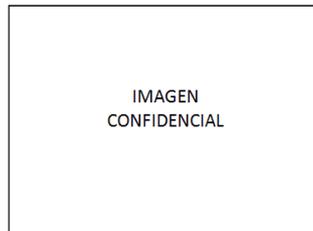
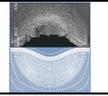


Imagen 56. Diferentes láminas de PS.



Almacenamiento de las bobinas de PS. Tiempo de curado:

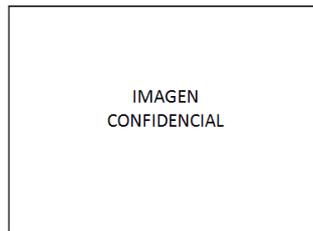


Gráfico 1. Representación gráfica del tiempo de curado.

El gráfico anterior muestra cómo la presión dentro de las celdas de la espuma cambia con el paso del tiempo. De este modo, pueden diferenciarse las siguientes etapas:

❖ Etapa 1

En los primeros minutos después de la extrusión, el agente espumante en las celdas se enfría y su presión desciende por debajo de una atmósfera.

En este punto, las celdas únicamente contienen agente espumante.

Mientras que la presión en las celdas sea baja ó haya vacío en ellas, no es posible llevar a cabo la operación de termoformado.

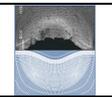
❖ Etapa 2

Las paredes de las celdas son permeables al aire y al agente espumante. Se produce la entrada de aire y la salida del agente nucleante en las celdas de la espuma. La entrada de aire se produce de forma más rápida que la salida del gas.

Después de unos días de envejecimiento (curado), la presión de aire y de gas dentro de las celdas es mayor que la presión atmosférica. Esto hecho marca el momento óptimo para el termoformado.

❖ Etapa 3

El agente espumante sale por completo de las celdas de la espuma, quedando una pequeña cantidad del mismo disuelto en las paredes de las celdas.



Termoformado

El termoformado consiste en el calentamiento de la lámina de PS en un horno, formado por una serie de resistencias dispuestas de forma determinada para optimizar el reparto de calor, hecho que origina que la lámina se vuelva deformable y aumente su espesor (expanda).

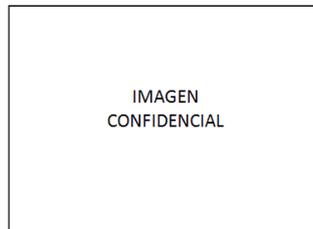


Imagen 57. Visión general del proceso de termoformado.

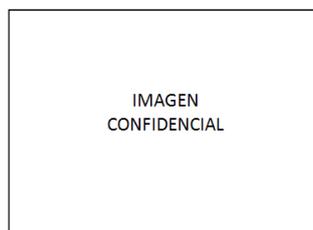


Imagen 58. Disposición de las resistencias en el horno de la termoformadora.

A continuación, la lámina caliente, se fuerza al paso por una determinada forma, empleando para ello moldes macho y hembra, generalmente confeccionados a partir de materiales metálicos de reducido peso, que debidamente refrigerados, evitan que la lámina se pegue a ellos y hacen que se enfríe, adoptando la forma de bandeja deseada.

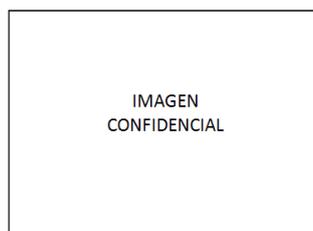
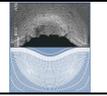


Imagen 59. Paso de las bandejas termoformadas del molde al troquel.

El espesor de la lámina expandida, después del horno de la termoformadora, debe ser tal que se rellenen todas las partes del molde. Para obtener el espesor final deseado, la lámina extruida debe tener el espesor correcto, la correcta post-expansión y la correcta orientación.

La cantidad de calor que es necesaria suministrar para obtener la expansión óptima, es aquella que consiga reblandecer el centro y la superficie externa de la lámina. La temperatura del polímero debe ser mayor que la del punto de reblandecimiento, pero menor que la que causaría el colapso de las celdas (lo que coloquialmente se conoce como el quemado de la lámina).

La cantidad de calor queda determinada por la temperatura del horno y el tiempo de calentamiento, el cual se determina por el tiempo de ciclo y la longitud del horno.



En el último paso del proceso, se procede al troquelado de la lámina para obtener las bandejas, separadas de la lámina.

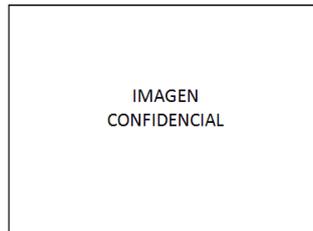


Imagen 60. Bandejas de PS saliendo por el lineal de la termoformadora nº10 de Linpac Packaging Pravia.

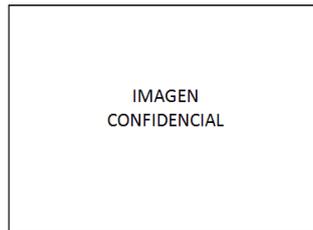
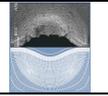
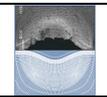


Imagen 61. Bandejas de PS dispuestas en los lineales de una gran superficie.



Se hace necesario mencionar el elevado grado de reciclabilidad que presentan los distintos materiales empleados en la fabricación de las bandejas de PS, por lo que durante los procesos de extrusión y termoformado, las bobinas que no presentan los requerimientos necesarios para su posterior termoformado, así como los rebordes de lámina que resultan del troquelado de la misma en el momento de obtener el producto final, son objeto de molienda y reciclado, de forma que se consigue un material reciclado de forma interna, que se emplea en posteriores ocasiones como aditivo reciclado en el proceso de extrusión, y que supone un importante ahorro económico para el proceso.



Análisis de mercado

El PS y el PET constituyen dos de los diez plásticos más comúnmente demandados, comportamiento que puede apreciarse en el gráfico que se adjunta a continuación:

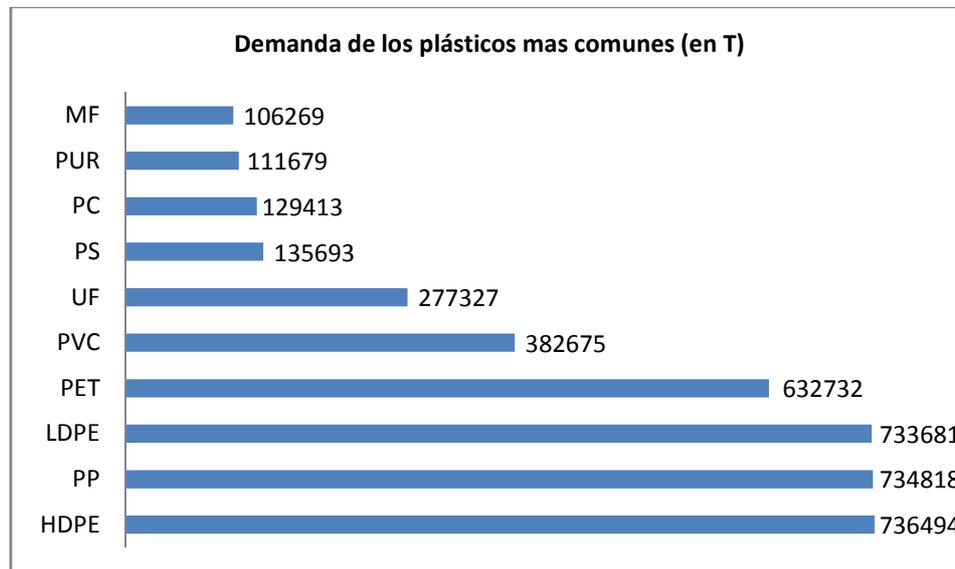


Gráfico 2. Relación de los plásticos más demandados.

El sector que más plásticos demanda es la industria del envasado. Este hecho queda perfectamente descrito en el gráfico que se presenta a continuación.

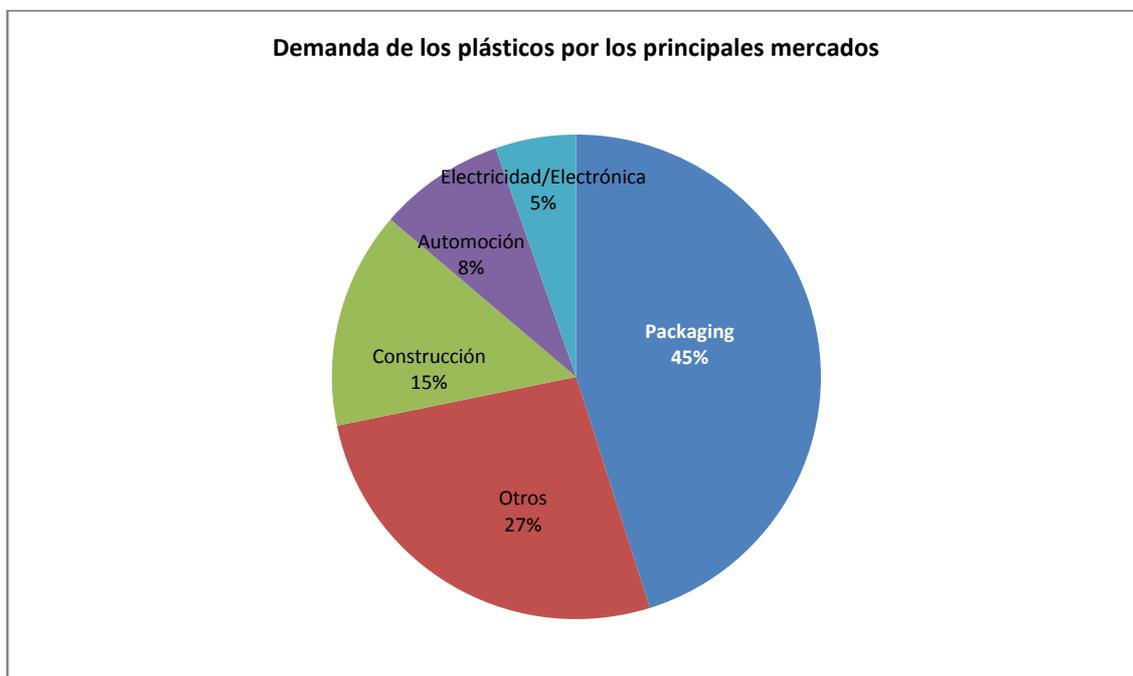
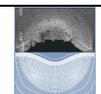
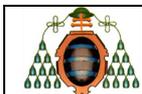


Gráfico 3. Demanda de plásticos por sectores.



Dentro del sector del envasado, la producción de bandejas ha descendido de forma notable entre los años 2007 y 2010, situación que mejora en 2011, como muestra el gráfico siguiente:

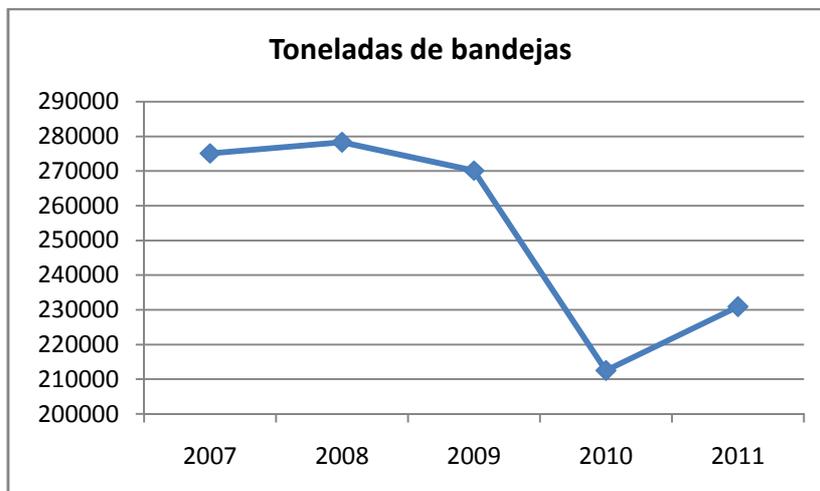


Gráfico 4. Evolución de la producción de bandejas entre 2007 y 2011.

A continuación, se analiza la situación del mercado de los plásticos incluidos en el presente proyecto, durante los años 2007 a 2011.

PS

Tabla 1. PS.

	En toneladas					En miles de euros				
	2007	2008	2009	2010	2011	2007	2008	2009	2010	2011
<i>Producción</i>	194661	176174	178752	140006	153231	226419	201273	156820	155560	190658
<i>Exportación</i>	102851	99241	99855	100119	110877	129080	124540	95900	130310	155810
<i>Importación</i>	144216	118198	112481	118096	93338	175240	130570	105510	142100	136450
<i>Consumo aparente</i>	236026	190130	191378	157984	135693	272629	207308	166430	167350	171298

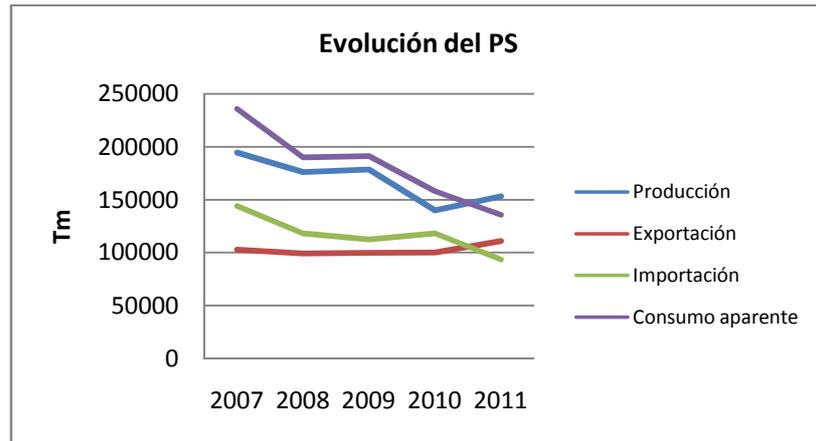


Gráfico 5. Evolución del PS (en toneladas).

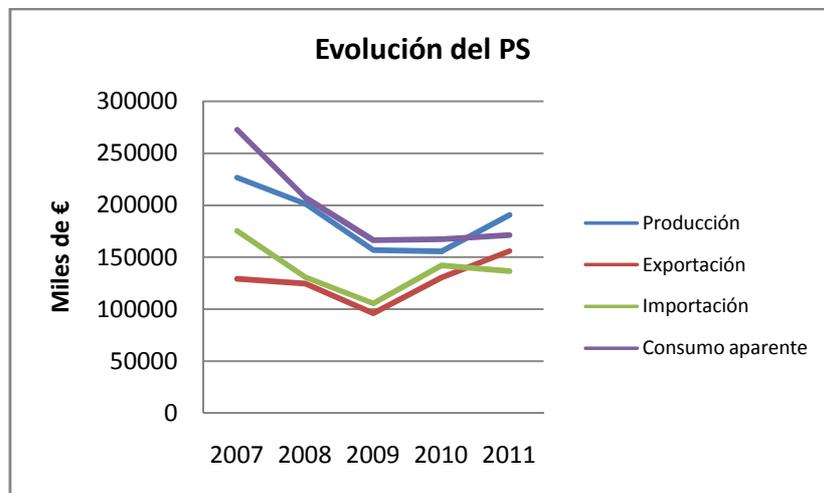


Gráfico 6. Evolución del PS (en miles de euros).

Los datos indican una disminución en la producción y el consumo de PS.



EPS

Tabla 2. EPS.

	En toneladas					En miles de euros				
	2007	2008	2009	2010	2011	2007	2008	2009	2010	2011
Producción	65165	59961	41521	27179	28363	90126	72705	38227	36707	41389
Exportación	18275	23841	16814	11139	14815	28190	53310	20310	17750	24770
Importación	36459	52345	47191	26389	28543	50770	76580	26890	35450	42260
Consumo aparente	83349	88465	71898	42429	42091	112706	115975	44807	54407	58879

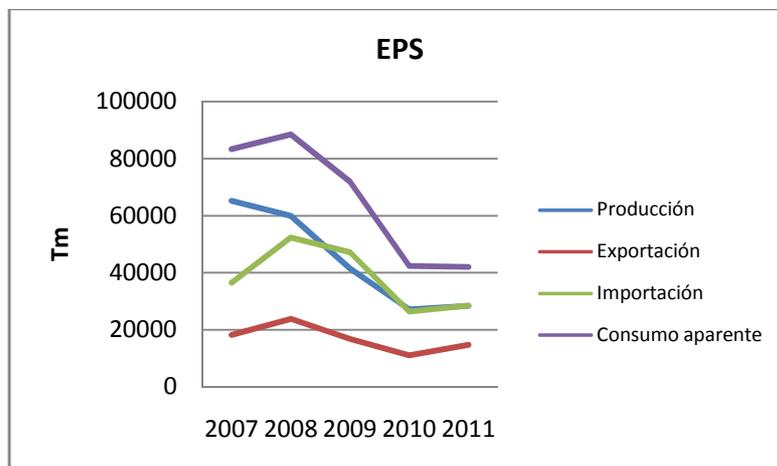


Gráfico 7. Evolución del EPS (en toneladas).

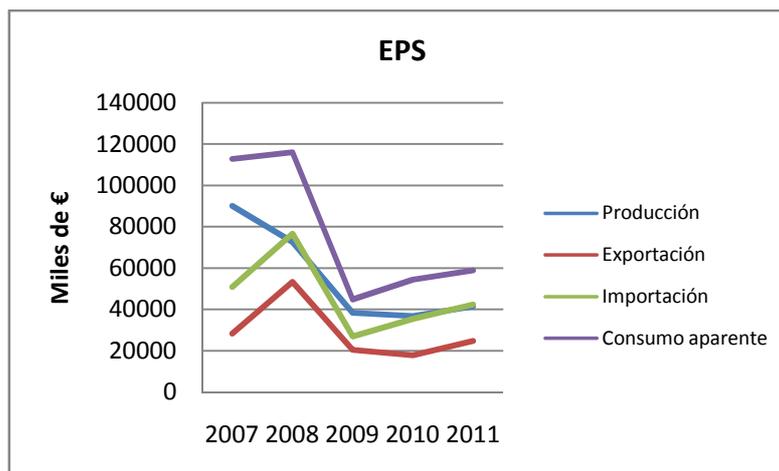
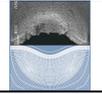


Gráfico 8. Evolución del EPS (en miles de euros).

Los datos indican una disminución de la producción y el consumo de EPS.



PET

Tabla 3. PET.

	En toneladas					En miles de euros				
	2007	2008	2009	2010	2011	2007	2008	2009	2010	2011
Producción	535094	554812	452270	711350	742771	610828	628704	518820	784720	834510
Exportación	140668	139201	108288	157146	207564	155970	153430	93990	164710	270770
Importación	123169	109879	151514	168138	97524	131600	118530	135080	177350	128270
Consumo aparente	516596	525490	495495	722343	632732	586458	593804	559910	797360	692010

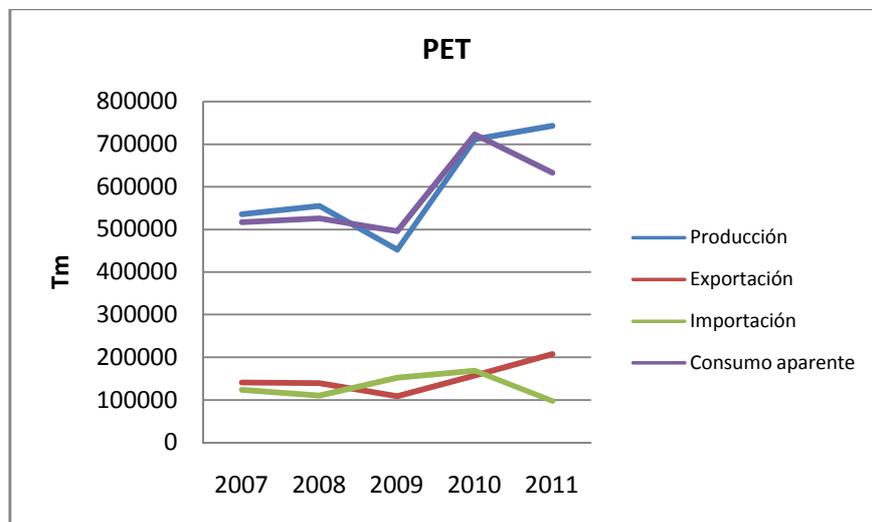


Gráfico 9. Evolución del PET (en toneladas).

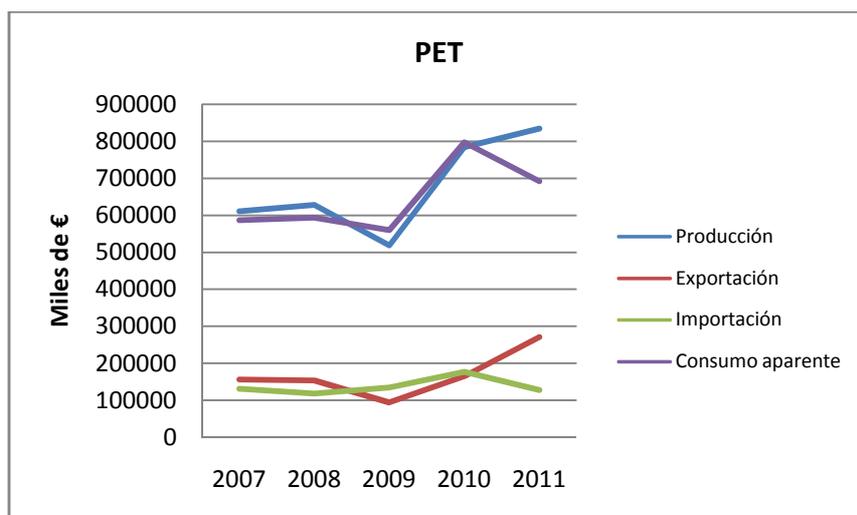
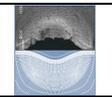


Gráfico 10. Evolución del PET (en miles de euros).



Los datos indican un aumento en la producción y el consumo de PET.

Según lo expuesto en los gráficos anteriores, parece notarse un cambio en el consumo de los plásticos alimentarios, donde un mercado claramente dominado por el PS en la última década, ha dado paso a una mayor demanda del PET.

Evolución del precio de las materias primas

En los últimos años, las materias primas empleadas para la fabricación de bandejas aptas para contacto alimentario han experimentado un fuerte aumento en su precio.

El gráfico siguiente recoge la evolución de los precios de los materiales vírgenes de PS (€/Tonelada) y PET (€/Tonelada), así como el barril de crudo de petróleo (€/Barril) desde Enero de 2009 a Mayo de 2013:

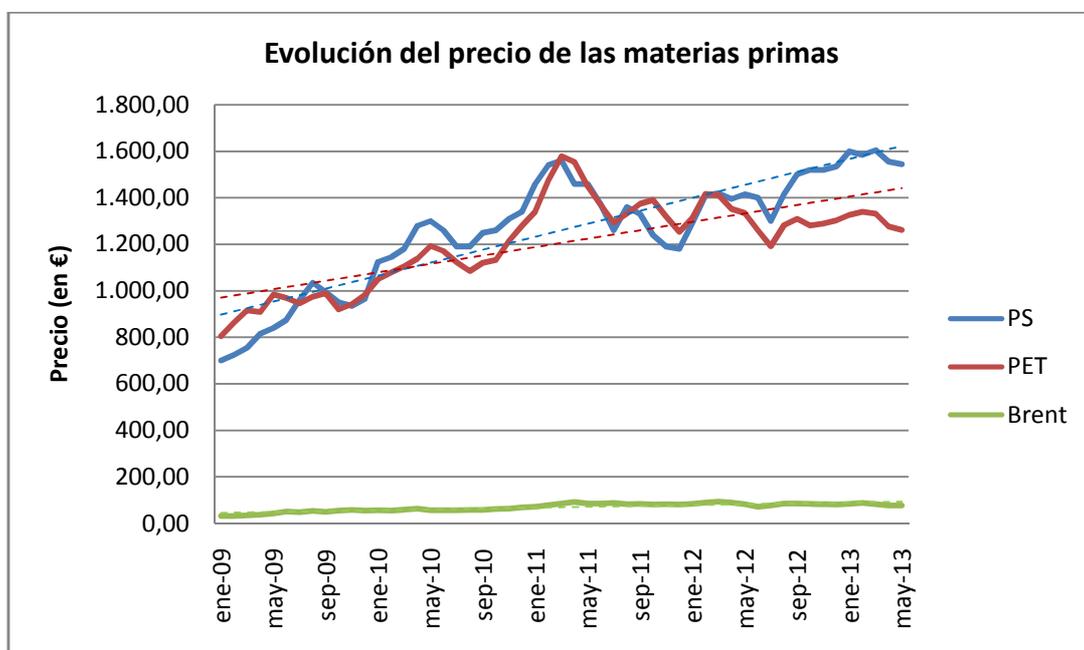
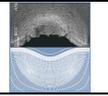


Gráfico 11. Evolución del precio de las materias primas.

Puede apreciarse de forma sencilla que el barril de crudo de petróleo ha experimentado un incremento en su valor del 57,32% en el periodo analizado, lo que implica un incremento del valor del PS y del PET del 54,69% y del 36,21%, respectivamente.

Por lo tanto, parece claro que se hace necesario obtener la mejor bandeja posible, que aúne el máximo de resistencia y el mínimo peso.



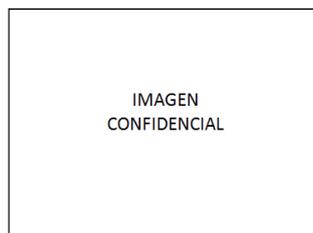
Procedimiento experimental

Caracterización de los materiales

Preparación de las probetas de PET

Se procede a obtener probetas para caracterizar el comportamiento del material. Para ello, se toman probetas con las dimensiones especificadas en la *Norma UNE-EN ISO 527*, correspondiente a la parte 3 sobre condiciones de ensayo para películas y hojas.

Se emplea una probeta tipo halterio con el objetivo de evitar que la probeta rompa por la zona de contacto con las mordazas, de modo que se “fuerce” la rotura de la misma en su zona central. La forma de las probetas empleadas puede apreciarse en las imágenes que se proponen a continuación:



Imágenes 62 y 63. Probeta obtenida de lámina (izquierda) y de bandeja (derecha) de PET.

Se analizarán probetas correspondientes a 3 lotes de producción diferentes con el objetivo de evaluar y conocer la dispersión de datos resultante.

Obtención de probetas en la lámina extruida

Para evaluar la posible anisotropía del material, debido al proceso de fabricación llevado a cabo para la obtención de la lámina, se evalúan las características del material en las direcciones longitudinal y transversal. Se obtienen 3 probetas en cada dirección, siguiendo la notación que se describe a continuación:

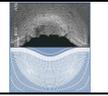
2703/1 L

, donde:

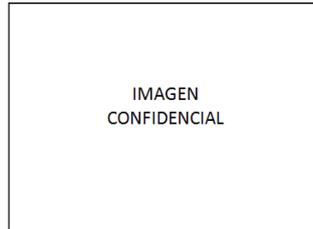
2703: corresponde al número de bobina.

1: número de probeta, siguiendo el plano que se proporciona más adelante.

L/T: direcciones longitudinal/transversal.



La figura siguiente muestra las diferentes zonas de donde se han extraído las probetas, de modo que se cubra todo el ancho de lámina:



Imágenes 64 y 65. Zonas de obtención de las probetas.

Las probetas se cortan a tijera, teniendo la precaución de evitar la presencia de rebabas o pequeñas incisiones que puedan actuar como concentradores de tensiones, provocando de este modo la rotura de la probeta.

Obtención de probetas en la bandeja termoformada

Debido a los refuerzos que presentan las bandejas, la obtención de las probetas se hace complicada. Inicialmente se consideró obtener probetas de las pestañas de las bandejas, pero debido a la estrechez de la zona se declinó esa opción, de modo que se obtuvieron probetas de las zonas laterales y fondo de las bandejas. De cada bandeja se obtienen cuatro probetas, siguiendo las direcciones longitudinal y transversal, como se indica en la imagen siguiente, de las que finalmente se analizan dos (correspondientes a las zonas 1 y 4) por el gran número de probetas que surgen para su análisis.

Para evaluar la posible anisotropía del material, debido al proceso de fabricación llevado a cabo para la obtención de la lámina, se evalúan las características del material en las direcciones longitudinal y transversal.

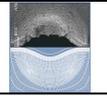


IMAGEN
CONFIDENCIAL

Imagen 66. Zonas de obtención de las probetas para el ensayo de tracción.

Descripción del ensayo

Para los ensayos de las probetas de PET a tracción se emplea la máquina *INSTRON 5580* del *Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica del Campus de Gijón*, a la que se le ha colocado la célula de carga de menor tamaño (10 KN).

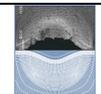
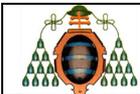


Imagen 67. Máquina empleada para la realización de los ensayos.

Se colocan las mordazas para el posicionamiento de las probetas, a las que se le acoplan unas pletinas para evitar que las probetas deslicen entre las mismas, disminuyendo en lo posible el error en los ensayos.



Imagen 68. Detalle de las mordazas de sujeción de las probetas.



La máquina va conectada a un PC que gobierna sus movimientos y recoge mediante el software apropiado los resultados del ensayo.



Imagen 69. PC que gobierna la máquina de ensayos.

Debido a la dificultad de colocación del extensómetro en un material de tan reducido espesor, se prescinde de su uso.

A continuación se enumeran los pasos necesarios para llevar a cabo el ensayo de tracción sobre las probetas de PET, y que se repite para la totalidad de probetas obtenidas:

- Posicionamiento de las probetas en las mordazas. Para ello, se pondrá especial atención a colocar la probeta lo más centrada posible para evitar introducir posibles efectos torsores en el ensayo que puedan desvirtuar los mismos. Mediante el ajuste fino de la máquina, se colocan las probetas de forma que queden con la suficiente tensión antes de iniciar el ensayo.



Imagen 70. Posicionamiento de la probeta en las mordazas.



- Balanceo de la tensión y el desplazamiento iniciales.

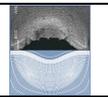


Imagen 71. Mandos de control de la máquina.

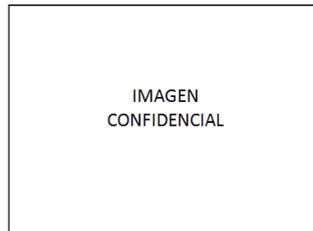
Se inicial el ensayo, de modo que comienza la tracción del material con el correspondiente desplazamiento vertical de la mordaza superior. La máquina comienza a registrar la fuerza y el desplazamiento en cada instante.



Imágenes 72, 73 y 74. Secuencia del ensayo.



El conjunto de imágenes siguientes muestran el estado inicial de una probeta antes del ensayo de tracción, y el estado final después del mismo:



Imágenes 75, 76, 77 y 78. Estado inicial y final de las probetas.

El resultado del ensayo de tracción es una curva tensión-deformación como la que se adjunta a continuación:

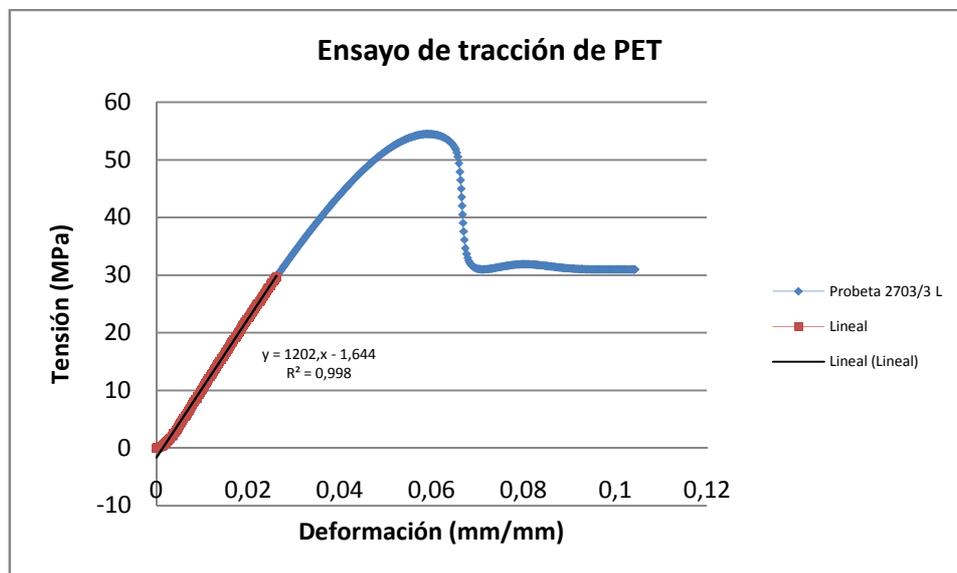
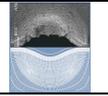


Gráfico 12. Curva tensión – deformación obtenida en el ensayo de tracción.



Preparación de probetas de PS

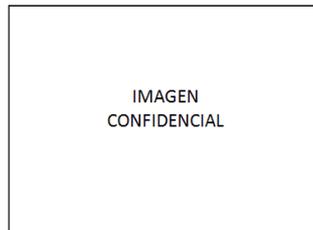
La obtención de las probetas se hace mediante una cuchilla bien afilada tipo guillotina que proporcione el corte lo más limpio posible para evitar introducir factores concentradores de tensiones que fueren la deformación de la probeta en la zona correspondiente a la imperfección.

Para evaluar la posible anisotropía del material, se propone recoger muestras en las direcciones longitudinal y transversal.

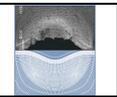
Se evalúan 3 lotes de producción diferentes para valorar y evaluar la posibilidad de dispersión de datos existente.

Obtención de probetas sobre lámina

La figura siguiente muestra las diferentes zonas donde se han obtenido las probetas:



Imágenes 79 y 80. Zonas de obtención de las probetas.



Las probetas se obtienen siguiendo las indicaciones de la *Norma UNE-EN ISO 178*.

En el caso de las probetas obtenidas sobre lámina su espesor está comprendido entre los 3 y los 5 mm, por lo que el ancho de las probetas será de 10 mm.

Así mismo, la forma de la probeta puede apreciarse en la imagen siguiente:

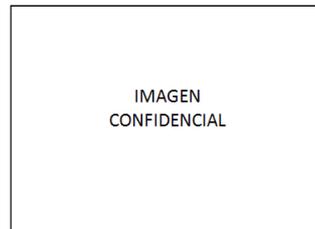


Imagen 81. Forma de la probeta de PS obtenida sobre lámina.

Obtención de probetas sobre bandeja

Las bandejas de PS, a diferencia de las de PET, no presentan refuerzos en las paredes y la base de la misma, por lo que la obtención de las probetas se simplifica notablemente. Todas las probetas se obtienen de la base de las bandejas. En algunos casos, el espesor de las mismas sobrepasa los 5 mm, por lo que el ancho de estas probetas será de 15 mm.

Sobre cada bandeja se toman muestras en las direcciones longitudinal y transversal, siguiendo el esquema y la nomenclatura que se describen a continuación:

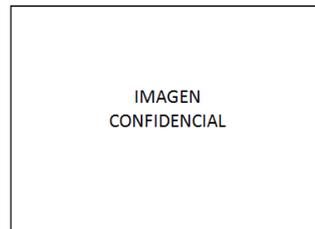
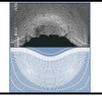


Imagen 82. Zonas de obtención de probetas sobre la bandeja.

Debido al gran número de probetas obtenido, se ensayan únicamente las probetas correspondientes a las zonas 1 y 2.



Descripción del ensayo de flexión

Para los ensayos de las probetas de PS a flexión se emplea la máquina *INSTRON 5580* del *Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica del Campus de Gijón*, a la que se le ha colocado la célula de carga de menor tamaño (10 KN).

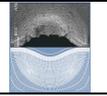


Imagen 83. Máquina empleada en los ensayos de flexión.

Sobre las mordazas empleadas para la caracterización a tracción, se colocan unos dispositivos auxiliares para poder realizar el ensayo de flexión a tres puntos.



Imagen 84. Detalle del dispositivo para el ensayo de flexión a 3 puntos.



La máquina va conectada a un PC que gobierna sus movimientos y recoge mediante el software apropiado los resultados del ensayo.



Imagen 85. PC que gobierna la máquina de ensayos.

A continuación se enumeran los pasos necesarios para llevar a cabo el ensayo de flexión sobre las probetas de PS, y que se repite para la totalidad de probetas obtenidas:

- Posicionamiento de las probetas en el útil del ensayo. Para ello, se pondrá especial atención a colocar la probeta lo más centrada posible para evitar introducir posibles efectos de desalineación de las mismas que puedan desvirtuar el ensayo. Mediante el ajuste fino de la máquina, se colocan las probetas de forma que queden tangentes con el cilindro de aplicación de la carga superior.

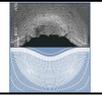


Imágenes 86 y 87. Posicionamiento de la probeta en las mordazas.

- Balanceo de la tensión y el desplazamiento iniciales.



Imagen 88. Mandos de control de la máquina.

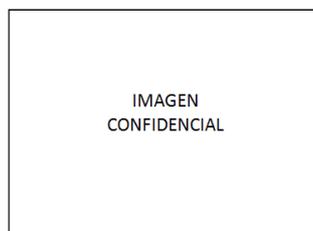


- Se inicial el ensayo, de modo que comienza la flexión del material con el correspondiente desplazamiento vertical del cilindro superior. La máquina comienza a registrar la fuerza y el desplazamiento en cada instante.

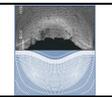


Imágenes 89, 90, 91, 92 y 93. Secuencia del ensayo.

Las imágenes siguientes muestran los estados inicial y final de dos probetas antes y después del ensayo de flexión:



Imágenes 94, 95, 96, 97 y 98. Estado inicial y final de las probetas.



El resultado del ensayo de flexión es una curva tensión-deformación cuya forma se representa a continuación:

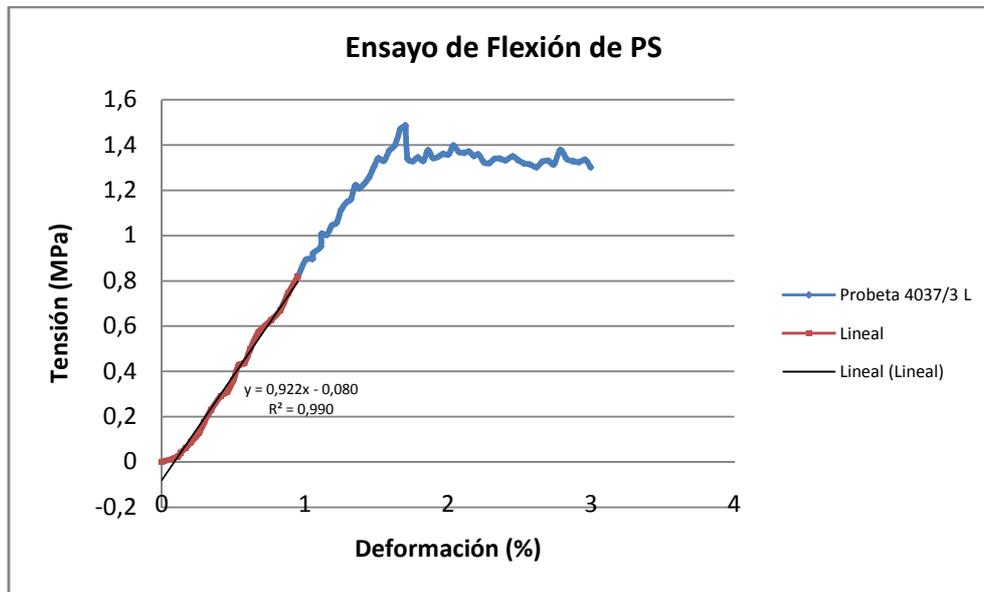


Gráfico 13. Curva tensión – deformación obtenida en el ensayo de flexión.

Diseño mediante Elementos Finitos

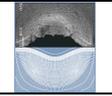
Bandeja de PS

El modelo de bandeja de PS elegida es la 89, cuyo peso y dimensiones, se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 4. Modelo 89.

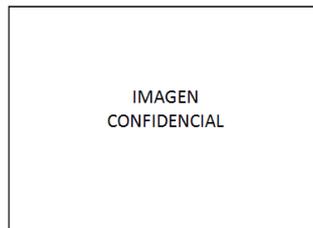
Modelo de bandeja	89	IMAGEN CONFIDENCIAL
Peso (g)	10,06	
Largo (mm)	252	IMAGEN CONFIDENCIAL
Ancho (mm)	176	
Profundidad (mm)	40	

Imágenes 99 y 100. Interior de la bandeja (arriba) y exterior de la bandeja (abajo).



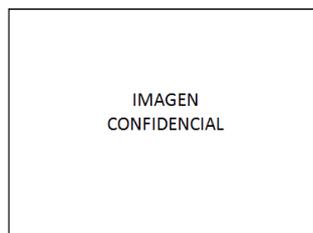
Es ampliamente conocido que la resistencia de una bandeja depende de su peso y de su espesor de pared, por lo que, para minimizar el efecto que esto podría suponer en el diseño, se supondrá el mismo espesor de pared para todas las bandejas, por lo que los parámetros de diseños serán los que se describen a continuación:

- La influencia del refuerzo en el contorno lateral. Para ello se comparará la actual bandeja (con un refuerzo en el contorno lateral) frente a su equivalente sin ningún refuerzo y con dos refuerzos en el contorno lateral.



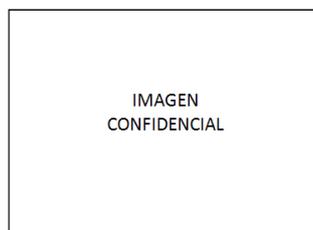
Imágenes 101, 102 y 103. Bandeja sin refuerzo en contorno (izquierda), con un refuerzo en contorno (centro) y con dos refuerzos en contorno (derecha).

- La influencia del ángulo de pared. Para ello se comparará la actual bandeja (con ángulo de pared de 55°) frente a su equivalente con mayor ángulo de pared (65°) y también frente a su equivalente con menor ángulo de pared (45°). En este punto hay que notar, que un diseño con mayor ángulo de pared implicará un menor volumen interior, por lo que se perderá capacidad de envasado.

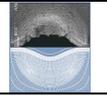


Imágenes 104, 105 y 106. Bandeja con ángulo de pared de 55° (izquierda), con un ángulo de pared de 65° (centro) y con ángulo de pared de 45° (derecha).

- La influencia de los nervios laterales. Para ello se comparará la actual bandeja frente a su equivalente con nervios laterales.



Imágenes 107 y 108. Bandeja sin refuerzos laterales (izquierda) y bandeja con refuerzos laterales (derecha).



Simulación del ensayo de flexión para el PS

Se parte de un cuarto de material como se aprecia en la imagen siguiente:

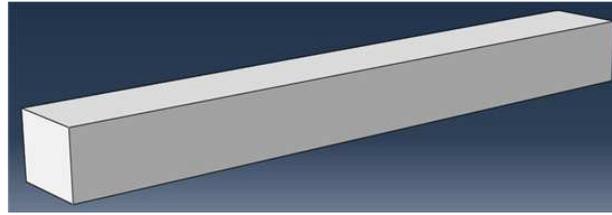


Imagen 109. Simulación de probeta de PS.

Se crean una serie de particiones en la pieza para facilitar el mallado y los puntos de contacto de la misma.

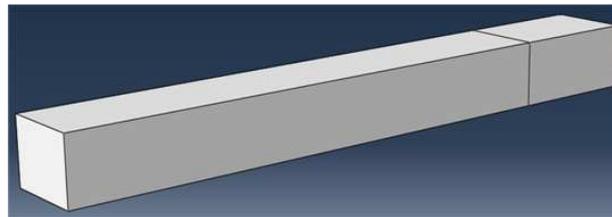


Imagen 110. Partición de la probeta de PS en la zona de apoyo con el rodillo inferior.

Mediante cuerpos rígidos e indeformables se simulan los cilindros de apoyo de la probeta así como el cilindro que ejerce el desplazamiento sobre ella.

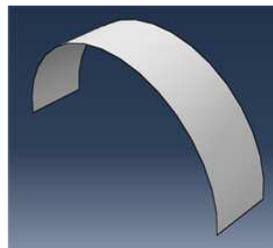


Imagen 111. Simulación del rodillo inferior.

Se asigna el punto de referencia que se encuentra en el punto medio que une la línea de los centros.

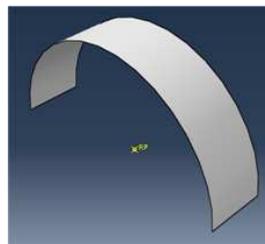
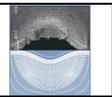


Imagen 112. Detalle del nodo de gobierno del cuerpo rígido.



A continuación se crea la partición en el punto de contacto con la probeta.

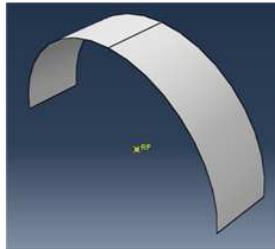


Imagen 113. Partición del rodillo inferior.

De forma análoga se procede sobre el rodillo de aplicación de la carga.

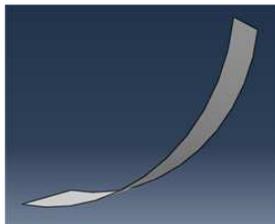


Imagen 114. Simulación del rodillo de aplicación de la carga.

La imagen siguiente describe el nodo de referencia del aplicador de la carga:

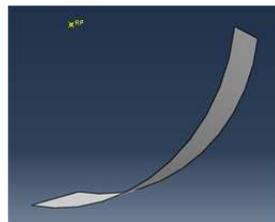


Imagen 115. Detalle del nodo de gobierno del cuerpo rígido.

Procediendo de éste modo, en el módulo *ensamblado*, la distribución del ensayo de flexión quedará de la siguiente manera:

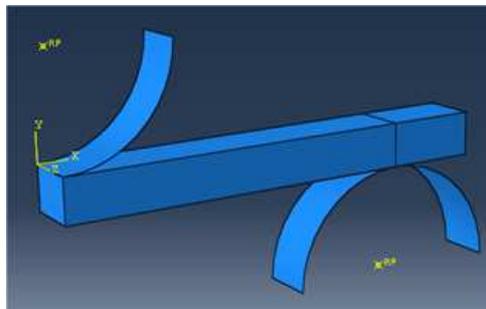
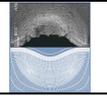


Imagen 116. Detalle del ensamblaje del conjunto.



Se aplican las condiciones de simetría, empotramiento (apoyo) y desplazamiento (aplicador de la carga) en el modelo:

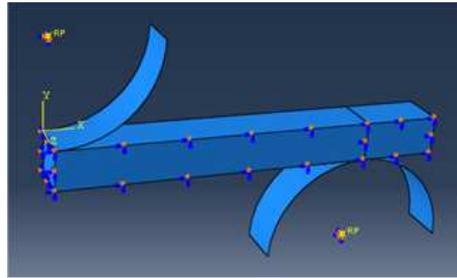


Imagen 117. Condiciones de simetría e imposición del desplazamiento en la zona central.

Se procede al mallado del conjunto:

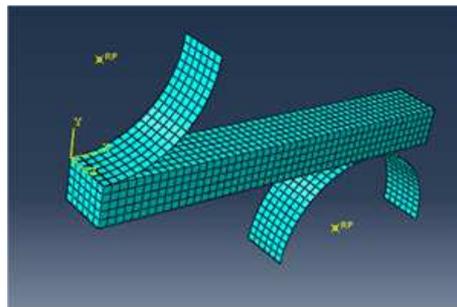
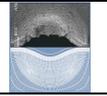


Imagen 118. Detalle del mallado de los diferentes elementos.

Para el aplicador de la carga y el apoyo se emplean elementos estándar rígidos discretos lineales cuadriláteros estructurados de tamaño 0.8. En el caso de la probeta de PS, se emplean elementos de tensión 3D cuadráticos con integración reducida con forma hexagonal estructurada y de tamaño 0.8.

Diseño de los modelos

En todos los modelos se busca trabajar de la misma forma, de modo que se eliminen posibles influencias externas que puedan interferir en los resultados. En todos los modelos se tratará de simular el ensayo llevado a cabo en las instalaciones de *Linpac Packaging Pravia, S.A.U.* donde se forzará una compresión del lado largo de la bandeja imponiendo un desplazamiento de 12 mm. Así mismo se realizarán particiones de los modelos que faciliten el mallado de los mismos y se emplearán elementos lineales con integración reducida, siguiendo un modelo tipo *Shell*, pues en todos los casos, una de las dimensiones (el espesor) es mucho menor que las otras dos dimensiones (largo y ancho de la bandeja). En las partes planas, se emplearán elementos cuadriláteros estructurados, mientras que en las zonas correspondientes a revoluciones, se emplearán elementos que describen el barrido de la revolución, con formas triangulares y cuadrilátero. Para agilizar el cálculo, y aprovechando la simetría de las bandejas, se procederá a simular un cuarto de cada modelo.



Bandeja sin refuerzo en el contorno lateral

IMAGEN
CONFIDENCIAL

Imágenes 119, 120 y 121. Condiciones de simetría y aplicación del desplazamiento impuesto de 12mm (izquierda), particiones (centro) y mallado del modelo (derecha).

Con refuerzo en contorno

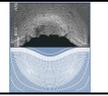
IMAGEN
CONFIDENCIAL

Imágenes 122, 123 y 124. Condiciones de simetría y aplicación del desplazamiento impuesto de 12mm (izquierda), particiones (centro) y mallado del modelo (derecha).

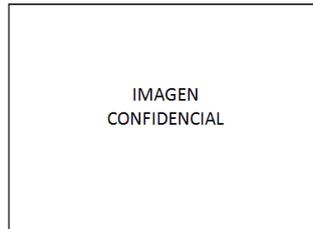
Con dos refuerzos en contorno

IMAGEN
CONFIDENCIAL

Imágenes 125, 126 y 127. Condiciones de simetría y aplicación del desplazamiento impuesto de 12mm (izquierda), particiones (centro) y mallado del modelo (derecha).



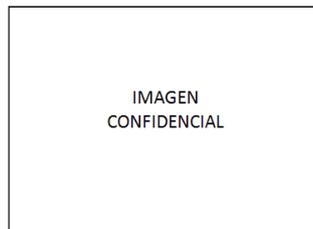
Con nervios laterales



Imágenes 128, 129 y 130. Condiciones de simetría y aplicación del desplazamiento impuesto de 12mm (izquierda), particiones (centro) y mallado del modelo (derecha).

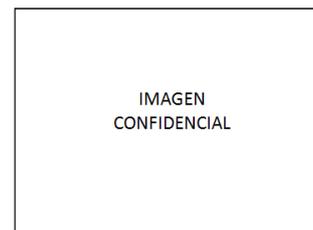
Se hace necesario destacar el mallado con trias de forma libre en las zonas de refuerzo lateral.

Modelo con menor ángulo de pared

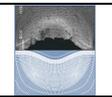


Imágenes 131, 132 y 133. Condiciones de simetría y aplicación del desplazamiento impuesto de 12mm (izquierda), particiones (centro) y mallado del modelo (derecha).

Modelo con mayor ángulo de pared



Imágenes 134, 135 y 136. Condiciones de simetría y aplicación del desplazamiento impuesto de 12mm (izquierda), particiones (centro) y mallado del modelo (derecha).



Bandeja de PET:

El modelo de bandeja de PET elegida es la 1825-45 (MAP), cuyo peso y dimensiones, se muestran en la tabla siguiente:

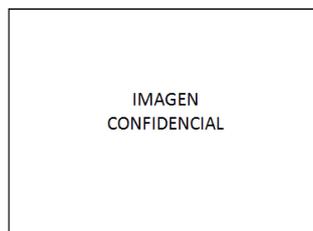
Tabla 5. Modelo 1825-45.

Modelo de bandeja	1825-45 (MAP)	
Peso (g)	31,5	IMAGEN CONFIDENCIAL
Largo (mm)	252	IMAGEN CONFIDENCIAL
Ancho (mm)	182	
Profundidad (mm)	47	

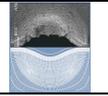
Imágenes 137 y 138. Interior de la bandeja (arriba) y exterior de la bandeja (abajo).

Es ampliamente conocido que la resistencia de una bandeja depende de su peso y de su espesor de pared (en este caso, micraje), por lo que, para minimizar el efecto que esto podría suponer en el diseño, se supondrá el mismo espesor de pared para todas las bandejas, por lo que los parámetros de diseños serán los que se describen a continuación:

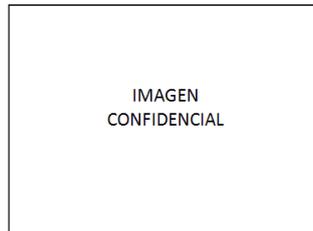
- La influencia de los refuerzos laterales (nervios). Para ello se comparará el diseño actual (que presenta 7 nervios) frente a un diseño carente de nervios laterales.



Imágenes 139 y 140. Bandeja con refuerzos laterales (izquierda) y sin refuerzos laterales (derecha).

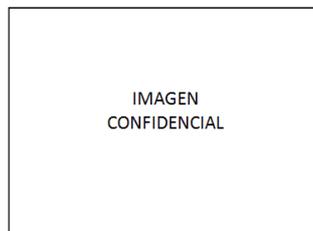


- La influencia del retorno de pestaña (cuello). Para ello se comparará una bandeja con un retorno de pestaña de 5 mm (actual) frente a una bandeja con un retorno de pestaña de 3,5 mm, reducción que supondría importantes ahorros logísticos.



Imágenes 141 y 142. Bandeja con retorno de pestaña de 5mm (izquierda) y con retorno de pestaña de 3,5 mm.

- La influencia del número de refuerzos laterales (nervios). Para ello se compararán bandejas que presentan diferentes nervios en su lado largo frente al diseño actual (que presenta 7 nervios).



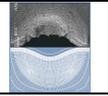
Imágenes 143, 144 y 145. Diseño actual con 7 nervios (izquierda) y diseños con 4 nervios (centro) y 5 nervios (derecha).

Simulación del ensayo de tracción:

Se parte de un cuarto de probeta, en el que se hará simetría con respecto a los *ejes X* e *Y*. Se realiza de esta forma por el importante ahorro de cálculo que supone. Como la dimensión del espesor (micras), es mucho menor que las otras dimensiones (del orden de milímetros), se modelizará el ensayo mediante un modelo tipo *Shell*.



Imagen 146. Simulación del ensayo de tracción.



Se crean las siguientes particiones para favorecer la operación de mallado (la transición de la malla en zonas curvas).



Imagen 147. Diferentes particiones en la probeta.

Se crean las condiciones de contorno y de aplicación de la carga para la simulación del ensayo:

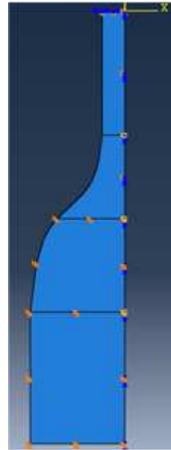
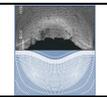


Imagen 148. Condiciones de contorno y de aplicación de la carga.

Se crea un mallado de elementos estándar de tensión plana, cuadráticos cuadriláteros estructurados con integración reducida.



En la parte correspondiente a la sujeción de las mordazas y libre de deformaciones se emplean elementos de tamaño 3, mientras que en la zona que describirá el ensayo se emplean elementos de tamaño 0,6 para obtener mayor precisión en los resultados.



Imagen 149. Malla de la probeta.

Diseño de los modelos

En todos los modelos se busca trabajar de la misma forma, de modo que se eliminen posibles influencias externas que puedan interferir en los resultados. En todos los modelos se tratará de simular el ensayo llevado a cabo en las instalaciones de *Linpac Packaging Pravia, S.A.U.* donde se forzará una compresión del lado largo de la bandeja imponiendo un desplazamiento de 12mm. Así mismo se realizarán particiones de los modelos que faciliten el mallado de los mismos y se emplearán elementos lineales con integración reducida, siguiendo un modelo tipo *Shell*, pues en todos los casos, una de las dimensiones (el espesor) es mucho menor que las otras dos dimensiones (largo y ancho de la bandeja). En las partes planas, se emplearán elementos con formas de triángulos y cuadriláteros libres, mientras que en las zonas correspondientes a revoluciones y a zonas no planas, se emplearán elementos que describen el barrido de la revolución, con formas triangulares y cuadrilátero. Aprovechando la simetría que presentan las bandejas, se simulará un cuarto de modelo, lo que supondrá un importante ahorro en los tiempos de cálculo.

Bandeja sin nervios

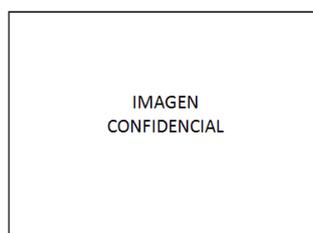
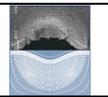


Imagen 150, 151 y 152. Condiciones de simetría y aplicación del desplazamiento impuesto de 12mm (izquierda), particiones (centro) y malla del modelo (derecha).



Bandeja con cuatro nervios

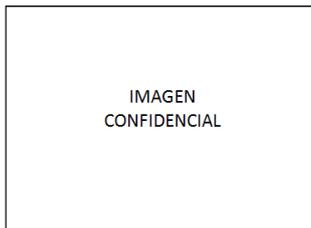


Imagen 153, 154 y 155. Condiciones de simetría y aplicación del desplazamiento impuesto de 12mm (izquierda), particiones (centro) y malla del modelo (derecha).

Bandeja con cinco nervios

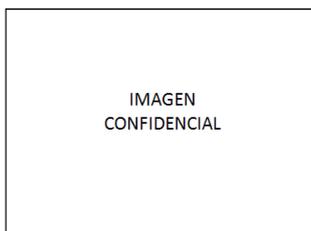


Imagen 156, 157 y 158. Condiciones de simetría y aplicación del desplazamiento impuesto de 12mm (izquierda), particiones (centro) y malla del modelo (derecha).

Bandeja estándar (con siete nervios)

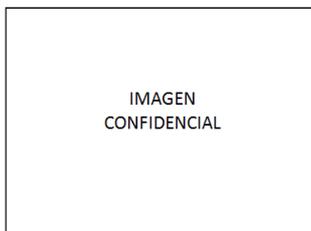


Imagen 159, 160 y 161. Condiciones de simetría y aplicación del desplazamiento impuesto de 12mm (izquierda), particiones (centro) y malla del modelo (derecha).

Bandeja con retorno de pestaña de 3,5 mm

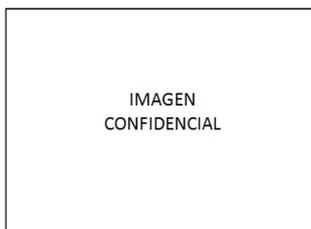
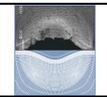


Imagen 162, 163 y 164. Condiciones de simetría y aplicación del desplazamiento impuesto de 12mm (izquierda), particiones (centro) y malla del modelo (derecha).



Resultados y su discusión

Caracterización de los materiales

PET

A continuación se presentan las curvas tensión-deformación de todas las probetas analizadas:

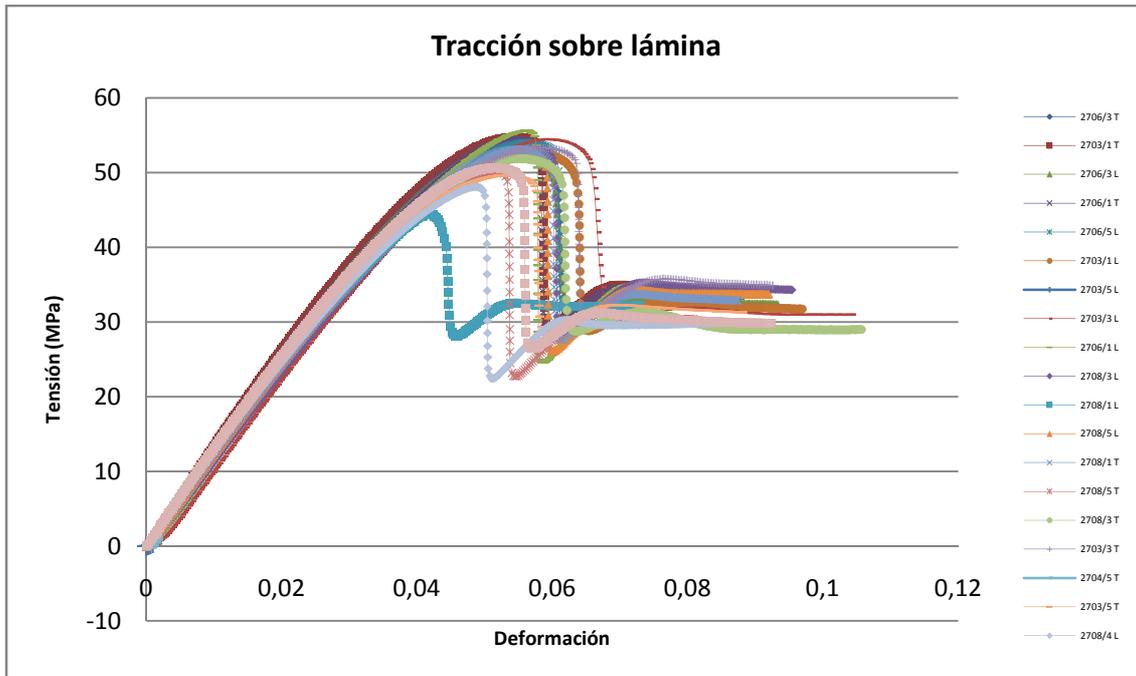


Gráfico 14. Curvas tensión deformación en probetas de PET obtenidas sobre lámina.

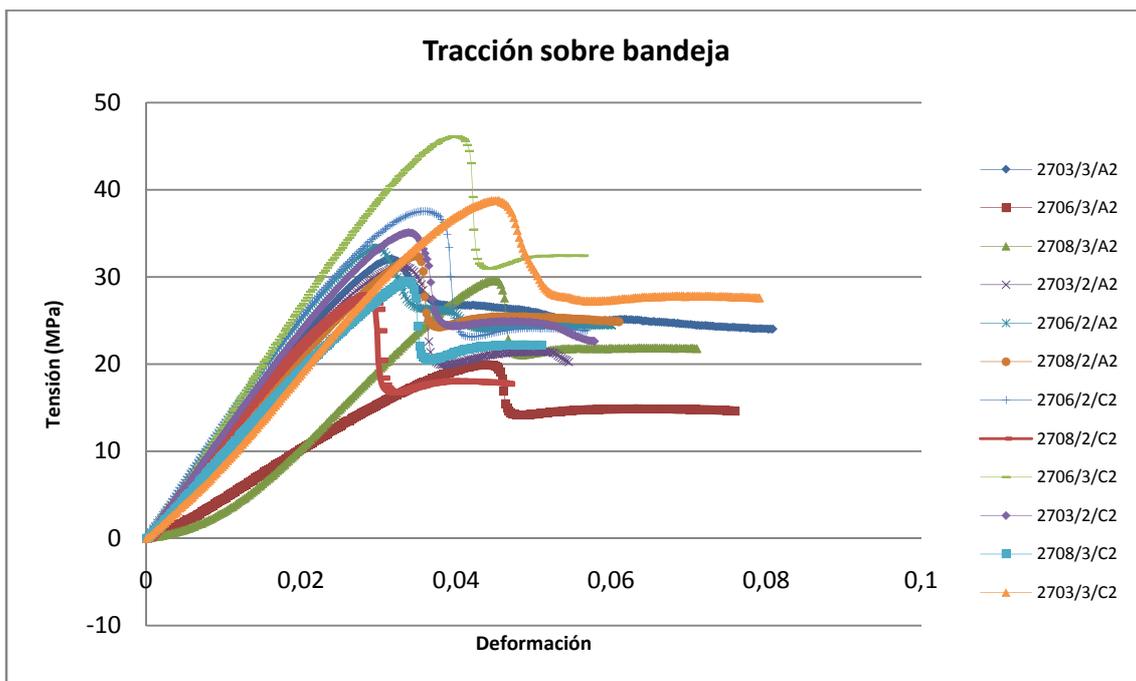
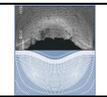


Gráfico 15. Curvas tensión deformación de probetas de PET obtenidas sobre bandeja.



Según las gráficas anteriores parece que no existen diferencias notables en las propiedades de las probetas obtenidas sobre la lámina, lo que no ocurre con las propiedades de las probetas obtenidas sobre las bandejas. Esto puede ser debido a la dificultad de obtención de las probetas debido al perfil de nervios de las bandejas.

La tabla que se presenta a continuación recoge los valores del Límite Elástico y el Módulo de Elasticidad de todas las probetas analizadas:

Tabla 6. Propiedades del PET.

Lámina			Bandeja		
Probeta	Límite Elástico (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Probeta	Límite Elástico (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)
2706/3 T	53.267	1307	2703/3/A2	32.076	1172
2703/1 T	54.706	1325	2706/3/A2	19.937	567.2
2706/3 L	53.61	1296	2708/3/A2	29.611	843.2
2706/1 T	54.35	1283	2703/2/A2	31.175	1141
2706/5 L	53.944	1240	2706/2/A2	33.324	1277
2703/1 L	52.731	1218	2708/2/A2	32.426	1063
2703/5 L	54.453	1207	2706/2/C2	37.535	1283
2703/3 L	54.458	1202	2708/2/C2	27.921	1160
2706/1 L	55.622	1236	2706/3/C2	46.115	1375
2708/3 L	52.98	1189	2703/2/C2	35.097	1210
2708/1 L	44.492	1225	2708/3/C2	29.512	980.5
2708/5 L	52.772	1227	2703/3/C2	38.761	988.2
2708/1 T	53.098	1236	Media	32.79	1088.34
2708/5 T	50.204	1217	Desv STD	6.43	221.43
2708/3 T	51.855	1214			
2703/3T	53.358	1202			
2706/5 T	55.322	1314			
2703/5 T	49.62	1221			
2708/4 L	48.078	1210			
2708/4 T	50.647	1234			
Media	52.48	1240.15			
Desv STD	2.72	41.14			



PS

A continuación se presentan las curvas tensión-deformación de todas las probetas analizadas:

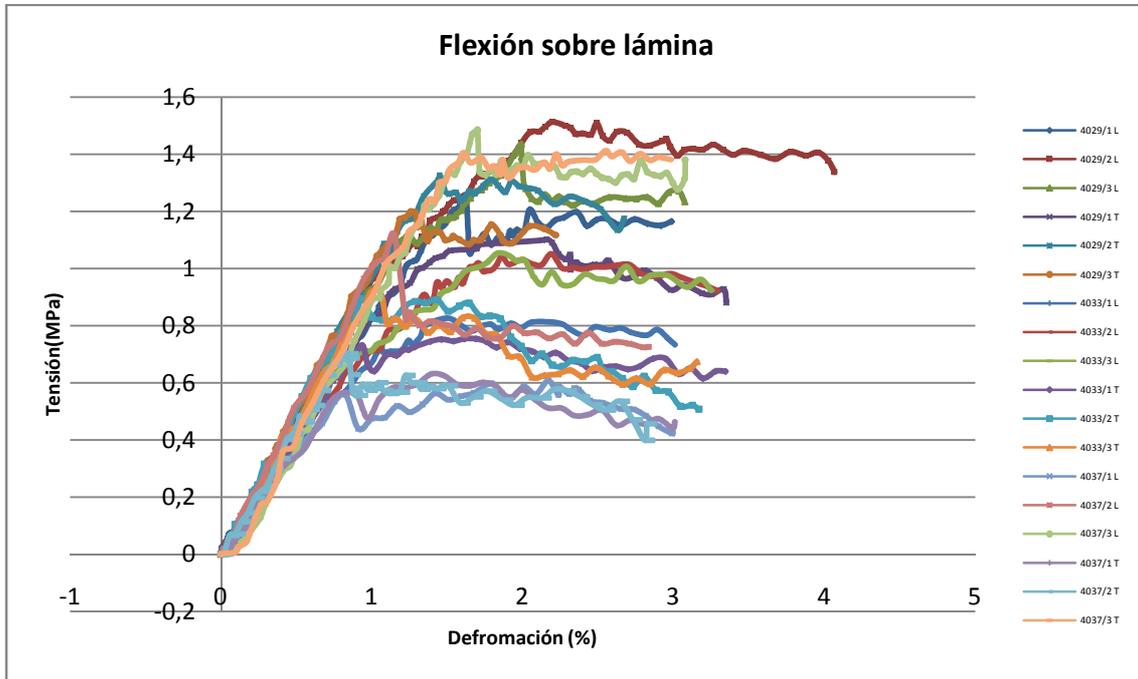


Gráfico 16. Curvas tensión-deformación sobre probetas de PS obtenidas en lámina.

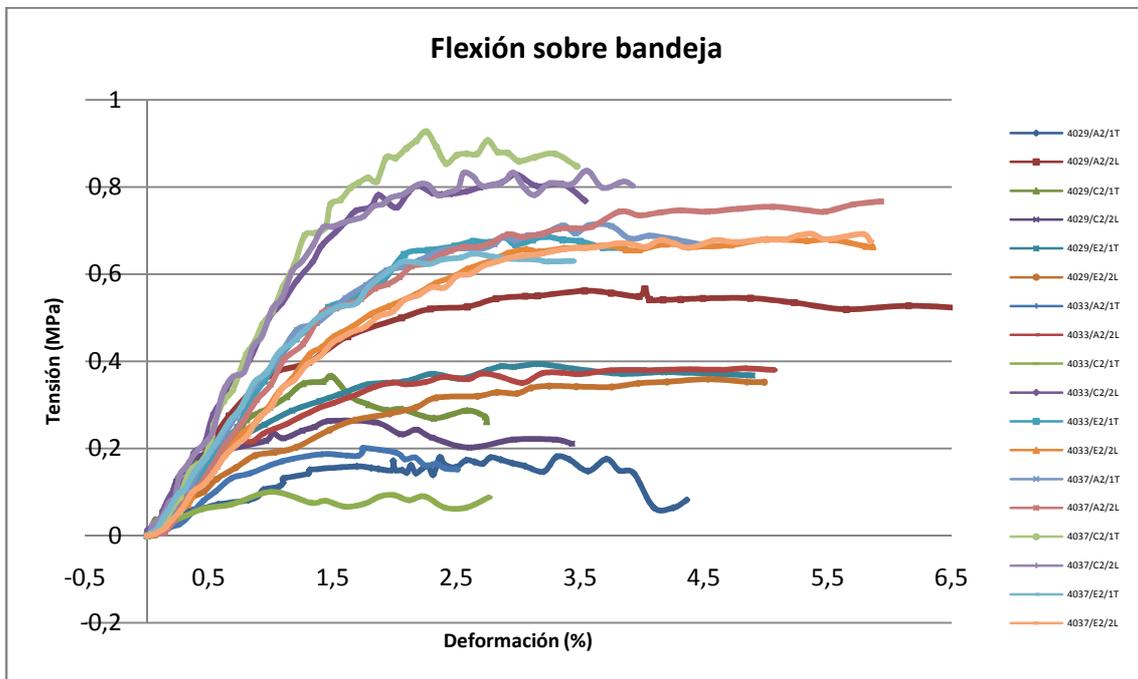
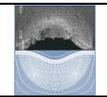


Gráfico 17. Curvas tensión-deformación sobre probetas de PS obtenidas en lámina.



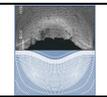
Según las gráficas anteriores se aprecian diferencias notables en las propiedades de las probetas obtenidas tanto sobre la lámina como sobre las bandejas. Esto puede ser debido a dos factores fundamentales:

- Que el material en análisis es un producto espumado cuya caracterización resulta compleja.
- Que la máquina empleada para la caracterización del material no es apropiada.

La tabla que se presenta a continuación recoge los valores del Límite Elástico y el Módulo de Elasticidad de todas las probetas analizadas:

Tabla 7. Propiedades obtenidas en las probetas de PS.

Lámina			Bandeja		
Probeta	Límite de Flexión (MPa)	Módulo (MPa)	Probeta	Límite de Flexión (MPa)	Módulo (MPa)
4029/1 L	1.257	0.799	4029/A2/1T	0.209	0.438
4029/2 L	1.521	0.991	4029/A2/2L	0.566	0.334
4029/3 L	1.435	0.965	4029/C2/1T	0.372	0.438
4029/1 T	1.106	0.805	4029/C2/2L	0.278	0.585
4029/2 T	1.33	1.001	4029/E2/1T	0.404	0.352
4029/3 T	1.24	1.026	4029/E2/2L	0.366	0.221
4033/1 L	0.847	0.697	4033/A2/1T	0.659	0.245
4033/2 L	1.06	0.906	4033/A2/2L	0.396	0.336
4033/3 L	1.079	0.875	4033/C2/1T	0.129	0.366
4033/1 T	0.78	0.83	4033/C2/2L	0.848	0.475
4033/2 T	0.93	0.975	4033/E2/1T	0.704	0.385
4033/3 T	0.918	0.952	4033/E2/2L	0.687	0.319
4037/1 L	0.632	0.696	4037/A2/1T	0.722	0.408
4037/2 L	1.181	1.009	4037/A2/2L	0.766	0.38
4037/3 L	1.516	0.922	4037/C2/1T	0.952	0.559
4037/1 T	0.657	0.732	4037/C2/2L	0.854	0.51
4037/2 T	0.73	0.893	4037/E2/1T	0.663	0.403
4037/3 T	1.441	0.987	4037/E2/2L	0.697	0.316
Media	1.09	0.89	Media	0.57	0.39
Desv STD	0.29	0.11	Desv STD	0.24	0.10



Diseño mediante Elementos Finitos

Simulación del ensayo de flexión

Tensiones

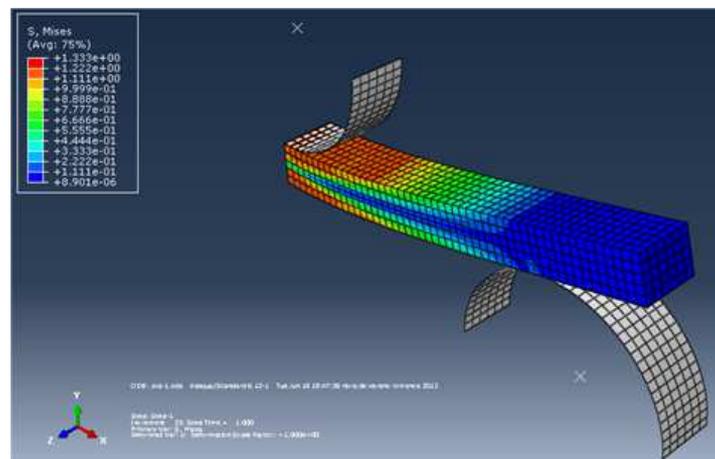


Imagen 165. Distribución de tensiones.

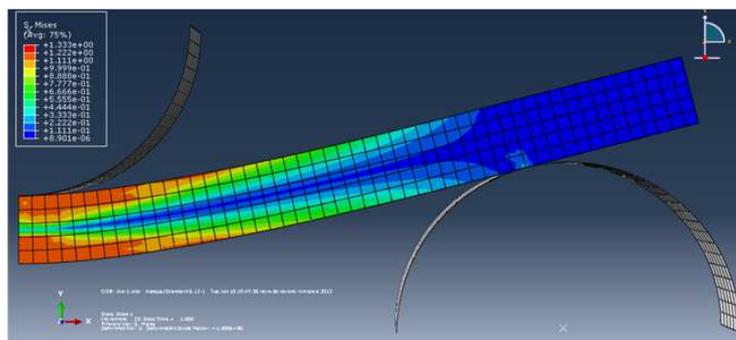


Imagen 166. Detalle de la distribución de tensiones.

Deformaciones

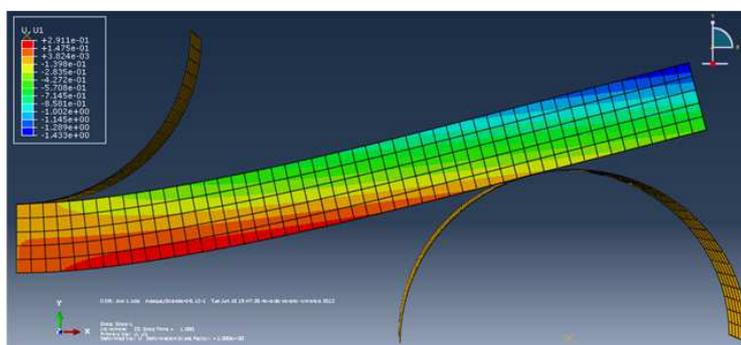


Imagen 167. Deformaciones en el eje x.

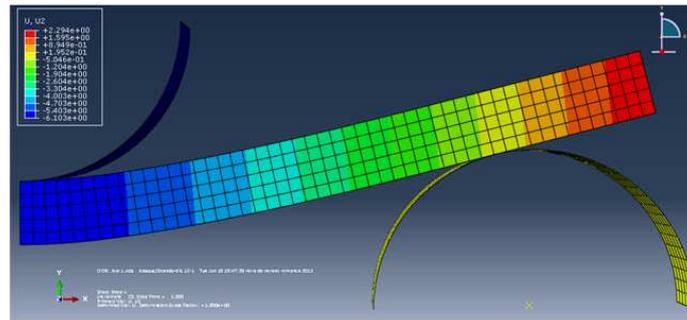
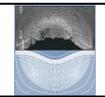


Imagen 168. Deformaciones en el eje y.

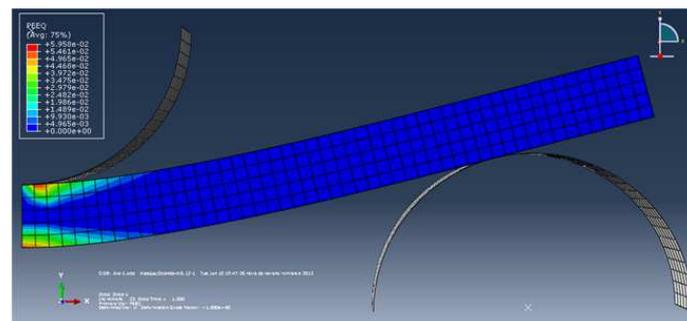


Imagen 169. Deformaciones plásticas.

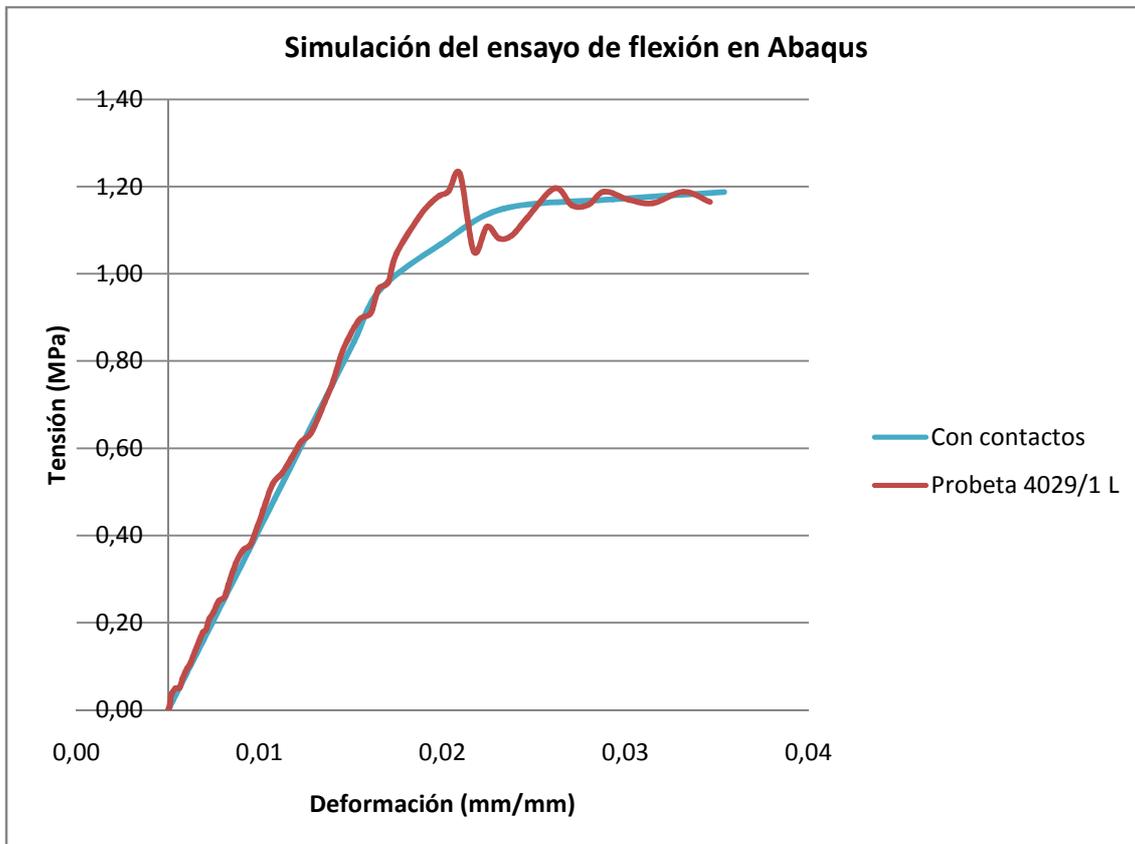
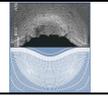


Gráfico 18. Simulación del ensayo de flexión de PS en Abaqus.

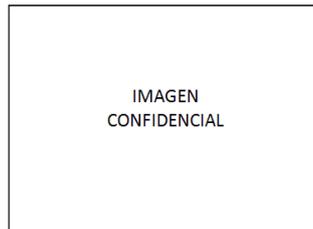


El resultado de la simulación del ensayo de flexión con *Abaqus* parece ajustarse de forma aceptable al comportamiento real del material.

Modelos de PS

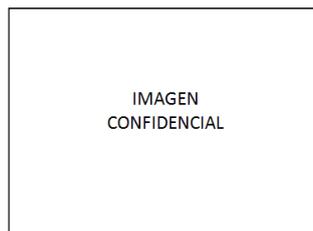
Modelo sin refuerzos en el contorno

Tensiones



Imágenes 170, 171 y 172. Distribuciones de tensiones en el modelo evaluado.

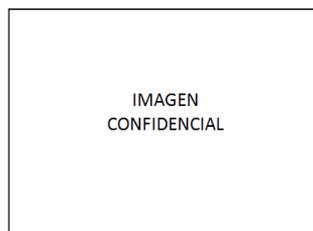
Deformaciones



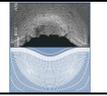
Imágenes 173, 174, 175, 176 y 177. Deformaciones en el modelo evaluado.

Modelo con refuerzo en el contorno

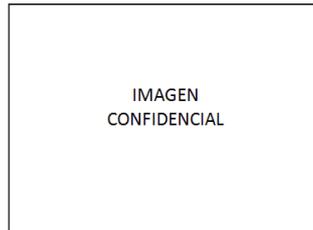
Tensiones



Imágenes 178, 179 y 180. Distribuciones de tensiones en el modelo evaluado.



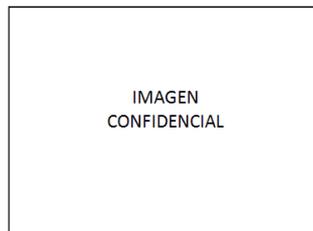
Deformaciones



Imágenes 181, 182, 183, 184 y 185. Deformaciones en el modelo evaluado.

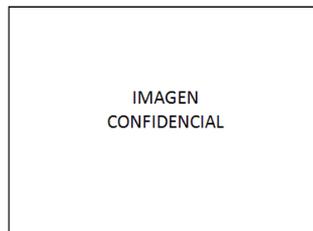
Modelo con dos refuerzos en el contorno

Tensiones

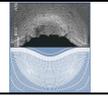


Imágenes 186, 187 y 188. Distribuciones de tensiones en el modelo evaluado.

Deformaciones

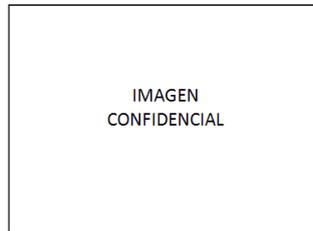


Imágenes 189, 190, 191, 192 y 193. Deformaciones en el modelo evaluado.



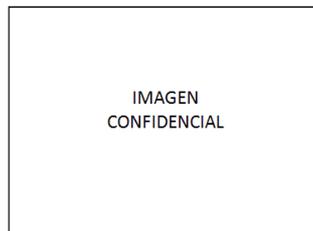
Modelo con nervios laterales

Tensiones



Imágenes 194, 195 y 196. Distribuciones de tensiones en el modelo evaluado.

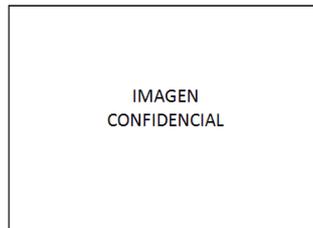
Deformaciones



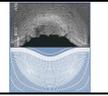
Imágenes 197, 198, 199, 200 y 201. Deformaciones en el modelo evaluado.

Modelo con menor ángulo de pared

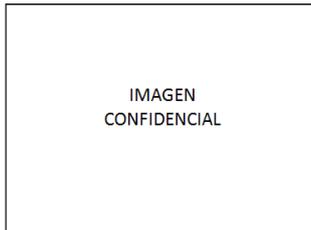
Tensiones



Imágenes 202, 203 y 204. Distribuciones de tensiones en el modelo evaluado.



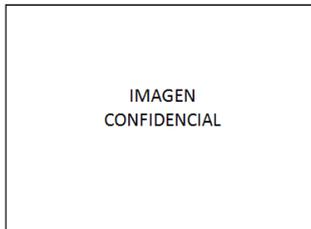
Deformaciones



Imágenes 205, 206, 207, 208 y 209. Deformaciones en el modelo evaluado.

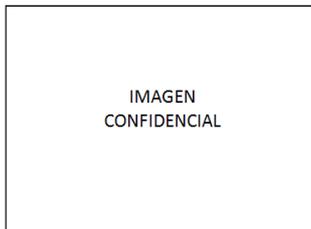
Modelo con mayor ángulo de pared

Tensiones



Imágenes 210, 211 y 212. Distribuciones de tensiones en el modelo evaluado.

Deformaciones



Imágenes 213, 214, 215, 216 y 217. Deformaciones en el modelo evaluado.



A continuación se recogen en una tabla las fuerzas de reacción en la dirección de aplicación de la carga, que facilitan la interpretación de los resultados obtenidos mediante la simulación de los diferentes modelos en *Abaqus*:

Tabla 8. Fuerzas de reacción en los modelos de PS.

Modelo	Sin refuerzo en contorno	Con refuerzo en contorno	Con dos refuerzos en contorno	Con nervios laterales	Con menor ángulo de pared	Con mayor ángulo de pared
Tiempo de simulación	Fuerza (en N)	Fuerza (en N)	Fuerza (en N)	Fuerza (en N)	Fuerza (en N)	Fuerza (en N)
0	0	0	0	0	0	0
0.01	0.159864	0.15554	0.149333	0.120281	0.184117	0.152809
0.02	0.317953	0.309355	0.29705	0.239745	0.365211	0.304152
0.035	0.551916	0.536996	0.515749	0.417515	0.631442	0.528553
0.0575	0.896047	0.871842	0.83763	0.681086	1.01918	0.859533
0.09125	1.39778	1.36008	1.3074	1.06987	1.57683	1.34404
0.141875	2.12091	2.0639	1.98558	1.63962	2.36455	2.0464
0.217812	3.14748	3.0635	2.95105	2.46814	3.45239	3.0517
0.317813	4.40706	4.29133	4.14126	3.51929	4.74303	4.29814
0.417812	5.58243	5.4388	5.25843	4.5321	5.9059	5.47373
0.517812	6.69346	6.52549	6.3205	5.51377	6.96989	6.59638
0.617813	7.75385	7.56715	7.34037	6.46983	7.9579	7.67743
0.717812	8.7735	8.56905	8.32541	7.40457	8.87947	8.7263
0.817813	9.75811	9.53907	9.28317	8.3169	9.75151	9.74345
0.917813	10.7	10.4762	10.2067	9.20562	10.5742	10.7165
1	11.4203	11.197	10.9153	9.92029	11.2171	11.4482

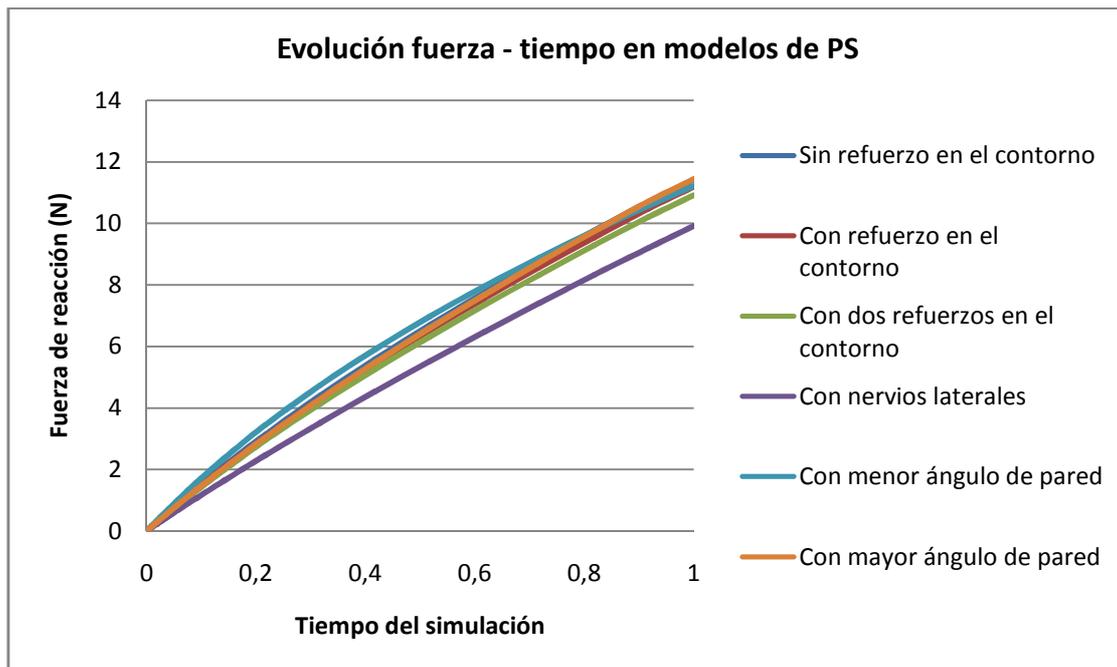
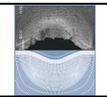


Gráfico 19. Comparación de las fuerzas de reacción en los modelos de PS.



Simulación del ensayo de tracción

El resultado de la simulación del ensayo es el que se describe a continuación:

Tensiones

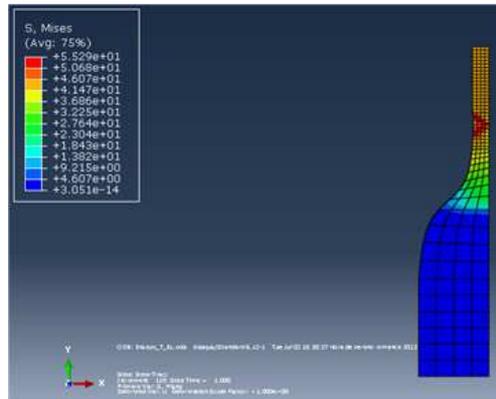


Imagen 218. Tensiones.

Deformaciones

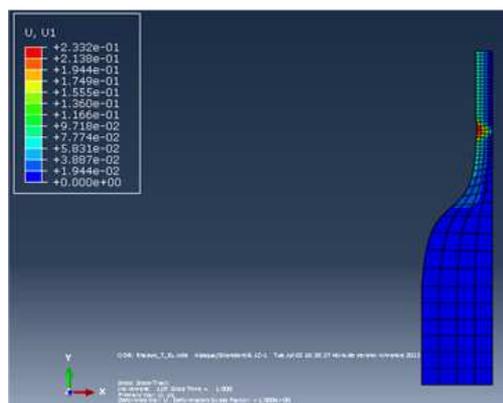


Imagen 219. Deformaciones en el eje x.

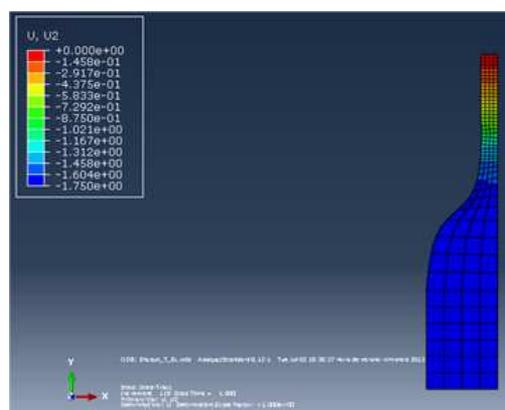


Imagen 220. Deformaciones en el eje y.

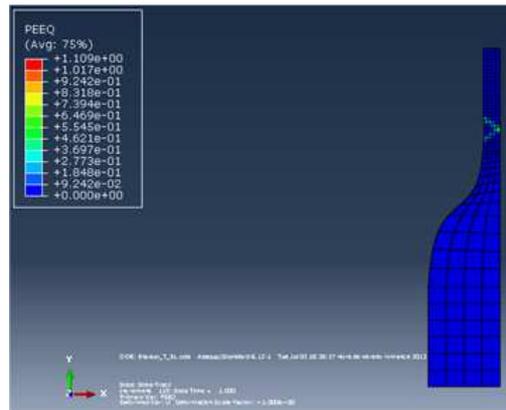
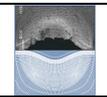


Imagen 221. Deformaciones plásticas.

Las deformaciones se producen en la zona central de la probeta y no en la zona de contacto con las mordazas, lo que reproduce la realidad del ensayo.

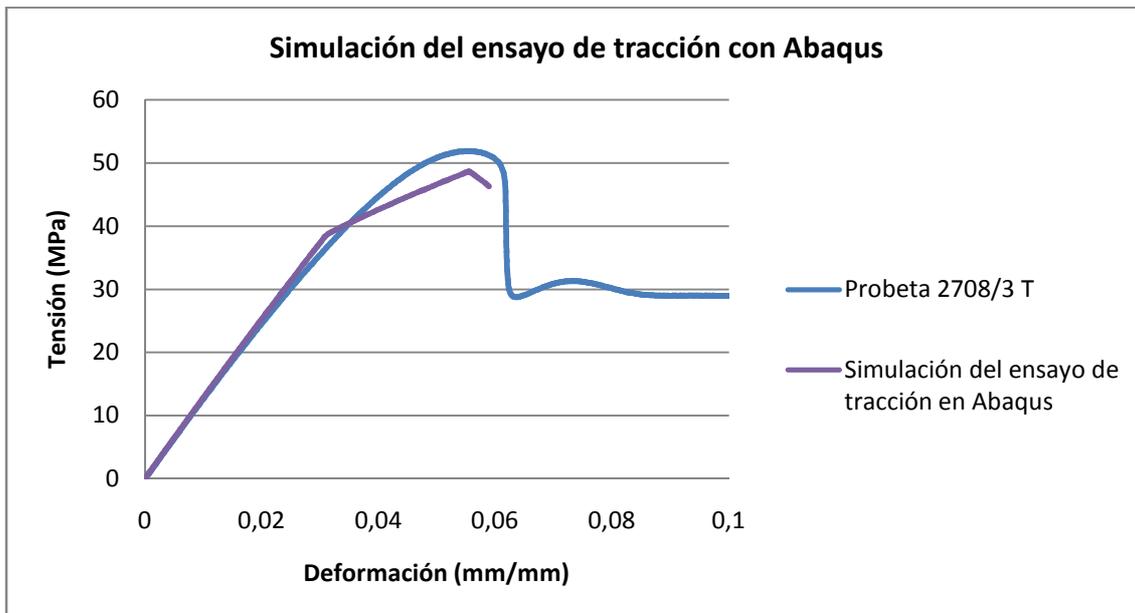
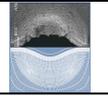


Gráfico 20. Simulación del ensayo de tracción con Abaqus.

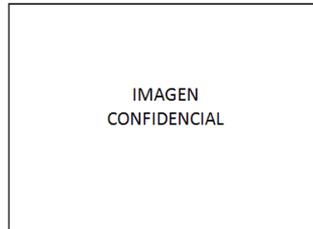
El resultado de la simulación del ensayo de tracción con Abaqus parece describir de forma aceptable el comportamiento del material durante el ensayo real.



Modelos de PET

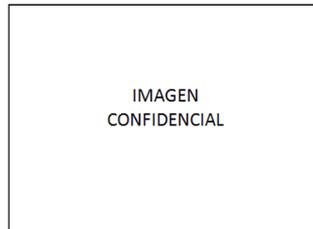
Bandeja sin nervios

Tensiones



Imágenes 222, 223 y 224. Distribuciones de tensiones en el modelo evaluado.

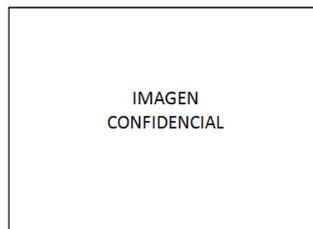
Deformaciones



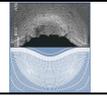
Imágenes 225, 226, 227, 228 y 229. Deformaciones en el modelo evaluado.

Modelo con cuatro nervios

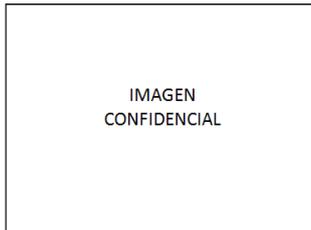
Tensiones



Imágenes 230, 231 y 232. Distribuciones de tensiones en el modelo evaluado.



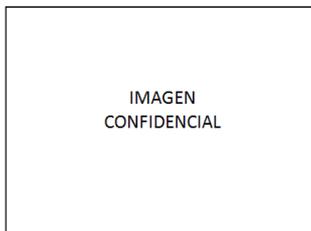
Deformaciones



Imágenes 233, 234, 235, 236 y 237. Deformaciones en el modelo evaluado.

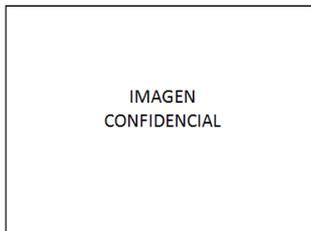
Modelo de 5 nervios

Tensiones

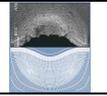


Imágenes 238, 239 y 240. Distribuciones de tensiones en el modelo evaluado.

Deformaciones

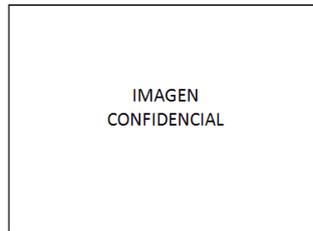


Imágenes 241, 242, 243, 244 y 245. Deformaciones en el modelo evaluado.



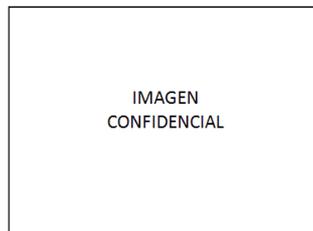
Modelo de bandeja estándar

Tensiones



Imágenes 246, 247 y 248. Distribuciones de tensiones en el modelo evaluado.

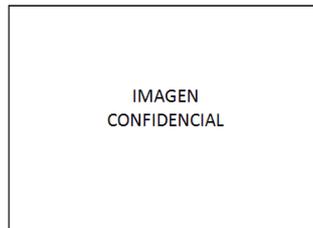
Deformaciones



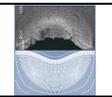
Imágenes 249, 250, 251, 252 y 253. Deformaciones en el modelo evaluado.

Modelo de cuello de 3,5 mm

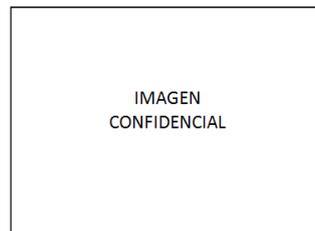
Tensiones



Imágenes 254, 255 y 256. Distribuciones de tensiones en el modelo evaluado.



Deformaciones



Imágenes 257, 258, 259, 260 y 261. Deformaciones en el modelo evaluado.

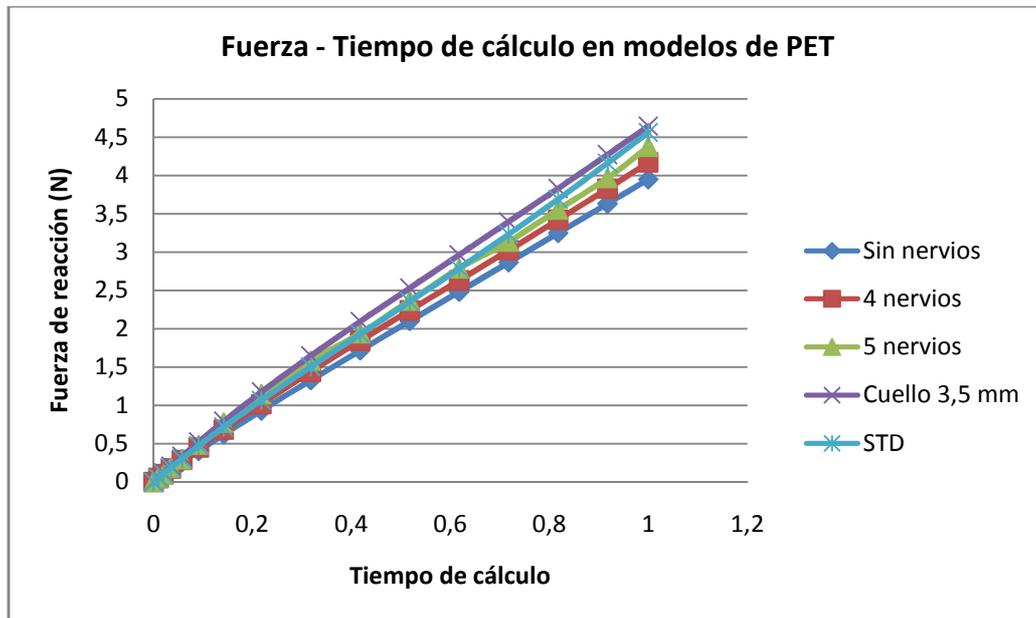
Para facilitar la interpretación de los resultados, se representan las fuerzas de reacción en la dirección de aplicación del desplazamiento impuesto de 12 mm en la tabla siguiente:

Tabla 9. Fuerzas de reacción en los modelos de PET.

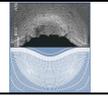
Modelo	Sin nervios laterales	Con 4 nervios laterales	Con 5 nervios laterales	Bandeja STD (con 7 nervios laterales)	Con cuello de 3,5 mm
Tiempo de simulación	Fuerza (en N)	Fuerza (en N)	Fuerza (en N)	Fuerza (en N)	Fuerza (en N)
0	0	0	0	0	0
0.01	0.04564	0.0510807	0.0577618	0.0542083	0.0595311
0.02	0.0909417	0.101643	0.094487	0.107788	0.118487
0.035	0.158296	0.17656	0.1871875	0.187033	0.205871
0.0575	0.258039	0.286932	0.2978125	0.303481	0.334579
0.09125	0.40493	0.448293	0.486766	0.473105	0.522407
0.141875	0.619708	0.681938	0.776236	0.717542	0.792867
0.217812	0.931518	1.01691	1.14683	1.06619	1.1757
0.317813	1.32855	1.43727	1.58348	1.50305	1.64685
0.417812	1.71649	1.84226	1.94181	1.92792	2.09438
0.517812	2.10025	2.23849	2.36682	2.35324	2.53078
0.617813	2.48277	2.63099	2.78811	2.78682	2.96284
0.717812	2.86551	3.02419	3.13725	3.23173	3.39446
0.817813	3.24894	3.42212	3.55395	3.68912	3.82929
0.917813	3.63297	3.82802	3.96705	4.16033	4.27145
1	3.94874	4.16912	4.37442	4.55952	4.64345



De forma visual, se representan en la gráfica que sigue:



Gráfica 21. Fuerzas de reacción en los modelos de PET.



Conclusiones

El PS y el PET son materiales poliméricos que se comportan de forma compleja.

La simulación numérica permite obtener el comportamiento aproximado de materiales poliméricos como el PS y el PET. Así mismo, es posible simular, de forma aproximada, los ensayos de flexión y tracción necesarios para la caracterización del PS y del PET, respectivamente.

Para la espuma de PS, se evalúan seis modelos diferentes imponiéndose para todos ellos un desplazamiento en la zona central de la pared larga de la bandeja de 12 mm. De esta forma es posible emitir las siguientes afirmaciones:

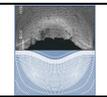
- Los refuerzos laterales no aportan resistencia a la bandeja de PS.
- La introducción de nervios no aporta resistencia a la bandeja de PS. Esto es acorde con la experiencia desarrollada en *Linpac Packaging Pravia S.A.U.*
- El ángulo de pared es decisivo en la resistencia de la bandeja. De los tres ángulos evaluados, se obtiene mayor resistencia con el mayor ángulo. Sin embargo, un diseño con un ángulo de pared mayor, empeora el factor de apilado de las bandejas, lo que implica una reducción del rendimiento logístico del proceso. Este parámetro de diseño deberá ser revisado en posteriores análisis.

Se hace necesario resaltar que en todos los modelos evaluados se produce una pequeña plastificación del material en la zona de aplicación del desplazamiento lateral impuesto.

Para el PET, se evalúan cinco modelos diferentes imponiéndose para todos ellos un desplazamiento en la zona central de la pared larga de la bandeja de 12mm. De esta forma es posible emitir las siguientes conclusiones:

- Los nervios laterales aportan resistencia a las bandejas de PET. Una bandeja sin nervios, es un 13,4% menos resistente.
- La resistencia de la bandeja aumenta al aumentar el número de nervios laterales.
- La reducción del cuello de la bandeja de 5 a 3,5 mm implica una mejora en la resistencia. Este resultado es totalmente contrario a la experiencia de *Linpac Packaging Pravia S.A.U.* por lo que deberá ser revisado en posteriores ocasiones.

Así mismo, en ninguno de los modelos evaluados se produce plastificación alguna del material con el desplazamiento lateral impuesto.



Presupuesto

Planificación

La tabla que se muestra a continuación enumera las tareas realizadas en el transcurso del Proyecto, recogiendo los tiempos consumidos en cada una de las diferentes tareas:

Tabla 10. Tareas realizadas en el Proyecto.

Proceso	Identificador del proceso	Inicio	Duración (en días)	Fecha de inicio	Fecha de fin
Revisión bibliográfica	1	0	14	04/02/2013	18/02/2013
Diseño de modelos de PS	2	14	24	20/02/2013	15/03/2013
Diseño de modelos de PET	3	38	49	18/03/2013	06/05/2013
Caracterización del PET	4	87	1	16/05/2013	16/05/2013
Caracterización del PS	5	88	1	21/05/2013	21/05/2013
Cálculo de modelos de PS	6	89	14	27/05/2013	10/06/2013
Cálculo de modelos de PET	7	103	25	27/05/2013	20/06/2013
Redacción de documentación	8	128	17	21/06/2013	07/07/2013

La duración en la ejecución del Proyecto asciende a 145 días (0,42 años), siendo el tiempo de trabajo dedicado cada día de cuatro horas y media.

El gráfico siguiente muestra el diagrama de *Gantt*, en el cual se describen los tiempos del Proyecto:

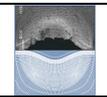


Gráfica 22. Diagrama de Gantt del Proyecto.

Cálculo del presupuesto

Para el cálculo del presupuesto del Proyecto han de tenerse en cuenta los siguientes costes:

- Costes relativos a la caracterización de los materiales.
- Costes relativos al hardware empleado.
- Costes relativos al software empleado.
- Costes relativos al personal requerido
- Costes relativos a desplazamientos.



En el caso de la estimación de los costes relativos al hardware y al software, los cálculos se realizarán basándose en la expresión siguiente:

$$C_i = C_T \times \frac{T_U}{T_A} \times \frac{U}{100} \times K$$

, donde:

C_i : es el coste imputable al equipo.

C_T : es el coste total de adquisición.

T_U : es el tiempo estimado de uso, en años.

T_A : es el tiempo estimado de amortización, en años.

U : es la utilización porcentual del equipo.

K : es el índice de inflación y reparaciones. Se tomará un valor de 1,4.

Costes de caracterización de los materiales

La tabla siguiente recoge los gastos relativos a la caracterización de los materiales:

Tabla 11. Gastos correspondientes a la caracterización de los materiales.

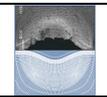
Caracterización del material	C_U (€/probeta)	C_1 (€)
PS	10	360
PET	10	320
Gastos totales de caracterización (€)		680

Costes de hardware

La tabla siguiente recoge los gastos relativos al uso del hardware:

Tabla 12. Gastos correspondientes a empleo del hardware.

Hardware	C_T (€)	T_U (años)	T_A (años)	U (%)	C_2 (€)
Ordenador portátil HP	900	0.42	3	80	141.12
Ordenador sobremesa DELL	650	0.42	3	30	38.22
Lápiz USB 4 Gb	15	0.42	0.42	60	12.60
Disco duro externo 500 Gb	100	0.42	1	40	23.52
Gastos totales de hardware (€)					215.46



Costes de software

La tabla siguiente recoge los gastos relativos al uso del software:

Tabla 13. Gastos correspondientes a empleo del software.

<i>Software</i>	$C_T(\text{€})$	T_U (años)	T_A (años)	$U(\%)$	$C_3(\text{€})$
Licencia Abaqus 6.12	40000	0.42	5	80	3763.20
Licencia de Windows Vista	300	0.42	3	90	52.92
Licencia de Microsoft Office	100	0.42	3	80	15.68
Licencia de Solid Works 2012	40000	0.42	5	40	1881.60
Gastos totales de software (€)					5713.40

Costes de personal

La tabla siguiente recoge los gastos relativos al personal requerido para la realización del Proyecto:

Tabla 14. Gastos correspondientes al personal requerido.

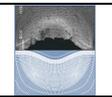
<i>Personal</i>	$C_U(\text{€/h})$	t (horas)	$C_4(\text{€})$
Documentación bibliográfica	20	40	800
Asistencia personal laboratorio	40	10	400
Diseño	45	328.5	14782.50
Cálculo	50	175.5	8775
Redacción de documentación	20	180	3600
Total gastos personal (€)			28357.50

Costes de transporte

La tabla siguiente recoge los gastos relativos al transporte:

Tabla 15. Gastos correspondientes al transporte.

<i>Gastos de transporte</i>	$C_U(\text{€/viaje})$	t (viaje)	$C_5(\text{€})$
Transporte	10	20	200
Total gastos transporte (€)			200



Coste total del Proyecto

A continuación se recoge en una tabla el coste total del Proyecto:

Tabla 16. Gastos totales del Proyecto.

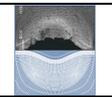
<i>Tipo de gasto</i>	<i>Coste (€)</i>
Caracterización de los materiales	680
Hardware	215.46
Software	5713.40
Personal	28357.50
Transporte	200
Coste Bruto (€)	35166.36
Beneficio Industrial (6%)	2109.98
Subtotal	37276.34
IVA (21%)	7828.03
Total	45104.37

El coste total del Proyecto asciende a CUARENTA Y CINCO MIL CIENTO CUATRO CON TREINTA Y SIETE CÉNTIMOS DE EURO.

Oviedo a 08/07/2013

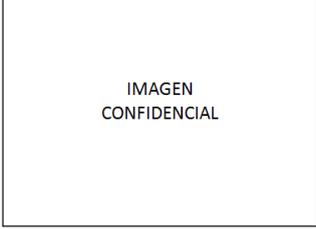
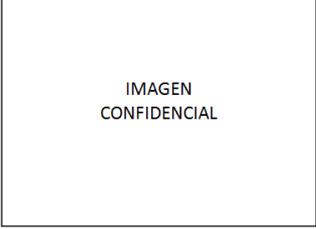
El Proyectista,

Javier Martínez Villa



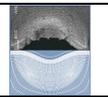
Futuras líneas de trabajo

- Caracterizar los materiales mediante otros posibles métodos de modo que sea posible describir el comportamiento de los materiales de la forma más exacta posible.
- Hacer una revisión bibliográfica sobre el estado de la caracterización de materiales poliméricos, fundamentalmente del PS y del PET.
- Intentar simular los modelos de bandejas con el espesor real de las mismas.
- Tratar de simular el ensayo de compresión lateral que se realiza en las instalaciones de *Linpac Packaging Pravia S.A.U* y validar la simulación con los correspondientes valores reales del ensayo. De esta forma sería posible comprobar si las propiedades empleadas en la simulación se corresponden con las que realmente presentan los materiales.

	<i>Antes de ensayo</i>	<i>Después de ensayo</i>
<i>PS:</i> <i>Modelo</i> <i>89</i>	 <p>IMAGEN CONFIDENCIAL</p>	 <p>IMAGEN CONFIDENCIAL</p>
<i>PET:</i> <i>Modelo</i> <i>1825-45</i>	 <p>IMAGEN CONFIDENCIAL</p>	 <p>IMAGEN CONFIDENCIAL</p>

Imágenes 262, 263, 264 y 265. Ensayo de compresión sobre las paredes laterales de las bandejas de PS (arriba) y PET (abajo).

- Intentar simular diferentes tipos de cargas sobre las bandejas, como por ejemplo las impuestas por los efectos de films y envoltorios, así como simular el comportamiento de la bandeja con producto en su interior.



Bibliografía

1. Packaging Materials. Polystyrene for food packaging applications. ILSI Europe Report Series. May 2002.
2. Packaging Materials. PET for Food Packaging Applications. ILSI Europe. Report Series. July 2000.
3. Pascual A. Guía de criterios de calidad y puntos de control en el diseño de envases y embalajes plásticos. AIMPLAS Instituto Tecnológico del Plástico. Laboratorio de envase.
4. Beltrán M, Marcilla A. Tecnología de polímeros.
5. Palacios J. Secado de polímeros. 2010.
6. Moreno A. Estudio del sector de los plásticos, edición 2012. Centro Español de Plásticos. 2012.
7. Castro A. Envases alimentarios o alimentos envasados. Arxiu d'etnografia de Catalunya 1989,7: 137-149.
8. Climpson J. The future of rigid plastics packaging. Pira International Ltd. 2005.
9. Boser L. Thermoforming manual and trouble-shooting guide.
10. Koester L, Nement S, Koester M. Thermoforming & Die cutting of recycled/virgin PET sheet. Lavergne Group.
11. Ashcroft M. Foam extrusion manual. Linpac Plastics International. 1992.
12. Norma UNE-EN ISO 178. Plásticos. Determinación de las propiedades de flexión. Septiembre 2011.
13. Norma UNE-EN ISO 527. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Noviembre 2012.