

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



"ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE UNIONES
ADHESIVAS PARA COMPONENTES DEL
CALZADO"

TRABAJO FIN DE GRADO

Febrero - 2026

AUTOR: Guillermo Belén Belso

DIRECTOR: Francisco Javier Simón Portillo

Gracias a mi familia, amigos y
profesores por su gran apoyo, sin
ellos no hubiese podido llegar
hasta aquí.



ÍNDICE

1. Introducción.....	6
1.1. Historia de los adhesivos en el calzado.....	12
1.1.1. Adhesivos naturales y de origen biológico.....	12
1.1.1.1. Caucho y Neopreno.....	13
1.1.1.2. Poliuretano (PU).....	13
1.1.1.3. Adhesivos hiperelásticos y reticulación.....	13
1.2. Envejecimiento.....	14
1.2.1. Agentes de degradación del calzado.....	14
1.2.2. Mecanismos de degradación química: hidrólisis.....	15
1.2.3. Degradación física: plastificación e higroscopia.....	15
1.2.4. Efecto de la temperatura sobre la energía superficial.....	15
1.3. Normativa de referencia y adaptación experimental.....	16
2. Objetivo.....	16
3. Materiales y método.....	18
3.1. Sustratos.....	18
3.1.1. Espuma de Etileno-Vinil-Acetato (EVA).....	18
3.1.2. Espuma de Poliuretano (PU).....	20
3.2. Adhesivos.....	21
3.3. Reticulantes.....	24
3.4. Ensayos.....	26
3.4.1. Ensayo de pelado.....	28
3.4.2. Ensayo de tracción.....	30
4. Resultados y discusión.....	33
4.1. Ensayo de pelado.....	33
4.2. Ensayo de tracción.....	39
5. Conclusión.....	44
5.1. Ensayo de pelado.....	44
5.2. Ensayo de tracción.....	45
6. Líneas futuras.....	46
7. Referencias.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Piso fabricado en TR inyectado.....	7
Figura 2. Entresuela fabricada en inyección de PU de color blanco.....	7
Figura 3. Plantilla de alto confort.....	8
Figura 4. Refuerzos y topes.....	8
Figura 5. Costura de vira de cuero a zapato con la técnica de Goodyear.....	9
Figura 6. Sección de zapato fabricado con técnica de costura Goodyear.....	9
Figura 7. Costura Strobel.....	10
Figura 8. Unión de piso mediante clavos.....	11
Figura 9. Unión de vira de cuero a piso mediante inyección.....	11
Figura 10. Muestra de espuma de EVA con forma de malla para ensayo de pelado....	20
Figura 11. Muestra de espuma de EVA.....	21
Figura 12. Muestra de espuma de PU con Carbón Activo.....	21
Figura 13. Cola Supertec 6200 de QS Adhesives & Sealants.....	22
Figura 14. Cola Insocol GTR de Insoco.....	23
Figura 15. Cola Swift Col 9720 de H. B. Fuller.....	24
Figura 16. Reticulante Desmodur RC.....	25
Figura 17. Máquina universal de ensayos.....	27
Figura 18. Cámara climática.....	27
Figura 19. Montaje de probetas con ayuda de mesa para ensayo de tracción.....	27
Figura 20. Montaje de probetas con garras para ensayo de pelado.....	30
Figura 21. Montaje de probetas con garras para ensayo de pelado.....	32
Figura 22. Gráfico de uniones no envejecidas de ensayo de pelado.....	34
Figura 23. Insocol GTR.....	35
Figura 24. Insocol GTR + 5% Desmodur RC.....	35
Figura 25. Supertec 6200.....	35
Figura 26. H. B. Fuller Swift Col 9720.....	35
Figura 27. Gráfico de uniones no envejecidas contra envejecidas de ensayo de	

pelado.....	36
Figura 28. Gráfica de caracterización de Espuma de PU con Carbón Activo.....	37
Figura 29. Insocol GTR + 5% Desmodur RC (Unión envejecida).....	38
Figura 30. H. B. Fuller Swift Col 9720 (Unión envejecida).....	38
Figura 31. Gráfico de uniones no envejecidas de ensayo de tracción.....	40
Figura 32. Gráfico de uniones no envejecidas frente a envejecidas de ensayo de tracción.....	41
Figura 33. Insocol GTR + 5 % Desmodur RC.....	42
Figura 34. Insocol GTR + 5 % Desmodur RC (Unión envejecida).....	42
Figura 35. H. B. Fuller Swift Col 9720.....	42
Figura 36. H. B. Fuller Swift Col 9720 (Unión envejecida).....	42
Figura 37. Supertec 6200.....	43
Figura 38. Supertec 6200 (Unión envejecida).....	43



1. Introducción.

El calzado ha acompañado al ser humano desde el Paleolítico, evolucionando de ser una mera herramienta de protección frente a las irregularidades del terreno y el clima, a convertirse en un producto de ingeniería complejo con requisitos ergonómicos y funcionales avanzados. Las primeras evidencias arqueológicas, como las sandalias de fibra de cáñamo halladas en la Cueva de los Murciélagos en España [1] o el zapato de cuero de Areni-1 en Armenia [2], demuestran que el diseño original se basaba en la protección de la planta del pie mediante el uso de pieles animales y fibras vegetales.

Durante la Antigüedad y la Edad Media, la estructura del zapato se mantuvo relativamente simple, consistente principalmente en una suela unida a un corte (parte superior) mediante tiras o cordones. El avance más significativo en la construcción del calzado ocurrió con la aparición del gremio de zapateros, quienes perfeccionaron el montaje, un proceso donde las piezas se tensaban sobre una horma de madera. En esta etapa, la unión de los componentes era estrictamente mecánica: las suelas se fijaban al corte mediante costuras con hilos de lino o cáñamo encerado, o mediante el uso de pequeñas clavijas de madera y puntas metálicas.

La Revolución Industrial en el siglo XIX marcó un hito en la fabricación, introduciendo la máquina de coser para el calzado, lo que permitió unir capas de materiales de forma más rápida y precisa. Sin embargo, el calzado seguía siendo un elemento rígido debido a las limitaciones de las uniones cosidas, que requerían perforar los materiales y creaban puntos de concentración de tensiones donde el cuero solía fallar por fatiga [3].

Es a mediados del siglo XX cuando la industria experimenta su transformación más radical con la introducción de los materiales poliméricos. La aparición de elastómeros como el caucho sintético, y más tarde el etileno-vinil-acetato (EVA) y el poliuretano (PU), cambió la concepción de las uniones. Estos nuevos materiales, caracterizados por su ligereza y capacidad de amortiguación, no permitían el uso de costuras tradicionales en todas sus partes, ya que el hilo podía desgarrar las estructuras celulares de las espumas [4, 5].

En la actualidad, esta evolución ha derivado en un calzado compuesto por múltiples capas y piezas técnicas. Los componentes que históricamente se cosían, hoy en día dependen casi exclusivamente de uniones adhesivas. Los tres componentes principales son:

El piso y la entresuela: La unión del piso que se puede observar en la figura 1 (caucho o TPU) con la entresuela, figura 2, (EVA o PU) requiere adhesivos que soporten la flexión continua sin sufrir delaminación.



Figura 1. Piso fabricado en TR inyectado [6].



Figura 2. Entresuela fabricada en inyección de PU de color blanco [7].

Las plantillas de montaje y de confort: Antiguamente eran piezas sueltas o clavadas. Hoy, la fijación de la plantilla de confort (especialmente aquellas con carbón activo y espumas de memoria) al resto de la estructura se realiza mediante adhesivos de contacto o reactivos, como se puede observar en la figura 3, para evitar desplazamientos internos que causarían lesiones o incomodidad al usuario.

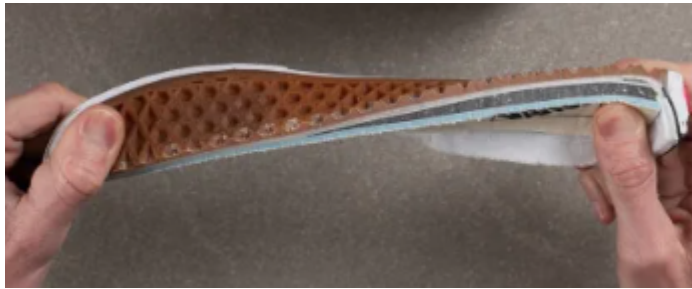


Figura 3. Plantilla de alto confort.

Refuerzos y topes: Los elementos internos que dan forma a la punta y al talón se adhieren químicamente para eliminar el relieve de las costuras, mejorando la estética y el confort térmico. En la figura 4 se puede ver donde se ubican dichos componentes.



Figura 4. Refuerzos y topes [8].

Esta transición histórica de lo mecánico a lo químico ha permitido que el calzado actual sea un ensamblaje de materiales heterogéneos que trabajan de forma solidaria gracias a la interfase adhesiva, permitiendo deformaciones elásticas que antes eran imposibles de alcanzar.

Aunque los sistemas adhesivos han sustituido gran parte de los procesos de ensamblaje, la industria del calzado sigue empleando métodos alternativos de unión

para garantizar la integridad del producto en condiciones de uso severo o para cumplir con estándares estéticos y funcionales específicos. Estas uniones pueden clasificarse principalmente en mecánicas y térmicas.

La costura sigue siendo el método de unión por excelencia para el corte (parte superior) del calzado. A diferencia del pegado, la costura ofrece una resistencia a la tracción muy elevada y permite la transpiración del material en las juntas.

Costura de Montaje (Sistema Goodyear): Es uno de los métodos más prestigiosos en el calzado de caballero. Consiste en unir el corte, la vira (una tira de cuero) y la planta mediante una costura doble. Este sistema no solo aporta una durabilidad excepcional, sino que facilita la reparación del zapato (resolado) sin dañar la estructura superior. En la figura 5 se puede apreciar como se une una vira con el corte, mientras que en la figura 6 se muestra una sección en la que aparece cada uno de los componentes propios del Sistema Goodyear.



Figura 5. Costura de vira de cuero a zapato con la técnica de Goodyear.



Figura 6. Sección de zapato fabricado con técnica de costura Goodyear [9].

Costura Strobel: Muy común en el calzado deportivo y plantillas técnicas. El corte se cose perimetralmente a una planta de tejido ligero antes de unir todo el conjunto a la entresuela mediante adhesivos. Esta unión híbrida garantiza que la plantilla no se desplace durante el ejercicio dinámico. En la figura 7 se muestra la unión del corte con la planta.

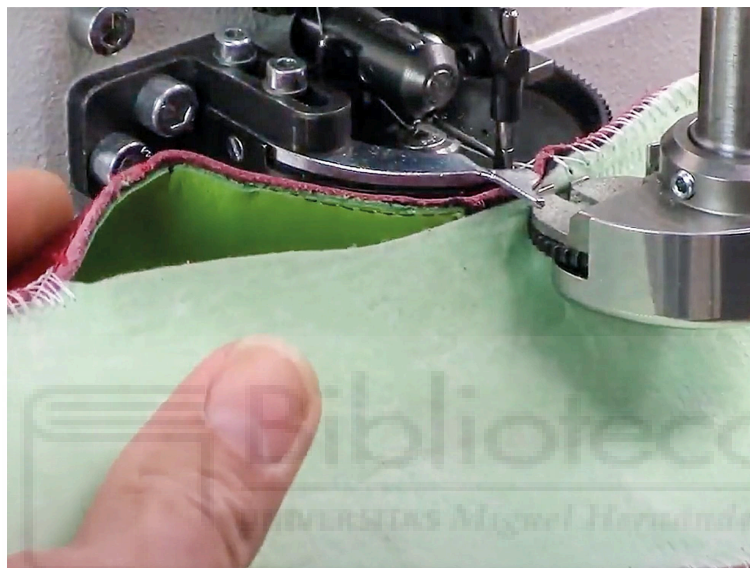


Figura 7. Costura Strobel [10].

Fijaciones con clavos y tachuelas: Aunque su uso ha disminuido, los clavos metálicos o de madera siguen siendo la unión estándar para la fijación de tacones en calzado femenino de alta gama. La carga de impacto que recibe el tacón requiere un anclaje mecánico que el adhesivo, por sí solo, no siempre puede garantizar sin riesgo de desprendimiento súbito. En la figura 8 se muestra como se une un tacón con clavos.



Figura 8. Unión de piso mediante clavos.

Las uniones térmicas con sistemas de inyección o vulcanizado eliminan la necesidad de un adhesivo intermedio externo, ya que el material de la suela actúa como su propio agente de unión al pasar de estado líquido a sólido.

Inyección: En este proceso, el corte montado en una horma se introduce en un molde donde se inyecta poliuretano (PU) o PVC fundido. El material líquido penetra en las fibras del corte y, al enfriarse y solidificarse, crea una unión de alta resistencia. Es un método muy valorado en el calzado de seguridad y militar por su estanqueidad y resistencia a la delaminación.



Figura 9. Unión de vira de cuero a piso mediante inyección.

Vulcanizado: Utilizado tradicionalmente en calzado de lona y zapatillas de deporte clásicas. La suela de caucho crudo se une al corte mediante calor y presión en un horno de vulcanización. El proceso químico crea enlaces cruzados entre el caucho y el tejido, logrando una unión permanente y extremadamente flexible.

En el calzado técnico y sintético moderno, se emplean ondas electromagnéticas o vibraciones mecánicas de alta frecuencia para fundir localmente los bordes de materiales termoplásticos.

Soldadura por Ultrasonidos: Permite unir láminas de EVA o refuerzos sintéticos sin añadir peso extra (sin pegamento ni hilo). Es una técnica "limpia" que evita el uso de solventes orgánicos y es ideal para plantillas de confort multicapa donde se requiere una unión sin relieve para evitar rozaduras al usuario.

Estas alternativas de unión se seleccionan en función de la naturaleza de los materiales y el uso previsto del calzado, actuando a menudo como refuerzo de las uniones adhesivas en puntos críticos de estrés mecánico.

1.1. Historia de los adhesivos en el calzado.

La transición de las fijaciones mecánicas a las químicas en el calzado no fue un evento súbito, sino una evolución técnica ligada a los avances de la química orgánica y de polímeros. A diferencia del apartado anterior centrado en la estructura del calzado, aquí se analiza la composición y el comportamiento de las sustancias empleadas para lograr la unión.

1.1.1. Adhesivos naturales y de origen biológico.

Desde la antigüedad hasta principios del siglo XX, los adhesivos utilizados eran predominantemente de origen natural. El calzado artesanal empleaba principalmente colas animales (colágenos extraídos de pieles y huesos) y resinas vegetales (breas y alquitranes). Estos materiales presentaban una gran limitación: su carácter termoplástico natural y su extrema sensibilidad a la humedad. En condiciones de lluvia o sudoración excesiva, los componentes de las sandalias o zapatos de cuero tendían a delaminar, lo que obligaba a que la costura siguiera siendo el método de unión estructural principal.

1.1.1.1.Caucho y Neopreno.

El primer gran salto tecnológico ocurrió con la vulcanización del caucho por Charles Goodyear en 1839. Este proceso permitió crear los primeros adhesivos de contacto basados en caucho natural disuelto en solventes orgánicos. No obstante, el hito que transformó la fabricación de plantillas y suelas fue la invención del policloropreno (neopreno) en 1930 por DuPont.

Los adhesivos de policloropreno introdujeron el concepto de "pegado en frío" con alta resistencia inicial, permitiendo unir por primera vez de forma fiable el cuero con el caucho. Estos adhesivos dominaron la industria del calzado durante décadas, aunque su resistencia térmica era limitada, lo que provocaba fallos en zonas de alta fricción donde el calor generado al caminar ablandaba la película adhesiva [11].

1.1.1.2.Poliuretano (PU).

A partir de la década de 1950, el desarrollo de los poliuretanos revolucionó el sector. Estos adhesivos se basan en la reacción de isocianatos con polioles, permitiendo crear cadenas moleculares con propiedades a la carta. Su introducción fue crucial para el uso de nuevos materiales como la EVA y el PU expandido.

A diferencia del neopreno, los adhesivos de poliuretano ofrecen:

- Mayor resistencia a la hidrólisis: Un factor crítico dado que las plantillas están en contacto directo con la humedad del pie.
- Transparencia y limpieza: Evitando las manchas amarillentas de las colas de contacto antiguas.
- Reactivación térmica: Permitiendo procesos industriales donde el adhesivo se aplica, se deja secar y se "activa" con calor justo antes del prensado, asegurando una unión inmediata y fuerte.

1.1.1.3. Adhesivos hiperelásticos y reticulación.

En las últimas décadas, la investigación se ha centrado en los adhesivos hiperelásticos. Con el auge del calzado deportivo y técnico, se necesitaban uniones que no fueran rígidas, sino que pudieran deformarse elásticamente junto con las espumas de EVA sin fracturarse.

El desarrollo de los isocianatos de reticulación marcó el último gran avance. Al añadir estos agentes endurecedores, se pasa de una estructura lineal (termoplástica) a una red tridimensional (termoestable). Esta innovación ha permitido que componentes con energías superficiales muy bajas o materiales altamente porosos, como el poliuretano con carbón activo, puedan ser integrados en el calzado con garantías de durabilidad, resistiendo no solo esfuerzos mecánicos, sino también la degradación química por envejecimiento térmico.

1.2. Envejecimiento.

El envejecimiento de una unión adhesiva se define como la pérdida progresiva de sus propiedades mecánicas y de su integridad estructural debido a la exposición prolongada a agentes ambientales. En el caso específico de las plantillas para calzado, los factores de degradación son especialmente agresivos, ya que combinan sollicitaciones mecánicas cíclicas con un entorno químico complejo generado por el pie humano.

1.2.1. Agentes de degradación del calzado.

Los principales responsables del deterioro de la unión entre la espuma de PU y la EVA son:

Temperatura: El calor corporal (aprox. 37 °C) y las temperaturas extremas de almacenamiento o uso (que pueden superar los 50 °C en verano) provocan el ablandamiento de la película adhesiva. Al ser polímeros termoplásticos o termoestables con un segmento flexible, el calor aumenta la movilidad de las cadenas poliméricas, reduciendo la cohesión.

Humedad y Sudor: El sudor no solo aporta agua, sino también sales, lípidos y ácidos orgánicos. La humedad es el agente más crítico para los adhesivos de poliuretano, ya que puede desencadenar reacciones de hidrólisis.

Radiación y Oxidación: Aunque en las plantillas el efecto de los rayos UV es menor, la oxidación térmica acelera la rotura de las cadenas poliméricas.

1.2.2.Mecanismos de degradación química: hidrólisis.

La hidrólisis es el proceso químico más relevante en este estudio. Los adhesivos de poliuretano contienen enlaces éster ($C - C(=O) - O - C$) o éter ($C - O - C$) en su estructura. En presencia de moléculas de agua (H_2O) y calor, estos enlaces pueden romperse, fragmentando las cadenas de polímero de cadena larga en moléculas más cortas [12].

Este proceso reduce drásticamente la densidad de reticulación del adhesivo. Como se ha observado en los ensayos con el adhesivo Insocol GTR + Desmodur RC, una humedad relativa del 95% a 55 °C puede llegar a disolver la red tridimensional de la unión si el sistema no está correctamente estabilizado, provocando un fallo adhesivo total donde las piezas se separan sin aplicar apenas esfuerzo.

1.2.3.Degradación física: plastificación e higroscopia.

Además de la rotura de enlaces químicos, el agua actúa como un plastificante. Las moléculas de agua se sitúan entre las cadenas del polímero, separándolas y reduciendo las fuerzas intermoleculares. Esto explica por qué el adhesivo Supertec 6200 se vuelve más elástico tras el envejecimiento: el material se ablanda y permite mayores deformaciones, aunque pierda rigidez.

Por otro lado, la higroscopía de los sustratos (especialmente la espuma de PU con carbón activo) juega un papel fundamental. Al ser materiales porosos, absorben y retienen la humedad en la interfase de pegado, creando un reservorio de agua que mantiene el proceso de degradación activo de forma continua, incluso cuando el calzado no está en uso.

1.2.4.Efecto de la temperatura sobre la energía superficial.

El envejecimiento térmico también puede provocar la migración de aditivos (como plastificantes o agentes del tratamiento NF) desde el interior de las espumas hacia la superficie. Esta migración puede crear una "capa límite débil" que impide que el adhesivo mantenga su anclaje sobre el poliuretano, favoreciendo un fallo de adhesión limpio, tal como se ha detectado en las muestras degradadas de este proyecto [13].

1.3.Normativa de referencia y adaptación experimental.

Para la realización de los ensayos mecánicos y los procesos de degradación de las probetas, se han tomado como base las directrices de las normas internacionales específicas para la industria del calzado. El cumplimiento de estas normativas garantiza la reproducibilidad de los resultados y permite establecer comparativas con otros estudios del sector. Las normas que rigen este estudio son:

- UNE-EN 1392: Esta norma especifica los métodos de ensayo para adhesivos destinados a la unión de materiales de cuero y calzado. Proporciona las directrices para la aplicación del adhesivo, los tiempos de secado y los procedimientos de unión [14].
- UNE-EN 15062: Establece los protocolos de envejecimiento acelerado para adhesivos de calzado. Define las condiciones de temperatura y humedad a las que deben someterse las probetas (en nuestro caso, 55 °C y 95% HR durante 72 horas) para simular la degradación en condiciones de uso reales [15].
- UNE-EN 15037: Define los requisitos y procedimientos para evaluar la resistencia de las uniones adhesivas sometidas a esfuerzos de pelado. Es la norma de referencia para caracterizar la adhesión entre la espuma de PU y la EVA perforada [16].

2. Objetivo

El propósito central de la presente investigación surge de la necesidad de optimizar la integridad estructural en la unión de componentes utilizados en la fabricación de plantillas para calzado, específicamente entre la espuma de poliuretano (PU) y el etileno-vinil-acetato (EVA). En el contexto industrial actual, se ha detectado que la unión adhesiva entre estos dos sustratos presenta una debilidad crítica que compromete la durabilidad del producto final bajo condiciones de uso dinámico. Mediante observaciones preliminares, se ha constatado que la mayoría de las formulaciones adhesivas empleadas muestran una afinidad aceptable con la superficie de la EVA, sin embargo, habitualmente aparece un fallo de adhesión en la superficie de la espuma de PU. Este fenómeno de desprendimiento se mitiga parcialmente en los bordes de las perforaciones romboidales de la EVA, donde la geometría del sustrato favorece el anclaje mecánico, lo que sugiere que el problema principal no radica solo en la cohesión del adhesivo, sino en las características físicas y químicas de la superficie de la espuma de poliuretano.

Uno de los factores determinantes que motiva este estudio es el análisis del tratamiento superficial denominado NF (No-Fray) del carbón activo presente en esta espuma de PU. Aunque este tratamiento es indispensable para el proceso productivo puesto que este tratamiento impide el deshilachado de las fibras de la espuma durante las operaciones de corte y troquelado que a los que es sometido este producto después de su pegado, se sospecha que el tratamiento aporta al material una energía superficial extremadamente baja. Una baja energía superficial impide el correcto "mojado" o humectación del sustrato por parte del adhesivo líquido. Sin una humectación adecuada se logra una unión débil que falla ante mínimos esfuerzos de pelado.

Adicionalmente, el carbón activo en la composición de la plantilla introduce una variable de porosidad que debe ser prevista. Al ser un producto con una estructura interna altamente porosa y una gran superficie específica, el carbón activo podría actuar como un agente absorbente de los componentes lo cual resulta crítico para el adhesivo. En el caso de adhesivos de poliuretano monocomponentes, es probable que la porosidad del sustrato esté succionando selectivamente los solventes o los grupos isocianato libres antes de que estos puedan reaccionar con la humedad

ambiental o con los grupos funcionales del propio sustrato para formar la red reticulada necesaria para el curado. Esta absorción prematura dejaría una capa de adhesivo "empobrecida" en la interfase, con una densidad de reticulación que no es suficiente para soportar las cargas mecánicas.

Además, más allá de los desafíos técnicos, este estudio tiene una motivación económica fundamental. La optimización del proceso de pegado responde a la necesidad de disminuir los costes operativos y de fabricación a la vez que se mantiene una unión adecuada de los componentes. Investigar un adhesivo o un tratamiento superficial que elimine estas incidencias permitirá no solo reducir el desperdicio de materia prima, sino también optimizar los tiempos de ciclo en la planta de producción. Al encontrar una solución técnica que garantice la adhesión desde la primera aplicación, se evita el uso de imprimaciones costosas que encarecen el producto final.

Este estudio se propone no solo caracterizar la resistencia mecánica de la unión actual, sino investigar métodos de preparación superficial o la selección de adhesivos con mayor capacidad de penetración y compatibilidad química que contrarresten los efectos negativos del tratamiento NF y la porosidad del carbón. Se busca, en última instancia, definir un estándar de unión que garantice que la deformación hiperelástica de la plantilla no derive en una delaminación prematura, asegurando el confort y la calidad exigidos en el sector del calzado técnico y deportivo.

3. Materiales y método.

3.1.Sustratos.

La caracterización precisa de los sustratos, los sistemas adhesivos y los agentes reticulantes es esencial para comprender los mecanismos de adhesión y los modos de fallo que se analizarán en los ensayos experimentales.

Para la realización de los ensayos mecánicos se han seleccionado materiales representativos de la industria del calzado técnico, con el fin de evaluar su comportamiento bajo diferentes configuraciones de carga.

3.1.1.Espuma de Etileno-Vinil-Acetato (EVA).

Las espumas de EVA constituyen el núcleo estructural y de amortiguación en la mayoría de las plantillas modernas. En este estudio se emplean variantes con distintas densidades, niveles de dureza y grados de rigidez, lo que permite evaluar el comportamiento mecánico en función de sus propiedades fisicoquímicas. Estas espumas se obtienen mediante una formulación compleja basada en cinco componentes principales: EVA al 18%, EVA al 28%, sílice, polietileno y carbonato cálcico. La mezcla se completa con agentes reticulantes y espumantes que, mediante un proceso de expansión controlada, determinan la estructura celular final.

La variabilidad en las proporciones de estos componentes permite ajustar parámetros críticos como la resiliencia y la resistencia a la compresión. En el diseño experimental de esta memoria, la EVA se utiliza en dos configuraciones específicas:

Ensayo de Pelado: Se emplea una lámina de EVA caracterizada por presentar perforaciones romboidales como se ve en la figura 10. Esta geometría no solo cumple funciones de transpirabilidad, sino que actúa como un factor de anclaje mecánico para el adhesivo.

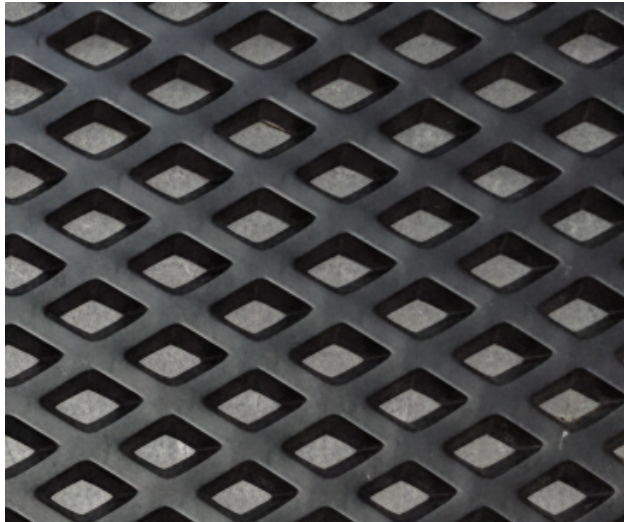


Figura 10. Muestra de espuma de EVA con forma de malla para ensayo de pelado.

Ensayo de Tracción: Se analizan probetas formadas por la unión de dos piezas de EVA con propiedades de dureza diferenciadas, ensambladas mediante un pegado oblicuo (biselado). Esta configuración busca simular las transiciones de rigidez habituales en las plantillas anatómicas y evaluar la resistencia de la unión ante esfuerzos de tracción.



Figura 11. Muestra de espuma de EVA.

3.1.2.Espuma de Poliuretano (PU).

Como contrapartida en la unión de pelado, se utiliza una espuma de poliuretano de celda cerrada, suministrada por el Grupo Zahonero, con un espesor nominal de 2 mm. Este material destaca por la integración de partículas de carbón activo en su estructura celular. El propósito funcional de este sustrato es triple: conservar una alta capacidad de absorción de impactos, proporcionar control de olores mediante la porosidad del carbón y añadir propiedades antibacterianas y de gestión de la humedad. No obstante, desde el punto de vista de la adhesión, la presencia del carbón activo y el tratamiento superficial No-Fray (NF) representan el principal desafío tecnológico de este estudio debido a su influencia en la energía superficial y la absorción de reactivos. En la figura 12 aparece una muestra de este material en su formato comercial. [17].

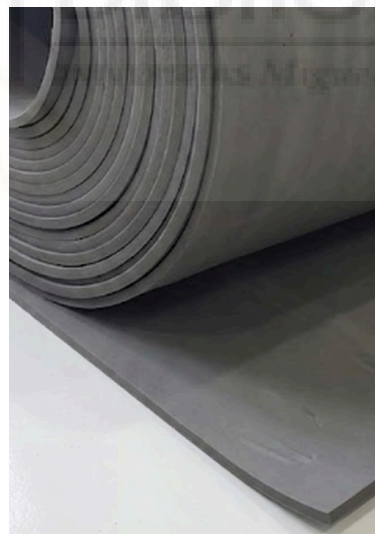


Figura 12. Muestra de espuma de PU con Carbón Activo.

3.2.Adhesivos.

Se han seleccionado tres soluciones adhesivas de alto rendimiento, ampliamente utilizadas en el sector, para comparar su eficacia sobre los sustratos descritos:

Supertec 6200 (QS Adhesives and Sealants): Se trata de un adhesivo de poliuretano monocomponente de base solvente, diseñado específicamente para el pegado de materiales sintéticos y cueros en la industria del calzado. Se caracteriza por una elevada pegajosidad inicial (green strength) y una excelente resistencia al calor tras su reactivación térmica. Su formulación busca un equilibrio entre la flexibilidad necesaria para materiales como la EVA y la fuerza de unión requerida para evitar la delaminación. El formato usado de este adhesivo en este estudio es adecuado para aplicarlo con rodillo de espuma [18].



Figura 13. Cola Supertec 6200 de QS Adhesives & Sealants.

Insocol GTR (Insoco): Adhesivo de poliuretano base solvente de alta calidad, formulado para uniones de gran responsabilidad. Es un adhesivo versátil que presenta una viscosidad optimizada para la penetración en sustratos porosos. En este estudio, el Insocol GTR actúa como la variable principal para analizar el efecto de la reticulación, utilizándose tanto de forma pura como mezclado con agentes

endurecedores. El formato usado de este adhesivo en este estudio es adecuado para aplicarlo con rodillo de espuma [19].



Figura 14. Cola Insocol GTR de Insoco.

Swift Col 9720 (H.B. Fuller): Este adhesivo de poliuretano destaca por su rápida velocidad de secado y su alta cohesión interna. Está desarrollado para procesos industriales de alta cadencia donde se requiere que la unión sea estable inmediatamente después del prensado. Presenta una excelente resistencia al envejecimiento y a la migración de plastificantes, factores críticos cuando se trabaja con espumas de PU y EVA. La forma de aplicar este adhesivo es mediante su pulverización sobre los sustratos, tal y como se ve en la figura 15 el formato que se ha usado es en espray. [20].



Figura 15. Cola Swift Col 9720 de H. B. Fuller.

3.3. Reticulantes.

Agentes Reticulantes: Desmodur RC

Los reticulantes, también denominados endurecedores o curadores, son aditivos químicos que se incorporan al adhesivo base para transformar su estructura molecular de termoplástica a termoestable mediante la creación de una red tridimensional de enlaces cruzados [21].

En este estudio se analiza el uso del Desmodur RC, un catalizador compuesto por un poliisocianurato de diisocianato de tolueno (TDI) disuelto en acetato de etilo. Su incorporación, generalmente en una proporción del 3% al 5% en peso sobre el adhesivo Insocol GTR, tiene como objetivo incrementar la resistencia térmica, química y mecánica de la unión. El Desmodur RC es una versión previamente formulada y estabilizada que facilita la dosificación industrial en comparación con otras variantes como el Desmodur R.

Sin embargo, el uso de estos agentes introduce variables críticas que serán objeto de análisis en los ensayos:

- Sensibilidad a la humedad: Los isocianatos reaccionan de forma parasitaria con la humedad ambiental, formando ureas y liberando burbujas de CO₂. Esto puede desactivar el adhesivo, reducir el área de contacto efectiva y alterar la viscosidad, provocando una gelificación prematura.
- Vida útil de la mezcla (Pot Life): Una vez mezclado el Desmodur RC con el adhesivo, se inicia una reacción química que limita el tiempo de trabajo a un máximo de 2 horas. Superado este tiempo, la pérdida de propiedades de mojado impide una correcta reactivación térmica y compromete la integridad de la unión.

La investigación comparará sistemáticamente los resultados obtenidos con el adhesivo Insocol GTR con y sin la adición de Desmodur RC, permitiendo cuantificar la mejora real en la resistencia al pelado y tracción frente a los inconvenientes operativos que su uso conlleva.

Como se ve en la figura 16 este producto se comercializa en un envase de 750 ml y se usa en mezclas al 5%.



Figura 16. Reticulante Desmodur RC.

3.4. Ensayos

Esta investigación se centra en el comportamiento mecánico de uniones adhesivas bajo condiciones de servicio reales y aceleradas. Para ello, se ha diseñado un plan de ensayos que permite comparar el comportamiento de cuatro sistemas adhesivos (Supertec 6200, Insocol GTR, Insocol GTR con un 5% de Desmodur RC y Swift Col 9720 de H. B. Fuller) sobre dos configuraciones de sustratos representativas de una plantilla de calzado técnica. Los ensayos se realizan con una máquina de ensayos universal del fabricante Zwick Roell modelo UTM 20 kN-Retroline (figura 17). El estudio diferencia sistemáticamente entre probetas en estado inicial (sin envejecer) y probetas sometidas a un proceso de degradación hidrotérmica controlada.

Para evaluar la durabilidad y estabilidad química de las uniones frente a agentes externos como el sudor, la humedad y el calor corporal, se aplica la norma UNE-EN 15062. El procedimiento se realiza de forma estrictamente controlada mediante el uso de una cámara climática del marca Ineltec, modelo INECC-30/150 (figura 18).



Figura 17. Máquina universal de ensayos.



Figura 18. Cámara climática.

Para realizar la unión de las piezas de las probetas de forma que se asegure la correcta alineación de los componentes se ha empleado una mesa de montaje del laboratorio (figura 19), que por su diseño permite adaptarse a las dimensiones específicas de estas probetas. La mesa de montaje a resultado ser crucial principalmente para el montaje de las probetas ensayadas a tracción que debido a sus dimensiones y al corte oblicuo por el que se debían unir hubiese resultado muy difícil o impreciso sin su ayuda.

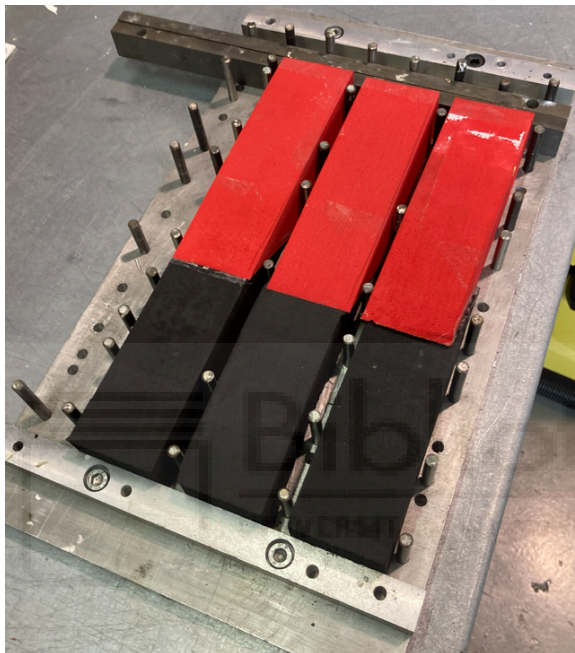


Figura 19. Montaje de probetas con ayuda de mesa para ensayo de tracción.

Para poder realizar estos ensayos se han diseñado unas garras que permiten fijar los sustratos a los soportes de la máquina de ensayos universal por el extremo libre de los sustratos de forma que podremos aplicar la carga en la dirección longitudinal de la probeta forzando el despegue tanto en el ensayo de tracción como en el de pelado, como se puede ver en las figuras 20 y 21.

Aunque las normas citadas proponen dimensiones estandarizadas, la naturaleza específica de los materiales ensayados en este proyecto —especialmente la elevada flexibilidad y la resistencia de las espumas de EVA y PU con carbón activo— ha requerido una adaptación de la geometría de las probetas.

El objetivo de esta modificación es garantizar que la superficie de adhesión sea lo suficientemente representativa para captar el efecto de la geometría romboidal de la EVA y para asegurar un anclaje firme en las mordazas de la máquina universal de ensayos sin que se produzca el colapso estructural del material antes de la rotura de la unión.

3.4.1. Ensayo de pelado.

Se analiza la resistencia al despegue entre la espuma de poliuretano con carbón activo y la espuma de EVA con perforaciones romboidales. El pelado es el esfuerzo más crítico en el calzado.

Probetas para ensayo de pelado (UNE-EN 15037 modificada): Se han fabricado probetas con unas dimensiones de 50 x 150 mm (ancho x largo). El incremento del ancho respecto a la norma estándar busca estabilizar la zona de fractura y compensar la porosidad del carbón activo y la forma de malla de la espuma de EVA.

Muestras sin envejecer: Se ensayan cuatro adhesivos: GTR, GTR + 5% Desmodur, Supertec 6200 y H. B. Fuller Swift Col 9720.

Muestras envejecidas: se evalúan Supertec 6200, Insocol GTR + 5% Desmodur RC, y Swift Col 9720.

Las probetas, una vez confeccionadas y tras haber completado su tiempo de curado inicial a temperatura de 23 °C y una humedad relativa (HR) del 50% , se introducen en la cámara bajo las siguientes condiciones: una temperatura constante de 55 °C y HR del 95% durante un periodo de 72 horas. Este protocolo acelera los procesos de degradación química (hidrólisis de los grupos uretano) y física (ablandamiento térmico del polímero), permitiendo predecir el comportamiento de la plantilla tras un uso prolongado. Tras el periodo de exposición, las probetas se estabilizan a temperatura ambiente antes de ser sometidas a los ensayos mecánicos siguiendo las directrices de la norma UNE-EN 1392.

Procedimiento de ensayo.

Basado en la norma UNE-EN 15037 y adaptaciones de la UNE-EN 1392, este ensayo determina la tensión necesaria para separar los sustratos de PU y EVA.

- Preparación de la unión: Se adhieren las láminas de espuma de PU y EVA dejando un extremo de aproximadamente 20-30 mm sin pegar. Este extremo libre es fundamental para permitir el agarre inicial de las mordazas.
- Configuración del ensayo: Las dos pestañas no adheridas se sujetan en las mordazas superior e inferior, de modo que la probeta adopte una forma de "T" invertida (figura 20).
- Ejecución: Las mordazas se separan a una velocidad constante de 100 mm/min. Durante el recorrido, el adhesivo es sometido a un esfuerzo de pelado donde la geometría romboidal de la EVA juega un papel crucial al ofrecer puntos de anclaje mecánico.
- Análisis de resultados: Se registra la curva de fuerza frente al desplazamiento. El valor relevante es la fuerza promedio de pelado calculada en la zona estable de la curva, expresada en Newton por milímetro de ancho (N/mm).
- Diagnóstico de interfase: Se observa si el adhesivo permanece en el PU, en la EVA o en ambos. Un fallo adhesivo limpio sobre el PU confirmaría la sospecha de baja energía superficial debido al tratamiento NF y la porosidad del carbón activo.



Figura 20. Montaje de probetas con garras para ensayo de pelado.

3.4.2. Ensayo de tracción.

Se evalúa la resistencia de una unión oblicua entre dos piezas de espuma de EVA de diferentes durezas. Este ensayo simula la resistencia de la costura de unión en la zona de flexión metatarsiana del pie, donde el material sufre ciclos de tracción y compresión.

Probetas para ensayo de tracción (UNE-EN 1392 modificada): Debido a las grandes elongaciones de la espuma de EVA, se han empleado probetas de 50 x 300 mm con un espesor de 50 mm. Estas dimensiones permiten que la unión oblicua se sitúe en el centro de la probeta con suficiente margen para que la distribución de tensiones sea uniforme durante el estiramiento axial.

Muestras sin envejecer: Se ensayan los cuatro adhesivos (Supertec 6200, Insocol GTR, Insocol GTR + 5% Desmodur RC, y Swift Col 9720).

Muestras envejecidas: Se ensayan Supertec 6200, Insocol GTR + 5% Desmodur RC, y Swift Col 9720. El adhesivo Insocol GTR sin reticulante se excluye de esta fase sabiendo que no es una solución que soporta las condiciones de envejecimiento que requieren estos ensayos.

Procedimiento de ensayo.

Este ensayo se fundamenta en la capacidad de la unión para transmitir cargas axiales. El procedimiento paso a paso es el siguiente:

1. Preparación de las probetas: Se cortan rectángulos de espuma de EVA de dimensiones no normalizadas, realizando un corte oblicuo (biselado) en los extremos que se van a unir para maximizar el área de contacto y simular la geometría real de ensamblaje.
2. Aplicación del adhesivo: Se aplica una capa uniforme de adhesivo en ambas caras de la unión oblicua, respetando los tiempos de evaporación de solventes (*open time*) y procediendo a la reactivación térmica si el fabricante lo requiere.
3. Montaje en máquina: Las probetas se sujetan en las mordazas de la máquina de ensayos. Se emplean mordazas de contacto amplio para asegurar una

distribución de presiones que no colapse la estructura celular de la EVA antes del ensayo (figura 21).

4. Ejecución: Se aplica una carga de tracción a una velocidad constante de 100 mm/min hasta alcanzar la rotura de la probeta o la separación de la unión.

5. Registro de datos: Se mide la fuerza máxima de rotura (N) y se analiza el modo de fallo. Se considera un éxito técnico cuando el fallo es cohesivo en el sustrato, indicando que la unión adhesiva posee una resistencia superior a la propia espuma.



Figura 21. Montaje de probetas con garras para ensayo de pelado.

4. Resultados y discusión.

4.1. Ensayo de pelado.

En las probetas no sometidas a envejecimiento, se observa que los adhesivos Supertec 6200 e Insocol GTR + 5% Desmodur RC presentan un comportamiento muy similar. Ambos muestran prácticamente la misma pendiente inicial, lo que denota una rigidez equivalente de la unión hasta alcanzar una carga aproximada de 11 N. A partir de este punto, la cola Supertec 6200 demuestra una mayor capacidad de carga, alcanzando una tensión máxima de 13,2 N, superando ligeramente la resistencia del Insocol GTR reticulado. Por su parte, el adhesivo Swift COL 9720 tiene una rigidez inferior en comparación con Supertec 6200, aunque su fuerza de rotura final se sitúa en rangos similares, lo que indica un comportamiento más dúctil antes del fallo.

Una característica presente en la mayoría de los ensayos de pelado de este estudio es la presencia de máximos y mínimos relativos constantes durante la propagación del esfuerzo. Este comportamiento se debe a la geometría del sustrato de EVA. Los huecos en forma de rombo generan variaciones periódicas en el área de contacto efectiva. La tensión aumenta cuando la fractura atraviesa la sección sólida de la espuma y disminuye al encontrar los huecos con forma de rombo. En los casos de Supertec 6200 e Insocol GTR + 5% Desmodur RC y Swift Col 9720, se ha observado que el material de la espuma llega a desgarrarse al alcanzar la tensión máxima (figuras 24, 25 y 26), lo que evidencia un fallo cohesivo del sustrato, este resultado es el ideal ya que demuestra que la fuerza de la unión adhesiva supera la resistencia de los materiales unidos.

En las siguientes curvas representadas mediante un gráfico de fuerza-deformación (figura 22) se exponen los resultados de los ensayos de pelado realizados. Los datos reflejan los resultados de rigidez, elasticidad y resistencia máxima de cada uno de los adhesivos.

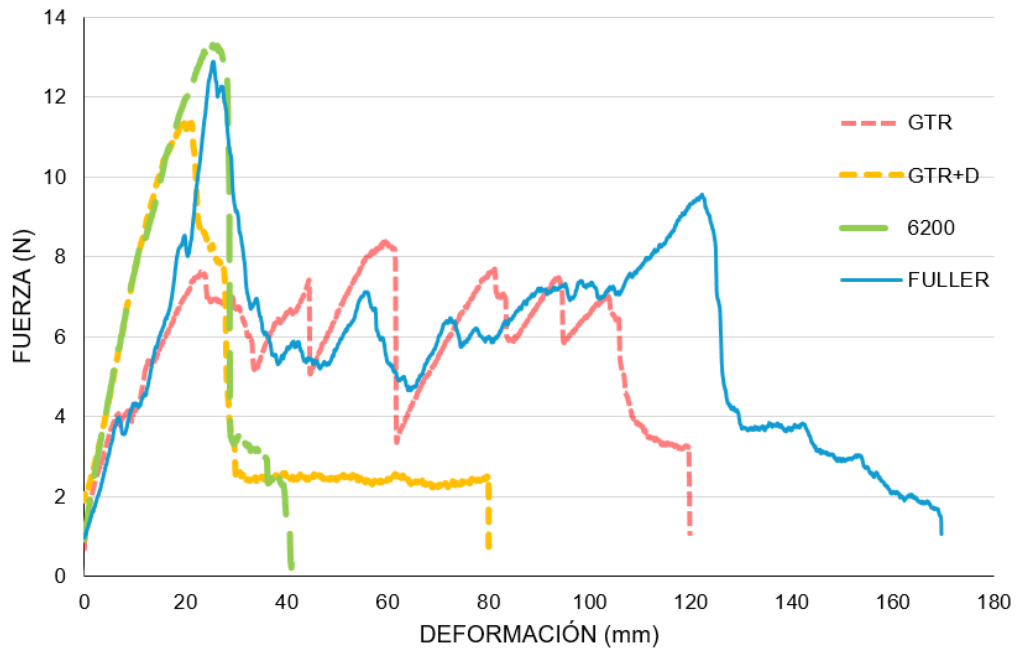
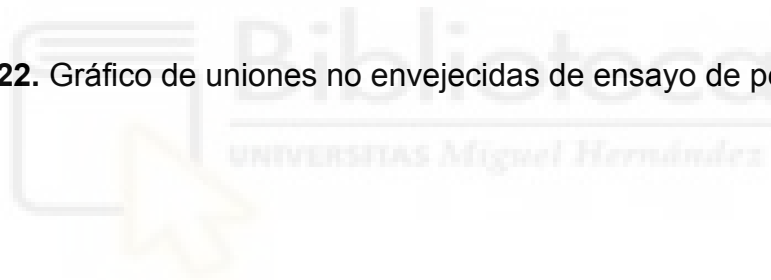


Figura 22. Gráfico de uniones no envejecidas de ensayo de pelado.



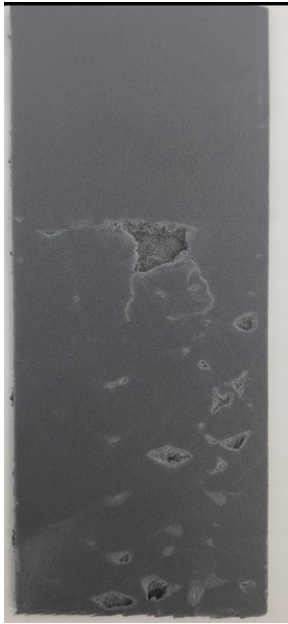


Figura 23. Insocol GTR

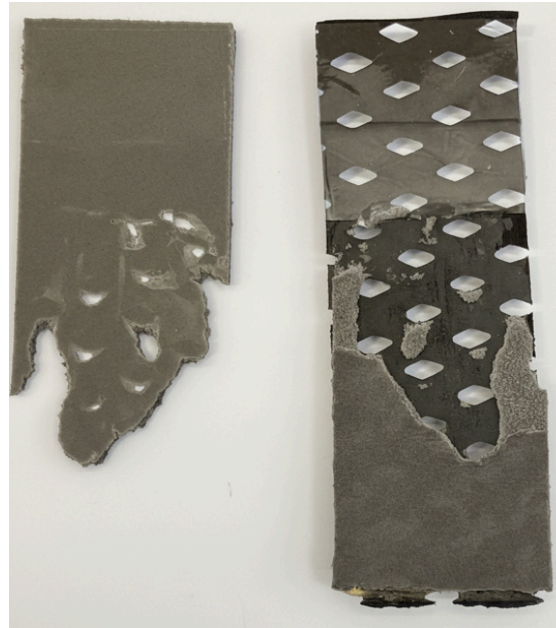


Figura 24. Insocol GTR + 5%
Desmodur RC



Figura 25. Supertec 6200

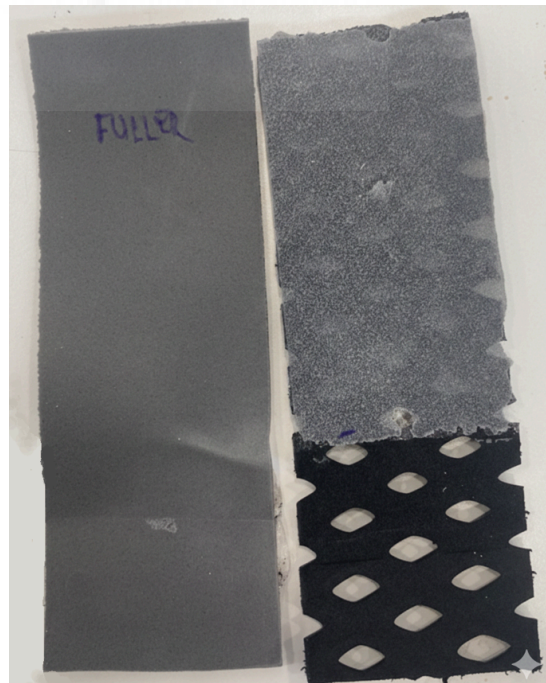


Figura 26. H. B. Fuller Swift Col 9720

El proceso de envejecimiento acelerado (72 horas, 55 °C, 95% HR) ha revelado diferencias críticas en la durabilidad de los adhesivos (figura 27). El adhesivo Supertec 6200 experimenta una disminución de sus capacidades, volviéndose notablemente más elástico después de haber pasado por la cámara térmica. Sin embargo, su rendimiento sigue siendo el más satisfactorio para esta aplicación, manteniendo una tensión de rotura superior a los 10 N, lo que garantiza una estabilidad residual aceptable. En contraste, los resultados del adhesivo Swift COL 9720 sufren una degradación severa, con una tensión máxima que cae hasta los 2,78 N. Este valor resulta insuficiente para los estándares de calidad exigidos, indicando una alta sensibilidad de este polímero a la hidrólisis.

En la siguiente gráfica se comparan los adhesivos que no han sido envejecidos frente a los que si para poder entender como se comportan las uniones bajo la degradación producida por el sudor y la temperatura del pie en uso.

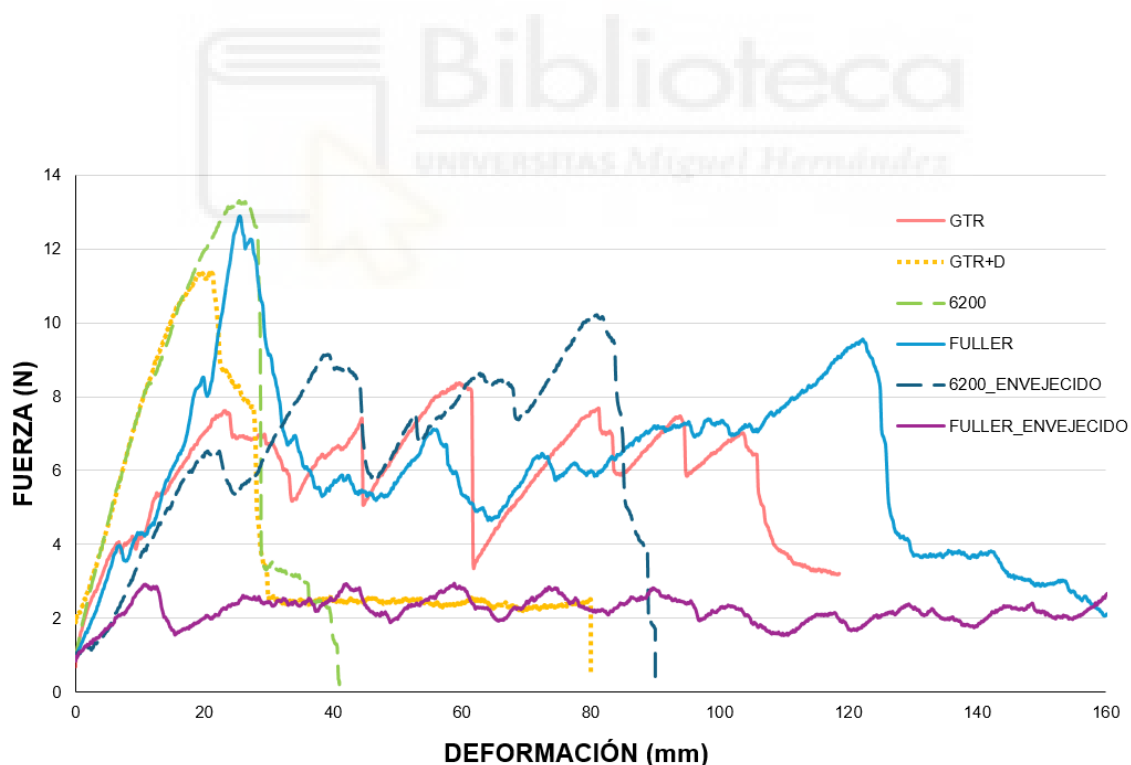


Figura 27. Gráfico de uniones no envejecidas contra envejecidas de ensayo de pelado.

Tras ver que en la mayoría de los ensayos la espuma de PU era la que acababa rompiendo se decide caracterizar este material (figura 28) y así poder determinar si las roturas eran debidas al fallo cohesivo o al fallo del propio material.

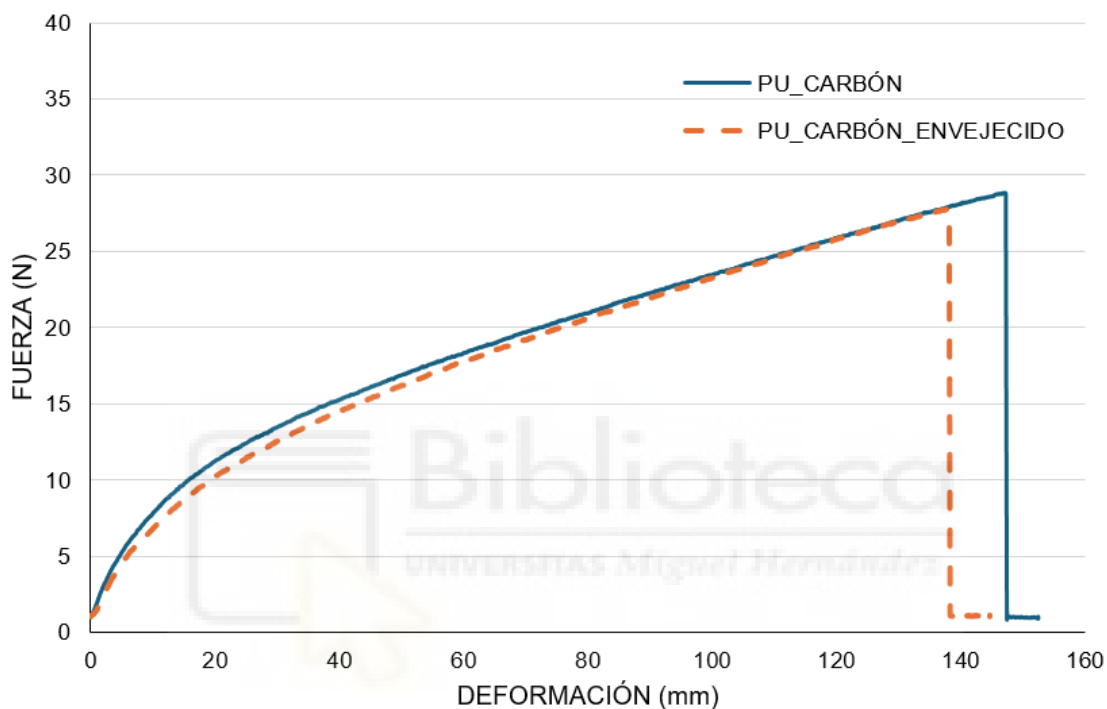


Figura 28. Gráfica de caracterización de Espuma de PU con Carbón Activo.

Los resultados obtenidos en los ensayos de pelado a 180° conducen a las siguientes conclusiones sobre las distintas uniones adhesivas de espuma de poliuretano y la espuma de EVA, así como su resistencia tras la degradación sufrida por envejecimiento en cámara térmica.

Finalmente, cabe destacar el mal comportamiento del adhesivo Insocol GTR + 5% Desmodur RC ante el envejecimiento. Aunque en estado inicial presentaba resultados excelentes, no ha sido posible realizar el ensayo de pelado tras el envejecimiento debido a que la unión desaparece completamente dentro de la cámara térmica. Las probetas se despegaron completamente después de la exposición a las condiciones de humedad y temperatura de los ensayos como se observa en las figuras 29 y 30. Los resultados obtenidos evidencian la imposibilidad del uso de este adhesivo en la unión ensayada puesto que el producto no podría continuar con el proceso de fabricación, en el que es necesario someter la unión a un proceso de termoconformado.



Figura 29. Insocol GTR + 5% Desmodur RC (Unión envejecida)



Figura 30. H. B. Fuller Swift Col 9720 (Unión envejecida)

4.2. Ensayo de tracción.

El ensayo de tracción sobre la unión oblicua de piezas de EVA pretende determinar la eficacia del adhesivo ante esfuerzos de extensión, simulando las cargas de tracción que soporta la plantilla debidas a la flexión bajo los metatarsos del pie experimentada en el movimiento al andar. Los resultados obtenidos ofrecen una visión clara de las uniones con los adhesivos Supertec 6200, Insocol GTR con un 5% de Desmodur RC y Swift COL 9720 de H.B. Fuller, tanto en su estado sin envejecer como tras el proceso de envejecimiento acelerado.

En las probetas sin envejecer se observa un comportamiento elástico en las fases iniciales de carga en todos los adhesivos. El adhesivo Supertec 6200 y la combinación de Insocol GTR con Desmodur RC demuestran una mayor rigidez inicial, lo que se traduce en una mayor capacidad para mantener la integridad de la unión sin deformaciones excesivas. Por el contrario, el adhesivo Swift COL 9720 muestra una mayor deformabilidad, permitiendo un ligero deslizamiento entre las caras antes de alcanzar su punto crítico. En lo que se refiere a resistencia máxima, los sistemas Insocol GTR + Desmodur y Supertec 6200 logran tensiones de rotura elevadas, produciéndose en la mayoría de las uniones un fallo cohesivo del sustrato de EVA de menor dureza. Este resultado es indicativo de que el adhesivo posee una fuerza de enlace superior a la resistencia de la propia espuma de EVA. Cabe destacar que comparando los adhesivos Insocol GTR + Desmodur y Supertec 6200 resultan ser más interesantes los resultados obtenidos por Insocol por el hecho de soportar una tensión superior a la vez que tiene una mayor elasticidad, propiedades que resultan clave en esta aplicación.

En las siguientes curvas representadas mediante un gráfico de fuerza-deformación se exponen los resultados de los ensayos de tracción realizados (figura 31). Los datos reflejan los resultados de rigidez, elasticidad y resistencia máxima de cada uno de los adhesivos.

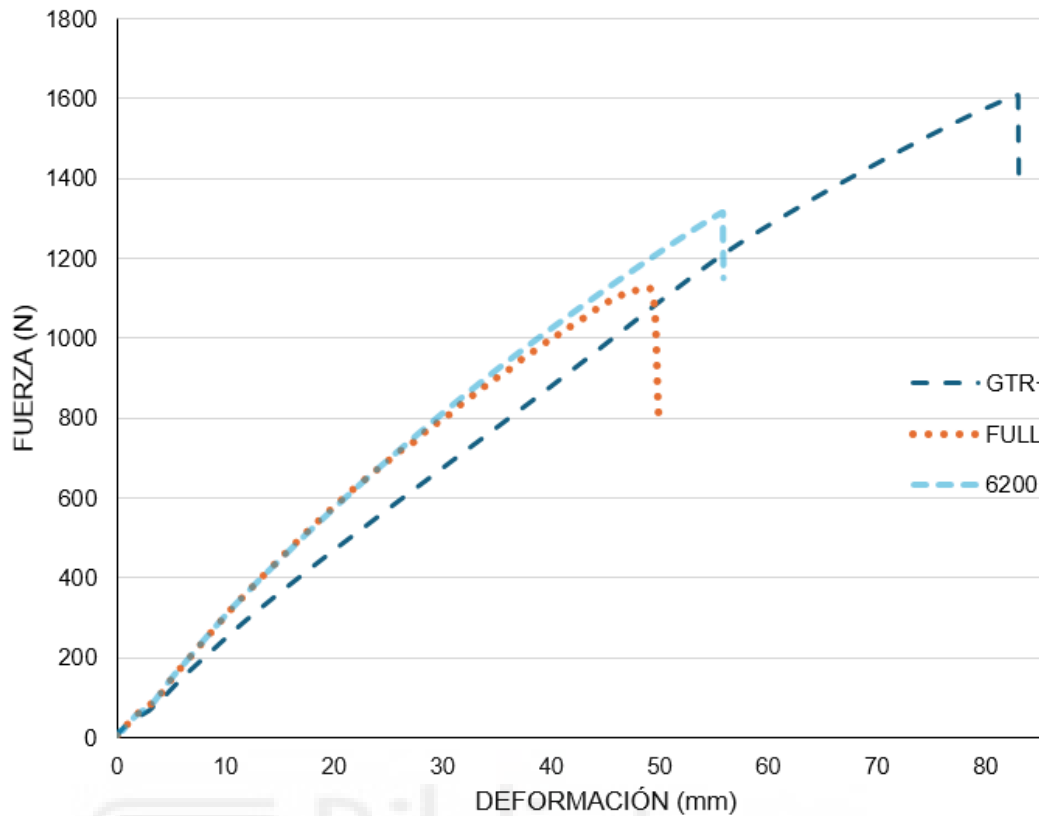


Figura 31. Gráfico de uniones no envejecidas de ensayo de tracción.

El impacto del envejecimiento (72 horas a 55 °C y 95% HR) es determinante para evaluar la calidad de la unión adhesiva. Al analizar los gráficos post-envejecimiento, se aprecia una degradación significativa en el adhesivo Swift COL 9720, cuya tensión de rotura desciende drásticamente. Este fenómeno sugiere una sensibilidad elevada del adhesivo de H.B. Fuller a la hidrólisis en estas condiciones específicas de porosidad del material. En cambio, el Supertec 6200 mantiene un rendimiento robusto; aunque se observa un incremento en su elongación (producto de la plastificación sufridas en el proceso de envejecimiento), la fuerza máxima de rotura se mantiene en niveles aceptables (figura 32).

Un dato de especial relevancia técnica es el comportamiento del Insocol GTR reticulado con Desmodur RC. A diferencia de lo observado en los ensayos de

pelado, en la configuración de tracción con el pegado oblicuo, la unión suele presentar una resistencia residual mayor tras el envejecimiento, aunque con una clara pérdida de las propiedades elásticas iniciales. No obstante, la caída generalizada de prestaciones en los adhesivos envejecidos frente a los iniciales confirma que la humedad extrema afecta a la unión adhesiva, debilitando los enlaces químicos.

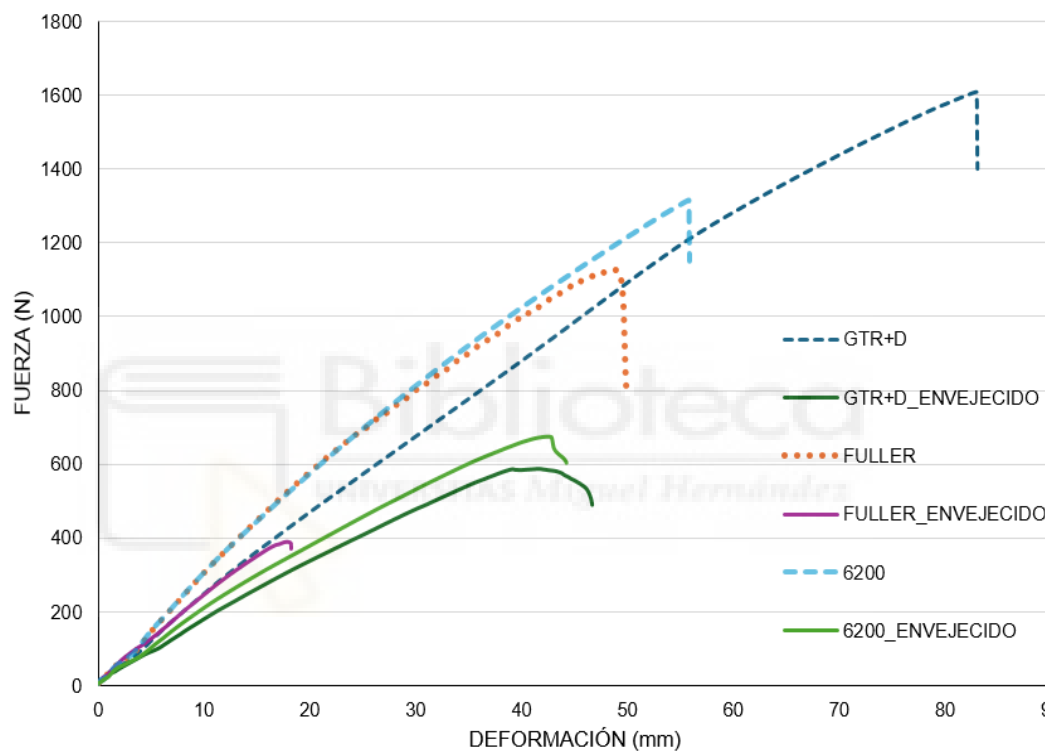


Figura 32. Gráfico de uniones no envejecidas frente a envejecidas de ensayo de tracción.



Figura 33. Insocol GTR + 5 % Desmodur RC

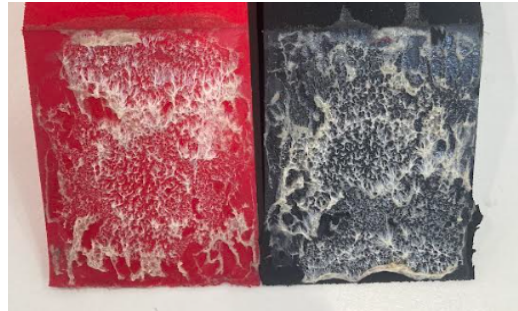


Figura 34. Insocol GTR + 5 % Desmodur RC (Unión envejecida)



Figura 35. H. B. Fuller Swift Col 9720



Figura 36. H. B. Fuller Swift Col 9720 (Unión envejecida)



Figura 37. Supertec 6200



Figura 38. Supertec 6200 (Unión envejecida)

En conclusión, la geometría de la unión oblicua favorece la distribución de tensiones en comparación con el pelado, pero el factor determinante sigue siendo la resistencia química del adhesivo ante la temperatura. Además, tras el proceso de envejecimiento, en los adhesivos Insocol GTR + Desmodur y Supertec 6200, se observa una plastificación de los adhesivos dando la sensación de los adhesivos han mejorado la adhesión al sustrato (figuras 34 y 38), aunque se sospecha que es debida que la elevada humedad del ensayo ha hecho que el agua entrase en la red del polímero aumentando su volumen libre, motivo por el que se observa esa plastificación, sin embargo no llega a romper la unión química. El adhesivo Supertec 6200 ofrece una alta rigidez inicial y la mejor estabilidad mecánica tras el ciclo de envejecimiento en cámara térmica, sin embargo Insocol GTR resulta más interesante porque ofrece una unión más elástica además de obtener una tensión de rotura mayor que la de Supertec 6200.



5. Conclusión.

5.1. Ensayo de pelado.

El adhesivo Supertec 6200 presenta el mejor rendimiento global: Es el adhesivo más resistente tanto sin envejecer (alcanzando una tensión máxima de 13,2 N) como tras el proceso de envejecimiento. Aunque la cámara térmica lo vuelve más elástico y disminuye sus capacidades, logra mantener una tensión de rotura superior a 10 N, lo que garantiza una estabilidad aceptable para esta aplicación.

El fallo cohesivo demuestra la alta efectividad de las uniones iniciales: En las probetas sin envejecer de Supertec 6200 e Insocol GTR (+ 5% Desmodur RC), la fuerza de la unión adhesiva supera a la del propio sustrato, provocando el desgarro de la espuma (fallo cohesivo). Este es el comportamiento ideal en este tipo de uniones.

La geometría del sustrato afecta directamente a la propagación del esfuerzo: Los huecos en forma de rombo de la espuma de EVA provocan variaciones constantes en el área de contacto efectiva, lo que se traduce en máximos y mínimos relativos durante los ensayos de pelado.

El Swift COL 9720 es inviable por su sensibilidad a la hidrólisis: Aunque antes del envejecimiento muestra una rigidez menor y un comportamiento más dúctil con una buena fuerza de rotura, sufre una degradación severa tras pasar por la cámara térmica. Su tensión máxima cae a 2,78 N, un valor inaceptable para los estándares de calidad.

El Insocol GTR (+ 5% Desmodur RC) es incompatible con el proceso de fabricación: Pese a mostrar excelentes propiedades mecánicas y una rigidez equivalente al Supertec 6200 en estado inicial (soportando hasta ~11 N antes del fallo), la unión desaparece por completo bajo las condiciones de temperatura y humedad (55 °C, 95% HR). Esto imposibilita su uso, ya que no soportaría el proceso de termoconformado necesario en la fabricación.

5.2. Ensayo de tracción.

Insocol GTR (+ 5% Desmodur RC) es el adhesivo más idóneo para esta sollicitación: En términos de tracción con el pegado oblicuo (que simula la flexión

del pie), este sistema presenta el mejor equilibrio técnico en estado inicial. Supera al Supertec 6200 al soportar una tensión de rotura mayor y ofrecer una elasticidad superior.

Al igual que ocurre con otras sollicitaciones, los adhesivos Supertec 6200 e Insocol GTR (+ Desmodur RC) sin envejecer logran que la unión sea más fuerte que el propio material base, provocando un fallo cohesivo en el sustrato de EVA de menor dureza.

La geometría de la unión influye en la resistencia al envejecimiento, la configuración en bisel (unión oblicua) distribuye mejor las tensiones que el esfuerzo de pelado. Esto permite que el Insocol GTR reticulado mantenga una resistencia residual mayor tras la cámara térmica, sobreviviendo al ensayo a pesar de perder sus propiedades elásticas originales.

Tras el envejecimiento, Supertec e Insocol muestran una mayor elongación que da la sensación óptica o mecánica de haber mejorado la adhesión. Sin embargo, esto es un efecto físico de plastificación: la alta humedad (95% HR) y temperatura (55 °C) introducen agua en la red del polímero, aumentando su volumen libre sin llegar a romper los enlaces químicos, pero debilitando las prestaciones generales de la unión.

El Swift COL 9720 es inapropiado para esta aplicación, en estado inicial permite un deslizamiento indeseado entre las caras biseladas por su alta deformabilidad. Tras el envejecimiento, sufre una caída drástica de la tensión de rotura, confirmando su nula viabilidad debido a su alta sensibilidad a la hidrólisis combinada con la porosidad del material.

6. Líneas futuras.

Tras el análisis de los resultados obtenidos y la identificación de las limitaciones en la durabilidad de las uniones bajo condiciones extremas de humedad y temperatura, se plantean diversas líneas de investigación para la optimización del proceso de fabricación de plantillas.

6.1. Implementación de tratamientos superficiales.

Dado que el tratamiento *No-Fray* (NF) y la porosidad del carbón activo reducen drásticamente la energía superficial de la espuma de PU, se propone investigar el uso de imprimaciones (*primers*) basadas en disolventes. Esta medida no supone una gran inversión en maquinaria y permite mejorar el "mojado" del sustrato. La aplicación de un *primer* específico para poliuretano podría sellar parcialmente la microporosidad del carbón, evitando que los isocianatos del adhesivo sean absorbidos prematuramente, asegurando así una reticulación efectiva en la interfase.

6.2. Evaluación de adhesivos de base acuosa o "Hot melts de PU".

Una alternativa realista para mejorar la sostenibilidad y reducir costes por gestión de residuos de solventes es el ensayo con adhesivos de poliuretano reactivos de base agua o Hot-Melts de baja temperatura. Estos adhesivos presentan una viscosidad que puede controlarse térmicamente, lo que facilitaría una penetración más uniforme en los bordes de las perforaciones romboidales de la EVA sin necesidad de tiempos de secado tan prolongados, optimizando el flujo de producción.

6.3. Ensayos de fatiga dinámica.

Los ensayos de tracción y pelado realizados en este estudio son de carácter estático. Sin embargo, una plantilla de calzado se somete a miles de ciclos de carga durante su vida útil. Como línea futura, se propone el desarrollo de un ensayo de fatiga cíclica. Este ensayo permitiría observar si la elasticidad ganada por el adhesivo Supertec 6200 tras el envejecimiento se traduce en una mayor resistencia

a la formación de grietas por flexión repetida o si, por el contrario, acelera el fallo de la unión.

6.4.Modificación de la geometría de los sustratos.

Sin aumentar el coste del material, se podría investigar la optimización de la geometría de las perforaciones de la EVA. Alterar el ángulo de los rombos o la densidad de los mismos en zonas de alta carga podría maximizar el anclaje mecánico observado en este estudio, reduciendo la dependencia exclusiva de la adhesión química en las zonas donde el tratamiento NF del PU es más agresivo.



7. Referencias.

- [1] National Geographic. (2010). *Zapato de cuero de Areni-1: El calzado de cuero más antiguo del mundo* [Imagen]. National Geographic Society.
- [2] National Geographic. (2023). *Sandalias de fibras vegetales de la Cueva de los Murciélagos de Granada* [Imagen]. National Geographic España.
- [3] Pizá, M. A. (2020). *Evolución de la maquinaria en el montaje de calzado: Del cosido manual a la Revolución Industrial*. Museo del Calzado de Elda.
- [4] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Ciencia e ingeniería de materiales* (9ª ed.). Reverté. (Referencia para el comportamiento de polímeros y espumas de EVA).
- [5] Inescop. (2022). *Guía técnica de materiales poliméricos y adhesivos para calzado: EVA, PU y caucho*. Centro Tecnológico del Calzado. .
- [6] Venexma Europa. (s.f.). *Piso Kamp (TR) para suelas de zapatos* [FIGURA 1]. Venexma Europa.
- [7] Jihua 3515. (2024). *Diagrama de los componentes y proceso de costura de la construcción Goodyear Welt* [FIGURA 2]. Jihua 3515.
- [8] Shoemakers academy. *Diagrama de piezas del calzado*. Figura los componentes internos de un zapato. [FIGURA 4]
- [9] Crownhill Shoes. (2016). *Diagrama de la doble costura en la construcción de zapatos Goodyear* [FIGURA 6]. Crownhill Shoes.
- [10] Serma. (2021). *Modelo terminado de corte y plantilla cosidos mediante sistema Strobel* [FIGURA 7]. Serma.
- [11] DuPont. (s.f.). *El desarrollo del neopreno: El primer caucho sintético comercial* [Imagen]. DuPont Museum & Archives.
- [12] Pérez-Limiñana, M. A. (2018). *Mecanismos de degradación por hidrólisis en uniones adhesivas de poliuretano*. Revista de Adhesión y Adhesivos / Inescop.

- [13] Arán-Ais, F. (s.f.). *Análisis de fallos de adhesión: Migración de plastificantes y capas límite débiles*. Inescop Formación
- [14] Asociación Española de Normalización (UNE). (2006). *UNE-EN 1392: Adhesivos para calzado. Métodos de ensayo para adhesivos para materiales de cuero y calzado. Resistencia de la unión: Pelado y tracción*.
- [15] Asociación Española de Normalización (UNE). (2006). *UNE-EN 15062: Adhesivos para calzado. Envejecimiento*.
- [16] Asociación Española de Normalización (UNE). (2006). *UNE-EN 15037: Adhesivos para calzado. Requisitos para uniones sometidas a pelado*.
- [17] Grupo Zahonero. (2023). *Especificaciones técnicas de espumas de poliuretano con partículas de carbón activo para control de olores y confort*.
- [18] H.B. Fuller Company. (2023). *Ficha Técnica: Swift® col 9720. Adhesivo de poliuretano para la industria del calzado*.
- [19] QS Adhesives & Sealants. (2022). *Ficha de Datos de Seguridad y Aplicación: Supertec 6200. Adhesivo de contacto de base poliuretano*.
- [20] Insoco S.L. (2021). *Manual de uso: Insocol GTR y sistemas de pegado para componentes de calzado*.
- [21] Covestro. (2023). *Reticulación de poliuretanos con isocianatos tipo Desmodur para uniones de alta resistencia*. Covestro AG.