



# Inescop

Shaping the future  
of footwear

EXPEDIENTE	IMDEEA/2024/45
ACRÓNIMO	DIS4REC
PROGRAMA	Proyectos de I+D en colaboración con empresas 2024
TÍTULO DEL PROYECTO	TECNOLOGÍA DE DESENSAMBLADO DE CALZADO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE SU PROCESO DE RECICLAJE

## Entregable E.2.1

### INFORME DEL ESTADO DEL ARTE SOBRE ENSAMBLADO Y FORMAS DE RECICLAJE DE CALZADO

## Índice

1. Introducción.....	3
2. Reciclaje de calzado en la industria.....	3
2.1. Evolución del reciclaje en la historia .....	4
2.2. Reciclaje en la industria.....	5
2.3. Alternativas actuales.....	7
3. La fabricación de calzado: Ensamblado.....	11
3.1. Materiales .....	13
3.2. Tipos de ensamblado .....	15
3.3. Adhesivos.....	16
4. Desensamblado de calzado.....	17
4.1. Ecodiseño.....	17
4.2. Adhesivos desmontables.....	18
5. Conclusiones .....	20

## 1. Introducción

El objetivo principal del proyecto DIS4REC es optimizar el proceso de reciclaje del calzado mediante la introducción de técnicas de desensamblado que buscan separar los materiales básicos de manera efectiva para aumentar la pureza de los resultados de los procesos de reciclaje posteriores.

Para lograr este objetivo, es esencial adquirir conocimientos sobre diferentes aspectos relacionados entre sí. El primer paso consiste en revisar el estado actual de la técnica en cada uno de estos temas. A partir de esta revisión, se puede iniciar el desarrollo de manera óptima y centrada en los puntos clave para el correcto avance del proyecto.

Entre los puntos a estudiar se encuentran las diversas vías de reciclaje de calzado disponibles, así como las iniciativas alineadas con las políticas actuales y futuras.

Dado que el objetivo es separar los materiales del zapato, es fundamental entender cómo se ensamblan para poder descomponerlos eficientemente. Por ello, se explorarán las diferentes técnicas de ensamblado utilizadas en los distintos tipos de calzado.

Otro aspecto que se tratará es el uso de tecnologías como sistemas de visión e inteligencia artificial (IA), que serán clave en el desarrollo del proyecto.

Este proyecto se basa, además, en el conocimiento adquirido por el equipo en proyectos anteriores y en los avances desarrollados en otros proyectos de investigación y, durante su curso, se llevarán a cabo la investigación específica y el desarrollo necesarios para obtener los mejores resultados posibles.

En primera instancia, el examen del estado del arte de las diferentes áreas implicadas en el proyecto es fundamental para su éxito. A continuación, se realizará una exploración de los métodos del ensamblado de calzado, la historia del reciclaje del calzado, las técnicas de reciclaje aplicables y los sistemas de visión e IA que pueden ser implementados para la resolución de la tarea propuesta.

## 2. Reciclaje de calzado en la industria

El calzado es un bien de consumo cuyo ciclo de vida se ve afectado por diversos condicionantes que van más allá de su durabilidad como producto, debido a su carácter estacional y a estar regido por los dictados de la moda.

Teniendo en cuenta que, según las últimas estadísticas, se generan anualmente más de 22.000 millones de pares de zapatos, parece obvio considerar que la cantidad de residuos generados por este producto será elevada, lo que lleva a pensar en la necesidad de un buen proceso de reciclado asociado con ellos.

Sin embargo, las mismas estadísticas consultadas arrojan datos poco alentadores ya que menos de un 5% de los pares de zapatos producidos anualmente se reciclan de forma adecuada, mientras en 95% restante va directamente a vertederos o es incinerado, con el consiguiente atentado medioambiental que esto supone.



Fig. 1. Esquema de calentamiento por inducción

Pero el problema del reciclado del calzado radica, precisamente, en la complejidad del producto. El objetivo del reciclaje es la recolección y transformación de materiales, generalmente procedentes de productos usados, para convertirlos en nuevos productos que, en ocasiones, se convierten de nuevo en materias primas del mismo tipo, que vuelven a reintroducirse en los mismos canales de producción, pero otras veces, dan lugar a un objeto diferente del mismo material o, incluso, los materiales se descomponen para generar cosas muy diferentes. Obviamente, cuanto más cerca se esté del primer planteamiento, mayor es la valorización del producto resultante y la clave radica en el grado de pureza que puede obtenerse en los materiales procedentes del reciclado.

## 2.1. Evolución del reciclaje en la historia

El reciclaje de calzado tiene sus raíces en la prehistoria, donde más que reciclar, se enfocaba en reutilizar. Las pieles y fibras vegetales se aprovechaban para fabricar y reparar este producto esencial. En la Edad Media, el calzado adquirió un gran valor y se reparaba regularmente para mantenerlo en buen estado.

Con la revolución industrial, tanto la producción como el consumo de calzado crecieron de manera notable, aunque el reciclaje se convirtió en una práctica escasa y puntual. Además, la diversificación de modelos y la incorporación de nuevos materiales, muchos derivados del petróleo y con baja biodegradabilidad, dificultaron aún más los procesos de reciclaje de calzado.

En la década de 1970, coincidiendo con el auge del movimiento ambientalista, comenzaron a surgir iniciativas para reciclar calzado. Más tarde, en los años 90, la creciente conciencia sobre el impacto ambiental de este producto impulsó el desarrollo de nuevas tecnologías orientadas al reciclaje. Una de las políticas clave que respaldaron estas iniciativas fue la Declaración de Río 92 sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, llevada a cabo en el marco de Naciones Unidas, marcando diversos patrones de comportamiento con el objetivo de conseguir un desarrollo sostenible del planeta.

Sin embargo, en esa misma década, emergió el fenómeno conocido como “fast fashion”, caracterizado por producciones masivas, especialmente en los sectores textil y del calzado, que promovían un consumo desenfrenado sin considerar la reutilización de los

productos. Esta tendencia resultó en grandes cantidades de excedentes y desechos difíciles de reciclar, contribuyendo a la acumulación constante de residuos en vertederos, tanto de calzado como de otros artículos relacionados con la industria de la moda.

## 2.2. Reciclaje en la industria

Actualmente, un diverso número de empresas trabajan en implementar programas de reciclaje de calzado y gestión de residuos de producciones masivas, las cuales generan cantidades ingentes de desechos. Dichas iniciativas son fortalecidas por las políticas y regulaciones que destacan la importancia de la Responsabilidad Ampliada del Productor (RAP), como la Ley española 7/2022 del 8 de abril de residuos y suelos contaminados para una economía circular. Además, la creciente conciencia social sobre cuestiones ambientales impulsa la demanda de productos sostenibles por parte de los consumidores, lo que a su vez motiva a las empresas a desarrollar tecnologías que mejoren los procesos de producción, los materiales empleados y, finalmente, los métodos de reciclaje al término de la vida útil del calzado.

En vistas de la situación actual, resulta esencial integrar el reciclaje como una etapa fundamental del ciclo de vida de los productos de consumo. Este proceso debe enfocarse en reducir al máximo los residuos generados y en reintegrar materiales a diferentes cadenas productivas, sean o no estas partes del mismo sector, fomentando así la simbiosis industrial. El modelo de la mariposa de circularidad, desarrollado por la Fundación Ellen MacArthur, ilustra cómo el reciclaje contribuye a un esquema más sostenible de producción y consumo:

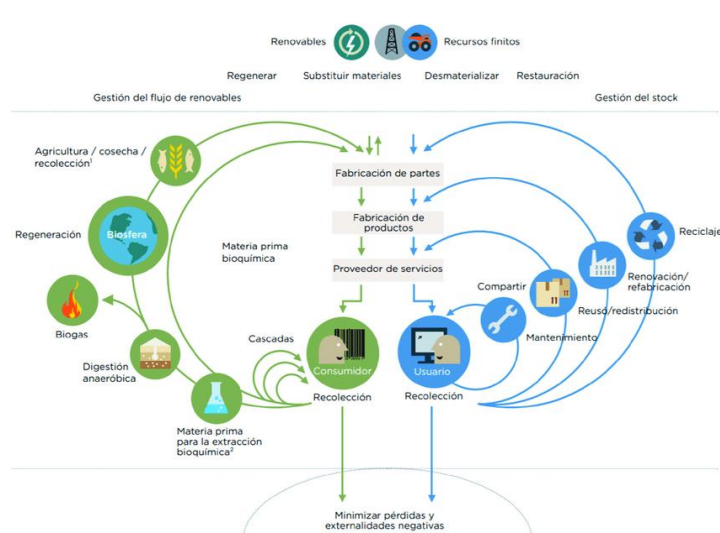


Fig. 2. Modelo de la mariposa de circularidad. Fundación Ellen McArthur

Entre las empresas que han comenzado a adoptar este tipo de medidas, la mayoría se centra en tipos específicos de calzado que, desde su diseño, materiales o procesos de fabricación, están concebidos para facilitar el reciclaje y priorizar la sostenibilidad. Sin embargo, el reciclaje de calzado ya existente, tanto pre como post-consumo, sigue siendo extremadamente complicado, con una reciclabilidad prácticamente nula. En

resumen, aunque se han logrado algunos avances puntuales, la situación sigue siendo alarmante debido a las dificultades inherentes al reciclaje de este producto y a la complicada valorización del material reciclado.

Algunos de los métodos de reciclaje que se utilizan para calzado y otros componentes en la actualidad son:

#### 1. Desensamblado manual:

- Aunque es poco eficiente, este método consiste en descomponer el calzado manualmente para separar materiales específicos. Es común en talleres pequeños, pero su aplicación industrial está limitada debido a los altos costos de mano de obra y el tiempo requerido.

#### 2. Reciclaje químico:

- Este método busca descomponer materiales específicos, como polímeros, mediante el uso de solventes o procesos térmicos que los convierten en sus compuestos base. Aunque puede resultar eficiente con materiales aislados, no resuelve el problema de la combinación presente en el calzado. Algunos ejemplos incluyen:
  - Despolimerización: Transformación de materiales como poliuretano en sus monómeros originales para reutilizarlos en la fabricación de nuevos productos.
  - Pirólisis: Uso de calor en ausencia de oxígeno para descomponer materiales como caucho y obtener productos utilizables, como aceites o gases.

#### 3. Reciclaje térmico o energético:

- Algunos componentes del calzado, como ciertos plásticos y cauchos, se utilizan como combustible en plantas de energía. Aunque no es un método sostenible, evita el vertido de residuos. Sin embargo, este enfoque no aborda la reutilización de materiales y no es compatible con los principios de economía circular.

#### 4. Trituración y clasificación mecánica:

- Este es el método más común, que consiste en triturar el zapato completo y separar los materiales mediante procesos mecánicos basados en propiedades físicas como densidad, tamaño o magnetismo. Aunque es ampliamente utilizado, tiene limitaciones significativas:
  - a. **Alta contaminación de materiales:** La mezcla de componentes durante la trituración resulta en materiales reciclados con un alto nivel de impurezas, reduciendo su valor y aplicaciones potenciales.
  - b. **Baja valorización:** Los productos resultantes suelen ser de calidad inferior y limitan su reutilización en aplicaciones de mayor valor.

Sin embargo, en general, estos métodos son poco sostenibles y no permiten revalorizar ni reutilizar el material obtenido excepto en el reciclaje mecánico, el cual se encuentra poco desarrollado.

### 2.3. Alternativas actuales

En esta línea, desde INESCOP se llevó a cabo el proyecto CIRCULAR INDUSTRY CV (Nº Expediente: IMIDEC/2019/18)) junto con otros dos centros tecnológicos, desarrollando un prototipo de planta industrial de reciclaje de calzado, juguete y textil. EL funcionamiento de esta planta se basa en el triturado de los distintos objetos y la separación de los componentes que forman estos objetos mediante diversos métodos mecánicos encadenados.



Fig. 3. Planta piloto demostrativa CIRCULAR INDUSTRY CV

La planta, como se observa en la figura 4, se diseñó de manera modular, estando compuesta por distintas fases conectadas entre sí para cada uno de los pasos para la separación de los componentes.

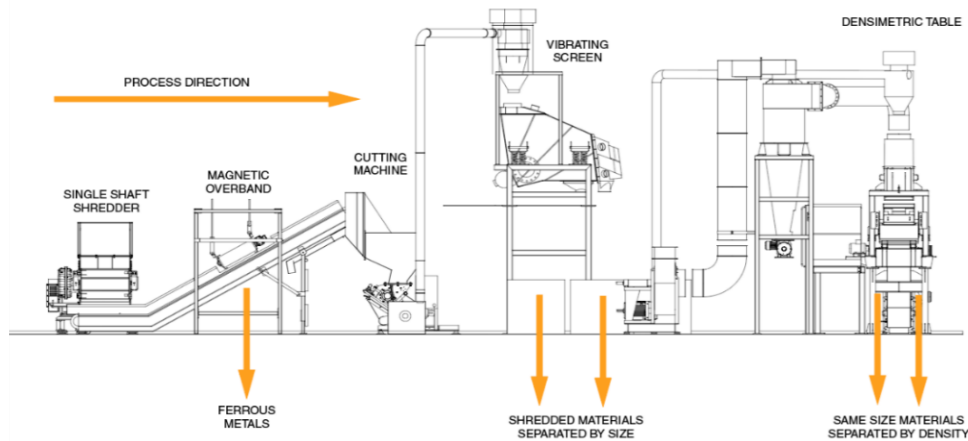


Fig. 4. Esquema planta piloto circular Industry

Para diferenciar los componentes se utilizan separadores magnéticos, de inducción, de clasificación volumétrica, densimétrica y basados en visión (RGB) para la separación mediante color para una mejor valorización posterior del material. En la tabla 1 se observan las diferentes etapas que componen la planta, la tecnología que utilizan y el material que reciben y expulsan.

DEMOSTRADOR DESARROLLADO (CIRCULAR INDUSTRY CV)			
ETAPA	TECNOLOGÍA	MATERIAL DE ENTRADA	MATERIAL DE SALIDA
TRITURADO (I)	DESGARRADOR 1 EJE	Residuos clasificados	Residuos triturados

<b>SEPARACIÓN (I)</b>	OVERBAND MAGNÉTICO + TAMBOR IMANTADO	Residuos triturados	Metales ferrosos
<b>TRITURADO (II)</b>	MOLINO DE REFINO	Otros materiales	Partículas de residuo pequeñas
<b>SEPARACIÓN (II)</b>	CRIBA VIBRATORIA	Partículas de residuo separadas por tamaño	Partículas de residuo separadas por tamaño
	SISTEMA DE SEPARACIÓN POR ASPIRACIÓN	Partículas de residuo pequeñas	Partículas de residuo separadas por peso
	MESA DENSIMÉTRICA	Partículas de residuo separadas por peso	Partículas de residuo separadas por densidad específica del material
	VISIÓN ARTIFICIAL RGB	Partículas de residuo separadas por tamaño y por densidad	Partículas de residuo separadas por colores

Tabla 1. Definición etapas planta piloto

El proceso de separación de los componentes comienza triturando los residuos (ya sean pre-consumo o post-consumo) en porciones manipulables mediante un desgarrador de un eje. Este desgarrador funciona mediante un rodillo con cuchillas muy resistentes que va girando mientras un empujador va acercándole los residuos para que este vaya rompiendo pequeños trozos de estos.

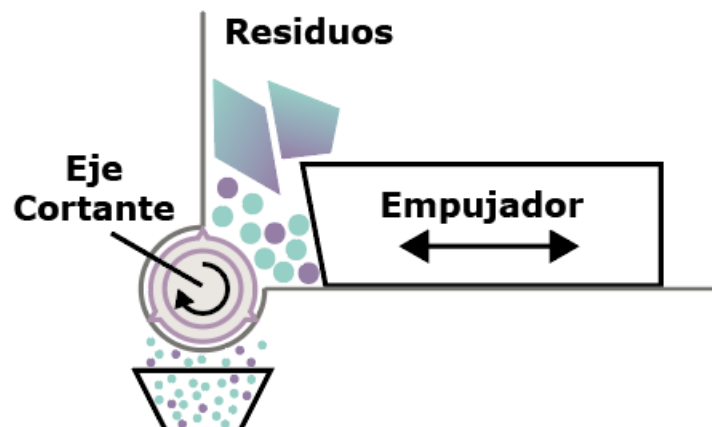


Fig. 5. Sistema de triturado y esquema del proceso

Estos trozos de material reciclado se depositan sobre una cinta transportadora que los lleva al siguiente módulo, consistente en un overband magnético que elimina los



materiales ferrosos para ser reciclados a parte y, así, evitar daños en la maquinaria posterior que dispone de cuchillas delicadas que sufrirían graves daños si se introdujeran elementos metálicos en ellas.



Fig. 6. Proceso de separación de metales ferrosos

Una vez limpio de metales ferrosos, el residuo para a un molino de refino que lo tritura a un tamaño más homogéneo. En este punto, es posible regular el tamaño de la granza de salida del sistema, en función del objetivo, material o aplicación que se le quiera dar al material.

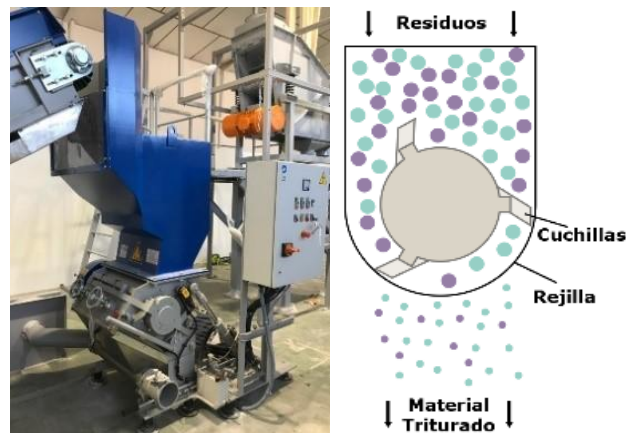


Fig. 7. Molino de refino

Para cribar los residuos de diferentes medidas, se utiliza una criba vibratoria con rejillas de mayor a menor tamaño que vibran y separan la granza en distintas medidas, así como, permitir la separación de las fibras textiles más volátiles. De esta forma, se pueden obtener granzas de tamaños constantes para aplicaciones concretas que tengan restricciones de tamaño.

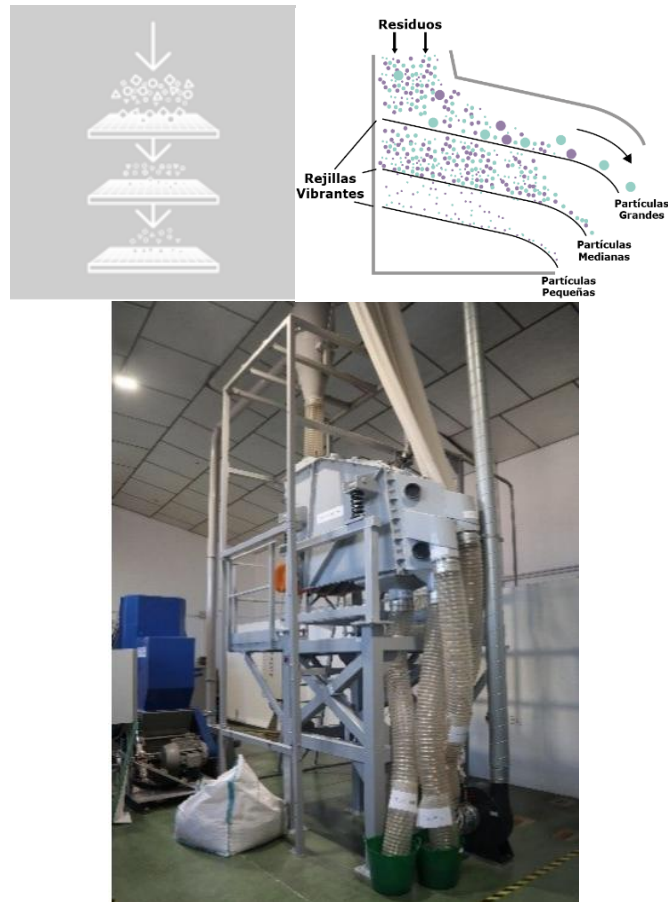


Fig. 8. Criba vibratoria

Una vez obtenida la granza separada por tamaños, este se transporta a una mesa densimétrica donde caen sobre una superficie vibrante por la cual se inyecta aire a presión de abajo a arriba, permitiendo separar los materiales de mayor y menor densidad. Esta separación se realizará en función de los parámetros con los que se configure la mesa, tanto la inclinación, la frecuencia de vibrado, el flujo de aire, etc. Este sistema también dispone de un sistema de aspiración en a parte superior de la mesa que se encarga de separar las pequeñas fibras y elementos ligeros de la muestra.





Fig. 9. Mesa densimétrica

Finalmente, se pasa el residuo resultante por un separador de metales no férricos que elimina partículas y trozos de aluminio, cobre y zamak que se puedan encontrar todavía en los residuos.

Como parte del proceso desarrollado por el proyecto Circular Industry y sus sucesores (Circular Industry II y Eco-Industry, ambos respaldados por financiación del IVACE), la técnica de triturado se utiliza para descomponer el producto y separarlo mediante una serie de procedimientos mecánicos. Sin embargo, en muchos casos, los gránulos resultantes de este triturado son demasiado pequeños, lo que dificulta la separación efectiva de los materiales, generando mezclas no deseadas y altos niveles de impurezas. Esto puede hacer que el material reciclado no sea viable o no alcance su máximo potencial en términos de valor añadido.

Con el objetivo de mejorar los procesos de reciclaje existentes y fomentar la valorización del producto reciclado, surge el proyecto DIS4REC, que propone una etapa adicional y previa al reciclaje. Esta etapa consiste en desensamblar el zapato en diferentes componentes según la naturaleza de sus materiales. Al identificar estas partes, la cantidad de cada material y su ubicación dentro del zapato, se pueden clasificar los materiales en familias. Por un lado, los componentes del piso, generalmente hechos de polímeros, espumas o caucho, y por otro, los materiales del corte, como telas, cuero y textiles. Este enfoque permitiría que el reciclaje iniciado con el triturado comenzara con elementos más homogéneos y selectivos, reduciendo las etapas necesarias para la separación y logrando materiales con menores niveles de impurezas.

### 3. La fabricación de calzado: Ensamblado

La industria del calzado se caracteriza por la gran variedad de tipos de zapatos distintos que, a su vez, se fabrican mediante diferentes técnicas tanto de patronaje como de montaje y ensamblado: pegado, cosido, etc., aunque el pegado suele aparecer de forma

total o parcial en un porcentaje muy elevado de zapatos. En este sentido, los diferentes tipos de adhesivo usados y la manera en la que están unidas las suelas al corte serán un factor clave a la hora de llevar a cabo el desensamblado.

Para comenzar, lo primero que debemos conocer son las partes principales que componen un zapato, que, de manera general serían el piso y el corte, ya citados previamente. Ambas partes se pueden identificar como las principales componentes del zapato, pudiendo ensamblarse de maneras muy diversas.



Fig. 10. Corte y piso de un zapato tipo.

Dentro de esta clasificación básica de corte y piso, se pueden diferenciar una mayor variedad de componentes que conforman los diferentes tipos de calzado.

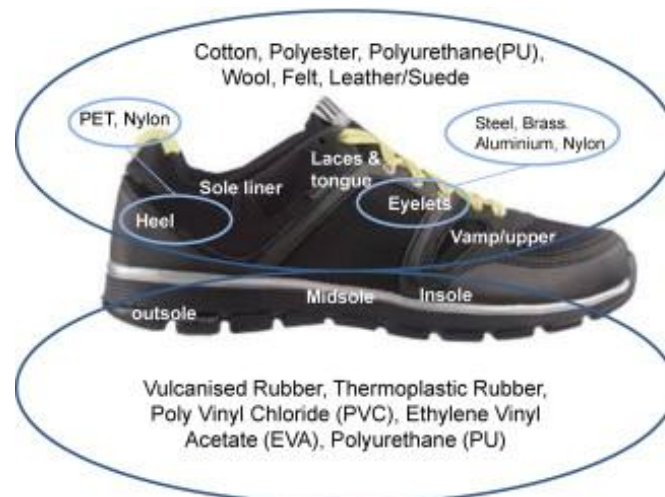


Fig. 11. Corte y piso de un zapato tipo.

### 3.1. Materiales

Los materiales que componen los diferentes tipos de calzado son muy variados, tanto en forma y disposición, como en su naturaleza, pudiendo darse el caso de encontrar, para una misma disposición, diferentes combinaciones de materiales.

En general, en función del tipo de calzado que se trate variarían los materiales utilizados, lo que afecta, además, al tipo de adhesivo más adecuado para cada caso.

Si diferenciamos por los materiales que se utilizan en el piso y los que se utilizan en el corte, vemos que en la parte del corte nos encontramos:

- **Cuero**

El más utilizado tradicionalmente debido a sus características de durabilidad, flexibilidad, transpirabilidad, etc. Generalmente se utilizaba para zapato de vestir y botas (también de trabajo). El principal contra que posee este material es que requiere de un buen mantenimiento si se desea que dure.
- **Textiles**

Materiales como el algodón, poliéster, nylon o distintas mezclas de estos se utilizan abundantemente en la industria gracias a su flexibilidad, poco peso, transpirabilidad, precio y comodidad. Son utilizados, principalmente, en calzado deportivo o casual, estilo zapatilla. Este tipo de materiales suelen ofrecer una durabilidad menor al resto de materiales, aportando, por el contrario, una mayor comodidad.
- **Materiales sintéticos**

Simulan la textura del cuero o de materiales similares, pero con menor mantenimiento y mejor precio, siendo además más ligeros, generalmente. Este tipo de materiales es utilizado en las mismas aplicaciones que el cuero tradicional, añadiendo zapatillas y calzado casual de bajo coste, pero con la contrapartida de una menor transpirabilidad y durabilidad que el cuero.

En cuanto a los materiales utilizados en el piso:

- **Goma**

Este material es conocido por su excelente tracción en casi cualquier terreno, su resistencia al desgaste y su flexibilidad, por ello se utiliza de manera común en calzado específico para labores que requieren de cierta seguridad en la pisada ya sea por terrenos irregulares o peligrosos. El contra de la goma pasa por ser bastante pesada.
- **Eva (Etileno-Vinil-Acetato)**

La ligereza, flexibilidad y absorción de impactos son los puntos fuertes de este material, siendo la opción más común en zapato deportivo, de correr, sandalias, etc. Tiende a formar parte de calzado extremadamente cómodo, pero es menos duradero que el resto de los materiales y su reciclabilidad hoy en día es casi nula.
- **Poliuretano (PU)**

Este material destaca por su flexibilidad, su resistencia a aceites y productos químicos. Es duradero, liviano y resistente a la abrasión, lo que lo hace ideal para calzado de seguridad y botas de trabajo. A pesar de estas ventajas, la producción de PU puede ser

más cara, y su durabilidad bajo condiciones extremas es inferior a la del caucho, desgastándose con mayor rapidez.

- Caucho termoplástico (TR)

El TR combina la tracción y flexibilidad del caucho con la facilidad de moldeo de los plásticos, siendo una opción ligera y económica. Se utiliza frecuentemente en calzado de bajo costo y en suelas de zapatillas casuales. Sin embargo, su durabilidad es inferior en comparación con el caucho tradicional o el PU, lo que lo hace menos adecuado para aplicaciones que requieran una alta resistencia.

La siguiente tabla presenta a modo de resumen, una comparación de los materiales más utilizados en la producción del calzado, evaluando aspectos clave como su durabilidad, biodegradación o impacto ambiental. En términos generales, los materiales empleados en las suelas suelen tener mayores dificultades para ser reciclados debido a su composición compleja y baja biodegradación, mientras que los materiales con densidades similares complican los procesos de separación mecánica, como el triturado. Este análisis permite identificar las fortalezas y debilidades de cada material, ofreciendo una perspectiva integral sobre su impacto ambiental y posibilidades de aprovechamiento tras el uso.

MATERIAL	PROPIEDADES	Durabilidad	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Biodegradación	Impacto Ambiental
<b>Cuero</b>	Flexible Transpirable Resistente	Alta	0.86 - 1.0	Lenta	Alto
<b>Textiles</b>	Ligeros Transpirable Cómodos	Media-Baja	0.5 - 1.4	Alta	Bajo-Medio
<b>Materiales Sintéticos</b>	Económicos Ligeros Versátiles	Media	0.90 - 1.3	Nula	Medio-Alto
<b>Goma</b>	Buena Tracción Poco Desgaste	Alta	1.1 - 1.2	Lenta	Medio
<b>EVA</b>	Ligero Flexible Absorción de Impactos	Media-Baja	0.93	Nula	Alto
<b>PU</b>	Resistencia Química Flexible Ligero	Alta	1.1 - 1.2	Nula	Alto

<b>TR</b>	Ligero Moldeable Buena Tracción	Media	0.9 - 1.1	Nula	Medio
-----------	---------------------------------------	-------	-----------	------	-------

Tabla 2. Características de los materiales

### 3.2. Tipos de ensamblado

El modo de ensamblaje del calzado ha sufrido una evolución a lo largo del tiempo, pasando por diferentes técnicas en función, tanto del tipo de zapato de que se trate (vestir, casual, deportivo, para niño, para adulto, etc.), de los materiales implicados, de las tecnologías que existen en cada época y de la capacidad de cada empresa en cuanto a maquinaria de fabricación.

En una primera aproximación, es posible englobar estos tipos de fabricación y de unión corte-piso en 3 grandes grupos:

- Pegado

Este proceso de fabricación se basa en la unión de piso y corte mediante algún tipo de adhesivo. Adicionalmente a los distintos tipos de adhesivos que se pueden utilizar, influyen en el resultado final los procesos y tratamientos previos al pegado propiamente dicho, los cuales preparan las superficies para facilitar y mejorar las propiedades de adhesión.

Por ello, además de los adhesivos, es fundamental considerar las condiciones ambientales durante el proceso de pegado, como la temperatura y la humedad, que pueden afectar a la eficacia de la adhesión. En esta línea, es importante señalar que los adhesivos también han sufrido una marcada evolución en los últimos tiempos, pasando de formulaciones en base solvente a otras en base acuosa, por ejemplo, que resultan más sostenibles y menos perniciosas tanto para los operarios que los aplican como para el medio ambiente.

- Cosido

En la actualidad, el uso de este tipo de unión suele estar relacionado con ciertos sistemas de fabricación (Blake, Goodyear, Billy, etc.) que, por su estética o buscando ciertas propiedades, precisan que se cosan el piso y el corte. Sin embargo, su origen está en épocas anteriores, cuando sí que se realizaba el cosido porque los adhesivos no eran lo suficientemente fuertes y era necesario añadir este paso con el fin de mejorar las propiedades mecánicas de la unión.

- Vulcanizado

En este caso, se realiza la vulcanización del material de piso directamente sobre el corte. Para ello es necesaria la adaptación de un molde al corte hormado, en el que se inyecta el material del que se compone la suela y mediante calor y presión se funde con el propio corte, creando la unión más fuerte de todas las vistas anteriormente. Este tipo de unión es muy común, sobre todo, en calzados tácticos militares, de seguridad, bomberos, etc.

### 3.3. Adhesivos

En el montaje de calzado se utilizan una gran diversidad de adhesivos distintos, en función de los materiales implicados o la parte del zapato de que se trate, así como el uso a que se destine (casual, deportivo, de montaña, etc.)

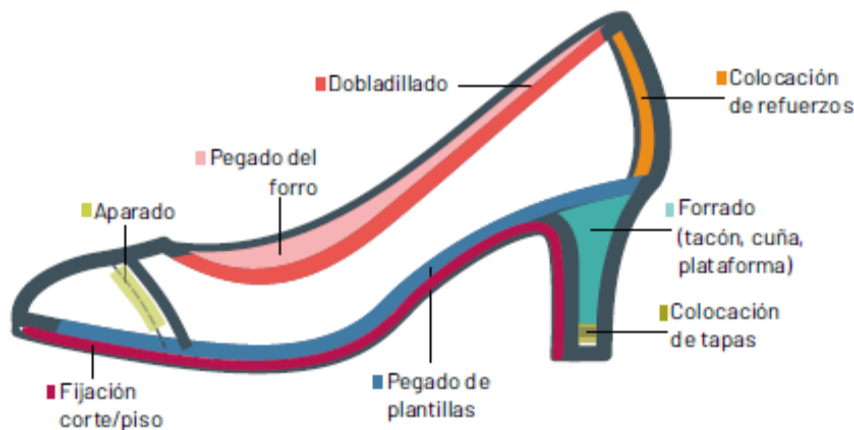


Fig. 12. Etapas de fabricación en las que se utiliza adhesivo

Algunos de los adhesivos que se utilizan actualmente son los siguientes:

- Adhesivos de poliuretano (PU)

Este tipo de adhesivo es muy versátil, ofreciendo, a su vez, una muy buena adherencia en la mayoría de los materiales utilizados en el calzado como cuero, goma y tejidos sintéticos. Son resistentes al agua, flexibles y duraderos, convirtiéndose en una de las opciones más comunes para realizar la unión entre la suela y el corte.

Como contra, tardan bastante en curarse y obtener resistencia y, dependiendo del compuesto concreto, puede contener compuestos orgánicos volátiles (COV)

- Policloropreno (PCP)

Conocido, también, como neopreno, se trata de un adhesivo muy resistente y flexible, ofreciendo un gran agarre inicial, sobre todo con goma o cuero. Es ideal para zapatos de trabajo o deportivos de alta exigencia. Su mayor inconveniente es que estos adhesivos contienen grandes cantidades de COV.

- Adhesivos con base acuosa

Debido a las regulaciones medioambientales, este tipo de adhesivos más ecológicos están ganando mucha popularidad, pese a requerir de mayor tiempo de secado respecto a los adhesivos en base solvente. Ofrecen una resistencia muy buena, aunque inicialmente presentan muy poca adherencia.

- Cianocrilatos

Estos adhesivos son de secado rápido, ofreciendo uniones muy rápidas y firmes. Son adhesivos bastante frágiles una vez secos y con un precio medio muy superior al resto de adhesivos, por lo que se suelen reservar para reparaciones o piezas pequeñas.



- Adhesivos termofusibles

También llamados adhesivos hot-melt son sólidos a temperatura ambiente y se funden al calentarlos, formando una unión fuerte al enfriarse. Proporcionan un gran poder de unión inicial en cuanto se comienzan a enfriar y son muy utilizados en producciones masivas por su bajo coste.

## 4. Desensamblado de calzado

El objetivo cuando se ensambla cualquier tipo de calzado pasa, precisamente, por evitar que se rompa o separe con el tiempo. Precisamente la consecución de este objetivo de fabricación produce grandes inconvenientes cuando se trata de realizar la operación contraria y se quiere conseguir un desensamblado lo más limpio posible.

Actualmente, no se han encontrado procesos automatizados o industrializados para el desensamblado de calzado, en gran parte, debido a su gran complejidad y variabilidad tanto en los tipos de calzado que se fabrican como en los materiales implicados.

### 4.1. Ecodiseño

Una de las vías actuales orientadas al desensamblado de calzado pasa por atacar el problema desde su inicio, la etapa de diseño. La propuesta se basa en enfocar el diseño atendiendo a criterios más ecológico, tanto añadiendo materiales o adhesivos más respetuosos con el medio ambiente, como modificando la forma en la que se fabrican los zapatos, añadiendo elementos innovadores para fijar las diferentes partes, evitando utilizar adhesivos de cualquier tipo, etc.

Un claro ejemplo son las zapatillas ROKU de Camper España, diseñadas específicamente con materiales reciclados, orientadas a no necesitar ningún tipo de adhesivo para ser montadas y, las cuales, una vez usadas se pueden desmontar y enviar para reciclarlas por completo.



Fig. 13. Ejemplo de zapatilla diseñada para evitar el uso de adhesivos (Fuente. Web de CAMPER)

En la siguiente figura pueden observarse las distintas partes que componen el zapato: suela, con unos surcos preparados para pasar los cordones específicos que la sujetarán, la plantilla, con más cuerpo que las habituales, para aportar comodidad y estabilidad, el corte, en forma de calcetín, y el sistema de sujeción que ensambla todo, basado en una combinación de cordones de varios diámetros.



Fig. 14. Componentes de la ROKU de CAMPER

Otro de los ejemplos de ecodiseño que se comercializan en la actualidad es el caso de Vesica Piscis, cuya filosofía de marca se basa en conseguir un desperdicio cero en la producción de calzado. Sus zapatos se fabrican con productos reciclados, tanto el corte como la suela y se evita el uso de adhesivos, ya que la suela va cosida al corte.



Fig. 15. Corte y Piso de Vesica Piscis (Fuente: Vesica Piscis)

Esta empresa ofrece, también, el servicio de reciclado, ofreciendo un descuento en la compra de las siguientes zapatillas de su marca, cuando el cliente aporta las zapatillas usadas con la suela y el corte separado para poder ser recicladas.

#### 4.2. Adhesivos desmontables

Pese a que el ecodiseño es una solución bastante viable para cierto tipo de calzado, más casual o menos exigente en cuanto a cualidades técnicas, sigue habiendo tareas y usos que requieren calzado muy resistente y duradero, que no pueden bajar sus requerimientos de fabricación.

Para ello, otra de las líneas que se encuentra en auge en la industria del calzado es la de los adhesivos desmontables, con los cuales se busca mantener o mejorar las capacidades que aportan hoy en día ciertos adhesivos muy contaminantes, ofreciendo alternativas más sostenibles.

La filosofía de este tipo de adhesivos es la de poseer un compuesto con las capacidades técnicas de cualquier adhesivo tradicional, pero funcionalizado con una especie de

“interruptor” que permite desactivar o romper de alguna forma las uniones que produjo, de forma que piso y corte de despeguen con facilidad.

En este novedoso enfoque, se investigan 2 posibles líneas de trabajo: la reformulación del compuesto para que sea reversible y la introducción de un elemento externo que permita deshacer la unión producida.

La vía de la reformulación resulta compleja y, pese a que se han realizado diversos estudios sobre el tema, no se han conseguido resultados aplicables a la industria. Por el contrario, la introducción de agentes o componentes externos para romper ese enlace sí que tiene aplicación real y, dentro de esta línea, se investigan varias técnicas distintas:

- Partículas térmicamente expandibles (TEPs) y aditivos para la separación de adhesivos.

Esta tecnología para el despegado de adhesivos a demanda utiliza partículas térmicamente expandibles, como microesferas desarrolladas por DOW Chemical. Estas partículas contienen una capa termoplástica rellena de hidrocarburo líquido, que al calentarse (70°C-285°C) se gasifica, expandiendo la partícula hasta 100 veces su tamaño original<sup>1</sup>.

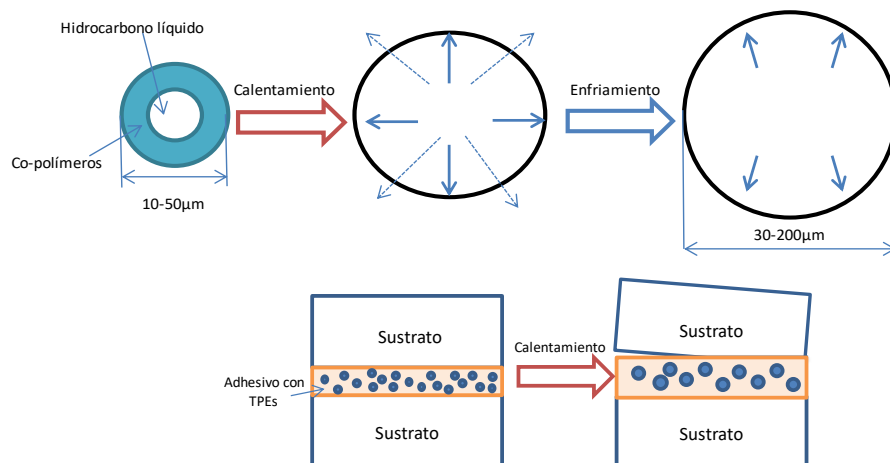


Fig. 16. Modelo del mecanismo de expansión

Las microesferas se aplican en adhesivos estructurales, facilitando su desensamblado. Usadas inicialmente en contrachapados, han sido adoptadas en la industria automotriz y aeroespacial, mejorando la separación de juntas adhesivas mediante calor o microondas.

- Nanopartículas utilizadas en la separación de adhesivos

En el despegue de adhesivos también se pueden utilizar las nanopartículas. En este caso, la unión adherida tiene una capa de imprimación que contiene nanopartículas con propiedades ferromagnéticas, superparamagnéticas o piezoeléctricas. Al someterlas a campos electromagnéticos alternos, se producen grandes cantidades de calor en esta capa de imprimación de la unión lo que provoca el reblandecimiento de las capas adhesivas termoplásticas. Si los adhesivos termoestables están

<sup>1</sup> Baena M.D., da Silva L.F.M., Carbas R.J.S., Campilho R.D.S.G. “Mechanical and Thermal Characterization of a structural polyurethane adhesive modified with thermally expandable particles” International Journal of Adhesion and adhesives, 54, pp 191-199 (2014).

adyacentes a la capa de imprimación, la estructura reticulada en la matriz se rompe debido al alto grado de calentamiento localizado produciéndose la separación del sustrato<sup>2</sup>.

- Combinación de partículas térmicamente expandibles (TEPs) y calentamiento por inducción para la separación de uniones adhesivas

Esta tecnología combina el proceso de calentamiento inductivo y el uso de TEPs para la separación de uniones adhesivas. Banea et al., utilizaron adhesivo de poliuretano de dos componentes SikaForce® 7888 (Sika, Portugal) y las partículas TPEs 031DU40 de Expancel (Expancel Nobel Industries, Suecia) siendo el diámetro entre 10 y 16  $\mu\text{m}$ <sup>3</sup>. Las propiedades mecánicas y la temperatura de despegue dependen del contenido de TEPs, a mayor contenido de TEPs, la temperatura de despegue y las propiedades mecánicas disminuyen. En la figura siguiente se observa el esquema del proceso de calentamiento por inducción.

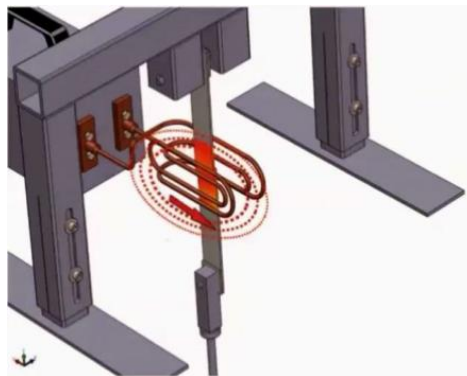


Fig. 17. Esquema de calentamiento por inducción

Sin embargo, estas tecnologías se encuentran en fase de desarrollo y, en el mejor de los casos serán aplicadas en las nuevas generaciones de calzado, pero el problema del reciclado es una realidad hoy en día a partir de producciones tradicionales.

## 5. Conclusiones

Como se ha observado durante este estado del arte sobre el desensamblado y reciclaje de calzado, el sector del calzado enfrenta desafíos significativos debido a la alta complejidad que posee el producto, principalmente por la cantidad de materiales empleados y los distintos tipos de ensamblados posibles.

---

<sup>2</sup> Kirsten, C. "Process for adhesive separation of bonded joints". Henkel KGaA (Duesseldorf, DE) US patent no.7407704.

<sup>3</sup> Banea et al, "Debonding of adhesive joints: Existing and Emerging technologies". 23<sup>rd</sup> ABCM International Congress of Mechanical Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, (2015).

Reciclaje limitado: Aunque existen iniciativas para el reciclaje de calzado, menos del 5% de los pares producidos globalmente se reciclan de manera efectiva. Esto se debe principalmente a la dificultad para separar los materiales, lo que genera altos niveles de impureza en los productos reciclados.

- **Importancia del ecodiseño:** Los avances en ecodiseño, como el uso de materiales reciclables y adhesivos desmontables, ofrecen una vía prometedora para mejorar la reciclabilidad. Ejemplos como las zapatillas ROKU de Camper y las soluciones de Vesica Piscis demuestran la viabilidad de productos diseñados para facilitar el desensamblado.
- **Tecnologías emergentes:** La visión artificial y la robótica surgen como herramientas fundamentales para abordar el desensamblado de calzado. Estas tecnologías permiten la identificación y separación de componentes de manera más precisa y eficiente, aunque su aplicación práctica en la industria aún se encuentra en etapas tempranas.
- **Adhesivos desmontables:** Las investigaciones actuales sobre adhesivos funcionalizados con "interruptores" para facilitar su separación son un área de innovación clave. Sin embargo, estas soluciones requieren avances adicionales para su implementación masiva.
- **Barreras actuales:** Los métodos tradicionales, como el triturado y la separación mecánica, resultan insuficientes para satisfacer las necesidades de reciclaje del sector. La falta de automatización y la complejidad de los materiales representan los principales retos a superar.

En conclusión, el estado del arte destaca la necesidad de combinar ecodiseño, tecnologías avanzadas y procesos innovadores para mejorar la reciclabilidad del calzado. Estos avances no solo contribuirán a reducir el impacto ambiental del sector, sino que también abren nuevas oportunidades para la economía circular.