

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA



**PANORAMA GENERAL SOBRE LA TELA NO TEJIDA MELTBLOWN Y
SPUNBOND.**

CASO DE ESTUDIO

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL DIPLOMA DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS

PRESENTA:

ISLA LIZETT RODRÍGUEZ BANDA

SALTILLO, COAHUILA

MARZO 2023

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA



**PANORAMA GENERAL SOBRE LA TELA NO TEJIDA MELTBLOWN Y
SPUNBOND.**

CASO DE ESTUDIO

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL DIPLOMA DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS

PRESENTA:

ISLA LIZETT RODRÍGUEZ BANDA

ASESOR:

DR. VICTOR JAVIER CRUZ DELGADO

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA



**PANORAMA GENERAL SOBRE LA TELA NO TEJIDA MELTBLOWN Y
SPUNBOND.**

CASO DE ESTUDIO

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL DIPLOMA DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS

PRESENTA:

ISLA LIZETT RODRÍGUEZ BANDA

EVALUADORES:

DR.FLORENTINO SORIANO

ING. ADAN HERRERA

SALTILLO, COAHUILA

MARZO 2023



GOBIERNO DE
MÉXICO



CONACYT
Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología



CENTRO DE INVESTIGACIÓN
EN QUÍMICA APLICADA

Saltillo, Coahuila a 7 de agosto de 2023

Coordinación de Posgrado
Presente

Por este conducto nos permitimos informar a esta coordinación que, el documento de Caso de Estudio preparado por ISLA LIZETT RODRÍGUEZ BANDA titulado Panorama general sobre la tela no tejida meltblown y spunbond, el cual fue presentado el día 04 de agosto de 2023, ha sido modificado de acuerdo a las observaciones, comentarios y sugerencias, realizadas por el Comité Evaluador asignado. Por tal motivo, avalamos que el documento adjunto corresponde a la versión final del documento de Caso de Estudio.

Atentamente,

SINODALES

Dr. Florentino Soriano Corral
Presidente

Ing. Adán Herrera Guerrero
Vocal

Vo. Bo. del Asesor

Dr. Víctor Javier Cruz Delgado



2023
AÑO DE
Francisco
VILLA

11 DE DICIEMBRE DE 1877

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por el apoyo económico otorgado durante la realización de mis estudios de especialización y por fomentar la investigación científica en México.

Así mismo agradezco al Centro de Investigación en Química Aplicada por darme la oportunidad de formarme en sus instalaciones y a todos mis maestros que contribuyeron en mi formación profesional.

Finalmente, gracias al lector por consultar este trabajo.

ÍNDICE

Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVO.....	2
3. JUSTIFICACIÓN.....	2
4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
4.1. Fundamentos y características de los materiales plásticos	3
4.1.1. Qué son los polímeros	3
4.1.1.1. Definiciones.....	3
4.1.1.2. Polimerización	3
4.1.1.2.1. Tipos de polimerización.....	3
4.1.1.3. Monómeros y polímeros	6
4.1.1.4. Peso molecular	6
4.1.2. Estructura.....	9
4.1.2.1. Polímeros lineales y ramificados.....	9
4.1.2.2. Polímeros entrecruzados	9
4.1.2.3. Copolímeros	10
4.1.2.4. Polímeros amorfos y semicristalinos	10
4.1.3. Propiedades	11
4.1.3.1. Transiciones térmicas.....	11
4.1.3.2. Propiedades mecánicas.....	12
4.1.3.3. Propiedades eléctricas	14
4.1.3.4. Propiedades térmicas.....	15
4.1.4. Relaciones estructura/propiedades.....	15
4.2. Polímeros para la obtención de TNT	17
4.2.1. Principales características de los polímeros	17
4.2.1.1. Viscosidad.....	17
4.2.1.2. Índice de fluidez o velocidad de fluidez	18
4.2.1.3. Normas para su determinación.....	18
4.2.2. Polietileno	19
4.2.2.1. HDPE, LDPE, LLDPE	19

4.2.3.	Polipropileno.....	20
4.2.3.1.	iPP, sPP, aPP	20
4.2.4.	Poliésteres.....	23
4.2.4.1.	PET, PBT, PEN, PLA	23
4.2.5.	Otros (Materiales Reciclados).....	25
4.2.5.1.	PP, PE, PET	25
4.3.	Definición y características principales de TNT	26
4.3.1.	Definición de TNT (ASTM D 1117-80)	26
4.3.2.	Tipos de TNT	27
4.3.2.1.	A partir de fibras naturales	27
4.3.2.2.	A partir de fibras sintéticas	27
4.3.3.	Métodos de obtención de TNT	28
4.3.3.1.	Electrospinning.....	28
4.3.3.2.	Melt blown	29
4.3.3.3.	Spun bond	31
4.3.3.4.	Parámetros de la operación y cuidados	32
4.3.3.4.1.	Variables que afectan el proceso	33
4.3.3.4.2.	Variables que afectan el producto	37
4.3.3.4.3.	Equipos que requieren atención	39
4.3.4.	Características de TNT	41
4.3.4.1.	Lisas	41
4.3.4.2.	Calandradas.....	42
4.3.4.3.	Planas/Afelpadas.....	43
4.3.4.4.	Guata	43
4.3.5.	Propiedades de TNT	44
4.3.5.1.	Propiedades fisicoquímicas.....	44
4.4.	Aplicación de la TNT	45
4.4.1.	Características generales	45
4.4.2.	Aplicaciones	46
4.4.2.1.	Filtración (aire/líquidos).....	46
4.4.2.2.	Equipo de protección personal (Bioseguridad).....	48
4.4.2.3.	Aplicaciones biomédicas	49
4.4.2.4.	Cuidado de la salud	52

4.4.2.5.	Sensores	55
4.4.2.6.	Manejo térmico.....	56
4.4.2.7.	Sector automotriz.....	57
4.4.2.8.	Agricultura	58
4.4.2.9.	Retardo a la flama	60
4.4.2.10.	Otros.....	60
4.4.3.	Mercados y prospectiva del uso de TNT	62
5.	Estado del arte	64
5.1.	Filtración	64
5.2.	Equipo de Protección Personal (EPP)	75
5.3.	Aplicaciones biomédicas.....	80
6.	Áreas de oportunidad	87
7.	Conclusiones y recomendaciones	88
8.	Lista de Figuras	90
9.	Referencias	93

1. INTRODUCCIÓN

Las telas no tejidas son una clase de materiales que han cobrado cada vez más importancia por sus propiedades únicas y su versatilidad en una amplia gama de aplicaciones. Los dos procesos de fabricación de no tejidos más comunes son el meltblown y el spunbond, que pueden producir tejidos con propiedades variables como resistencia, durabilidad y permeabilidad.

Gracias a sus propiedades versátiles, pueden aportar soluciones innovadoras y rentables a muchos problemas de ingeniería. Por ejemplo, la alteración de la composición de las materias primas de las fibras o los métodos de tratamiento de acabado pueden proporcionar diferentes características como gran ductilidad, capacidad de absorción, flexibilidad, absorbencia, entre otras. Por ello se utilizan en una gran variedad de industrias, especialmente en el campo de la filtración, productos de higiene y los equipos de protección personal.

La pandemia de COVID-19 ha remarcado la importancia de estos materiales, con un aumento de la demanda de mascarillas médicas para prevenir la propagación del virus. Debido a esto, en los últimos años ha crecido el interés por el uso de telas no tejidas en aplicaciones sostenibles, centrándose en la utilización de fibras naturales y biodegradables, así como en la incorporación de aditivos para mejorar sus propiedades. Esto ha llevado a una mayor necesidad de investigación en el desarrollo y caracterización de estos materiales para garantizar su rendimiento y seguridad en diversas aplicaciones.

En este trabajo se realizó una revisión bibliográfica para ofrecer una visión general acerca de las telas no tejidas, sus propiedades y características, las fibras utilizadas, los procesos de fabricación y sus aplicaciones. Posteriormente, se realizó una revisión del estado actual del conocimiento de las aplicaciones de los no tejidos fabricados por meltblown y spunbond, con especial atención en filtración y los equipos de protección personal, además de su incorporación en campos emergentes como el área biomédica donde se empiezan a emplear como materiales innovadores y prometedores. También se evaluó el papel de los distintos materiales y aditivos utilizados en estas aplicaciones y el papel en las propiedades del producto final.

2. OBJETIVO

El objetivo de este artículo es proporcionar una comprensión exhaustiva de las telas no tejidas y analizar las propuestas e investigaciones que se han desarrollado para mejorar su eficiencia e incorporación en distintas aplicaciones considerando el tipo de materiales utilizados y procesos de fabricación.

3. JUSTIFICACIÓN

Las telas no tejidas se han convertido en parte integrante de nuestra vida cotidiana y se utilizan en diversas aplicaciones que van desde los productos para el cuidado personal hasta las industrias automotrices y de la construcción. Las propiedades únicas de las telas no tejidas, como su resistencia, durabilidad y permeabilidad, las hacen ideales para aplicaciones que requieren protección de barrera, filtración o absorberencia.

Con la creciente demanda de materiales sostenibles, el uso de fibras naturales y biodegradables en telas no tejidas ha ganado una atención significativa como alternativa sostenible a las fibras sintéticas tradicionales. Además, la incorporación de aditivos a las telas no tejidas ha abierto nuevas posibilidades para mejorar sus propiedades y características de rendimiento.

Debido a la importancia de las telas no tejidas y la popularidad que adquirieron después de la pandemia, es necesario ofrecer un panorama general acerca de este tema y realizar una revisión del estado del arte de las principales aplicaciones y nuevos materiales utilizados para su fabricación con la finalidad de predecir el rumbo que tomarán las telas no tejidas, así como las áreas de oportunidad.

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1. Fundamentos y características de los materiales plásticos

4.1.1. Qué son los polímeros

4.1.1.1. Definiciones

Los polímeros se definen como macromoléculas formadas por la unión, usualmente por enlaces covalentes, de un gran número de moléculas pequeñas llamadas monómeros.

El Libro de Oro de la IUPAC define una macromolécula como "Una molécula de alta masa molecular relativa, cuya estructura comprende esencialmente la repetición múltiple de unidades derivadas, real o conceptualmente, de moléculas de baja masa molecular relativa".

Los polímeros tienen un peso molecular muy alto que varía entre 10 000 g/mol y 1 000 000 g/mol. Las moléculas formadas por la unión de monómeros pero que no alcanzan pesos moleculares elevados se denominan oligómeros.

El tamaño del polímero viene determinado por el grado de polimerización (DP). Es el número total de unidades estructurales, incluidos los grupos terminales, y está relacionado tanto con la longitud de la cadena como con el peso molecular.

Los polímeros se obtienen por reacción química de los monómeros ya que los monómeros tienen la capacidad de reaccionar con otra molécula del mismo tipo o de otro en las condiciones adecuadas para formar la cadena polimérica. Este proceso en la naturaleza da lugar a la formación de polímeros naturales como la celulosa, el almidón y el ADN, mientras que los fabricados artificialmente se conocen como polímeros sintéticos (Naka, 2015).

4.1.1.2. Polimerización

El proceso mediante el cual se crean polímeros se denomina polimerización. Durante la polimerización, los monómeros se combinan químicamente para formar las macromoléculas. Un proceso de polimerización requiere que los componentes básicos o monómeros tengan la capacidad de combinarse o unirse con otros componentes para crear un polímero (Shrivastava, 2018).

4.1.1.2.1. Tipos de polimerización

Existen dos tipos principales de polimerización. Estos métodos se denominaban originalmente polimerización por adición y por condensación. Según el autor, la polimerización por adición

se denomina ahora también como polimerización en cadena, de crecimiento en cadena o de reacción en cadena. La polimerización por condensación se denomina también polimerización por crecimiento en etapas o por etapas (Chan et al., 2022).

A. Polimerización por adición

Los monómeros normalmente empleados en este tipo de polimerización contienen un doble enlace carbono-carbono.

La polimerización por reacción en cadena puede clasificarse como: polimerización por radicales libres, catiónica, aniónica o de coordinación, dependiendo de la naturaleza del centro reactivo.

El mecanismo de polimerización consta de tres pasos distintos: iniciación, propagación, terminación. Además, puede intervenir un cuarto paso denominado transferencia de cadena. En la etapa de iniciación, una molécula o moléculas iniciadoras se descomponen térmicamente o se someten a una reacción química para generar una "especie activa", esta "especie activa", que puede ser un radical libre, un catión, un anión o un complejo de coordinación, inicia entonces la polimerización añadiéndose al doble enlace carbono-carbono del monómero. La reacción se produce de tal manera que se genera un nuevo radical libre, catión, anión o complejo. El monómero inicial se convierte en la primera unidad de repetición de la cadena polimérica inicial. En la etapa de propagación, la "especie activa" recién generada se añade a otro monómero de la misma manera que en la etapa de iniciación. Este procedimiento se repite una y otra vez hasta que se produce el último paso del proceso, la terminación. En este paso, la cadena en crecimiento termina: por reacción con otra cadena en crecimiento, por reacción con otra especie en la mezcla de polimerización, o por la descomposición espontánea del sitio activo. En determinadas condiciones, las polimerizaciones aniónicas y de coordinación pueden llevarse a cabo sin el paso de terminación para generar los llamados polímeros "vivos" (Harris, 1981). Durante la polimerización por adición, se consumen todos los monómeros y no se forman subproductos.

Ejemplos comunes de polimerización por adición son el polietileno (PE), el cloruro de polivinilo (PVC), los acrílicos, el poliestireno (PS), el politetrafluoroetileno (PTFE) y el polioximetileno (acetal).

B. Polimerización por condensación

En este mecanismo, la reacción entre las unidades de repetición y la cadena en crecimiento da lugar a la liberación de una pequeña molécula como agua.

Los monómeros de la polimerización por condensación son diferentes a los de la polimerización por adición, ya que los monómeros de la polimerización por condensación tienen grupos funcionales y cada monómero tiene al menos dos sitios reactivos (normalmente representativos de dos grupos funcionales diferentes). La reacción de condensación inicia en cuanto se añaden los monómeros reactivos y sólo cesa cuando se ha consumido todo el monómero. A diferencia del proceso de polimerización por adición, que crece rápidamente a partir de la formación de enlaces C–C, la polimerización por condensación generalmente crece paso a paso mediante la formación de enlaces carbono-heteroátomo, como el C–O o el C–N (Shrivastava, A., 2018). Una vez que reaccionan los grupos funcionales de los monómeros, se forma un dímero y ese dímero puede reaccionar con otro grupo funcional en otro monómero o dímero, así este proceso se repite hasta que todos los monómeros se convierten en especies de bajo peso molecular, como dímeros, trímeros, tetrameros, etc (O'dian, 2004). Estas moléculas, que se denominan oligómeros, pueden seguir reaccionando entre sí a través de sus grupos funcionales libres. Las cadenas de polímeros que tienen pesos moleculares moderados pueden construirse de esta manera. Algunos ejemplos comunes son los poliésteres, poliamidas, policarbonatos, siliconas y polisacáridos.

Debido a la naturaleza de su reacción, los polímeros de condensación tienen pesos moleculares más bajos que los de adición. Un polímero de condensación típico puede llegar a tener un peso molecular de entre 20 000 g/mol a 100 000 g/mol, mientras que los polímeros de adición tienen pesos moleculares de 1 000 000 g/mol (Bueche, 1962).

4.1.1.3. Monómeros y polímeros

La siguiente tabla muestra algunos de los polímeros de adición más comunes y los monómeros a partir de los cuales son producidos.

Tabla 4.1 Polímeros de adición más comunes (Odián, 2004).

Polímero	Monómero	Unidad repetitiva
Poli(etileno)	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$
Poli(isobutileno)	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2=\text{C} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$	$-\text{CH}_2-\overset{\text{CH}_3}{\underset{\text{CH}_3}{\text{C}}}-$
Poli(acrilonitril) o Poli(cloruro de vinilo)	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CN}$	$-\text{CH}_2-\overset{\text{CN}}{\text{CH}}-$
Poli(estireno)	$\text{CH}_2=\text{CH}-\phi$	$-\text{CH}_2-\overset{\phi}{\text{CH}}-$
Poli(metil metacrilato)	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2=\text{C} \\ \\ \text{CO}_2\text{CH}_3 \end{array}$	$-\text{CH}_2-\overset{\text{CH}_3}{\underset{\text{CO}_2\text{CH}_3}{\text{C}}}-$
Poli(vinil acetato)	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{OCOCH}_3$	$-\text{CH}_2-\overset{\text{OCOCH}_3}{\text{CH}}-$
Poli(cloruro de vinilideno)	$\begin{array}{c} \text{Cl} \\ \\ \text{CH}_2=\text{C} \\ \\ \text{Cl} \end{array}$	$-\text{CH}_2-\overset{\text{Cl}}{\underset{\text{Cl}}{\text{C}}}-$
Poli(tetrafluoroetileno)	$\begin{array}{c} \text{F} \ \text{F} \\ \ \\ \text{C}=\text{C} \\ \ \\ \text{F} \ \text{F} \end{array}$	$-\overset{\text{F}}{\text{C}}-\overset{\text{F}}{\text{C}}-$
Poli(isopreno (goma natural))	$\begin{array}{c} \text{CH}_2=\text{C}-\text{CH}=\text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$	$-\text{CH}_2-\overset{\text{CH}_2-}{\underset{\text{CH}_3}{\text{C}}}=\text{CH}-$
Polipropileno	$\begin{array}{c} \text{CH}_2=\text{CH} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$	$-\text{CH}_2-\overset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-$

4.1.1.4. Peso molecular

La variable que define las propiedades físicas y químicas de un polímero es su peso molecular. Sin embargo, debido a que las polimerizaciones se realizan bajo circunstancias aleatorias, el peso molecular queda determinado por esta particularidad (Mier et al., 1997); el resultado es la obtención de un producto final formado por macromoléculas de distinta longitud y, en

consecuencia, los pesos moleculares de los productos poliméricos que se obtienen estarán dentro de un rango, en lugar de un peso molecular único y exacto.

Los polímeros que presentan lo anterior, son los polímeros sintéticos que se describen como polidispersos con respecto a los pesos moleculares ya que se compone de cadenas de muchos pesos moleculares diferentes.

Por otra parte, algunos polímeros naturales pueden tener un peso molecular único y exacto como, por ejemplo, algunas de las proteínas. Estos polímeros se describen como monodispersos, en contraste con la habitual dispersión de pesos moleculares de los polímeros sintéticos (Hocking, 2005).

Por lo tanto, el peso molecular del polímero representa el tamaño promedio y la distribución de las cadenas moleculares. Existen cuatro métodos para estimar el peso molecular medio de los polímeros, que incluyen: el peso molecular promedio en número, peso molecular promedio en peso, peso molecular viscosimétrico y peso molecular promedio Z.

A. Peso molecular promedio en número

La medición del peso molecular medio en número (M_n) requiere contar el número total de moléculas en una unidad de masa de polímero, independientemente de su forma o tamaño. Esto significa que todas las moléculas se tratan por igual. Este tipo de sistema de medición es necesario en los casos en los que ciertas propiedades dependen únicamente del número de moléculas o unidades de repetición y no de su peso o tamaño. Son las llamadas propiedades coligativas, como la elevación del punto de ebullición, descenso crioscópico y los cambios de presión osmótica. El peso molecular medio en número M_n se calcula como:

$$\overline{M}_n = \frac{\sum_i N_i M_i}{\sum_i N_i} \quad (4.1)$$

Donde M_i es el peso molecular de la cadena, N_i es el número de cadenas con ese peso molecular e i es el número de moléculas del polímero.

B. Peso molecular promedio en peso

El peso molecular promedio en peso (M_w) incluye la masa de las cadenas individuales, que contribuye al peso molecular general del polímero. Así que entre más grande es el tamaño de la molécula, mayor es su contribución al peso molecular promedio. Una propiedad utilizada para medirlo es la dispersión de luz. El peso molecular promedio en peso M_w se calcula como:

$$\overline{M}_w = \frac{\sum_i N_i M_i^2}{\sum_i N_i M_i} \quad (4.2)$$

C. Peso molecular promedio viscosimétrico

Es el peso molecular calculado a partir de la viscosidad de un polímero en solución, se mide el tiempo de flujo de un polímero en solución a través de un capilar; este método también se conoce como viscometría de solución diluida.

El peso molecular promedio viscosimétrico M_v se calcula como:

$$\overline{M}_v = \left[\frac{\sum_i N_i M_i^{1+\alpha}}{\sum_i N_i M_i} \right]^{1/\alpha} \quad (4.3)$$

Donde α es una constante para un sistema determinado polímero-solvente-temperatura.

D. Peso molecular promedio Z

Es el peso molecular que se obtiene al someter una solución diluida de un polímero a un campo centrífugo a baja velocidad para establecer un equilibrio termodinámico en el que las moléculas se distribuyen según sus tamaños moleculares. El M_z puede determinarse a partir de mediciones combinadas de difusión y sedimentación. Las moléculas más grandes son aún más importantes en este caso. El peso molecular medio Z se calcula como:

$$\overline{M}_z = \frac{\sum_i N_i M_i^3}{\sum_i N_i M_i^2} \quad (4.4)$$

Para un sistema polidisperso, la representación ordenada de los diferentes pesos moleculares promedios está dada por una curva de distribución de pesos moleculares (Figura 4.1):

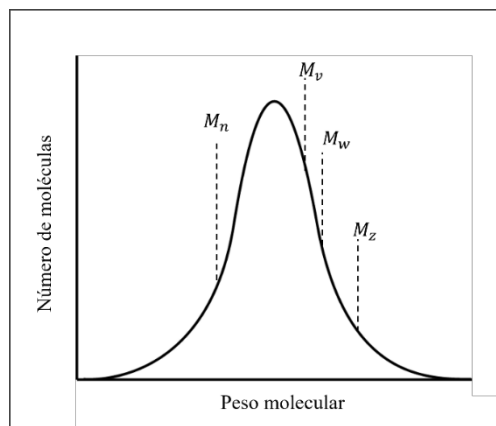


Figura 4.1 Distribución de los diferentes pesos moleculares promedio (Shrivastava, 2018).

La medida de la amplitud de la distribución del peso molecular se obtiene mediante el índice de polidispersidad (PDI). Cuanto mayor sea el PDI, más amplio será el peso molecular. El PDI de un polímero se calcula como:

$$PDI = \frac{M_w}{M_n} \quad (4.5)$$

4.1.2. Estructura

4.1.2.1. Polímeros lineales y ramificados

En los *polímeros lineales*, las unidades repetitivas se unen de extremo a extremo en una única cadena flexible. Estos polímeros tienen amplias atracciones de Vander Waals que mantienen las cadenas unidas. Normalmente, los polímeros lineales están hechos de monómeros con un solo grupo final. Cuando se forman, estos polímeros lineales pueden crear fibras o formar una malla que puede ser muy fuerte y difícil de romper (Carr, 2018). Algunos ejemplos comunes de polímeros lineales son el polietileno, el PVC, el poliestireno y las poliamidas.

En los *polímeros ramificados* hay cadenas laterales o ramas que salen de la cadena principal, resultado de reacciones laterales durante la polimerización, estas están formadas por las mismas unidades de repetición que las cadenas principales del polímero, con mínimo una unidad monomérica completa. Las ramas largas pueden tener estructuras tipo peine, aleatorias o en forma de estrella. Uno de los ejemplos más comunes de polímero ramificado es el polietileno de baja densidad (LDPE).

4.1.2.2. Polímeros entrecruzados

Son polímeros en los que las cadenas poliméricas adyacentes están conectadas en una estructura de red tridimensional. Conforme se produce la reticulación durante la polimerización se producen composiciones en las que, finalmente, todas las cadenas de polímeros están unidas a otras cadenas en múltiples puntos, produciendo, en principio, una molécula gigante unida covalentemente. Esto es la red tridimensional de polímeros (Sperling, 2005).

Estos polímeros se caracterizan por su densidad de reticulación, que es el número de puntos de unión por unidad de volumen (Ebewele, 2000). Una vez que se desarrollan los enlaces cruzados entre las cadenas, el polímero se convierte en termoestable.

Algunos ejemplos comunes son los epóxidos, el caucho y varios adhesivos.

4.1.2.3. Copolímeros

Entre los polímeros sintéticos, los que tienen un solo tipo de unidad de repetición se denominan homopolímeros, y los que contienen más de un tipo de unidad de repetición son *copolímeros*, los copolímeros resultan cuando diferentes monómeros se unen para producir una cadena en la que cada tipo de monómero conserva sus respectivos sustituyentes en la molécula del polímero (Hiemenz y Lodge, 2007).

Los copolímeros pueden tener diferentes arreglos de unidades repetitivas en la estructura del polímero, que les aportan diferentes propiedades, por lo que se pueden clasificar como:

Alternados: Cuando los monómeros están acomodados de forma alternada.

Aleatorios: Cuando los monómeros no siguen un orden específico de acomodo.

En bloque: Cada especie del mismo monómero está agrupado (en bloques).

De injerto: Cuando las cadenas polímero hechas de un tipo de monómero se injertan en cadenas poliméricas hechas de otro tipo de monómero.

4.1.2.4. Polímeros amorfos y semicristalinos

Los polímeros en estado sólido tienen una estructura semicristalina o amorfa. El tipo de estructura afecta tanto a las propiedades físicas como al proceso de extrusión. (Wagner et al., 2014).

En el caso de algunos polímeros, en el proceso de formación de un sólido, las cadenas individuales se pliegan y empaquetan regularmente de forma ordenada. El sólido resultante es un polímero cristalino con una disposición ordenada tridimensional de largo alcance. Sin embargo, como las cadenas de polímeros son muy largas, es imposible que las cadenas se ajusten a una disposición perfecta, así que no hay polímeros 100% cristalinos.

Por lo tanto, se trata de polímeros semicristalinos que son parcialmente cristalinos, y constan de dominios altamente ordenados y regiones de cadenas dispuestas al azar. En otras palabras, constan de una fase cristalina y una fase amorfa. La cristalinidad y los tamaños de las regiones cristalinas varían según el polímero y las condiciones de procesamiento. Algunos polímeros cristalizan muy rápidamente por debajo del punto de fusión, y otros lo hacen muy lentamente. Ejemplos de polímeros cristalinos son el PE, el PP, el PBT, el PET, la mayoría de los nylons, el acetal y los polímeros cristalinos líquidos. cristalino líquido (Michler, 2015).

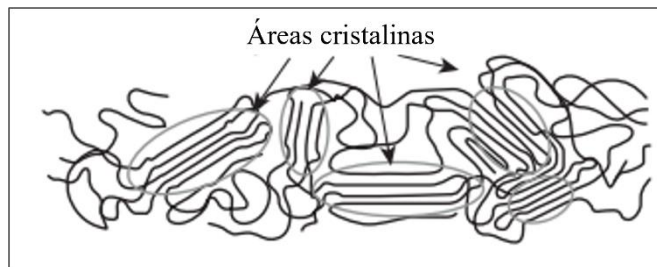


Figura 4.2: Polímero semicristalino (regiones cristalinas y regiones amorfas) (Wagner et al., 2014).

A diferencia de los polímeros cristalinos, los polímeros amorfos poseen cadenas incapaces de ordenarse. Estos polímeros se vitrifican, formando un sólido vítreo amorfo en el que las cadenas moleculares están dispuestas al azar e incluso enredadas. Los polímeros amorfos no dispersan la luz, por lo que son transparentes a la luz visible, así que pueden utilizarse como sustituto de vidrio ligero como el polimetilmetacrilato (PMMA) y el policarbonato (PC). Otros polímeros amorfos incluyen: PVC, PS, ABS, SAN, PEEK.

4.1.3. Propiedades

4.1.3.1. Transiciones térmicas

El conocimiento de las transiciones térmicas es importante para la selección de las condiciones adecuadas de procesamiento y fabricación, la caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de un material y, por tanto, la determinación de los usos finales adecuados.

Las moléculas simples pueden presentarse en tres estados, el sólido, el líquido y el gaseoso. Las transiciones entre estas fases son bruscas y están asociadas a un equilibrio termodinámico.

En el caso de las moléculas de polímeros, la situación es mucho más compleja; a diferencia de las moléculas simples, la transición entre el estado sólido y líquido de un polímero es más bien difusa y se produce en un intervalo de temperaturas cuya magnitud depende de la polidispersidad del polímero y a altas temperaturas, se descomponen en lugar de hervir, es decir no existe el estado gaseoso en los polímeros (Ebewele, 2000).

Se han identificado dos temperaturas importantes a las que ciertas propiedades físicas de los polímeros sufren cambios drásticos:

A. Temperatura de transición vítrea (T_g)

Es la transición de un sólido duro, frágil y vítreo a un estado más blando y gomoso. Se presenta en los polímeros amorfos y en el caso de un polímero parcialmente cristalino, esta transformación sólo se produce en las regiones amorfas. Las zonas cristalinas permanecen inalteradas y actúan como elementos de refuerzo, lo que hace que la muestra sea dura y resistente.

La temperatura de transición vítrea está afectada por algunas variables internas como: la flexibilidad de la cadena; la rigidez, la polaridad o las fuerzas de atracción entre cadenas; la simetría de la cadena; la copolimerización; el peso molecular, la ramificación; el grado de entrecruzamiento y la cristalinidad. Y variables externas como son la plastificación, la presión y la velocidad de ensayo.

B. Temperatura de fusión (T_m)

El punto de fusión cristalina, T_m , corresponde a la temperatura a la que el polímero empieza a fundirse y sólo se presenta en los polímeros cristalinos.

El valor de T_m suele tomarse como la temperatura a la que desaparecen los cristalitos de mayor fusión. Este parámetro depende en cierta medida de la historia térmica de la muestra.

4.1.3.2. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas se utilizan para predecir el comportamiento de los productos plásticos cuando experimentan fuerzas de deformación como la tracción, la compresión, la flexión y la torsión.

Para que un polímero pueda ser utilizado en una aplicación determinada, se realizan diferentes ensayos para medir sus propiedades mecánicas.

Uno de los ensayos más comunes para determinar las propiedades mecánicas de materiales plásticos es el ensayo de tracción. En este ensayo, la muestra, con forma de probeta, se sujeta entre dos mordazas, uno de los extremos se sujeta a un agarre estacionario y el otro extremo se somete a un desplazamiento controlado. Después de colocar las muestras entre las mordazas, éstas se estiran a una velocidad predeterminada y se mide la carga correspondiente al desplazamiento (δ). Este proceso se continúa hasta un desplazamiento determinado o hasta que la muestra se rompe. A partir de este ensayo se mide la tensión (σ) y la deformación (ε) del material.

La tensión (σ) se define como la relación de la fuerza aplicada sobre la sección transversal del material.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4.6)$$

Cuando se aplican fuerzas a una muestra, estas tienden a deformar el material en la dirección de la fuerza. La deformación (ε) de un material se calcula como la relación entre el cambio de longitud y el original.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4.7)$$

Estas mediciones se suelen acompañar de curvas tensión-deformación donde se puede observar el comportamiento que tuvo el material durante el ensayo.

Las propiedades mecánicas importantes de un material, que se pueden determinar a partir de la curva de tensión-deformación, incluyen (Brady et al., 2017):

- A. Límite elástico:** Punto a partir del cual el material experimenta una deformación permanente al retirar la carga.
- B. Módulo de elasticidad:** Es una medida de la rigidez del material, es la pendiente de la parte lineal de la curva (parte elástica).
- C. Elongación a la fractura:** Es el máximo estiramiento desde ambos extremos que puede soportar el material antes de romperse.

- D. Tensión a la fractura:** La máxima tensión que el material puede soportar antes de romperse.
- E. Tensión a la cedencia:** La tensión máxima que puede aplicarse sin superar un valor determinado de deformación permanente.
- F. Tenacidad:** Indica la capacidad de absorber energía y sufrir una amplia deformación plástica sin romperse. Se mide por el área bajo la curva de tensión-deformación.
- G. Resiliencia:** Define la capacidad de absorber energía sin sufrir una deformación permanente. El área bajo la parte elástica de la curva tensión-deformación.

Otras propiedades mecánicas obtenidas a partir de otros ensayos son:

- H. Módulo de flexión:** indica cuánto puede flexionar el material antes de sufrir una deformación permanente.
- I. Resistencia al impacto:** Es la capacidad del material a absorber un golpe o impacto sin romperse.

4.1.3.3. Propiedades eléctricas

Los plásticos son comúnmente considerados como aislantes, pero pueden transmitir algunas energías eléctricas a frecuencias más altas.

La eficacia de los plásticos como aislantes suele medirse con los siguientes parámetros:

- A. Constante dieléctrica:** Es la habilidad del material para almacenar energía eléctrica. Para aplicaciones de aislantes, la constante dieléctrica debe ser baja, mientras que, para aplicaciones de conducción de electricidad, la constante debe ser alta.
- B. Factor de disipación:** es la medida de la cantidad de energía pérdida cuando un material es usado para almacenar energía eléctrica; usualmente la energía disipada está en forma de calor.
- C. Fuerza dieléctrica:** La resistencia eléctrica de un material aislante. Se mide como la tensión máxima necesaria para producir una ruptura dieléctrica a través del material.

Muchos parámetros, como aditivos y cargas, el grosor de la pieza, la frecuencia y las condiciones ambientales, como la humedad, influyen en la resistividad eléctrica de los materiales plásticos. En los últimos años se han realizado muchos esfuerzos para alterar las propiedades aislantes de los plásticos, haciéndolos conductores.

4.1.3.4. Propiedades térmicas

Además de las temperaturas de transición existen otras propiedades térmicas que son importantes para el procesamiento y aplicación de los polímeros.

- A. Capacidad calorífica o calor específico:** La cantidad de calor por unidad de masa que es requerido para elevar la temperatura 1°C, ayuda a determinar las temperaturas de procesamiento y la cantidad de calor necesario para procesar el material.
- B. Coeficiente de expansión térmica lineal (CLTE):** Son los cambios fraccionarios en la longitud o el volumen de un material para una unidad de cambio de temperatura, caracteriza la capacidad de un plástico para expandirse cuando se calienta.
- C. Conductividad térmica:** Es una medida de qué tan bien un material transfiere calor. Los materiales con mayor conductividad térmica tienden a conducir más calor que un material con menor conductividad térmica.

4.1.4. Relaciones estructura/propiedades

La estrecha relación que existe entre las propiedades y la estructura de los polímeros hace posible diseñar materiales poliméricos para aplicaciones con requerimientos de desempeño altamente específicos, pues su comportamiento en determinadas condiciones se puede anticipar, en gran medida, si se conoce su estructura (Coreño-Alonso et al., 2010).

La estructura de los polímeros depende de:

- Tamaño y forma de la cadena polimérica
- La naturaleza química de los monómeros

Y a su vez, la estructura de los polímeros afecta propiedades como:

- Propiedades mecánicas
- Cristalinidad

En los polímeros con tendencia a la cristalinidad, sus cadenas o parte de ellas pueden agruparse de manera ordenada dando origen a regiones cristalinas, mientras que las secciones desordenadas forman regiones amorfas. Las regiones cristalinas otorgan rigidez y resistencia, mientras que las amorfas dan flexibilidad y tenacidad a los polímeros (Sauer, 1977). Por tanto, los defectos en el proceso de cristalización y las moléculas enlazantes aumenten la tenacidad de los polímeros. Por otra parte, la cristalinidad tiene un efecto marcado en ciertas propiedades: disminuye la solubilidad y la permeabilidad a los gases, pero aumenta la dispersión de la luz. Los factores que principalmente contribuyen a la cristalinidad de un polímero son la magnitud de las fuerzas secundarias y una estructura que permita un arreglo regular.

A. Temperatura de transición vítrea (T_g) y temperatura de fusión (T_m)

Los factores que determinan la T_g son aquellos que afecten la facilidad de movimiento de los segmentos de las cadenas, siendo los más importantes la rigidez o flexibilidad de la cadena y la magnitud de las fuerzas intermoleculares.

Como la T_m implica dar energía suficiente para que las cadenas se muevan en su totalidad, los factores que impiden estos movimientos son también la rigidez y las fuerzas intermoleculares, por lo que generalmente un polímero con una T_m alta, también tendrá una T_g alta.

B. Elasticidad

Para polímeros parcialmente cristalinos el módulo es un poco mayor que en los completamente amorfos debido al mejor empaquetamiento de las cadenas en la región cristalina. Al aumentar la temperatura se llega a la región de transición del estado rígido al flexible y el módulo cae notoriamente, en esta región los polímeros semicristalinos son resistentes y tenaces; la caída del módulo dependerá de la fracción de zonas cristalinas, que dan rigidez y resistencia al polímero, mientras que la parte amorfa le permitirá deformación elástica. Posteriormente, se ubica la región ahulada, en la que el módulo permanece casi constante con la temperatura.

C. Propiedades mecánicas

A partir de su comportamiento en ensayos esfuerzo-deformación, los polímeros se pueden clasificar en cuatro categorías principales:

- **Elastómeros:** tienen cadenas muy flexibles, lo cual los hace fácilmente deformables elásticamente y presentar elongaciones reversibles a esfuerzos relativamente bajos. Estas características se deben a que las fuerzas intermoleculares son muy bajas.
- **Plásticos flexibles:** tienen bajo módulo, baja resistencia tensil y una elongación de baja a alta. Las fuerzas intermoleculares son más altas lo que aumenta sus propiedades mecánicas, pero las cadenas conservan aún suficiente flexibilidad.
- **Plásticos rígidos:** tienen alto módulo, moderada resistencia tensil y su elongación es muy pequeña. Son estructuras altamente entrecruzadas, por lo que son rígidas, de baja flexibilidad y frágiles si se usan en estado puro
- **Fibras:** son polímeros con alta resistencia tensil, alto módulo y sufren muy poca deformación. En estos materiales el eje de las cadenas de los polímeros tiende a alinearse a lo largo de la dirección de la fibra, por lo que sus propiedades mecánicas son mejores en esa dirección que en la perpendicular.

4.2. Polímeros para la obtención de TNT

4.2.1. Principales características de los polímeros

4.2.1.1. Viscosidad

La reología es la ciencia de la deformación y el flujo de la materia. Las mediciones reológicas proporcionan información útil sobre el comportamiento y la procesabilidad de los materiales. En el caso de los fluidos los estudios reológicos implican la medición de la viscosidad y a su vez las mediciones de la viscosidad de las soluciones de polímeros pueden proporcionar información sobre el peso molecular de los monómeros, la distribución del peso molecular y otros parámetros de caracterización del material.

La viscosidad se define como la resistencia al flujo y se considera la característica de flujo más importante de los plásticos. La viscosidad es un término relativo en el que una mayor viscosidad significa que los materiales son difíciles de fluir y una menor viscosidad significa que los materiales son más fáciles de fluir (Vlachopoulos et al., 2016). La viscosidad es una medida de la fricción interna de un fluido.

Dependiendo de la aplicación los polímeros necesitan diferentes viscosidad, las viscosidades bajas son beneficiosas para llenar cavidades y paredes finas durante el moldeo por inyección, mientras que las viscosidades más altas, representativas de una mayor resistencia, son útiles para la extrusión y el moldeo por soplado para mantener la forma del extruido hasta su solidificación.

Para medir la viscosidad, el polímero debe estar en forma fluida como en estado fundido o en forma de solución.

4.2.1.2. Índice de fluidez o velocidad de fluidez

El índice de fluidez (MFI) del polímero fundido es una medida ampliamente usada que relaciona el flujo y la viscosidad característicos del polímero (Reyes, 2010).

Se define como la capacidad de un material para fluir en un intervalo de tiempo limitado y es útil para que el material pueda utilizarse en cualquier máquina estándar, que tiene ciertas limitaciones basadas en la fluidez del material utilizado (Boparai et al., 2016). El MFI de cualquier polímero se calcula como el peso (gramos)/10 min a través de la máquina de pruebas de flujo de fusión a temperatura estándar. El MFI es una propiedad bien conocida de los materiales plásticos/polímeros que se obtiene mediante un equipo llamado probador de índice de flujo de fusión (Singh et al., 2018).

4.2.1.3. Normas para su determinación

Los probadores de índice de fusión se utilizan a menudo en la industria como una forma fácil y rápida de control de calidad. Se realiza una medición en un solo punto, utilizando condiciones de ensayo estándar específicas para cada clase de polímero. Las normas ASTM D1238 e ISO 1133 son las que rigen estas pruebas.

El reómetro capilar es un dispositivo instrumentado para medir la viscosidad aparente en una amplia gama de velocidades de cizallamiento, a temperaturas predeterminadas típicas de las condiciones encontradas en el procesamiento del polímero fundido, como el moldeo y la extrusión. Las condiciones de ensayo se rigen por las normas ASTM D3835 e ISO 11443 para diversos materiales.

La viscometría de solución diluida es el método para caracterizar polímeros puros midiendo la viscosidad de su solución diluida y es aplicable a los polímeros que se disuelven completamente sin reacción química ni degradación. La ventaja de la viscometría de solución diluida es que es sencilla, rápida y barata.

La norma ASTM D2857 describe las prácticas estándar para la viscosidad en solución diluida de los polímeros. La norma ASTM D1243 describe los métodos de prueba para la solución diluida de PVC y La norma ASTM D4603 describe el método para determinar la viscosidad inherente del PET mediante un viscosímetro capilar de vidrio (Shrivastava, 2018).

4.2.2. Polietileno

4.2.2.1. HDPE, LDPE, LLDPE

El polietileno (PE) es el plástico más común, es un termoplástico, sin embargo, puede convertirse en un plástico termoestable cuando se modifica. El PE se clasifica por su densidad y ramificación. Sus propiedades mecánicas dependen en gran medida de variables como el grado y el tipo de ramificación, la estructura cristalina y el peso molecular (Basmage et al, 2019).

Los polietilenos se clasifican principalmente en tres tipos:

- A. Polietileno de baja densidad (LDPE):** tiene un buen equilibrio entre flexibilidad y resistencia y puede tener una amplia combinación de propiedades. Tiene una gran claridad, es químicamente inerte y tiene una buena resistencia al impacto y una excelente resistencia al desgarro y a las grietas por tensión (Sastri, 2022). Su densidad oscila entre 0.910 y 0.940 g/cm³, y tiene valores de MFI entre 0.1 y 109.
- B. Polietileno lineal de baja densidad (LLDPE):** Es un copolímero de etileno y α -olefina, con secuencias lineales y una cierta cantidad de ramificaciones de cadena corta

responsables de su alta cristalinidad, lo que dota al LLDPE de propiedades superiores como la resistencia a la tracción, al desgarrar y a la perforación, por lo que se ha utilizado ampliamente en el campo de las películas y también en la modificación de polímeros. Sin embargo, el LLDPE también presenta algunas desventajas como su procesabilidad, ya que es más difícil de procesar que el LDPE debido a su alta viscosidad de fusión causada por sus ramas de cadena cortas y su estrecha distribución de peso molecular, y la transparencia de la película de LLDPE es deficiente debido a su alta cristalinidad (Li et al., 2012). Su densidad oscila entre 0.910 y 0.920 g/cm³.

C. Polietileno de alta densidad (HDPE): Suele ser translúcido y menos flexible que el LDPE. Debido a su mayor cristalinidad, tiene mayor resistencia química, rigidez y fuerza que el LDPE. Los instrumentos quirúrgicos y médicos utilizan en su gran mayoría HDPE. Al igual que el LDPE, el HDPE presenta una buena resistencia química y a las grietas por tensión, resistencia a la radiación y resistencia al impacto. Se utiliza ampliamente en los tubos médicos, donde su bajo coste, baja fricción, resistencia química y fácil moldeabilidad. Su densidad oscila entre 0.941 y 0.967 g/cm³ (Sastri, 2022).

El grado de ramificación de los diferentes tipos de PE puede representarse esquemáticamente como en la Figura 4.3.

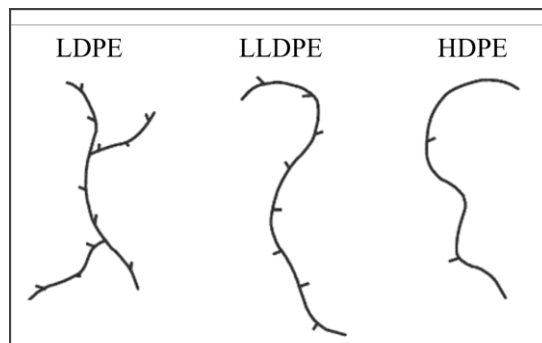


Figura 4.3: Estructuras de los diferentes tipos de polietileno.

4.2.3. Polipropileno

4.2.3.1. iPP, sPP, aPP

El polipropileno es un polímero termoplástico altamente cristalino y se utiliza en una gran variedad de aplicaciones, entre las que se incluyen: piezas de plástico y contenedores

reutilizables, camisas y pantalones térmicos, equipos de laboratorio, altavoces y componentes de automoción. El PP se fabrica a partir del monómero propileno y sólo puede producirse con catalizadores de coordinación.

Pertenece al grupo de las poliolefinas y tiene propiedades similares al PE, pero es ligeramente más duro y resistente al calor (Basmage et al., 2019).

Las subdivisiones comunes del PP son: atáctico, sindiotáctico e isotáctico (Figura 4.4). La producción del PP a partir de varias configuraciones estereoquímicas se debe a que el propileno es un monómero asimétrico (Kupolati et al., 2017).

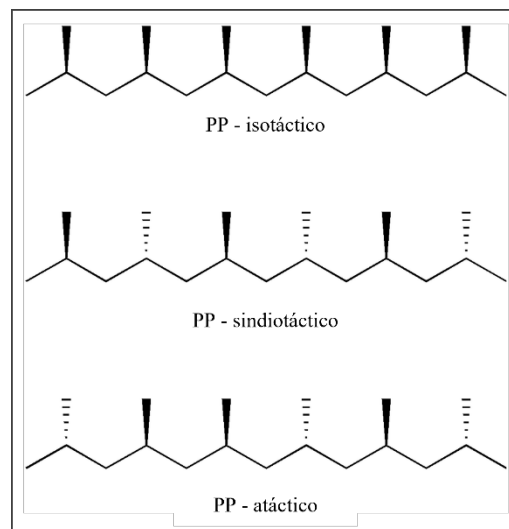


Figura 4.4. Tipos de polipropileno.

- A. PP atáctico (a-PP):** los grupos metilo están dispuestos lateralmente de forma aleatoria en la cadena. Es un material blando y pegajoso con poca resistencia. Tiene una alta permeabilidad al vapor y al gas y poca resistencia a los disolventes. Las aplicaciones comerciales son muy limitadas; sin embargo, puede encontrarse como componente en adhesivos y sistemas de techado.
- B. PP sindiotáctico (s-PP):** los grupos metilo están dispuestos de forma alternada. tiene un punto de fusión más bajo de aproximadamente 138°C y una menor densidad de 0.89 g/cm³. Se ha utilizado como capa central en películas multicapa para proporcionar una alta resistencia al desgarro y claridad. Su lenta tasa de cristalización limita su uso como

película monocapa pero puede incorporarse a otros materiales de polipropileno para mejorar su resistencia (Calhoun, 2016).

- C. PP isotáctico (i-PP):** los grupos metilo están dispuestos en el mismo lado. Las ventajas de los polímeros isotácticos sobre el s-PP y a-PP surgen es su alta cristalinidad, tienen una cristalinidad de entre el 40% y el 70% y un punto de fusión de 165 a 171°C. Con una densidad de entre 0.90 y 0.91 g/cm³. Tiene una inusual resistencia a muchos productos químicos disolventes, bases, ácidos y rayos ultravioleta (UV). Debido a su estructura tiene buenas propiedades mecánicas como la rigidez y la resistencia a la tracción y a los solventes.

El mercado está dominado predominantemente por el i-PP porque puede producirse fácilmente, mientras que el s-PP sólo puede producirse con algunos catalizadores de metaloceno, por lo tanto, tiene un menor uso comercial.

El s-PP es menos rígido que el i-PP, pero tiene mejor resistencia al impacto y claridad. Debido a su estructura irregular, el a-PP tiene una baja cristalinidad, lo que da lugar a un material pegajoso y amorfo utilizado principalmente para adhesivos y alquitranes para tejados.

El aumento de la cantidad de a-PP en una formulación predominantemente isotáctica aumenta la resistencia al impacto a temperatura ambiente y la elasticidad, pero disminuye la rigidez, la turbidez y la calidad del color.

Los polipropilenos generalmente tienen mayor resistencia a la tracción, flexión y compresión, así como módulos más altos que los polietilenos debido a la interacción estérica de los grupos metilo colgantes que resultan en una cadena de polímero más rígida y que en el polietileno (Maier et al., 1998).

Los polipropilenos tienen excelentes propiedades eléctricas y aislantes, inercia química y resistencia a la humedad. Es resistente a una variedad de productos químicos a temperaturas relativamente altas e insoluble en prácticamente todos los disolventes orgánicos a temperatura ambiente. La absorción de disolventes por parte del polipropileno aumenta con el aumento de la temperatura y la disminución de la polaridad. La alta cristalinidad del polipropileno confiere al polímero una alta resistencia a la tracción, rigidez y dureza. Sin

embargo, es intrínsecamente menos estable que el polietileno a la degradación térmica, lumínica y oxidativa.

El polipropileno se utiliza en aplicaciones que van desde productos, fibras y filamentos moldeados por inyección y moldeados por soplado hasta películas y recubrimientos por extrusión. Los usos del moldeo por inyección, que representan aproximadamente la mitad del polipropileno producido, incluyen aplicaciones en los campos de la automoción y los electrodomésticos. Las fibras de polipropileno extruido se utilizan en productos como hilo para alfombras, telas tejidas y de punto y telas para tapicería.

Las telas de polipropileno no tejidas se utilizan en aplicaciones tales como respaldo de alfombras, forros para pañales desechables, telas hospitalarias desechables, toallas reutilizables y cubiertas antipolvo para muebles (Ebewele, 2000).

4.2.4. Poliésteres

4.2.4.1. PET, PBT, PEN, PLA

A. Poli(tereftalato de etileno) (PET): es una de las resinas termoplásticas semicristalinas más abundantes y es el único polímero saturado formador de fibras y películas con importancia comercial. Es un tipo de poliéster termoplástico de ingeniería, posee excelentes propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas. Además, tiene muy buena resistencia química, transparencia, estabilidad dimensional y baja absorción de humedad.

Puede ser de naturaleza semicristalina o amorfa. El PET con alta cristalinidad posee una mayor temperatura de transición vítrea en comparación con el PET amorfo, junto con propiedades mecánicas como un mayor módulo, tenacidad, rigidez, resistencia a la tracción, dureza y mayor resistencia a los disolventes. La resistencia al impacto del material se vuelve inferior con el aumento de la cristalinidad.

B. Tereftalato de polibutileno (PBT): es un poliéster semicristalino, blanco o blanquecino, similar tanto en composición como en propiedades al PET. Tiene una resistencia y rigidez algo inferiores a las del PET, es un poco más blando, pero tiene una mayor

resistencia al impacto y una resistencia química similar. Como cristaliza más rápidamente que el PET, suele preferirse para el moldeo a escala industrial (McKeen, 2014).

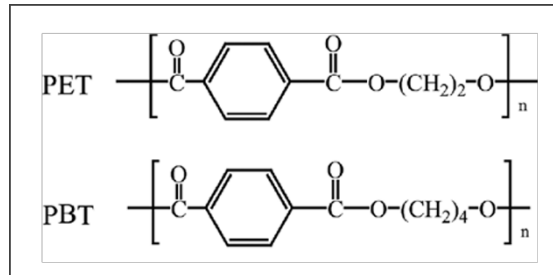


Figura 4.5. Estructuras del PET y PBT (Ting Wu, Hui Lian Hu, Yi Ping Du, 2014)

C. Naftalato de polietileno (PEN): es un poliéster transparente semiaromático sintetizado a partir del ácido naftaleno-2,6 dicarboxílico y etilenglicol. En comparación con el PET, tiene menor permeabilidad al oxígeno, mayor estabilidad hidrolítica, mayor resistencia a la tracción, así como menor alargamiento y contracción debido a su transición vítrea mayor.

Ya que las aplicaciones de alta temperatura del PET están limitadas en cierta medida por su baja temperatura de transición vítrea ($T_g = 80\text{ }^\circ\text{C}$), esta limitación permitió la introducción comercial del PEN como poliéster más resistente térmicamente, especialmente en forma de película orientada biaxialmente. Aunque la T_g del PEN ($118\text{ }^\circ\text{C}$) es significativamente mayor que la del PET, su punto de fusión cristalina ($268\text{ }^\circ\text{C}$) es sólo unos grados superiores, por lo que el PEN sigue siendo fácilmente procesable en fundido (Meehan et al., 2014).

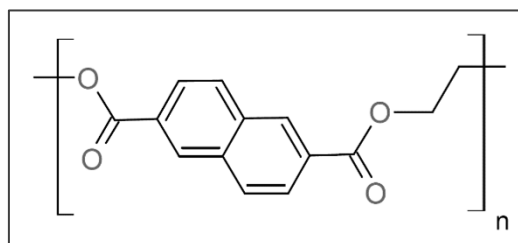


Figura 4.6. Estructura química del PEN (Plastics Technology).

D. Ácido poliláctico (PLA): es un poliéster alifático, generalmente obtenido por síntesis de ácido láctico, que puede producirse a partir de recursos renovables como maíz, almidón, azúcar u otra biomasa. Se trata de un poliéster termoplástico biodegradable con un gran potencial debido a sus propiedades físicas únicas, que lo hacen útil en diversas aplicaciones, como las quirúrgicas y médicas, el recubrimiento de papel, las fibras, las películas y los envases (Ibarra et al., 2016).

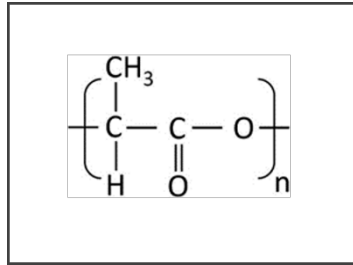


Figura 4.7. Estructura química del PLA (Salvador Galindo, Fernando Ureña-Nuñez, 2018).

4.2.5. Otros (Materiales Reciclados)

4.2.5.1. PP, PE, PET

En la actualidad, el consumo mundial de material plástico es de casi 45 kg per cápita. Para evitar la acumulación de residuos plásticos, se han inventado técnicas para reutilizar estos materiales (Kulkarni, G., 2018)

En general, los termoplásticos pueden volver a utilizarse hasta tres ciclos de transformación, en función de las propiedades deseadas y de la aplicación ya que se funden al calentarse y se endurecen al enfriarse lo que facilita su recalentamiento, reciclado y transformación en productos diferentes (Tuladhar et al., 2019).

Los termoplásticos, como el PET, el PE y el PP, tienen un alto potencial de reciclado mecánico, dichos polímeros son habituales y son clave en la producción de telas no tejidas y la posibilidad de reutilizar y reciclar estas telas no tejidas permiten minimizar el impacto del ciclo de vida de muchos polímeros.

Esto es especialmente cierto en el caso de las telas no tejidas desechables, y actualmente se están probando procesos específicos para permitir que los materiales compuestos que se

encuentran en los productos de incontinencia e higiene vuelvan a introducirse en los flujos de producción (Goswami et al., 2016).

En la actualidad, sólo el PET, el HDPE y el PP se separan adecuadamente en los flujos de reciclaje municipales en volúmenes significativos. Sin embargo, se prevé que las innovaciones en la detección y separación continuas de plásticos acabarán por permitir que materiales como el PLA puedan reorientarse y reprocesarse fácilmente en un futuro próximo.

4.3. Definición y características principales de TNT

4.3.1. Definición de TNT (ASTM D 1117-80)

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM D 1117-80) define una tela no tejida como una estructura textil producida por la unión y/o entrelazamiento de fibras realizado por medios mecánicos, químicos, térmicos o solventes y combinaciones de los mismos. El término no incluye el papel ni las telas tejidas o de punto (Smith, 2000).

Una estructura de tela no tejida se diferencia de otras estructuras textiles en los siguientes aspectos (Mao & Russell, 2015):

- Se compone principalmente de fibras individuales o capas de mallas fibrosas en lugar de hilos.
- Es anisótropo tanto en su estructura como en sus propiedades debido a la alineación de las fibras y a la disposición de los puntos de unión en su estructura.
- No suele ser completamente uniforme en cuanto al peso del tejido, su grosor o ambos.
- Es muy poroso y permeable.

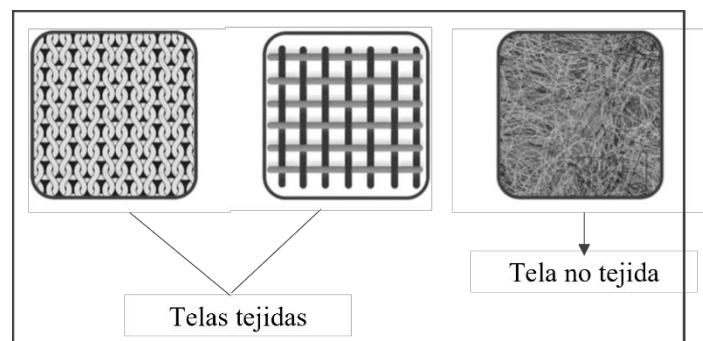


Figura 4.8. Diferencias estructurales entre telas tejidas y tela no tejida (Sadeghi et al., 2021).

4.3.2. Tipos de TNT

4.3.2.1. A partir de fibras naturales

Las fibras naturales para telas no tejidas incluyen el algodón, el yute, el kenaf y el lino, así como pequeñas cantidades de cáñamo, coco, sisal, algodoncillo, madera y algunas fibras animales. Entre las fibras naturales, el algodón es la más utilizada y se calcula que representa el 8% del mercado mundial de productos de TNT.

Las ventajas del algodón incluyen la biodegradabilidad, una mayor resistencia a la humedad y una superficie de secado rápido. Además, también se ha combinado con fibras bicomponentes como el lyocell y el acetato de celulosa.

Las aplicaciones de algodón para TNT incluyen productos desechables como hisopos, toallitas, filtros, guata, productos de cuidado personal como pañales para bebés y productos de higiene femenina, así como productos semiduraderos como ropa de cama, relleno de almohadas y mobiliario doméstico.

Otra de las fibras naturales más utilizadas es el yute y entre sus propiedades útiles para aplicaciones no tejidas incluyen una alta resistencia, módulo y estabilidad dimensional, así como una buena absorción de la humedad y transpirabilidad. Una aplicación especialmente importante de la TNT de yute son los interiores de automóviles debido a la combinación de ligereza, durabilidad, baja inflamabilidad y otras propiedades mecánicas como la drapeabilidad, la resistencia a la tracción y el impacto (Mukhopadhyay, 2014).

4.3.2.2. A partir de fibras sintéticas

Las fibras sintéticas más utilizadas para TNT incluyen: polipropileno (PP), poliésteres como tereftalato de polietileno (PET), tereftalato de polibutileno (PBT) y el tereftalato de politrimetileno (PTT), polietileno (PE) y nylon.

Las fibras de PP representan el 60% de todas las fibras utilizadas para la producción de TNT. Las fibras de polipropileno tienen las ventajas de ser ligeras, secas (debido a su naturaleza oleofílica), con buena resistencia, buena resistencia a la abrasión, alto módulo y buena resistencia al deterioro por productos químicos y microorganismos, además de tener un tacto

suave. Sin embargo, su baja temperatura de transición vítrea y su punto de fusión restringen algunas aplicaciones potenciales.

Los poliésteres son las segundas fibras sintéticas más utilizadas dentro de las cuales el PET es la más utilizada. Las fibras son relativamente resistentes y tienen entre un 60% y un 85% de cristalinidad. La alta cristalinidad del poliéster y la presencia del anillo aromático en la estructura de la fibra hacen que las fibras tengan una baja absorción de agua y resistencia a los ácidos y álcalis. Entre las ventajas de las fibras de poliéster se incluyen su alta resistencia, alto módulo, alta tenacidad, buena resistencia a la abrasión, buena resiliencia, muy baja absorción de humedad, alta temperatura de fusión y temperatura de distorsión térmica, resistencia a productos químicos peligrosos, barrera al oxígeno, inercia y biocompatibilidad.

4.3.3. Métodos de obtención de TNT

Las telas no tejidas suelen fabricarse como láminas a partir de fibras o filamentos en dos etapas. En primer lugar, se forma una red de fibras (formación de redes), que luego se trata para unirla y aumentar su resistencia (unión). Desde el punto de vista comercial, son procesos continuos de alta velocidad que producen grandes longitudes de tejido, que pueden tener muchos metros de ancho y se enrollan en rollos.

Las TNT pueden formarse mediante diversas técnicas, a continuación se presentan algunas de las más importantes.

4.3.3.1. Electrospinning

El electrospinning es un proceso de creación de fibras sólidas continuas de material con un diámetro del orden de micrómetros y nanómetros mediante el uso de campos eléctricos.

La configuración más básica consta de tres componentes principales:

Una fuente de alimentación de alto voltaje, una jeringa con una aguja de punta roma y una pantalla colectora metálica. La jeringa contiene la solución de polímero o el polímero fundido (Li et al., 2003). Con el uso de una bomba de jeringa, la solución se puede alimentar a un ritmo constante y controlable. Un electrodo está conectado a la aguja que contiene la solución hilada y el otro a la pantalla colectora, cuando se aplica una alta tensión a la aguja se induce una carga

en la superficie de la gota líquida, como resultado, la gota se ve sometida a la acción de fuerzas electrostáticas y eso hace que la gota de líquido se alargue hasta formar un objeto cónico conocido como cono de Taylor. Una vez que la intensidad del campo eléctrico alcanza un cierto valor crítico, las fuerzas electrostáticas superan la tensión superficial de la solución polimérica y fuerzan la eyección del chorro de líquido desde la punta del cono de Taylor. Antes de llegar a la pantalla del colector, el chorro de líquido se alarga y el disolvente se evapora, lo que da lugar a la formación de una tela no tejida de fibras poliméricas finas orientadas aleatoriamente sobre el colector.

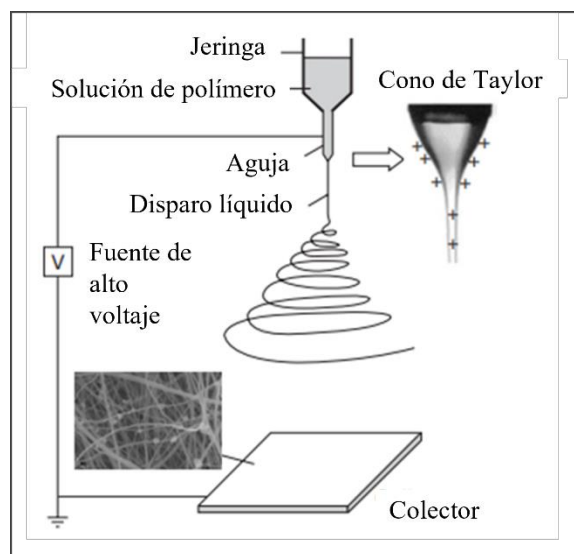


Figura 4.9. Proceso de electrospinning (Garg, K., Sell, S. A., & Bowlin, G. L. 2009).

La mayoría de las nanofibras obtenidas por electrospinning tienen forma no tejida y pueden utilizarse para un pequeño número de aplicaciones, como la filtración, películas de recubrimiento de implantes y el vendaje de heridas. La TNT de fibras electrospun es muy porosa, tiene un gran volumen de huecos interconectados y posee una elevada relación superficie/volumen (Garg, et al., 2009).

4.3.3.2. Melt blown

El proceso comienza con el polímero en forma de pellets o polvo que se vierte en la tolva. Dentro de la extrusora hay un eje de tornillo giratorio que hace pasar el polímero a través de tres zonas de calentamiento que lo funden. El flujo de polímero fundido pasa a través de una

mallas que sirven para filtrar el polímero fundido de impurezas, luego pasa a través del dado, por la espinereta, que es un bloque de metal que contiene miles de orificios (Figura 4.9).

La espinereta se calienta a 215 – 340°C para producir una red uniforme y a medida que el polímero sale de los orificios, es golpeado por una corriente de aire caliente a alta velocidad, a su punto de fusión o incluso por encima de él, que rompe el flujo y estira los numerosos filamentos hasta hacerlos muy finos (Hutten, 2016). En este proceso, el diseño del dado es de particular importancia, pues es ahí donde convergen las corrientes de aire.

Finalmente, las fibras se recogen, con una orientación aleatoria, en una banda transportadora, con una caja de succión debajo.

El material más usado para meltblown es el polipropileno.

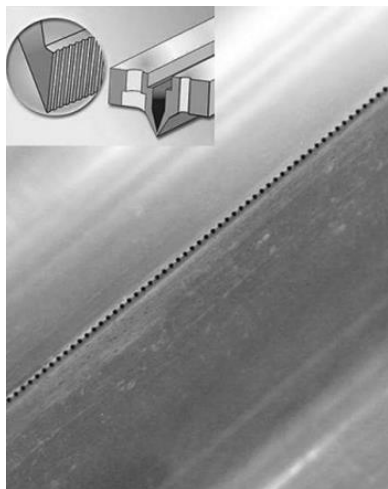


Figura 4.10. Vista inferior de una espinereta de dado tipo Exxon (Geus, 2016).

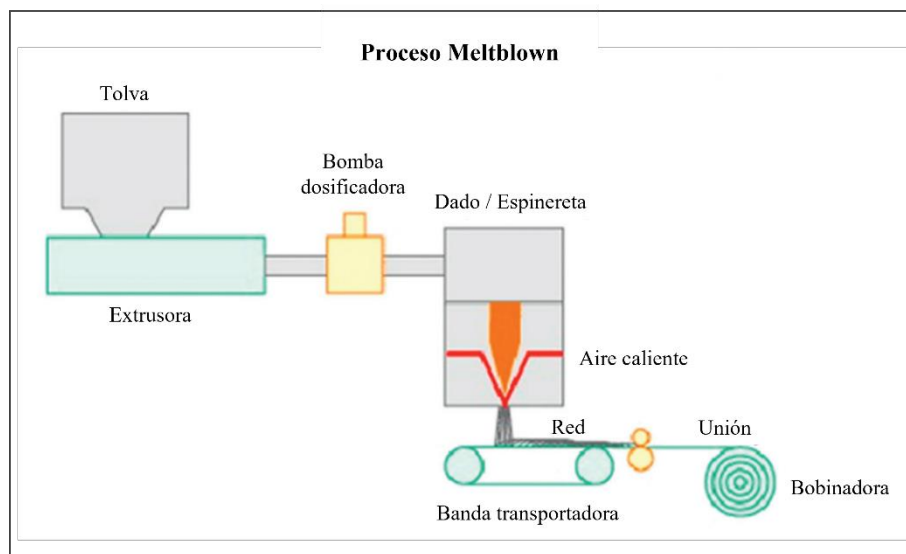


Figura 4.11. Proceso de meltblown (Hutten, 2016).

4.3.3.3. Spun bond

El proceso comienza de la misma manera que en meltblown, los filamentos se extruyen a través la espinereta y después viajan a través de una cámara larga, vertical y cerrada. El flujo de aire es forzado a través de la cámara por un dispositivo de succión de vacío situado debajo de la banda transportadora, en la parte inferior de la cámara. Las fibras se enfrían rápidamente mediante un flujo cruzado de aire frío que también desorienta y aleatoriza los filamentos.

Hay dos zonas de enfriamiento: la primera se encuentra por debajo de la espinereta y la segunda es una zona auxiliar que se encuentra por debajo de la zona primaria y se encarga de soplar aire a temperatura ambiente.

Varios metros por debajo de las zonas de enfriamiento, los filamentos son aspirados a través de un cámara tipo Venturi que acelera el flujo de filamentos y arrastra las fibras (Hutten, 2016). Se introduce aire y esto provoca el enredo de los filamentos. Finalmente, las fibras enredadas se depositan por succión en la banda transportadora para formar una red. Existen tres técnicas básicas de unión empleadas en un proceso de spunbond: térmica, química/adhesiva y mecánica. La elección de la técnica depende principalmente de la aplicación final del tejido y del peso de la banda. En ocasiones, se emplea una combinación de dos o más técnicas de unión (Russell, 2007). Los polímeros generalmente usados en el proceso de spunbond es el poliéster, nylon y polipropileno.

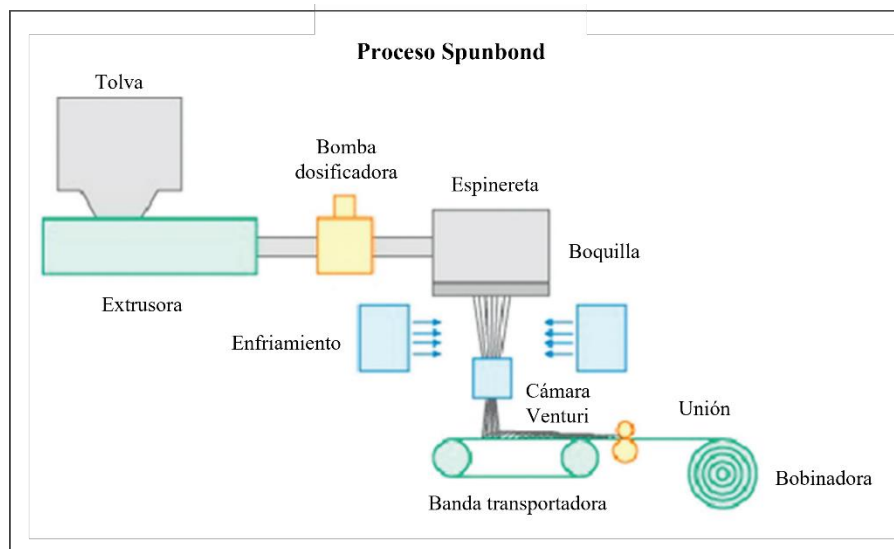


Figura 4.12. Proceso de spunbond (Hutten, 2016).

La diferencia principal entre el proceso de spunbond y el de meltblown está en el dado. En el proceso de meltblown, el aire caliente converge con la fibra a medida que ésta sale del dado, mientras que en el proceso de spunbond el flujo de aire caliente es transversal a la fibra emergente. El flujo convergente del proceso de meltblown sirve para atenuar y arrastrar las fibras, de modo que la red resultante está compuesta de fibras más finas. La TNT formada es más blanda, más voluminosa y débil. Tiene un tamaño de poro más pequeño y proporciona una mayor eficacia de filtración; mientras que las TNT de spunbond contienen fibras más gruesas y tienen una resistencia a la tracción mucho mayor (Hutten, 2016).

En la práctica las tecnologías spunbond y meltblown se utilizan a menudo juntas en un proceso continuo en la producción de tejidos meltblown en la producción de tejidos multicapa por ejemplo Spunbond-Meltblown-Spunbond (SMS). Estos tejidos son importantes en aplicaciones que incluyen ropa de protección, como batas quirúrgicas, y productos de higiene, como pañales para bebés.

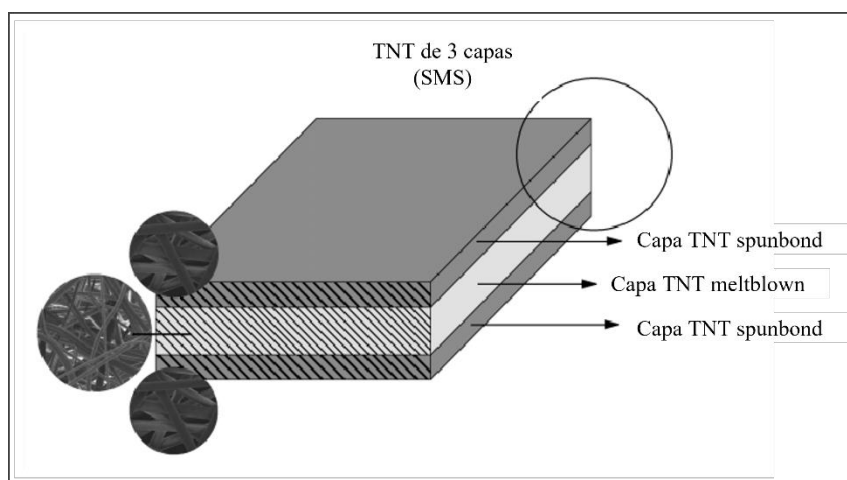


Figura 4.13. TNT multicapa (Çelikel & Babaarslan, 2017).

4.3.3.4. Parámetros de la operación y cuidados

El proceso de fabricación de TNT implica la producción de materiales que se utilizan en una amplia gama de aplicaciones. La calidad y el rendimiento de estos materiales dependen en gran medida de los parámetros utilizados durante su fabricación. Por lo tanto, el control de

estos parámetros es crucial para garantizar que el producto final cumpla las especificaciones y normas de rendimiento requeridas.

Controlar los parámetros del proceso de fabricación, como la temperatura, la presión y la velocidad, ayuda a garantizar que el producto final sea homogéneo en cuanto a peso, grosor y otras propiedades.

Las TNT se puede producir por diversos métodos, entre los cuales los más comunes y utilizados actualmente son spunbond y meltblown, así que esta sección se centrará en los parámetros de operación de estos dos procesos.

4.3.3.4.1. Variables que afectan el proceso

Las variables de procesamiento pueden dividirse en dos categorías: variables del material y variables operativas. Mediante la manipulación de ambas se puede producir una variedad de no tejidos con las propiedades deseadas.

A. Variables del material

Las variables del material incluyen el tipo de polímero, el peso molecular, la distribución del peso molecular, los aditivos del polímero, la degradación del polímero y las formas del polímero, como pellets o gránulos (Bath et al., 2007). Estas variables se pueden encontrar en las fichas técnicas de los materiales.

Por ello la ficha técnica desempeña un papel crucial en los procesos de spunbond y meltblown ya que estos procesos implican la extrusión de fibras de polímero; las fichas técnicas proporcionan información crítica sobre las propiedades físicas y químicas del polímero, que pueden afectar al proceso de extrusión y formación de la tela.

El proceso de spunbond requiere resinas de peso molecular moderadamente alto y amplia distribución de peso molecular para producir bandas uniformes. Los polímeros de polipropileno y polietileno de bajo MFI se han utilizado con éxito para el proceso de spunbond (Bath et al., 2007).

Para el proceso de meltblown se pueden usar una gran variedad de polímeros. Las propiedades básicas de estos polímeros es que son de alto MFI, tienen distribución de peso molecular

estrecha y la capacidad de solidificarse antes de caer sobre la superficie del colector. La resina más utilizada es el polipropileno debido a su facilidad de procesamiento y estabilidad térmica. La ficha técnica de los polímeros también puede proporcionar información sobre otros parámetros que pueden afectar al proceso de spunbond y meltblown, como la estabilidad térmica, la resistencia a la tracción y el alargamiento a la rotura. Por ejemplo, la estabilidad térmica del polímero puede afectar a la temperatura a la que tiene lugar la extrusión, y la resistencia a la tracción y el alargamiento a la rotura pueden afectar a la unión o entrelazado de las fibras durante la producción de los materiales no tejidos.

Actualmente, debido a la necesidad de reducir el impacto ambiental, se han incorporado materiales reciclados al proceso. El porcentaje de materiales reciclados utilizados en la producción de TNT puede tener efectos tanto positivos como negativos en el producto final y en el proceso de producción.

Un mayor porcentaje de materiales reciclados puede reducir las propiedades mecánicas y la calidad general de la tela no tejida. Pero con la formulación adecuada pueden adquirir propiedades únicas, como la patente de la empresa de no tejidos Fitesa (Hartl, 2014) donde se fabricó una TNT con mezcla de PP y PLA reciclados y presentó características de absorción y filtración excelentes.

También el porcentaje de materiales reciclados utilizados puede afectar al propio proceso de producción, especialmente en términos de procesabilidad y consistencia. Los materiales reciclados pueden tener impurezas, contaminantes o variaciones en las propiedades que pueden afectar a los procesos de extrusión y unión.

B. Variables operativas

- **Temperatura:** El efecto de la temperatura se observa en la uniformidad de la banda. Durante el proceso de meltblown, la temperatura se ajusta en función de las propiedades del polímero que se está procesando, como el punto de fusión o las temperaturas de transición vítrea. El calor ablanda y funde la resina hasta alcanzar la viscosidad necesaria para que pueda extruirse con éxito. Si la temperatura en la

extrusora es inferior a la requerida, la TNT formada mostrará algunas manchas de polímero dentro de su estructura, dándole una estructura no uniforme. Si la temperatura es demasiado alta, la TNT será demasiado blanda y esponjosa y el flujo de aire en la zona de atenuación provocará muchas roturas (Butin et al., 1974).

La temperatura también se debe controlar en el dado y debe oscilar entre 215 - 340 °C, dependiendo del tipo de polímero que se procese. El aire caliente que fluye a través del dado debe estar entre 230 - 360 °C, este es responsable de la atenuación del polímero (Moyo et al., 2013).

Durante el proceso de spunbond, la temperatura del aire primario tiene un efecto significativo en el diámetro de las fibras extruidas, ya que el diámetro de la fibra disminuye con el aumento de la temperatura del aire primario (Russell, 2007). Además, la temperatura de unión tiene una gran influencia en las propiedades de tensión del tejido final, pues a altas temperaturas la unión de la estructura aumenta ya que más filamentos de fibra se fusionan y forman una estructura cada vez más rígida.

- **Secado y deshumidificación:** Son etapas importantes en la fabricación de telas no tejidas, sobre todo en los procesos de meltblown y spunbond. Estos procesos implican el uso de polímeros termoplásticos que se funden y se extruyen en fibras finas, que luego se recogen y se unen para formar una tela no tejida. Para conseguir una unión y unas propiedades físicas óptimas, es esencial eliminar la humedad de las fibras antes de unir las.
- **Dosificación:** La cantidad de material introducido en el proceso puede afectar a varias propiedades del tejido no tejido resultante. La dosificación adecuada es crucial para determinar el diámetro y la uniformidad de las fibras resultantes. La cantidad de material introducido en el proceso de extrusión afecta a la velocidad de extrusión y al tamaño de las fibras extruidas. Una dosificación incorrecta puede dar lugar a diámetros de fibra inconsistentes, lo que puede resultar en una tela no tejida no uniforme y de

baja calidad. Además, una dosificación incorrecta también puede provocar defectos en el tejido, como agujeros o zonas débiles.

- **Presión:** La presión del aire es la variable más crítica para controlar el diámetro de la fibra (Kandagor et al., 2017).

Durante el proceso de meltblown, al incrementar la presión del aire, menor es el diámetro de la fibra resultante y mayor la fuerza de unión entre las fibras. Como resultado, se disminuye la porosidad y se aumenta la resistencia a la tensión en dirección máquina con una ligera disminución de los índices de recuperación elástica (Chang et al., 2022).

En líneas de spunbond, se utilizan sistemas de flujo cruzado para suministrar aire acondicionado a los filamentos. Según la presión del aire, la tecnología se divide en tres categorías: alta presión, baja presión y subpresión. Para procesar polipropileno, polietileno, poliéster y poliamidas se utiliza aire de baja presión.

Un aumento de la presión del aire de enfriamiento, que se consigue añadiendo más aire auxiliar, provoca una disminución del diámetro de la fibra (Midha et al., 2017).

- **Velocidad del husillo y de la bomba dosificadora:** El caudal de polímero puede aumentarse incrementando la velocidad del tornillo. La tasa de salida afecta al tamaño de las fibras, cuanto mayor es la tasa de salida, mayor es el tamaño de las fibras. A mayor velocidad de salida, más difícil es conseguir una TNT de buena calidad. El diámetro de las fibras fundidas es mayor al aumentar la velocidad del tornillo (Hoda et al., 2021).
- **Tipo de sistema:** El tipo de sistema utilizado en la producción de telas no tejidas, como sistemas independientes o enlazados, puede afectar a la eficacia, la calidad y el coste de los procesos de meltblown y spunbond. En un sistema independiente, los procesos de meltblown y spunbond están separados y las líneas de producción funcionan de forma independiente. Esto significa que cada proceso tiene su propio conjunto de

máquinas, equipos y controles. Un sistema independiente puede ofrecer flexibilidad en términos de optimización de procesos y selección de materiales, ya que cada proceso puede ajustarse de forma independiente. En un sistema enlazado, los procesos se combinan en una única línea de producción, en la que el proceso de meltblown alimenta directamente el proceso de spunbond. Esto puede dar lugar a una reducción de los costes de equipamiento y de espacio, así como a una mejora en las propiedades de la TNT (Lim, 2010). Sin embargo, también puede limitar la flexibilidad para ajustar los procesos de meltblown y spunbond de forma independiente, y cualquier problema o defecto en un proceso puede afectar a toda la línea de producción.

4.3.3.4.2. Variables que afectan el producto

El proceso de producción de TNT implica varios parámetros, cada uno de los cuales puede tener un impacto en el producto final. Aunque hay muchos factores que pueden afectar positivamente a las propiedades de las TNT y al producto final, también hay varios defectos que pueden afectar negativamente a la calidad del tejido. A continuación, se describen algunos de ellos.

- **Llenado Uniforme:** La uniformidad del llenado en TNT es crucial para producir productos de alta calidad. Una distribución no uniforme de fibras puede resultar en puntos débiles, textura inconsistente y absorción o filtración no uniforme. Esto puede comprometer la integridad del tejido y su aplicación.

Para lograr un relleno uniforme, se deben controlar cuidadosamente los parámetros del proceso, como la dosificación, la presión y la velocidad. También es esencial monitorear el equipo, como la cinta transportadora, para asegurarse de que funcionen correctamente y no causen obstrucciones u otros problemas.

- **Ancho:** El ancho puede afectar al peso y al grosor de la TNT, así como a la uniformidad y consistencia. Con una tela más ancha puede ser más difícil mantener propiedades uniformes en toda la anchura de la tela, sobre todo en los casos en que el equipo de producción no está diseñado para manejar telas anchas. Esto puede dar lugar a

variaciones en las propiedades mecánicas. Una red de TNT con un ancho mayor se arruga a mayor tensión que una con ancho menor (Chiluka, 2015).

- **Color:** Es importante controlar la consistencia del color durante todo el proceso de fabricación del no tejido para garantizar que el producto final cumple las especificaciones requeridas. Los artículos de TNT deben teñirse con tonos que presenten niveles de solidez al lavado, la transpiración, la luz y otros agentes. Sin embargo, en la práctica, estos requisitos técnicos pueden resultar difíciles debido a las propiedades inherentes de las TNT.

Además, como el PP representa más de la mitad del contenido de fibra sintética de la producción mundial de TNT, puede haber mayores problemas en la coloración y retención del pigmento ya que el PP isotáctico no se puede teñir debido a su estructura no polar y su alta cristalinidad. Actualmente, la coloración de telas no tejidas se limita a aplicaciones como revestimientos de suelos, papeles pintados, mobiliario, ropa de cama y mesa, forros de calzado y ropa de protección de uso único o limitado (Burkinshaw et al., 2012).

Durante el proceso de fabricación de telas no tejidas pueden producirse cambios de color debido a diversos factores como las materias primas utilizadas, cambios en las condiciones de procesamiento, variaciones de temperatura o presión. La contaminación del material durante la producción también puede provocar cambios de color, especialmente si la contaminación es de un color diferente al del material que se está produciendo.

- **Arrugas:** Algunas TNT están diseñadas para tener una estructura arrugada y las arrugas son controladas y diseñadas para que el material siga teniendo las propiedades esperadas. Sin embargo, en otros casos las arrugas se presentan como defectos para algunas aplicaciones donde una superficie lisa es importante, como en productos médicos o de higiene. Las arrugas pueden hacer que el producto sea menos cómodo de usar, menos efectivo o incluso inutilizable. Por ejemplo, las arrugas pueden hacer

que los productos no tejidos sean menos absorbentes o resistentes al desgarro. La mayoría de las arrugas se producen por una mala alineación entre los rodillos o rodillos no cilíndricos. Aunque también pueden aparecer por una mala calidad de la red formada, ya sea por el material usado o cambios en las condiciones de procesamiento, como el aumento de la temperatura o el contenido de humedad (PFFC, 2011).

- **Otros variables superficiales:** Las manchas, líneas, agujeros y gotas son defectos que pueden ocurrir en las TNT durante el proceso de hilado (Wolf, 1980). Estos defectos pueden tener un impacto significativo en la calidad y rendimiento del producto final. Las manchas pueden ocurrir debido a la contaminación en las materias primas y pueden afectar la apariencia del producto final, lo que puede ser especialmente importante para productos destinados al consumo. Las líneas pueden ocurrir debido a variaciones en el proceso de extrusión o debido a defectos en el equipo. Los agujeros y las gotas pueden ocurrir debido a una variedad de razones, como una dosificación inadecuada, una presión insuficiente o defectos en el equipo, y esto puede disminuir la resistencia del producto.

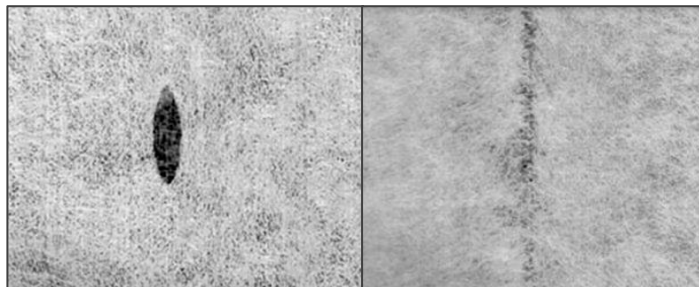


Figura 4.14. Muestras de agujeros (izquierda) y líneas (derecha) en las telas no tejidas.

4.3.3.4.3. Equipos que requieren atención

Los procesos de meltblown y spunbond son dos métodos muy utilizados para producir TNT.

Los principales equipos que requieren atención en estos procesos incluyen:

- **Extrusoras:** Las extrusoras son el principal equipo utilizado en estos procesos. Se utilizan para fundir y extrudir el material polimérico en fibras finas. Para mantener las extrusoras, es importante limpiarlas con regularidad para evitar la acumulación de material polimérico. Además, hay que vigilar y ajustar el control de temperatura y los sensores de presión para garantizar que la extrusora funciona en condiciones óptimas.
- **Espinereta:** La espinereta es un componente de precisión indispensable en la producción de TNT, los orificios de la espinereta se utilizan para distribuir uniformemente el material polimérico fundido y crear filamentos. Después de un período de uso, debe ser limpiada por ultrasonidos y aparatos de secado, además es necesario inspeccionar si hay algún resto de suciedad antes de que sea reutilizada, de lo contrario, la suciedad dará lugar a anomalías en el rendimiento de la espinereta (Zengbo, 2020).
Se han creado diversos métodos de limpieza y mantenimiento para que la mano de obra, y los errores que esto conlleva, se reduzcan, así como la frecuencia de limpieza (Jiangsu Tiandi, 2012). Y también se han llevado a cabo investigaciones y montajes de métodos automatizados para mejorar la precisión de la inspección de los orificios (Zengbo, 2020).
- **Cámaras de enfriamiento:** Se utilizan para enfriar y solidificar las fibras cuando salen de la espinereta. Para mantener estas cámaras en buen estado, es importante controlar la temperatura y el flujo de aire para garantizar que las fibras se enfrían y solidifican correctamente. Las cámaras también deben limpiarse periódicamente para evitar obstrucciones y mantener un rendimiento óptimo.
- **Bandas transportadoras:** Tanto el spunbond como el meltblown son conocidos por crear problemas de contaminación en la banda transportadora, cada proceso tiene sus características específicas y problemas de contaminación de la cinta. La contaminación de la cinta reduce la capacidad de funcionamiento de la línea de producción y, por

tanto, la producción (Matthis, 2021). Además, la superficie de los colectores debe mantenerse limpia para evitar la acumulación de fibras y garantizar la uniformidad del tejido. Por ello, los colectores deben revisarse periódicamente para comprobar su desgaste y sustituirse cuando sea necesario.

- **Equipo de corte:** El corte de los bordes de los productos no tejidos es importante para evitar que se deshagan, para crear un borde limpio y acabado, para personalizar el tamaño y la forma del producto.

Los materiales no tejidos pueden tener distintos grados de grosor, densidad y rigidez, lo que puede afectar al comportamiento del material durante el corte. El equipo utilizado para el corte debe elegirse cuidadosamente para garantizar que es capaz de cortar el material sin dañarlo ni dejar bordes dentados. Además, el equipo de corte debe ser capaz de proporcionar la precisión y exactitud necesarias para garantizar que el producto final cumpla con las especificaciones.

4.3.4. Características de TNT

Las características de la tela no tejida pueden ajustarse en función de los requisitos de uso final teniendo en cuenta la selección del polímero, las variables del proceso y los procesos de unión y acabado. Entre los diferentes tipos de tela no tejida que se encuentran están las lisas, calandradas, afelpadas y la guata.

4.3.4.1. Lisas

Generalmente son TNT hechas a partir del método de meltblown que produce fibras con una textura superficial lisa. También se pueden obtener mediante el calandrado, un proceso de acabado que somete el tejido, en el punto o puntos de contacto de dos o más rodillos, a la influencia de un tiempo, una temperatura y una presión controlados (Chapman, 2004).



Figura 4.15. TNT lisa (Faymask).

4.3.4.2. Calandradas

Es un acabado mecánico que se realiza en conjuntos de rodillos a través de los cuales pasa la tela no tejida. Uno de los rodillos tiene una superficie estampada con un patrón de puntos de unión. Las geometrías de los puntos de unión utilizados en la industria y la investigación son muy diversas, las formas típicas son los puntos rectangulares (cuadrados, rectangulares o en forma de rombo/diamante), redondos y ovalados o elípticos.

Además, existen varias patentes que introducen formas más complejas que podrían ayudar a aumentar la fuerza, la suavidad o la resistencia a la abrasión de los no tejidos (Leucker, 2020).

Debido a su estructura, los no tejidos calandrados son tejidos heterogéneos resistentes compuestos por tres dominios mecánicamente distintos: matriz fibrosa, zonas de unión y regiones de interfaz; por lo que presenta dos factores de anisotropía estructural. Uno está relacionado con la orientación de las fibras y otro con el patrón de unión.

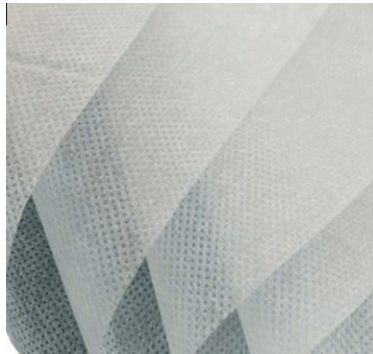


Figura 4.16. TNT calandrada (Made-in-China).

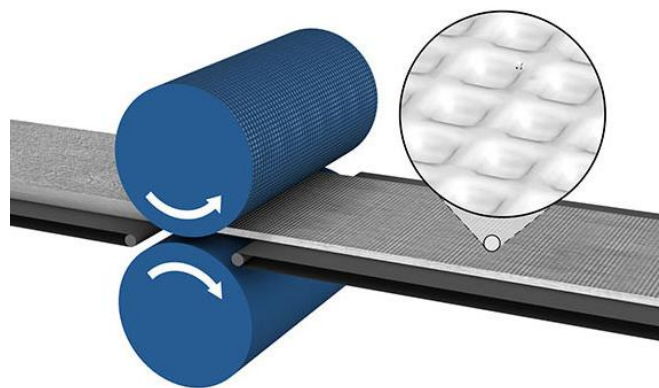


Figura 4.17. Proceso de calandrado (Freudenberg).

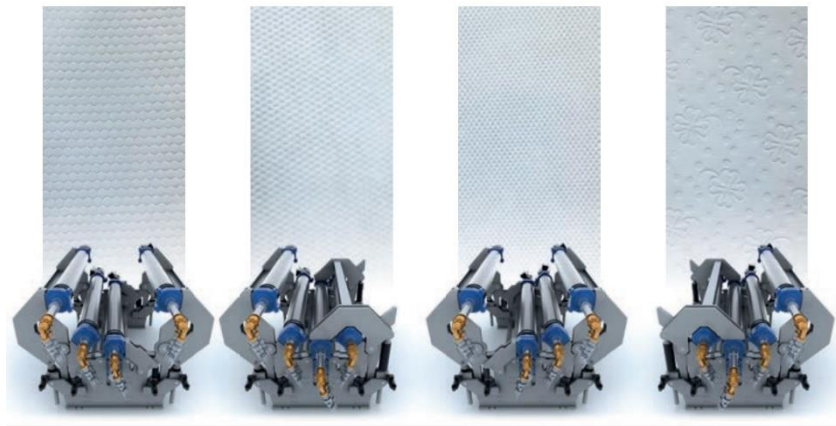


Figura 4.18. Diferentes tipos de TNT calandradas (ANDRITZ).

4.3.4.3. Planas/Afelpadas

Las TNT tridimensionales de gran volumen o afelpadas pueden alcanzar su forma tridimensional, es decir, un grosor significativo, durante la formación inicial de la tela o mediante la superposición de varias telas después de la formación inicial de la tela. El producto final ofrece un alto rendimiento de absorción y aislamiento sin dejar de ser ligero. Los productos se utilizan en diversos sectores, como el transporte, la filtración, el mobiliario doméstico, el aislamiento y la construcción (Gong, 2011).



Figura 4.19. TNT plana y afelpada (Unixel).

4.3.4.4. Guata

Son TNT tridimensionales de baja densidad y que se suelen unir mediante hornos de aire pasante o aerosoles. Para maximizar la resistencia a la compresión, una parte de las fibras de estas guatas deben estar orientadas en la dirección del grosor (Russell, 2007).

Entre sus aplicaciones se encuentran como rellenos de aislantes de colchones y muebles, así como capas de confort para proporcionar soporte, capas base de alfombras y aislamiento acústico y térmico para automóviles.

Actualmente se fabrican principalmente de algodón-poliéster y 100% poliéster, así como de combinaciones de algodón con otras fibras sintéticas como polipropileno y acrílico.



Figura 4.20. Guata (Made-in-China).

4.3.5. Propiedades de TNT

Las propiedades de las TNT que determinan sus aplicaciones dependen de las propiedades de las fibras que lo componen y la estructura de la tela, que incluye el tipo de método y unión utilizado para su producción.

Entre las propiedades más importantes a considerar en una TNT están: propiedades mecánicas, propiedades físicas y químicas y rendimiento específico de la aplicación.

4.3.5.1. Propiedades fisicoquímicas

Las propiedades fisicoquímicas de las telas no tejidas son importantes para su rendimiento y aplicación, y pueden incluir:

- A. Porosidad:** El grado en que un material permite el paso de aire o líquido a través de él. Esta propiedad puede controlarse ajustando la densidad de las fibras y el proceso de unión.

- B. Hidrofobicidad:** La capacidad del material para repeler el agua. Esta propiedad es importante para aplicaciones en las que el material estará expuesto al agua o a la humedad.
- C. Humectabilidad:** Se refiere a la capacidad de una tela no tejida para absorber líquidos en su superficie. Se puede medir a través del ángulo de contacto.
- *Ángulo de contacto:* Se refiere al ángulo que forma la interfaz entre el líquido y la superficie de la tela no tejida. Un ángulo bajo indica que el líquido se extiende sobre la superficie de la tela, lo que indica una buena humectabilidad.
- D. Resistencia química:** La capacidad del material para resistir la degradación o los daños químicos. Esta propiedad es importante para aplicaciones en las que el material estará expuesto a productos químicos o entornos agresivos.
- E. Rugosidad de la superficie:** El grado de irregularidad o rugosidad de la superficie del material puede afectar a su rendimiento en determinadas aplicaciones, como la filtración o la impresión.

4.4. Aplicación de la TNT

4.4.1. Características generales

Las propiedades y características de una tela no tejida dependen en gran medida del tipo de fibra con el que está fabricada. Generalmente se caracterizan por lo siguiente:

- **Ausencia de formación de hilos:** A diferencia de las telas tejidas y de punto, las telas no tejidas no tienen una estructura entrelazada de hilos o hebras.
- **Densidad:** Pueden variar desde muy ligeros a muy pesados y densos, dependiendo del tipo de fibra y del método de unión utilizado.
- **Resistencia:** Pueden ser resistentes y duraderos, pero su resistencia suele ser inferior a la de los tejidos de calada y de punto.
- **Porosidad:** Pueden ser muy permeables al aire y a los líquidos, o pueden hacerse resistentes al agua e impermeables.
- **Suavidad:** Pueden variar de blandos y flexibles a rígidos y rígidos, dependiendo de la fibra y el método de unión utilizado.

- **Absorbencia:** Pueden tener distintos niveles de absorbencia, lo que los hace útiles en aplicaciones como productos de higiene, toallitas y apósitos médicos.

4.4.2. Aplicaciones

Algunos aspectos destacables de las estructuras de los no tejidos, como la resistencia a la tracción, el alargamiento, la rigidez, la permeabilidad, la absorción de líquidos y vapores y la resistencia química (Pourmohammadi, 2013) proporcionan un espectro amplio de productos y numerosos campos de aplicación que cada vez se amplía más conforme la tecnología se vuelve más sofisticada.

Las aplicaciones de los no tejidos pueden clasificarse en desechables y duraderas. Los no tejidos desechables son los de corta duración, de un solo uso, y los no tejidos duraderos son los de larga duración o usos múltiples, como los usados en aplicaciones de entretelas, tejados, geotextiles, automóviles o revestimientos de suelos.

A continuación, se enlistan algunas de las aplicaciones más utilizadas para TNT.

4.4.2.1. Filtración (aire/líquidos)

Debido a su variabilidad y a su fabricación económica, las TNT son de los materiales más usados en filtración. Estos ofrecen propiedades superficiales amplias y ajustables y pueden adaptarse a diferentes requisitos de filtración. Dependiendo de los requisitos del filtro, se pueden combinar diferentes estructuras para formar una estructura sándwich (por ejemplo, tela de soporte y tela no tejida).

Las telas no tejidas se utilizan en filtración de aire y líquidos debido a sus propiedades únicas, incluyendo su alta resistencia a la tracción, su estructura porosa, su gran superficie y su capacidad para retener partículas y microorganismos que le confieren una eficacia de filtración superior (Gregor, 2004).

Algunas aplicaciones comunes incluyen:

- **Filtros de aire:** las telas no tejidas se utilizan como medios filtrantes en filtros de aire para purificar el aire en aplicaciones industriales, hospitalarias y de climatización.

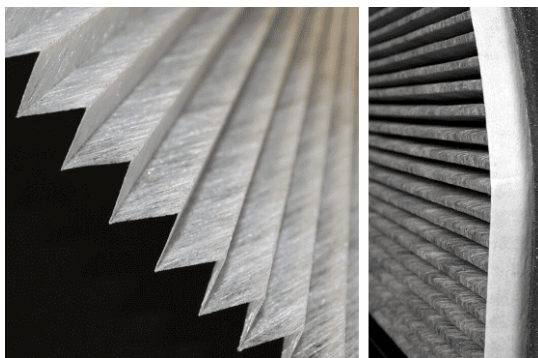


Figura 4.21. Filtro de aire de tela no tejida (Colback Solutions).

- **Filtros de líquidos (filtración húmeda):** Estos filtros se ocupan de la separación de sustancias sólidas, líquidas o gaseosas de un medio líquido. Los materiales por filtrar suelen estar suspendidos en el medio. Los filtros húmedos ofrecen la posibilidad de permeabilidad de los fluidos y, al mismo tiempo, proporcionan impermeabilidad a las partículas que deben filtrarse. Los medios filtrantes no tejidos ofrecen la posibilidad de recoger las partículas en la superficie del filtro (filtración superficial) y en la instalación del medio filtrante (filtración en profundidad). Se caracterizan por ser medios muy finos y compactados. Se utilizan en la purificación de agua, la filtración de alimentos y bebidas, los procesos farmacéuticos y eléctricos, la filtración de sangre, las bolsas de té y café y los filtros de zumo, los filtros de aceite de cocina y los filtros de aceite/combustible para automóviles (Zobel et al., 2010).



Figura 4.22. Filtro de tela no tejida para limpieza de líquido en fabricación de semiconductores, tratamiento de aguas residuales o para el combustible/aceite de motor (KurarayKuraflex Co).

En comparación con otros medios de filtración como las membranas, las telas metálicas y los tejidos monofilamento, las telas no tejidas ofrecen mayores propiedades lo que les permite ser más efectivas en la filtración de partículas y contaminantes. Algunas de las ventajas son:

- Eliminación de una amplia gama de contaminantes (bacterias, virus, metales, minerales, etc.)
- Estructura uniforme
- Resistencia al desgarro y la perforación
- Resistencia química
- Alta capacidad de retención
- Alta permeabilidad al aire
- Excelente resistencia a la abrasión
- Absorción de grasas y aceites
- Alta resistencia a la tracción

4.4.2.2. Equipo de protección personal (Bioseguridad)

El equipo de protección personal (EPP) es la principal aplicación de los no tejidos en ropa especializada y de consumo (Collier, 2010). A continuación, se exponen algunas de las razones por las que los no tejidos se utilizan en estas aplicaciones:

- **Transpirabilidad:** Esta propiedad los hace adecuados para su uso en EPP en los que la comodidad es una preocupación. Esto es importante para el personal sanitario, que puede tener que llevar EPP durante largos periodos de tiempo.
- **Propiedades de barrera:** Los no tejidos pueden bloquear eficazmente la transmisión de partículas, líquidos y microorganismos.
- **Resistencia y durabilidad:** Los no tejidos suelen ser resistentes y duraderos, lo que los hace adecuados para su uso en aplicaciones de alto estrés, como los EPP. También pueden soportar múltiples lavados y procesos de esterilización sin perder sus propiedades.
- **Suavidad y comodidad:** Hace a las TNT ideales para su uso en EPP en los que es probable el contacto con la piel.
- **Rentabilidad:** Las TNT suelen ser menos caros que otros materiales.

Algunas aplicaciones comunes incluyen:

- **Máscaras y cubrebocas:** Para proteger contra la inhalación de partículas y fluidos, como en el caso de la protección contra el COVID-19. Actualmente las fibras de polipropileno dominan el mercado de los cubrebocas (Dolez et al., 2022).
- **Ropa protectora:** Batas, overoles y gorros, para proteger contra la exposición a partículas y fluidos.
- **Calzas:** Se utilizan para proteger los pies contra la exposición a partículas y fluidos.

El uso de TNT en EPP puede ayudar a proporcionar una protección eficaz contra la transmisión de agentes infecciosos, al tiempo que ofrece comodidad y rentabilidad.

4.4.2.3. Aplicaciones biomédicas

En la mayoría de los casos, los textiles biomédicos tienen que cumplir una serie de requisitos bien definidos. Para la mayoría de las aplicaciones biomédicas, la conservación de las propiedades del material, como la elasticidad, la resistencia, la ductilidad, la integridad estructural, etc., es fundamental. Es por eso que las telas no tejidas son muy usadas en aplicaciones biomédicas pues, además de conservar sus propiedades, ofrecen ciertas ventajas frente a otros materiales como (Ajmeri et al., 2016):

- Diseño específico para cada procedimiento
- Comodidad óptima para el usuario
- Resistente pero ligero
- Excelentes propiedades de barrera
- Excelente uniformidad
- Transpirabilidad
- Resistencia a la abrasión
- Plegado aséptico

Por estas propiedades las TNT son ideales para las siguientes aplicaciones:

- **Apósitos para heridas:** Debido a la suavidad, capacidad de absorción y propiedades de barrera de las TNT, se utilizan para cubrir y proteger heridas, absorbiendo el exudado que ésta produce y optimizando el proceso de cicatrización.

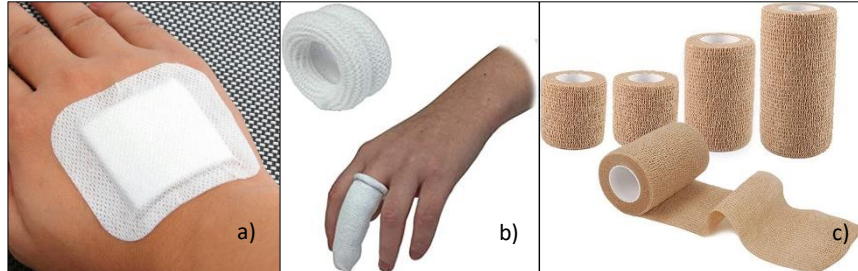


Figura 4.23. Diferentes tipos de apósitos y sus aplicaciones: a) Apósito adhesivo para heridas b) Venda tubular para dedos c) Venda elástica y antideslizante para muñeca (HuFriedy Group).

- **Paños quirúrgicos:** Para proporcionar una barrera entre la zona quirúrgica y el entorno circundante, ayudando a prevenir la propagación de infecciones.
- **Envolturas de esterilización:** Para proporcionar una barrera que ayuda a mantener la esterilidad de los instrumentos quirúrgicos y otros dispositivos médicos.

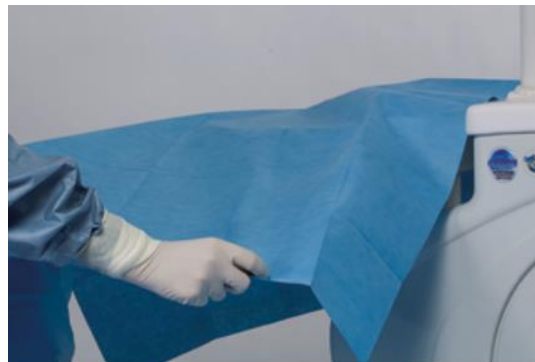


Figura 4.24. Paño quirúrgico de TNT absorbente con PE impermeable (HuFriedyGroup).

- **Administración de fármacos:** Los no tejidos pueden utilizarse para administrar fármacos directamente en el lugar de una lesión o infección, ayudando a mejorar la eficacia del tratamiento.
- **Ingeniería de tejidos:** Se utilizan como estructura de soporte para aplicaciones de ingeniería tisular, como la producción de piel o cartílago artificiales y como andamiajes en

la producción de implantes biomédicos, proporcionando una estructura para que las células crezcan y formen tejido.

Esta última aplicación es de las más importantes y con mayor crecimiento en los últimos años. Recientemente han surgido enfoques de ingeniería tisular que utilizan diversos tipos de andamiajes biodisponibles para la reparación y reconstrucción de tejidos y órganos dañados por enfermedades, accidentes y anomalías congénitas. Los andamios para aplicaciones médicas como sustitutos tisulares. Estos sustitutos son injertos o sustratos porosos que desempeñan un papel importante para proporcionar entornos a las células y que estas se adhieran, se multipliquen y formen un tejido funcional preciso (Luo et al., 2015).

Entre los métodos más comunes de fabricación de andamios utilizados están las estructuras no tejidas (Ghosh, 2014).

Los no tejidos tienen estructuras de fibras similares a las del tejido conjuntivo natural, y son muy utilizados en ingeniería tisular por su estructura, su buena capacidad de absorción de agua y su gran porosidad (Ajmeri et al., 2016).

Para la fabricación de andamios no tejidos, los polímeros biodegradables, como el PLA, PLGA, PCL, son los más utilizados, debido a que, tras su implantación, el organismo los descompone en productos finales que pueden ser secretados por el cuerpo, por lo que ya no es necesaria una segunda intervención quirúrgica (Cools et al., 2015).

Las TNT por spunlaid reabsorbibles se utilizan cada vez más como sustrato para la ingeniería de tejidos 3D, como células endocrinas y como parches para cubrir áreas más grandes de tejido lesionado.

También se han hecho investigaciones de TNT por electrohilado para la fabricación de nuevas generaciones de andamiajes nanoestructurados.

Actualmente se trabajan en diferentes enfoques con base en ingeniería de tejidos, pues utiliza andamios para células y factores de crecimiento que promueven de manera más rápida el crecimiento tisular, uno de ellos es un enfoque nuevo para la reconstrucción del cartílago. Hoy en día, los cirujanos ortopédicos prefieren utilizar esteras fibrosas no tejidas compuestas de grafito y teflón alrededor de los implantes ortopédicos para estimular el crecimiento del tejido.

Estos implantes se utilizan para reemplazar huesos y articulaciones y para estabilizar huesos fracturados. (Ajmeri et al., 2016).



Figura 4.25. Andamios no tejidos en forma de red hechos por electrohilado (Hild et al., 2014).

4.4.2.4. Cuidado de la salud

Las telas no tejidas también se utilizan en productos desechables como pañales y productos de higiene femenina. Estos productos requieren materiales muy absorbentes, cómodos y con pocas fugas. Las TNT son perfectas para esta aplicación porque presentan ciertas ventajas frente a tejidos tradicionales, tales como: excelente absorción, suavidad, elasticidad, comodidad, resistencia, doble efecto de barrera de fluidos que permite absorber y retener la humedad, buena uniformidad, alta resistencia, buena penetración, escasa humedad, rentabilidad, resistencia al desgarro, poder cubriente de manchas y alta transpirabilidad.

En general las TNT tienen dos características principales que las hacen especialmente adecuadas para su uso en un material higiénico absorbente: su gran volumen para absorber y retener una gran cantidad de fluido por unidad de masa de material y el bajo coste de convertir la materia prima en producto final (Ajmeri et al., 2010).

Hoy en día, los productos para cuidado de la salud están compuestos por varios materiales que pueden ser algodón, rayón viscosa, poliéster, polietileno, polipropileno y poliuretano, cada uno de los cuales desempeña funciones diferentes que consisten en recibir fluidos, absorberlos rápidamente, retenerlos durante cierto tiempo, evitar que la ropa se ensucie, mantener seca la piel del usuario, disimular los olores, poder ponerse y quitarse fácilmente y desecharse con comodidad.

A menudo, en la fase de producción, se combinan las TNT por spunbond y TNT por meltblown para obtener una variedad de estructuras compuestas que proporcionan diferentes propiedades. Las estructuras más utilizadas son las SMS (Figura 4.12) patentadas por Kimberly-Clark Corporation, que se caracterizan por sus excelentes propiedades físicas, uniformidad y excelentes cualidades de barrera, al mismo tiempo que proporcionan una permeabilidad al aire y una suavidad controladas.

Como se mencionó anteriormente, una de las mayores aplicaciones de TNT, para higiene personal, son los pañales. Según la EDANA, un pañal de bebé promedio se compone de un 35% de celulosa, un 33% de SAP (polímeros superabsorbentes o hidrogeles que absorben el agua cien veces más que su propio peso), un 17% de PP, un 6% de PE, un 4% de adhesivos, un 4% de otros y un 1% de elásticos (EDANA, 2019).

A continuación se enlistan las diferentes partes que componen un pañal de bebé a partir de la Figura 4.25 como referencia.

- A. Capa superior:** TNT suave que está en contacto con la piel.
- B. Capa de captación:** TNT para transportar los fluidos fuera de la piel.
- C. Capa trasera:** Una película a prueba de agua para asegurar la retención de los fluidos y puede incluir algún diseño.
- D. Núcleo:** SAP para absorber los fluidos
- E. Sujetadores:** Cintas para asegurar el pañal alrededor del bebé.
- F. Elásticos:** Material elástico dispuesto alrededor de la cintura y piernas del bebé para un mejor ajuste y confort.



Figura 4.26. Pañal de bebé y sus diferentes partes (EDANA) .

Las TNT también se han utilizado ampliamente para productos de higiene femenina como compresas higiénicas, tampones y copas menstruales.

Las funciones de las compresas higiénicas son absorber y retener el flujo menstrual y aislar los fluidos menstruales del cuerpo al mismo tiempo que haya ausencia de olores y de ruidos y obviamente comodidad en su uso. Una compresa promedio se compone de un 48% de celulosa, un 36% de PE, PP y PET, un 7% de adhesivos, un 6% de SAP y un 3% de papel antiadherente (Ajmeri et al., 2010).

A continuación se muestran las diferentes capas que componen una compresa higiénica o toalla femenina que se ven representadas en la Figura 4.26:

- A. Capa superior:** Lámina suave que entra en contacto con la piel hecha de fibras de celulosa o sintéticas.
- B. Capa de captación y canales:** TNT que se encarga de dirigir los fluidos a las áreas más absorbentes.
- C. Núcleo interno:** Lámina hecha de celulosa o SAP para absorber humedad.
- D. Capa trasera:** TNT a prueba de agua.
- E. Papel adhesivo:** Pegamento para que se adhiera a la ropa

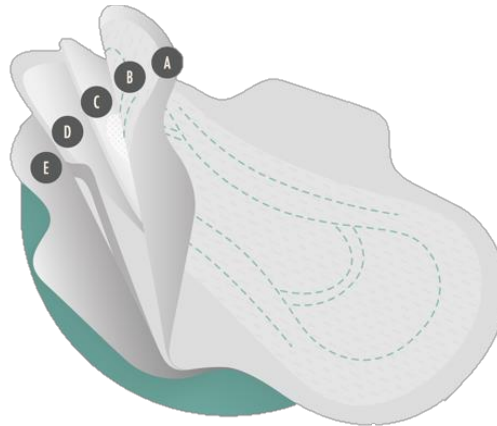


Figura 4.27. Toalla sanitaria y sus diferentes capas (EDANA).

Otros productos importantes de cuidado personal que se fabrican con TNT son los productos para la incontinencia de adultos que deben combinar rendimiento, comodidad, discreción y estética. La composición promedio de los productos para la incontinencia según EDANA es:

62% de celulosa, 12% de SAP, 10% de película de PE, 10% de TNT de PP, 3% de adhesivos, 2% de otros y 1% de elásticos.

4.4.2.5. Sensores

Las TNT se han empezado a utilizar en aplicaciones de sensores debido a sus propiedades, como la porosidad, la elevada superficie, la flexibilidad y el bajo coste.

Una de las principales aplicaciones de las TNT en sensores es el campo de la salud y el deporte para detección de movimientos y medición continua de las condiciones fisiológicas. Aunque actualmente existen pulseras y relojes inteligentes, es necesario la fabricación de sensores que se puedan llevar puestos en el cuerpo para monitorizar mejor los movimientos más complejos de forma precisa y cómoda (Du et al., 2016). Se han hecho sensores portátiles hechos de TNT basados en grafeno, que podrían integrarse directamente en la ropa o los textiles, mediante un proceso sencillo y rentable que podría detectar con eficacia movimientos mecánicos como el estiramiento, la flexión y la presión.

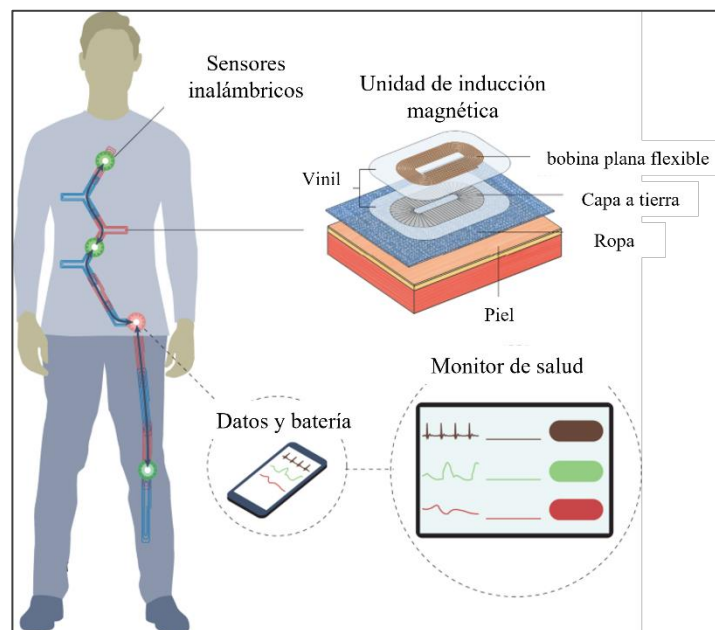


Figura 4.28. Ejemplo de sensores portátiles para medición de condiciones fisiológicas (Lin, 2021).

Otra aplicación son los sensores de presión y temperatura pues las TNT permiten una transmisión eficaz de las señales de presión (Yu et al., 2022) y funcionan como sustratos para sensores de temperatura debido a su alta estabilidad térmica y baja conductividad térmica. Para aplicaciones de presión, la TNT se recubre con un material sensible a la presión, como polímeros piezoeléctricos o polímeros conductores, que permiten medir los cambios de presión y para aplicaciones de temperatura, la TNT, que puede ser PP, PS o PET, se recubre con un material sensible a la temperatura, como un termistor o un termopar, que permite medir los cambios de temperatura (Zong-Yao et al., 2021).

4.4.2.6. Manejo térmico

El control térmico es la capacidad de regular la temperatura, y las TNT se utilizan en varias industrias con este fin por sus excelentes propiedades de aislamiento térmico.

Los materiales aislantes no tejidos se utilizan habitualmente en el sector de la construcción para reducir el consumo de energía en los edificios. Se utilizan en el aislamiento de paredes y tejados, así como en suelos, para ayudar a mantener una temperatura interior agradable y reducir los costes de calefacción y refrigeración (Albrecht et al., 2016).

Otra aplicación para manejo térmico es la ropa. Inicialmente, la función esencial de los textiles es mantener la temperatura corporal y reducir la pérdida de energía del cuerpo para sobrevivir en el entorno natural (Gao et al., 2022). Los textiles tradicionales se concentran más en reducir la transferencia de calor corporal al aire circundante por convección y conducción, sin embargo, irradian una enorme cantidad de energía térmica al ambiente debido a la alta emisividad de los materiales utilizados, esto debilita la función térmica, provocando grandes pérdidas de energía térmica por disipación en forma de radiación infrarroja.

Por ello se ha trabajado con TNT transpirable y flexible para mejorar el confort térmico y reducir el consumo de energía adicional, regulando la radiación del cuerpo humano o compensando las pérdidas de calor.

4.4.2.7. Sector automotriz

Las TNT se utilizan cada vez más en la industria automotriz principalmente por su bajo costo de producción y alta productividad. Actualmente cubren más de 30 aplicaciones automotrices y representan el 11% del total de textiles en un carro (World Textile Publications Ltd, 1999). Una de las principales razones por las que las telas no tejidas son tan versátiles en estas aplicaciones y pueden competir con otros materiales, es que pueden producirse en diferentes formatos, ya sea como fieltros voluminosos y suaves o paneles rígidos y finos (Chen, 2010).

En general las aplicaciones en este sector se dividen en 3 categorías:

- Compartimento de pasajero: Incluye los asientos, las alfombras, el aislante interior del tablero, el revestimiento del techo y de las puertas.
- Compartimento de la cajuela: Incluye la cubierta del interior.
- Compartimento del motor: Incluye el aislante y el amortiguador del capó.

En la tabla 4.2 se resumen brevemente algunos de las aplicaciones más importantes.

Tabla 4.2. Aplicaciones de las TNT en los componentes automotrices.

Aplicación	Descripción
Alfombras	Tienen dos funciones: como revestimiento del suelo por razones estéticas y como aislamiento acústico del suelo. El tejido decorativo está hecho de una TNT por punzonado con aguja (needle punching), mientras que la capa aislante del puede ser una capa de espuma o una capa de fieltro no tejido.
Asientos	Visiblemente las TNT se utilizan para la funda, la parte trasera y el rodapié. También se incluyen en las partes no visibles como almohadillas de espuma como refuerzo, hechas principalmente de TNT de PP cardado por needle punching o spunbond.
Cajuela	Se utilizan para los revestimientos, incluyendo la cubierta lateral y la cubierta del piso de carga, esta última está conformada por una capa de fieltro plano, que ayuda a reducir el peso y el coste, y una capa acolchonada de TNT voluminoso usualmente fabricado de fibras recicladas.

Motor	Se utilizan como absorbentes acústicos para reducir el ruido y las vibraciones en los vehículos. La mayoría de las TNT utilizadas son needle-punched. Aparte de los requisitos de rendimiento acústico, los materiales no tejidos también deben tener una excelente resistencia al fuego, repelencia a los líquidos y resistencia a las manchas además de alta densidad y porosidad.
Filtros	Se utilizan en filtros de aire y aceite para atrapar el polvo, la suciedad y otras partículas. Ofrecen una alta eficacia de filtración, baja caída de presión y buena durabilidad. Las telas no tejidas de poliéster, polipropileno o fibras de vidrio se utilizan habitualmente en aplicaciones de filtración de automóviles.

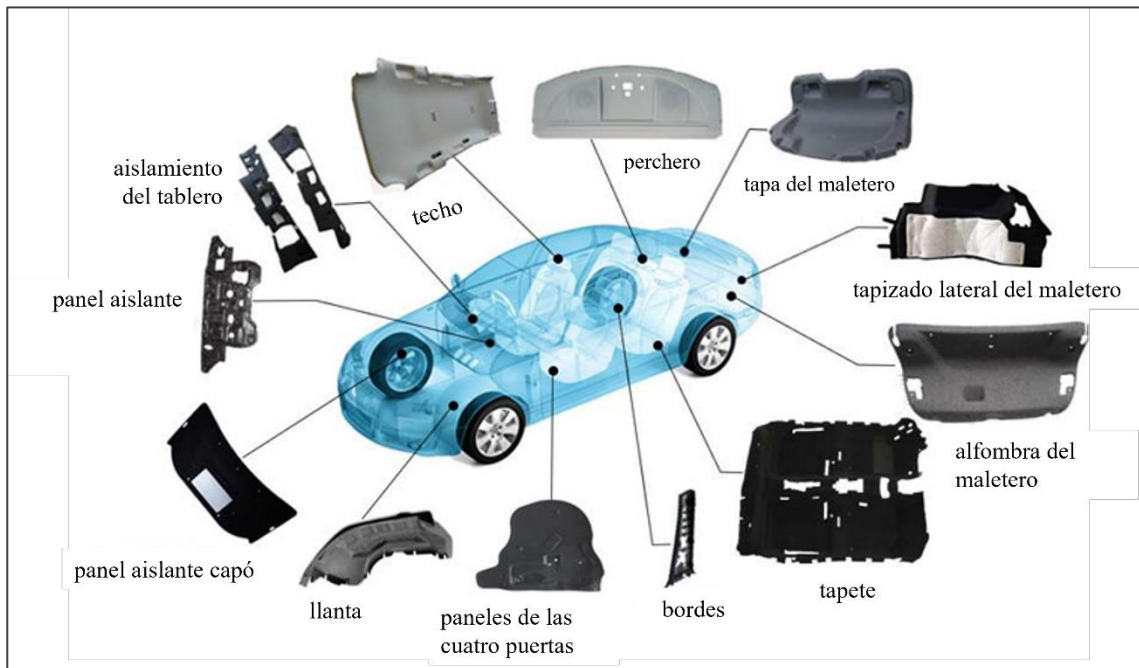


Figura 4.29. Componentes de TNT en un automóvil (EGYPTEX Co).

4.4.2.8. Agricultura

Las TNT para uso en agricultura suele servir como medio de almacenamiento y transporte de cargas funcionales como agua, fertilizantes o semillas de plantas (Fuchs, 2003).

Uno de los principales usos de los no tejidos es la protección de los cultivos, ya que se utilizan como barrera protectora entre el cultivo y el medio ambiente, protegiéndolo de plagas, insectos y condiciones climáticas extremas.

También pueden utilizarse como materiales de acolchado para suprimir el crecimiento de malas hierbas, mantener la humedad del suelo y regular su temperatura. Estos tejidos son permeables al agua y al aire, lo que permite un intercambio adecuado de gases y nutrientes y reduce la erosión del suelo.

Además, las TNT se utilizan habitualmente como esteras para semillas y bolsas de cultivo debido a su porosidad y alta retención de agua, lo que los hace ideales para germinar semillas y propagar plantas.

Las TNT también están presentes en la etapa final de la producción agrícola, ya que se utilizan como materiales de envasado para frutas y verduras para proporcionar protección durante el transporte y el almacenamiento, al tiempo que permiten una circulación de aire adecuada.



Figura 4.30. TNT para protección de cultivos (EDANA).

Actualmente compiten con las películas de polipropileno y polietileno y a medida que la industria agrícola siga evolucionando, es probable que los no tejidos sigan desempeñando un papel importante en el crecimiento y la sostenibilidad del sector e incluso lleguen a desplazar a las tradicionales películas de plástico.

4.4.2.9. Retardo a la flama

Actualmente, las principales aplicaciones de las TNT con retardo a la flama son las prendas de protección contra el fuego y los materiales de barrera para asientos, colchones y tapicerías.

Para las prendas de protección, las TNT tienen que cumplir con varias propiedades, entre ellas, protección contra el calor, propiedades de transferencia de calor-humedad, ligereza y confort. Los no tejidos compuestos de fibras de alto rendimiento suelen utilizarse como forros térmicos en este tipo de prendas, pues, los tejidos de protección son prendas multicapa que contienen hasta cinco o seis capas (Duquesne et al., 2010). Por ejemplo, el uniforme para bomberos consta de al menos cuatro capas: exterior e interior, barrera contra la humedad y forro térmico (TNT).

Uno de los usos más comunes de las TNT en el retardo a la flama es como material de barrera en los materiales acolchados. Estos no tejidos se utilizan a menudo para evitar la propagación del fuego actuando como barrera física entre el foco del incendio y el entorno circundante (Damant, 1996).

Se colocan bajo el tejido de la cubierta exterior del mobiliario y la primera capa de materiales de acolchado en asientos, colchones y tapicerías pues son los que tienen el mayor riesgo a incendiarse. Entre los materiales ignífugos no tejidos se incluyen los fabricados con fibras de alta resistencia como el vidrio, Nomex, Kevlar y PBI.

4.4.2.10. Otros

Se ha visto que las telas no tejidas se utilizan ampliamente en diversas aplicaciones, y una de ellas son los geotextiles. Los geotextiles son tejidos permeables que se utilizan en aplicaciones de ingeniería civil para mejorar la estabilidad del suelo, reforzar taludes y muros de contención y filtrar y separar capas de suelo.

Los geotextiles hechos de no tejidos tienen diversos usos en la industria de la construcción, como la construcción de carreteras, la construcción de presas y diques y la estabilización de cimientos de edificios. En la construcción de carreteras, se utilizan a menudo para evitar la erosión del suelo y proporcionar capas de separación y filtración entre el subsuelo y las capas

de pavimento. También pueden utilizarse en la construcción de muros de contención para evitar la erosión del suelo y proporcionar estabilidad adicional.

Cuando se utilizan en contacto con el suelo, las siguientes características de los no tejidos son particularmente importantes para su uso a largo plazo: su estructura plana, delgada, estable y uniforme, su capacidad de deformación, su capacidad para retener material granular siendo al mismo tiempo permeables al agua, su baja masa por unidad de superficie, y su alta resistencia y alargamiento (Lieberenz, 2003).

Los geotextiles no tejidos se fabrican principalmente con polipropileno o poliéster en forma de fibras o filamentos no tejidos. En Europa Occidental y Norteamérica, el 80% de los tejidos son de polipropileno.



Figura 4.31. Geotextiles no tejidos pesados que se utilizan a menudo como cojín de geomembrana (ACF Environmental, 2020).

Otra aplicación que va en crecimiento para los no tejidos es en la industria de la confección. A menudo se utilizan como materiales de forro en chaquetas y otras prendas exteriores. Las TNT forman el armazón interno de las prendas y ayudan a absorber y soportar las tensiones estáticas y dinámicas a las que se somete la prenda durante su uso. La forma dada a la prenda por razones anatómicas o de moda debe ser mantenida permanentemente por la entretela sin modificar las propiedades textiles (Assent, 2003).

En la industria de la moda, además, las TNT se utilizan a menudo como elemento de diseño ya que pueden producirse en una amplia gama de colores y texturas, lo que permite a los diseñadores crear prendas únicas e innovadoras. Los no tejidos también se pueden estampar o bordar, añadiendo elementos de diseño adicionales a la ropa.

Además, se emplean en muchos componentes del calzado moderno, sobre todo en el calzado deportivo y de entrenamiento actual.



Figura 4.32. Chaqueta hecha de TNT por personal de la Universidad de Leeds (Fashion with nonwovens, 2011)

4.4.3. Mercados y prospectiva del uso de TNT

Las telas no tejidas tienen una amplia gama de aplicaciones y se utilizan en muchos sectores. Se prevé que el mercado mundial de telas no tejidas siga creciendo en los próximos años, impulsado por factores como la creciente demanda de los sectores sanitario e higiénico, y el aumento de la población y la urbanización.

El sector sanitario es uno de los mayores consumidores de telas no tejidas, sobre todo para productos médicos y de higiene, como batas quirúrgicas, mascarillas y pañales. Como la población mundial sigue creciendo, también se espera que aumente la demanda de estos productos. Según Edana, en el 2019 los TNT para higiene abarcaron el 28.7 % del total.

Algunos de otros segmentos importantes de mercado de no tejidos en ese mismo año se pueden ver en la Figura 4.32.

En el periodo histórico del 2008 al 2018, la producción de TNT aumentó un 5.7%, liderada por el crecimiento en spunbond, tendido en seco (drylaid) e hidroentrelazamiento.

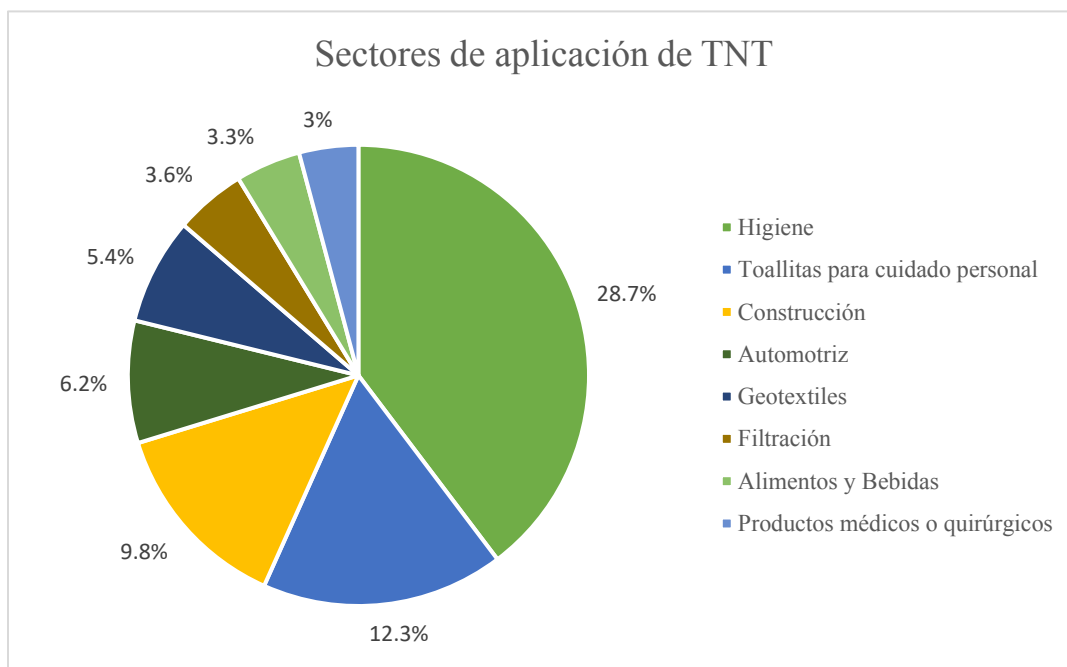


Figura 4.33. Segmentos importantes de mercado de no tejidos según EDANA.

Actualmente, el PP es la principal materia prima utilizada para los no tejidos debido a su versatilidad en propiedades, rendimiento y coste competitivo. Se espera que el polipropileno domine el mercado mundial de telas no tejidas en los próximos seis años y que el poliéster se convertirá en el segundo segmento de productos del mercado mundial debido a su creciente uso en aplicaciones como la industria automotriz, la agricultura y los equipos quirúrgicos y médicos, además de que ofrece una estabilidad superior y una alta resistencia de unión interna debido a la alineación uniforme de las fibras.

El segmento de TNT duraderas tuvo el mayor volumen en 2020, representando más de la mitad del mercado mundial de TNT, y se estima que se mantendrá de esta manera durante los próximos años ya que con el aumento de construcción y a su vez de geotextiles en mercados emergentes como Brasil, China e India se espera que impulse la demanda de telas no tejidas en aplicaciones duraderas (David Correa, 2022).

En general, las perspectivas del mercado de TNT son prometedoras, ya que se espera un crecimiento continuo en diversos sectores, sin embargo, a medida que aumenta el consumo de productos no tejidos desechables, también aumenta la preocupación ambiental.

Para ello diversos investigadores e industrias se han centrado en el desarrollo de TNT biodegradables para minimizar el impacto ambiental. Varios polímeros biodegradables nuevos, como el ácido poliláctico (PLA), han ayudado a la industria a producir mayores cantidades de no tejidos biodegradables (Bhat et al., 2010).

Actualmente se siguen desarrollando nuevas formas de producir TNT biodegradables mediante la combinación de fibras naturales, como el algodón y yute, y otras resinas o fibras biodegradables, como la PCL.

De tal manera que el objetivo a largo plazo es sustituir las fibras sintéticas por fibras biodegradables en los no tejidos desechables utilizados principalmente para productos de limpieza industriales y profesionales y para toallitas domésticas e higiénicas.

5. Estado del arte

5.1. Filtración

Las telas no tejidas se han convertido en un componente fundamental en muchas aplicaciones de filtración, como la filtración de aire y agua, la filtración médica y la filtración industrial. Se utilizan para eliminar impurezas del flujo de fluidos, capturar contaminantes y proteger los equipos. Sin embargo, como la demanda de productos de filtración sigue creciendo, es necesario mejorar los materiales y métodos utilizados pues uno de los retos críticos de la filtración con no tejidos es garantizar una calidad constante.

Para fabricar mejores productos no tejidos en el área de filtración, es necesario evaluar y medir la eficacia de los productos que ya se tienen. Existe una gran cantidad de productos filtrantes no tejidos, pero sin duda unos que han adquirido mayor popularidad estos últimos años en el área de filtración son los cubrebocas o mascarillas quirúrgicas.

En marzo del 2020, a inicios de la pandemia por SARS-CoV-2, Boi y colaboradores de la Universidad de Bologna, en Italia, realizaron pruebas funcionales a mascarillas quirúrgicas con el objetivo de apoyar a la industria para la producción de nuevas mascarillas y proporcionar un procedimiento simple y directo para la certificación y eficiencia de éstas.

Los investigadores instalaron el primer laboratorio de pruebas italiano para caracterizar mascarillas quirúrgicas siguiendo el estándar europeo EN ISO 14683:2019. Las mascarillas definidas en dicha norma se clasifican en dos tipos principales según su eficiencia de filtración bacteriana (BFE), y su comodidad en cuanto a transpirabilidad. Para la mascarilla clase I se necesita al menos un 95% de BFE, y la clase II, $BFE \geq 98\%$. Además, se considera una tercera clase de mascarillas (IIR), las cuales son resistentes a los posibles chorros de sangre que puedan impactar contra ellas durante una operación quirúrgica.

A continuación, se presentan las pruebas funcionales exigidas por la norma que se realizaron para caracterizar el tipo de mascarilla.

1. Presión diferencial o Respirabilidad

Es la medida directa de la resistencia respiratoria proporcionada por la mascarilla, evaluada como caída de presión a flujo fijo, y se correlaciona así con el esfuerzo requerido por el usuario para respirar con ritmos de inhalación y exhalación convencionales.

2. Eficiencia de filtración bacteriana (BFE)

Esta prueba representa la evaluación directa de la eficacia del dispositivo de filtrado, ya que mide el número de gotas de líquido que contienen bacterias que permean a través de una muestra circular.

3. Resistencia a la penetración de sangre sintética

La prueba sólo es obligatoria para las mascarillas de tipo IIR. Esto es necesario para garantizar que la sangre no alcance la capa interna de las máscaras, entrando así en contacto con los labios y la nariz del operador.

4. Limpieza microbiana

La prueba tiene por objeto cuantificar el número de microorganismos presentes en la mascarilla antes de ponérsela por primera vez.

Los resultados mostraron que de un total de 435 mascarillas para las que se realizaron todas las pruebas, en un periodo de 10 meses, sólo el 10% cumplió con los requisitos de la norma (tabla 5.1), mientras que las 393 mascarillas restantes fracasaron; la Figura 5.1 resume los resultados de las pruebas de las distintas mascarillas probadas.

Tabla 5.1. Valores límites para las pruebas de acuerdo a la norma EN ISO 14683:2019 (Boi et al., 2020).

Prueba	Tipo I	Tipo II	Tipo IIR
Presión diferencial (Pa/cm^2)	< 40	< 40	< 60
BFE (%)	≥ 95	≥ 98	≥ 98
Resistencia a la penetración de sangre (kPa)	-	-	≥ 16

Los sistemas de tres capas, compuestos de una capa de filtración intermedia y dos capas externas, resultaron ser la solución más adecuada para esta aplicación (Figura 5.2).

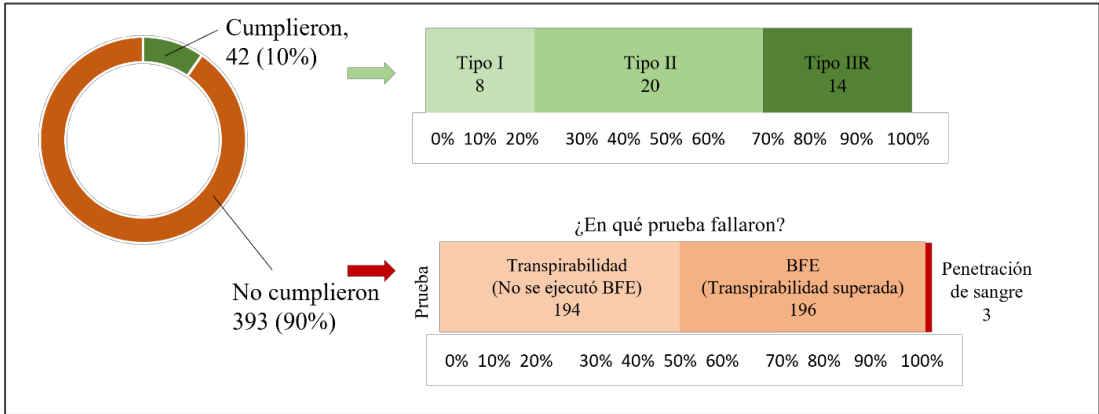


Figura 5.1. Tasa de éxito de los prototipos de mascarilla quirúrgica probados, con detalles del tipo de mascarilla en el caso de las mascarillas conformes (que cumplieron con la norma) y el motivo del fracaso en el caso de las mascarillas no conformes (Boi et al., 2020).

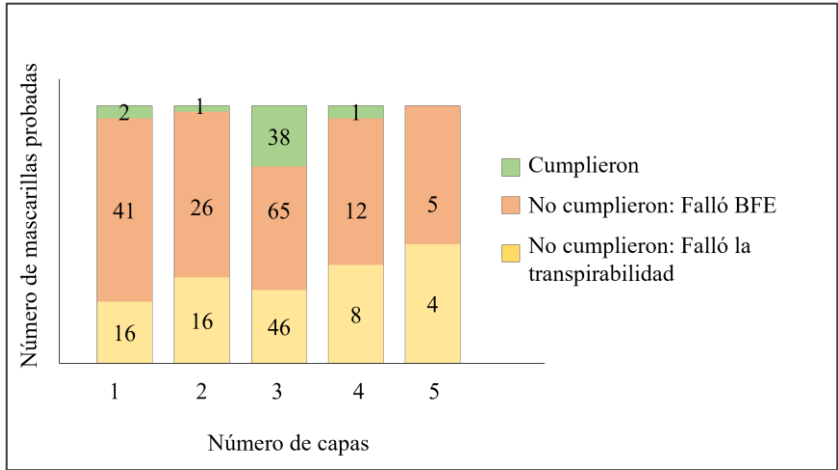


Figura 5.2. Resultados de las mascarillas probadas de acuerdo con el número de capas (Boi et al., 2020).

De las 42 mascarillas que cumplieron con la norma y fueron certificadas, el 12% estaban fabricadas con un filtro SMS, compuesto principalmente por dos capas externas de PET spunbond y una capa intermedia de PBT meltblown, y el 88% restante con un filtro meltblown

de PP. La principal diferencia entre el material SMS que se probó y los filtros meltblown consistió en las distintas técnicas de fabricación; al de la capa de PP meltblown se le añadió una carga electrostática para aumentar su rendimiento de filtración y para el filtro de SMS se utilizó una capa interna de meltblown sin necesidad de ningún mecanismo de carga electrostática adicional.

En cuanto a la capa de filtración, las TNT meltblown y SMS fueron los únicos materiales adecuadas en términos de eficacia de filtración bacteriana y transpirabilidad. Otros materiales, como el spunbond o el algodón, resultaron no ser apropiados para ello. En la Figura 5.3 se muestra una comparación de las diferentes capas de filtración: spunbond, meltblown, SMS.

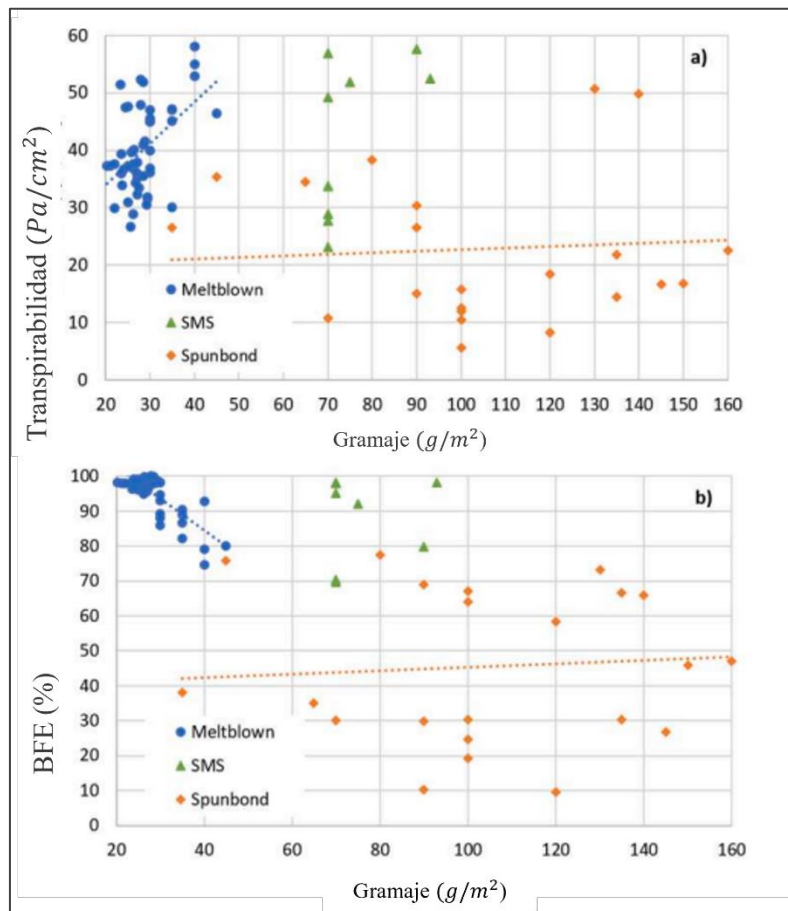


Figura 5.3. Rendimiento de las 42 mascarillas quirúrgicas conformes de composición conocida a) Variación de la presión diferencial con el gramaje, b) Variación de la BFE con el gramaje (Boi et al., 2020).

Las mascarillas de spunbond ofrecieron una resistencia mucho menor al flujo de aire en comparación con las de meltblown y de SMS, por ello se suelen utilizar como capas externas.

Debido al incremento de los residuos y de la creciente preocupación pública por el medio ambiente aunado al aumento de las exigencias de los consumidores de un aire más limpio y un agua más pura, se ha empezado a evaluar la posibilidad de fabricar medios filtrantes de microfibra biodegradables.

Mehran y colaboradores (2020) fabricaron medios filtrantes tanto de PLA como de PP mediante el proceso de meltblown. El estudio tuvo como objetivo investigar la procesabilidad del PLA y los efectos de los parámetros de procesamiento sobre su estructura y sus propiedades de filtración, así como compararlos con los medios filtrantes de PP de diámetros similares.

Para ello utilizaron PLA 6260D con MFI de 65 g/10 min (a 210 °C) y PP grado meltblown MF650W con MFI de 500 g/10 min (a 230 °C).

Los medios filtrantes de cada material se fabricaron en una línea de meltblown, Reicofil, equipada con un dado tipo Exxon con 35 orificios por pulgada y cada uno de 400 µm de diámetro. Para cada material se utilizó una temperatura de procesamiento constante, para el PLA de 275°C y para el PP, de 255°C.

Se varió el caudal del polímero fundido a través del orificio del dado, de 0.3 a 0.6 g/min, el flujo de aire de procesamiento, de 800 a 1900 m³/h, y la distancia del dado al colector (DCD).

Una vez obtenidos los medios filtrantes de cada material, se midió la permeabilidad del aire, el rendimiento de filtración y el rendimiento de filtros electro medio mediante descarga corona.

Se encontró que los principales factores que determinaron el diámetro de las fibras de las TNT fueron el caudal del polímero fundido a través del orificio del dado, el flujo de aire y la viscosidad del polímero fundido.

El aumento del flujo de aire y la disminución de la cantidad de polímero fundido a través del orificio del dado redujeron los diámetros de las fibras de PLA meltblown, pero en las condiciones de procesamiento dadas, el PLA meltblown tuvo un diámetro de fibra mayor que el PP meltblown como se muestra en la Figura 5.4.

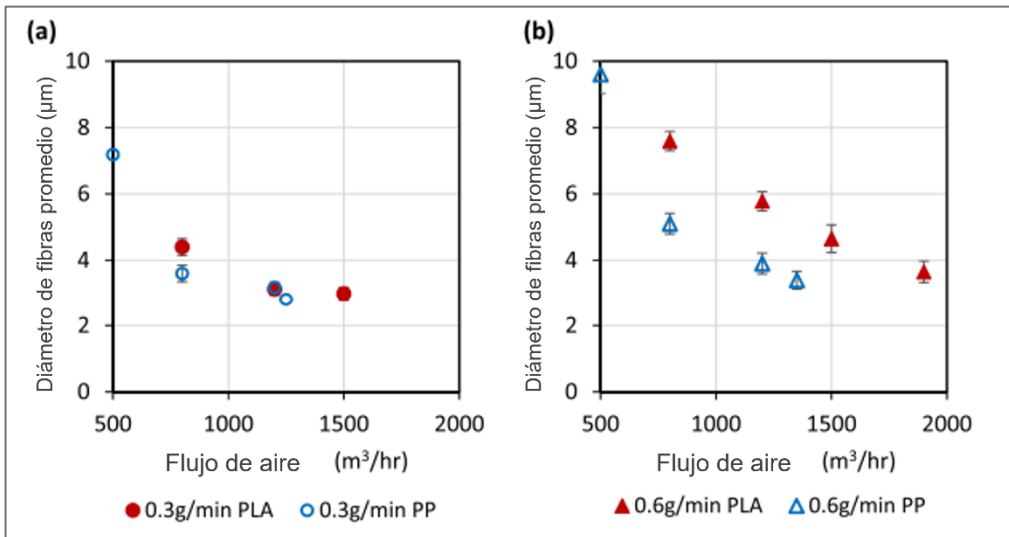


Figura 5.4. Efectos de la cantidad de polímero y del flujo de aire en el diámetro promedio de las fibras de PLA y PP meltblown a 15 cm de DCD. La cantidad de polímero por orificio fueron (a) 0.3 g/min y (b) 0.6 g/min, respectivamente (Mehran et al., 2020).

Sin embargo, un diámetro mayor no deterioró la eficacia de filtración del PLA meltblown. Al contrario, la eficacia de filtración del PLA meltblown fue superior a la del PP meltblown con un diámetro de fibra similar (Figura 5.5). La posible razón de esta mayor eficacia de filtración puede ser la captura electrostática de partículas inducida por la carga del polímero de PLA durante el proceso de meltblown.

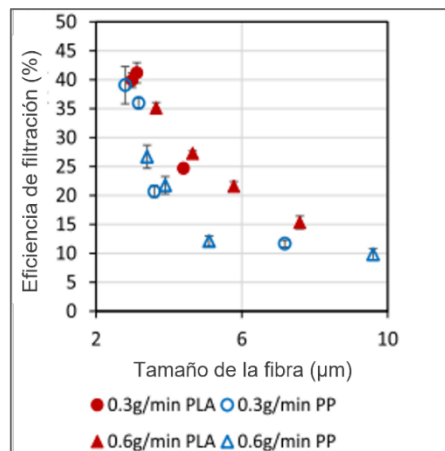


Figura 5.5. Efectos del diámetro de la fibra en la eficacia de filtración (Mehran et al., 2020).

En la Figura 5.6 se muestra que la eficacia de filtración tanto del PLA como del PP meltblown aumentó con el flujo de aire y disminuyó con la cantidad de polímero fundido a través del dado.

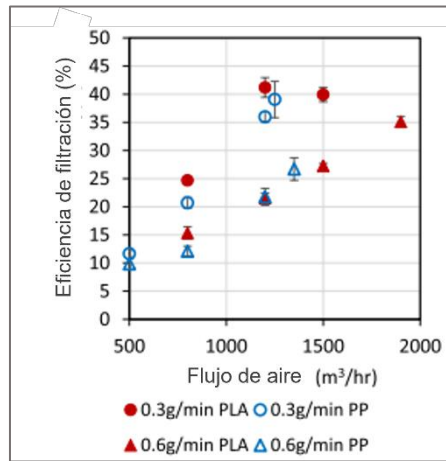


Figura 5.6. Efectos de las condiciones de procesamiento en la eficacia de la filtración (Mehran et al., 2020).

También se encontró que la solidez, es decir la relación entre el volumen ocupado por las fibras y el volumen total de la TNT, del PLA meltblown fue menor que la del PP meltblown porque su alta rigidez y alta T_g previenen la excesiva unión de fibras y el colapso de las estructuras. Esto mejoró aún más el rendimiento de la filtración al mejorar la permeabilidad al aire y reducir la caída de presión. En la Figura 5.7 se muestra que a una caída de presión dada, el PLA meltblown siempre muestra una penetración significativamente menor que se traduce en una mayor eficiencia de filtración.

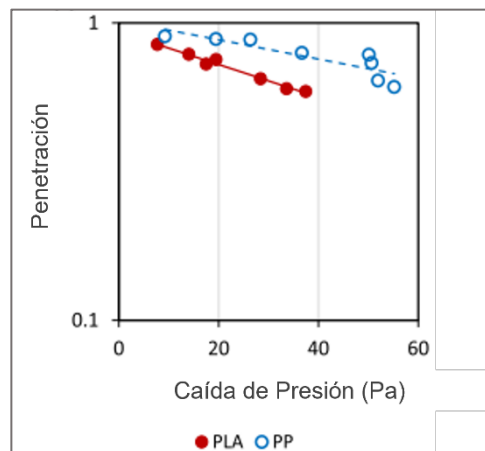


Figura 5.7. Penetración de partículas frente a la caída de presión (Mehran et al., 2020).

La menor caída de presión y la eficacia de filtración superior o comparable del PLA meltblown dieron lugar a factores de calidad superiores a los del PP meltblown. Los factores de calidad de del PLA fueron más del doble que los de los del PP con tamaños de fibras similares (Figura 5.8).

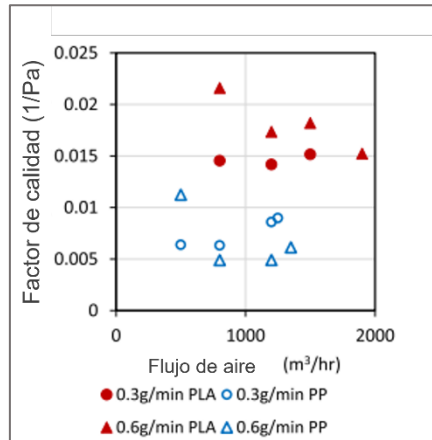


Figura 5.8. Factores de calidad (Mehran et al., 2020).

La carga corona de los medios de PLA meltblown mejoró eficazmente el rendimiento de la filtración. Las TNT de PP y PLA presentan un comportamiento similar en cuanto a la carga y la estabilidad de la carga. En la Figura 5.9 se muestra el rendimiento de la filtración por carga corona del PLA y PP meltblown.

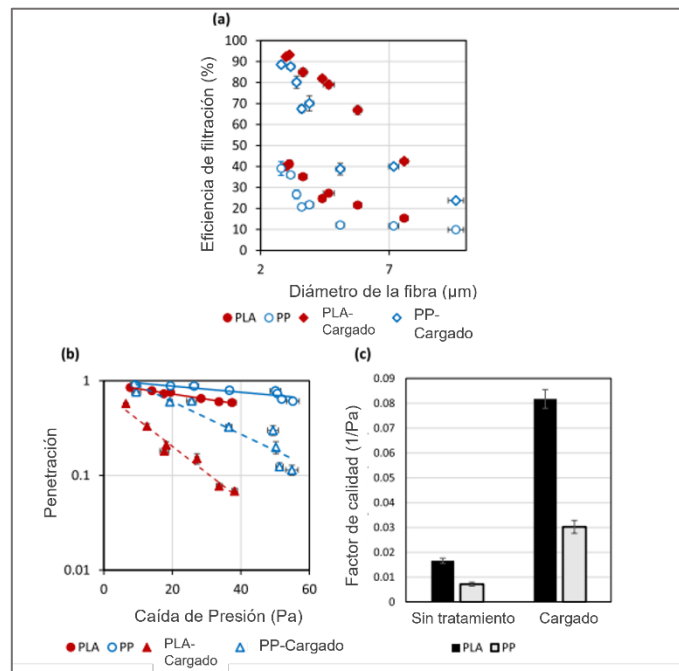


Figura 5.9. Rendimiento de filtración de las TNT de PLA y PP cargados con corona. El DCD fue de 15 cm. (a) Efecto del diámetro de la fibra en la eficacia de la filtración, (b) Penetración frente a caída de presión, y (c) Factores de calidad promedios de PLA y PP (Mehran et al., 2020).

Otra manera de mejorar la eficiencia de los materiales filtrantes es a través de fibras bicomponentes y la agregación de cargas. Liu y colaboradores (2019) presentaron una metodología novedosa para crear materiales de filtración bicomponentes con sección transversal núcleo/coraza compuesta por PP/PE y agente nucleante de MgSt, fabricado mediante la técnica de spunbond bicomponente y tratado con tratamiento de carga corona. Esto con el objetivo de brindar protección contra la contaminación del aire, al mismo tiempo de producir un método que, a diferencia del meltblown y electrospinning, no aumente la caída de presión causando un alto consumo de energía y ruido.

Los materiales obtenidos tuvieron propiedades electretas, es decir tuvieron un comportamiento de materiales dieléctricos al desarrollar una carga eléctrica casi permanente cuando fueron sometidos a un campo eléctrico y tratamiento corona, esto tuvo la capacidad de mejorar la captura de partículas aprovechando la atracción electrostática, sin aumentar la caída de presión. Por ello, para mejorar la estabilidad de la carga y evitar su descarga, se tuvieron que introducir las partículas de MgSt en el polímero para mejorar la estructura cristalina y el rendimiento electreto.

En la Figura 5.10 se muestra el procedimiento realizado para la fabricación de los materiales de filtración bicomponentes utilizando PE con MFI de 20 g/10 min, PP de 30 g/10 min y polvo de MgSt de 400 g/10 min.

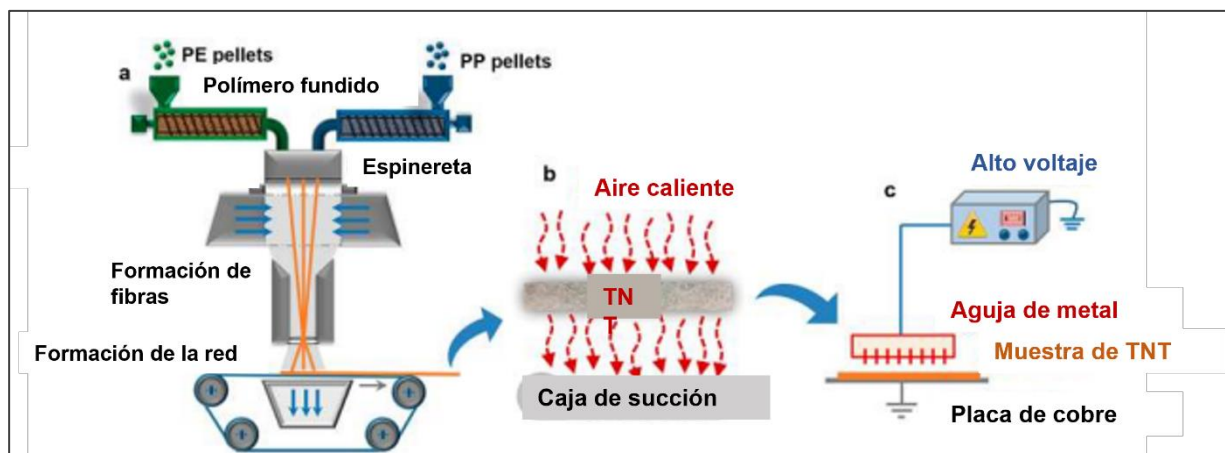


Figura 5.10. Diagrama esquemático del (a) proceso de spunbond bicomponente, (b) refuerzo a través de aire, y (c) tratamiento de carga corona (Liu et al., 2019).

En la Figura 5.11 se muestra un esquema de las diferentes formas en las que se incorporó el MgSt a la fibra bicomponente, en total se fabricaron 4 diferentes tipos de materiales: un grupo control PP/PE, y los demás con MgSt en el núcleo, en la coraza o en ambos, M- PP/PE, PP/PE-M, M-PP/PE-M.

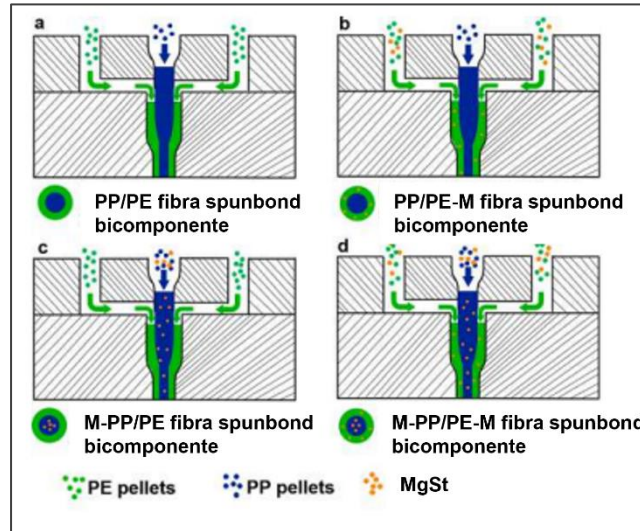


Figura 5.11. Diagrama esquemático de la fabricación de diferentes tipos de fibra bicomponente spunbond en un único orificio. (a) Fibra PP/PE, (b) Fibra PP/PE-M, (c) Fibra M-PP/PE, y (d) Fibra M-PP/PE-M. Las concentraciones de MgSt fueron todas del 0.4% en peso (Liu et al., 2019).

Como se muestra en la Figura 5.12 las imágenes SEM indican que las fibras de los materiales spunbond estaban distribuidas aleatoriamente y se puede observar en la sección transversal de la fibra los dos componentes, la coraza (PE) y el núcleo (PP).

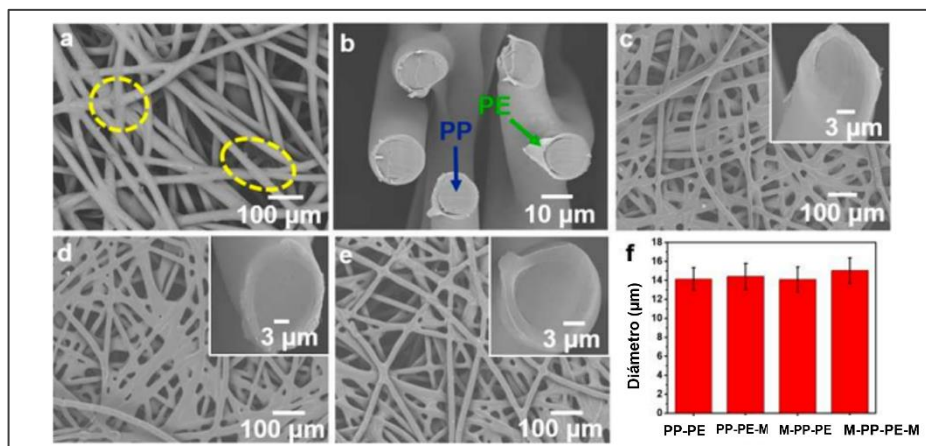


Figura 5.12. Morfología y diámetro de diferentes tipos de materiales. Imágenes SEM de (a) la superficie de materiales PP/PE y (b) sección transversal de materiales PP/PE. Imágenes SEM de la superficie y sección transversal de (c) PP/PE-M, (d) M-PP/PE, y (e) M-PP/PE-M. (f) Diámetro de la fibra (Liu et al., 2019).

El MgSt se fundió por completo y se dispersó en el polímero. Además, no hay diferencias significativas en los diámetros promedio del PP/PE, M- PP/PE, PP/PE-M, M-PP/PE-M. Por ello antes del tratamiento corona, no hubo mucha variación en la eficiencia de filtración ni en el factor de calidad.

Tras la carga corona, la eficacia de filtración de los cuatro tipos de muestras aumentó significativamente en comparación con la de las muestras preparadas sin cargar, mientras que la caída de presión permaneció constante, como se muestra en la Figura 5.13.

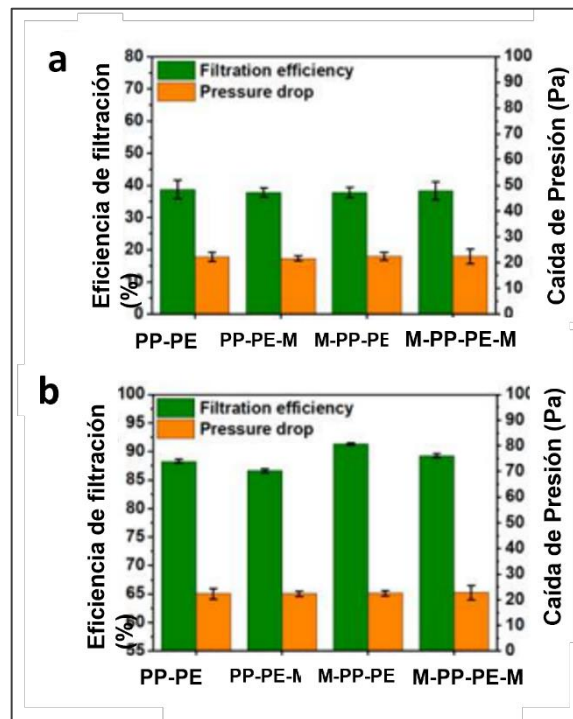


Figura 5.13. (a) Rendimiento de la filtración en los materiales originales y (b) Rendimiento de la filtración tras la carga corona. Todas las pruebas se realizaron con un flujo de aire constante (Liu et al., 2019).

Ya que la muestra de M- PP/PE fue la que tuvo mayor eficiencia en la filtración se probó con diferentes concentraciones de MgSt y se encontró que el mejor valor fue de 0.6% de MgSt (Figura 5.14). Manteniendo esta concentración de 0.6%, se hicieron pruebas de filtración variando el peso y se encontró que los materiales con un peso de 200 g/m² presentaron una alta eficacia de filtración del 98.94%, una baja caída de presión de 37.92 Pa y una alta capacidad de retención de polvo a comparación de los filtros por electrospun y meltblown.

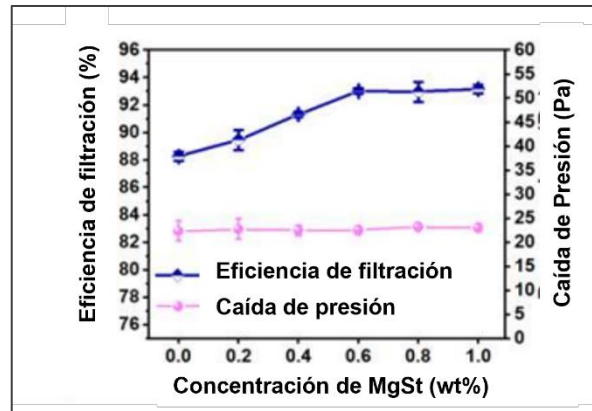


Figura 5.14. Eficiencia de filtración y caída de presión con varias concentraciones del agente nucleante (Liu et al., 2019).

5.2. Equipo de Protección Personal (EPP)

Una de las aplicaciones más importantes es la fabricación de mascarillas que se usan ampliamente en el sector sanitario. La integración de propiedades antibacterianas y antivirales ha sido uno de los avances más significativos de los últimos años, lo que ha dado lugar a materiales que no sólo son cómodos y duraderos, sino que también proporcionan una capa adicional de protección contra las bacterias dañinas.

Ahrari y colaboradores (2020) reportaron por primera vez un nuevo enfoque para la aplicación de nanopartículas de plata en mascarillas de tres capas con el método de curado en seco, ya que las nanopartículas de plata son las nanopartículas metálicas más utilizadas en diversas aplicaciones médicas pues son conocidas por su actividad antimicrobiana y antiviral contra una amplia gama de patógenos. Para ello utilizaron mascarillas SMS de PP y las AgNPs se les aplicaron a diferentes concentraciones, en las capas internas y externas cumpliendo la función de biocida. En la Figura 5.15 se muestran aglomeraciones blancas que indican la presencia de las nanopartículas de plata en las diferentes capas de la mascarilla.

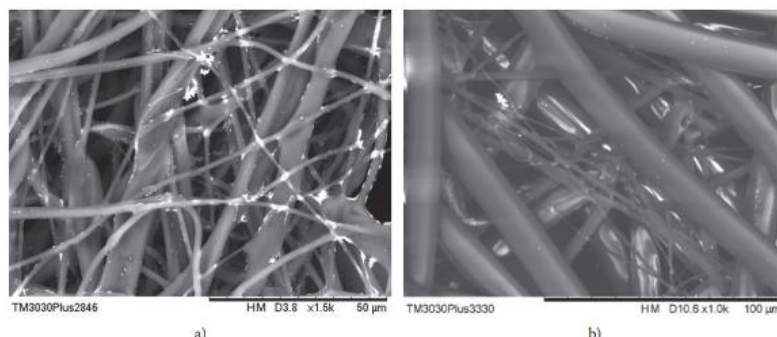


Figura 5.15. Micrografías electrónicas de barrido de nanopartículas de plata sobre las mascarillas no tejidas; (a) melt-blown, (b) spun-bond (Ahrari et al., 2020).

Para medir la actividad antimicrobiana y antiviral se realizaron las pruebas de eficiencia de filtración bacteriana (BFE), limpieza microbiana y eficacia antiviral, así como la prueba de respirabilidad (presión diferencial) siguiendo la norma ISO 14683:2019.

En la tabla 5.2 se encuentran las diferentes muestras analizadas con las diferentes concentraciones de AgNPs.

Tabla 5.2. Configuración de las máscaras utilizadas en el estudio (Ahrari et al., 2020).

Muestra	Capa externa tratada con AgNPs (g/l)	Capa interna tratada con AgNPs (g/l)
M-1	1	Sin tratamiento
M-2	1	1
M-3	2	Sin tratamiento
M-4	2	2
M-5	3	Sin tratamiento
M-6	3	3
M-7	4	Sin tratamiento
M-8	5	Sin tratamiento
Referencia	Sin tratamiento	Sin tratamiento

Los resultados de las pruebas de eficacia de filtración bacteriana, limpieza microbiana y eficacia antiviral fueron satisfactorios como se muestra en las Figura 5.16 y Figura 5.17.

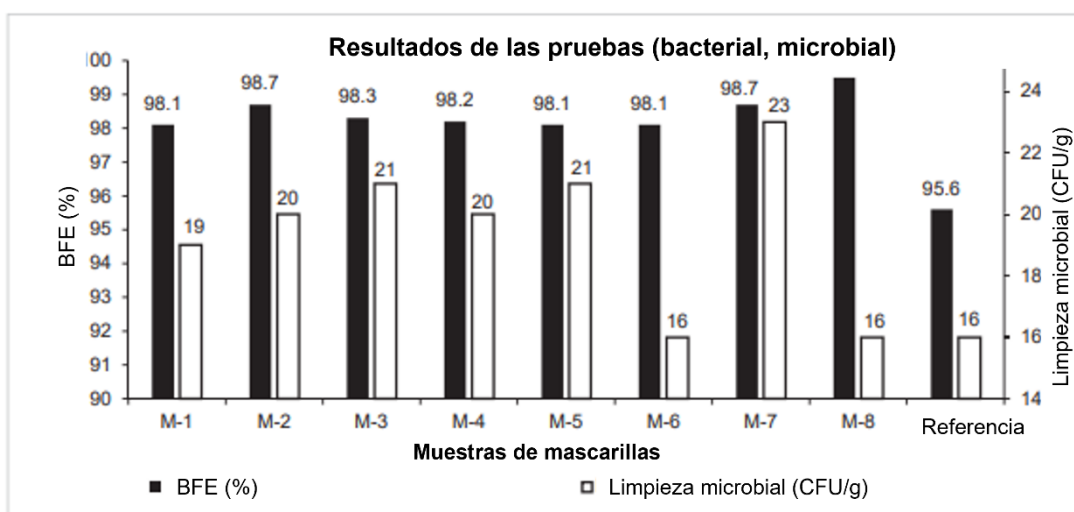


Figura 5.16. Eficacia de la filtración bacteriana y limpieza microbiana de las mascarillas no tejidas tratadas y no tratadas (Ahrari et al., 2020).

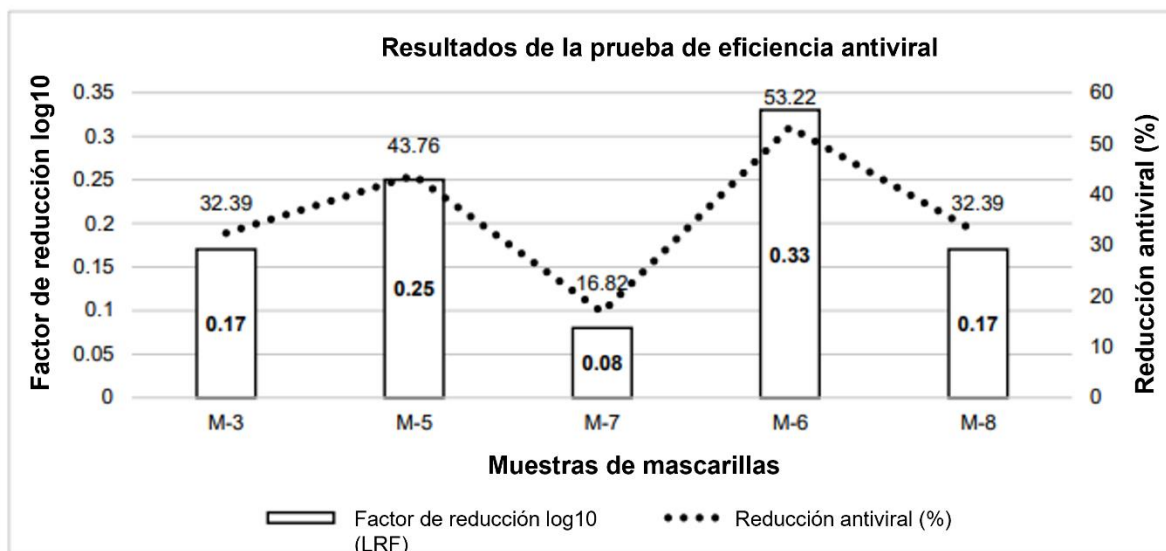


Figura 5.17. Comparación del factor de reducción log₁₀ y del porcentaje de reducción antiviral de diferentes muestras a 25 °C y 5 minutos de tiempo de contacto (Ahrari et al., 2020).

Sin embargo, la adición de nanopartículas de plata provocó la obstrucción de los poros de la TNT de polipropileno spunbond, lo que se tradujo en unos pobres resultados de presión diferencial (respirabilidad) así que los autores recomiendan concentraciones más bajas de nanopartículas de plata.

Los equipos de protección personal también desempeñan un papel importante en la protección contra riesgos en condiciones extremas de temperatura. La ropa de protección térmica está especialmente diseñada de tejidos o telas no tejidas fabricadas con fibras retardantes a la flama, como las fibras de aramida y fenólicas. Sin embargo, las telas tejidas suelen tener un aislamiento térmico inadecuado, son pesadas y voluminosas debido a los diámetros de las fibras y a su baja porosidad. Es por eso que Zhang y colaboradores (2023) diseñaron una tela no tejida meltblown de resina fenólica modificada con silicio de alta ortosilicona (SiPR) para protección térmica.

Se utilizaron resinas fenólicas por su elevada estabilidad térmica, resistencia a la flama y aislamiento térmico. Para reducir la fragilidad y poder procesarla mediante meltblown se modificó con silicio de alta ortosilicona.

Se procesó la resina por meltblown como se muestra en la Figura 5.18.

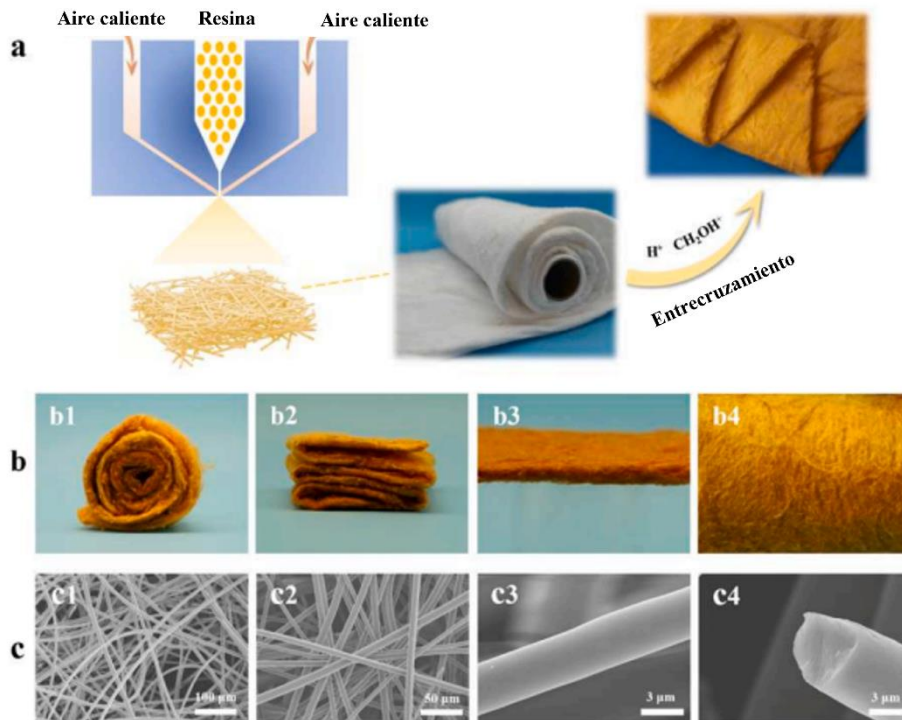


Figura 5.18. Diagrama del proceso de preparación del SiPR-MBNM (a); TNT SiPR-MBNM (b); imágenes SEM (c): morfología superficial del SiPR-MBNM y de la fibra SiPR-MBNM (c1-3), y morfología de la sección transversal de la fibra SiPR MBNM (c4) (Zhang et al., 2023).

La TNT resultante (SiPR-MBNM) tuvo una apariencia fibrosa y esponjosa y mostraba una gran flexibilidad, pudiendo enrollarse y plegarse fácilmente, lo que garantizaba una buena portabilidad. Las fibras presentaban superficies lisas, y la distribución del diámetro era uniforme con elevada porosidad del 88%, lo que resultaba beneficioso para obtener un elevado aislamiento térmico.

El aislamiento térmico se evaluó colocando el SiPR-MBNM sobre una placa caliente y registrando la temperatura con una cámara termográfica. En la Figura 5.19 se muestra que la TNT presentó alta resistencia térmica, retardo a la flama y baja conductividad térmica. En las Figuras 4c-d, se muestra un ΔT estable en el proceso de calentamiento continuo, lo que demuestra el aislamiento térmico.

En la comparación del SiPR-MBNM contra las capas aislantes comerciales, el SiPR-MBNM presentó un valor pico de tasa de liberación de calor más bajo mientras que los materiales aislantes comerciales mostraron dos picos altos en las tasas de liberación de calor. Además, el

SiPR-MBNM no se deformó y no se incendió después de arder en la lámpara de alcohol, a diferencia del material comercial que se incendió al entrar en contacto con la llama.

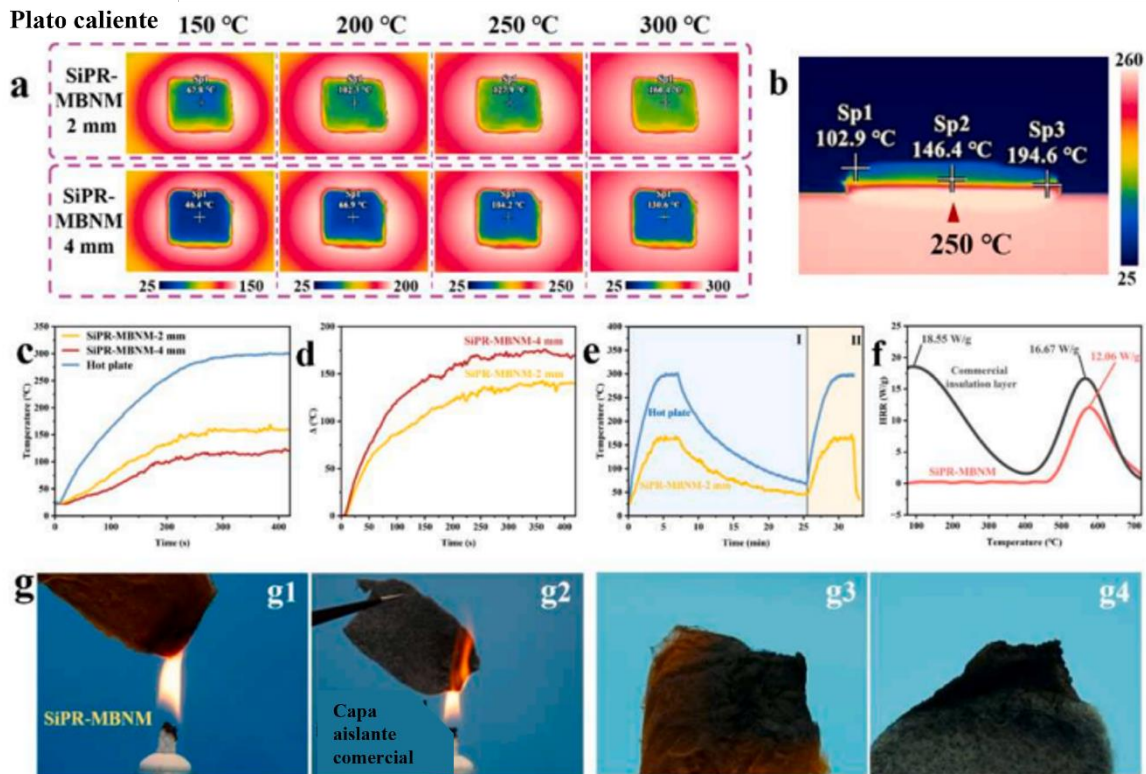


Figura 5.19. Imágenes térmicas infrarrojas del desempeño de aislamiento térmico de SiPR-MBNM de diferentes grosores (a); imagen térmica infrarroja desde la vista lateral de SiPR-MBNM de 4 mm (b); gráficos de curvas de aumento de temperatura para SiPR MBNM-2 mm y SiPR-MBNM-4 mm (c), y gráficos de diferencia de temperatura con placa caliente (d); curvas de calentamiento y enfriamiento de SiPR-MBNM-2 mm (e); curvas de velocidad de liberación de calor de SiPR-MBNM y de la capa aislante comercial (f); gráfico comparativo del retardo a la flama de SiPR-MBNM y de una capa aislante comercial (g) (Zhang et al., 2023).

Dadas sus excelentes propiedades antífama y de aislamiento térmico, diseñaron un guante de protección térmica (STPG) compuesto por cuatro capas: capa exterior retardante a la flama, capa impermeable, capa de aislamiento térmico y forro. El SiPR-MBNM se utilizó como capa de aislamiento térmico, y los demás materiales coincidían con los materiales habituales de los guantes de aislamiento térmico comerciales.

En la Figura 5.20 se muestran los resultados después de colocar un termopar en el guante para detectar la temperatura somatosensorial en contacto directo con una fuente de fuego para detectar la sensación real de llevarlo puesto y el cambio de temperatura interna.

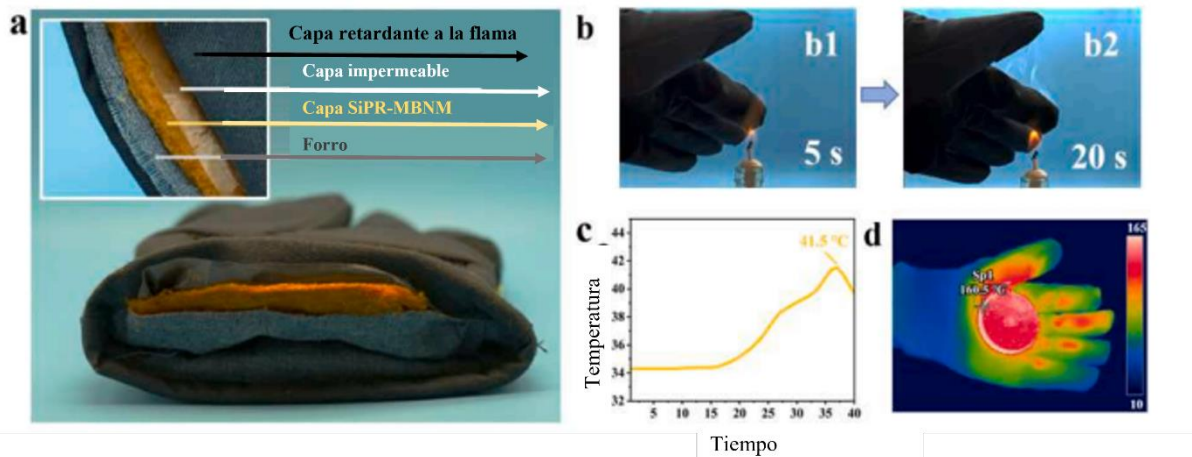


Figura 5.20. Componentes del guante (a); Prueba de aislamiento térmico del STPG (b); Diagrama de la variación de la temperatura interna del STPG con el tiempo de combustión (c); Diagrama de demostración por infrarrojos del rendimiento del aislamiento térmico del STPG (d) (Zhang et al., 2023).

Esto demostró que incluso cuando la capa retardante a la flama se dañó en un entorno en llamas o se expuso a una condición de alta temperatura durante mucho tiempo, el interior del guante mantuvo una temperatura aceptable para el cuerpo humano.

5.3. Aplicaciones biomédicas

Se espera que las TNT desempeñen un papel cada vez más importante en el desarrollo de nuevos tratamientos para diversas lesiones ya que pueden diseñarse para imitar la estructura y las propiedades de los tejidos naturales, como la piel, los huesos, los cartílagos y los vasos sanguíneos, y adaptarse a las necesidades específicas de los distintos tipos de tejidos.

Para este tipo de aplicaciones, el PLA ha sido el más utilizado en las dos últimas décadas debido a sus propiedades biocompatibles y a su habilidad para degradarse en compuestos no tóxicos en el organismo.

Actualmente la mayoría de las investigaciones para esta área están enfocadas en la técnica de electrospinning, sin embargo, ya que no es posible su producción a escala industrial se han propuesto algunos estudios involucrando la técnica de meltblown.

Gazzola y colaboradores (2019) evaluaron nanoredes de PLA por meltblown como alternativa viable de andamios en ingeniería tisular para promover la unión celular, proliferación, migración y penetración para maximizar la regeneración de tejido dañado.

Para ello procesaron muestras de PLA 6252D por meltblown y seleccionaron como andamios las que tuvieran características similares a la dermis humana basadas en sus propiedades mecánicas, diámetro de las fibras y tamaño de los poros; con diámetro de 588 nm, tamaño de poro de 14 μm , grosor de 421 μm y módulo de tensión en dirección máquina de 179 kPa.

Después se añadieron fibroblastos dérmicos humanos a los andamios y se cultivaron durante 1, 3, 7 y 14 días.

Los resultados fueron prometedores, ya que se demostró buena proliferación del día 1 al 3 y hasta el día 7 como se muestra en la figura 5.21. La unión celular y la migración fue adecuada y en cuanto a la penetración, las células pudieron penetrar completamente dentro del grosor del andamio.

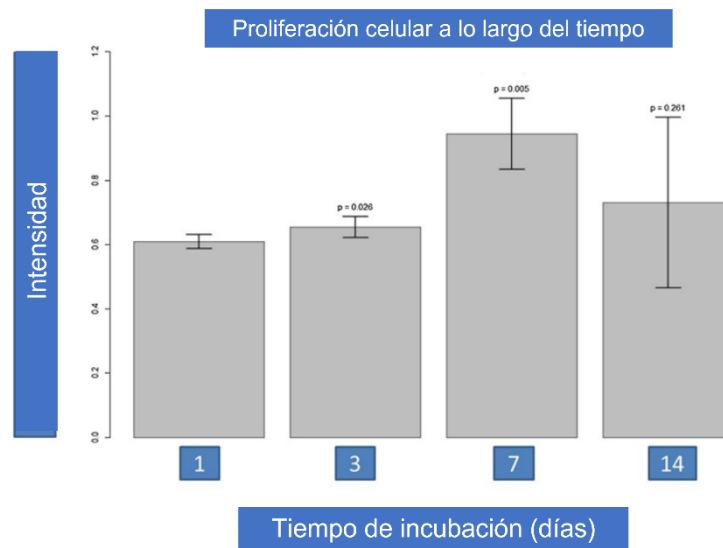


Figura 5.21. Resultados de cultivos celulares en los días 1, 3, 7 y 14 (Gazzola et al., 2019).

En la sección 4 se mencionó que los parámetros de procesamiento pueden afectar el producto final, para evaluar esto en aplicaciones de ingeniería tejidos Dzierzkowska y colaboradores (2021) compararon 8 telas no tejidas de PLA por meltblown producidos en diferentes condiciones de proceso con el fin de identificar el mejor material para la cicatrización de heridas. Para ello investigaron cómo la temperatura de las tres zonas del extrusor, del cabezal y del aire afectaron a las propiedades microestructurales, térmicas y biológicas de las telas no tejidas.

En la tabla 5.3 se muestran las condiciones de procesamiento que utilizaron para los andamios de PLA 3251D y en la figura 5.22 las fotografías por SEM de cada uno.

Tabla 5.3. Condiciones de procesamiento de meltblown para el PLA (Dzierzkowska et al., 2021).

Parámetro de procesamiento	MB1	MB2	MB3	MB4	MB5	MB6	MB7	MB8
Zona 1 del extrusor (°C)	195	195	190	180	170	195	195	195
Zona 2 del extrusor (°C)	230	230	195	190	175	200	230	245
Zona 3 del extrusor (°C)	235	235	210	190	180	205	245	260
Cabezal (°C)	220	220	200	190	180	270	250	260
Temperatura del aire (°C)	230	230	230	200	180	220	240	260
Flujo del aire (m^3/h)	7-8	7-8	7-8	7-8	7-8	7-8	7-8	7-8
Tasa de flujo del fundido (g/min)	5	5	8	5	5	5	5	5
Diámetro del orificio (mm)	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
DDC (cm)	26	26	26	26	26	26	26	26

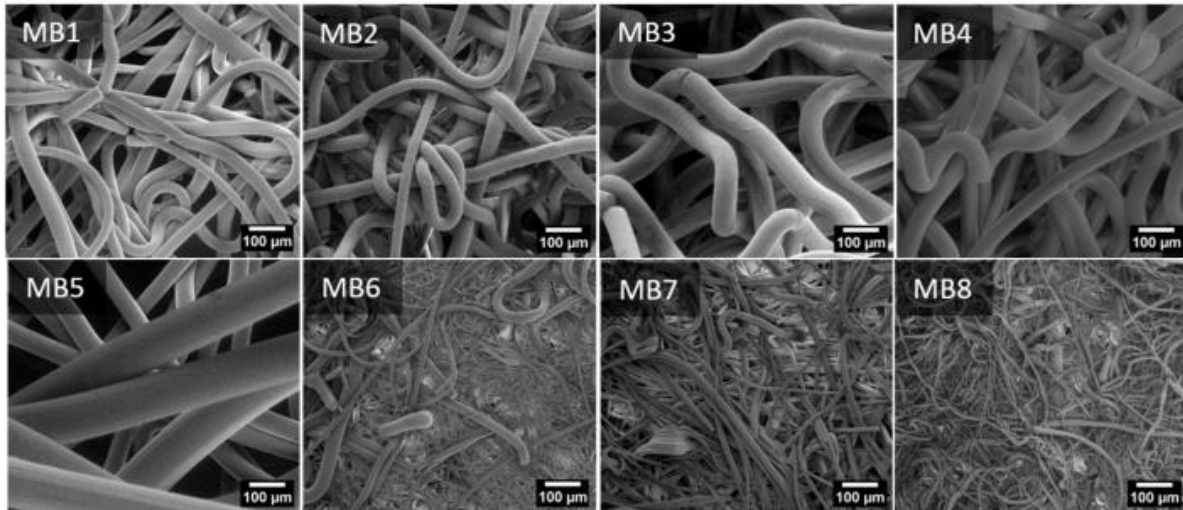


Figura 5.22. Fotografías SEM de las 8 muestras (Dzierzkowska et al., 2021).

De cada uno de los 8 andamios se evaluó su grosor, diámetro y distribución de poros, propiedades térmicas y rugosidad. Para los estudios biológicos se añadieron dos tipos de células a los andamios: queratinocitos (células que producen queratina) y células similares a los macrófagos.

La investigación demostró que el tamaño, la rugosidad y la porosidad de las fibras estaban estrechamente relacionados con las temperaturas del proceso. Los diámetros promedio de las fibras oscilaron entre 3 y 120 μm . La temperatura del aire más baja generó las fibras más

grandes (MB5-119 μm) y la temperatura del aire más alta, las más pequeñas (MB8-3 μm) como se muestra en la figura 5.23a. Las fibras de diámetro pequeño, de hasta 15 μm (MB6, MB7), se formaron cuando la temperatura del aire era inferior a la del cabezal, mientras que cuando la temperatura del aire fue superior a la del cabezal generó las fibras de mayor diámetro (MB1-MB4) como se muestra en la figura 5.23b.

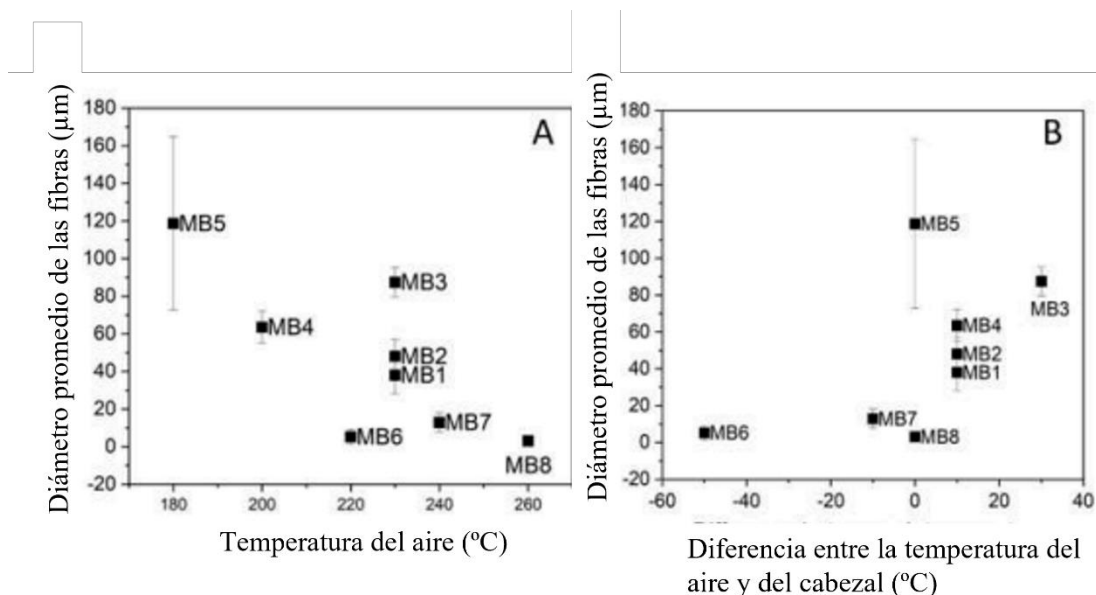


Figura 5.23. Diámetro de las fibras frente a) la temperatura del aire y b) la diferencia entre la temperatura del aire y del cabezal (Dzierzkowska et al., 2021)

Los valores medios de rugosidad del material se situaron entre 47 y 160 μm . La rugosidad superior a 100 μm se observó en las fibras con un diámetro promedio superior a 60 μm . Las fibras con un diámetro inferior a 15 μm mostraron los valores de rugosidad más bajos, alrededor de 50 μm .

El tamaño de los poros es responsable de proporcionar a las células espacio suficiente para crecer dentro del material. El tejido cutáneo necesita un tamaño de poro inferior a 160 μm y para este estudio los diámetros de los poros oscilaron entre 5 y 400 μm . Los tamaños de poro de los materiales con mayor viabilidad celular (MB3-MB5) se situaron en el intervalo de 40-400 μm .

Los termogramas de calorimetría revelaron una correlación entre los parámetros de temperatura y la cristalización, esto fue importante ya que la cristalinidad tiene influencia en la unión celular.

La respuesta de los queratinocitos y macrófagos mostró una mayor viabilidad celular en las fibras más gruesas.

La interacción entre las células y los andamios se observó mediante SEM al cabo de 7 días, como se muestra en las figuras 5.24 y 5.25.

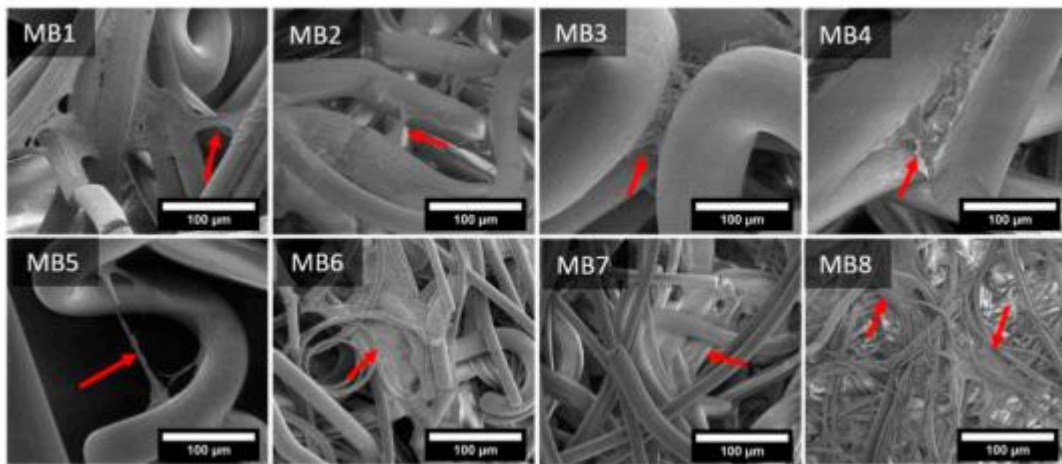


Figura 5.24. Microfotografías SEM de queratinocitos extendidos sobre las TNT meltblown el día 7 del cultivo. La flecha indica queratinocitos aplanados sobre fibras o migrando a fibras adyacentes (Dzierzkowska et al., 2021).

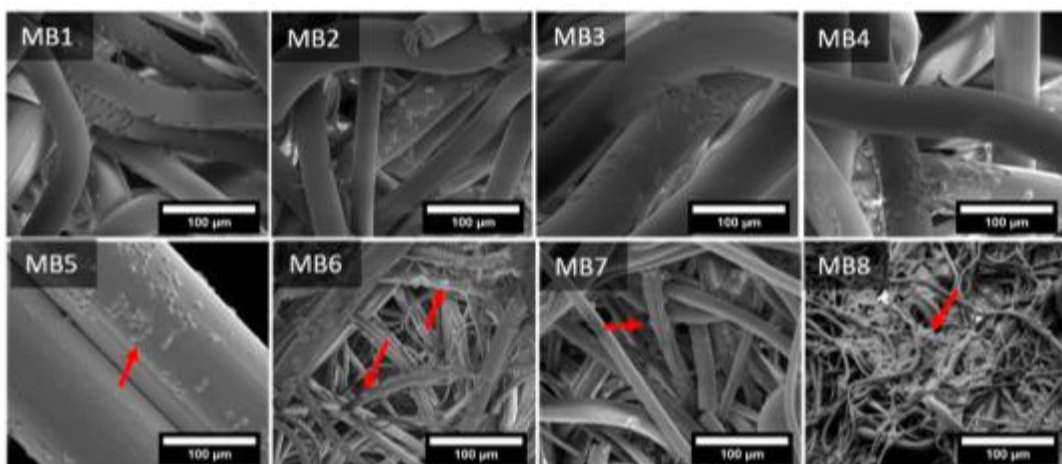


Figura 5.25. Microfotografías SEM de macrófagos extendidos sobre las TNT meltblown el día 7 del cultivo. La flecha indica macrófagos aplanados sobre la superficie de las fibras (Dzierzkowska et al., 2021).

Los mejores resultados de viabilidad de queratinocitos se demostraron con los materiales MB3 y MB4. Estas células mostraron una morfología alargada en la fibra única y también se unieron a las fibras adyacentes.

Los macrófagos se adhirieron uniformemente por toda la superficie de las muestras. En la fibra de menor diámetro (MB8) se facilitó la unión celular y proliferación.

Una aplicación de interés creciente en el área biomédica es la investigación de materiales inteligentes, uno de ellos son los polímeros con memoria de forma (SMP) en los que diferentes estímulos pueden activar un cambio en su estructura molecular. Walczak y colaboradores (2017) utilizaron una mezcla de PLLA y α -PHB para obtener una TNT meltblown con efecto de memoria de forma inducido térmicamente a una temperatura de transición programada con el objetivo de obtener los parámetros óptimos de procesamiento para producir telas no tejidas inteligentes e investigar el mecanismo de memoria de forma y la relación de recuperación de forma para determinadas temperaturas de transición en el material producido.

Para ello utilizaron PLLA 3001D mezclado con α -PHB en una proporción de 90:10 y se procesaron mediante meltblown. Se analizaron las propiedades térmicas, mecánicas y estructurales del producto final.

Las pruebas mecánicas revelaron que la TNT tenía propiedades isotrópicas y que los parámetros mecánicos eran relativamente bajos a temperaturas inferiores a su T_g .

Los termogramas revelaron que la mezcla PLLA- α PHB presentaron un solo valor de T_g , lo que indicó que la mezcla creada era un sistema miscible. El proceso de producción de la tela no tejida, las condiciones de estirado y la temperatura de procesado influyeron en el comportamiento térmico y de cristalización del producto final, lo que se demostró por los cambios en las temperaturas de fusión y cristalización en los termogramas.

Los parámetros empíricos de estabilización térmica determinados (65°C, 60 min) mediante aire caliente y condiciones especiales contribuyeron a eliminar la elevada contracción de la TNT (figura 5.26) y por lo tanto aumentar la densidad, además de disminuir su T_g (46 °C).

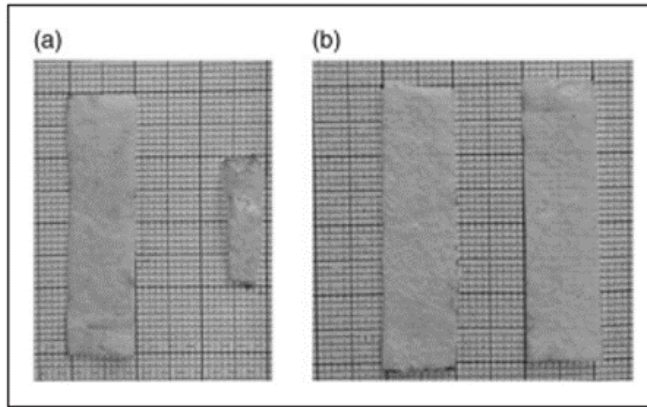


Figura 5.26. Contracción térmica del material no tejido tras la inmersión en agua caliente (100 °C): a) antes del proceso de estabilización térmica y b) después del proceso de estabilización térmica (Walczak et al., 2017).

La eficacia de la recuperación de la forma dependió del experimento realizado.

En el experimento termomecánico con espirales, la recuperación completa e inmediata de la forma se obtuvo a una temperatura de transición de 45 °C y 65 °C (figura 5.27). La reducción de la temperatura de transición de 65 °C a 38 °C prolongó el tiempo de recuperación de la forma. Sin embargo, en el experimento de estiramiento se obtuvo una recuperación incompleta de la forma (81%).

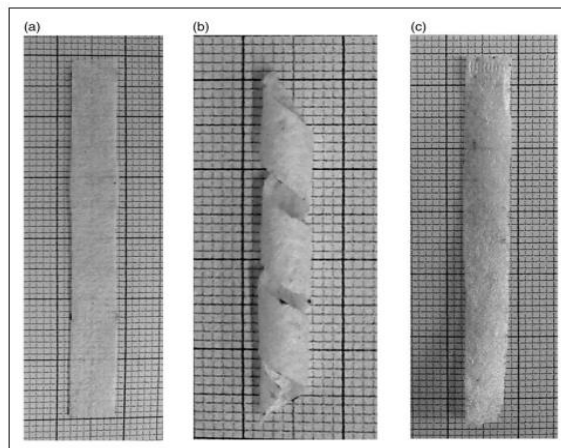


Figura 5.27. Experimento de espirales estudiado en la TNT PLLA:a-PHB a) Forma inicial (forma permanente) $T < T_g$ b) Forma secundaria (forma temporal) $T > T_g$ y $T < 0^\circ\text{C}$ c) forma final (forma permanente) $T > T_g$ (Walczak et al., 2017).

Los investigadores concluyeron que el material elegido puede tener aplicaciones potenciales como implantes autoajustables, andamios inteligentes o parte de un sistema de anclaje para injertos.

6. Áreas de oportunidad

Las referencias estudiadas anteriormente demuestran que existe una amplia área de investigación para telas no tejidas en aplicaciones de filtración, equipo de protección personal e ingeniería de tejidos, por lo que se pueden definir las siguientes áreas de oportunidad:

- Investigar el efecto de los parámetros de procesamiento en el rendimiento de filtración del material no tejido filtrante, así como de su vida útil.
- Investigar y comparar diferentes métodos de fabricación para aplicaciones de filtración de agua y gases, ya que las investigaciones enfocadas en filtración se centran en filtración de aire.
- Desarrollar de nuevos equipos de protección personal no tejidos para aplicaciones específicas, como industriales y militares. Esto implica evaluar cómo la implementación de las telas no tejidas puede mejorar el equipo que ya se tiene en esas áreas y hacer investigación para poder escoger el polímero con las propiedades adecuadas para la aplicación y el proceso adecuado para la obtención de la TNT.
- Desarrollar prototipos del equipo de protección personal para hacerle las pruebas correspondientes en un ambiente controlado y lo más cercano posible a la realidad, imitando las condiciones del usuario que lo portará.
- Investigar el impacto ambiental de las TNT en aplicaciones de filtración y EPP, la vida útil promedio de los productos y buscar alternativas para disminuir los desechos que vienen de estas aplicaciones, esto implica analizar la viabilidad de incorporar material reciclado.
- Investigar sobre fibras naturales y polímeros biodegradables, procesables mediante los métodos de meltblown y spunbond para que se puedan usar en distintas aplicaciones y generar un menor impacto ambiental, pues la mayoría de las investigaciones actuales se enfocan sólo en el PLA.
- Comparar la interacción, biocompatibilidad y respuesta entre los andamios tejidos y los no tejidos.

7. Conclusiones y recomendaciones

Los estudios realizados en la actualidad demuestran que las TNT se pueden aplicar en diferentes áreas debido a sus propiedades y características. Además, las investigaciones han crecido en torno al proceso de meltblown por su capacidad de producción y la posibilidad de producir microfibras.

Los estudios demostraron que en el campo de la filtración y en el equipo de protección personal para el área médica, cada vez se desarrollan nuevos y mejores métodos para mejorar la eficiencia de los productos filtrantes. El método más utilizado y con mejores resultados para las mascarillas es el SMS que consiste en producir una TNT de 3 capas, con dos capas externas hidrófobas de spunbond y una capa interna de meltblown que filtra partículas. A pesar de su alta eficiencia de filtración, las mascarillas SMS son transpirables. Esto significa que el usuario puede respirar fácilmente a través de la mascarilla sin sentirse asfixiado.

Otra alternativa adecuada es el uso de partículas con propiedades antivirales y antibacterianas, como las nanopartículas de plata, que mejoran la eficiencia de filtración y protección en el área médica. Para esta aplicación es muy importante considerar el tamaño y la distribución de los poros de las telas no tejidas para que no ocurra el efecto contrario y las partículas obstruyan los poros y baje la eficiencia de filtración.

Otros factores importantes por considerar, especialmente cuando se trabaja con tamaños a nanoescala o microescala como en el caso de andamios para ingeniería tisular, son los parámetros de procesamiento. Un cambio en la temperatura de procesamiento, en el flujo de aire o en la dosificación, se puede traducir en diferentes tamaños de fibras, diferente porosidad y rugosidad, lo que va a limitar su eficiencia.

Son pocas las investigaciones que se han realizado acerca de polímeros meltblown en ingeniería de tejidos, ya que las telas no tejidas para estas aplicaciones se fabrican principalmente mediante electrospinning. Sin embargo, el proceso meltblown demostró que es un método adecuado y prometedor para la fabricación de andamios y abre las posibilidades para futuras investigaciones.

Se encontró que el PLA fue el polímero más utilizado en el área biomédica por su biocompatibilidad y en las demás áreas por su biodegradabilidad. En todos los casos y aplicaciones dio excelentes resultados.

Se propone que para futuras investigaciones se continúe trabajando con el PLA y con otros biopolímeros procesables mediante meltblown para que en un futuro los productos que se utilicen de telas no tejidas estén fabricados principalmente de polímeros sustentables y el impacto ambiental no sea tan grande como lo es ahora.

8. Lista de Figuras

Figura 4.1 DPM (Shrivastava, 2018)	6
Figura 4.2: Polímero semicristalino (regiones cristalinas y regiones amorfas) (Wagner et al., 2014).....	11
Figura 4.3: Estructuras de los diferentes tipos de polietileno	20
Figura 4.4. Tipos de polipropileno	21
Figura 4.5. Estructuras del PET y PBT (Ting Wu, Hui Lian Hu, Yi Ping Du, 2014).....	24
Figura 4.6. Estructura química del PEN (Plastics Technology)	24
Figura 4.7. Estructura química del PLA (Salvador Galindo, Fernando Ureña-Nuñez, 2018)	25
Figura 4.8. Dif. estructurales entre telas tejidas y tela no tejida (Sadeghi et al., 2021).....	26
Figura 4.9. Proceso de electrospinning (Garg, K., Sell, S. A., & Bowlin, G. L. 2009)	29
Figura 4.10. Vista inferior de una espinereta de dado tipo Exxon (Geus, 2016)	30
Figura 4.11. Proceso de meltblown (Hutten, 2016)	30
Figura 4.12. Proceso de spunbond (Hutten, 2016)	31
Figura 4.13. TNT multicapa (Çelikel & Babaarslan, 2017)	32
Figura 4.14. Muestras de agujeros (izquierda) y líneas (derecha) en las telas no tejidas	39
Figura 4.15. TNT lisa (Faymask)	41
Figura 4.16. TNT calandrada (Made-in-China)	42
Figura 4.17. Proceso de calandrado (Freudenberg)	42
Figura 4.18. Diferentes tipos de TNT calandradas (ANDRITZ)	42
Figura 4.19. TNT plana y afelpada (Unixel)	43
Figura 4.20. Guata (Made-in-China)	44
Figura 4.21. Filtro de aire de tela no tejida (Colback Solutions)	47
Figura 4.22. Filtro de tela no tejida para limpieza de líquido en fabricación de semiconductores, tratamiento de aguas residuales o para el combustible/aceite de motor (KurarayKuraflex Co)	47
Figura 4.23. Diferentes tipos de apósitos y sus aplicaciones: a) Apósito adhesivo para heridas b) Venda tubular para dedos c) Venda elástica y antideslizante para muñeca (HuFriedy Group)	50
Figura 4.24. Paño quirúrgico de TNT absorbente con PE impermeable (HuFriedyGroup)	50
Figura 4.25. Andamios no tejidos en forma de red hechos por electrohilado (Hild et al., 2014)	52
Figura 4.26. Pañal de bebé y sus diferentes partes (EDANA).....	53
Figura 4.27. Toalla sanitaria y sus diferentes capas (EDANA).....	54
Figura 4.28. Ejemplo de sensores portátiles para medición de condiciones fisiológicas (Lin, 2021).....	55
Figura 4.29. Componentes de TNT en un automóvil (EGYPTEX Co)	58
Figura 4.30. TNT para protección de cultivos (EDANA)	59
Figura 4.31. Geotextiles no tejidos pesados que se utilizan a menudo como cojín de geomembrana (ACF Environmental, 2020)	61
Figura 4.32. Chaqueta hecha de TNT por personal de la Universidad de Leeds (Fashion with nonwovens, 2011)	62
Figura 4.33. Segmentos importantes de mercado de no tejidos según EDANA.....	63

Figura 5.1. Tasa de éxito de los prototipos de mascarilla quirúrgica probados, con detalles del tipo de mascarilla en el caso de las mascarillas conformes (que cumplieron con la norma) y el motivo del fracaso en el caso de las mascarillas no conformes (Boi et al., 2020)	66
Figura 5.2. Resultados de las mascarillas probadas de acuerdo con el número de capas (Boi et al., 2020)	66
Figura 5.3. Rendimiento de las 42 mascarillas quirúrgicas conformes de composición conocida a) Variación de la presión diferencial con el gramaje, b) Variación de la BFE con el gramaje (Boi et al., 2020).....	67
Figura 5.4. Efectos de la cantidad de polímero y del flujo de aire en el diámetro promedio de las fibras de PLA y PP meltblown a 15 cm de DCD. La cantidad de polímero por orificio fueron (a) 0.3 g/min y (b) 0.6 g/min, respectivamente (Mehran et al., 2020)	69
Figura 5.5. Efectos del diámetro de la fibra en la eficiencia de filtración (Mehran et al., 2020)	69
Figura 5.6. Efectos de las condiciones de procesamiento en la eficacia de la filtración (Mehran et al., 2020)	70
Figura 5.7. Penetración de partículas frente a la caída de presión (Mehran et al., 2020)	70
Figura 5.8. Factores de calidad (Mehran et al., 2020)	71
Figura 5.9. Rendimiento de filtración de las TNT de PLA y PP cargados con corona. El DCD fue de 15 cm. (a) Efecto del diámetro de la fibra en la eficacia de la filtración, (b) Penetración frente a caída de presión, y (c) Factores de calidad promedios de PLA y PP (Mehran et al., 2020)	71
Figura 5.10. Diagrama esquemático del (a) proceso de spunbond bicomponente, (b) refuerzo a través de aire, y (c) tratamiento de carga corona (Liu et al., 2019)	72
Figura 5.11. Diagrama esquemático de la fabricación de diferentes tipos de fibra bicomponente spunbond en un único orificio. (a) Fibra PP/PE, (b) Fibra PP/PE-M, (c) Fibra M-PP/PE, y (d) Fibra M-PP/PE-M. Las concentraciones de MgSt fueron todas del 0.4% en peso (Liu et al., 2019)	73
Figura 5.12. Morfología y diámetro de diferentes tipos de materiales. Imágenes SEM de (a) la superficie de materiales PP/PE y (b) sección transversal de materiales PP/PE. Imágenes SEM de la superficie y sección transversal de (c) PP/PE-M, (d) M-PP/PE, y (e) M-PP/PE-M. (f) Diámetro de la fibra (Liu et al., 2019)	73
Figura 5.13. (a) Rendimiento de la filtración en los materiales originales y (b) Rendimiento de la filtración tras la carga corona. Todas las pruebas se realizaron con un flujo de aire constante (Liu et al., 2019)	74
Figura 5.14. Eficiencia de filtración y caída de presión con varias concentraciones del agente nucleante (Liu et al., 2019)	75
Figura 5.15. Micrografías electrónicas de barrido de nanopartículas de plata sobre las mascarillas no tejidas; (a) melt-blown, (b) spun-bond (Ahrari et al., 2020)	75
Figura 5.16. Eficacia de la filtración bacteriana y limpieza microbiana de las mascarillas no tejidas tratadas y no tratadas (Ahrari et al., 2020)	76
Figura 5.17. Comparación del factor de reducción log ₁₀ y del porcentaje de reducción antiviral de diferentes muestras a 25 °C y 5 minutos de tiempo de contacto (Ahrari et al., 2020)	77

Figura 5.18. Diagrama del proceso de preparación del SiPR-MBNM (a); TNT SiPR-MBNM (b); imágenes SEM (c): morfología superficial del SiPR-MBNM y de la fibra SiPR-MBNM (c1-3), y morfología de la sección transversal de la fibra SiPR-MBNM (c4) (Zhang et al., 2023)	78
Figura 5.19. Imágenes térmicas infrarrojas del desempeño de aislamiento térmico de SiPR-MBNM de diferentes grosores (a); imagen térmica infrarroja desde la vista lateral de SiPR-MBNM de 4 mm (b); gráficos de curvas de aumento de temperatura para SiPR-MBNM-2 mm y SiPR-MBNM-4 mm (c), y gráficos de diferencia de temperatura con placa caliente (d); curvas de calentamiento y enfriamiento de SiPR-MBNM-2 mm (e); curvas de velocidad de liberación de calor de SiPR-MBNM y de la capa aislante comercial (f); gráfico comparativo del retardo a la flama de SiPR-MBNM y de una capa aislante comercial (g) (Zhang et al., 2023)	79
Figura 5.20. Componentes del guante (a); Prueba de aislamiento térmico del STPG (b); Diagrama de la variación de la temperatura interna del STPG con el tiempo de combustión (c); Diagrama de demostración por infrarrojos del rendimiento del aislamiento térmico del STPG (d) (Zhang et al., 2023)	80
Figura 5.21. Resultados de cultivos celulares en los días 1, 3, 7 y 14 (Gazzola et al., 2019)....	81
Figura 5.22. Fotografías SEM de las 8 muestras (Dzierzkowska et al., 2021).....	82
Figura 5.23. Diámetro de las fibras frente a) la temperatura del aire y b) la diferencia entre la temperatura del aire y del cabezal (Dzierzkowska et al., 2021).....	83
Figura 5.24. Microfotografías SEM de queratinocitos extendidos sobre las TNT meltblown el día 7 del cultivo. La flecha indica queratinocitos aplanados sobre fibras o migrando a fibras adyacentes (Dzierzkowska et al., 2021).	84
Figura 5.25. Microfotografías SEM de macrófagos extendidos sobre las TNT meltblown el día 7 del cultivo. La flecha indica macrófagos aplanados sobre la superficie de las fibras (Dzierzkowska et al., 2021).....	84
Figura 5.26. Contracción térmica del material no tejido tras la inmersión en agua caliente (100 °C): a) antes del proceso de estabilización térmica y b) después del proceso de estabilización térmica (Walczak et al., 2017).....	86
Figura 5.27. Experimento de espirales estudiado en la TNT PLLA:α-PHB a) Forma inicial (forma permanente) $T < T_g$ b) Forma secundaria (forma temporal) $T > T_g$ y $T < 0^\circ\text{C}$ c) forma final (forma permanente) $T > T_g$ (Walczak et al., 2017).	86

9. Referencias

- ACF Environmental. (2020). Medium & Heavyweight Nonwoven Geotextiles. <https://acfenvironmental.com/products/geosynthetics/geotextile/med-hw-non-woven/>
- Ahrari, M., Karahan, M., Hussain, M., Nawab, Y., Khan, A., & Shirazi, A. A. (2020). Razvoj protibakterijskih in protivirusnih netkanih kirurških mask za medicinske namene. *Tekstilec*, 65(2), 135–146. <https://doi.org/10.14502/tekstilec.65.2022020>
- Ajmeri, J. R., & Ajmeri, C. J. (2010). Nonwoven personal hygiene materials and products. *Applications of Nonwovens in Technical Textiles*, 85–102. doi:10.1533/9781845699741.2.85
- Ajmeri, J. R., & Ajmeri, C. J. (2016). Developments in nonwoven materials for medical applications. *Advances in Technical Nonwovens*, 227–256. doi:10.1016/b978-0-08-100575-0.00008-5
- Albrecht, W., Fuchs, H., & Kittelmann, W. (2006). *Nonwoven Fabrics: Raw Materials, Manufacture, Applications, Characteristics, Testing Processes*. Wiley.
- Baby Diapers. (s. f.). Default. <https://www.edana.org/nw-related-industry/nonwovens-in-daily-life/absorbent-hygiene-products/baby-diapers>
- Basmage, O. M., & Hashmi, M. S. J. (2019). Plastic Products in Hospital and Healthcare Systems. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. doi:10.1016/b978-0-12-803581-8.11303-7
- Bhat, G., & Malkan, S. (2007). Polymer-laid web formation. *Handbook of Nonwovens*, 143-200. <https://doi.org/10.1533/9781845691998.143>
- Bhat, G., & Parikh, D. V. (2010). Biodegradable materials for nonwovens. *Applications of Nonwovens in Technical Textiles*, 46–62. doi:10.1533/9781845699741.1.46
- Burkinshaw, S. M., Hewitt, A. D., Blackburn, R. S., & Russell, S. J. (2012). The dyeing of nonwoven fabrics part 1: Initial studies. *Dyes and Pigments*, 94(3), 592–598. doi:10.1016/j.dyepig.2011.09.011
- Butin R R, Keller J P and Harding J W (1974), 'Nonwoven mats by melt blowing', US Patent No. 3849241, November 19.
- C. Boi, F. Borsetti, T.M. Brugo, M. Cappelletti, M.G. De Angelis, S. Fedi, S. Di Giacomo, T. Fabiani, G. Foli, A. Garelli, U. Genchi, D. Ghezzi, C. Gualandi, E. Lalli, M. Magnani, A. Maurizzi, F. Mazzi, N. Mehrabi, M. Minelli, R. Montalbano, L. Morelli, S. Nici, R. Onesti, A. Paglianti, K. Papchenko, S. Pappalardo, N.F. Parisi, S. Rapino, M. Reggio, M. Roselli, E. Ruggeri, L. Sabatini, E. Saracino, G.E. Scarponi, L. Serra, V. Signorini, A. Storione, M. Torsello, E. Tugnoli, C.M. Vargiu, G. Vidali, F.S. Violante (2022). One year of surgical mask testing at the University of Bologna labs: Lessons learned from data analysis, *Separation and Purification Technology*, Volume 294. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121180>

- Calhoun, A. (2016). Polypropylene. Multilayer Flexible Packaging, 35–45. doi:10.1016/b978-0-323-37100-1.00003-x
- Çelikel, D. C., & Babaarslan, O. (2017). Effect of Bicomponent Fibers on Sound Absorption Properties of Multilayer Nonwovens. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 12(4), 155892501701200. <https://doi.org/10.1177/155892501701200403>
- Chan, C. H., Chen, J. T., Farrell, W. S., Fellows, C. M., Keddie, D. J., Luscombe, C. K., Matson, J. B., Merna, J., Moad, G., Russell, G. T., Théato, P., Topham, P. D. & Sosa Vargas, L. (2022). Reconsidering terms for mechanisms of polymer growth: the “step-growth” and “chain-growth” dilemma. *Polymer Chemistry*, 13(16), 2262-2270. <https://doi.org/10.1039/d2py00086e>
- Chang, L., Zhou, Y., Dai, K., Jiang, L., Jerrams, S., Ma, J., & Chen, S. (2022). The effect of process parameters on the properties of elastic melt blown nonwovens: Air pressure and DCD. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(2). <https://doi.org/10.1002/app.53308>
- Chapman, R. (2004). Nonwoven Fabrics, Staple Fibers. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. <https://doi.org/10.1002/0471440264.pst501>
- Chen, J. (2010). Nonwoven textiles in automotive interiors. *Applications of Nonwovens in Technical Textiles*, 184-201. <https://doi.org/10.1533/9781845699741.2.184>
- Chiluka, P. (2015). Effects Of Non-Uniformity On Trough Instability In Nonwovens [Master of Science]. Osmania University.
- Colback Solutions. (2020). Air filter carrier – creating stable pleats with Colback. <https://www.colbacksolutions.com/applications-industries/filtration-applications/air-filter-carrier/>
- Collier, B. J. (2010). Nonwovens in specialist and consumer apparel. *Applications of Nonwovens in Technical Textiles*, 120–135. doi:10.1533/9781845699741.2.120
- Cools, P., Morent, R., & De Geyter, N. (2015). Plasma Modified Textiles for Biomedical Applications. *Advances in Bioengineering*. doi:10.5772/59770
- Damant GH (1996), ‘Use of barriers and fire blocking layers to comply with full-scale fire tests for furnishings’, *Journal of Fire Sciences*, 14(1), 3–25.
- Dolez, P. I., Marsha, S., & McQueen, R. H. (2022). Fibers and Textiles for Personal Protective Equipment: Review of Recent Progress and Perspectives on Future Developments. *Textiles*, 2(2), 349-381. <https://doi.org/10.3390/textiles2020020>
- Du, D., Li, P., & Ouyang, J. (2016). Graphene coated nonwoven fabrics as wearable sensors. *Journal of Materials Chemistry C*, 4(15), 3224–3230. doi:10.1039/c6tc00350h
- Duquesne, S., & Bourbigot, S. (2010). Flame retardant nonwovens. *Applications of Nonwovens in Technical Textiles*, 65-84. <https://doi.org/10.1533/9781845699741.2.65>
- Dzierzkowska, E., Scisłowska-Czarnecka, A., Kudzin, M., Boguń, M., Szatkowski, P., Gajek, M., Kornaus, K., Chadzinska, M., & Stodolak-Zych, E. (2021). Effects of Process Parameters on Structure and Properties of Melt-Blown Poly(Lactic Acid) Nonwovens

- for Skin Regeneration. *Journal of Functional Biomaterials*, 12(1), 16. <https://doi.org/10.3390/jfb12010016>
- Ebewe, R. O. (2000). *Polymer Science and Technology*. Amsterdam University Press.
 - EGYPTEX Co. (s. f.). <http://www.egyptex.com/Automotive.html>
 - FASHION WITH NONWOVENS. (2011) <http://www.nonwovensnetwork.com/fashion/2011/index.html>
 - Feminine Care. (s. f.). Default. <https://www.edana.org/nw-related-industry/nonwovens-in-daily-life/absorbent-hygiene-products/feminine-care>
 - For Liquid filtration media | KurarayKuraflex Co., Ltd. (s. f.). <https://www.kuraflex.com/english/nonwoven/filters/liquid-filters/>
 - Gao, Q., Lauster, T., Kopera, B. A. F., Retsch, M., Agarwal, S., & Greiner, A. (2021). Breathable and Flexible Dual-Sided Nonwovens with Adjustable Infrared Optical Performances for Smart Textile. *Advanced Functional Materials*, 32(5), 2108808. <https://doi.org/10.1002/adfm.202108808>
 - García Ibarra, V., Sendón, R., & Rodríguez-Bernaldo de Quirós, A. (2016). Antimicrobial Food Packaging Based on Biodegradable Materials. *Antimicrobial Food Packaging*, 363-384. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-800723-5.00029-2>
 - Garg, K., Sell, S. A., & Bowlin, G. L. (2009). Electrospinning and its influence on the structure of polymeric nanofibers. *Handbook of Textile Fibre Structure*, 460–483. doi:10.1533/9781845696504.2.460
 - Gazzola, W. H., Benson, R. S., & Carver, W. (2019). Meltblown Polylactic Acid Nanoweb as a Tissue Engineering Scaffold. *Annals of Plastic Surgery*, 83(6), 716-721. <https://doi.org/10.1097/sap.0000000000002036>
 - Geus, H.-G. (2016). Developments in manufacturing techniques for technical nonwovens. *Advances in Technical Nonwovens*, 133–153. doi:10.1016/b978-0-08-100575-0.00005-x
 - Ghosh, S. (2014). Composite nonwovens in medical applications. *Composite Non-Woven Materials*, 211–224. doi:10.1533/9780857097750.211
 - Gong, R. H. (2011). *Specialist Yarn, Woven and Fabric Structures: Developments and Applications*. Elsevier Gezondheidszorg.
 - Goswami, P., & O’Haire, T. (2016). Developments in the use of green (biodegradable), recycled and biopolymer materials in technical nonwovens. *Advances in Technical Nonwovens*, 97–114. doi:10.1016/b978-0-08-100575-0.00003-6
 - Gregor E C (2004), ‘Versatile nonwoven filtration media’, *Allgemeiner Vliesstoffreport*, 2, 26–27.
 - Harris, F. W. (1981). Introduction to polymer chemistry. *Journal of Chemical Education*, 58(11), 837. <https://doi.org/10.1021/ed058p837>
 - Hartl, Helmut, Dr., Newkirk, David, D., Novarino, Elena. (2014, 24 enero). Meltblown nonwoven web comprising recycled polypropylene component and recycled

sustainable polymer component and method of making the same.
<https://patents.google.com/patent/JP6297719B2/en>

- Hild, M., Brünler, R., Jäger, M., Laourine, E., Scheid, L., Haupt, D., Aibibu, D., Cherif, C., & Hanke, T. (2014). Net Shape Nonwoven: a novel technique for porous three-dimensional nonwoven hybrid scaffolds. *Textile Research Journal*, 84(10), 1084-1094. <https://doi.org/10.1177/0040517513515315>
- Hocking, M. B. (2005). Condensation (Step-Growth) Polymer Theory. *Handbook of Chemical Technology and Pollution Control*, 669–688. doi:10.1016/b978-012088796-5/50023-5
- Hoda, N., Mert, F., Kara, F., Atasagun, H. G., & Bhat, G. S. (2021). Effect of Process Parameters on Fiber Diameter and Fiber Distribution of Melt-Blown Polypropylene Microfibers Produced by Biax Line. *Fibers and Polymers*, 22(1), 285-293. <https://doi.org/10.1007/s12221-021-9155-5>
- Hutten, I. (2016). Processes for Nonwoven Filter Media. En *Handbook of Nonwoven Filter Media* (pp. 195-244). Butterworth-Heinemann.
- J. Brady, T. Dürig, P.I. Lee, J.-X. Li (2017). *Polymer Properties and Characterization Chapter 7*.
- Jafari, M., Shim, E., & Joijode, A. (2021). Fabrication of Poly(lactic acid) filter media via the meltblowing process and their filtration performances: A comparative study with polypropylene meltblown. *Separation and Purification Technology*, 260, 118185. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118185>
- Jiangsu Tiandi Chemical Fibre Co Ltd. (2012). High-efficiency cleaning and maintenance method of spinning assembly (Patent N.o CN103305929A). <https://patents.google.com/patent/CN103305929A/en>
- John Vlachopoulos, David Strutt. (2016). *Rheology of Molten Polymers*.
- Kandagor V, Prather D, Fogle J, Bhave R, Bhat G (2017) Processing, Structure and Properties of Melt Blown Polyetherimide. *J Textile Sci Eng* 6: 298. doi: 10.4172/2165-8064.1000298
- Kant, R., Chauhan, P. S., Patel, V. K., & Bhattacharya, S. (2022). Introduction to the Fabrication of Polymers and Polymeric Composites. *Trends in Fabrication of Polymers and Polymer Composites*, 1-10. https://doi.org/10.1063/9780735423916_001
- Kulkarni, G. S. (2018). Introduction to Polymer and Their Recycling Techniques. *Recycling of Polyurethane Foams*, 1–16. doi:10.1016/b978-0-323-51133-9.00001-2
- Kupolati, W. K., Sadiku, E. R., Ibrahim, I. D., Adeboje, A. O., Kambole, C., Ojo, O. O. S., ... Ndambuki, J. M. (2017). The use of polyolefins in geotextiles and engineering applications. *Polyolefin Fibres*, 497–516. doi:10.1016/b978-0-08-101132-4.00016-3
- Leucker, Karsten. (2020). Influence of the calender pattern on the mechanical properties of polypropylene spunbond nonwovens.
- Li, D., Wang, Y., & Xia, Y. (2003). Electrospinning of Polymeric and Ceramic Nanofibers as Uniaxially Aligned Arrays. *Nano Letters*, 3(8), 1167–1171. doi:10.1021/nl0344256

- Li, S.-C., Li, B., & Qin, X.-M. (2012). Properties of LLDPE Film Modified by LDPE. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 51(3), 307–310.
- Lim, H. (2010). A review of spun bond process. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, 6(3), 1-13.
- Lin, R. (2021). A DIY approach to wearable sensor networks. *Nature*. https://www.nature.com/articles/s41928-021-00674-x?error=cookies_not_supported&code=6add6c5-67a2-4fc6-b471-488221998852
- Liu, J., Zhang, H., Gong, R. H., Zhang, X., Wang, Y., & Jin, X. (2019). Polyethylene/polypropylene bicomponent spunbond air filtration materials containing magnesium stearate for efficient fine particle capture. *ACS Applied Materials & Interfaces*. doi:10.1021/acsami.9b13162
- Luo, B., & Choong, C. (2015). Porous bumin scaffolds, with tunable properties: a resourceefficient biodegradable material for tissue engineering applications. *Journal of Biomaterials Applications*, 29(6), 903e911.
- Maier, C., & Calafut, T. (1998). *Chemistry. Polypropylene*, 3–9. doi:10.1016/b978-188420758-7.50006-0
- Mao, N., & Russell, S. J. (2015). Fibre to Fabric. *Textiles and Fashion*, 307–335. doi:10.1016/b978-1-84569-931-4.00013-1
- Materials. (s. f.). https://www.mdpi.com/journal/materials/special_issues/Structure_Property_Relationship_Polymeric_Materials
- Matthis, S. (2021). ProJet provides technical service Fitesa s.r.l., Trezzano Rosa, Italy. *PULPAPERnews.com*. <https://www.pulpapernews.com/20210901/12828/projet-provides-technical-service-fitesa-srl-trezzano-rosa-italy>
- Meehan, S. J., Sankey, S. W., Jones, S. M., MacDonald, W. A., & Colquhoun, H. M. (2014). Cocrystalline Copolyimides of Poly(ethylene 2,6-naphthalate). *ACS Macro Letters*, 3(10), 968-971. <https://doi.org/10.1021/mz500357z>
- Michler, G. H. (2015). Semicrystalline Polymers. *Atlas of Polymer Structures*, 121–222. doi:10.3139/9781569905586.005
- Midha VK, Dakuri A. Spun bonding technology and fabric properties: a review. *J Textile Eng Fashion Techno*. 2017;1(4):126-133. DOI: 10.15406/jteft.2017.01.00023
- Moyo, D., Patanaik, A., & Anandjiwala, R. D. (2013). Process control in nonwovens production. *Process Control in Textile Manufacturing*, 279–299. doi:10.1533/9780857095633.3.279
- Mukhopadhyay, S. (2014). Natural and synthetic fibres for composite nonwovens. *Composite Non-Woven Materials*, 20–29. doi:10.1533/9780857097750.20
- Naka, K. (2015). Monomers, Oligomers, Polymers, and Macromolecules (Overview). *Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials*, 1295-1300. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29648-2_237
- Namazi, H. (2017). Polymers in our daily life. *BiolImpacts*, 7(2), 73-74. <https://doi.org/10.15171/bi.2017.09>

- News. (s. f.). Default. <https://www.edana.org/about-us/news/new-report-forecasts-excellent-worldwide-outlook-for-nonwovens-through-2023>
- Nonwoven Fabrics Market Share Analysis Report, 2020. (s. f.). <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/nonwoven-fabrics-market>
- Nonwovens in agriculture and horticulture. (s. f.). Default. <https://www.edana.org/nw-related-industry/nonwovens-in-daily-life/agriculture-and-horticulture>
- Nonwovens in clothing and footwear. (s. f.). Default. <https://www.edana.org/nw-related-industry/nonwovens-in-daily-life/clothing-and-footwear>
- OMNIA PAÑOS QUIRÚRGICOS. (s. f.). HuFriedy Group. <https://hufriedygroup.eu/es/omnia-panos-quirurgicos>
- PFFC (2011.). Web Handling: Top 7 Causes of Wrinkles. <https://pffc-online.com/web-handling/9810-web-handling-top-7-causes-wrinkles-1010>
- Pourmohammadi, A. (2013). Nonwoven materials and joining techniques. *Joining Textiles*, 565–581. doi:10.1533/9780857093967.4.565
- Russell, S. (2007). *Handbook of nonwovens*. Taylor & Francis.
- Sadeghi, B., Marfavi, Y., AliAkbari, R., Kowsari, E., Borbor Ajdari, F., & Ramakrishna, S. (2021). Recent Studies on Recycled PET Fibers: Production and Applications: a Review. *Materials Circular Economy*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s42824-020-00014-y>
- Sastri, V. R. (2010). Commodity Thermoplastics. *Plastics in Medical Devices*, 73-119. <https://doi.org/10.1016/b978-0-8155-2027-6.10006-6>
- Shrivastava, A. (2018). Polymerization. *Introduction to Plastics Engineering*, 17–48. doi:10.1016/b978-0-323-39500-7.00002-2
- Singh, R., Fraternali, F., Farina, I., & Hashmi, M. S. J. (2018). Experimental Investigations for Development of Hybrid Feed Stock Filament of Fused Deposition Modeling. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. doi:10.1016/b978-0-12-803581-8.10392-3
- Smith, P. A. (2000). Technical fabric structures – 3. Nonwoven fabrics. *Handbook of Technical Textiles*, 130–151. doi:10.1533/9781855738966.130
- Smith, P. A. (2000). Technical fabric structures – 3. Nonwoven fabrics. *Handbook of Technical Textiles*, 130–151. doi:10.1533/9781855738966.130
- The Effect of Long Term Thermal Exposure on Plastics and Elastomers. (2014). *Polyolefins, Polyvinyls, and Acrylics*. <https://doi.org/10.1016/c2013-0-00091-6>
- Tuladhar, R., & Yin, S. (2019). Production of recycled polypropylene (PP) fibers from industrial plastic waste through melt spinning process. *Use of Recycled Plastics in Eco-Efficient Concrete*, 69–84. doi:10.1016/b978-0-08-102676-2.00004-9
- Typical Defects. (s. f.). WINTRISS. <https://www.weco.com/nonwoven>
- Wagner, J. R., Mount, E. M., & Giles, H. F. (2014). Polymer Structure. *Extrusion*, 225–232. doi:10.1016/b978-1-4377-3481-2.00019-3
- Walczak, J., Sobota, M., Chrzanowski, M., & Krucinska, I. (2017). Application of the melt-blown technique in the production of shape-memory nonwoven fabrics from a blend

- of poly(L-lactide) and atactic poly[(R,S)-3-hydroxy butyrate]. *Textile Research Journal*, 88(18), 2141-2152. <https://doi.org/10.1177/0040517517716906>
- Web bonding. (s. f.). Freudenberg Performance Materials. <https://www.freudenberg-pm.com/Materials/Webbonding>
 - What are polymers? (2017, 7 junio). IUPAC | International Union of Pure and Applied Chemistry. <https://iupac.org/polymer-edu/what-are-polymers/>
 - Wilson, A. (2010). The formation of dry, wet, spunlaid and other types of nonwovens. *Applications of Nonwovens in Technical Textiles*, 3-17. <https://doi.org/10.1533/9781845699741.1.3>
 - Wolf, W. E. (1980). On-line Inspection For Nonwoven Fabrics. *Optics in Metrology and Quality Assurance*. doi:10.1117/12.958596
 - World Textile Publications Ltd (1999), 'Changing landscape: notable developments in the automotive sector', *Nonwovens Report International*, July 340, 34–37.
 - www.technicaltextile.net. (s. f.). Speakable Content. <https://www.technicaltextile.net/articles/global-nonwovens-recent-trends-and-future-7939>
 - Yan, Z. Y., Liu, J. Y., & Niu, J. R. (2021). Research of a Novel Ag Temperature Sensor Based on Fabric Substrate Fabricated by Magnetron Sputtering. *Materials*, 14(20), 6014. <https://doi.org/10.3390/ma14206014>
 - Yu, Q., Su, C., Bi, S., Huang, Y., Li, J., Shao, H., Jiang, J., & Chen, N. (2022). Ti3C2Tx@nonwoven Fabric Composite: Promising MXene-Coated Fabric for Wearable Piezoresistive Pressure Sensors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14(7), 9632-9643. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c00980>
 - Zengbo, X. (2020). A method for inspecting the cleanliness of spinneret holes. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 15, 155892502098014. <https://doi.org/10.1177/1558925020980147>
 - Zhang, L., Wu, J., Yang, X., Di, Y., & Zhuang, X. (2023). Melt-blowing of silicane-modified phenolic fibrous mat for personal thermal protection. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 663, 131076. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131076>
 - Zobel, S., & Gries, T. (2010). The use of nonwovens as filtration materials. *Applications of Nonwovens in Technical Textiles*, 160-183. <https://doi.org/10.1533/9781845699741.2.160>