Resumen

El proyecto tiene como objetivo definir la ventana de proceso de inyección para microespumación MuCell® de probetas de ABS en dos niveles de reducción de peso (10% y 17%), determinar una metodología de análisis de morfología y establecer relación entre propiedades mecánicas y morfología.

Para ello se inyectan probetas cilíndricas utilizando el grado comercial de ABS MAGNUM™ 8434 de la empresa STYRON empleado en la industria de la automoción. Los parámetros de proceso elegidos como variables de estudio fueron el porcentaje de gas, la velocidad de inyección y la temperatura del molde.

Se realiza un análisis de pesos de las probetas inyectadas. En aquellas probetas de las condiciones que presentan una reducción de peso más cercana a los objetivos de 10% y 17% se realiza una caracterización morfológica y una determinación de propiedades mecánicas.

La caracterización morfológica se realiza mediante microscopia electrónica de barrido y análisis de imagen determinando tamaños de celda, densidades celulares y espesores de piel maciza y núcleo espumado. Mediante ensayos de tracción se obtiene la tensión de cedencia y el módulo de elasticidad.

Como conclusiones del estudio morfológico se observan 3 regiones diferenciadas en la morfología de la probeta: un núcleo espumado, una zona microcelular y una piel no espumada. En la zona microcelular se encuentran mayoría de celdas inferiores a 20 µm y en la zona núcleo se encuentran celdas con tamaños superiores a 100 µm.

En la caracterización mecánica, mediante ensayos de tracción, se observa una disminución de la resistencia máxima y del módulo de elasticidad a medida que aumenta el tanto por ciento de espumación del material.

Sumario

RESUMEN 1

SUMARIO 3

1. PREFACIO 5

1.1. Origen del Proyecto. 5

1.2. Objetivos del proyecto 5

2. INTRODUCCIÓN 6

2.1. Plásticos en automoción 6

2.2. Normativa 8

2.3. Espumas microcelulares 12

2.3.1. Inyección de espumas microcelulares 14

2.3.2. Gases inertes 17

3. MATERIALES Y PROCESADO 18

3.1. Descriptiva de material 18

3.2. Inyección de probetas 21

3.2.1. Preparación del material 21

3.2.2. Parámetros de inyección 22

3.2.3. Nomenclatura de probetas 24

4. MÉTODOS EXPERIMENTALES 28

4.1. Control de peso de las probetas 28

4.2. Caracterización Morfológica 29

4.2.1. Microscopía electrónica de barrido (SEM) 29

4.2.2. Análisis Morfológico 30

4.3. Caracterización mecánica 32

4.3.1. Ensayo de tracción 32

4.3.2. Cálculo y expresión de resultados 34

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 36

5.1. Estudio de la reducción de peso 36

5.2. Caracterización morfológica 40

5.3. Caracterización mecánica 45

6. ESTUDIO MEDIOAMBIENTAL 51

7. PRESUPUESTO 53

CONCLUSIONES 55

AGRADECIMIENTOS 57

BIBLIOGRAFÍA 59

Referencias bibliográficas 59

Bibliografía complementaria 60

ANEXOS 62

1. Prefacio

1.1. Origen del Proyecto.

El presente proyecto final de carrera surge con la intención de colaborar en la investigación del doctorando Javier Gómez Monterde en su tesis con el título "Caracterización de plásticos microcelulares para la reducción de peso en piezas interiores de automoción" durante su Doctorado Industrial en la empresa *SEAT* en colaboración con la *Universitat Politécnica de Catalunya (UPC)* y el *Centre Català del Plàstic (CCP*).

La reducción de peso es un objetivo fundamental en la industria de la automoción ya que comporta una disminución de consumos y emisiones consiguiendo mejoras de rendimiento y eficiencia energética. La Normativa Europea (EURO5 y EURO6) marca límites de emisiones muy restrictivos, la microespumación física de polímeros contribuye a la reducción de peso y por lo tanto a conseguir estos objetivos establecidos.

1.2. Objetivos del proyecto

El objetivo general del proyecto es definir la ventana de proceso para la inyección de probetas de ABS microespumadas mediante la tecnología MuCell® de dos niveles de reducción de peso (10% y 17%).

Con las probetas más cercanas al objetivo de reducción de peso se realiza una caracterización morfológica y ensayos de tracción.

Los objetivos concretos del proyecto son los siguientes:

- Definir las variables de proceso que afectan a la morfología obtenida.
- Diseño de experimentos reducido.
- Inyección de probetas.
- Control de peso.
- Caracterización morfológica mediante Microscopia Electrónica de Barrido y software de procesado de imagen.
- Caracterización mecánica mediante ensayos de tracción.

2. Introducción

2.1. Plásticos en automoción

El uso de plásticos en la automoción empezó en torno a 1950 y actualmente es difícil de imaginar un coche sin piezas plásticas. Los materiales plásticos dentro del automóvil han revolucionado la eficiencia, la seguridad y la funcionalidad de los vehículos. Los componentes plásticos han permitido reducir tiempos de montaje, introducir rápidas modificaciones de diseño y recortar costes en acabados. En la *Figura 1* se puede ver el incremento en utilización de plástico en un salpicadero actual en comparación con uno de 1960.

Figura 1. Imagen salpicadero de Seat 600[1](1960) y Seat Ibiza (2013)[2]

El sector de la automoción es un pilar importante dentro de la industria del plástico, tanto por volumen de producción como por esfuerzos en investigación y desarrollo.

En Europa, durante el año 2012, la demanda de plástico fue de 45.9 millones de toneladas. Tal como se puede ver en la *Figura 2* un 8.2% de las 45.9 millones de toneladas totales fueron destinadas a la industria de la automoción. Con un consumo de 3.8 millones de toneladas la industria de la automoción es la tercera en demanda, solo después de los sectores del Packaging y la Construcción[3].

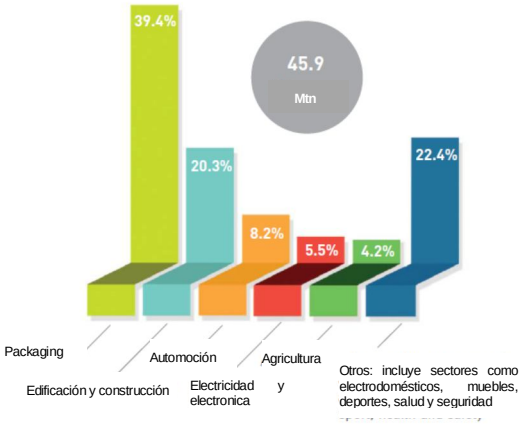


Figura 2. Gráfico de consumo de plástico por sectores en tanto por ciento en peso [3]

Las 3.8 millones de toneladas de plástico son las necesarias para la producción de las más de 200 piezas diferentes que forman parte del automóvil. Podemos encontrar piezas plásticas tanto en el interior como en el exterior del habitáculo, bajo el capó y en sistemas eléctricos y de iluminación. En la *Figura 3* se muestran la gráfica de los porcentajes de uso del plástico dentro del vehículo

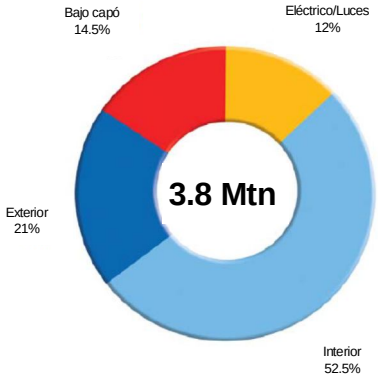


Figura 3. Gráfico en tanto por ciento de ubicación de piezas plástica en el vehículo [3].

Son necesarias piezas de naturalezas muy diversas para poder satisfacer funciones muy diferentes. En la *Figura 4* se muestran los porcentajes de las más de 10 familias de plásticos utilizadas en la automoción.

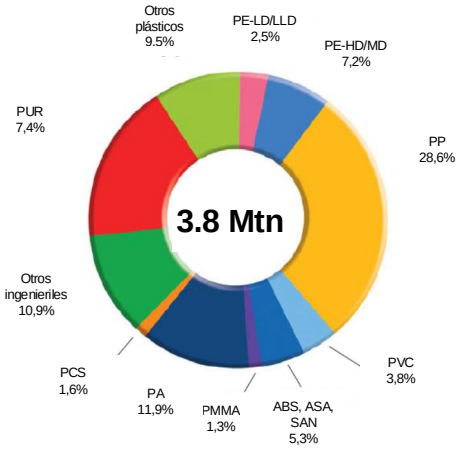


Figura 4. Gráfico en porcentaje en peso de familias de plásticos utilizadas en automoción[3].

2.2. Normativa

La aplicación del Reglamento CE nº715/2007 del Parlamento y el Consejo Europeo comporta el cumplimiento de exigentes objetivos de emisiones a los fabricantes de turismos y vehículos industriales ligeros de hasta 2610 kg. Los límites en emisiones marcados se han dividido en dos etapas según su fecha de aplicación EURO 5 y EURO 6. En la *Tabla1* se muestran los límites de emisiones para turismos [4].

Tabla1. Especificaciones de emisiones máximas según el reglamento Euro 5 y Euro 6 [4].

	Fecha de aplicación	CO (mg/km)	HCT (mg/km)	HCNM (mg/km)	NOx (mg/km)	HCT+NOx (mg/km)	PM (mg/km)
Diesel							
Euro 5	Setiembre 2009	500	-	-	180	230	5
Euro 6	Setiembre 2014	500	-	-	80	170	5
Gasolina							
Euro 5	Setiembre 2009	1000	100	68	60	-	-
Euro 6	Setiembre 2014	1000	100	68	60	-	5

Glosario de emisiones:

CO: Masa de dióxido de carbono
HCT: Masa total de hidrocarburos
HCNM: Masa de hidrocarburos no metanos
NOX: Masa de óxidos de nitrógeno
HCT+NOx: Masa combinada total de Hidrocarburos y óxidos de nitrógeno totales
PM: Masa de partículas

Este tipo de reglamentos empezaron a funcionar en el 1992 con la EURO 1 y han llegado hasta el 2014 con actualizaciones en los niveles de emisiones cada vez más estrictos. Se crearon con el objetivo de disminuir el impacto negativo de los vehículos en la salud de la población y en el medio ambiente.

Para cumplir con estos reglamentos los fabricantes automovilísticos han desarrollado sistemas muy diversos para la reducción de emisiones. Entre los más conocidos tenemos: Catalizadores, Sondas lambda, válvulas EGR, filtros de partículas, sistemas Adblue® de urea, etc.

Actualmente, con el objetivo de reducir emisiones y consumos muchos fabricantes se centran en la reducción en peso de los turismos. Por cada 100 kg de reducción de peso en un vehículo tenemos una reducción de 8.5 g/km en emisiones de CO_2 y 0,4 l/km de consumo de combustible [3].

El peso de los vehículos ha tenido una tendencia creciente debido al aumento de sistemas electrónicos y la introducción en el mercado de vehículos de propulsión eléctrica, con el correspondiente aumento de peso debido al uso de motores eléctricos, baterías y otros subsistemas.

Tal como se puede ver en el gráfico de la *Figura 5* un 74% en peso de un automóvil es metal. Los componentes metálicos son el primer objetivo en cuanto a reducción de peso.

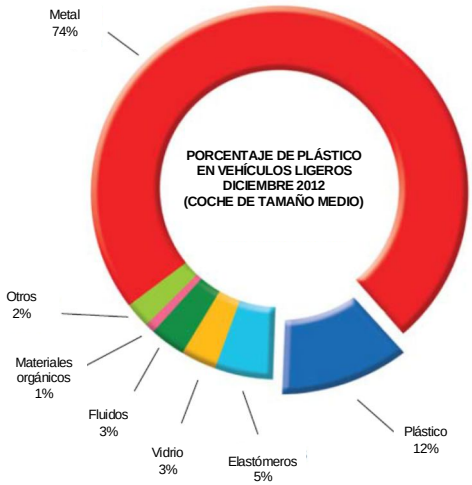


Figura 5. Gráfico de porcentaje en peso de materiales dentro de un vehículo [4].

o Los fabricantes plantean diversas opciones para llegar a una reducción de peso significativa en metal. A continuación se exponen ejemplos de aplicación de diversos fabricantes divididos en chasis, carrocería y piezas de alta solicitación mecánica.

-Chasis:

Se substituye acero convencional por acero HSLA o HIPS. Estos aceros son de alta resistencia con alta absorción de impacto, pudiendo realizar chapas de menor espesor con su correspondiente reducción de peso. También se plantea el cambio de material en piezas de acero por aluminio o magnesio[5][6].

-Carrocería:

Diversos fabricantes que optan por el uso de aluminio o fibra de carbono en carrocería. Recientemente tanto BMW como Volkswagen han introducido la fibra de carbono en producción en serie para vehículos. Se utiliza CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) producido mediante RTM (moldeo por transferencia). La densidad de los CFRP es de un 20 % la del acero previamente utilizado [7].

-Piezas de alta solicitación mecánica:

Podemos encontrar ejemplos de substitución de piezas metálicas por piezas plásticas. La compañía BASF ha desarrollado para el modelo Mercedes Benz GL un soporte motor realizado mediante inyección de poliamida reforzada con fibra de vidrio. Esta pieza es 3 veces más ligera que la pieza de colada de aluminio a la que substituye. Esta pieza responde a las mismas solicitaciones mecánicas y mejora propiedades acústicas y de aislamiento térmico [8].

Mediante el uso de estos materiales se consigue satisfacer las necesidades mecánicas y de funcionamiento dentro del automobil, teniendo un gran potencial de uso. A pesar de ello, debido a sus altos costes, todavía es pronto para que estos materiales puedan substituir a materiales metálicos actuales a gran escala.

- El siguiente objetivo en reducción de peso son los materiales plásticos. Tal como podemos ver en la *Figura 4* el 12 % en peso de un vehículo es plástico.

La reciente introducción de la microespumación MuCell® en piezas de automoción abre una nueva puerta a la reducción de peso en plásticos. El desarrollo de esta tecnología en otros tipos de piezas y polímeros utilizados en automoción, es vital para conseguir reducciones totales en peso del vehículo.

En la *Figura 6* se muestran diversas piezas para automoción actualmente fabricadas por la tecnología MuCell®.

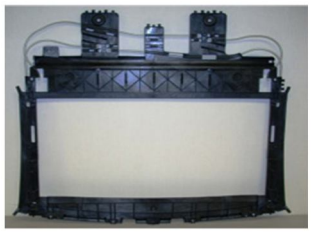
Armazón panel de instrumentos	Soporte panel puerta	Guia maletero
Ford	Mercedes-Benz	
Marco ventilador	Marco techo solar	Recubrimiento interior puerta
		
BMW	GM	

Figura 6. Imágenes de piezas para la industria de la automoción producidas mediante tecnología Mucell® [12],

2.3. Espumas microcelulares

La idea de trabajar con plásticos microcelulares surgió a principios de 1980 cuando el Dr. Nam Suh y sus estudiantes del Instituto de Tecnología de Massachussets (MIT) desarrollaron espumas termoplásticas con diámetros de celda inferiores a 100 µm y densidades celulares superiores a 10^6 celdas/cm^3.

El objetivo de estas espumas microcelulares es la reducción de peso en polímeros sin disminuir substancialmente sus propiedades mecánicas. Para conseguir este objetivo es necesaria la reducción de tamaño de celda sin variar el tanto por ciento de espumación.

En la *Tabla 2* se comparan diferentes propiedades y características entre espumas convencionales, espumas microcelulares y sólidos [10].

Tabla 2. Tabla de características espuma microcelular [10].

Característica comparada	Espuma convencional	Espuma microcelular	Sólido
Densidad celular media (celdas/cm^3)	10^2-10^6	10^6-10^9 o superior	NA
Tamaño de celda medio (µm)	250 o superior	3-100	NA
Rechupes	No	No	Si
Estructura celular	abierta o cerrada	Cerrada	NA
Máximo ratio longitud de flujo /grosor	50-100:1	Hasta 350:1	Hasta 300:1
Grosor de pared	Pared ancha, 4-9 mm (hasta 50 mm)	Pared estrecha, 0,5-3mm (posibilidad hasta 6 con bajo ratio de flujo y alta velocidad)	0,5-6 mm (hasta 9 mm)
Acabado superficial	Pobre	Entre espuma convencional y sólido*	Clase A
Reducción de tiempo de ciclo	Largo tiempo de ciclo debido al grosor de pared, dependiente del grosor de pared.	Hasta un 50% de reducción de peso respecto a pieza sólida para ≤ 3mm	NA

*Posibilidad de mejora del acabado superficial aplicando tecnología Heat and Cool al molde.

Las ventajas más importantes de la espumación microcelular son las siguientes [10]:

- Aumento de la tenacidad sin aumento de peso.

- En sólidos de pared fina difíciles de llenar por restricciones de flujo, disminuye la fuerza de cerrado, así como la presión de inyección límite.

- Facilita el llenado de molde ya que el gas disperso en el polímero reduce la viscosidad significativamente.

- Se eliminan problemas de estabilidad dimensional, marcas de flujo, defectos de planitud y tensiones residuales después del moldeo debido a la eliminación de las etapas de empaquetamiento y mantenimiento.

- Reducción de tiempo de ciclo.

- Ahorro de energía. No se necesita una presión de inyección pico y se reduce en un 50% la fuerza de cierre.

Por el contrario las principales desventajas de la espumación microcelular son:

- Mal acabado superficial
- Para moldes multicavidad es necesario un sistema de bebederos cuidadosamente equilibrados.
- Exclusivo para aplicaciones no transparentes.
- Tecnología de proceso más complicada.

2.3.1. Inyección de espumas microcelulares

La inyección de espumas microcelulares con tecnología MuCell® de Trexel es posible mediante la introducción de las siguientes modificaciones a una inyectora convencional [12].

1.- Unidad de control de fluido supercrítico
2.- Interface de gestión de fluido supercrítico
3.- Inyector de fluido supercrítico
4.- Válvulas antiretorno

En la *Figura 7* se muestra la ubicación en la inyectora de los accesorios necesarios.

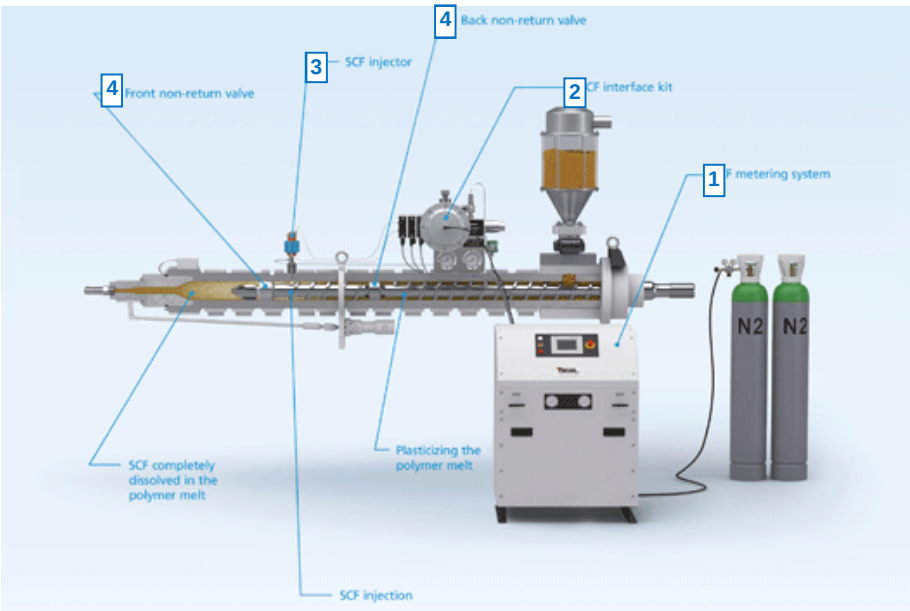


Figura 7. Esquema de tecnología Mucell® en una inyectora tradicional [12].

En la *Figura 8* se podemos observar la inyectora en el CCP con sistema Mucell® instalado.

Figura 8. Imagen de Inyectora con sistema Mucell® en el CCP

1.-Unidad de suministro de fluido supercrítico

El sistema cuenta con un una unidad de suministro de fluido en estado supercrítico. La unidad dispone de un sistema de compresión regulado que garantiza la entrada del fluido en la inyectora en condiciones supercríticas. En nuestro caso el fluido utilizado es N_2. En la *Figura 9* podemos observar la unidad de suministro de fluido supercrítico utilizada durante la inyección en el CCP.

Figura 9. Imagen de unidad de suministro de fluido supercrítico en el CCP

2.- Consola de gestión de fluido supercrítico

Se trata de un sistema de control en el que es posible comprobar y regular los parámetros en los que se inyecta gas al polímero fundido. En la *Figura 10* podemos observar la consola de gestión de fluido supercrítico utilizada durante la inyección en el CCP.

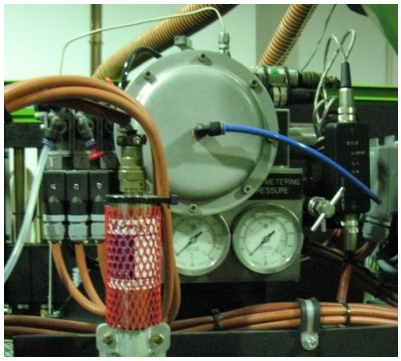


Figura 10. Imagen de consola de gestión de fluido supercrítico en el CCP

3.- Inyector de fluido supercrítico

Se añade a la calandra del husillo una válvula inyectora de fluido supercrítico. Con este inyector se regula el caudal y tiempo de inyección del fluido. En la *Figura 11* se muestra la imagen del inyector utilizado durante la inyección en el CCP y una sección tanto del inyector como del husillo en la que podemos ver la manera en que se inyecta fluido supercrítico.

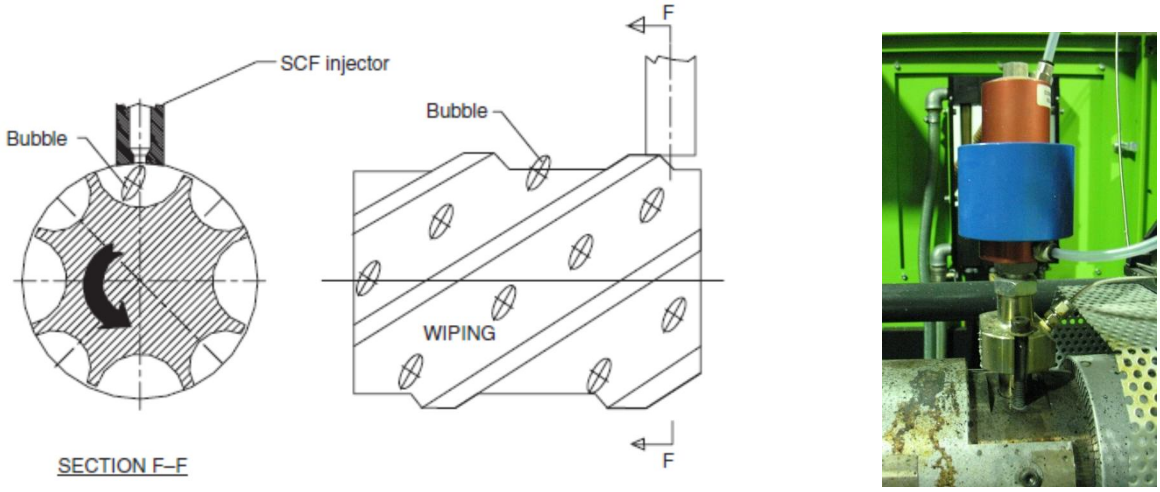


Figura 11. Esquemas de inyección de gas por parte del inyector e imagen del inyector montado en el barril del husillo [10].

4.-Válvulas antirretorno

Se añade para el husillo una válvula antiretorno que impide el retorno de material con gas disuelto hacia atrás o su salida hacia adelante, en el momento de la plastificación, asegurando una única fase polímero/gas. En la Figura 12 podemos observar las secciones de las válvulas que impiden el movimiento del polímero una vez se ha inyectado el gas.

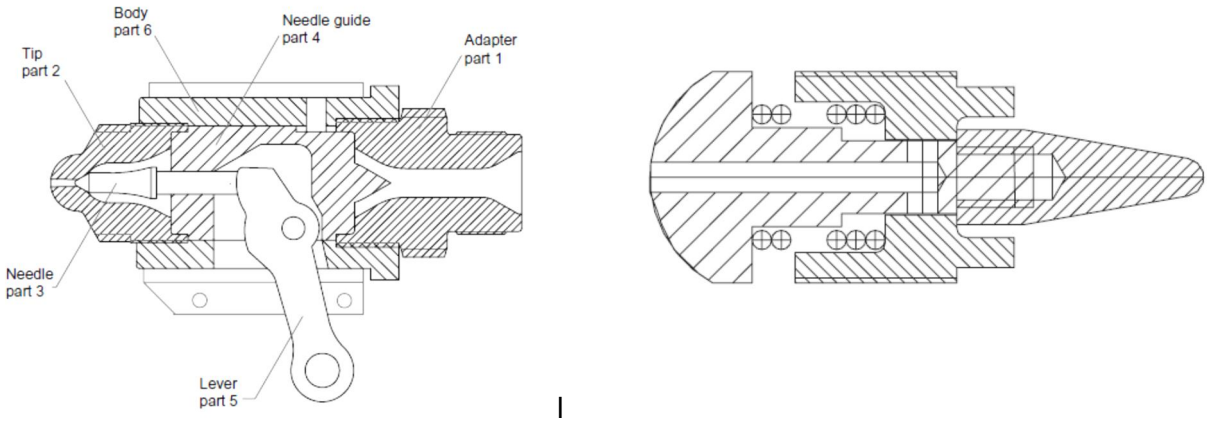


Figura 12. Esquema de sección de las válvulas antirretorno necesarias en el sistema. [10].

2.3.2. Gases inertes

Los gases inertes, en especial el dióxido de carbono y el nitrógeno, son los más utilizados como agentes espumantes.

El nitrógeno se utiliza ampliamente por su bajo coste, por ser abundante y ambientalmente aceptable. El CO_2 se obtiene como subproducto de la producción de amoniaco o en procesos de fermentación, o extraído del aire o de otros recursos naturales. Es menos aceptado ya que se considera un gas de efecto invernadero. El oxígeno no se utiliza como agente espumante pero es importante tenerlo en cuenta ya que difunde en espacios celulares de espumas de celdas cerradas[11].

Otra de las razones por las que N_2 y el CO_2 son ampliamente utilizados como agentes espumantes son su relativamente moderadas temperatura y presión críticas. En la *Tabla 3* se muestran los valores de temperatura y presiones críticas.

Tabla 3. Tabla de características gases inertes [11].

	CO_2	N_2	O_2
Temperatura crítica, ºC	31	-146,9	-118,3
Presión crítica, MPa	7,38	3,4	5

Como es sabido, un material está en estado de fluido supercrítico (SCF) cuando se mantiene a una temperatura y presión por encima de su temperatura y presión crítica. En este estado supercrítico el material tiene densidad de líquido pero con la habilidad de fluir de un gas sin casi viscosidad o tensión superficial [11]. En la *Figura 13* se observa en qué zona del diagrama de fases nos encontramos en estado supercrítico.

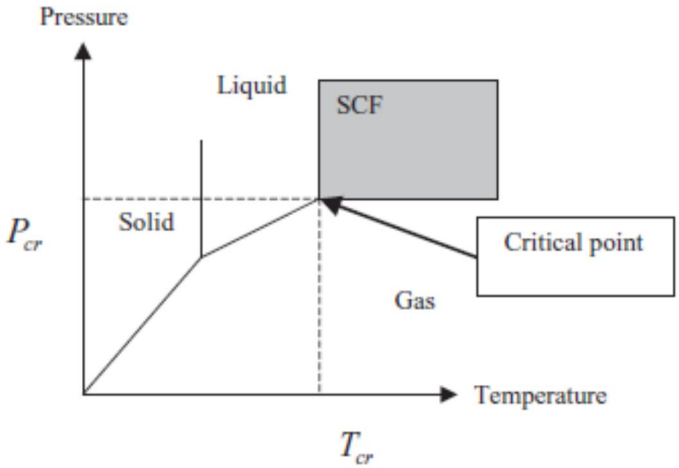


Figura 13. Gráfico de fases explicativo del estado de los fluidos supercríticos [10].

Cuando un polímero fundido saturado con fluido supercrítico sufre una rápida caída de presión, el polímero se supersatura con el gas, se produce una muy alta nucleación de celdas y una alta concentración y crecimiento de estas [11].

3. MATERIALES Y PROCESADO

3.1. Descriptiva de material

Para la inyección se ha utilizado resina ABS MAGNUM™ 8434 de la empresa STYRON, un grado comercial destinado a la industria de la automoción.

Se decidió por el uso de un material amorfo debido a su naturaleza predecible y simplicidad estructural que favorece el estudio de la nucleación y crecimiento de celdas.

Normalmente los materiales amorfos tienen una amplia ventana de procesamiento para moldeo por inyección microcelular además de una excelente arquitectura de celdas.

A pesar de ello, el ABS tendrá amplias variaciones por las diferentes fases gomosas en el material base que pueden influenciar significativamente los resultados. Además la arquitectura de celdas para diferentes grados comerciales de ABS puede ser diferente también. [10]

El ABS, es un copolímero formado a partir de Acrilonitrilo, Butadieno y Estireno pertenece a una familia muy extensa y versatil de materiales poliméricos termoplásticos derivados del poliestireno (PS). En la *Figura 14* se muestra la estructura química de las unidades repetitivas constituyentes del ABS.

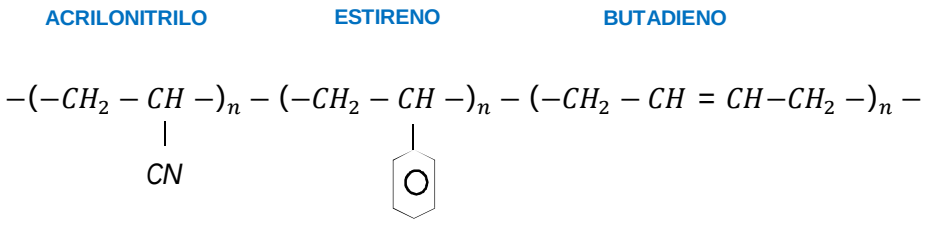


Figura 14. Estructura química de los monómeros componentes del ABS (Acrilonitrilo-Estireno-Butadieno)

Cada una de las unidades repetitivas que forman parte del ABS tiene una finalidad específica dentro del copolímero:

-*Acrilonitrilo:* Contribuye a un aumento de resistencia química, dureza superficial y resistencia a la radiación UV.

-*Estireno:* El componente estirénico contribuye a facilitar la procesabilidad de la mezcla. Aporta resistencia mecánica y una alta rigidez.

-*Butadieno*: Como componente elastomérico, contribuye a incrementar la tenacidad y resistencia a impacto del sistema.

La obtención de estos copolímeros puede llevarse a cabo con diferentes técnicas de polimerización, dando lugar a materiales con características muy distintas. Por otro lado las características del ABS presentan una elevada variabilidad en función de la proporción de los diferentes monómeros.

Las principales características son las siguientes [13]:

(1) Alta resistencia a impacto.

(2) Buena rigidez.

(3) Excelente calidad superficial.

(4) Alta estabilidad dimensional a altas temperaturas.

(5) Buena resistencia química.

Las desventajas principales son:

(1) Falta de transparencia.

(2) Resistencia pobre a factores atmosféricos.

(3) Resistencia pobre a la llama.

El ABS es un material ampliamente empleado en automoción, en la *Figura 15* se muestran diversos ejemplos de utilización. Las aplicaciones son: consolas centrales, componentes de salpicadero, paneles puerta, embellecedores exteriores, recubrimientos de montantes, spoilers, carcasas de luces, etc.

Figura 15. Imágenes de piezas de ABS para automoción. Styron [14].

3.2. Inyección de probetas

El comportamiento del ABS durante el proceso de inyección es altamente predecible gracias a su naturaleza química, por su estructura amorfa y por sus productos de degradación fácilmente detectables.

Los parámetros más importantes a tener en cuenta son los siguientes[13]:

(1) El carácter higroscópico del ABS. Puede absorber hasta un 0,3% de humedad en 24h. Debe ser deshumidificado antes de la inyección, sobretodo para tener una buena calidad superficial.

(2) Los límites de temperaturas de procesado se encuentran en torno a 250-260ºC cuando se trabaja a altas velocidades de husillo y altas contrapresiones. La degradación puede ocasionar burbujas, marcas de flujo y otros defectos de inyección, para minimizarlo es aconsejable purgar el material después de cada inyección.

(3) Las viscosidad puede variar considerablemente entre los diferentes grados comerciales (Rango entre 80 hasta 150:1)

(4) Baja contracción por moldeo debido a su naturaleza amorfa (0,082-0.088cm/cm).

3.2.1. Preparación del material

Previo a la inyección se procede al secado del ABS a 80ºC durante 3h. Este proceso se realizará mediante una tolva secadora *Piovan* con punto de rocío de -40ºC.

Figura 16. Imágenes de sistema de secado de granza PIOVAN

3.2.2. Parámetros de inyección

La inyección se realiza utilizando una inyectora Engel modelo Victory 110 con fuerza de cierre de 110 toneladas equipada con una válvula de inyección serie II de 25mm, con un sistema de suministro de fluido supercrítico MuCell® y una boquilla cerrada para dicho sistema (Trexel Inc.,Woburn, MA, EEUU).

El perfil de temperaturas de proceso escogido, de la tolva a la boquilla, es de 160, 220, 230, 245 y 250 ºC. Este perfil se utiliza tanto para probetas macizas como espumadas.

Primeramente se inyectaron las probetas en macizo para establecer parámetros de inyección correctos para el molde multicavidad utilizado. Posteriormente se inyectan las diferentes condiciones espumadas, mediante criterio de pieza llena, mínimo volumen de plástico con el que conseguimos llenar la pieza.

Para las condiciones de objetivo de reducción de peso del 10% se establecen constantes las condiciones de la alimentación de gas N_2 : un caudal de consumo de gas de 0.35 kg/h, un tiempo de apertura del inyector de 4 s y un volumen de dosificación de 71 cm^3. Una vez establecidos estos parámetros tenemos un porcentaje de carga de gas de 0.6 %.

Para las condiciones con objetivo de reducción de peso del 17% se establecen constantes las condiciones de la alimentación de gas N_2 : un caudal de consumo de gas de 0.45 kg/h, un tiempo de apertura del inyector de 4.5 s y un volumen de dosificación de 68 cm^3. Una vez establecidos estos parámetros tenemos un porcentaje de carga de gas de 0.93 %.

Se fijaron tres parámetros de inyección a controlar en dos niveles diferentes de estudio. Se determinó un nivel alto, un nivel bajo más un nivel intermedio. En la tabla 4 se muestra los parámetros y sus niveles.

Tabla 4. Tabla de condiciones proceso empleadas

Factor	Nivel		
	-1	0	1
Reducción de peso (%)	0.6	0.80	0.94
Velocidad de inyección (cm^3/s)	40	70	100
Temperatura de molde (ºC)	35	47	60

Se consideraron como parámetros de inyección para el estudio el porcentaje de gas, velocidad de inyección y temperatura del molde. Con dos niveles y tres parámetros a estudio se estableció una matriz de ensayo 2^k .Esto nos da un total de 8 condiciones de inyección más una condición intermedia.

Tabla 5. Tabla de condiciones de inyección y parámetros

	Gas inyectado	Velocidad de inyección	Temperatura de molde
	%	cm³/s	ºC
C1	0.6	40	35
C2	0.6	100	35
C3	0.93	100	60
C4	0.6	40	60
C5	0.6	100	60
C5'	0.6	100	60
C6	0.93	40	60
C7	0.93	40	35
C8	0.93	100	35
C0	0.8	70	47

En la inyección de la condición C5, con los parámetros con los que trabajábamos faltaba tiempo de molde cerrado, lo que producía un hinchamiento de las probetas una vez fuera del molde. Por ello se repitió esta condición de inyección añadiendo 3 segundos más de tiempo de molde cerrado (C5').

3.2.3. Nomenclatura de probetas

3.2.3.1 Parámetros de inyección

Se establece una nomenclatura para facilitar el reconocimiento de los parámetros de cada condición. Para cada parámetro se establece una posición dentro de la nomenclatura:

1ª Letra: Porcentaje de gas.
2ª letra: Velocidad de inyección.
3ª letra: Temperatura de molde.

Para cada nivel se le asigna una letra:

A: Nivel alto
M: Nivel medio
B: Nivel bajo

Tabla 6. Tabla con nomenclatura de probetas según niveles

Nomenclatura	Gas inyectado	Velocidad de inyección	Temperatura de molde
	%	cm^3/s	ºC
A	0.93	100	60
M	0.80	70	47
B	0.6	40	35

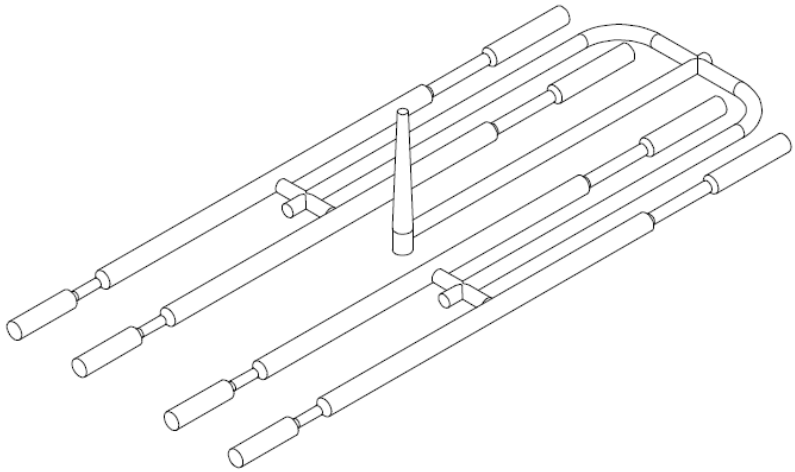
Tabla 7. Tabla de nomenclatura de condiciones según parámetros y niveles.

Nomenclatura	Condición	Gas inyectado	Velocidad de inyección	Temperatura de molde
		%	cm^3/s	ºC
AAA	C3	0.93	100	60
ABA	C6	0.93	40	60
AAB	C8	0.93	100	35
ABB	C7	0.93	40	35
BBB	C1	0.60	40	35
BAB	C2	0.60	100	35
BBA	C4	0.60	40	60
BAA	C5	0.60	100	60
BAA'	C5'	0.60	100	60
MMM	C0	0.8	70	47

3.2.3.1 Geometría molde

Se inyectaron probetas cilíndricas mediante un molde equilibrado de 4 cavidades con la geometría que se puede observar en la *Figura 17.*

La elección de este molde para la inyección viene dada por el largo recorrido del material dentro del molde. La larga longitud de flujo favorece la estabilización de la microespumación además de hacer posible la observación de las diferencias morfológicas entre celdillas a medida que nos alejamos del punto de inyección.



.

Figura 17. Vista isométrica de las probetas más el bebedero

De cada cavidad inyectada es posible sacar dos tipos diferentes de probetas cilíndricas de tracción. De 4 y 5 mm de sección. En la *Figura 18* se muestra la probeta que se extrae de cada cavidad inyectada.

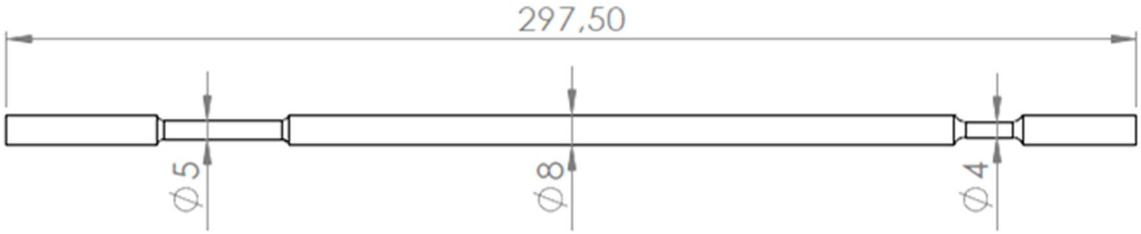


Figura 18. Vista en planta de probeta de una cavidad entera con medidas.

Para determinar en qué posición se encuentra cada probeta dentro del molde, se establece el sistema de nomenclatura mostrado en la *Figura 19.*

X indica el número correlativo de inyectada (del 1 al 15)

A, B, C o *D* indica la posición en *X* dentro del molde

1 o *2* indica la posición en Y dentro del molde

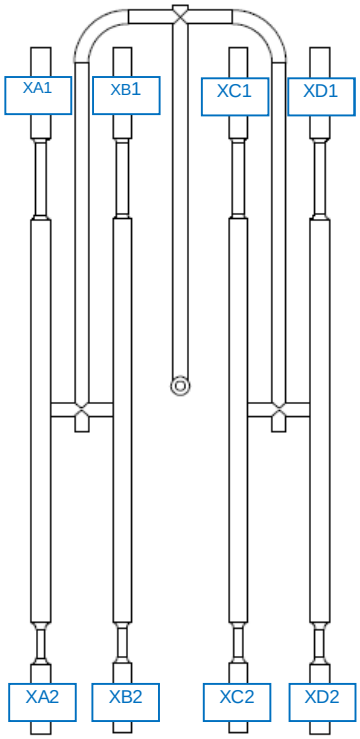


Figura 19. Vista en planta de las probetas con el bebedero con nomenclatura establecida

La cavidad B del molde no llena completamente en ninguna de las condiciones inyectadas. Esto es debido a una mayor refrigeración del molde en esta cavidad respecto a las otras, lo que produce que el material solidifique antes de llenar completamente la cavidad.

Figura 20. Imagen con la probeta de la cavidad B con falta de material.

Con el uso de la nomenclatura es sencillo determinar en qué condiciones se ha realizado la inyección de una probeta en concreto. A continuación se explican la información que se puede extraer de un ejemplo de nomenclatura en concreto:

Ejemplo de nomenclatura:

ABB-10D1

A: Probeta con condiciones de inyección 0.93% gas inyectado. (A- Nivel Alto)

B: 40 cm3/s de velocidad de inyección. (B- Nivel Bajo).

B: 35 ºC de temperatura de molde. (B- Nivel Bajo)

10: Décima serie de inyección.

D: Cavidad D del molde.

1: Posición superior de la probeta.

4. MÉTODOS EXPERIMENTALES

4.1. Control de peso de las probetas

Principio del método

Se pesan las probetas microespumadas y macizas. Analizando los resultados se obtienen valores de porcentajes de reducción de peso.

Probetas

Se pesan todas las probetas microespumadas inyectadas. Se dispone de 15 probetas de cada una de las cuatro cavidades para cada una de las 10 condiciones de inyección. Esto hace un total de 600 probetas microespumadas pesadas para el análisis.

En cuanto a las probetas macizas se pesan 15 probetas de cada una de las cuatro cavidades. Suma un total de 60 probetas macizas pesadas.

En la *Figura 21* se muestra la geometría de las probetas cilíndricas pesadas.

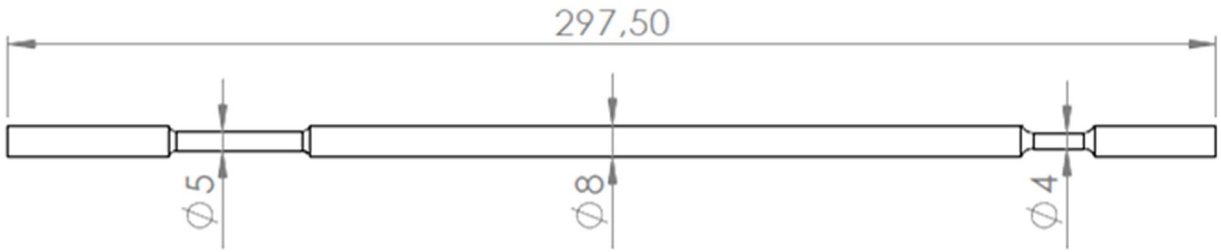


Figura 21. Medidas en milímetros de las probetas pesadas.

.

4.2. Caracterización Morfológica

4.2.1. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Principio de ensayo

Se obtienen imágenes de las muestras mediante microscopia electrónica de barrido. Es necesario el recubrimiento de las muestras con una capa de oro para garantizar la conductividad de estas. Las imágenes se realizaron a 25x mediante dos métodos de emisión de electrones diferentes: electrones retrodispersados y electrones secundarios. En la *Figura 22* se muestra un dibujo esquemático de análisis por microscopia electrónica de barrido de una muestra sólida.

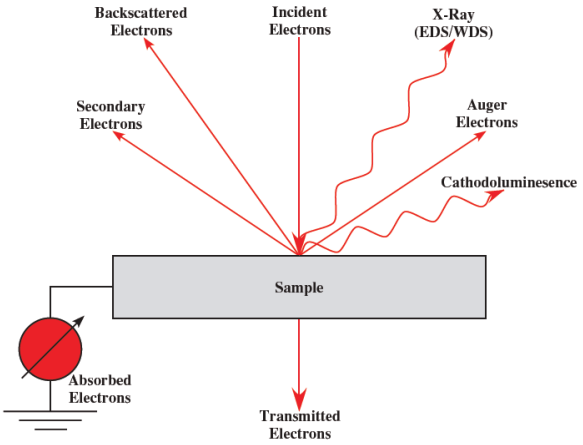


Figura 22. Dibujo esquemático del análisis SEM en una muestra sólida, mostrando alguna de las señales generadas que pueden ser utilizadas para caracterizar la microestructura.[16]

Probetas

Se realiza microscopía de 3 secciones perpendiculares a la dirección del flujo coincidiendo con los diferentes diámetros de la probeta. En la *Figura 23a y Figura 23b* se señalan las secciones analizadas y las imágenes obtenidas.

Se observaron un total de 22 superficies microespumadas mediante ambos métodos de microscopia, sumando un total de 44 imágenes.

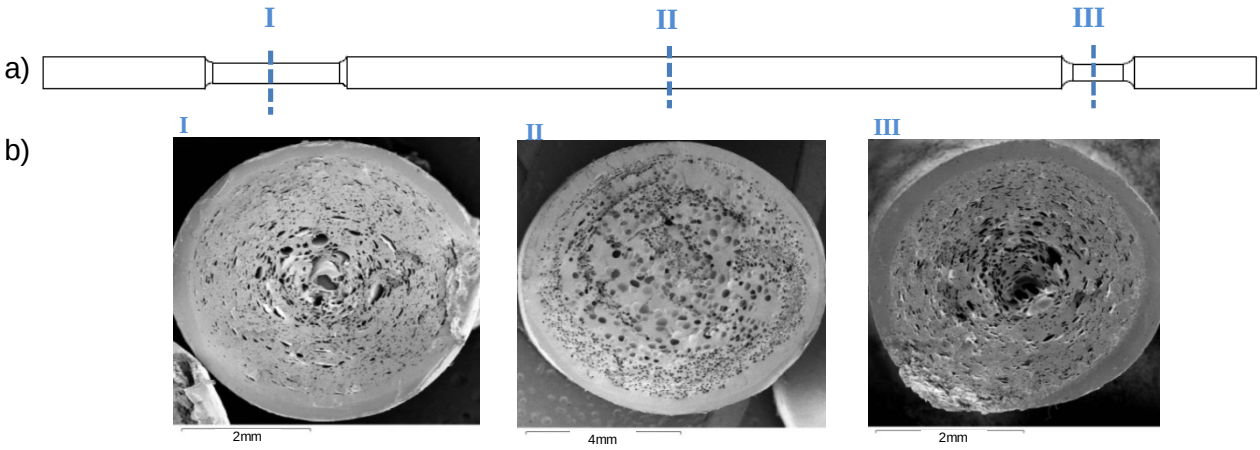


Figura 23. a) Esquema de las superficies de estudio dentro de la probeta. b) Imágenes SEM obtenidas.

4.2.2. Análisis Morfológico

Principio de procedimiento

Las imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido se analizan mediante un software IgorPro. Este software de análisis de imágenes registra el número de celdas, su posición en la probeta así como la superficie de cada una de ellas.

En un análisis de la superficie de las probetas se pueden diferenciar 3 zonas diferentes según su tipo de espumación tal como se puede ver en la *Figura 24:*

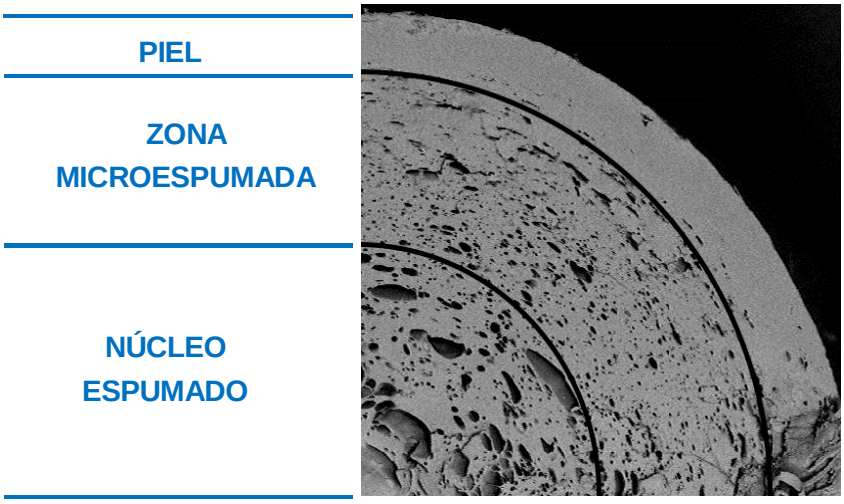


Figura 24. Microscopia SEM a x25. Marcaje de las diferentes zonas espumadas.

Se utiliza el programa *particle_analisys* de Javier Gomez realizado con Matlab. Por un lado como datos de entrada de este programa, tenemos las tablas de datos provenientes de Igorpro con número de celdas, tamaño y posición. Por otro lado, se introducen los espesores de núcleo, zona microcelular y piel. Como resultados de salida tenemos los datos de densidades y tamaños de celda agrupados en las diferentes zonas espumadas (núcleo y zona microcelular).

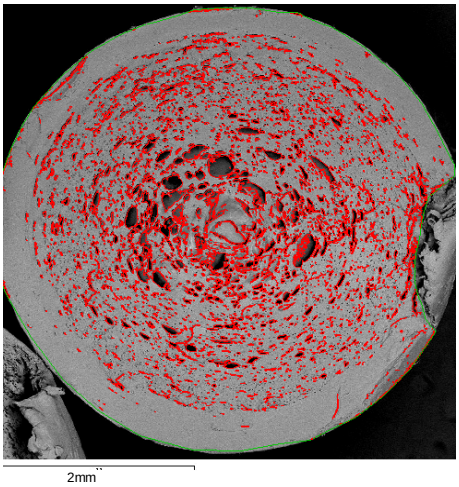


Figura 25. Resultado de conteo mediante IgorPro.

Probetas

Se dispone de 12 imágenes de superficies de ambas reducciones de peso (10% y 17%) conseguidas mediante microscopía SEM. De estas se utilizan las 7 superficies correspondientes a la sección central de las probetas utilizadas para el ensayo a tracción.

Estas 7 superficies se obtuvieron mediante microscopia electrónica de barrido por dos métodos diferentes, electrones retrodispersados y electrones secundarios. Por lo que suma un total de 14 imágenes analizadas**.**

En la *Figura 26.*se muestra la sección utilizadas para el análisis morfológico correspondiente a un diámetro de 3mm.

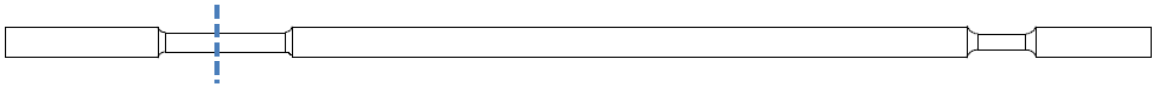


Figura 26. Esquema de superficie de microcopia utilizada.

4.3. Caracterización mecánica

4.3.1. Ensayo de tracción

Principio de ensayo

Los ensayos de tracción se realizan a temperatura ambiente (22ºC) y con una velocidad de desplazamiento de mordazas de 50mm/min.

Probetas

En cuanto a probetas microespumadas se seleccionaron las condiciones de inyección AAA y BAA'. Se seleccionaron estas condiciones ya que los parámetros de inyección son los que más se aproximan a la reducción de peso objetivo 10% y 17 % respectivamente. Se ensayaron un total de 12 probetas macizas y 12 espumadas. En *la Figura 27* se muestra la geometría utilizada y las probetas ensayadas.

Figura 32. Vista isométrica e imagen de las probetas ensayadas.

En la *Figura 28* se muestran las dimensiones de las probetas ensayadas a tracción.

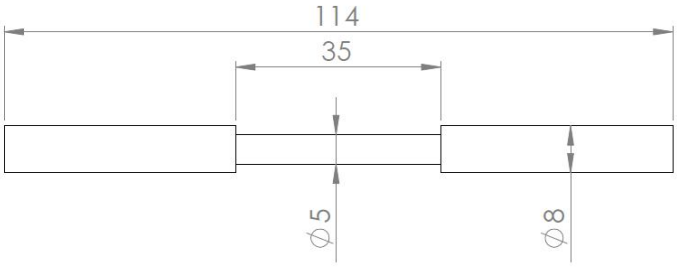


Figura 28. Medidas en milímetros de las probetas ensayadas a tracción.

Equipos

Se realiza el ensayo de tracción en una máquina de tracción Zwick/Roell modelo Amsler HC25, montada con una célula de carga de 2.5 kN.

Se utilizan mordazas con agarre cilíndrico para un correcto ajuste con las probetas utilizadas. En las *Figuras 29 y 30* se muestran imágenes de las probetas en la máquina durante el ensayo.

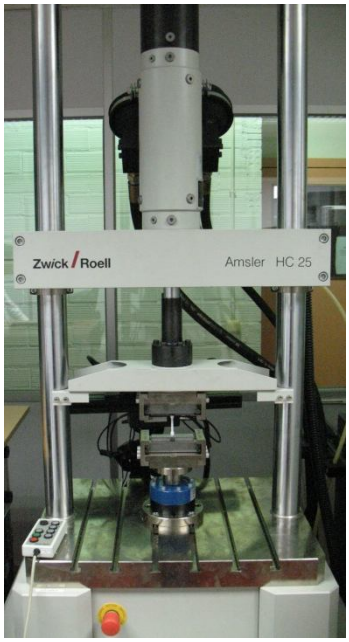


Figura 29. Imagen de máquina universal de ensayos de Tracción Zwick/Roell Amsler HC25.

Figura 30. Imagen de probeta cilíndrica posterior al ensayo.

4.3.2. Cálculo y expresión de resultados

Cálculo de esfuerzos

Se mide la sección transversal inicial de las probetas. Posteriormente se calculan los esfuerzos sobre esta sección inicial de la probeta [15]:

$$\sigma = \frac{F}{A} \qquad \textbf{\textit{Ec.1}}$$

Dónde:

σ es el valor de tensión correspondiente, expresado en megapascales;

F es la fuerza medida correspondiente, en newton;

A es el área de la sección transversal inicial de la probeta, en milímetros cuadrados.

Cálculo de las deformaciones

Se calculan los valores de deformaciones sobre la longitud inicial de referencia de la probeta.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \qquad \textbf{\textit{Ec.2}}$$

$$\varepsilon(\%) = 100 * \frac{\Delta L_0}{L_0} \qquad \textbf{\textit{Ec.3}}$$

Dónde:

ε es el valor de deformación correspondiente, expresado como una relación sin dimensiones, o en porcentaje;

L_0 es la longitud de referencia de la probeta, en milímetros.

ΔL_0 es el incremento de la longitud de la probeta entre las marcas de referencia en milímetros

Cálculo del módulo de Young

Se calcula el módulo de elasticidad en tracción definido antes sobre la base de dos valores de deformación especificados, en la zona elástica de la deformación.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \qquad \textbf{\textit{Ec.4}}$$

Donde:

E es el módulo de elasticidad en tracción, expresado en megapascales;
σ_1 y σ_2 son esfuerzos en megapascales, medidos a deformaciones ε_1 y ε_2, dentro de la deformación elástica.

5. Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la etapa experimental y se divide en tres apartados.

En el primer apartado se presentan los resultados de reducción de peso de la todas las condiciones inyectadas. En el segundo y tercer apartado se presentan los resultados de análisis morfológico y de ensayos a tracción para las dos condiciones de inyección más cercanas a la reducción de peso objetivo 10% y 17%.

5.1. Estudio de la reducción de peso

Se pesan todas las probetas microespumadas debido a las desviaciones altas de valores encontrados. El peso medio de las probetas macizas es de 12.99 +/- 0.1 g, este es el valor con el que se trabajará para el cálculo en reducciones de peso.

Inicialmente se establece una reducción de peso del 20% con la que no se consigue llenar el molde por completo. Posteriormente se establecen 10% y 17% como objetivos de reducción de peso. En la *Tabla 8* se muestran las reducciones de peso conseguidas para cada condición.

Tabla 8. Tabla con reducciones de peso de cada condición

Reducción de peso	Nomenclatura	Gas inyectado	Velocidad de inyección	Temperatura de molde	Reducción de peso	Desviación estandard
		%	cm³/s	ºC	%	%
10%	BBB	0.60	40	35	11,14	0,32
	BAB	0.60	100	35	11,12	0,63
	BBA	0.60	40	60	11,03	0,59
	BAA	0.60	100	60	9,25	0,51
	BAA’	0.60	100	60	9,33	1,23
17%	AAA	0.93	100	60	17,32	0,48
	ABA	0.93	40	60	18,76	0,69
	AAB	0.93	100	35	17,84	1,12
	ABB	0.93	40	35	19,09	0,77
13%	MMM	0.8	70	47	13,55	0,76

En la *Figura 31* se muestra el gráfico de barras pesos. Cada barra, marcada de un color diferente, designa una condición de inyección en concreto. Por orden, de izquierda a derecha se presentan probetas macizas, probetas con nivel medio de reducción de peso, probetas con objetivo de reducción de peso del 10 % y 17%. Los resultados se presentan con pesos en el eje *Y* y las diferentes cavidades del molde en el eje *X*.

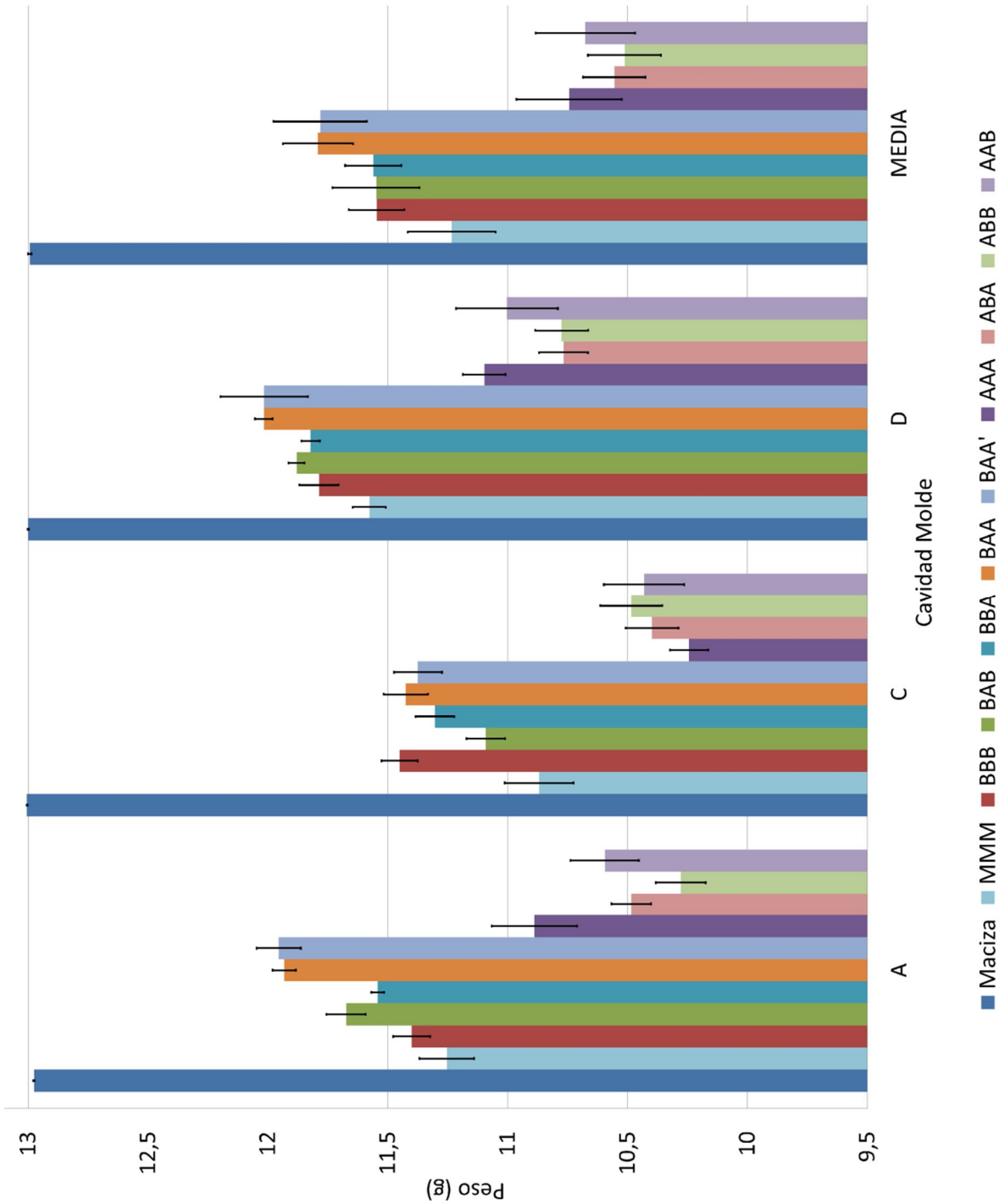


Figura 31. Gráfico de barras de pesos de probetas macizas y todas las condiciones de probetas microespumadas para cada cavidad del molde.

A continuación se muestran las gráficas de peso divididas en las reducciones de peso objetivo 10% y 17%. Los resultados de peso se muestran agrupados por cavidades (A, C y D), la cavidad B no llena completamente por lo que estas probetas se eliminan del estudio.

En el gráfico de la *Figura 32* se muestran los pesos para las condiciones de inyección con nivel de reducción de peso objetivo 10% (B: nivel bajo). El valor medio de pesos es de 11.65 ±0.22g lo que equivale a una reducción de peso media de 10.37 % respecto a las probetas macizas.

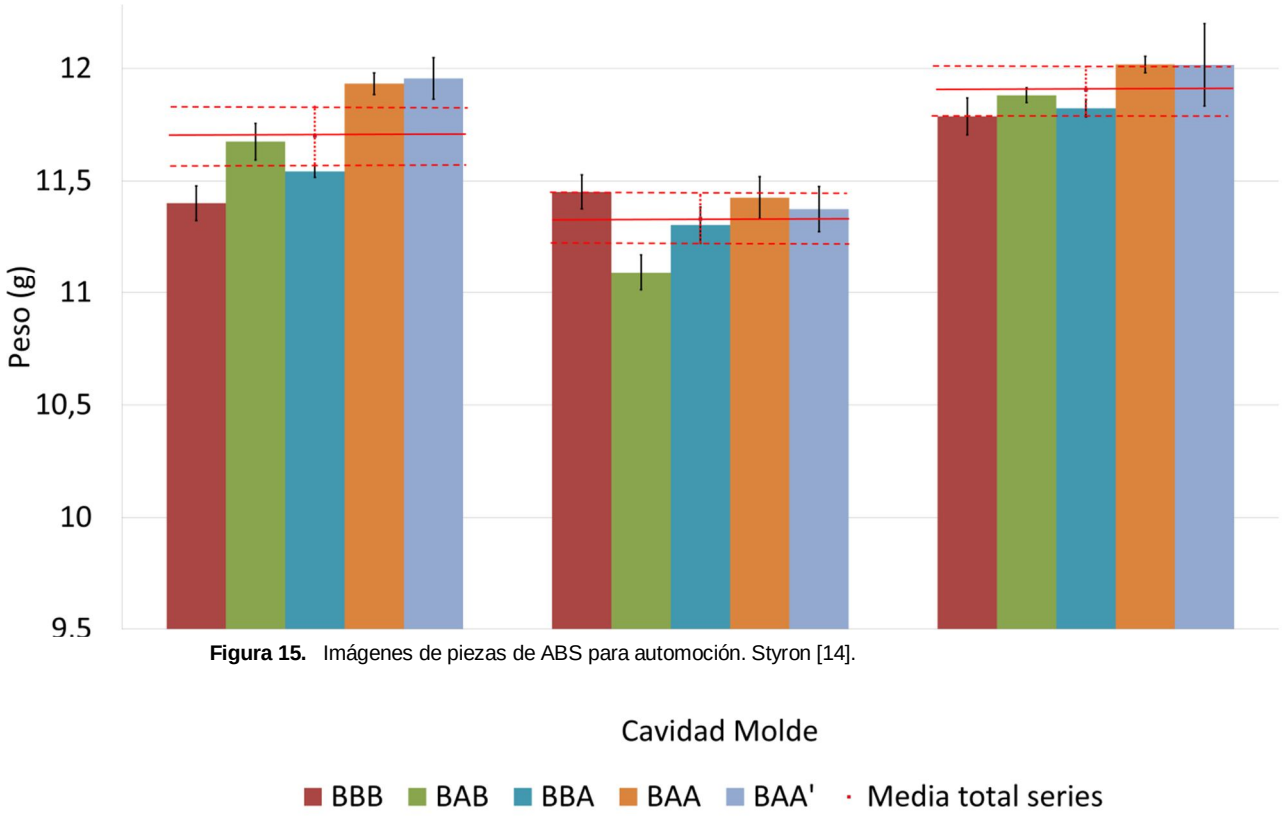


Figura 15. Imágenes de piezas de ABS para automoción. Styron [14].

Figura 32. Gráfico de barras de pesos de probetas espumadas con una reducción de peso del 10%

Tal como se observa en la *Tabla 8*, en la condición BAA' se determina un peso medio de 11.78g lo que implica una reducción de peso de 9.33%. Esta es la condición microespumada que se acerca más al objetivo del 10% de reducción de peso. La condición BAA' se inyectó con un 0.93% de gas, 100 cm^3/s de velocidad de inyección y 60 ºC de temperatura de molde.

Se observa que a altas velocidades de inyección y altas temperaturas de molde tenemos un mayor control sobre el peso de las probetas microespumadas. Las velocidades de inyección altas crean una mayor caída de presión en el molde que provoca mayor nucleación de celdas de forma homogénea [17].

En el gráfico de la *Figura 33* se muestran los pesos para las condiciones de inyección con un nivel de reducción de peso del 17% (A: nivel alto). El valor medio de peso de probetas es de 10.62g con una desviación típica de 0.30g, lo que equivale a una reducción de peso media de 18.25% respecto de las probetas macizas.

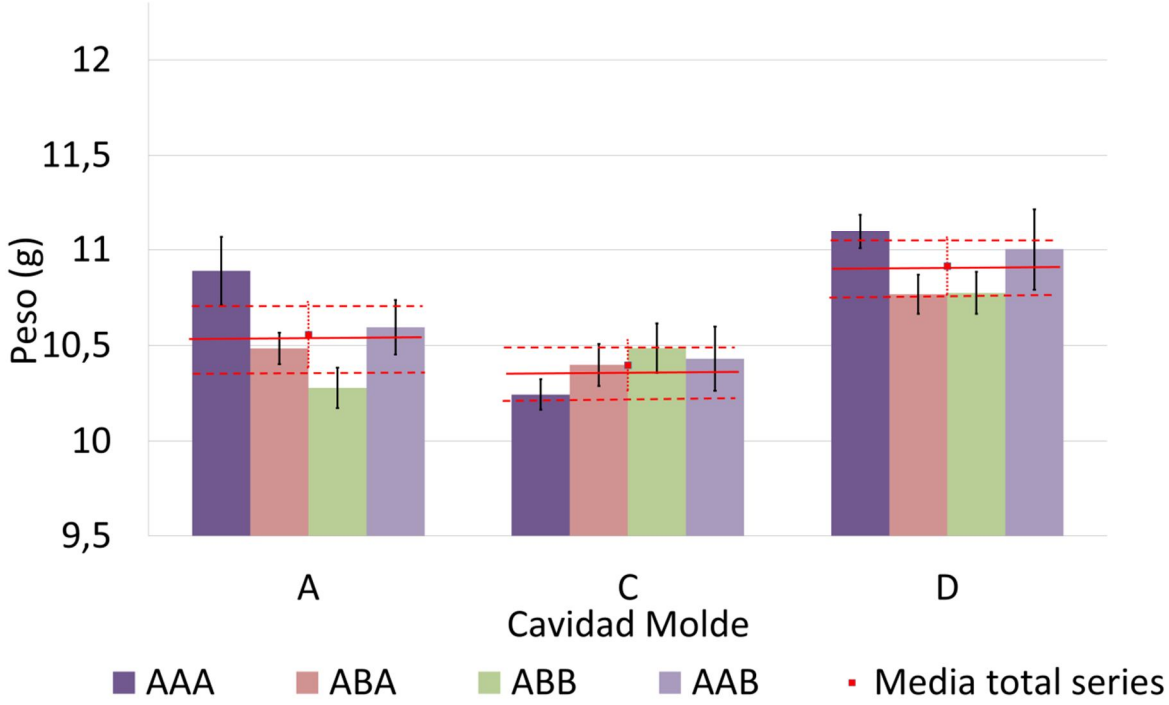


Figura 33. Gráfico de barras de pesos de probetas espumadas con una reducción de peso del 17%

En la condición AAA tenemos un peso medio de 10.74g lo que implica una reducción de peso de 17.32 % respecto a las probetas en macizo, tal como observamos en la *Tabla 8*. Esta condición es la que tiene una reducción de peso que más se aproxima al 17% de reducción de peso. Esta condición tiene como parámetros de proceso un 0.60% de gas, 100 cm^3/s de velocidad de inyección y 60 ºC de temperatura de molde.

Se confirma que a velocidades de inyección altas y temperaturas de molde altas tenemos un mayor control sobre el peso objetivo de las probetas microespumadas.

5.2. Caracterización morfológica

Previo a la caracterización morfológica se realiza una metodología para la obtención de superficies a analizar.

Con el objetivo de conseguir una superficie plana para analizar mediante microscopía, es necesario forzar una rotura frágil de las probetas, de este modo aseguramos una superficie sin deformación plástica. El procedimiento para la obtención de las superficies se compone de 4 etapas: Corte, introducción de entalla, atemperación a baja temperatura y rotura frágil de probeta.

1.- Corte

Corte de la probeta inyectada en 3 subprobetas mediante sierra circular.

2.- Introducción de entalla

Creación de entalla en el punto medio de la probeta mediante cuchilla a lo largo de media circunferencia de la probeta.

3.- Atemperación a baja temperatura:

Fragilización de probetas manteniéndolas a bajas temperaturas durante un tiempo determinado. Este proceso se realiza por dos vías diferentes:

- Cámara frigorífica a -40ºC durante 24h

Figura 34. Imagen cámara frigorífica

- Inmersión de probetas en nitrógeno líquido durante 15 minutos.

Figura 35. Imagen de inmersión de las probetas en N_2 líquido.

4.- Rotura frágil

Una vez estabilizadas las probetas a bajas temperaturas se fuerza su rotura frágil a partir de la entalla previamente creada. Con la intención de conseguir superficies de fractura en un único plano y comparables entre sí, se establece un método de rotura frágil utilizando un Péndulo Charpy. En las *Figuras 36* se muestra la colocación de la probeta previa a rotura.

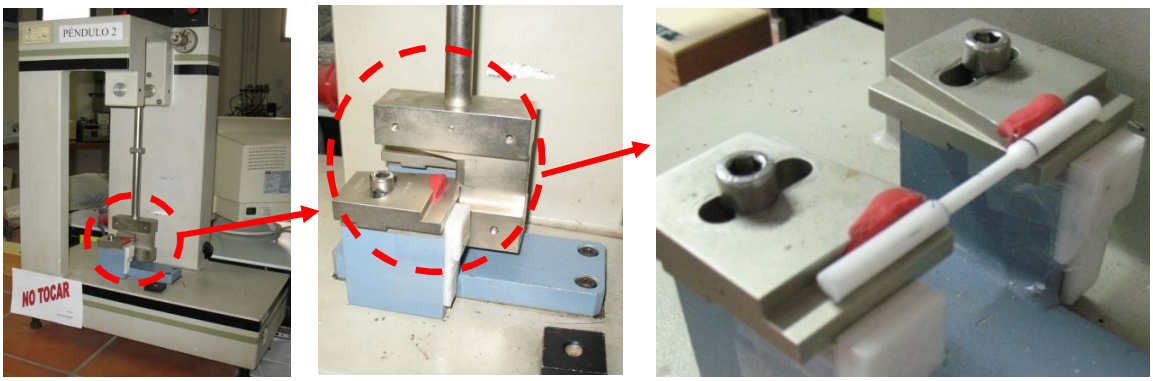


Figura 36. Imagen de Péndulo Charpy utilizado para rotura de probetas.

Posteriormente se realiza la obtención de imágenes de la superficie mediante el Microscopio electrónico de barrido JEOL JSM- 5610. Las imágenes se analizan mediante el software de análisis de imágenes IgorPro. Este software registra el número de celdas, su posición en la probeta así como la superficie de cada una de ellas.

Todas las superficies de fractura mostraron 3 zonas diferentes dentro de la probeta según su tipo de espumación tal como se puede ver en la *Figura 37:*

(a) *Piel:* Espesor de probeta sin espumar.

(b) *Zona microespumada:* Espesor de probeta con mayoría de celdas de tamaño microcelular (tamaño inferior a 100 µm).

(c) *Núcleo espumado:* Zona central de la probeta con gran número de celdas de tamaño superior a 100 µm.

Se miden los espesores de las zonas dentro de la probeta. Posteriormente se realiza el conteo y análisis de celdas independiente en cada zona (Núcleo y zona microcelular)

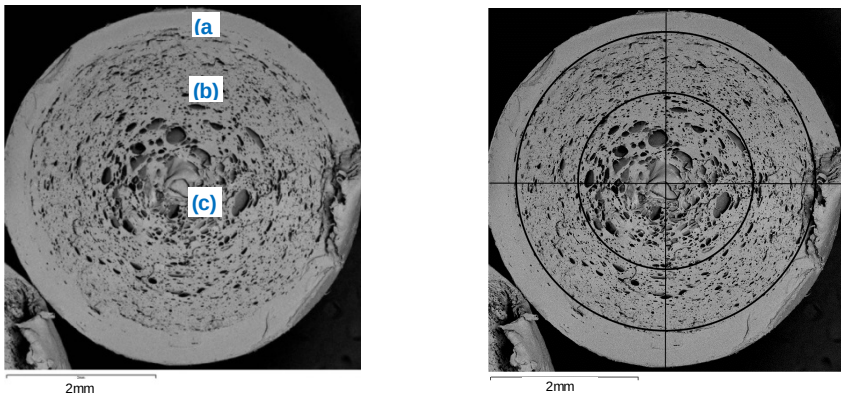


Figura 37. Micrografías SEM a x25, marcaje de las diferentes zonas espumadas.

En la *Figura 38 y 39* se muestra la distribución típica de tamaños de celda obtenidos. En la comparativa de las condiciones BAA' y AAA (10% y 17% de reducción de peso) se varia únicamente el parámetro de tanto por ciento de gas inyectado.

Se puede observar en la *Figura 38* que en la condición BAA' (10% de espumación) al tener un menor porcentaje de gas inyectado aumenta el porcentaje de celdas de tamaño superior a 100 µm.

En la condición AAA (17% de espumación) al tener un mayor porcentaje de gas inyectado disuelto en el fundido se consigue una mayor caída de presión en el molde provocando un alto grado de nucleación de celdas de menor tamaño, aumenta el porcentaje de celdas menores a 20 µm [17].

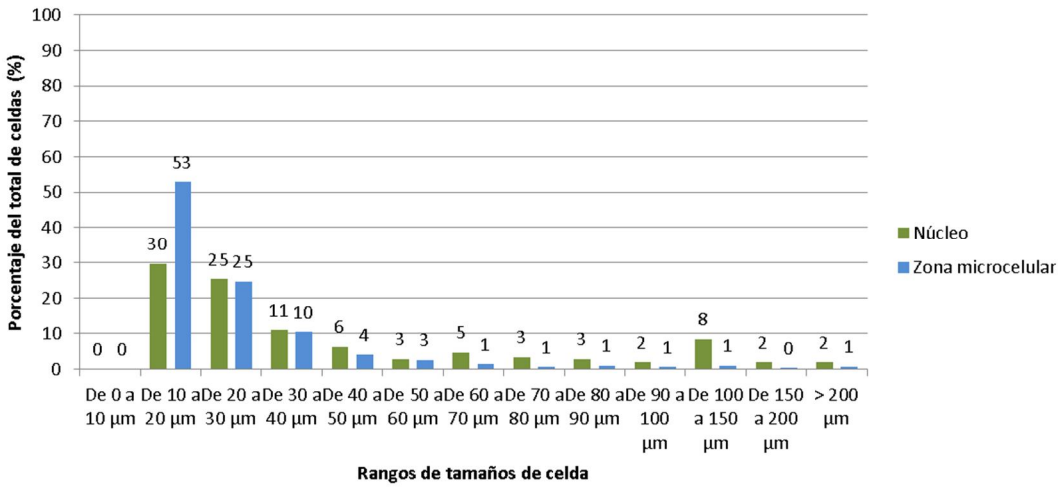


Figura 38. Gráfico de distribución de tamaños de celda para la reducción de peso 10%, condición BAA' y superficie 4A1.

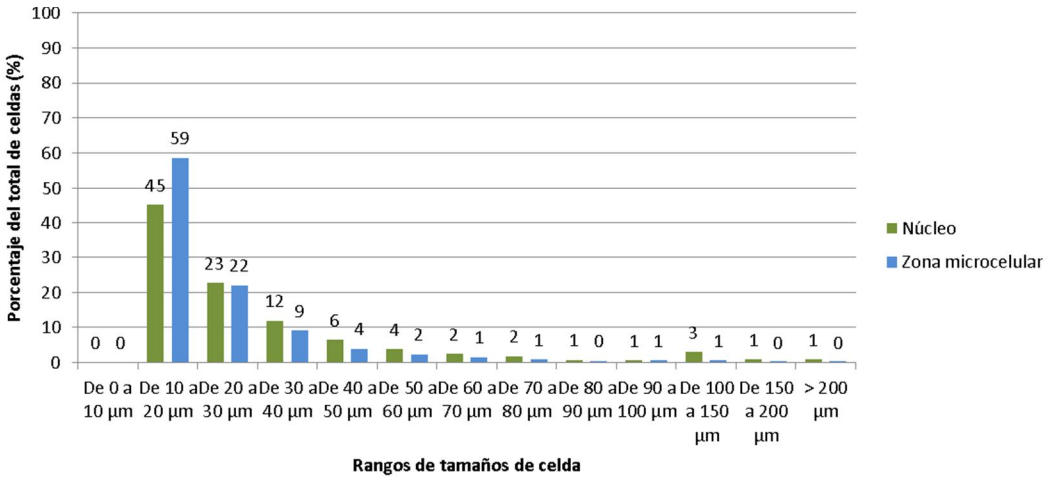


Figura 39. Gráfico de distribución de tamaños de celda para la reducción de peso 17%, condición AAA y superficie 4A1.

En la *Tabla 9* se muestran los parámetros morfológicos obtenidos tanto para las probetas con reducción de peso 10% y 17%.

Tabla 9. Tabla con resultados de morfologia de las superficies analizadas.

Reducción de peso	Probeta	Espesor /tamaño probeta			Densidad celular		Número de celdas	
		Núcleo	Zona microcelular	Piel	Núcleo	Zona microcelular	Núcleo	Zona microcelular
		%	%	%	celdas/cm2	celdas/cm2		
10%	BAA'-4A1	55	29,58	15,42	5,85E+03	1,33E+04	320	994
	BAA'-4C1	63,11	19,67	17,21	7,52E+03	1,86E+04	560	1001
	BAA'-4D1	65,7	22,73	11,57	3,56E+03	9,03E+03	283	582
17%	AAA-4A1	49,59	34,43	15,98	1,55E+04	2,19E+04	711	1886
	AAA-4C1	49,79	37,86	12,35	1,83E+04	2,17E+04	844	2094
	AAA-4D1	56,25	32,92	10,83	1,47E+04	2,04E+04	840	1767
	AAA-9A1	43,62	46,09	10,29	1,78E+04	2,31E+04	630	2631

En la *Figura 40* se observa que al aumentar el porcentaje de espumación se aumenta el espesor de la zona microespumada. Por el contrario al aumentar el porcentaje de espumación reducimos el espesor de zona núcleo. El espesor de piel no tiene variación al aumentar el porcentaje de espumación.

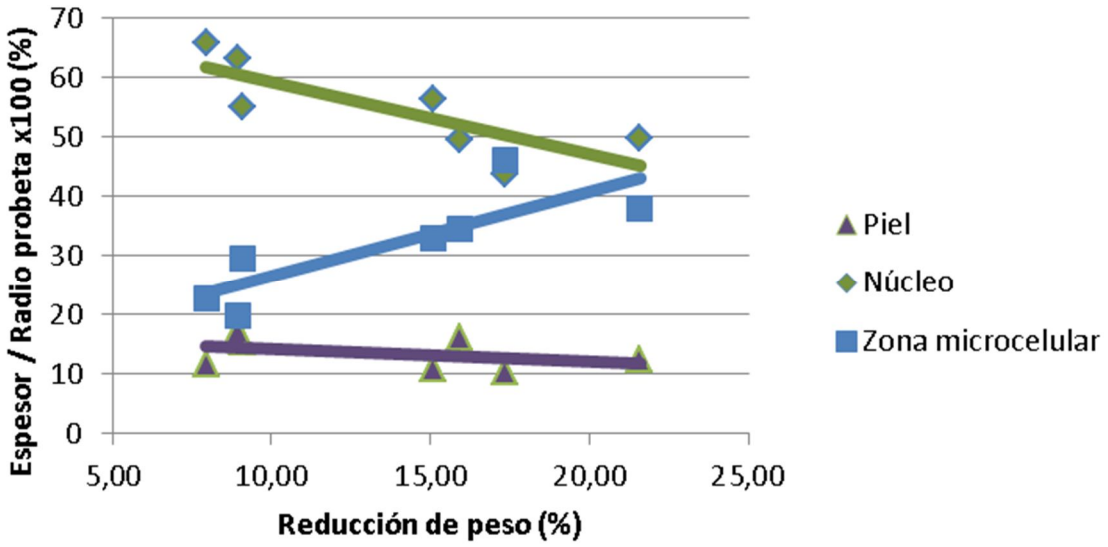


Figura 40. Gráfico de espesores vs. reducción de peso.

En la *Figura 41* se puede ver que al aumentar el porcentaje de espumación se consigue un aumento de la densidad celular tanto en el núcleo como en la zona microespumada.

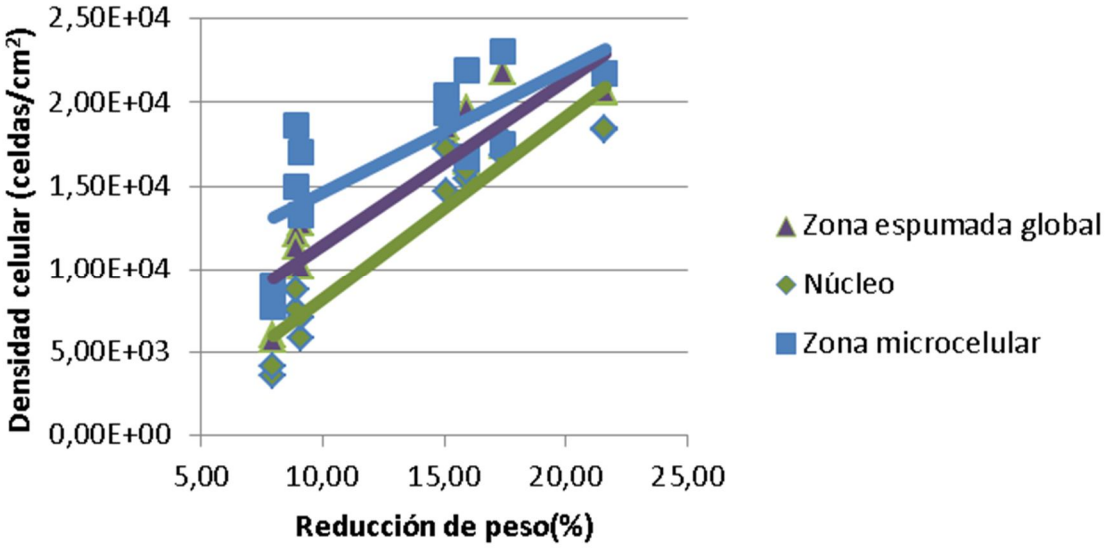


Figura 41. Gráfico de densidad celular vs. reducción de peso

5.3. Caracterización mecánica

Se ensayaron a tracción 12 probetas macizas y 12 probetas microespumadas. De las probetas microespumadas se ensayaron 6 probetas de 10% de reducción de peso (condición BAA') y 6 probetas de la 17% de reducción de peso (condición AAA).

A partir de las curvas de tensión-deformación se evaluaron, entre otros parámetros, el módulo de elasticidad, la tensión de cedencia y la deformación a rotura.

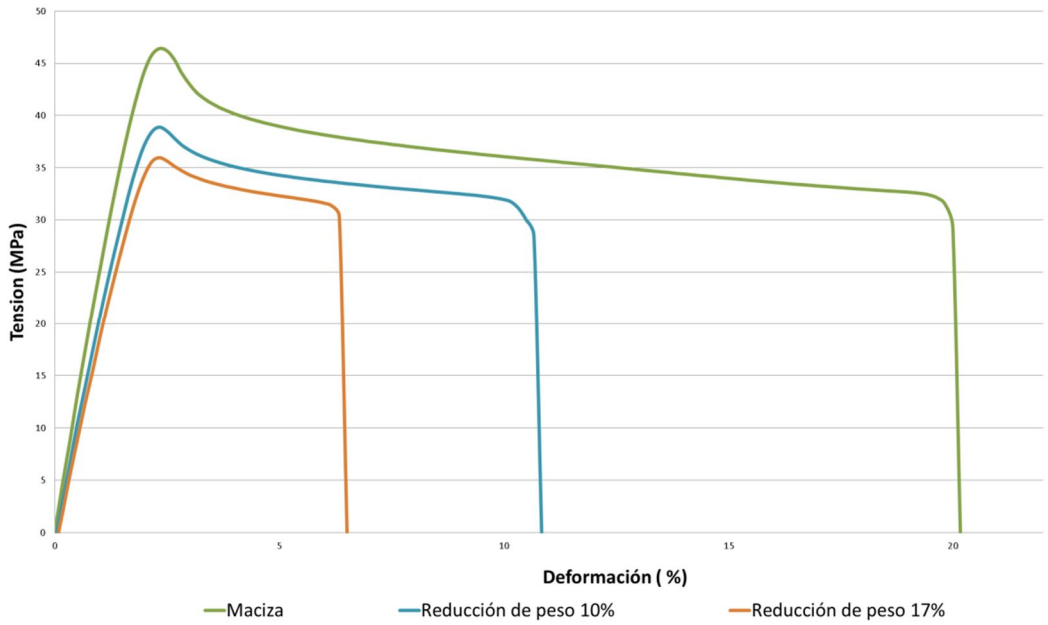


Figura 42. Gráfico de curva a tracción de probetas con diferentes reducciones de peso.

En la *Figura 42* se muestra la comparativa de curvas tensión/ deformación de probetas macizas, probetas con 10% de reducción de peso (condición BAA') y probetas de la 17% de reducción de peso (condición AAA). Se observa una disminución de la tensión de cedencia y deformación a rotura a medida que aumentamos el porcentaje de espumación de las probetas.

A continuación se muestran los resultados de tracción agrupados por tipo de probeta: probetas macizas, probetas espumadas con una reducción de peso del 10% y probetas con una reducción de peso del 17%.

Probetas Macizas

De un total de 15 ciclos de inyección sucesivos, se seleccionaron los ciclos de inyección 3, 6, 10, 12 y 14. De estas se escogieron probetas de las diferentes cavidades A,C y D. Sumando un total de 12 probetas de tracción.

Las probetas al romper muestran un comportamiento dúctil-frágil, forman pequeña zona copa-cono en la probeta con posterior rotura frágil.

En la *Tabla 10* se muestran los resultados de los ensayos a tracción para probetas macizas agrupados por cavidades. Se encontró un valor de tensión de cedencia medio de 46.20 MPa, módulo de elasticidad medio de 2365.08 MPa y deformación a rotura media de 19.63%.

Tabla 10. Tabla con resultados de ensayos a tracción para probetas macizas.

MACIZAS	Tensión cedencia (MPa)	Dev. Est (MPa)	E (MPa)	Dev. Est (MPa)	Def. a rotura (%)	Dev. Est (%)
A	46,63	0,71	2367,78	54,59	19,37	1,07
C	45,70	0,86	2364,80	39,31	19,44	1,45
D	46,27	1,79	2362,65	17,26	20,08	1,02
Media Maciza	**46,20**	**1,17**	**2365,08**	**36,33**	**19,63**	**1,13**

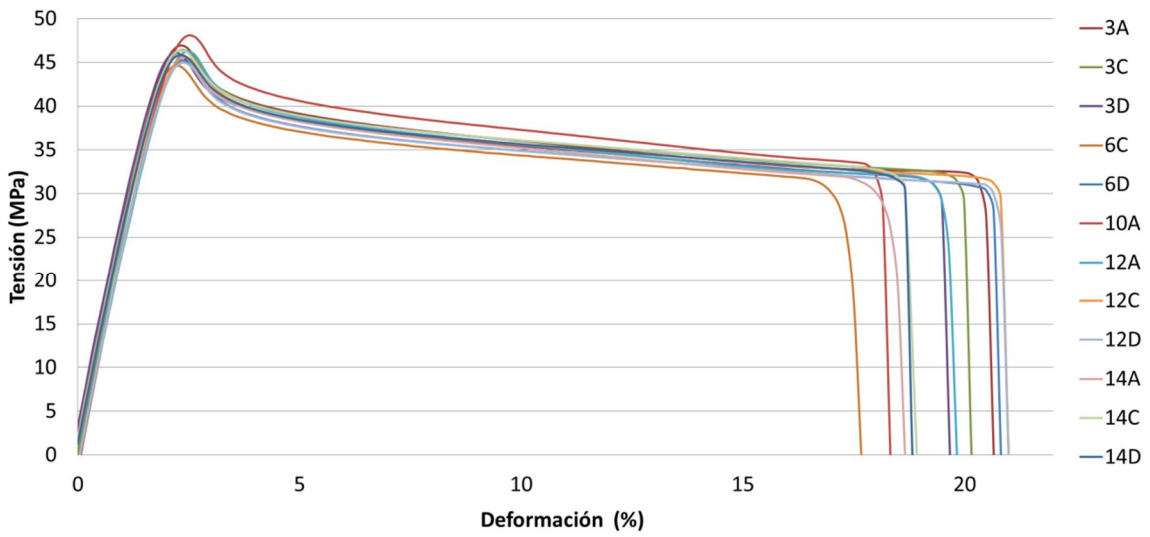


Figura 43. Gráfico de ensayo a tracción de probetas macizas.

Probetas con 10% de reducción de peso (Condición BAA')

Se ensayaron un total de 6 probetas a tracción. Se tomaron de los ciclos de inyección 3,6,10,12 y 14 una serie de probetas de las cavidades A y D.

Las probetas al romper muestran un comportamiento dúctil- frágil, rompen después de una pequeña deformación plástica. La deformación plástica es menor que la encontrada en las probetas macizas.

En la *Tabla 11* se muestran los resultados de los ensayos a tracción para la condición BAA'. El valor de cedencia medio encontrado es de 37.87 MPa, el módulo de elasticidad medio de 1972.85 MPa y la deformación a rotura de 7.92 %. Para una reducción de peso media de 10%, al comparar con probetas macizas, se reduce un 18.03% la tensión de cedencia, un 16.58% el módulo de elasticidad y un 59.65% la deformación a rotura.

En las probetas microespumadas aumenta la desviación estándar de los valores medios de tensión de cedencia, módulo de elasticidad y deformación a rotura.

Tabla 11. Tabla con resultados de ensayos a tracción para probetas de la condición BAA'

Cavidad	Tensión cedencia(σ_y) (MPa)	Dev. Est (MPa)	Módulo elástico (E) (MPa)	Dev. Est (MPa)	Def.a rotura (ε_r) (%)	Dev. Est (%)
A	37,99	0,89	1986,33	41,31	9,23	2,10
D	37,74	0,44	1959,37	18,35	6,61	0,39
Media 10%	**37,87**	**0,64**	**1972,85**	**32,17**	**7,92**	**1,97**
Media Maciza	**46,20**	**1,17**	**2365,08**	**36,33**	**19,63**	**1,13**

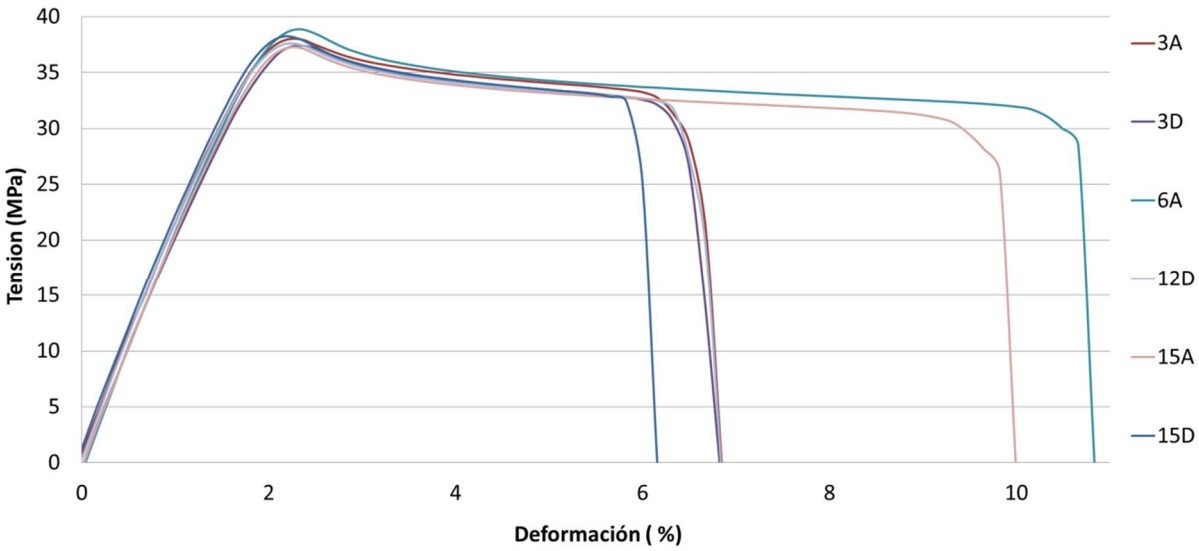


Figura 44. Gráfico de ensayo a tracción de probetas de la condición BAA'

Probetas con 17% de reducción de peso (Condición AAA)

Se ensayaron un total de 6 probetas a tracción. Se tomaron de los ciclos de inyección 3,6,10,12 y 14 una serie de probetas de las cavidades A,C y D.

Las probetas al romper muestran un comportamiento dúctil- frágil, rompen después de una pequeña deformación plástica. La deformación plástica es menor al aumentar el grado de espumación al 17%.

En la *Tabla 12* se muestran resultados de los ensayos a tracción. El valor de cedencia medio encontrado es de 34,53 MPa, el módulo de elasticidad medio de 1871.10 MPa y la deformación a rotura de 6,60 %. Para una reducción de peso de 17%, al comparar con probetas macizas, se reduce un 25.26% la tensión de cedencia, un 20.89% el módulo de elasticidad y un 66.38% la deformación a rotura.

Al aumentar el porcentaje de microespumación se observa un aumento la desviación estándar de los valores medios de tensión de cedencia, módulo de elasticidad y deformación a rotura

Tabla 12. Tabla con resultados de ensayos a tracción para probetas de la condición AAA

Cavidad	Tensión cedencia(σ_y) (MPa)	Dev. Est (MPa)	Módulo elástico (E) (MPa)	Dev. Est (MPa)	Def.a rotura (ε_r) (%)	Dev. Est (%)
A	35,46	1,37	1926,40	49,92	7,09	0,35
C	33,02	0,06	1797.10	13,86	4,59	0,83
D	35,12	0,07	1889,80	15,41	8,12	0,08
Media 17%	**34,53**	**1,33**	**1871,10**	**64,33**	**6,60**	**1,67**
Media 10%	**37,87**	**0,64**	**1972,85**	**32,17**	**7,92**	**1,97**
Media Macizas	**46,20**	**1,17**	**2365,08**	**36,33**	**19,63**	**1,13**

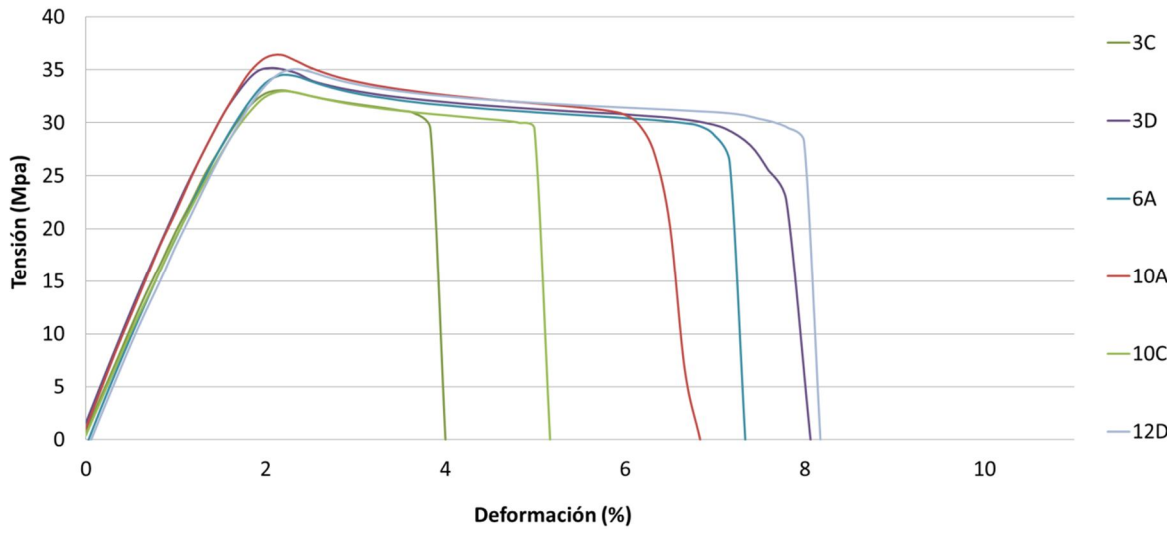


Figura 45. Gráfico de ensayo a tracción de probetas de la condición AAA

Tal como se puede ver en la *Figura 46 y Figura 47* a medida que aumenta el porcentaje de espumación se observa una disminución de la tensión de cedencia y del módulo de elasticidad.

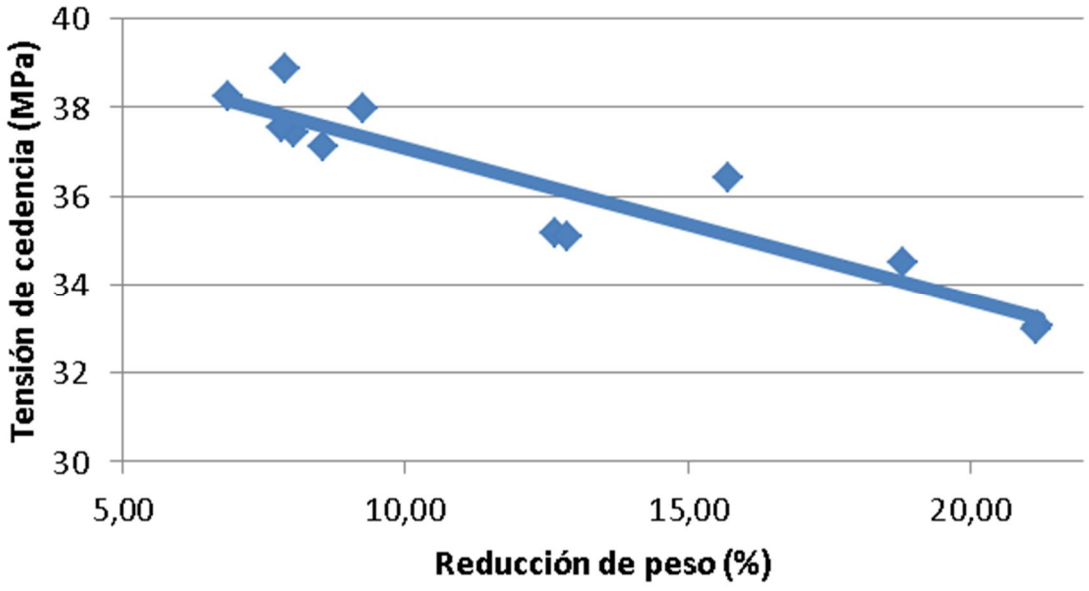


Figura 46. Gráfico de tensión de cedencia vs. reducción de peso

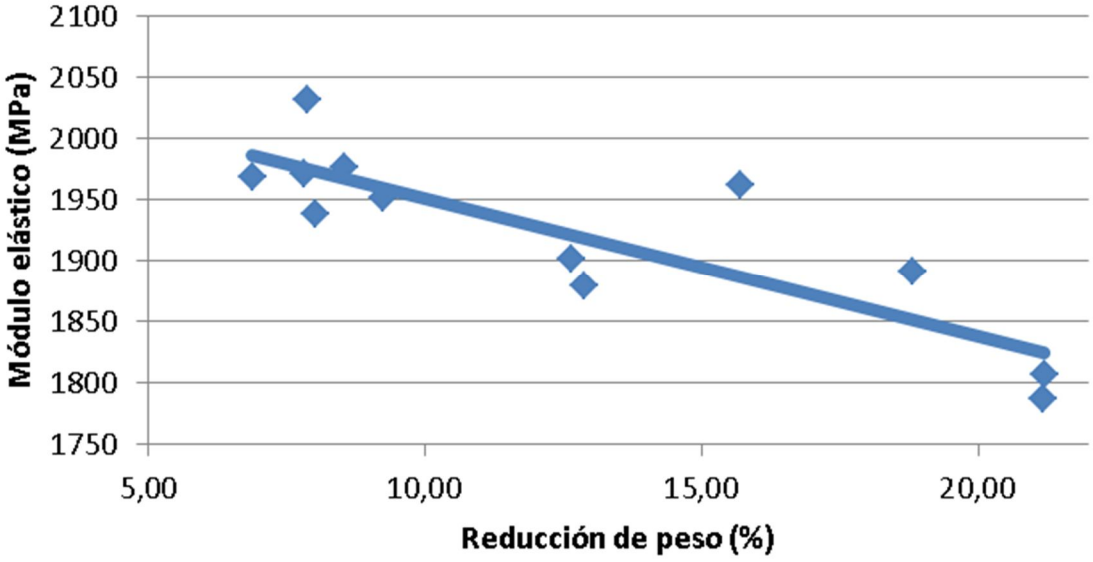


Figura 47. Gráfico de Módulo elástico vs. reducción de peso

En la *Tabla 13* se muestran los resultados de tracción para las probetas macizas y las dos reducciones de peso (10% y 17 %). Al dividir la tensión de cedencia entre la densidad encontramos valores similares para las dos reducciones de peso. Por otro lado al dividir los resultados de Módulo de elasticidad entre las densidades, se encuentra que aumenta E/ρ al aumentar el grado de espumación a 17%.

Tabla 13. Tabla con resultados de ensayos a tracción entre las densidad

	Densidad (ρ) (g/cm3)	Módulo elástico (E) (MPa)	Tensión cedencia (σ_y) (MPa)	E/ρ (Mpa/g·cm-3)	σ_y/ρ (Mpa/g·cm-3)
Macizas	1,05	2362,65	46,20	2250,14	44,00
10% Red.de peso	0,95	1972,85	37,87	2076,68	39,86
17% Red. de peso	0,87	1871,10	34,53	2150,69	39,69

6. Estudio medioambiental

Para el estudio medioambiental se utilizó la plantilla normalizada para la gestión de recursos y residuos del CCP. A continuación se desglosa el estudio.

Nom i cognoms: Victor Bernabé Miguel		
Títol : Caracterización de ABS microcelular obtenido mediante moldeo por inyección con espumación física		x PFC ❑ T
Tutor: Mª Lluisa Maspoch		❑ M-EX
Data d'inici del projecte: 01/03/2014	Data de finalització del projecte:01/10/2014	

- Aquesta recopilació de dades s'emmarca dins del Sistema de Gestió Ambiental del CCP.
- En el cas de necessitar més espai que els disponibles en aquest formulari, es poden afeixir linneas amb les anotacions addicionals.
- Una cop finalitzat el projecte, el formulari s'haurà de lliurar al Coordinador de Medi Ambient.
- Per qualsevol aclariment o informació addicional sobre el Sistema de Gestió Ambiental del CCP, poseu-vos en contacte amb el Coordinador de Medi ambient.
- Bibliografía:PFC-2003-114 bis Estudi de la viabilitat d'utilització de materials reciclats en els edificis i en el Campus de Castelldefels de la Universitat Politècnica de Catalunya (MATREC)

Aspecte ambiental	Unidades	Cantidad	kg CO2/Projecte	Hectàrees
CONSUM ELÈCTRIC teoric	Kwh	3697,6	976,166	0,213
CONSUM ELÈCTRIC	Kwh	1479,04	390,467	0,085
AIGUA	m^3	22,4	---------	---------
MOBILITAT	MJ	17880	393,360	0,086
RESIDUS	kg	20	---------	---------
PLÀSTIC	kg	40	---------	---------
TOTAL ESTIMAT		17962,4	1759,993	0,384

CONSUM ELÈCTRIC

Màquina/Aparell	Hores	Potencia kW (*)	Consum kWh
Circuit de refrigeració	38	9	342
Injectora Engel Victory 110	18	45	810
PIOVAN (deshum.) DSN506HE	6	6,8	40,8
Ordinadors	400	6,2	2480
Fluorescents	400	0,058	23,2
Lampades de mercuri	40	0,04	1,6

TOTAL ESTIMAT	Kwh	Kg CO2	Hectàrees
	3697,6	976,1664	0,21313677

CONSUM AIGUA

Màquina/Aparell	Hores	Cabal m^3/h	Consum m^3
Circuit de Refrigeració	38	0,4	15,2
Circuit d'injecció	18	0,4	7,2

TOTAL ESTIMAT	m^3
	22,4

MOBILITAT

Mitja de Transport	Km.	MJ/Km.	MJ	Equivalent L. benzina	Kg CO2
Cotxe	6000	2,98	17880	447	393,36

TOTAL ESTIMAT	MJ	Kg CO2	Hectàrees
	17880	393,36	0,08588646

7. Presupuesto

En el presupuesto se han desglosado los diferentes gastos de material necesario, uso de máquinas y coste de personal necesarios para la realización de este proyecto. Se presentan los resultados en las siguientes tablas.

Tabla 13. Tabla con datos de presupuesto de materiales

	Coste unitario		Cantidad	Coste (€)
ABS	2	€/Kg	40	80
SUMATORIO				**80**

Tabla 14. Tabla con datos de presupuesto de uso de máquinas

		Coste unitario		Cantidad	Coste (€)
Inyección probetas	Inyección	1200	€/dia	1	1200
	Inyección MuCell	1500	€/dia	2	3000
Obtención probetas	Corte de Probetas tracción	120	€/serie	1	120
	Cámara frigorífica	2,5	€/hora	24	60
	Nitrógeno líquido	3	€/Kg	3	9
Ensayos Laboratorio	Ensayos a tracción	240	€/1ªserie	1	240
		150	€/2ªserie	1	150
Microscopia	Microscopio Optico	10	€/hora	10	100
	Microcopio Electrónico	180	€/hora	3	540
SUMATORIO					**5419**

Tabla 15. Tabla con datos de coste de personal

	Coste unitario		nº Horas	Coste (€)
Estudio previo	20	€/hora	120	2400
Experimentación	20	€/hora	180	3600
Análisis de datos	20	€/hora	320	6400
Documentación	20	€/hora	100	2000
SUMATORIO				**14400**

Tabla 16. Tabla con costes totales de proyecto

Concepto	Coste (€)
Material	80
Uso de máquina	5419
Personal	14400
SUBTOTAL	19899
+10% de gastos generales	
TOTAL PROYECTO	**21888,9**

7. Conclusiones

Se inyectaron probetas en 9 condiciones de inyección con dos niveles diferentes de porcentaje de gas, velocidad de inyección y temperatura de molde.

Para todas las condiciones se realizó un análisis de peso de las probetas inyectadas. Mediante el estudio de pesos se determinó que los valores de las condiciones BAA' y AAA son los más cercanos a las reducciones de peso objetivo: 10% y 17%.

Las condiciones BAA' y AAA se inyectaron con niveles altos de temperatura de molde y de velocidad de inyección (60ºC y 100 cm^3/s) variando el porcentaje de gas entre ellas (0.6% y 0.93%).

Posteriormente se realizó una caracterización morfológica y mecánica de las condiciones más cercanas a la reducción de peso objetivo 10% y 17% (BAA' y AAA).

En la caracterización morfológica mediante Microscopia Electrónica de Barrido se diferencian 3 regiones en la morfología de la probeta: un núcleo espumado, una zona microcelular y una piel no espumada. En zona microcelular se encuentran mayoría de celdas inferiores a 20 µm y en la zona núcleo tenemos tamaños de celda superiores a 100 µm.

- Se observa que al aumentar el tanto por ciento de gas (0.93%) disminuye el área definida como núcleo (con celdas superiores a 100 µm).

- No se observa variación en el espesor de la piel no espumada para los diferentes al variar el tanto por ciento de gas (0.66%-0.93%)

En la caracterización mecánica, mediante ensayos a tracción, se observa una disminución de la resistencia máxima y del módulo de elasticidad a medida que aumenta el tanto por ciento de espumación del material.

- Al dividir la tensión de cedencia entre las densidades (σ_y /ρ) se encuentran valores similares para las dos reducciones de peso (10% y 17%)

- Al dividir el módulo de elasticidad entre las densidades (E/ρ) se observa que aumenta E/ρ al aumentar el grado de espumación a 17%.

Para continuar con el estudio se propone:

-Caracterizar el resto de condiciones inyectadas.

-Considerar otras condiciones de reducción de peso que confirmen la tendencia.

-Considerar geometrías de molde diferentes.

-Trabajar con un material semicristalino.

8. Agradecimientos

- En cuanto al ámbito académico del proyecto me gustaría agradecer en primer lugar a mi tutora de proyecto Mª Lluisa Maspoch su soporte, disponibilidad y motivación a lo largo de la realización de este proyecto.

En segundo lugar agradecer al doctorando Javier Gomez su plena colaboración y ayuda en todo momento.

También agradecer a Miguel Sanchez y David Arencón su ayuda durante el proceso de inyección de nuestros materiales.

Por último quería agradecer también a todos los integrantes del CCP su soporte, solucionando problemas en todo momento.

- En cuanto el ámbito personal, quería agradecer a mi familia y a mis amigos por estar allí cuando es necesario.

Especialmente a Anna por su apoyo constante y paciencia infinita. También a mis padres su soporte incondicional en todo momento.

Para acabar agradecer a todos mis amigos desatendidos, que siempre me hacen ver la vida de manera más fácil.

9. Bibliografía

Referencias bibliográficas

[1] Revista Autobild. 40 años del último Seat 600.
[http://www.autobild.es/noticias/40-anos-ultimo-seat-600-204567, 6 de Agosto de 2014]

[2] Revista Diario Motor. Presentación Seat Ibiza.
[http://www.diariomotor.com, 6 de Agosto de 2014]

[3] Plastics Europe, Association of Plastics Manufacturers, Automotive Brochure Final, 2013.
[www.plasticseurope.org/, 9 de Abril de 2014]

[4] Europa. Sintesis de la legislación de la UE. Reducción de las emisiones contaminantes de los vehículos ligeros.
[http://europa.eu/legislation_summaries/environment/air_pollution/l28186_es.htm, 8 de Agosto de 2014]

[5] *Automotive Engineer* Europe's Automotive engineering magazine. www.ae-plus.com Junio 2013, p.42.

[6] *Automotive Engineer* Europe's Automotive engineering magazine. www.ae-plus.com,September 2013, p. 42.

[7] *Electric and Hybrid Vehicle Technology International,* Julio 2013, p.70

[8] *Automotive Engineer* Europe's Automotive engineering magazine. www.ae-plus.com, Abril 2013, p.40.

[9] *Crashtest - Technology international*, Setiembre,p.52. 2013

[10] Xu, J., *Microcellullar Injection Molding*, WILEY, 2010, ISBN: 978-0-470-46612-4.

[11] Eaves,D., *Handbook of Polymer Foams*,Rapra Technology Limited ,2004, ISBN: 1-85957-388-6

[12] Trexel Inc. Mucell Proceses. Automotive Industry.
[http://www.trexel.com/en/industries/automotive, 15 de Agosto de 2014]

[13] J.A Brydson, *Plastics materials,* 7th Edition, Butterworth-Heinenmann,1999, ISBN: 0-7506-4132-0.

[14] STYRON. Automotive Brochure.
[http://www.styron.com/pdfs/Styron-Automotive-Brochure-October13.pdf, 9 Abril 2014]

[15] Norma española UNE-EN ISO 527-1_ Plásticos_ Determinación de las propiedades en tracció. Octubre 1996

[16] Brandon,D and Kaplan,W,D. *Microestructural Characterization of Materials, WILEY, 2008,2nd Edition.*

[17] M.R. Barzegari, D. Rodrigue. *The effect of injection molding conditions on the morphology of polymer structural foams*. Polymer Engineering and Science, 2009, vol. 49, num. 5, pp. 949-959

Bibliografía complementaria

[18] MONTGOMERY, D.C. Universidad estatal de Arizona, *Diseño y análisis de experimentos* (2ª edición)Limusa Wiley ,2004, p. 218-276

[19] Jaime Francisco Gómez-Gómez_Tesis doctoral(UPC)_*Caracterización y estudio comparativo de materiales celulares poliméricos obtenidos mediante moldeo por inyección con espumación física o química* (2013).

10. ANEXOS

Technical Information

STYRON™

MAGNUM™ 8434
ABS Resin

Overview

MAGNUM™ 8434 is a product which combines high gloss with medium-high heat performance. It is suitable for a wide range of applications. The mass (continuous process) ABS technology of Styron ensures an ABS resin that combines excellent processability with a stable light base colour that is ideal for self-colouring.

Applications:
- Household appliances
- Consumer goods
- Toys
- Automotive interior trim
- Chrome
- Electroplating

Physical	Nominal Value	(English)	Nominal Value	(SI)	Test Method
Density	1.05	g/cm³	1.05	g/cm³	ISO 1183/B
Apparent Density	0.65	g/cm³	0.65	g/cm³	ISO 60
Melt Mass-Flow Rate (MFR) (220°C/10.0 kg)	13	g/10 min	13	g/10 min	ISO 1133
Melt Volume-Flow Rate (MVR) (220°C/10.0 kg)	0.793	in³/10min	13.0	cm³/10min	ISO 1133
Molding Shrinkage - Flow	0.0040 to 0.0070	in/in	0.40 to 0.70	%	ISO 294-4
Mechanical	**Nominal Value**	**(English)**	**Nominal Value**	**(SI)**	**Test Method**
Tensile Modulus					ISO 527-2
0.126 in (3.20 mm), Injection Molded	305000	psi	2100	MPa	
Tensile Stress					
Yield, 0.126 in (3.20 mm), Injection Molded	6820	psi	47.0	MPa	ISO 527-2/50
Yield, 0.126 in (3.20 mm), Injection Molded	6960	psi	48.0	MPa	ISO 527-2/100
Yield, 0.126 in (3.20 mm), Injection Molded	6960	psi	48.0	MPa	ISO 527-2/100
Tensile Strain					ISO 527-2/50
Yield, 0.126 in (3.20 mm), Injection Molded	2.7	%	2.7	%	ISO 527-2/100
Flexural Modulus					ISO 178 [1, 2]
0.126 in (3.20 mm), Injection Molded	305000	psi	2100	MPa	
Flexural Strength					ISO 178 [1, 2]
0.126 in (3.20 mm), Injection Molded	9430	psi	65.0	MPa	
Impact	**Nominal Value**	**(English)**	**Nominal Value**	**(SI)**	**Test Method**
Charpy Notched Impact Strength					
-22°F (-30°C), Injection Molded	4.8	ft·lb/in²	10	kJ/m²	ISO 179/1eA
-22°F (-30°C), Injection Molded	3.3	ft·lb/in²	7.0	kJ/m²	ISO 179/2C
73°F (23°C), Injection Molded	5.7	ft·lb/in²	12	kJ/m²	ISO 179/2C
73°F (23°C), Injection Molded	9.0	ft·lb/in²	19	kJ/m²	ISO 179/1eA
Notched Izod Impact Strength					ISO 180/A
-22°F (-30°C), Injection Molded	4.3	ft·lb/in²	9.0	kJ/m²	
73°F (23°C), Injection Molded	10	ft·lb/in²	21	kJ/m²	
Thermal	**Nominal Value**	**(English)**	**Nominal Value**	**(SI)**	**Test Method**
Heat Deflection Temperature					ISO 75-2/A
264 psi (1.8 MPa), Annealed	216	°F	102	°C	
Vicat Softening Temperature	214	°F	101	°C	ISO 306/B50
Flammability	**Nominal Value**	**(English)**	**Nominal Value**	**(SI)**	**Test Method**
Burning Rate (0.0787 in (2.00 mm))	1.8	in/min	45	mm/min	ISO 3795 [3]
Flame Rating					UL 94 [3]
0.0591 in (1.50 mm)	HB		HB		
0.118 in (3.00 mm)	HB		HB		