



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



protecting the future



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA EN LAS CARACTERÍSTICAS
MECÁNICAS DE UN ADHESIVO ESTRUCTURAL EN BASE EPOXI
EN FUNCIÓN DE LAS VARIABLES DE PRODUCCIÓN

Autor:

Lahuerta Noguera, Alberto allano@etsid.upv.es

Cotutor en empresa:

Cortés Fibla, Enrique ecortes@aerox.es

Tutor:

García Manrique, Juan Antonio jugarcia@mcm.upv.es

Valencia, – de Septiembre de 2017

*Dedicado en especial a mis padres,
quienes han dado todo lo que tenían
en sus manos y más para verme
cumplir mis sueños.*

Agradecimientos

Quiero agradecer principal este proyecto a todos los miembros de DRS UPV, los cuales han sido vitales este año, a lo largo del cual he descubierto mi verdadera pasión y vocación junto a ellos.

También dar las gracias a la empresa Aerox Advanced Polymers por facilitar medios para la realización del trabajo así como haber hecho que mi estancia en la empresa sea agradable y efímera. Gracias a todos los compañeros de trabajo y una mención especial para Antonio Hernández-Francés, guía en el proyecto y fuente de apoyo con frases memorables como:

-Si te meto presión es como los padres, porque me importas

A familia y amigos.

Resumen

Este proyecto se basa en el estudio de la influencia de las variables de producción de un adhesivo estructural sobre sus propiedades mecánicas finales. El material objeto de estudio es uno de la serie Epolit Fix 900, el cual es un producto de la empresa Aerox Advanced Polymers.

Para la realización del trabajo se ejecutarán todos los procesos necesarios y pertinentes desde la fabricación del producto. Se someterá el material a un control de calidad previo a la elaboración de las probetas con la finalidad de comprobar los estándares de calidad fijados en la documentación técnica del producto. Por último, se realizarán probetas a partir de las normas ISO para posteriormente someter cada una a su ensayo correspondiente, también detallado en la norma vigente.

Finalmente, partiendo de los resultados obtenidos en los ensayos, se podrá averiguar la influencia de las variables de producción en las características mecánicas y se obtendrán las conclusiones correspondientes.

Resum

Aquest projecte es basa en l'estudi de la influència de les variables de producció d'un adhesiu estructural sobre les seues propietats mecàniques finals. El material objecte d'estudi és un de la sèrie Epolit Fix 900, el qual és un producte de la empresa Aerox Advanced Polymers.

Per a la realització del treball s'executaran tots els processos necessaris i pertinents des de la fabricació del producte. Es sotmetrà el material a un control de qualitat previ a l'elaboració de les provetes amb la finalitat de comprovar els estàndards de qualitat fixats en la documentació tècnica del producte. Per últim, es realitzaran provetes a partir de les normes ISO per a, posteriorment, sotmetre cadascuna al seu assaig corresponent, també detallat en la norma vigent.

Finalment, partint dels resultats obtinguts als assajos, es podrà esbrinar la influència de les variables de producció en les característiques mecàniques i s'obtindran les conclusions corresponents.

Abstract

This project is based on the study of the influence of the production variables in a structural adhesive's final mechanical properties. The material which the study is about is one of the Epolit Fix 900 set, which is a product of the company Aerox Advanced Polymers.

In order to perform this project, all the needed and relevant processes since the fabrication of the product will be executed. The material will be submitted to a quality control before the elaboration of the samples with the aim of checking the quality standards established in the technical documentation of the product. Lastly, specimens will be elaborated following the ISO normative to, after, submit each one to its correspondent test, also detailed in the regulations in force.

Finally, according to the results obtained from the tests, the influence of the production variables in the mechanic features will be deduced and the corresponding conclusions will be inferred.

Índice general

Apartados	Página
Agradecimientos	III
Resumen	V
Resum	VII
Abstract	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XV
Nomenclatura	XVII
Lista de símbolos	XVII
Lista de abreviaciones y tecnicismos	XVII
1. Introducción	1
1.1. Objetivos del proyecto	1
1.2. Motivación	1
1.3. Descripción	2
2. Estado del Arte	3
3. Fabricación	9
4. Proceso de control de calidad	15
4.1. Viscosidad	15
4.1.1. Material utilizado	15
4.1.2. Procedimiento	16
4.1.3. Medidas	18
4.1.4. Observaciones	21
4.2. Densidad	22
4.2.1. Material utilizado	22
4.2.2. Procedimiento	23
4.2.3. Medidas	24
4.2.4. Observaciones	25
4.3. Exotermia	25
4.3.1. Material utilizado	25
4.3.2. Procedimiento	27
4.3.3. Medidas	29
4.3.4. Observaciones	34

4.4. SAG Resistance	35
4.4.1. Material utilizado	36
4.4.2. Procedimiento	36
4.4.3. Medidas	38
5. Preparación de probetas	41
5.1. Probetas de Tracción	41
5.2. Probetas de Compresión	46
5.3. Probetas de TG	49
6. Ensayos	53
6.1. Ensayo de Tracción	53
6.1.1. Máquina de ensayo	53
6.1.2. Procedimiento	55
6.2. Ensayo de Compresión	57
6.2.1. Máquina de ensayo	57
6.2.2. Procedimiento	58
6.3. Ensayo de TG	61
6.3.1. Máquina de ensayo	62
6.3.2. Procedimiento	62
7. Resultados	65
7.1. Resultados de Tracción	65
7.1.1. Observaciones	69
7.2. Resultados de Compresión	69
7.2.1. Observaciones	72
7.3. Resultados de TG	73
7.3.1. Observaciones	77
8. Entorno de trabajo	79
8.1. Laboratorio Químico	79
8.2. Puesto de oficina	80
8.3. Taller de mecanizado y ensayos	80
9. Conclusiones	81
10. Análisis económico	83
Bibliografía	87

Índice de figuras

2.1. Aerogenerador construido por Charles F. Brush en 1887 (Fuente: en.wikipedia.org).	3
2.2. Aerogenerador <i>Smith-Putnam</i> , construido en 1941. (Fuente: eolienne.cavey.org).	4
2.3. Parque eólico <i>Onshore</i> . (Fuente: www.moroccoworldnews.com)	5
2.4. Parque eólico <i>Offshore</i> . (Fuente: www.offshorewind.biz).	6
2.5. Deterioro en el borde de ataque de una pala de aerogenerador (Fuente: www.hogrehojder.se)	7
2.6. Aplicación de un producto EPOLIT® GC E en el molde de una pala de aerogenerador (Fuente: www.aerox.es)	7
2.7. Aplicación con cartucho de un producto EPOLIT® FIX (Fuente: www.aerox.es)	8
3.1. A la izquierda, parte A y a la derecha parte B del producto con alto contenido en espesantes	10
3.2. A la izquierda, parte A y a la derecha parte B del producto con bajo contenido en espesantes	11
3.3. Cámara de vacío	12
3.4. Horno industrial	13
4.1. Instrumentos auxiliares para el control de viscosidad	16
4.2. Control de la viscosidad de la parte <i>A</i> del producto	17
4.3. Picnómetro	22
4.4. Medición de la masa del picnómetro lleno de producto	23
4.5. Sonda de temperatura junto con el dispositivo de registro de datos	26
4.6. Proceso de agitación del producto para el control de exotermia	27
4.7. Control de exotermia del producto	28
4.8. Control de exotermia del producto N°1	30
4.9. Control de exotermia del producto N°2	31
4.10. Control de exotermia del producto N°3	32
4.11. Control de exotermia del producto N°4	33
4.12. Control de exotermia del producto N°5	34
4.13. Control de exotermia del producto en todas sus variaciones	35
4.14. Molde modular para las muestras de SAG sobre un panel de fibra de vidrio	36
4.15. Muestra de SAG en durante el proceso de curado en un panel vertical	37
4.16. Control de SAG no apto del lote de fabricación N°5	38
4.17. Control de SAG apto del lote de fabricación N°6	39
5.1. Geometría de las probetas de tracción según la norma UNE-EN ISO 527	42
5.2. Sonda de temperatura junto con el dispositivo de registro de datos	43
5.3. Probetas de tracción antes del proceso de curado.	44
5.4. Probeta de tracción con defectos en forma de burbujas de aire retenidas.Indicadas con un círculo rojo	45
5.5. Resultado final de las probetas de tracción	46
5.6. Moldes de compresión junto a las lijas utilizadas para su acabado	47

5.7. Cilindros de compresión antes de ser cortados a medida	48
5.8. Resultado final de las probetas de compresión	49
5.9. Piezas para las probetas de TG previas al proceso de curado	50
5.10. Piezas para las probetas de TG terminadas	51
5.11. Plano detalle de un crisol de probetas de TG	52
6.1. Máquina de ensayos universal asistida por ordenador.	54
6.2. Mordazas para el ensayo de tracción.	54
6.3. Posición correcta de la probeta para ser ensayada.	56
6.4. Ensayo de tracción finalizado.	57
6.5. Útiles de compresión acoplados a la máquina de ensayos.	58
6.6. Mampara de seguridad en el ensayo de compresión.	59
6.7. Probeta en distintas etapas del ensayo de compresión.	60
6.8. NETZSCH DSC 214 Polyma.	62
6.9. Báscula analítica de precisión RADWAG.	63
6.10. Esquema del interior del DSC en funcionamiento.	63
7.1. Comparativa entre probetas de compresión del producto N°1 antes y después del ensayo.	70
7.2. Termograma del Producto N°1.	73
7.3. Termograma del Producto N°2.	74
7.4. Termograma del Producto N°3.	75
7.5. Termograma del Producto N°4.	76
7.6. Termograma del Producto N°5.	77

Índice de tablas

4.1. Valores de viscosidad del producto con bajo contenido en espesantes, con vacío y temperatura.	18
4.2. Valores medios y desviaciones estándar del producto con bajo contenido en espesantes, con vacío y temperatura	18
4.3. Valores de viscosidad del producto con bajo contenido en espesantes, con vacío y sin temperatura.	19
4.4. Valores medios y desviaciones estándar del producto con bajo contenido en espesantes, con vacío y sin temperatura	19
4.5. Valores de viscosidad del producto con bajo contenido en espesantes, sin vacío y con temperatura.	19
4.6. Valores medios y desviaciones estándar del producto con bajo contenido en espesantes, con vacío y temperatura	19
4.7. Valores de viscosidad del producto con bajo contenido en espesantes, con vacío y temperatura.	20
4.8. Valores medios y desviaciones estándar del producto con bajo contenido en espesantes, con vacío y temperatura	20
4.9. Valores de viscosidad del producto con alto contenido en espesantes,N°de lote 5. . . .	20
4.10. Valores medios y desviaciones estándar del producto con alto contenido en espesantes, N°de lote 6	21
4.11. Valores de viscosidad del producto con alto contenido en espesantes,N°de lote 6. . . .	21
4.12. Valores medios y desviaciones estándar del producto con alto contenido en espesantes, N°de lote 6	21
4.13. Densidades de las partes <i>A</i> del producto con bajo contenido en espesantes	24
4.14. Densidades de las partes <i>B</i> del producto con bajo contenido en espesantes	24
4.15. Densidades de las partes <i>A</i> del producto con alto contenido en espesantes	24
4.16. Densidades de las partes <i>B</i> del producto con alto contenido en espesantes	25
4.17. Notación simplificada de las distintas variables del producto	29
4.18. Datos relevantes de la exotermia del producto N°1	30
4.19. Datos relevantes de la exotermia del producto N°2	31
4.20. Datos relevantes de la exotermia del producto N°3	32
4.21. Datos relevantes de la exotermia del producto N°4	33
4.22. Datos relevantes de la exotermia del producto N°5	34
7.1. Resultados del ensayo de tracción del Producto N°1	65
7.2. Estadísticas del ensayo de tracción del Producto N°1	66
7.3. Resultados del ensayo de tracción del Producto N°2	66
7.4. Estadísticas del ensayo de tracción del Producto N°2	66
7.5. Resultados del ensayo de tracción del Producto N°3	67
7.6. Estadísticas del ensayo de tracción del Producto N°3	67
7.7. Resultados del ensayo de tracción del Producto N°4	67

7.8. Estadísticas del ensayo de tracción del Producto N°4	68
7.9. Resultados del ensayo de tracción del Producto N°5	68
7.10. Estadísticas del ensayo de tracción del Producto N°5	68
7.11. Resultados del ensayo de compresión del Producto N°1	69
7.12. Variables estadísticas del ensayo de compresión del Producto N°1	70
7.13. Resultados del ensayo de compresión del Producto N°2	70
7.14. Variables estadísticas del ensayo de compresión del Producto N°2	71
7.15. Resultados del ensayo de compresión del Producto N°3	71
7.16. Variables estadísticas del ensayo de compresión del Producto N°3	71
7.17. Resultados del ensayo de compresión del Producto N°4	71
7.18. Variables estadísticas del ensayo de compresión del Producto N°4	72
7.19. Resultados del ensayo de compresión del Producto N°5	72
7.20. Variables estadísticas del ensayo de compresión del Producto N°5	72
7.21. Resultados TG del Producto N°1	73
7.22. Resultados TG del Producto N°2	74
7.23. Resultados TG del Producto N°3	75
7.24. Resultados TG del Producto N°4	76
7.25. Resultados TG del Producto N°5	77
10.1. Presupuesto en recursos humanos	83
10.2. Presupuesto en licencias de software	83
10.3. Presupuesto en uso de equipos	84
10.4. Presupuesto en material de laboratorio	84
10.5. Presupuesto en materiales para la fabricación	85
10.6. Presupuesto en ensayos	85
10.7. Presupuesto total	85

Nomenclatura

Lista de símbolos

A_R	Alargamiento de rotura
σ_R	Carga de rotura
ρ	Densidad
σ	Desviación estándar
d	Diámetro
ΔC_p	Incremento de calor específico a presión constante
σ_P	Límite elástico
l	Longitud
m	Masa
E	Módulo de young
T	Temperatura
\bar{x}	Valor medio

Lista de abreviaciones, y tecnicismos

<i>DSC</i>	Differential Scanning Calorimetry
<i>EPI</i>	Equipo de protección individual
<i>GC</i>	Gel Coat
<i>I + D</i>	Investigación y desarrollo
<i>IPA</i>	Isopropanol
<i>Mix Ratio</i>	Relación de mezcla
<i>OF</i>	Orden de fabricación
<i>TDS</i>	Technical datasheet
<i>TG</i>	Temperatura de transición vitrea

Capítulo 1

Introducción

1.1. Objetivos del proyecto

En este trabajo fin de grado se han establecido una serie de objetivos que se desea cumplir para la fecha de finalización del mismo. Al tratarse de un proyecto realizado en colaboración con una empresa externa a la UPV, las metas y objetivos del trabajo se adaptan a las necesidades de un proyecto interno de la empresa. Ello también implica la omisión de cierta información debido a la confidencialidad que ha de mantenerse desde *Aerox Advanced Polymers*, que es la empresa colaboradora con el proyecto. Teniendo esto en cuenta, se enumeran los objetivos de este trabajo fin de grado:

1. Llevar a cabo la fabricación del producto de estudio. Además establecer distintas variables de producción y fabricar versiones del producto aplicándolas.
2. Establecer un control de calidad rutinario similar al que se haría en una empresa adquirente del producto y someter a este control todas las versiones del producto fabricadas.
3. Fabricar las probetas pertinentes para realizar posteriormente los ensayos que determinarán las características mecánicas del producto.
4. Someter probetas de las distintas versiones del material a una serie de ensayos mecánicos para determinar sus características.
5. Analizar los resultados obtenidos de los ensayos y determinar que versión del producto posee unas mejores características mecánicas.
6. Realizar un estudio económico sobre el coste total del proyecto a nivel teórico.

1.2. Motivación

La principal fuente de motivación de este trabajo fin de grado es la realización de un proyecto real y actual de una empresa, en este caso AEROX ADVANCED POLYMERS, donde yo, el autor del proyecto, he realizando las prácticas en empresa. Otra motivación que ha hecho que este trabajo tomara importancia a nivel personal es la participación en todos los procesos desde el inicio hasta el fin, desde la fabricación hasta el análisis de resultados ya que el centrarse en una sola parte nunca ha tenido atractivo para mí.

Además, el producto a estudiar, se trata de un producto comercial enfocado a la industria de los aerogeneradores que, actualmente se trata de una fuente de energía renovable a la alza y que adquiere cada día mayor importancia y repercusión sobre la sociedad a nivel global.

1.3. Descripción

Mediante el presente documento se pretende analizar a partir de técnicas experimentales la afectación que sufren las características físicas tanto como mecánicas de un adhesivo estructural de la serie EPOLIT FIX 900. Todo ello dependiendo de los valores que tomen las variables que influyen en la producción del mismo.

El producto es un adhesivo estructural desarrollado de forma íntegra por la empresa Aerox Advanced Polymers. Se trata de un adhesivo epoxi bicomponente. Enfatizando en los componentes del material, por un lado se encuentra la parte *A*, cuya composición es con base de resinas y por otro lado, la parte *B*, cuya composición está basada en aminas. El proceso de curado comienza una vez las dos partes del material han reaccionado. Este adhesivo es utilizado en diversas aplicaciones como la unión de paneles de fibra de vidrio, reparación de palas de aerogeneradores, adhesión de productos cerámicos en la construcción etc...

Este trabajo fin de grado se realiza en colaboración con la empresa Aerox Advanced Polymers. La experimentación sobre el material se hará tanto en instalaciones de la UPV como en instalaciones de Aerox, consiguiendo así un mayor abanico de resultados del cual obtener unos resultados de mayor fiabilidad.

El punto central del proyecto consiste en obtener la combinación de variables de producción óptimas para aumentar el módulo de elasticidad del material (Modulo de Young), para ello se tratará de reducir al máximo las burbujas procedentes de la fabricación en el producto final con la finalidad de obtener un producto lo más homogéneo posible. Seguidamente se someterá al producto al ensayo normalizado de tracción. Con esta base, se analizará si los procesos utilizados para optimizar las características mecánicas del material tienen alguna repercusión en las características físicas del mismo, como en la viscosidad o la densidad. Estos parámetros a su vez deberán estar contenidos en un rango de valores fijado por el fabricante del producto, que asegure que se cumplen las condiciones de calidad mínimas.

Respecto a las variables de producción que se pueden modificar para asignar variabilidad al experimento, las de mayor relevancia son las temperaturas y tiempos a lo largo de los pasos previos a la aplicación del producto, por ello se aplicarán condiciones de vacío y temperaturas elevadas en ambas partes del producto durante las etapas de mezclado y almacenamiento modificadas en el proceso de vacío así como en el mezclado de las dos partes del producto.

Capítulo 2

Estado del Arte

A lo largo de la historia han existido diversas fuentes de energía aprovechadas por el hombre para su beneficio personal. Sin embargo, son las energías abastecidas por restos fósiles las que han predominado históricamente.

Centrándonos en la energía eólica, campo en el que se sitúa el presente documento, podemos resaltar varios hitos en la historia de la energía eólica, entre los cuales destacamos a los siguientes pioneros:

- **Charles F. Brush(1849-1929)** En 1887 construyó una máquina actualmente considerada como el primer aerogenerador con finalidad de producir electricidad. El diámetro de este aerogenerador era de 17 metros y el rotor contaba con 144 hojas de cedro. A pesar de las enormes dimensiones para la época, solamente era capaz de generar una potencia de 12 kW.

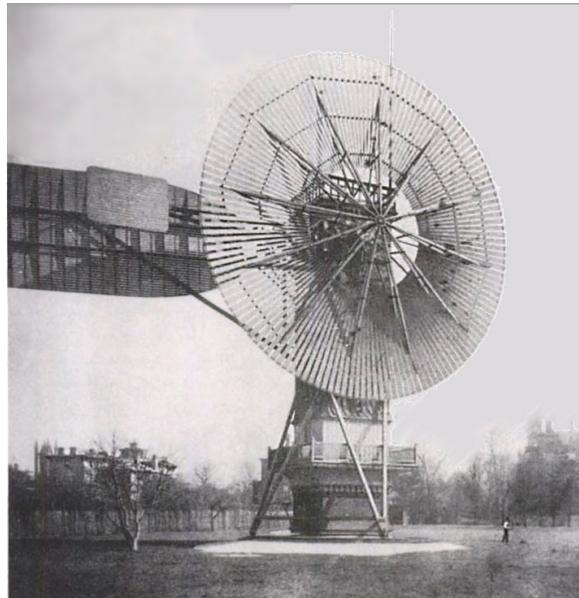


Figura 2.1: Aerogenerador construido por Charles F. Brush en 1887 (Fuente: en.wikipedia.org).

- **Poul la Cour (1846-1908)** Era un meteorólogo danés. Se le considera el padre de la energía eólica moderna. Diseñó y desarrolló los primeros aerogeneradores comerciales, que se instalaron después de la primera guerra mundial debido a la escasez de combustibles fósiles. También creó la primera academia de energía eólica, donde se formaron los primeros ingenieros especializados en el tema.

- **Albert Betz (1885-1968)** Era un físico alemán. Formuló la ley Betz, que establece el valor máximo que se puede aprovechar de la energía cinética del viento (59.3 %). Desarrolló una teoría sobre la formación de las alas que aún hoy en día se sigue utilizando en la construcción de aerogeneradores.
- **Palmer Cosslett Putnam (1910-1986)** Ingeniero americano que desarrolló el aerogenerador *Smith Putnam* en 1941. Este aerogenerador trabajó durante 4 años sin interrupciones hasta que se dio un fallo de materiales. Cabe destacar que en esta época no existían materiales en el mercado aptos para este objetivo.

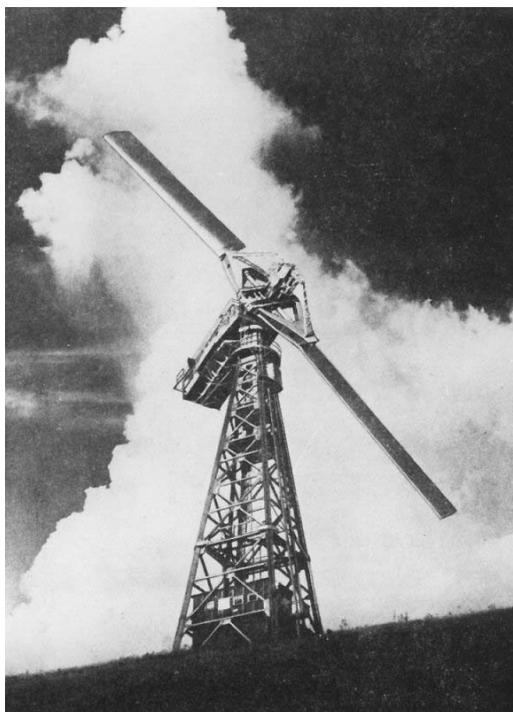


Figura 2.2: Aerogenerador *Smith-Putnam*, construido en 1941. (Fuente: eolienne.cavey.org).

- **Ulrich W Hüttner (1910-1990)** Ingeniero alemán creador del aerogenerador StGW-34 en el año 1957. Actualmente, es considerado como el primer aerogenerador de la tecnología eólica moderna.

A pesar de todos estos hitos, no fue hasta los años 70, cuando a raíz de la primera crisis del petróleo y sobre todo con el nacimiento de los movimientos sociales en contra de la energía nuclear cuando empezaron a ganar popularidad las energías renovables. Se buscaron nuevas formas de explotar los recursos de la Tierra. Esta búsqueda se centró en que las nuevas formas de energía fueran económicas a la vez que rentables. En el caso de la energía eólica, los aerogeneradores de la época tenían un precio muy elevado y la energía obtenida mediante los mismos no ayudaba a rentabilizarlos, debido a esto, fueron muchos los que en un principio se opusieron a su construcción. En un intento de promoverlos, distintos gobiernos internacionales presentaron una serie de ayudas para investigación en energía eólica y subvenciones para la construcción de aerogeneradores.



Figura 2.3: Parque eólico *Onshore*. (Fuente: www.moroccoworldnews.com)

Fruto de esta iniciativa surgieron centros de investigación como el Instituto Alemán de la Energía Eólica (DEWI) o el Instituto de Investigación Danés (Risø), gracias a los cuales se han llevado a cabo una estandarización de las instalaciones eólicas y la seguridad en ellas.

A partir de 1981 el coste de la energía eólica se redujo en un 50 % gracias al desarrollo del aerogenerador de 55 kW, llevando a la energía eólica a ser considerada una de las más económicas si se tienen en cuenta los costes externos, como los daños producidos al medio ambiente. En la actualidad, una parte importante de la electricidad mundial es producida por aerogeneradores. Además, Alemania, Estados Unidos y España son los tres países con mayor energía eólica instalada del mundo.

En la actualidad existen dos tipos principales de parques eólicos. En primer lugar encontramos los parques *onshore*, los cuales están contruidos en tierra firme, dado que se encuentran ubicados próximos a poblaciones han de cumplir una serie de requisitos de tolerancia con el medio ambiente. Está establecido un límite tanto para el ruido emitido como para las dimensiones ya que afectan al impacto visual. El otro tipo de parques eólicos que encontramos es el modelo *offshore*, se trata de parques de aerogeneradores contruidos en alta mar. Este tipo de parques son una tecnología relativamente reciente ya que los primeros fueron instalados en Dinamarca en 1991. Frente al *onshore* se encuentran varias ventajas que hacen que la investigación se centre actualmente en este tipo de parques, entre ellas:

- Posibilidad de producción de mayor cantidad de energía ya que la velocidad del viento en alta mar es más elevada y posee una mayor constancia.
- No existen restricciones de ruido ni espacio debido a que el impacto visual de estas instalaciones es menor que en tierra firme.



Figura 2.4: Parque eólico *Offshore*. (Fuente: www.offshorewind.biz).

Sin embargo el elevado coste de este tipo de parques es el principal inconveniente para su proliferación. Los costes de instalación y mantenimiento hacen que la producción de energía eólica en el mar sea un 20 % más cara que la producida en tierra. Hay que tener en cuenta que se trata de una tecnología reciente y que posee un gran potencial para el abaratamiento, como se ha comentado anteriormente, el apoyo de los gobiernos puede resultar clave para hacer que este tipo de energía prospere.

Con la llegada del siglo XXI, la implantación de parques eólicos creció de forma exponencial debido a un incremento del calentamiento global y la preocupación mundial por la ecología. Además, con el protocolo de Kyoto, un gran número de países se comprometieron a reducir sus emisiones a la atmósfera, haciendo así que las instalaciones de energías renovables se vieran favorecidas y subvencionadas por los gobiernos. En este punto de la historia la investigación eólica estaba completamente centrada en el desarrollo de nuevos modelos de aerogeneradores, de mayor tamaño y potencia, capaces de aprovechar de forma más eficiente el viento etc... Sin embargo, durante todo este tiempo no se había tenido en cuenta el deterioro y mantenimiento necesario en los aerogeneradores ya instalados. Alrededor del año 2010, en inspecciones rutinarias se descubrió que las puntas de pala de los aerogeneradores estaban en unas muy malas condiciones, a raíz de este suceso, comenzó la investigación en el campo de los materiales para conseguir eliminar o reducir este deterioro.

Las aspas de los aerogeneradores rotan a una velocidad comprendida entre 15 y 40 revoluciones por minuto. Esta velocidad angular se transforma en velocidad lineal en la punta de las aspas. Si se consideran las dimensiones de un rotor de aerogenerador (42-80 metros de diámetro en *onshore* y hasta 140 metros de diámetro en *offshore*) implica que las puntas de pala tienen una velocidad de funcionamiento cercana a los 300km/h. A estas velocidades, los pequeños impactos con las partículas contenidas en el aire generan una erosión en el aspa. Si además se suma la exposición a la intemperie durante 365 días al año, donde existe exposición a elevadas temperaturas, rayos UV, hielo y lluvia, el deterioro de las palas eólicas se convierte en un punto importante del mantenimiento.



Figura 2.5: Deterioro en el borde de ataque de una pala de aerogenerador (Fuente: www.hogrehojder.se)

En este momento, con la necesidad en el sector eólico de innovar e investigar soluciones para el deterioro de las aspas de los aerogeneradores es cuando surge la empresa AEROX ADVANCED POLYMERS, que en 2014 con un equipo de ingenieros dedicados al I+D desarrolla una serie de productos para este sector, llegando en poco tiempo a ser los proveedores de los fabricantes de palas de aerogenerador líderes del mercado internacional. A día de hoy, la empresa cuenta con una amplia gama de productos entre los que destacan:

- **Gel Coats:** Los productos de la serie EPOLIT® GC E están específicamente diseñados para proteger la superficie de las aspas de los aerogeneradores. Dentro de la serie encontramos productos destinados a la aplicación manual o a la aplicación mediante máquina, para aplicaciones en molde o para usarlos en el proceso de acabado de las palas.



Figura 2.6: Aplicación de un producto EPOLIT® GC E en el molde de una pala de aerogenerador (Fuente: www.aerox.es)

- **LEP:** La gama de productos LEP (Leading Edge Protection) es el último producto desarrollado por Aerox y fue lanzado en 2016. Los revestimientos AEROX AHP LEP están enfocados a la protección de los bordes de ataque de las palas de los aerogeneradores. Las características de cada versión de AEROX AHP LEP está adaptada a una gran variedad de condiciones ambientales de trabajo. Existen versiones dedicadas tanto para palas *onshore* como para *offshore*.

- **Adhesives:** En esta gama de productos se encuentra la serie EPOLIT® FIX, donde uno de los productos es el objeto de estudio del presente proyecto. Los productos EPOLIT® FIX son adhesivos estructurales diseñados para la unión de los paneles de fibra de vidrio que conforman las cubiertas exteriores de las palas de los aerogeneradores. Dentro de la amplia gama de productos, se encuentran productos enfocados a la industria así como al mantenimiento, con aplicación mediante cartucho o con aplicación industrial.



Figura 2.7: Aplicación con cartucho de un producto EPOLIT® FIX (Fuente: www.aerox.es)

Esta serie de productos presenta unas excelentes propiedades de resistencia química, resistencia al cizallamiento y pelado además de unas muy buenas cualidades para su aplicación en vertical dado su reducido descuelgue.

Una vez introducido el contexto tanto histórico como la situación actual del sector de la energía eólica se procede con el grueso del proyecto.

Capítulo 3

Fabricación

Para la realización de este proyecto se ha llevado a cabo un proceso de fabricación en las instalaciones de la empresa Aerox. La labor de fabricación de un adhesivo epoxi requiere de una serie de instrumental técnico por lo que se ha hecho uso del laboratorio de la empresa.

Como el propio nombre del proyecto indica, la producción del material es una variable, por lo que se han seguido distintos procesos para la preparación de cada una de las muestras. Quedan distinguidos principalmente dos productos, de los cuales se obtendrán varias subcategorías más adelante. Se denotará el producto como *Epolit Fix 900* a pesar de ser uno de los que comprende esta gama para ayudar a la comprensión del trabajo.

- **Epolit Fix 900** con alto contenido en aditivos tixotropantes.
- **Epolit Fix 900** con bajo contenido en aditivos tixotropantes

Entre los dos productos la única diferencia existente es el contenido en aditivos. Esta clase de aditivos funcionan como espesantes dotando al producto de una mayor o menor viscosidad. La cantidad de reactivos tanto en uno como en otro es la misma, sin embargo, para mantener el *mix ratio* entre la parte *A* y *B* se han realizado pequeños ajustes de la formulación en lo correspondiente a los aditivos tixotropantes.

Para dar comienzo a la fabricación del producto el primer paso es esencial y se trata de crear una *OF*, la cual pasa directamente al servidor de la empresa y en ella figura la cantidad de cada una de las materias primas utilizadas para la fabricación del producto. Este paso ayuda a regular y controlar la logística de la empresa en cuanto a materias primas se refiere. Una vez la *OF* ha sido aprobada, esta es remitida a la fábrica o al laboratorio dependiendo de los requerimientos de la fabricación (disponibilidad de materias primas, viscosidad del producto, cantidad de producto...)

En el caso del producto que tiene un alto contenido en espesantes, estamos hablando de un producto con una viscosidad muy elevada y por ello, no se puede fabricar con un agitador de baja potencia. Debido a ello, la fabricación de este producto (parte *A* y *B*) se ha llevado a cabo en las instalaciones de fábrica, donde los agitadores dispuestos cuentan con una mayor potencia y así es posible conseguir una perfecta homogeneización. Una vez se ha terminado el producto, las dos partes que lo conforman cuentan con el aspecto mostrado en la figura 3.1. En este estado, el producto es recogido de fábrica y llevado al laboratorio para la experimentación con el mismo.



Figura 3.1: A la izquierda, parte **A** y a la derecha parte **B** del producto con alto contenido en espesantes

La fabricación de la parte *A* así como de la *B* del producto con bajo contenido en espesantes se ha llevado a cabo en el laboratorio ya que en este caso, los agitadores dispuestos en esta instalación son capaces de lidiar con la viscosidad del producto. Si se comparan las figuras 3.1 y 3.2, dónde en esta última se muestra el producto con bajo contenido en espesantes, se puede apreciar que la viscosidad varía considerablemente entre los dos productos.



Figura 3.2: A la izquierda, parte **A** y a la derecha parte **B** del producto con bajo contenido en espesantes

Una vez finalizada la fabricación del producto con bajo contenido en espesantes, éste se someterá a distintos procesos, los cuales serán contabilizados como variables de producción y posteriormente se llevará a cabo el estudio de la influencia de estas variables sobre sus características mecánicas. La finalidad de estos procesos principalmente es la eliminación de todo el aire contenido en el producto y que no es capaz de ser expulsado por diferencia de densidades. En el caso del producto con alto contenido de espesantes, estos procesos no se van a aplicar ya que tras varias pruebas, se ha determinado que debido a la alta densidad y viscosidad del producto, a pesar de los procesos, no se consigue eliminar la cantidad de aire retenido. Los dos procesos a los que se va a someter el producto con bajo contenido en espesantes son:

- Proceso de eliminación de burbujas mediante vacío:** El producto es sometido a una presión negativa mediante la creación de vacío en una cámara estanca, la utilizada en este proyecto se puede apreciar en la figura 3.3. Con la extracción del aire de la cámara se consigue que el contenido gaseoso atrapado en el producto tenga una tendencia a ascender hacia la superficie del mismo y después de crear una burbuja, esta se explote y libere el aire inicialmente retenido en el producto. A lo largo de este proceso se ayudará al desplazamiento de aire hacia la superficie sometiendo la cámara de vacío a movimientos vibratorios. La presión a la que se ha sometido el producto en todas las ocasiones que se ha realizado este proceso es de -1Bar . La presión negativa es generada por una bomba de vacío eléctrica. Finalmente cabe destacar que hay que verificar previamente la presión que la cámara de vacío es capaz de soportar. Los productos que se han sometido a este proceso, han estado expuestos a la presión de -1Bar hasta que la aparición de burbujas en la superficie ha sido nula.



Figura 3.3: Cámara de vacío

- **Proceso de eliminación de burbujas mediante calor:** El producto es sometido a una temperatura elevada con la ayuda de un horno industrial como el mostrado en la figura 3.4. Este proceso se basa en el principio físico que relaciona inversamente temperatura y viscosidad de un líquido. Al disminuir la viscosidad del producto, se facilita el desplazamiento de las burbujas de aire retenidas en el interior del producto. Todos los productos sometidos a este proceso han estado expuestos a una temperatura de 80°C durante un tiempo de 4h.



Figura 3.4: Horno industrial

Una vez denotados los procesos para la reducción de burbujas de aire en el producto, utilizando combinatoria es posible obtener cuatro variaciones distintas de del producto con bajo contenido en espesantes:

- Producto **sin** aplicación de vacío y **sin** aplicación de temperatura
- Producto **sin** aplicación de vacío y **con** aplicación de temperatura
- Producto **con** aplicación de vacío y **sin** aplicación de temperatura
- Producto **con** aplicación de vacío y **con** aplicación de temperatura

En el caso del producto con alto contenido de espesantes, solo se contará con una variación, ya que a pesar de someterlo a los procesos anteriores, no se ha conseguido la eliminación de burbujas de aire retenidas.

Capítulo 4

Proceso de control de calidad

A nivel industrial, un aspecto muy importante es la calidad del producto que se adquiere por parte de una empresa. Para controlar la calidad de un adhesivo estructural existen varios procedimientos usuales que se llevan a cabo una vez se recibe el producto. Este proceso se denomina control de calidad y ayuda a determinar si el producto adquirido cumple con las especificaciones teóricas del fabricante.

Para la realización de este proyecto se ha llevado a cabo un proceso de control de calidad del producto similar al que se realizaría en una empresa que adquiere el producto a nivel industrial. Son varios los ensayos a los que se ha sometido el producto, a continuación se explica en qué consiste cada uno de los procesos así como la metodología utilizada. Finalmente, se muestran los resultados obtenidos y el tratamiento de los mismos mediante métodos estadísticos simples.

4.1. Viscosidad

Esta sección abarca tanto el procedimiento seguido para la obtención de la viscosidad dinámica como los resultados obtenidos del producto, tanto de la parte *A* como de la parte *B* de todas las variaciones del producto *Epolit Fix 900*. Todo el proceso seguido en el control de calidad de la viscosidad del producto cumple la norma UNE-EN ISO 2884, la cual regula los instrumentos así como los métodos utilizados.

4.1.1. Material utilizado

El principal instrumento de medida del cual se ha hecho uso es un viscosímetro apreciable en la figura 4.2. Este dispositivo cuenta con una cabeza superior, la cual es un viscosímetro rotacional y una base inferior que controla la temperatura del producto durante la medición. El método utilizado para la medición de la viscosidad es el denominado cono-placa, donde se hace girar un husillo sobre una muestra del producto. La viscosidad del producto se calcula teniendo en cuenta las características del cono y conociendo el par que genera el husillo al girar a una velocidad de cizalla determinada. De esto último se encarga la cabeza superior mientras que la base se encarga de disponer una superficie completamente plana y de mantener una temperatura constante en ella. Todas las mediciones realizadas con el viscosímetro se han hecho haciendo uso de un cono 4020 y con la base a una temperatura de 25°C.

Además de los dispositivos de medida, para la preparación de las muestras se han utilizado varios instrumentos auxiliares con la finalidad de asegurar la repetitividad del ensayo. Dichos instrumentos se aprecian en la figura 4.1 y son:

- Espátula metálica
- Espátula de laboratorio
- Molde de metacrilato



Figura 4.1: Instrumentos auxiliares para el control de viscosidad

4.1.2. Procedimiento

Una vez el reómetro se encuentra encendido, los pasos seguidos para la toma de medidas son los siguientes:

- Fijar la temperatura del ensayo en la base del viscosímetro.
- Seleccionar el tipo de husillo utilizado para la medida.
- Fijar un tiempo de medida y la velocidad de cizalla

Para este proyecto se han utilizado dos velocidades de cizalla distintas ya que disponemos de dos variaciones principales del producto, las cuales poseen unas viscosidades muy distintas. Cabe destacar que con el producto con alto contenido en espesantes se ha tenido que reducir mucho la velocidad de cizalla ya que generaba un par que excedía la capacidad de medida del viscosímetro. Para el producto menos viscoso se ha utilizado una velocidad de cizalla de $20s^{-1}$ y para el producto más viscoso la velocidad ha sido reducida a $2s^{-1}$

A estas alturas los instrumentos de medida se encuentran completamente configurados, los siguientes pasos describen cómo situar la muestra:

- Abrir el bote que contiene el producto y remover con una espátula de laboratorio durante un minuto, homogeneizando la muestra. Tratar de no introducir burbujas de aire en su realización.
- Colocar el molde de metacrilato en la base del reómetro.
- Con la ayuda de la espátula de laboratorio introducir en el molde la cantidad de producto suficiente como para rebasarlo.
- Haciendo uso de la espátula metálica ayudar al producto a adaptarse al molde y retirar el exceso de producto.
- Extraer el molde de metacrilato en dirección vertical para no dañar la muestra. Una vez sobrepasada la muestra, retirar el molde hacia fuera.
- Bajar el cono del viscosímetro hasta la altura fijada en la calibración.
- Iniciar la medida.



Figura 4.2: Control de la viscosidad de la parte A del producto

El viscosímetro genera un valor de viscosidad de forma instantánea en la pantalla, sin embargo, siguiendo la norma hay que esperar un tiempo mínimo para que la medida se estabilice y sea un valor fiable. En este proyecto, el tiempo para cada medida ha sido de 10min . Una vez finalizada la medición, se limpiarán los instrumentos utilizados con la ayuda de un papel impregnado con acetona a excepción

del molde de metacrilato, que se limpiará de la misma forma pero con el papel impregnado de IPA para evitar su deformación. En la labor de limpieza se han de eliminar todos los restos del producto existentes.

4.1.3. Medidas

Para el registro de datos de viscosidad se han tomado cinco medidas de cada una de las variaciones del producto, tanto en la parte A como en la parte B. Este número de medidas se debe a la variabilidad que presenta el producto en lo que a viscosidad se refiere, ya que influyen distintos factores como la existencia de espesantes mal disociados o pequeñas porciones del producto reseca.

Con los datos medidos se procederá al cálculo del valor medio y de la desviación estándar. Dado el caso de que la desviación supere el valor correspondiente al 5% del resultado de la media, se procederá a tomar 3 medidas más y así sucesivamente hasta que el valor de la desviación sea inferior a $0,05 \cdot \sigma_m$.

- Producto con bajo contenido en espesantes

Con aplicación de vacío y con aplicación de temperatura.

Parte A	Viscosidad [$Pa \cdot s$]	Parte B	Viscosidad [$Pa \cdot s$]
	51.09		26.06
	49.94		25.88
	51.59		25.73
	47.32		26.01
	50.72		26.07

Tabla 4.1: Valores de viscosidad del producto con bajo contenido en espesantes, con vacío y temperatura.

De los valores medidos obtendremos un valor medio y la desviación estándar.

Parte A			Parte B		
\bar{x}	Valor medio [$Pa \cdot s$]	50.13	\bar{x}	Valor medio [$Pa \cdot s$]	25.95
σ	Desviación estándar [$Pa \cdot s$]	1.51	σ	Desviación estándar [$Pa \cdot s$]	0.13

Tabla 4.2: Valores medios y desviaciones estándar del producto con bajo contenido en espesantes, con vacío y temperatura

La desviación estándar en ambos casos es menor del 5% del valor de la media, por lo tanto consideraremos una medida aceptable.

Con aplicación de vacío y sin aplicación de temperatura.

Parte A	Viscosidad [$Pa \cdot s$]	Parte B	Viscosidad [$Pa \cdot s$]
	49.53		25.18
	50.40		25.12
	51.27		25.48
	50.70		25.77
	49.96		25.95

Tabla 4.3: Valores de viscosidad del producto con bajo contenido en espesantes, con vacío y sin temperatura.

De los valores medidos obtendremos un valor medio y la desviación estándar.

Parte A			Parte B		
\bar{x}	Valor medio [$Pa \cdot s$]	50.37	\bar{x}	Valor medio [$Pa \cdot s$]	25.50
σ	Desviación estándar [$Pa \cdot s$]	0.60	σ	Desviación estándar [$Pa \cdot s$]	0.32

Tabla 4.4: Valores medios y desviaciones estándar del producto con bajo contenido en espesantes, con vacío y sin temperatura

La desviación estándar en ambos casos es menor del 5% del valor de la media, por lo tanto es una medida aceptable.

Sin aplicación de vacío y con aplicación de temperatura.

Parte A	Viscosidad [$Pa \cdot s$]	Parte B	Viscosidad [$Pa \cdot s$]
	52.55		26.16
	51.31		26.42
	52.47		26.14
	52.39		26.60
	52.79		26.11

Tabla 4.5: Valores de viscosidad del producto con bajo contenido en espesantes, sin vacío y con temperatura.

De los valores medidos obtendremos un valor medio y la desviación estándar.

Parte A			Parte B		
\bar{x}	Valor medio [$Pa \cdot s$]	52.30	\bar{x}	Valor medio [$Pa \cdot s$]	26.29
σ	Desviación estándar [$Pa \cdot s$]	0.51	σ	Desviación estándar [$Pa \cdot s$]	0.19

Tabla 4.6: Valores medios y desviaciones estándar del producto con bajo contenido en espesantes, con vacío y temperatura

Es una medida válida ya que la desviación estándar en ambos casos es menor del 5% del valor de la media.

Sin aplicación de vacío y sin aplicación de temperatura.

Parte A	Viscosidad [$Pa \cdot s$]	Parte B	Viscosidad [$Pa \cdot s$]
	51.76		36.40
	52.48		36.50
	52.73		36.33
	51.97		35.92
	51.83		35.64

Tabla 4.7: Valores de viscosidad del producto con bajo contenido en espesantes, con vacío y temperatura.

De los valores medidos obtendremos un valor medio y la desviación estándar.

Parte A			Parte B		
\bar{x}	Valor medio [$Pa \cdot s$]	52.15	\bar{x}	Valor medio [$Pa \cdot s$]	36.16
σ	Desviación estándar [$Pa \cdot s$]	0.38	σ	Desviación estándar [$Pa \cdot s$]	0.33

Tabla 4.8: Valores medios y desviaciones estándar del producto con bajo contenido en espesantes, con vacío y temperatura

Se acepta la medida ya que la desviación estándar en ambas partes es menor del 5% del valor de la media.

- Producto con elevado contenido en espesantes En el caso del producto con elevado contenido en espesantes se ha optado por realizar el control de la viscosidad sobre dos lotes de producción para fabricar con posterioridad las probetas con el que presente mayor repetitividad y una menor desviación entre medidas.

N° de Lote 5.

Parte A	Viscosidad [$Pa \cdot s$]	Parte B	Viscosidad [$Pa \cdot s$]
	865.4		257.3
	853.9		255.4
	866.9		261.0
	856.9		260.8
	865.1		263.2

Tabla 4.9: Valores de viscosidad del producto con alto contenido en espesantes, N° de lote 5.

De los valores medidos obtendremos un valor medio y la desviación estándar.

Parte A			Parte B		
\bar{x}	Valor medio [$Pa \cdot s$]	861.64	\bar{x}	Valor medio [$Pa \cdot s$]	259.54
σ	Desviación estándar [$Pa \cdot s$]	5.218	σ	Desviación estándar [$Pa \cdot s$]	2.803

Tabla 4.10: Valores medios y desviaciones estándar del producto con alto contenido en espesantes, N°de lote 6

Se acepta la medida ya que la desviación estándar en ambas partes es menor del 5% del valor de la media.

N°de Lote 6.

Parte A	Viscosidad [$Pa \cdot s$]	Parte B	Viscosidad [$Pa \cdot s$]
	804.7		360.2
	809.7		358.7
	799.4		356.2
	806.6		364.7
	803.0		361.8

Tabla 4.11: Valores de viscosidad del producto con alto contenido en espesantes, N°de lote 6.

De los valores medidos obtendremos un valor medio y la desviación estándar.

Parte A			Parte B		
\bar{x}	Valor medio [$Pa \cdot s$]	804.68	\bar{x}	Valor medio [$Pa \cdot s$]	360.32
σ	Desviación estándar [$Pa \cdot s$]	3.452	σ	Desviación estándar [$Pa \cdot s$]	2.863

Tabla 4.12: Valores medios y desviaciones estándar del producto con alto contenido en espesantes, N°de lote 6

La medida se considera válida ya que la desviación estándar en ambas partes es menor del 5% del valor de la media.

4.1.4. Observaciones

Las viscosidades del producto con bajo contenido en espesantes, al tratarse de un producto no fabricado por la empresa de forma genérica era el primer registro sobre viscosidades hecho hasta el momento. Así pues no existen valores previos para comparar y verificar que los datos son correctos. Es cierto que se observa una pequeña diferencia de valores si comparamos con el resto en la parte B del producto sin vacío y sin temperatura, sin embargo, ante la repetitividad y la no existencia de datos anómalos. Las medidas se consideran correctas.

Respecto al producto con alto contenido de espesantes ha de cumplir según su ficha técnica (TDS) que las viscosidades estén comprendidas entre $(700 - 900) Pa \cdot s$ para la parte A y entre $(200 - 400) Pa \cdot s$ para la parte B. Para la fabricación de probetas, como variación del producto con alto contenido en

espesantes se utilizará el lote de producción N°6 ya que presenta una desviación estándar mucho menor en la parte *A* y una desviación similar al N°5 en la parte *B*.

4.2. Densidad

En este apartado se detallará todo el proceso de medición de la densidad del producto en todas sus variables. Las medidas se tomarán por separado, por un lado la de la parte *A* y por otro, la de la parte *B*. A nivel de normativa, todo el proceso de medición de densidades queda registrado en la norma UNE-EN ISO 1183, por ello, se ha recurrido a la misma para crear el proceso de medición de densidad para este proyecto y por lo tanto todos los procedimientos son válidos a nivel internacional.

4.2.1. Material utilizado

Para la realización de las medidas de densidad, el principal instrumento utilizado es un picnómetro. Se trata de un recipiente metálico con un volumen interior y una masa calibrados, de forma que al rellenar el recipiente, con una simple operación matemática se obtiene la densidad del producto. En este caso, el picnómetro tiene una masa de 190g y un volumen interno de 100ml. Conociendo estos datos, la densidad de los productos se calculará como:

$$\frac{m - 190}{100} = \rho(g/ml) = \rho(g/cm^3) \quad (4.1)$$

donde

- **m** es la masa del picnómetro lleno del producto en gramos.
- **ρ** es la densidad del producto



Figura 4.3: Picnómetro

El hecho de verter la cantidad exacta dentro del recipiente del picnómetro es posible gracias al orificio que posee en la parte superior, de forma que al colocar la tapa del recipiente, el propio picnómetro expulsa la cantidad excedente de producto. Además del picnómetro, serán necesarios otros instrumentos para completar la medición de la densidad:

- Báscula digital.
- Espátula de laboratorio.
- Papel y acetona.

4.2.2. Procedimiento

Para realizar la medición de la densidad, al igual que en los procesos de control de calidad anteriores, el primer paso es homogeneizar el producto con la ayuda de una espátula de laboratorio, evitando introducir burbujas de aire durante el proceso. Posteriormente, los pasos a seguir son:

- Verter el producto en el interior del picnómetro hasta rebasar la muesca de la tapa.
- Colocar la tapa del picnómetro y apretar lentamente hasta que todo el producto excedente haya salido por el orificio superior.
- Limpiar el producto sobrante situado en la parte superior de la tapa.
- Pasar un papel empapado en acetona por el picnómetro, eliminando así el excedente de producto por completo.
- Asegurarse de que la báscula se encuentra tarada a cero.
- Situar el picnómetro sobre la báscula y obtener la masa.
- Aplicar la fórmula de la ecuación 4.1 para obtener la densidad del producto.



Figura 4.4: Medición de la masa del picnómetro lleno de producto

Una vez finalizada la medición se limpiarán todos los instrumentos utilizados con acetona y papel, eliminando por completo los restos del producto.

4.2.3. Medidas

En cuanto a los valores obtenidos de las densidades, tanto en las correspondientes al producto así como en otras medidas de densidad realizadas en la empresa sobre otros productos, presentan una variabilidad entre medidas mínima. Por ello se ha optado por la eliminación del estudio estadístico y se ha recogido únicamente un valor de densidad para cada una de las variaciones del producto, tanto de las partes *A* como de las partes *B*.

- Producto con bajo contenido en espesantes

Parte A		
Aplicación Vacío	Aplicación Temperatura	Densidad [g/cm^3]
SI	SI	1.340
SI	NO	1.252
NO	SI	1.206
NO	NO	1.204

Tabla 4.13: Densidades de las partes *A* del producto con bajo contenido en espesantes

Parte B		
Aplicación Vacío	Aplicación Temperatura	Densidad [g/cm^3]
SI	SI	1.004
SI	NO	1.014
NO	SI	1.003
NO	NO	1.018

Tabla 4.14: Densidades de las partes *B* del producto con bajo contenido en espesantes

- Producto con alto contenido en espesantes

Parte A	
Nº de lote	Densidad [g/cm^3]
5	1.264
6	1.259

Tabla 4.15: Densidades de las partes *A* del producto con alto contenido en espesantes

Parte B	
Nº de lote	Densidad [g/cm^3]
5	1.070
6	1.057

Tabla 4.16: Densidades de las partes *B* del producto con alto contenido en espesantes

4.2.4. Observaciones

Contemplando los valores obtenidos de la medición de la densidad del producto, se puede apreciar con claridad en las tablas 4.13 y 4.14, como en el caso del producto líquido la densidad aumenta cuantos más procesos de eliminación de aire se han realizado sobre el producto. Es un indicativo de que a medida que se aplican más procesos sobre el producto, la eliminación de aire es mayor ya que la densidad del producto es obviamente mayor que la del aire. La diferencia que se aprecia en la parte *B* es menor ya que se trata de un producto menos viscoso donde la extracción de aire es más fácil y se consigue prácticamente sin someterla a ningún proceso. En el caso de la parte *A* se observa como la aplicación de vacío es más efectiva que la aplicación de temperatura ya que se consigue una mayor densidad, indicativo de menor contenido de aire en el producto.

Al igual que en el caso de la viscosidad, se trata del primer control de calidad realizado sobre el producto con bajo contenido en espesantes, sin embargo, el producto en teoría ha de tener la misma densidad con alto y bajo contenido en espesantes. La ficha técnica del producto establece un rango de valores válidos para la densidad, en la parte *A* el rango está comprendido entre $(1,2 - 1,4)g/cm^3$ y en el caso de la parte *B* entre $(0,9 - 1,1)g/cm^3$. Se observa que todas las variables del producto poseen valores comprendidos entre los límites aceptables, por lo tanto cumplen el control de calidad. Respecto al producto con más espesantes, como se ha comentado en 4.1.4 se escogerá el lote N°6.

4.3. Exotermia

Un control rutinario realizado sobre los adhesivos estructurales es la exotermia del mismo. Este control se realiza como inspección a la entrada en cualquier empresa que adquiera el producto. Mediante este control se pretende conocer la temperatura máxima que puede alcanzar el producto una vez entran en reacción las partes *A* y *B*. Así pues también se controla la cantidad de tiempo que tarda el producto en alcanzar ese punto de temperatura máxima.

En este caso, con el *Epolit Fix 900* el pico exotérmico debería darse una vez hayan transcurrido las dos horas y media desde que se homogeneizan los dos componentes. Además, la temperatura máxima no ha de rebasar los $49^{\circ}C$ según la TDS del producto.

4.3.1. Material utilizado

Para llevar a cabo este control, el principal instrumento de medida necesario es una sonda electrónica. Esta sonda está compuesta por un termopar y gracias a un dispositivo de registro es capaz de guardar los datos de forma automática. Este factor hace que no se tengan que registrar los datos de forma periódica manualmente.



Figura 4.5: Sonda de temperatura junto con el dispositivo de registro de datos

Además de la sonda, se hará uso de otros instrumentos como:

- Espátula de laboratorio.
- Báscula de precisión.
- Piana y pinza.
- Agitador.
- Cronómetro.
- Papel y acetona.

Finalmente el proceso de tratamiento de datos se realizará mediante un ordenador, donde se descargarán los archivos de registro creados por la sonda.

4.3.2. Procedimiento

Para la medición de la exotermia se ha dispuesto en el laboratorio una piana con una pinza de sujeción, la cual tiene la misión de sostener la sonda. La posición de todos los elementos es fija de forma que la sonda permanecerá siempre sumergida en el producto a la misma altura, más concretamente, en el centro de la muestra y un centímetro por encima del fondo del recipiente que contiene la muestra.

Para realizar este control ha de prepararse una muestra del producto que contenga entre 150 y 160 gramos. Por ello, teniendo en cuenta la relación de mezcla de la parte *A* y *B* se preparará la muestra en un recipiente de plástico cuya capacidad es 0,5l. Una vez el vaso contiene la cantidad correcta de la mezcla, se lleva a cabo el proceso de homogeneización. En este caso, como se trata de una mezcla y no una simple homogeneización de una muestra, se hará uso de un agitador.

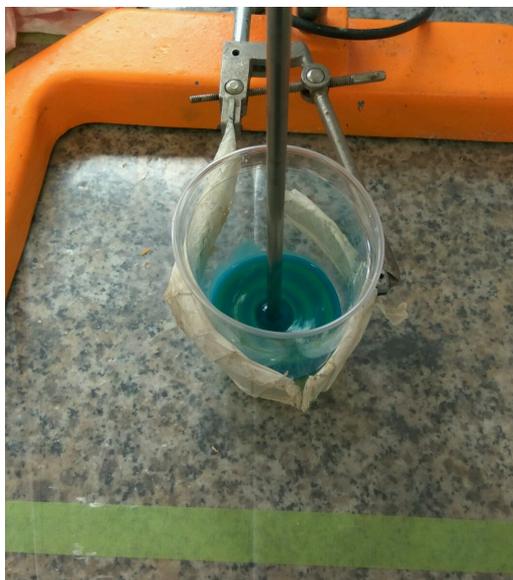


Figura 4.6: Proceso de agitación del producto para el control de exotermia

El procedimiento es el siguiente:

- Agitar el producto a baja velocidad durante 5 minutos. Se tratará de no introducir burbujas de aire en el proceso de agitación.
- Situar el recipiente con la muestra en la ubicación marcada en la peana.
- Fijar la sonda con la pinza de forma que quede en la posición deseada.
- Iniciar el programa de registro de temperaturas en el dispositivo electrónico que acompaña a la sonda.
- Fijar en el cronómetro *2h y 30min* en cuenta atrás para tener una idea aproximada de en qué momento va a producirse el pico exotérmico.
- Durante el proceso, ir controlando la temperatura, viendo que mantiene una tendencia ascendente.
- Cuando se observe una tendencia descendente en la temperatura, es indicativo de que el pico exotérmico se ha alcanzado ya, por lo tanto, retirar la sonda del producto antes de que solidifique por completo.
- Guardar el archivo generado por la sonda.

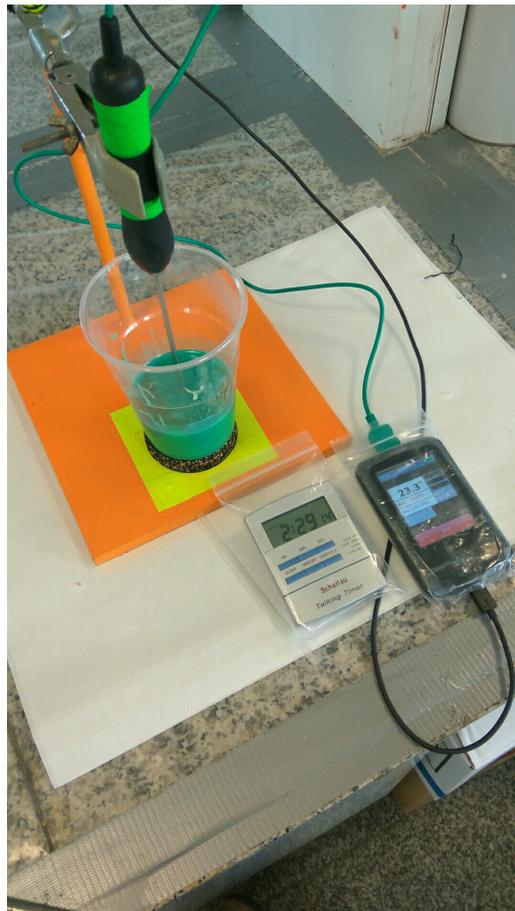


Figura 4.7: Control de exotermia del producto

Dada la elevada duración de este control, será de gran importancia ir limpiando todos los instrumentos una vez se hayan terminado de utilizar, ya que de lo contrario, el producto podría solidificar y dejar inservible alguno de los instrumentos utilizados. Como siempre, la limpieza se llevará a cabo con la ayuda de acetona y papel.

Finalmente, conectando la sonda al ordenador es posible transferir los archivos de datos generados.

4.3.3. Medidas

En las medidas que se han realizado de la exotermia del producto, se han tenido en cuenta distintos factores ambientales que pueden influir como tal en los resultados y alterar así la validez de las medidas. Como factores de mayor relevancia se han tomado la temperatura ambiente así como la humedad relativa. Para hacer más cómodo el proceso de redacción y nombrar los productos de una forma más simple estableceremos una notación con esa finalidad.

Producto	Contenido en espesantes	Aplicación de Vacío	Aplicación de Temperatura
N°1	Bajo	Si	Si
N°2	Bajo	Si	No
N°3	Bajo	No	Si
N°4	Bajo	No	No
N°5	Alto	-	-

Tabla 4.17: Notación simplificada de las distintas variables del producto

Una vez establecida la notación, pasaremos a mostrar los resultados de exotermia obtenidos por el producto en todas sus variaciones.

- Producto N°1

En la figura 4.8 se aprecia la evolución de la temperatura en función del tiempo transcurrido. El tiempo tiene su origen en el momento en el que el producto se encuentra completamente homogeneizado.

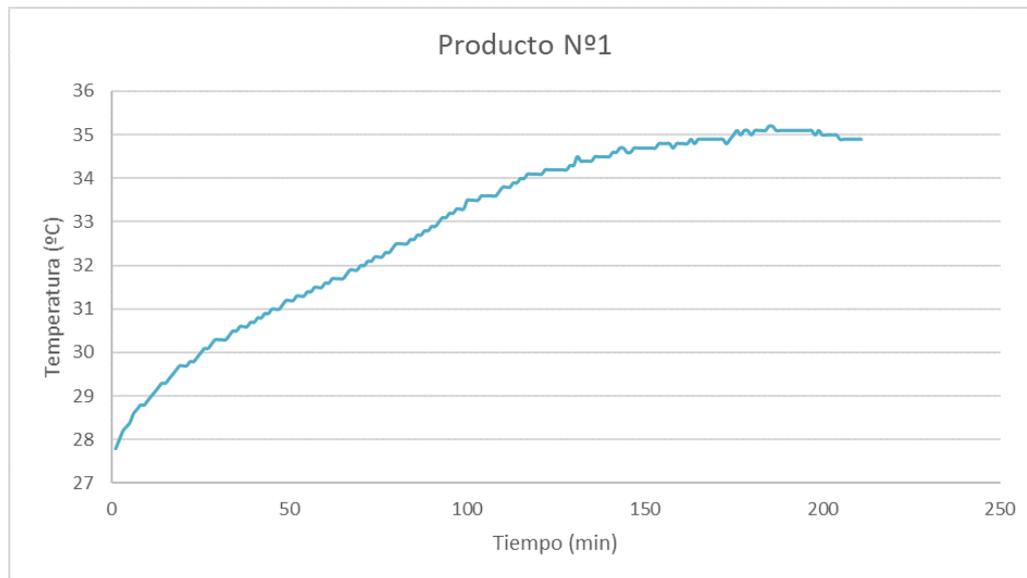


Figura 4.8: Control de exotermia del producto N°1

Las condiciones ambientales así como los resultados más relevantes obtenidos de la figura 4.8 se aprecian en la tabla 4.18.

Producto N°1	
Temperatura ambiente [°C]	22.3
Humedad relativa [%]	58.0
Temperatura pico [°C]	35.2
Tiempo pico [min]	185

Tabla 4.18: Datos relevantes de la exotermia del producto N°1

- Producto N°2

En la figura 4.9 se aprecia la evolución de la temperatura en función del tiempo para el producto N°2.

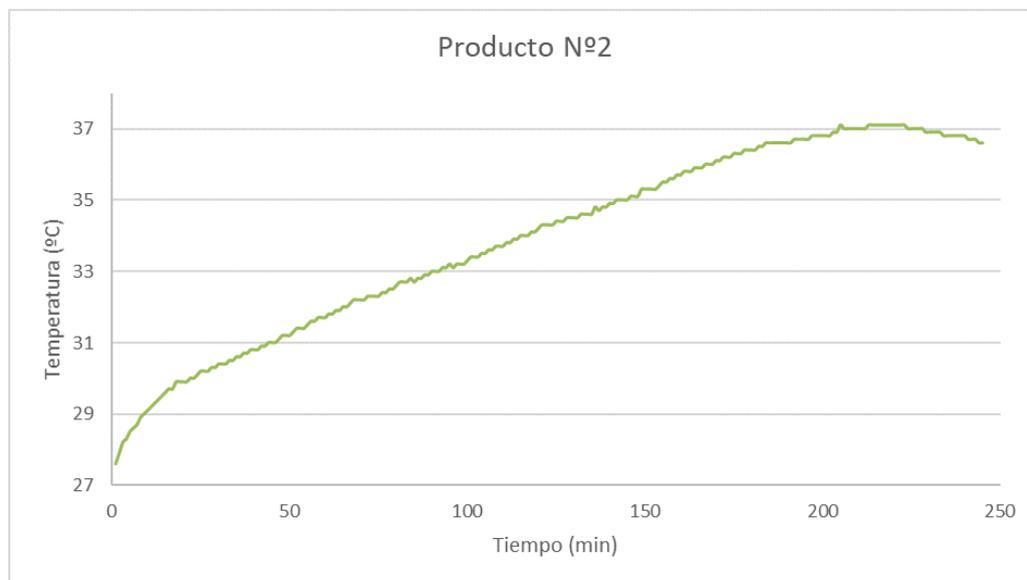


Figura 4.9: Control de exotermia del producto N°2

En la tabla 4.19 se observan las condiciones ambientales para este ensayo así como los datos más relevantes del pico exotérmico.

Producto N°2	
Temperatura ambiente [°C]	22.3
Humedad relativa [%]	60.0
Temperatura pico [°C]	37.1
Tiempo pico [min]	205

Tabla 4.19: Datos relevantes de la exotermia del producto N°2

- Producto N°3

En la figura 4.10 queda representada la evolución temporal de la temperatura del producto N°3.

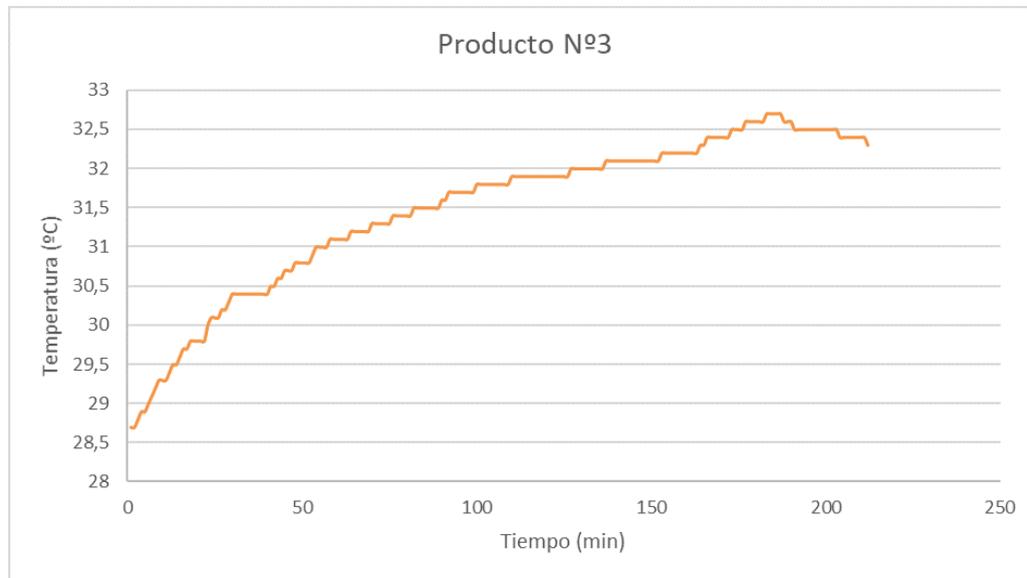


Figura 4.10: Control de exotermia del producto N°3

Al igual que en los casos anteriores, los valores de las condiciones ambientales así como los del pico quedan representados en la tabla 4.20.

Producto N°3	
Temperatura ambiente [°C]	22.0
Humedad relativa [%]	52.0
Temperatura pico [°C]	32.7
Tiempo pico [min]	183

Tabla 4.20: Datos relevantes de la exotermia del producto N°3

- Producto N°4

La evolución de la temperatura respecto del tiempo para el producto N°4 queda representada en la figura 4.11.

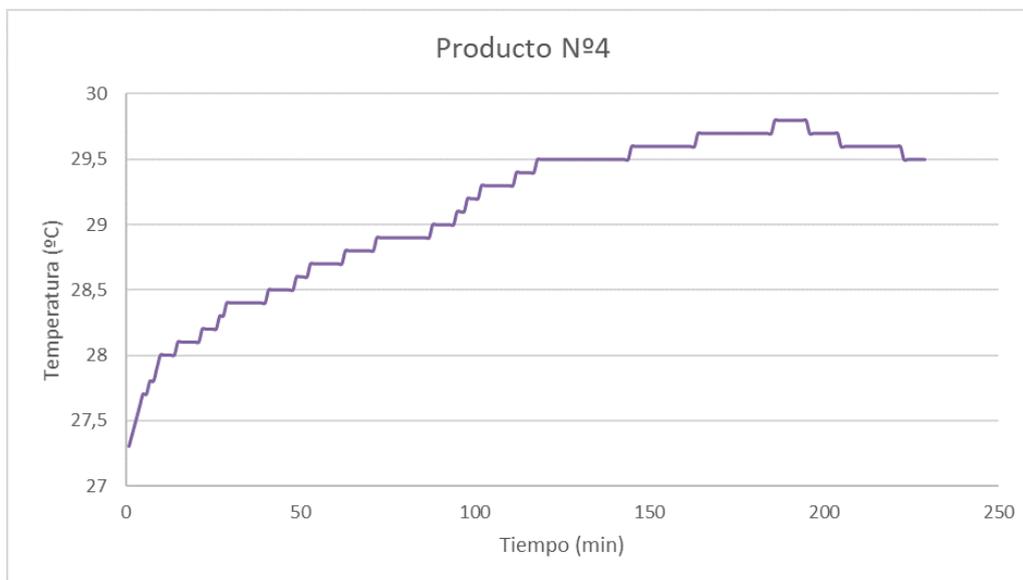


Figura 4.11: Control de exotermia del producto N°4

En la tabla 4.21 se indican los valores del pico exotérmico así como las condiciones ambiente a las que se realizó la medida.

Producto N°4	
Temperatura ambiente [°C]	21.3
Humedad relativa [%]	50.0
Temperatura pico [°C]	29.8
Tiempo pico [<i>min</i>]	186

Tabla 4.21: Datos relevantes de la exotermia del producto N°4

- Producto N°5

Finalmente, la evolución de la temperatura frente al tiempo del producto con alto contenido en espesantes se ve reflejado en la figura 4.12.

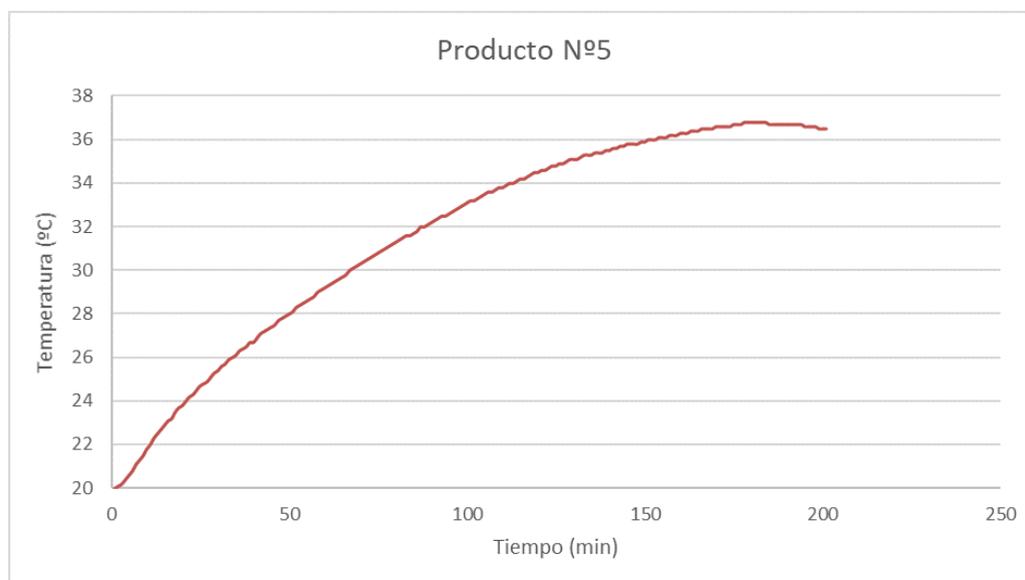


Figura 4.12: Control de exotermia del producto N°5

Los valores relevantes del pico exotérmico realizado así como las condiciones en las que se ha realizado el ensayo se encuentran en la tabla 4.22.

Producto N°5	
Temperatura ambiente [°C]	20.0
Humedad relativa [%]	53.0
Temperatura pico [°C]	36.8
Tiempo pico [min]	178

Tabla 4.22: Datos relevantes de la exotermia del producto N°5

4.3.4. Observaciones

Como se ha comentado en la introducción de 4.3 el producto no ha de rebasar los 49°C en su pico exotérmico y éste ha de producirse como pronto, tras dos horas y media del inicio de la catalización. Si observamos las tablas resumen de cada uno de los productos (4.18 a 4.22) se puede apreciar con claridad como todos los productos cumplen el control de calidad.

Cabe destacar que el producto con alto contenido en espesantes partía de una temperatura más baja al encontrarse ambas partes en un recipiente refrigerado. Este hecho se debe a que según las especificaciones del producto, su aplicación debe realizarse entorno a los 20°C. En el caso de los productos con bajo contenido en espesantes, no es necesario mantener el producto refrigerado ya que aún partiendo de una temperatura cercana a los 27°C, la exotermia del producto no es capaz de elevar la temperatura por encima de los 49°C. En la figura 4.13 se observan todos los picos de exotermia realizados

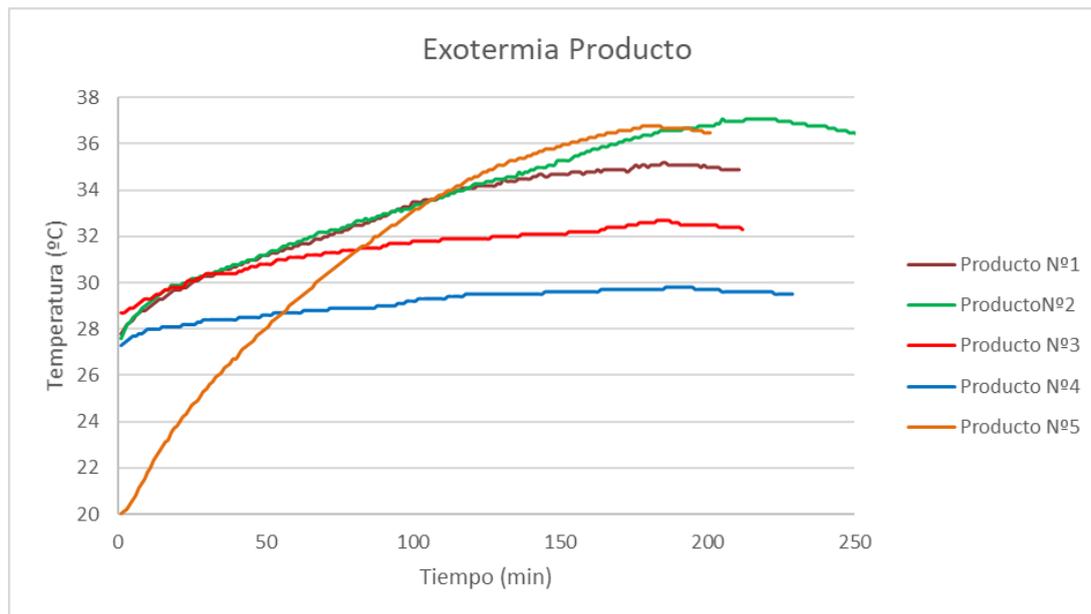


Figura 4.13: Control de exotermia del producto en todas sus variaciones

Analizando la figura anterior se pueden obtener un par de deducciones. Primero, en la mayoría de los casos, cuantos menos tratamientos se han aplicado al el producto, menor temperatura alcanza en el pico exotérmico. Ésto indica posiblemente la reacción incompleta de las partes *A* y *B* del producto debida a la presencia de aire. La segunda observación es que el producto que cuenta con un elevado contenido de espesantes al catalizar, produce una mayor cantidad de calor y como consecuencia, la temperatura del producto alcanzada en el pico exotérmico es mayor.

4.4. SAG Resistance

Finalmente, el último control de calidad que se le realiza al producto es el de SAG resistance o resistencia al descuelgue. En este control se comprueba que durante el proceso de curado del producto, si este se aplica sobre una superficie vertical, no fluya en el sentido de la gravedad.

Dada la viscosidad del producto con bajo contenido en espesantes, resulta irrelevante realizar este control sobre el mismo, ya que los resultados no aportarían ninguna información de interés.

La norma vigente que rige la evaluación de la resistencia al descuelgue es la UNE-EN ISO 16862. Basándose en esta norma, se ha desarrollado el proceso de control de resistencia al descuelgue para este proyecto cumpliendo en todo momento lo especificado en la norma. El método de inspección se ha generado en la propia empresa y se basa en la preparación de un bloque del producto ya mezclado, este bloque se sitúa sobre un panel de fibra de vidrio y se ajusta a una geometría. Después se dispone dicho panel en posición vertical. Evaluando la geometría del bloque al final del proceso de curado se obtienen los resultados del control.

4.4.1. Material utilizado

Para realizar este control, se ha utilizado un útil específico para la preparación de muestras de SAG, se trata de un molde modular que facilita la preparación de la muestra a pesar de la elevada viscosidad del producto. La muestra se prepara directamente sobre el panel de fibra de vidrio situando el molde sobre el mismo.

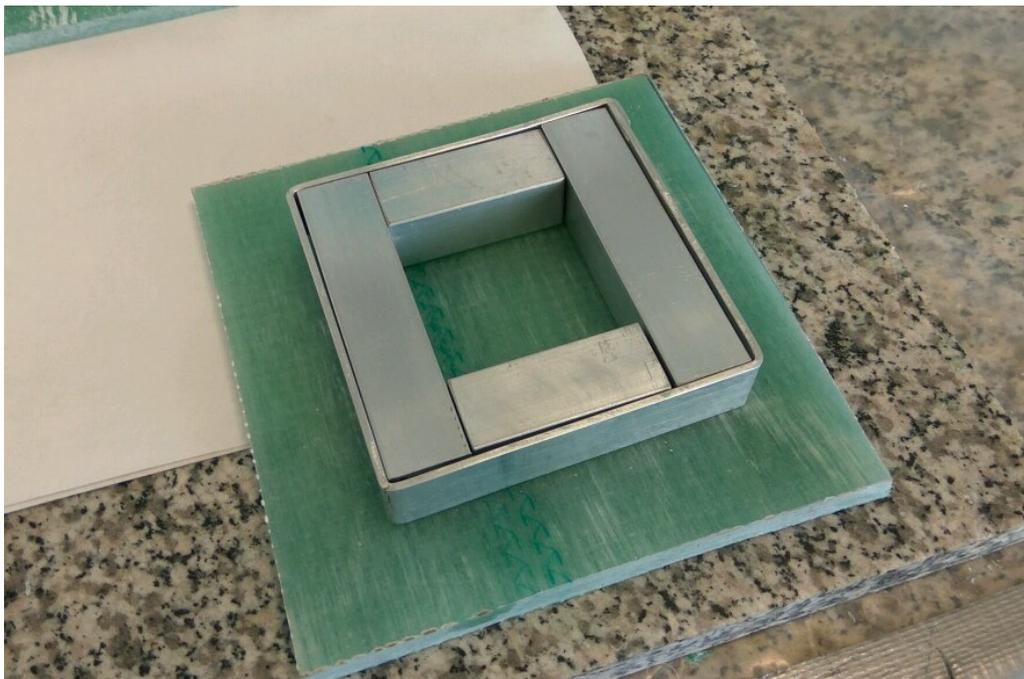


Figura 4.14: Molde modular para las muestras de SAG sobre un panel de fibra de vidrio

Además, para la realización del control son necesarios los siguientes instrumentos:

- Espátula de laboratorio.
- Hilo de alambre.
- Pinzas de sujeción
- Agitador.
- Papel y acetona.

4.4.2. Procedimiento

Al igual que en el control de exotermia, el SAG resistance se realiza sobre el producto una vez mezcladas las partes *A* y *B*. Por lo tanto, el primer paso es la preparación de la mezcla teniendo en cuenta la relación de mezcla. Con la ayuda de una báscula de precisión se tomarán las cantidades adecuadas de ambas partes y posteriormente, se agitará la mezcla en un agitador.

En el panel de fibra de vidrio, se marca con un rotulador el contorno inferior del molde, así mismo, se marcará una línea por debajo situada a 2mm . Esta línea indicará posteriormente si el descuelgue del producto es superior a 5° . Los siguientes pasos a seguir son:

- Agitar 150g de mezcla a baja velocidad durante 5min , procurando no introducir burbujas de aire en la mezcla.
- Ubicar el molde ensamblado sobre el panel de fibra de vidrio.
- Verter el producto sobre el molde hasta que rebase el borde superior.
- Retirar el excedente con la ayuda de una espátula de laboratorio.
- Retirar el molde desplazándolo en vertical.
- Con ayuda del alambre, retirar las rebabas debidas a la retirada del molde.
- Colocar el panel en posición vertical y dejar curar el producto.



Figura 4.15: Muestra de SAG en durante el proceso de curado en un panel vertical

Se limpiarán con ayuda de acetona y papel todos los instrumentos que mantengan contacto con el producto.

4.4.3. Medidas

En el caso del control de descuelgue (SAG) solo existen dos posibles resultados ya que se reduce a un control del tipo “*pasa - no pasa*”. El límite para la aceptación del producto según los estándares de calidad se establece en un descuelgue de 5°. Así pues, se procede a mostrar los resultados obtenidos.

Como se ha mencionado en la introducción de 4.4, únicamente se ha sometido a este control al producto con alto contenido en espesantes.

- Lote de fabricación N°5

En la figura 4.16 se puede apreciar como al interponer una escuadra tocando con el borde inferior del producto, éste rebasa la línea que indica el descuelgue de 5°. Como consecuencia, este producto no pasa el control de calidad de descuelgue.

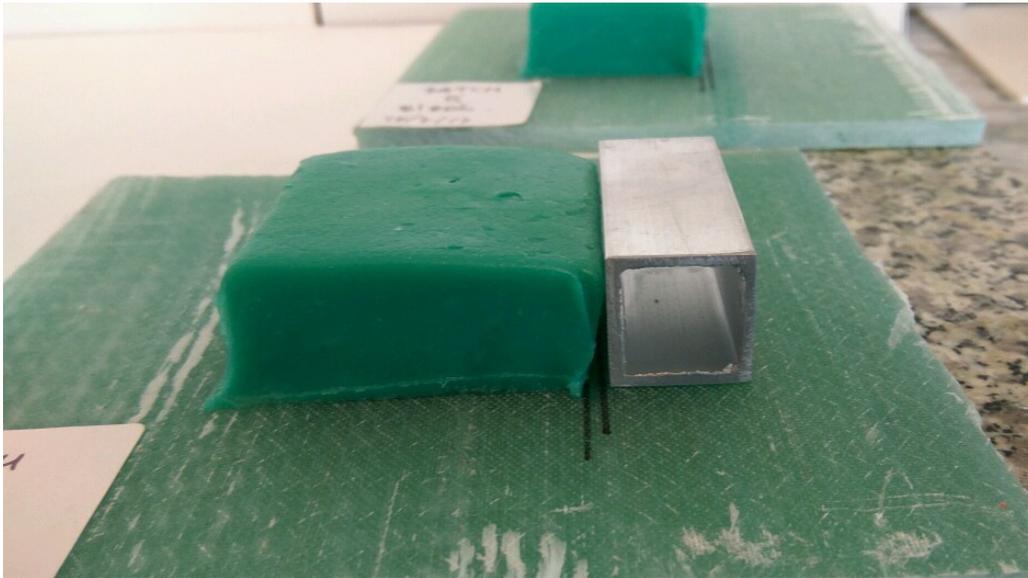


Figura 4.16: Control de SAG no apto del lote de fabricación N°5

- Lote de fabricación N°6

Al contrario que en el caso del lote N°5, en la figura 4.17 se observa que al aplicar el mismo procedimiento, el extremo inferior del producto no sobrepasa la línea que indica los 5° de descuelgue. Así pues, el lote N°6 si que pasa el control de calidad. Dado que es el único que pasa el control, definitivamente se utilizará este lote para la fabricación de probetas.

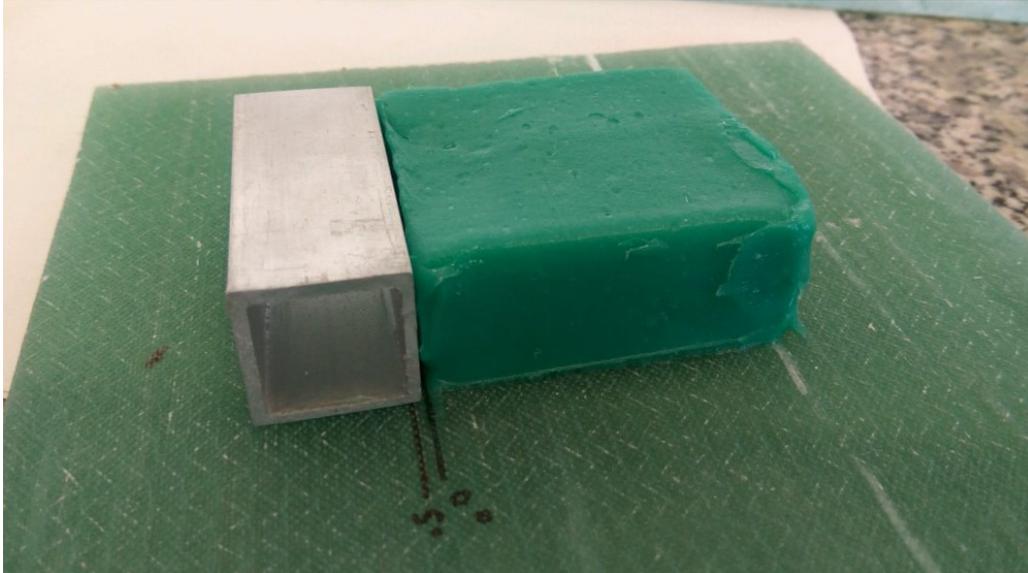


Figura 4.17: Control de SAG apto del lote de fabricación N°6

Capítulo 5

Preparación de probetas

En este capítulo se tratará el proceso de fabricación de probetas así como su acondicionamiento para el posterior ensayo de las mismas. Las probetas que se han preparado se adecuan en geometría así como en proceso de fabricación a las normas ISO correspondientes. Para este proyecto se ha designado un sistema de nomenclatura de probetas para la fácil identificación de las mismas. El sistema es el siguiente:

X.Y.ZZ

donde

- **X** es el ensayo al cual se va a someter la probeta, siendo **T**=tracción ,**C**=compresión y **G**=tg.
- **Y** es la variación del producto de la cual está fabricada la probeta donde
 - 1 - Producto sin espesantes **CON** aplicación de vacío y temperatura.
 - 2 - Producto sin espesantes **CON** aplicación sólo de vacío.
 - 3 - Producto sin espesantes **CON** aplicación sólo de temperatura.
 - 4 - Producto sin espesantes **SIN** ningun proceso post-fabricación.
 - 5 - Producto con alto contenido en espesantes.
- **ZZ** es el número de probeta.

5.1. Probetas de Tracción

Para el ensayo de tracción, las probetas están regidas según la norma UNE-EN ISO 527. Así pues, basandose en dicho documento, se procede a la fabricación. Dentro de la norma se admiten distintos tipos de probetas, de las cuales para este proyecto se han elegido las del tipo 1B. Estas probetas cuentan con unas dimensiones y forma detalladas en la figura 5.1

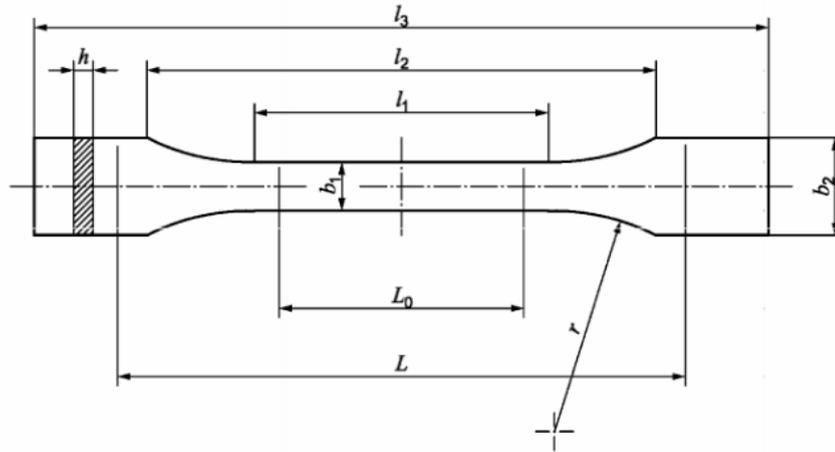


Tabla 1 – Medidas de las probetas tipo 1A y 1B

Medidas en milímetros

Tipo de probetas	1A	1B
l_3 Longitud total ^a	170	≥ 150
l_1 Longitud de la parte estrecha de caras paralelas	80 ± 2	$60,0 \pm 0,5$
r radio	24 ± 1	$60 \pm 0,5$
l_2 Distancia entre las partes anchas de caras paralelas ^b	$109,3 \pm 3,2$	$108 \pm 1,6$
b_2 Anchura en los extremos	$20,0 \pm 0,2$	
b_1 Anchura de la parte estrecha	$10,0 \pm 0,2$	
h Espesor recomendado	$4,0 \pm 0,2$	
L_0 Longitud de referencia (recomendada)	$75,0 \pm 0,5$	$50,0 \pm 0,5$
Longitud de referencia (aceptable si se requiere para el control de calidad o cuando se especifique)	$50,0 \pm 0,5$	
L Distancia inicial entre las mordazas	115 ± 1	115 ± 1

^a La longitud total recomendada de 170 mm para el tipo 1A concuerda con las Normas ISO 294-1 e ISO 10724-1. Para algunos materiales, puede ser necesario alargar la longitud de los extremos (por ejemplo $l_3 = 200$ mm) para evitar la rotura o el deslizamiento en las mordazas de la máquina de ensayo.

^b $l_2 = l_1 + [4r(b_2 - b_1) - (b_2 - b_1)^2]^{1/2}$, que resulta de l_1 , r , b_1 y b_2 , pero dentro de las tolerancias indicadas.

Figura 5.1: Geometría de las probetas de tracción según la norma UNE-EN ISO 527

El método de fabricación elegido en este proyecto es el proceso de colada, el cual está aceptado para la producción de probetas según la norma. En el proceso de colada, se vierte el producto en un molde cuya matriz es la forma de las probetas, tras la catalización del producto, se obtienen las probetas y finalmente, se extraen del molde obteniendo un la geometría deseada.

Los moldes utilizados en este proceso de fabricación constan de dos módulos y están fabricados mediante el mecanizado de una plancha de acero. Además, los moldes reciben un tratamiento químico previo a su uso para la fabricación de probetas. El tratamiento químico consta de la aplicación de dos productos:

- **Producto sellante:** A los moldes se les aplican cuatro capas de sellante, aplicando una cantidad de producto de $0,01l/m^2$ en cada capa. El tiempo de secado entre cada una de las capas es de $15min$ y finalmente, tras la aplicación de la última capa, se ha de curar el producto sometiéndolo durante una hora a una temperatura de $80^\circ C$.
- **Producto desmoldeante:** El segundo producto aplicado a los moldes es un desmoldeante, del cual se aplican dos capas entre las que se deja secar el producto durante $20min$. La cantidad

aplicada por capa es de $0,02l/m^2$. Esta aplicación se repetirá cada tres usos de los moldes debido al desprendimiento del producto con el uso y el tiempo. Gracias a esta aplicación la extracción de probetas del molde será mucho menos costosa.



Figura 5.2: Sonda de temperatura junto con el dispositivo de registro de datos

El proceso seguido para la fabricación de las probetas una vez los moldes han recibido el tratamiento químico es el siguiente:

- Preparar 725g de mezcla del producto con un mix ratio de 100 : 45 (500g de parte A con 225g de parte B).
- Agitar a baja velocidad durante 15min. Evitar introducir burbujas de aire en la mezcla.
- Verter el producto en el recipiente del extrusor.
- Acoplar una boquilla de 1mm al extrusor e introducir el producto en el molde con la ayuda del extrusor.
- Con la ayuda de una espátula dejar la superficie del producto nivelada con el borde superior del molde. El resultado después de este paso se aprecia en la figura 5.3.



Figura 5.3: Probetas de tracción antes del proceso de curado.

Una vez el producto se encuentra en el molde, se ha de realizar el proceso de curado del material.

A lo largo de este proyecto, todos los curados realizados se tratan del mismo recomendado por el fabricante del producto. Este curado consta de tres etapas:

- **Rampa de subida:** de $25^{\circ}C$ a $80^{\circ}C$ en una hora.
- **Temperatura constante** a $80^{\circ}C$ durante cuatro horas.
- **Rampa de bajada:** de $80^{\circ}C$ a $25^{\circ}C$ en una hora.

Durante el proceso de fabricación de las probetas pueden resultar probetas cuyas características no cumplan con la normativa y por lo tanto deban de ser desechadas. En el caso de este proyecto, se han obtenido varias probetas con disconformidades, en la mayoría de los casos la disconformidad se limitaba a rebabas en los bordes de probeta, este problema se ha solucionado eliminando dichas rebabas con la ayuda de una espátula y lija. La norma especifica que no deben existir rechupes en las probetas, sin embargo, para los procesos en los que se utiliza un molde es imposible evitar este fenómeno que surge gracias a la diferencia de temperaturas entre el seno del producto y el molde. Para estos casos la norma establece que los rechupes son aceptables siempre que la diferencia de espesores de la probeta entre el centro y el borde exterior sean menores de $0,1mm$, siendo así todas las probetas que se han producido en este proyecto aceptables. La última y más importante disconformidad que se ha encontrado en la producción de probetas a lo largo de este proyecto es la aparición de oquedades en el interior del material debido a la existencia de burbujas de aire en el producto antes de verterlo en el molde. En la figura 5.4 se aprecia como al disponer las probetas a contraluz, las oquedades existentes en las probetas se hacen visibles. Ante la imposibilidad de solucionar esta disconformidad una vez las probetas están curadas, las que presentan este defecto son desechadas inmediatamente.



Figura 5.4: Probeta de tracción con defectos en forma de burbujas de aire retenidas. Indicadas con un círculo rojo

En la norma UNE EN ISO 527-2 se especifica que el número de probetas necesarias para la caracterización de un material es de cinco. En pos de la mejora de resultados, para este proyecto se han fabricado diez probetas válidas de cada versión fabricada del material, mejorando así la posibilidad de obtención de unos resultados más precisos.



Figura 5.5: Resultado final de las probetas de tracción

5.2. Probetas de Compresión

Para el caso de compresión, la norma que rige lo referente a las probetas a ensayar es la norma UNE-EN ISO 604. Todo proceso llevado a cabo en este proyecto en lo que respecta a las probetas de compresión cumple dicha norma.

En este caso, en la propia empresa no se contaba con moldes adecuados para la fabricación de probetas de compresión, por lo que una labor añadida al proyecto fue la fabricación de dichos moldes.

Partiendo de que el proceso de fabricación de probetas iba a ser también mediante colada, los moldes fabricados son adecuados para este tipo de proceso. Dada la forma cilíndrica de las probetas de compresión, para la fabricación de los moldes se ha utilizado un tubo de acero cuyo diámetro interior coincide con el diámetro de las probetas.

La longitud seleccionada para el tubo es superior a la longitud de la probeta, ya que posteriormente se cortará la probeta a la longitud deseada. A todos los moldes fabricados se les ha aplicado el mismo tratamiento químico que el citado en la sección 5.1 a base de sellante y desmoldeante.

En este caso, los moldes se encuentran abiertos por dos puntos, por lo que a la hora de verter el producto en su interior uno de los extremos tendrá que sellarse adheriendo el molde a una superficie plana con la ayuda de cinta de doble cara. Para asegurar la estanqueidad del molde, el extremo que se vaya a adherir a la superficie, se lijara con papel de lija de distintos números de grano, dándole el acabado final con una lija con número de grano 400.



Figura 5.6: Moldes de compresión junto a las lijas utilizadas para su acabado

Una vez el proceso de fabricación de los moldes queda finalizada, la producción de las probetas puede describirse en los siguientes pasos:

- Preparar 200g del producto, con un mix ratio de 100 : 45.
- Agitar a baja velocidad durante 15min, evitando introducir burbujas de aire en la mezcla.
- Verter el producto en el recipiente del extrusor.
- Con la boquilla de 1mm de diámetro del extrusor, introducir el producto en los moldes hasta que la superficie del producto quede enrasada con el extremo superior del molde.

Con el producto ya introducido en el molde, se procederá al igual que en el caso de las probetas de tracción, al curado del producto. En este caso también se utilizará el curado propuesto por el fabricante.

Tras el curado, se obtienen unos cilindros de los que se extraerán las probetas de compresión (observar figura 5.7). Existe un proceso posterior al curado mediante el cual la pieza se adecua a los requerimientos de la norma. En este proceso se eliminan todas las posibles rebabas existentes en las probetas debidas al proceso de moldeado, posteriormente, con la ayuda de una sierra de diamante se cortan a la longitud deseada. Finalmente se lleva a cabo un exhaustivo proceso de lijado de los extremos, donde se garantiza que los dos extremos de la probeta sean paralelos entre sí y además de que estas superficies sean perpendiculares al eje longitudinal de la probeta. Para este proceso se hace uso de diversos utensilios de medida tales como escuadras, reglas y pies de rey.



Figura 5.7: Cilindros de compresión antes de ser cortados a medida

La norma UNE-EN ISO 604 establece que existen unas dimensiones de probeta preferentes, pero no restringe las dimensiones siempre que se cumpla la siguiente ecuación.

$$\varepsilon_c \leq 0,4 \frac{x^2}{l^2} \quad (5.1)$$

Donde:

- ε_c es la deformación nominal máxima en compresión durante el ensayo.
- x es el diámetro del cilindro que conforma la probeta.
- l es la longitud de la probeta, medida paralela al eje de la fuerza de compresión.

La tabla tal muestra las dimensiones de todas las probetas que se han fabricado, todas ellas concuerdan con la norma en su recomendación de que la relación $x/l > 0,4$.

Finalmente, la norma UNE-EN ISO 604, dado que se trata de un material isotrópico, establece que son necesarias al menos cinco probetas para la obtención de las características del material a compresión. Así pues, para este ensayo se han fabricado el número mínimo de probetas de cada variación del producto de las que se dispone.



Figura 5.8: Resultado final de las probetas de compresión

5.3. Probetas de TG

Para la fabricación de probetas para su posterior análisis por calorimetría diferencial la norma UNE-EN ISO 11357 es la que rige todo lo que incumbe a estas probetas, por lo tanto, partiendo de dicha norma se procederá a la obtención de las probetas.

Mediante el ensayo de TG se pretende obtener la temperatura y el tiempo característico de reacción del producto, para realizar esta labor solamente se necesitan unos miligramos de producto ya curado. Ante la imposibilidad de fabricar una probeta de estas dimensiones, la norma permite obtener la muestra como una fracción de una probeta de mayor tamaño. Los fragmentos que se extraen de la probeta han de adaptarse al crisol donde se realizará el ensayo, por lo tanto los fragmentos serán de tamaño reducido, ya sean en polvo, virutas o granulados.

La pieza de la cual se extraerá la muestra se ha fabricado a partir de un proceso similar al utilizado para la fabricación de probetas de tracción y compresión. Partiendo de un molde de silicona, se preparan 100g de producto con un mix ratio de 100 : 45 entre la parte A y B. Tras agitar la mezcla durante cinco minutos a bajas revoluciones, con la finalidad de no introducir burbujas en la mezcla, se vierte sobre el producto en el molde hasta rellenarlo completamente.

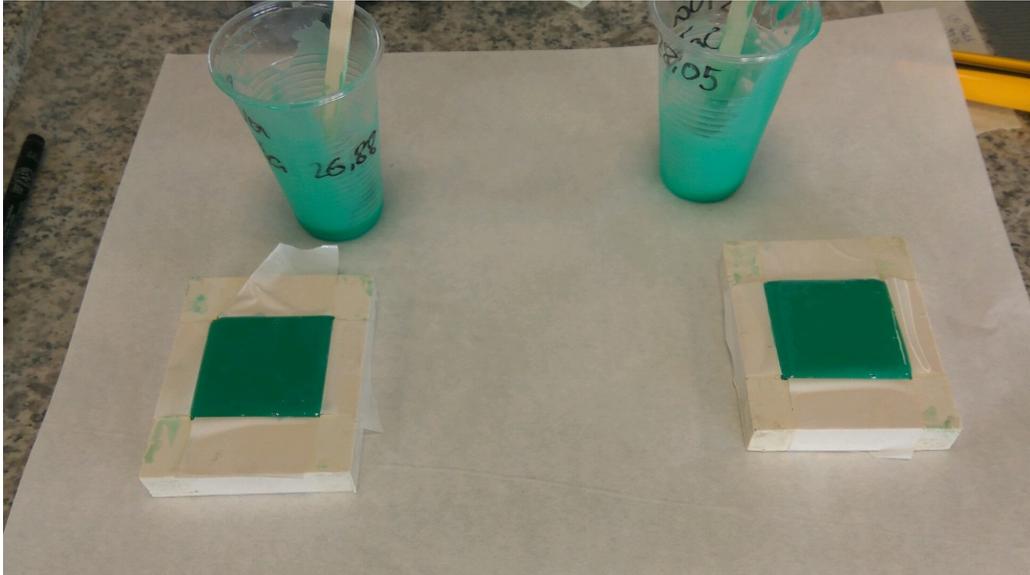


Figura 5.9: Piezas para las probetas de TG previas al proceso de curado

Para la fabricación de estas piezas el proceso de curado difiere del utilizado en las otras probetas. Debido a los requerimientos del ensayo, el producto se ha curado durante un tiempo de dos horas a una temperatura de 80°C, reduciendo el tiempo de isoterma y eliminando las rampas de subida y bajada de temperatura. El hecho de que el curado para este ensayo sea distinto se debe a que son aspectos regulados por la norma y además se reduce posteriormente el tiempo de ensayo de la probeta.



Figura 5.10: Piezas para las probetas de TG terminadas

Una vez las piezas están curadas, con ayuda de unas tenacillas se obtendrán los pequeños fragmentos del material procurando empezar a sustraer material por las esquinas. A la hora de introducir el producto dentro del crisol, dado su tamaño y delicadeza apreciables en la figura 5.11, se prestará especial atención a no contaminar la muestra con posibles agentes externos.

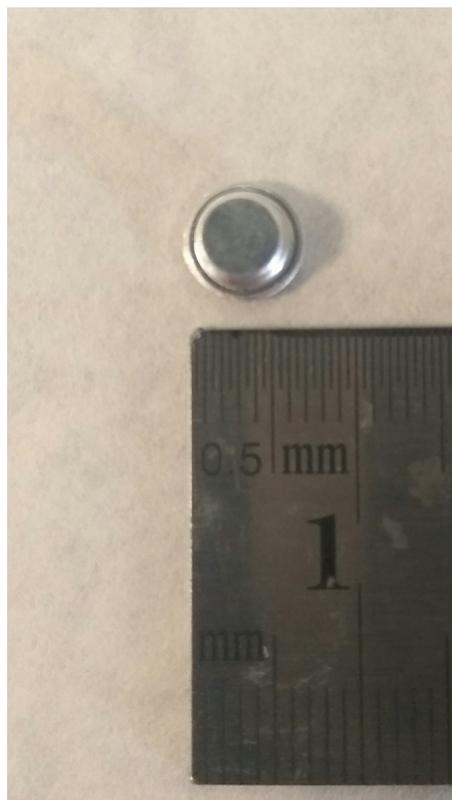


Figura 5.11: Plano detalle de un crisol de probetas de TG

Capítulo 6

Ensayos

En este capítulo se tratará todo lo referente a los distintos ensayos a los que se van a someter las probetas. Se describirá todo el proceso previo al ensayo y la configuración que requieren las máquinas de ensayos para su correcto funcionamiento. Los tres ensayos a realizar para este proyecto son destructivos, lo que implica que una vez las probetas hayan sido ensayadas, el producto quedará dañado para posibles inspecciones.

6.1. Ensayo de Tracción

Mediante el ensayo de tracción se somete la probeta a una tensión axial de tracción hasta la rotura de la misma. Con este ensayo se pretende obtener la resistencia del material a una fuerza semiestática ya que a pesar de que la fuerza varía, lo hace de una forma muy lenta.

Sometiendo las probetas a este ensayo se pretenden obtener los siguientes parámetros que caracterizan al material:

- **Módulo de elasticidad:** También conocido como Módulo de Young. Es el coeficiente que relaciona la tensión aplicada con la deformación unitaria del material. Es únicamente aplicable en la zona donde deformación y tensión son proporcionales. Se denota con E y cuenta con las unidades de presión, ya que el alargamiento es adimensional, se utilizarán normalmente MPa .
- **Límite elástico:** Es la tensión máxima aplicable sobre el material sin que se produzcan deformaciones permanentes (deformaciones plásticas). Se denota con σ_P y sus unidades también son MPa .
- **Alargamiento de rotura:** Es la deformación que sufre la probeta en el instante de su rotura. Se denotará como A_R y es adimensional ya que se refiere al incremento de longitud respecto a la longitud inicial.
- **Carga de rotura:** Es la máxima carga que es capaz de resistir el material, se da en el instante previo a la rotura. Se trabajará con MPa como unidad y se denotará como σ_R .

6.1.1. Máquina de ensayo

Para realizar los ensayos se cuenta con una máquina universal de ensayos de la marca *INSTRON*, modelo 5967, podemos observar la máquina en la figura 6.1. Gracias a la posibilidad de acoplar distintos tipos de acoples, con esta máquina se pueden realizar también ensayos de compresión y de flexión.



Figura 6.1: Máquina de ensayos universal asistida por ordenador.

Evidentemente, para realizar el ensayo de tracción se acoplarán a la máquina los útiles correspondientes a este tipo de ensayo, visibles en la figura 6.2. Éstos son básicamente dos mordazas que sujetan los extremos de la probeta impidiendo que deslice cuando comienza el esfuerzo axial.



Figura 6.2: Mordazas para el ensayo de tracción.

6.1.2. Procedimiento

Para llevar a cabo el ensayo de tracción es necesario seguir una serie de instrucciones para configurar la máquina. En primer lugar, se pondrá en marcha tanto la máquina como el ordenador auxiliar. Una vez iniciado el programa que asiste a la máquina se procederá a configurar el ensayo. En el configurador se le indicará los parámetros de la probeta así como los resultados que se quieren obtener. Para este proyecto, en base a la norma UNE-EN ISO 527 se han fijado los siguientes parámetros.

- **Parámetros del ensayo:**

- Velocidad del ensayo:** $1\text{mm}/\text{min}$

- Tipo de probeta:** $1B$

- Ancho de probeta:** 10mm

- Espesor de probeta:** 4mm

- Distancia inicial entre mordazas:** 115mm

- Detención del ensayo:** Aumento de la velocidad en un 20 %

- **Resultados del ensayo deseados:**

- Límite elástico**

- Alargamiento proporcional**

- Alargamiento de rotura**

- Carga de rotura**

Con estos parámetros se obtendrá a posteriori el valor del módulo de elasticidad.

El siguiente paso a seguir consiste en iniciar el ensayo, una vez iniciado, el asistente mostrará en el ordenador la orden de fijar la probeta. En ese punto, las mordazas se situarán automáticamente en la posición inicial. El operario procederá a ubicar la probeta de forma que quede simétrica respecto al plano medio que forman las dos mordazas, como se muestra en la figura 6.3. Posteriormente se fijarán las probetas haciendo uso del sistema de apriete por rosca que disponen las mordazas. Finalmente se iniciará el ensayo pulsando el botón de inicio que aparece en la pantalla del ordenador. El ensayo se detendrá de forma automática cuando se produzca la rotura en la probeta. En la figura 6.4 se muestra el estado de una probeta una vez finalizado el ensayo.



Figura 6.3: Posición correcta de la probeta para ser ensayada.

A lo largo del ensayo, se puede observar en la pantalla del ordenador la gráfica que relaciona tensión y deformación cómo va evolucionando. Una vez la probeta rompe y el ensayo se detiene, se retira la probeta de las mordazas, se reinicia la posición original de las mordazas y se coloca una nueva probeta para ensayar. Una vez se ha terminado de ensayar un lote entero de probetas del mismo material se guardan los datos obtenidos del ensayo desde la aplicación del ordenador. Se conservarán todos los datos en bruto de los parámetros que se han especificado a la hora de configurar el ensayo en un documento compatible con *Microsoft Excel*®.

El proceso se repetirá hasta haber completado los lotes de 10 probetas de cada una de las variables del material.



Figura 6.4: Ensayo de tracción finalizado.

6.2. Ensayo de Compresión

El ensayo de tracción consiste en someter una probeta del material de interés a una fuerza estática axial, siendo esta de compresión. Realizando este ensayo se obtiene una gráfica tensión-deformación al igual que con el ensayo de tracción. De dicha gráfica podemos extraer los parámetros necesarios para caracterizar el material a compresión. Estos parámetros son:

- **Módulo de compresión:** Es el coeficiente que relaciona la carga de compresión con la deformación unitaria de las probetas. Es solo aplicable en la zona donde carga y deformación son proporcionales.
- **Carga de rotura a compresión:** Es la máxima carga admitida para compresión sin que la probeta rompa.
- **Deformación de rotura a compresión:** Es la deformación de la probeta en el instante de rotura, cuando la carga de rotura a compresión está aplicada.

6.2.1. Máquina de ensayo

La máquina utilizada para ensayar probetas a compresión es una máquina universal de ensayos, la misma que la utilizada en el ensayo de tracción. La diferencia reside en que para este ensayo se han sustituido las mordazas acopladas a la máquina por los útiles adecuados para compresión. Éstos útiles consisten en dos superficies planas perpendiculares al eje de las probetas y con un acabado espejado. Quedan perfectamente descritos en la norma UNE-EN ISO 604 y son visibles en la figura 6.5.



Figura 6.5: Útiles de compresión acoplados a la máquina de ensayos.

6.2.2. Procedimiento

Este ensayo, al realizarse también de forma asistida por ordenador, por lo que al principio del proceso tendrá que ponerse en marcha tanto el ordenador como la máquina de ensayos. Una vez la aplicación está iniciada en el ordenador el primer paso es establecer una altura inicial para los dos extremos de las mordazas de compresión. Como las probetas son de 22mm de altura, se fijará la altura inicial en 23mm para una correcta extracción e introducción de las probetas. El siguiente paso es configurar el ensayo que se desea realizar, al igual que en el ensayo de tracción se fijarán tanto parámetros que definan la probeta y el ensayo así como los resultados que se deseen obtener. Siguiendo la norma UNE-EN ISO 604 se establece una velocidad de ensayo elevada dado que el material es un polímero y seguramente aparezca una zona de fluencia. Como parámetro de seguridad para la detención del ensayo se fijará la velocidad aunque posiblemente dada la naturaleza del material, se tenga que detener el ensayo de forma manual una vez se aprecie en la gráfica que se ha alcanzado la carga de rotura. Los parámetros que se han fijado son:

- **Parámetros de las probetas:**

Altura de la probeta: 22mm

Diámetro de la probeta: 17,8mm

Velocidad de ensayo: 5mm/min

Factor de detención del ensayo: Aumento de velocidad en un 20%

- **Resultados a obtener del ensayo:**

Módulo de compresión

Deformación de rotura por compresión

Carga de rotura por compresión

Una vez el ensayo se encuentra configurado completamente, se procede a ubicar la probeta entre las mordazas de la máquina. La probeta ha de quedar centrada entre las mordazas y a su vez al ser cilíndricas han de ubicarse de forma concéntrica a las mordazas. Dado que se va a comprimir un material y no se sabe cuál va a ser su reacción, se colocará como dispositivo de protección una mampara de plástico transparente, que impida daños en caso de desprendimiento de un trozo del material y que además permita observar la probeta mientras se realiza el ensayo. El resultado se aprecia en la figura 6.6



Figura 6.6: Mampara de seguridad en el ensayo de compresión.

Con la probeta situada ya en su posición correcta, se pulsa el botón de inicio del ensayo. La máquina comenzará a comprimir la probeta hasta su fractura, a la vez se mostrará en pantalla la gráfica tensión-deformación del ensayo. Una vez el punto de fractura se supere, lo cual se puede identificar en la gráfica

por la disminución de la tensión al aumentar deformación, se podrá finalizar el ensayo de forma manual si no se detiene automáticamente. Al terminar el ensayo, se retornará la máquina al punto de inicio, se retirarán los restos de la probeta y se colocará una nueva. Se realizará este proceso repetidamente hasta finalizar con la muestra de probetas de un mismo material. Al terminar, se guardarán los datos de los ensayos y se comenzará con otra muestra. En la figura 6.7 se observa una secuencia de imágenes con las distintas etapas del ensayo de tracción.

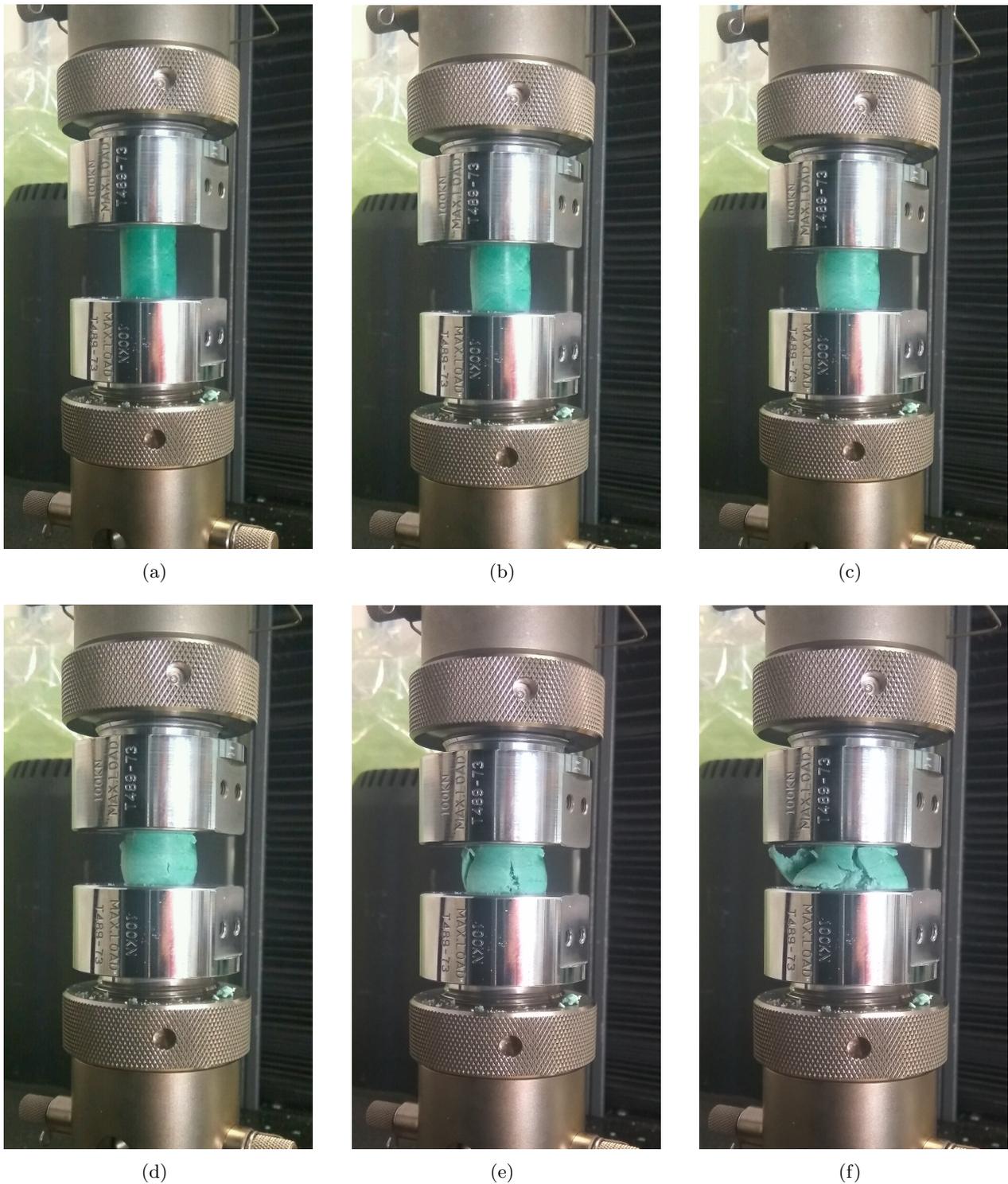


Figura 6.7: Probeta en distintas etapas del ensayo de compresión.

Donde:

- (a) Probeta al inicio del ensayo, no existe carga aplicada ni deformación.
- (b) Inicio de la compresión, se aprecia un ligero engrosamiento de la probeta en su parte central.
- (c) Continúa la deformación, aparecen líneas blanquecinas debido al cortante que se genera en el interior de la probeta.
- (d) Inicio de la deformación permanente, aparición de las primeras grietas.
- (e) Las grietas se expanden y se aprecian en todo el perímetro de la probeta.
- (f) Probeta completamente destruida, fin del ensayo.

6.3. Ensayo de TG

En el ensayo de TG se pretende determinar cual de las variaciones del material posee una mejor temperatura de transición vítrea. La temperatura de transición vítrea se define como un cambio reversible de fase de un polímero amorfo, o la parte amorfa de un polímero semi cristalino, de un estado rígido (vítreo) a uno plástico (goma). Esta propiedad en los plásticos termoestables como en este caso, sufre un desplazamiento debido al cross-linking que se produce durante el curado, esto significa que la temperatura de transición vítrea del tercer calentamiento siempre será mayor o igual que la del segundo calentamiento.

$$Tg_{3^{er} \text{ calentamiento}} \geq Tg_{2^{o} \text{ calentamiento}} \quad (6.1)$$

Además, durante la transición vítrea se produce un incremento del calor específico (a presión constante) del material C_p . En los materiales termoestables, al igual que ocurre con la T_g , este incremento sufre variaciones en los distintos calentamientos. Siendo respecto al primero, siempre mayor o igual.

$$\Delta C_{p_{2^{o} \text{ calentamiento}}} \geq \Delta C_{p_{1^{er} \text{ calentamiento}}} \quad (6.2)$$

Finalmente, hay que tener en cuenta que los resultados de este ensayo dependen de varios factores, los cuales habrá que tener en cuenta y asegurarse de que son idénticos en todas las variaciones del material, de lo contrario, podrían aparecer discordancias entre ellos. Estos factores son:

- **Grado de curado:** En un mismo material, el espécimen con mayor grado de curado presentará una mayor temperatura de transición vítrea.
- **Presencia de componentes sin disociar:** Dado el caso de un mal proceso de mezclado donde se hayan quedado pequeñas cantidades de resina o aditivos, la gráfica de T_g presentará errores.

Este tipo de ensayo se puede realizar sobre el material sin curar o una vez el proceso de curado ha finalizado, obteniendo mediante el ensayo distintas características en cada caso. En este proyecto, el ensayo se ha llevado a cabo sobre el material ya curado, pudiendo así obtener datos sobre la humedad, presencia de monómeros sin reaccionar, degradación, transición vítrea...

A pesar de todas las posibilidades que ofrece este ensayo, nos centraremos en este estudio en la obtención de la temperatura de transición vítrea.

6.3.1. Máquina de ensayo

Para la realización de este ensayo se hará uso principalmente de un escáner de calorimetría diferencial, también denominado *DSC*. En concreto para este ensayo, se ha utilizado un *DSC 214 Polyma* como el de la figura 6.8, de la marca NETZSCH.

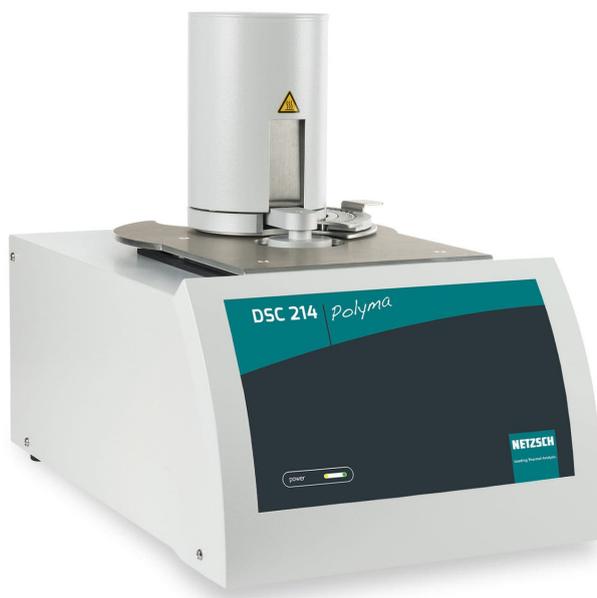


Figura 6.8: NETZSCH DSC 214 Polyma.

Este DSC ofrece la posibilidad de identificar mediante software la temperatura de transición vítrea de forma automática y así facilitar el tratamiento de datos.

6.3.2. Procedimiento

El procedimiento llevado a cabo para este ensayo es sin duda el más delicado y por ello hay que seguir unas determinadas instrucciones con rigor. Al tratarse de un equipo electrónico como primer paso se procederá a la conexión del mismo así como el ordenador auxiliar, que ayudará en el proceso de configuración y de visualización de resultados.

El siguiente paso es la preparación del crisol. Como el propio nombre de la máquina indica, utiliza la calorimetría diferencial, comparando un crisol que contiene el material con uno completamente vacío. En el crisol que contiene el material se introducirán entre 15 y 40mg del producto curado. Como se indica en el apartado 5.3 estas cantidades de producto se extraerán de las probetas preparadas con anterioridad con la ayuda de unas tenacillas.

Dada la reducida cantidad que se debe introducir en el crisol con precisión, se hará uso de una báscula analítica de precisión $\pm 0,01mg$ de la marca RADWAG apreciable en la figura 6.9. Para este estudio se ha precisado aún más la cantidad de producto introducida en el crisol y en todos los casos se ha introducido entre 20 y 30mg.



Figura 6.9: Báscula analítica de precisión RADWAG.

Con el crisol ya preparado, se cerrará y se hará un pequeño orificio en la parte superior con la ayuda de una prensa manual, considerada accesorio del DSC. Análogamente se preparará otro crisol completamente vacío. Una vez están los dos crisoles listos para ensayar, se introducen en el DSC en el compartimento habilitado para ello, en la figura 6.10 se aprecia esquemáticamente el interior del DSC en funcionamiento. Para reducir variables que puedan afectar al ensayo, se situará siempre el crisol con el material en el lado derecho.

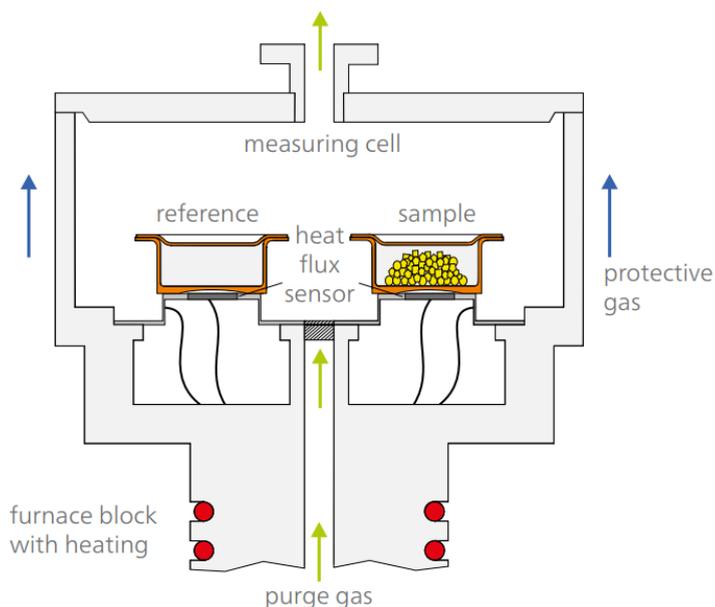


Figura 6.10: Esquema del interior del DSC en funcionamiento.

En este punto, solo falta por configurar el DSC para que siga la rampa de temperaturas deseada. En este estudio se ha utilizado una rampa estándar utilizada en la empresa de forma frecuente. Podemos describir la rampa de temperaturas como:

- De 20°C a 200°C a una velocidad de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$

Finalmente, se configura los datos que se desean obtener como resultados para que el DSC los identifique y posteriormente los registre. En este estudio, nos centraremos en:

- Incremento del calor específico (a presión constante).
- Temperatura media de la TG.

Capítulo 7

Resultados

En este apartado se mostrarán de forma gráfica y representados en tablas los resultados obtenidos en los distintos ensayos para todas las variables del producto. Se utilizará la notación propuesta en el apartado 4.3.3 para evitar repetitividad de los extensos nombres.

7.1. Resultados de Tracción

Los resultados se muestran en tablas, indicando los datos significativos obtenidos de cada probeta.

■ Producto N°1

Producto N°1 - Vacío y Temperatura					
Id. Probeta	Límite elástico (MPa)	Carga de rotura (MPa)	Alargamiento proporcional (%)	Alargamiento de rotura (%)	Módulo de Young (MPa)
T.1.01	30.33	42.04	1.51	3.00	2008.34
T.1.02	30.41	42.80	1.50	3.15	2027.33
T.1.03	29.39	41.83	1.50	3.26	1959.53
T.1.04	30.83	42.28	1.52	3.08	2027.96
T.1.05	29.82	44.46	1.49	3.33	2001.34
T.1.06	31.25	43.44	1.44	2.61	2170.42
T.1.07	29.34	41.65	1.44	2.94	2037.50
T.1.08	33.01	46.12	1.49	2.89	2215.03
T.1.09	33.20	44.73	1.54	3.05	2156.04
T.1.10	34.02	46.54	1.53	3.00	2082.69

Tabla 7.1: Resultados del ensayo de tracción del Producto N°1

Obtenemos los siguientes parámetros estadísticos de la tabla anterior:

Producto N°1 - Vacío y Temperatura

Variable Estadística	Límite elástico (MPa)	Carga de rotura (MPa)	Alargamiento proporcional (%)	Alargamiento de rotura (%)	Módulo de Young (MPa)
Media (\bar{x})	31.16	42.60	1.50	2.90	2082.69
Desv. Típica (σ)	1.68	4.19	0.03	0.503	97.64

Tabla 7.2: Estadísticas del ensayo de tracción del Producto N°1

■ Producto N°2

Producto N°2 - Vacío y Sin Temperatura

Id. Probeta	Límite elástico (MPa)	Carga de rotura (MPa)	Alargamiento proporcional (%)	Alargamiento de rotura (%)	Módulo de Young (MPa)
T.2.01	28.19	37.66	1.46	2.28	1930.89
T.2.02	24.68	31.27	1.35	1.84	1828.22
T.2.03	28.28	36.24	1.43	2.07	1977.48
T.2.04	27.74	30.86	1.43	2.06	1940.35
T.2.05	27.04	35.35	1.45	2.17	1864.48
T.2.06	27.98	36.13	1.44	2.14	1943.06
T.2.07	29.64	38.26	1.44	2.20	2058.47
T.2.08	28.11	35.70	1.47	2.11	1912.45
T.2.09	26.28	32.97	1.47	2.06	1788.89
T.2.10	29.19	37.11	1.54	2.32	1913.89

Tabla 7.3: Resultados del ensayo de tracción del Producto N°2

Al igual que en el apartado anterior obtenemos:

Producto N°2 - Vacío y Sin Temperatura

Variable Estadística	Límite elástico (MPa)	Carga de rotura (MPa)	Alargamiento proporcional (%)	Alargamiento de rotura (%)	Módulo de Young (MPa)
Media (\bar{x})	27.71	35.06	1.45	2.076	1913.89
Desv. Típica (σ)	1.43	2.79	0.05	0.221	76.58

Tabla 7.4: Estadísticas del ensayo de tracción del Producto N°2

■ **Producto N°3**

Producto N°3 - Temperatura y Sin Vacío					
Id. Probeta	Límite elástico (MPa)	Carga de rotura (MPa)	Alargamiento proporcional (%)	Alargamiento de rotura (%)	Módulo de Young (MPa)
T.3.01	29.04	33.58	1.52	1.87	1910.52
T.3.02	27.43	38.49	1.41	2.30	1945.17
T.3.03	28.70	38.98	1.43	2.27	2007.06
T.3.04	25.63	34.96	1.37	2.07	1870.73
T.3.05	31.62	41.06	1.46	2.16	2165.89
T.3.06	29.80	39.00	1.46	2.16	2041.16
T.3.07	25.20	31.09	1.39	1.81	1813.02
T.3.08	22.99	35.30	1.37	2.59	1678.39
T.3.09	24.39	35.88	1.37	2.37	1779.93
T.3.10	26.35	38.45	1.41	2.46	1868.65

Tabla 7.5: Resultados del ensayo de tracción del Producto N°3

De los datos anteriores obtenemos la media y la desviación típica:

Producto N°3 - Temperatura y Sin Vacío					
Variable Estadística	Límite elástico (MPa)	Carga de rotura (MPa)	Alargamiento proporcional (%)	Alargamiento de rotura (%)	Módulo de Young (MPa)
Media (\bar{x})	27.11	36.67	1.41	2.21	1908.05
Desv. Típica (σ)	2.68	3.02	0.05	0.246	140.05

Tabla 7.6: Estadísticas del ensayo de tracción del Producto N°3

■ **Producto N°4**

Producto N°4 - Sin Vacío y Sin Temperatura					
Id. Probeta	Límite elástico (MPa)	Carga de rotura (MPa)	Alargamiento proporcional (%)	Alargamiento de rotura (%)	Módulo de Young (MPa)
T.4.01	28.29	35.63	1.48	2.12	1911.62
T.4.02	30.54	35.03	1.64	2.13	1862.26
T.4.03	30.43	35.73	1.60	2.11	1901.93
T.4.04	28.30	35.19	1.53	2.18	1849.74
T.4.05	28.76	36.22	1.51	2.20	1904.83
T.4.06	31.55	38.43	1.62	2.33	1947.47
T.4.07	31.63	36.76	1.58	2.04	2001.90
T.4.08	29.20	35.56	1.59	2.20	1836.54
T.4.09	27.46	35.35	1.46	2.18	1881.03
T.4.10	32.08	33.80	1.72	1.89	1865.06

Tabla 7.7: Resultados del ensayo de tracción del Producto N°4

De los datos anteriores, obtenemos el valor medio y la desviación típica:

Producto N°4 - Sin Vacío y Sin Temperatura					
Variable Estadística	Límite elástico (MPa)	Carga de rotura (MPa)	Alargamiento proporcional (%)	Alargamiento de rotura (%)	Módulo de Young (MPa)
Media (\bar{x})	29.83	35.77	1.57	2.13	1896.24
Desv. Típica (σ)	1.63	1.22	0.08	0.115	49.68

Tabla 7.8: Estadísticas del ensayo de tracción del Producto N°4

▪ **Producto N°5**

Producto N°5 - Alto contenido en espesantes					
Id. Probeta	Límite elástico (MPa)	Carga de rotura (MPa)	Alargamiento proporcional (%)	Alargamiento de rotura (%)	Módulo de Young (MPa)
T.5.01	35.66	37.10	1.45	1.56	2458.97
T.5.02	34.79	38.95	1.24	2.06	2805.89
T.5.03	32.82	41.72	1.40	1.97	2344.21
T.5.04	33.11	39.38	1.35	1.70	2452.30
T.5.05	31.56	34.31	1.42	1.60	2222.46
T.5.06	33.24	29.98	1.17	1.27	2841.03
T.5.07	33.50	42.89	1.37	2.07	2445.11
T.5.08	32.84	34.45	1.40	1.49	2345.93
T.5.09	36.43	42.63	1.52	1.94	2396.97
T.5.10	37.39	42.66	1.58	1.97	2366.46

Tabla 7.9: Resultados del ensayo de tracción del Producto N°5

Por último se calcula el valor medio y la desviación típica de este último producto:

Producto N°5 - Alto contenido en espesantes					
Variable Estadística	Límite elástico (MPa)	Carga de rotura (MPa)	Alargamiento proporcional (%)	Alargamiento de rotura (%)	Módulo de Young (MPa)
Media (\bar{x})	34.13	38.41	1.39	1.75	2467.93
Desv. Típica (σ)	1.85	4.39	0.12	0.29	200.01

Tabla 7.10: Estadísticas del ensayo de tracción del Producto N°5

7.1.1. Observaciones

El parámetro de principal importancia que describe el comportamiento de un material a tracción es el módulo de elasticidad o de Young, por lo tanto, comparando este valor se aprecia que el producto con un valor más elevado es el N°5. Seguidamente, ordenados según el valor de mayor a menor aparecen los productos 1, 2, 3 y 4. Esto tiene coherencia ya que posee un mayor módulo el material con menor contenido de aire, sin embargo no explica que el producto que mayor valor tenga sea el N°5. A pesar de ello cabe destacar que el producto N°5 es el que mayor variación presenta, teniendo una desviación típica muy superior al resto, llegando a duplicar los valores obtenidos en otros productos. Esto es un síntoma de que el material no presenta las mismas características en todas las fabricaciones.

Respecto al resto de parámetros, sólo prestaremos atención a los de rotura ya que los de proporcionalidad están directamente relacionados con el módulo de elasticidad. El producto que posee una mayor carga a rotura es el N°1, además la superioridad respecto del resto es importante, sin embargo la diferencia entre los otros cuatro productos es reducida. La desviación típica de la carga de rotura es similar en todos los productos exceptuando el N°4, que presenta un valor bastante inferior al resto, posiblemente esto se deba meramente a la aleatoriedad. Finalmente observando los alargamientos de rotura se puede observar como el producto N°

7.2. Resultados de Compresión

Como se ha mencionado en el apartado 6.2 del ensayo de compresión se obtendrá el módulo de compresión y la carga y deformación de rotura a compresión. Los valores se encuentran representados en las siguientes tablas:

■ Producto N°1

Producto N°1 - Vacío y Temperatura			
Id. Probeta	Fuerza de rotura (N)	Deformación de rotura (%)	Módulo de Compresión (MPa)
C.1.01	> 30000	-	1685.23
C.1.02	> 30000	-	1578.49
C.1.03	> 30000	-	1716.83
C.1.04	> 30000	-	1661.46
C.1.05	> 30000	-	1587.07

Tabla 7.11: Resultados del ensayo de compresión del Producto N°1

En el caso del producto N°1 no se ha conseguido llegar a la rotura de las probetas de compresión. Esto se debe a que el límite de carga de la máquina de ensayos era de $30kN$. Durante el ensayo, se ha llegado en todas las probetas a esta fuerza, obteniendo el mismo resultado. Por tanto se puede asegurar que la fuerza necesaria para la rotura se encuentra por encima de los $30kN$. Si adecuamos esta fuerza a las dimensiones de la probeta, la carga de rotura a compresión es $\geq 1,26MPa$. En la figura 7.1 se observan dos probetas del producto N°1, a la derecha, una probeta tras ser ensayada y a la izquierda, antes de ensayarla.



Figura 7.1: Comparativa entre probetas de compresión del producto N°1 antes y después del ensayo.

De los datos obtenidos se pueden extraer los siguientes valores estadísticos:

Producto N°1 - Vacío y Temperatura			
Variable Estadística	Fuerza de rotura (N)	Deformación de rotura (%)	Módulo de Compresión (MPa)
Media (\bar{x})	> 30000	-	1645.81
Desv. Típica (σ)	-	-	54.45

Tabla 7.12: Variables estadísticas del ensayo de compresión del Producto N°1

■ Producto N°2

Producto N°2 - Vacío y Sin Temperatura			
Id. Probeta	Fuerza de rotura (N)	Deformación de rotura (%)	Módulo de Compresión (MPa)
C.2.01	26150.32	38.26	1145.47
C.2.02	28976.48	39.57	1050.88
C.2.03	27741.26	39.13	1556.45
C.2.04	29983.73	40.87	1659.53
C.2.05	28854.36	41.74	1312.26

Tabla 7.13: Resultados del ensayo de compresión del Producto N°2

De estos resultados obtenemos las siguientes variables estadísticas:

Producto N°2 - Vacío y Sin Temperatura			
Variable Estadística	Fuerza de rotura (N)	Deformación de rotura (%)	Módulo de Compresión (MPa)
Media (\bar{x})	28341.23	39.91	1344.92
Desv. Típica (σ)	1305.73	1.24	232.82

Tabla 7.14: Variables estadísticas del ensayo de compresión del Producto N°2

■ Producto N°3

Producto N°3 - Temperatura y Sin Vacío			
Id. Probeta	Fuerza de rotura (N)	Deformación de rotura (%)	Módulo de Compresión (MPa)
C.3.01	28853.27	42.52	961.66
C.3.02	29976.34	41.96	938.19
C.3.03	28833.02	42.39	1341.00
C.3.04	27064.68	41.30	970.43
C.3.05	27883.92	40.43	1009.91

Tabla 7.15: Resultados del ensayo de compresión del Producto N°3

De estos valores obtenemos:

Producto N°3 - Temperatura y Sin Vacío			
Variable Estadística	Fuerza de rotura (N)	Deformación de rotura (%)	Módulo de Compresión (MPa)
Media (\bar{x})	28522.25	41.52	1044.23
Desv. Típica (σ)	985.14	0.66	150.17

Tabla 7.16: Variables estadísticas del ensayo de compresión del Producto N°3

■ Producto N°4

Producto N°4 - Sin Vacío y Sin Temperatura			
Id. Probeta	Fuerza de rotura (N)	Deformación de rotura (%)	Módulo de Compresión (MPa)
C.4.01	26458.59	37.96	1731.74
C.4.02	27233.28	40.13	1494.67
C.4.03	25956.33	39.09	1036.57
C.4.04	26867.58	40.04	1306.94
C.4.05	27544.08	40.09	1521.95

Tabla 7.17: Resultados del ensayo de compresión del Producto N°4

Los valores estadísticos relevantes de la tabla anterior son:

Producto N°4 - Sin Vacío y Sin Temperatura			
Variable Estadística	Fuerza de rotura (N)	Deformación de rotura (%)	Módulo de Compresión (MPa)
Media (\bar{x})	26811.932	39.46	1418.37
Desv. Típica (σ)	560.96	0.85	233.64

Tabla 7.18: Variables estadísticas del ensayo de compresión del Producto N°4

■ Producto N°5

Producto N°5 - Alto contenido en espesantes			
Id. Probeta	Fuerza de rotura (N)	Deformación de rotura (%)	Módulo de Compresión (MPa)
C.5.01	26065.34	41.52	1264.20
C.5.02	23853.12	41.96	1340.15
C.5.03	25033.74	42.39	1107.59
C.5.04	25068.23	41.30	1247.59
C.5.05	26120.02	40.43	1138.63

Tabla 7.19: Resultados del ensayo de compresión del Producto N°5

Finalmente, del producto N°obtenemos los siguientes parámetros estadísticos:

Producto N°5 - Alto contenido en espesantes			
Variable Estadística	Fuerza de rotura (N)	Deformación de rotura (%)	Módulo de Compresión (MPa)
Media (\bar{x})	24328.09	41.52	1219.63
Desv. Típica (σ)	2053.73	0.66	85.33

Tabla 7.20: Variables estadísticas del ensayo de compresión del Producto N°5

7.2.1. Observaciones

Resulta destacable el hecho de que el producto N°1 sometido al mismo ensayo de compresión que el resto de variaciones, no presente fractura. La causa de ello es la completa eliminación de burbujas de aire en el interior del mismo, ya que las oquedades creadas por el aire actúan como concentradores de tensiones, favoreciendo así la creación de grietas y consecuentemente, la fractura del material. A pesar de esto, se ha podido obtener el módulo de compresión del producto ya que sí que se ha superado la zona donde el comportamiento del material es elástico, creando una deformación permanente en las probetas y haciendo que estas sean inservibles para un nuevo ensayo.

En el resto de productos si que se ha llegado al punto de fractura con la maquinaria disponible. Si comparamos entre ellos resulta obvio que las mejores propiedades a compresión las posee el N°1.

Entre el resto de productos, en cuanto a la fuerza de rotura se observa un patrón donde los productos con mejores resultados son los que menor contenido de aire poseen, siendo los productos N°4 y N°5 los que tienen menores valores, más concretamente el producto con alto contenido en espesantes (N°5) presenta un valor muy inferior al resto. Sin embargo en cuanto a módulo de compresión y deformación de rotura no se puede establecer una relación entre productos ya que no se tienen datos de ubicación, tamaño y cantidad de aire contenido en el material. Por lo tanto hay que establecer un rango de valores que comprenda los resultados obtenidos.

7.3. Resultados de TG

En este apartado se mostrarán los termogramas de cada una de las variables del producto obtenidos a partir del DSC y a continuación se reunirán en una tabla los valores significativos obtenidos de las gráficas.

■ Producto N°1

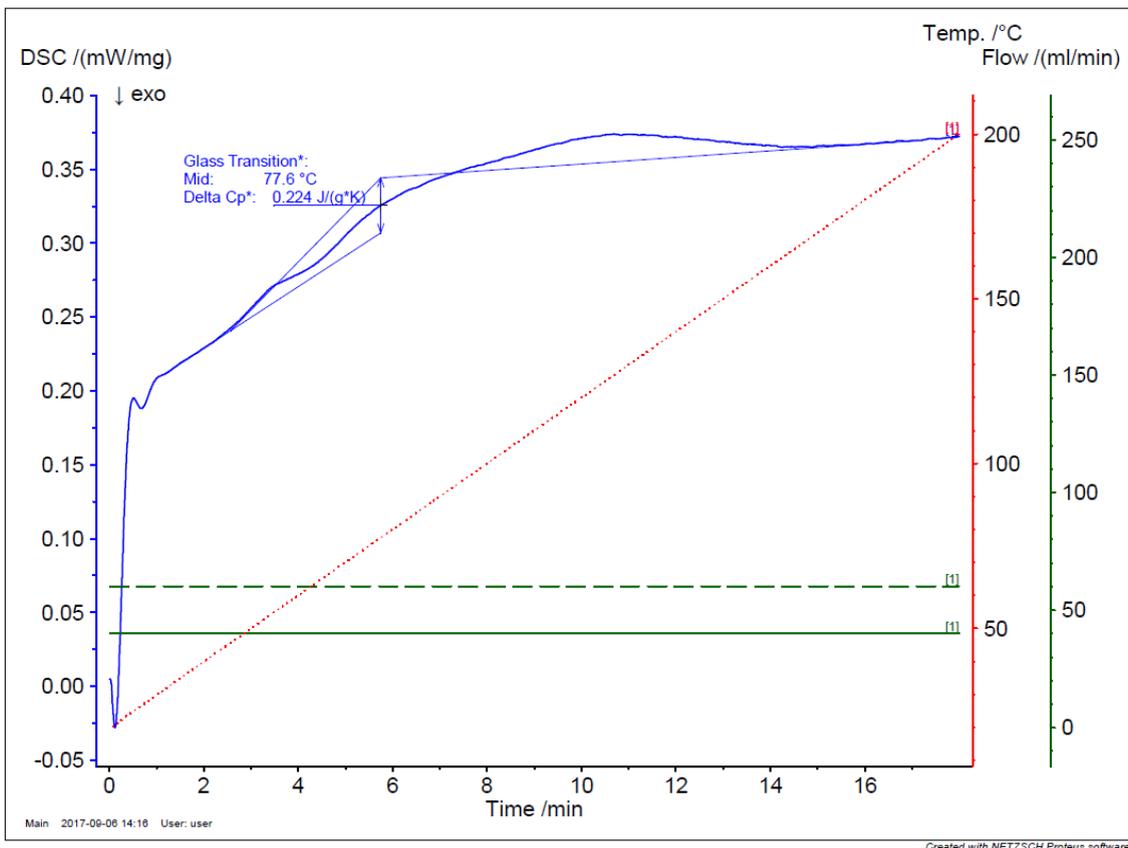


Figura 7.2: Termograma del Producto N°1.

Producto N°1	
Incremento de calor específico ($J/(gK)$)	0.224
Temperatura de transición vitrea ($^{\circ}C$)	77.6

Tabla 7.21: Resultados TG del Producto N°1

■ **Producto N°2**

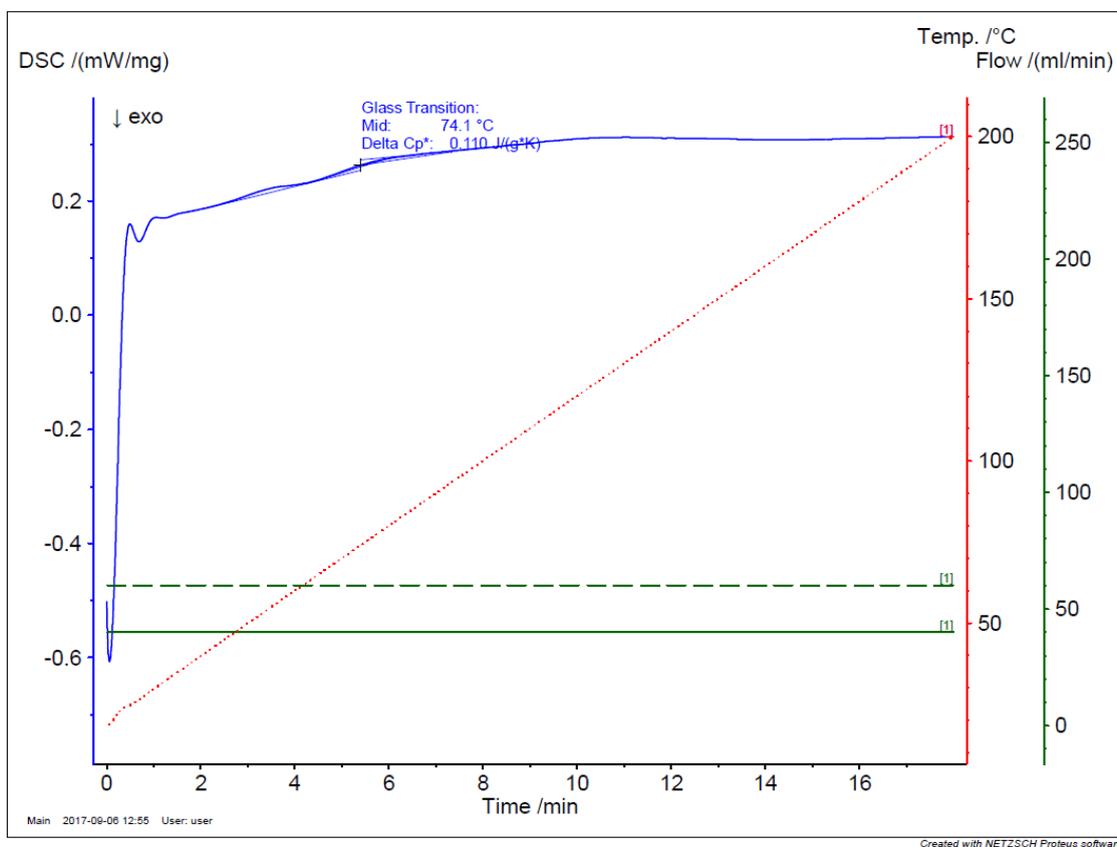


Figura 7.3: Termograma del Producto N°2.

Producto N°2	
Incremento de calor específico ($J/(gK)$)	0.110
Temperatura de transición vítrea (°C)	74.1

Tabla 7.22: Resultados TG del Producto N°2

■ **Producto N°3**

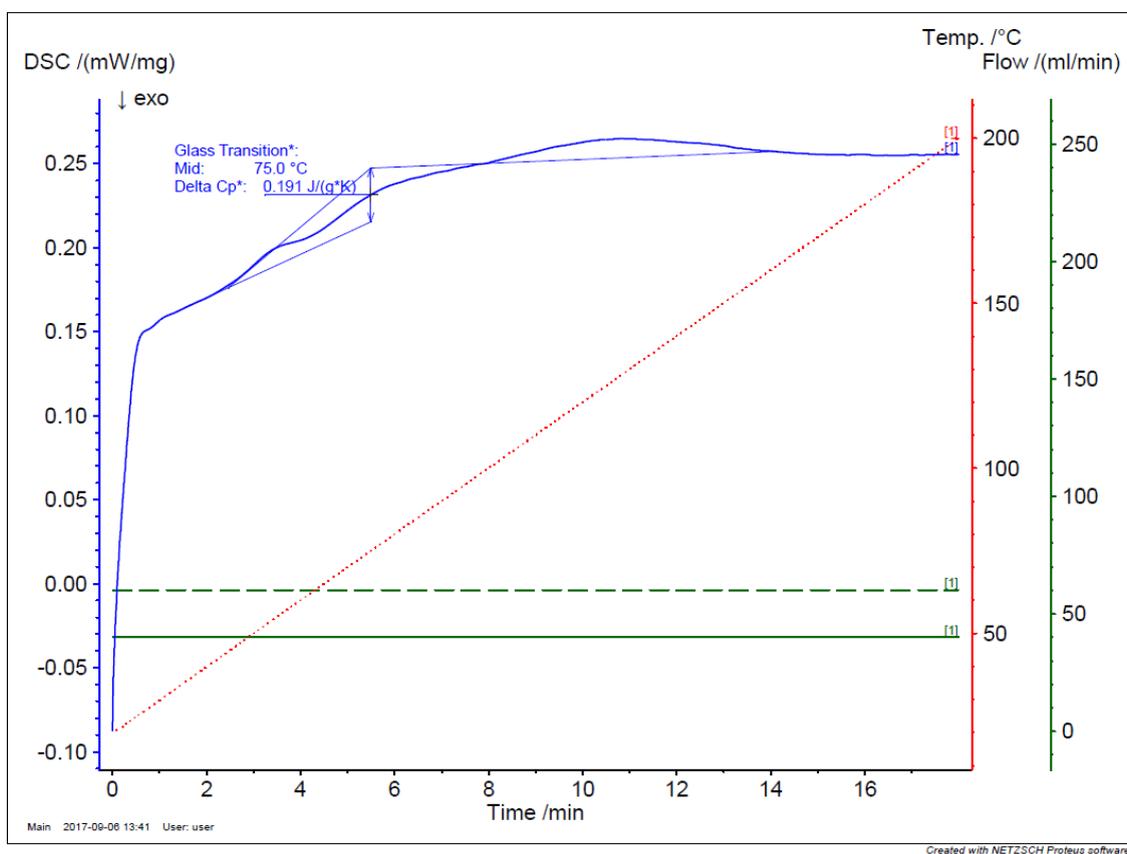


Figura 7.4: Termograma del Producto N°3.

Producto N°3	
Incremento de calor específico ($J/(gK)$)	0.191
Temperatura de transición vítrea (°C)	75.0

Tabla 7.23: Resultados TG del Producto N°3

■ Producto N°4

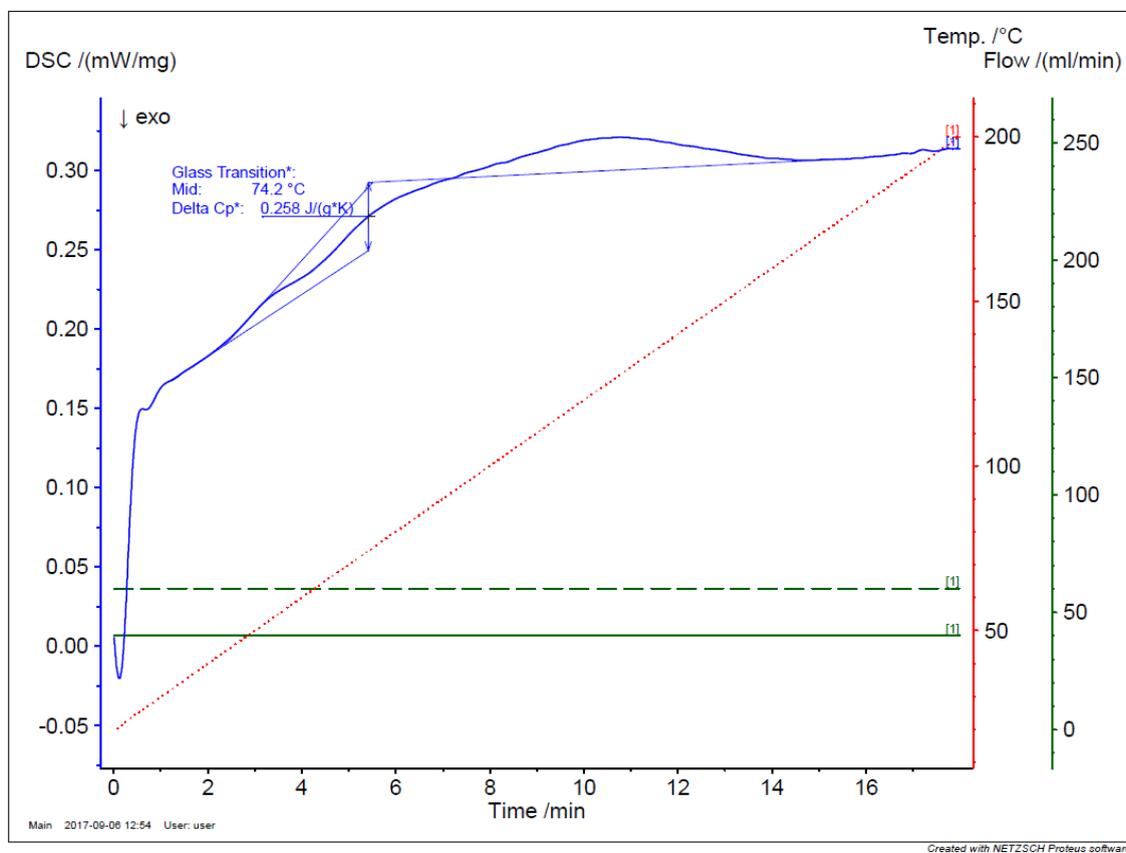


Figura 7.5: Termograma del Producto N°4.

Producto N°4	
Incremento de calor específico ($J/(gK)$)	0.258
Temperatura de transición vítrea ($^{\circ}C$)	74.2

Tabla 7.24: Resultados TG del Producto N°4

■ Producto N°5

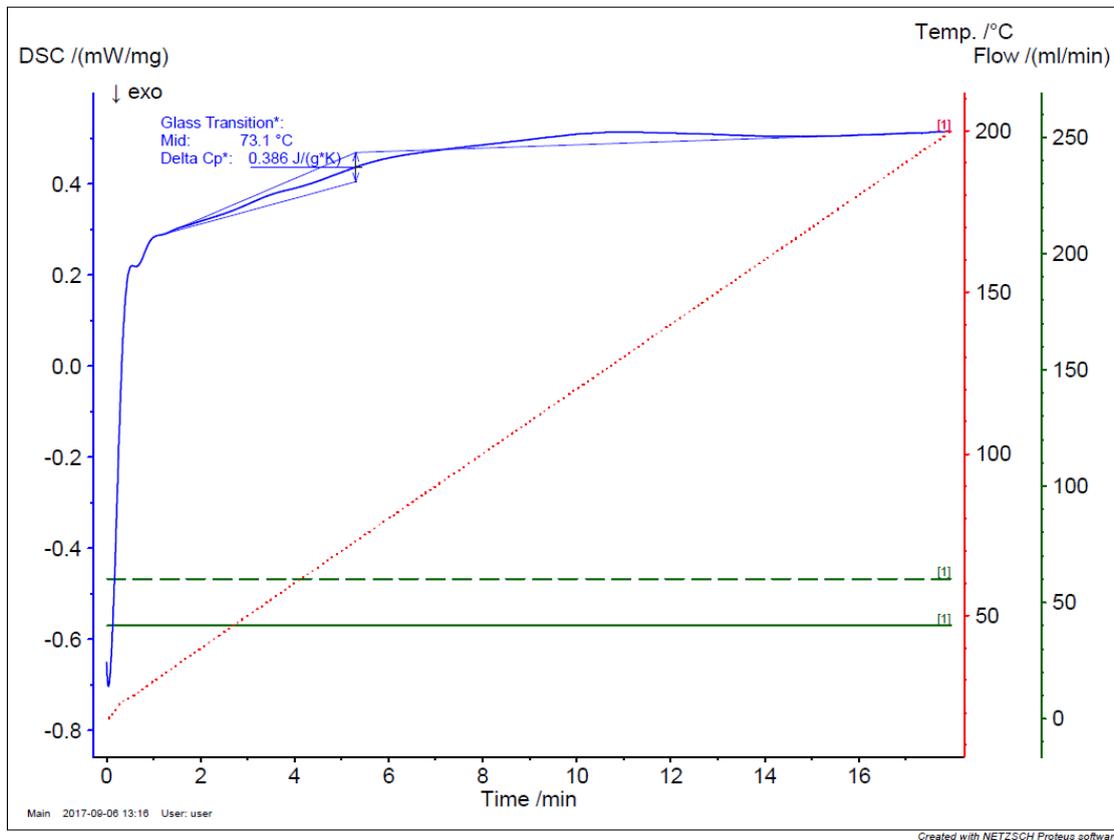


Figura 7.6: Termograma del Producto N°5.

Producto N°5	
Incremento de calor específico ($J/(gK)$)	0.386
Temperatura de transición vítrea ($^{\circ}C$)	73.1

Tabla 7.25: Resultados TG del Producto N°5

7.3.1. Observaciones

En primer lugar, si comparamos los valores de la temperatura de transición vítrea de todos los productos, observamos como una vez más, el producto N°1 es el que presenta una mayor temperatura y por lo tanto, tiene mejores características frente al resto. Comparando entre el resto se aprecia como la TG del resto de productos es similar exceptuando el producto con elevado contenido de espesantes (N°5), que tiene un valor ligeramente inferior.

En referencia al incremento de calor específico no se aprecia un patrón que describa el comportamiento de dicho valor en función del producto ensayado. Por lo tanto no se puede justificar la influencia del contenido de aire en este valor.

Capítulo 8

Entorno de trabajo

Para el desarrollo de este proyecto se han utilizado tres espacios de trabajo principalmente. Todos ellos han de cumplir una serie de requisitos mínimos para garantizar la seguridad y la salud del trabajador. Los requisitos del espacio de trabajo quedan establecidas en el Real Decreto 486/1997. Cada espacio de trabajo también tendrá una serie de normas de seguridad acordes a la labor desempeñada en cada uno de ellos. Los tres lugares de trabajo utilizados son:

- Laboratorio químico.
- Puesto de oficina.
- Taller de mecanizado y ensayos.

A continuación se detallan las condiciones así como las medidas de seguridad llevadas a cabo en cada uno de ellos.

8.1. Laboratorio Químico

Al tratarse de un laboratorio químico donde se realizan trabajos de investigación así como de control de calidad requiere de unas condiciones específicas para la obtención de unos resultados y análisis precisos, por ello es considerado como una zona con altas exigencias visuales, que por normativa ha de poseer una iluminación mínima de 500lux . Además, dado que la mayoría de controles y fabricaciones se realizan en condiciones estándar, la temperatura y humedad del laboratorio son factores muy importantes. Estos valores se mantienen entre $24 - 26^\circ\text{C}$ en el caso de la temperatura y entre $45 - 65\%$ para la humedad relativa.

El principal proceso de este proyecto llevado a cabo en el laboratorio es la fabricación. En este proceso existe la manipulación de recipientes pesados, el contacto con productos nocivos y el desprendimiento de vapores y sustancias en suspensión. Por ello el operario ha de llevar en todo momento su EPI, que consta de:

- Gafas de protección contra impacto.
- Guantes de protección química nivel 3.
- Mascarilla con filtro de partículas y vapores orgánicos.
- Botas de seguridad con puntera de acero.
- Bata de laboratorio.

Además cuando se vayan a manipular productos a una elevada temperatura se utilizarán guantes de protección térmica.

8.2. Puesto de oficina

En este espacio se ha llevado a cabo toda la labor de ofimática, redacción, investigación y el tratamiento de los resultados obtenidos. Según el real decreto citado anteriormente, el puesto de trabajo debe disponer de dos metros cuadrados de superficie por trabajador y estar ubicado en una sala con una altura mínima de dos metros y medio. Además, al tratarse de una labor de mecanografía y procesamiento de datos, la iluminación mínima del puesto de trabajo ha de ser de 500lux . Respecto a condiciones ambientales el puesto ha de disponer de un sistema de climatización que garantice un flujo de aire y tanto la temperatura como la humedad relativa han de mantenerse entre $17 - 27^{\circ}\text{C}$ y $45 - 65\%$ respectivamente.

Como medidas de seguridad en este puesto se procurará una buena postura en el asiento de trabajo y se evitará posicionar el ordenador portátil de forma que la luz incida directamente sobre la pantalla, así se evitarán reflejos que podrían causar daños visuales.

8.3. Taller de mecanizado y ensayos

Como su propio nombre indica en este lugar de trabajo se han llevado a cabo tanto los ensayos de tracción como los de compresión. También es aquí donde se han preparado los moldes para las probetas así como el corte y acabado de las probetas de compresión.

Se trata de un lugar de trabajo donde se manipulan herramientas, maquinaria y existe riesgo de corte, aplastamiento o inhalación de partículas en suspensión, ya que se realizan procesos con desprendimiento de viruta. Dadas las labores que se desempeñan, las exigencias visuales que se requieren son elevadas. Esto condiciona al local a tener una iluminación mínima de 500lux . Por otra parte, las condiciones termohigrométricas son las estándares de un puesto de trabajo, donde la temperatura ha de estar entre $14 - 25^{\circ}\text{C}$ y la humedad relativa entre $30 - 70\%$.

Este entorno es el que presenta mayores riesgos laborales, por ello el operario dispone de un EPI que contiene los siguientes elementos:

- **Gafas de protección contra impacto:** Su uso es obligatorio para labores de corte con desprendimiento de viruta, procesos de lijado y durante el ensayo de probetas.
- **Guantes de trabajo:** De uso obligatorio para manipulación de maquinaria y piezas pesadas.
- **Botas de protección con puntera de acero:** Este elemento es de uso obligatorio en todo momento.
- **Mascarilla de partículas:** Se utilizará de forma obligatoria en todo proceso con desprendimiento de viruta.

Capítulo 9

Conclusiones

Tras haber realizado toda la labor que requería este proyecto, haber obtenido los resultados necesarios y haber analizado los mismos de forma estadística, se pueden extraer una serie de conclusiones que, como el nombre del proyecto indica, determinan que variables de producción afectan al material de forma que sus propiedades mecánicas sean óptimas.

En cuanto a lo que fabricación se refiere se ha comprobado como los procesos aplicados son exactamente iguales en todos los productos, por ello se podría determinar esta fase del proyecto como válida y conforme al planteamiento inicial. En este punto, no se encuentran diferencias visuales entre los productos con bajo contenido en aditivos tixotrópicos, únicamente se aprecia diferencia con el producto con alto contenido en espesantes. En el proceso de fabricación no se ha producido ningún tipo de incidencia.

Una vez llegados al punto de control de calidad, se pueden apreciar las primeras diferencias entre productos a pesar de que todos ellos cumplen los estándares de calidad fijados por el fabricante. Las diferencias más notorias, sin embargo esperadas, se encuentran en la viscosidad entre los productos N°1-4 y el producto N°5. Al contrario, una diferencia no apreciable a nivel visual es la que existe entre las densidades de los productos N°1-4, donde a medida que el producto ha sido sometido a más procesos para la extracción del aire su densidad aumenta de forma notable.

Respecto a la fabricación de probetas cabe destacar que la preparación de éstas con el producto N°5 ha sido costosa dada la elevada viscosidad del material. Se han realizado varias fabricaciones de probetas hasta conseguir un método eficaz con el que se lograra una máxima homogeneidad con todos los productos, pero en especial con el producto N°5 ha llevado horas de prueba y error obteniendo como resultado de estas pruebas probetas defectuosas.

Finalmente, llegamos al apartado de los resultados, donde realmente se aprecian las características mecánicas. En primer lugar, nos centraremos en los resultados de tracción, donde el parámetro más representativo para la caracterización de un material es el módulo de Young, que mejora las características cuanto mayor es. Teniendo esto claro, el producto con mayor módulo es el N°5, seguido del N°1. El resto de productos presenta un módulo inferior y con ello peores propiedades a tracción. También hay que destacar que el producto N°5 posee el mayor valor de desviación típica, lo cual indica que el valor del módulo de Young está comprendido en un amplio rango. Esto es perjudicial a nivel comercial ya que lo óptimo en estos casos es establecer un parámetro descriptivo del material en un rango de valores lo más reducido posible. De los resultados de tracción también es destacable el buen comportamiento de los productos N°1-4 en la zona plástica, al contrario que el producto N°5.

Analizando los resultados del ensayo de tracción encontramos un comportamiento similar, dentro de los productos líquidos N°1-4, el N°1 es el que mejores propiedades presenta y las propiedades de

los otros van disminuyendo, con una relación inversa con la cantidad de aire que contienen. Por otro lado, el producto N°5 presenta un módulo de compresión comprendido entre los resultados obtenidos para los productos N°1-4.

Por último, respecto a la temperatura de transformación vítrea, el producto con las mejores propiedades es el N°1, presentando un valor por encima del resto de productos. El producto N°5, que es con el cual se establece la mayor diferencia por el contenido en espesantes, tiene una temperatura de transformación vítrea 4.5°C por debajo del N°1. Esta diferencia es significativa en este tipo de ensayo ya que la transformación entre polímero cristalino y amorfo se produce antes y con ello cambian las propiedades del material.

Concluyendo, la obtención de unas propiedades mecánicas óptimas en función de las variables de fabricación es la meta de este proyecto. Dados todos los procesos de fabricación y los resultados de los ensayos realizados se puede afirmar:

- Las mejores propiedades mecánicas a tracción las posee el producto N°5, sin embargo, teniendo una variabilidad entre probetas mucho menor, el producto N°1 también posee unas propiedades excelentes en comparación.
- De forma muy sobresaliente por encima del resto de productos, el N°1 presenta las mejores propiedades a compresión.
- La temperatura de transición vítrea más elevada es la del producto N°1, por ello es el que mejores propiedades presenta en este ensayo.

Queda demostrado que las mejores propiedades mecánicas en general las presenta el producto N°1 ya que, aunque en tracción no posea el mayor módulo, la variabilidad entre probetas tanto en este ensayo como en el resto, es menor que en el resto de productos con valores similares o superiores.

Capítulo 10

Análisis económico

En este apartado se va a profundizar en la parte económica de este proyecto, se evaluarán las horas de trabajo realizadas así como el precio de los materiales utilizados y el coste que supone el uso de las máquinas de ensayos.

Se agruparán los recursos en campos relacionados para ayudar a desglosar el presupuesto. Finalmente se tendrán en cuenta todos los grupos para obtener el coste total del proyecto.

Recursos humanos

Presupuesto en recursos humanos			
Personal	Horas dedicadas	Precio(€/h)	Coste total (€)
Ingeniero Aeroespacial	380	25	9500
Tutor del proyecto	15	45	675
Cotutor en empresa	20	45	900
Operario DSC	5	40	200
Operario máquina universal de ensayos	8	40	320
Total			11595

Tabla 10.1: Presupuesto en recursos humanos

Material y licencias de software

Presupuesto en licencias de software			
Software	Horas de uso	Precio(€/hora)	Coste total (€)
Microsoft Excel®	20	0.05	1
NETZSCH SmartMode - Proteus®	7	0.65	4.55
LahmRheology Software for Windows	15	0.23	3.45
Total			9

Tabla 10.2: Presupuesto en licencias de software

Presupuesto en uso de equipos			
Descripción	Horas de uso	Amortización (€/hora)	Coste total (€)
Viscosímetro LahmRheology CP1000	15	12	180
Balanza de precisión	3	9	27
Ordenador portatil ASUS R510VX	180	0.85	153
Horno industrial	70	3.6	252
Cámara de vacío	20	1.7	34
Agitador industrial	3	2	6
Sierra de diamante	5	0.50	2.5
Total			654.5

Tabla 10.3: Presupuesto en uso de equipos

Presupuesto en material de laboratorio			
Descripción	Unidades	Precio unitario (€)	Coste total (€)
Rollo de papel	1	1.5	1.5
Sticks de agitación	150	0.01	1.5
Pipetas desechables	60	0.01	0.6
Disco de corte de diamante	1	27	27
Set de lijas de distintos granos	1	10.9	10.9
Termómetro digital	2	9	18
Cronómetro digital	2	15.4	30.8
Espátula de laboratorio	3	6.3	18.9
Guantes de nitrilo	200	0.04	8
Máscara de protección	1	19.6	19.6
Guantes de protección térmica	1	3.9	3.9
Bata de laboratorio	1	12.9	12.9
Botas de seguridad	1	59.6	59.6
Total			213.2

Tabla 10.4: Presupuesto en material de laboratorio

Presupuesto en materiales para fabricación			
Descripción	Cantidad	Pecio unitario(€)	Coste total (€)
Tubo de acero galvanizado	Ø20mm x 1m	4.6	4.6
Moldes mecanizados tracción	2 ud.	164	328
Plancha PLEXIGLAS	500 x 500 x 4mm	19.7	19.7
Tulipa de plástico 4L	5 ud.	0.8	4
Lata metálica 1L	35 ud.	0.5	17.5
Epolit Fix serie 900	13Kg	42	546
Total			919.8

Tabla 10.5: Presupuesto en materiales para la fabricación

Ensayos

Presupuesto en ensayos			
Ensayo	Probetas	Pecio (€/probeta)	Coste total (€)
Ensayo de tracción	50	26	1300
Ensayo de compresión	25	26	650
Ensayo de TG	5	70	350
Total			2300

Tabla 10.6: Presupuesto en ensayos

Presupuesto total	
Descripción	Coste (€)
Recursos humanos	11595
Licencias de software	9
Uso de equipos	654.5
Material de laboratorio	213.2
Material de fabricación	919.8
Ensayos	2300
Total	15691.5

Tabla 10.7: Presupuesto total

El presupuesto total del proyecto, expresado en EUROS, asciende a una cantidad de:

QUINCE MIL SEISCIENTOS NOVENTA Y UN EUROS Y 50 CÉNTIMOS

Bibliografía

- [1] AEROX-WEBSITE, <http://www.aerox.es/>
- [2] GREAT POWER WIND TURBINES, <http://eolienne.cavey.org/en/autres.php>
- [3] UNE-EN ISO 291 *Atmósferas normalizadas para acondicionamiento y ensayos.*
- [4] UNE-EN ISO 527 *Plásticos: Determinación de las propiedades en tracción.*
- [5] UNE-EN ISO 11357 *Plásticos: Calorimetría diferencial de barrido (DSC).*
- [6] UNE-EN ISO 604 *Plásticos: Determinación de las propiedades en compresión.*
- [7] UNE-EN ISO 2884 *Determinación de la viscosidad utilizando viscosímetros de rotación.*
- [8] UNE-EN ISO 16862 *Evaluación de la resistencia al descuelgue.*
- [9] UNE-EN ISO 1183 *Métodos para determinar la densidad de plásticos no celulares.*
- [10] UNE- EN ISO 11339 *Adhesivos: Ensayo de pelado en T para uniones encoladas flexible sobre flexible.*
- [11] JAMES F. SACKERLFFORD, *Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros*, ED. PRENTICE HALL, 1998.
- [12] E.M. PETRIE, *Handbook of Adhesives and Sealants*, ED. MC-GRAW HILL, USA, 2000.
- [13] K.M. LIECHTI, *Adhesives and Sealants Engineered Materials*, ED. ASM INTERNATIONAL, USA, 1999.
- [14] WIKIBOOKS-LATEX, <https://en.wikibooks.org/wiki/LaTeX>
- [15] TÉCNICAS REOMÉTRICAS, <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/3626/1/tema5RUA.pdf>