



Al viajar por campos al sur de Europa, un extraño llamado a veces puede arrancarnos de nuestro sueño. Aquel que crea en fantasmas, que se tranquilice: a la luz, el fantasma de la noche tropical resulta ser un gecko, que está pegado al techo. Tal vez sólo estaba cazando insectos que también saben moverse sin problemas por allí. El secreto de por qué los geckos, insectos y arañas pueden pasear boca abajo colgados del techo despierta desde hace tiempo la curiosidad de los investigadores. Sobre todo, están fascinados con el

materiales e ingenieros, por supuesto también trabajan biólogos. Stanislav Gorb hace tiempo que se dedica a estudiar a los reyes de la adhesión como ser insectos, arañas y geckos. Durante varios años trabajó en el Instituto Max Planck de Biología del Desarrollo en Tubinga. Él y su equipo pueden mostrar imágenes fascinantes de cómo se ve debajo de los pies de los gecónidos – ese es el nombre de la familia. El Tokay (*Gekko gecko*) es el más indicado, ya que este lagarto del Sudeste Asiático con manchas naranja-rojizas,

Con adherencia ilimitada

Cómo gecko y compañía inspiran el desarrollo de nuevos materiales

hecho de que, para huir, los animales puedan suprimir instantáneamente esa impresionante fuerza de adhesión de sus pies.

¿Qué opciones tienen a su disposición para lograr esto? Ventosas diminutas quedan descartadas, ya que jamás podrían apoyar su contorno sobre el rugoso y polvoriento revoque para quedar adheridas. A su vez, los adhesivos químicos verdaderos necesitan tiempo para endurecer y luego, el pobre animal ya no podría levantar ninguna pierna. Un argumento en contra de diminutos ganchos, es que estos artistas de la sujeción incluso encuentran apoyo sobre el liso vidrio. Así que tienen que usar otros trucos. Cuáles son, es lo que indagan los científicos en el Instituto Max Planck para Investigación de Metales en Stuttgart. No sólo quieren develar el secreto del gecko, la mosca y la araña, sino también, con este conocimiento, desarrollar nuevos materiales adhesivos artificiales. Deben unirse sin pegamento y liberarse sin rastros de pegamento, como el pie de este animal. Esta imitación técnica de la naturaleza se llama **biomimética**. De hecho, los primeros prototipos funcionales de tal película adhesiva ya existen, y se seguirán desarrollando con un socio industrial para ser lanzados al mercado.

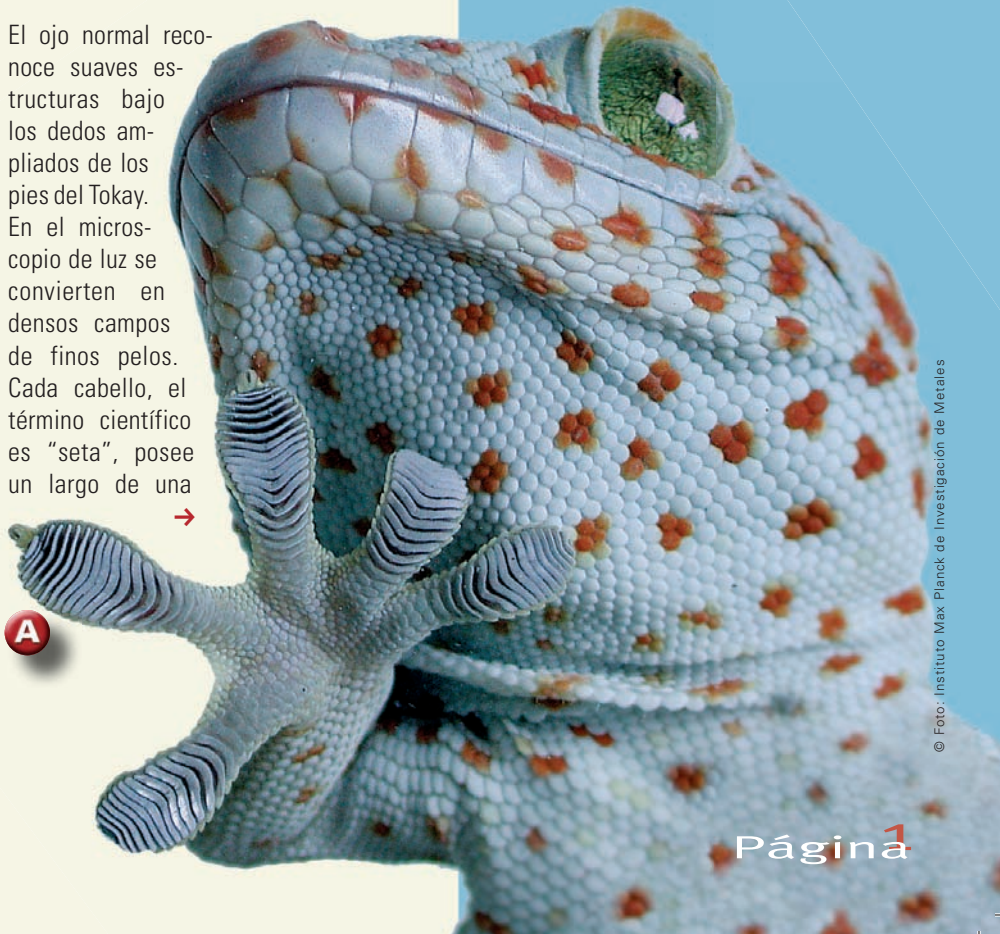
El área de investigación es altamente interdisciplinaria: junto a físicos, científicos de

es una de las especies más grandes (**Fig. A**). Un macho adulto puede llegar a medir casi cuarenta centímetros y pesar unos trescientos gramos. Incluso este peso pesado avanza sin problemas a lo largo de la cara inferior de un vidrio horizontal. En la naturaleza esto equivale a una verdadera obra maestra en la técnica de la sujeción.

El ojo normal reconoce suaves estructuras bajo los dedos ampliados de los pies del Tokay. En el microscopio de luz se convierten en densos campos de finos pelos. Cada cabello, el término científico es "seta", posee un largo de una

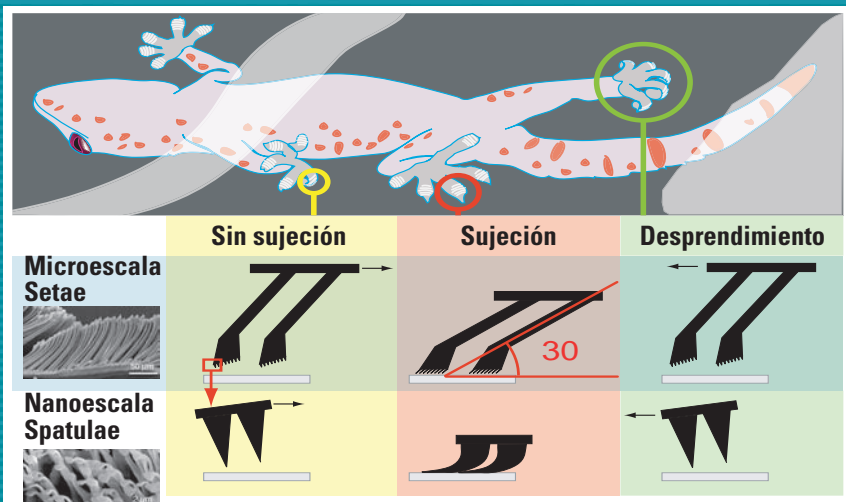
→

A



► El Tokay (*Gekko gecko*)

SUJECIÓN LIMPIA – LIBERACION VELOZ



Los geos encuentran sujeción sobre casi cualquier superficie. Pero en apenas quince microsegundos (millonésimas de segundos) se pueden liberar sin esfuerzo alguno. Para ello activan y desactivan su sistema de sujeción en una sofisticada coreografía. Mientras el geco no utiliza sus setas, éstas se curvan hacia la planta para que las espátulas no se peguen entre sí (evitar esto, por cierto, también es una cuestión central en el diseño de las láminas adherentes artificiales). Cuando el geco apoya su pie, lo hace presionando ligeramente contra la dirección del movi-

miento. Así, las setas se desdoblán hasta que su ángulo con respecto a la superficie sea inferior a treinta grados (véase imagen - en el medio, arriba). En esta posición, las puntas de las setas se dirigen en forma paralela hacia la superficie y todas las espátulas ahora se aferran a ella (véase imagen - en el medio, abajo). La técnica de liberación es graciosa: el geco levanta sus dedos hacia arriba como si estuviera despegando cintas adhesivas. Así, las setas son retorcidas por fuera del ángulo de treinta grados, y las espátulas se liberan de la superficie sin mayor esfuerzo.

evolución no las ha producido? La respuesta está en el peso de los animales: una cabra es por lo menos cien veces más pesada que una lagartija. En consecuencia, las espátulas de la cabra deberían ser mucho más finas que la de los geos, es decir, ¡más delgadas que una única molécula de queratina! "Llega un punto en el que los cabellos serían tan delgados que simplemente se desgarrarían", dice Gorb.

Cuanto más profundo se penetra en el mundo microscópico (o incluso nanoscópico) de los contactos, más fuerte rigen las leyes de la física que describen la teoría de estas aproximaciones. En principio, se crea un contacto siempre que dos superficies se aferran mutuamente. Rocas, corteza de árboles, hojas, o más recientemente, superficies artificiales como el vidrio no se preocupan por los geos o las moscas. Por el contrario, son sus adherentes pelos los que tienen que adaptarse bien a estas diferentes superficies. Por lo tanto, tienen que ser extremadamente flexibles, pero también muy resistentes, de lo contrario podrían desgarrarse. Así es que durante el contacto, las setas se comportan como pequeños resortes: se doblan, pero en ello su resistencia a la deformación aumenta. Durante el contacto, a esta resistencia mecánica se le opone una fuerza de atracción, cuya causa son fuerzas moleculares de superficie, como veremos a continuación.

© Gráfico: Roland Wengemayr

→ décima de milímetro y un grosor de tan sólo un quinto de micrón, y así, es diez veces más fino que un cabello humano. El aún más potente microscopio de electrones muestra que cada seta se divide en cientos de pequeñas terminaciones llamadas espátulas (ver imágenes en el recuadro). Cada una de éstas sólo tiene unos doscientos nanómetros de ancho (un nanómetro es una milmillonésima parte de un metro), y su grosor realmente ya está más allá de nuestra imaginación: es de tan sólo diez a quince nanómetros. En este reducido espacio caben justo cinco o seis moléculas de queratina, una al lado de la otra. Estas proteínas no sólo son los bloques de construcción del pelo adherente de los geos, sino que también otorgan rigidez a nuestras uñas y cabellos. La queratina es en realidad muy resistente, pero las ramificaciones increíblemente finas hacen que las setas y espátulas parezcan como hechas de terciopelo. Así, pueden amoldarse a la rugosidad microscópica e incluso nanoscópica de las superficies. Éste es uno de los secretos detrás de la adherencia del geco.

Algunos insectos también utilizan pelos adherentes. Pero por lo general, éstos no están ramificados ni son tan finos como los del geco. Este es el caso del escarabajo dorado *Gastrophysa viridula* que, como el Tokay, es uno de los residentes del laboratorio de Stuttgart, y sobre cuyas suaves "medias" las espátulas están dispuestas con una densidad mil veces menor que en los geos (Fig. D). Además, sus espátulas con forma de hongos son de diez a cincuenta veces más gruesas. En algunas arañas grandes, la cuestión ya se afina bastante. Comparaciones como éstas, llevaron a los científicos del Instituto Max Planck a la idea de que podría haber algún tipo de "ley natural de adhesión" (Fig. B): "Cuanto más grande es un animal, más finamente se ramifican sus áreas de contacto". Stanislav Gorb pudo mostrar que realmente todos los especialistas de adhesión por medio de pelos cumplen con esta regla. También explica porqué los geos son los animales más pesados que utilizan este principio. Ciertamente, una cabra de monte gustaría tener "elegantes pezuñas adherentes" para huir por riscos verticales. Pero ¿por qué la

UN GRAN NÚMERO DE "CONTACTOS"

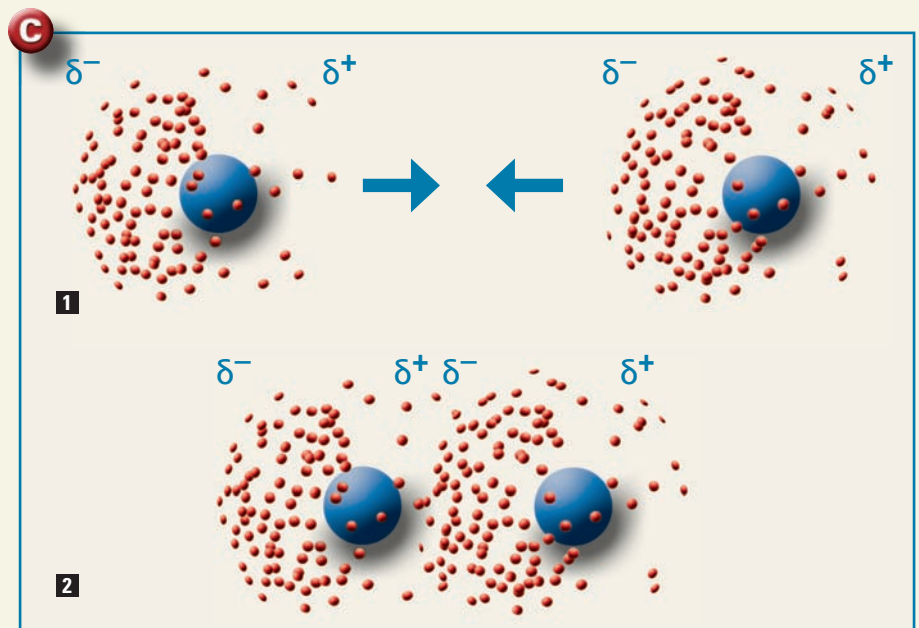
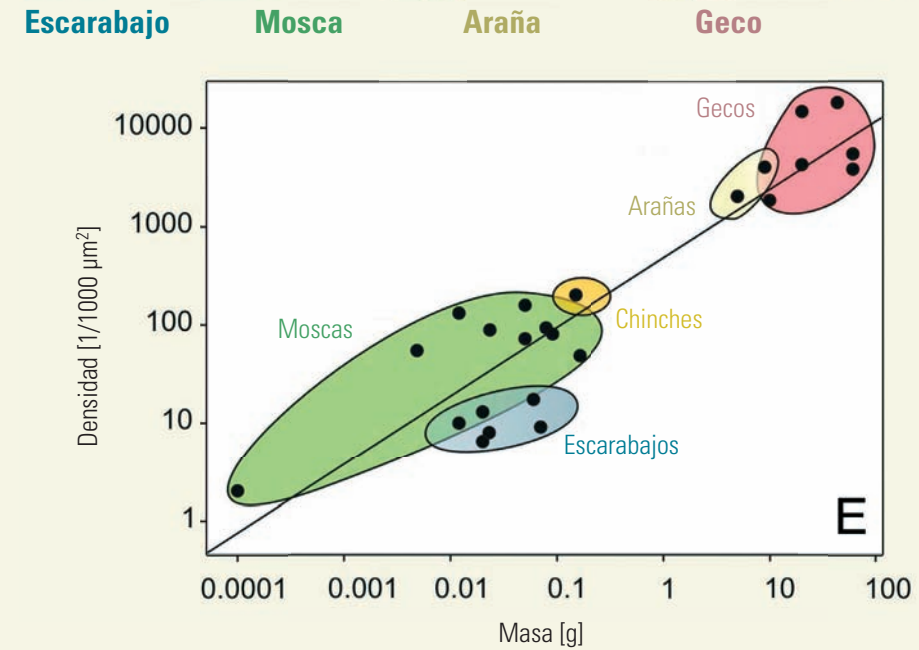
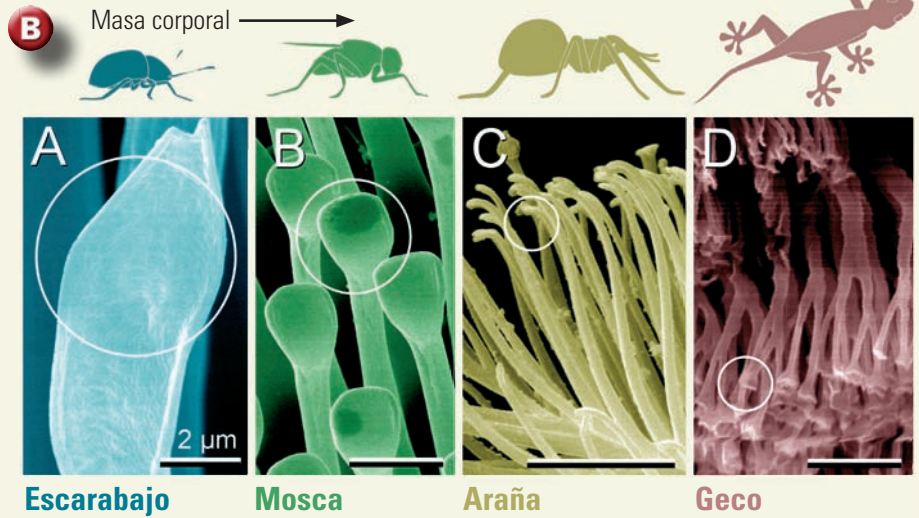
La interacción crucial entre estas dos fuerzas se desarrolla en el borde del contacto. "No es el tamaño del área lo que realmente importa, sino su perímetro", explica el científico del Instituto Max Planck. Esta notable propiedad presente en los pequeños contactos inmediatamente explica por qué los artistas de la sujeción tienen pelos tan finos. Aquel que divide su superficie de contacto en muchas áreas de contacto más pequeñas, obtendrá un mayor perímetro total. Con la ayuda de una hoja de papel, esto puede entenderse fácilmente: si se la corta en varios trozos y luego se mide y suma la longitud de todos los bordes, se obtiene el perímetro total, que excede por mucho el de la hoja original. Sobre la base de esta simple relación geométrica (y algunos cuantos ingredientes más complejos) la teoría de contactos obtiene la siguiente regla asombrosamente sencilla: "Si se corta la superficie de contacto en n contactos más pequeños, donde n es un número natural, la fuerza de contacto aumentará por el factor \sqrt{n} ". Si se dividiera una superficie en 10.000

► El microscopio electrónico revela las finas estructuras espatales (arriba), que proporcionan la adhesión a techos y paredes en pies de escarabajos, moscas, arañas y geos. Cuanto más pesado es el artista de la adhesión, más delgado deberá ser el pelo.

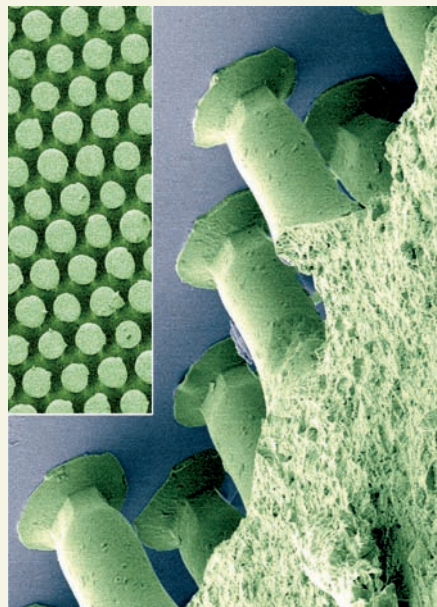
contactos más pequeños, entonces la fuerza adhesiva se elevaría 100 veces. De hecho, la naturaleza no se aleja "ni un pelo" de esta regla, como descubrieron en Stuttgart. La ingenua suposición de que los animales aumentan su superficie de contacto por dividirla en muchos pelos finos es incorrecta. ¡Aumentan su adhesión gracias a un mayor perímetro total de los contactos!

Aun queda la pregunta acerca de cuáles fuerzas moleculares son responsables de la fuerza de atracción. A fines de la década de 1960 el anatomista Uwe Hiller, de la Universidad de Münster, llegó a la huella correcta. Puso a sus geos sobre superficies preparadas de manera diferente y así descubrió dónde las lagartijas fallan: el tobogán perfecto para geos debiera estar recubierto con teflón. La investigación de Hiller mostró que sólo ciertas fuerzas moleculares entran en juego. Fue hace cinco años que el biólogo americano Kellar Autumn pudo mostrar que se trata de una fuerza cuyo nombre proviene del Premio Nobel de Física holandés, Diderik Van der Waals. Autumn y su equipo del *Lewis & Clark College* en Portland, en el estado de Oregon (EE.UU.) encontraron que las setas del geco se adhieren igualmente bien sobre superficies hidrófugas como sobre hidrófilas. Y eso es posible sólo mediante la fuerza de Van der Waals, que funciona sobre casi cualquier tipo de superficie.

Las **fuerzas de Van der Waals** se basan en pequeños desplazamientos de carga en la nube de electrones de las moléculas. Uno puede imaginárselo así: la distribución de electrones en moléculas y átomos no es siempre igual, se trata de un promedio estadístico. La nube electrónica a veces puede desplazarse más en una dirección, y a veces algo más en la otra (Fig. C). Las partículas se comportan como dipolos, y estos pequeños cambios de carga garantizan que las moléculas en la punta del pelo adherente y las moléculas del terreno se atraigan entre sí. Las fuerzas de Van der Waals son muy débiles, pero a través de las muchas espátulas se suman en forma masiva. En principio, pueden sostener a un geco de gran tamaño varias veces. El equipo de Autumn logró medir la fuerza adherente de una sola



► Las fuerzas de Van der Waals surgen porque los átomos o moléculas pueden formar dipolos por períodos muy breves. Si al acercarse dos átomos simultáneamente se da el cambio de carga (1), entonces estas fuerzas ejercen su atracción a partir de cierta distancia: el polo positivo de un átomo polarizado atraerá al polo negativo del otro átomo polarizado (2).



▲ El pie del escarabajo dorado (izquierda) proveyó el modelo para una nueva lámina que incluso adhiere sobre vidrio. La micrografía (derecha) muestra la estructura de la superficie biomimética del material adherente desarrollado por el Instituto Max Planck de Stuttgart.

→ seta de un Tokay. En base a este resultado, los norteamericanos calcularon que un Tokay trepado a una pared vertical lisa, en teoría, puede soportar con sus 6,5 millones de setas el peso de dos personas de tamaño medio (en general los gecos activan sólo un pequeño porcentaje de su poder adherente). Según esta estimación, los escaladores podrían usar a estos animales como manijas vivientes, si ellos colaborasen.

Mientras tanto, los investigadores del Instituto Max Planck, en cooperación con colegas de la Universidad del Sarre y la Universidad de Erlangen-Nuremberg, lograron una hazaña aún mayor: la medición de la fuerza de una única espátula nanoscópica. De esta manera, los investigadores fueron capaces de calcular qué porcentaje de sus espátuladas puntas de pelos utiliza un geco en diferentes situaciones. Para la medición, los investigadores utilizaron un **microscopio de fuerza atómica**. Con una aguja ultra fina, este dispositivo puede medir las fuerzas más sutiles. Sobre esta aguja los investigadores pegaron una seta y con un haz de iones (similar a un cañón láser sólo que mucho más pequeño) eliminaron todas las espátulas, a excepción de una. Ésta fue dispuesta, junto con la aguja, sobre una superficie de vidrio. Luego midieron la fuerza con la que la espátula se deja desprender del vidrio. El resultado fue la fuerza increíblemente pequeña de alrededor de diez Nanonewton. Dado que las 6,5 millones de setas del Tokay se componen de unas mil millones de espátulas, en teoría

se obtiene una fuerza de adhesión máxima del orden de los diez Newton. Un Newton corresponde aproximadamente al peso de un geco con una masa de cien gramos. Es decir que nuestro Tokay de cien gramos, puede adherirse a una placa de vidrio horizontal, con una fuerza que es diez veces más grande que su propio peso.

SIGUIENDO EL EJEMPLO DE LA NATURALEZA

Con ayuda del microscopio de fuerza atómica, los investigadores alemanes también fueron capaces de demostrar que los gecos no confían únicamente en las fuerzas de Van der Waals. Con un aumento de la humedad ambiente, la fuerza adhesiva de cada espátula puede llegar a duplicarse. Esto se debe a una película muy delgada de apenas una o dos moléculas de agua entre espátula y superficie que otorga una mayor cohesión mediante fuerzas moleculares. Los físicos lo llaman **efecto capilar** y también puede observarse en un delgado tubo de vidrio, que es sumergido en un líquido. Mientras que los gecos usan este efecto de forma complementaria, algunos insectos lo usan como herramienta principal. Estos insectos excretan una secreción desde unas glándulas ligadas a los pelos de adhesión. Los gecos y arañas, en cambio, viven con los pies secos. Es que la naturaleza nunca se apoya sobre un único mecanismo. Esto lo saben muy bien los investigadores que desarrollan materiales artificiales estructurados de forma más simple que sus contrapartes naturales. Por el

momento se concentran en la adhesión más sencilla sobre superficies muy lisas, pero que posee muchas aplicaciones técnicas. Las ideas van desde robots con delicados agarres en la producción de DVD's, hasta la sustitución de ruidosos cierres de velcro. En la búsqueda del óptimo diseño adherente, los investigadores analizaron todo tipo de formas peludas, granulares y fungiformes para las estructuras de contacto. Porque incluso la geometría del pelo influye, para lo cual la naturaleza ofrece un surtido de modelos. Con la ayuda de la teoría de contacto, en Stuttgart los investigadores han desarrollado un complejo mapa de la adhesión. En él se muestra de forma sistemática cómo el tamaño, el material y el diseño de las nanofibras influyen la fuerza de adhesión.

De esta manera, pudieron desarrollar una película que logra la mitad de la adhesión de un geco sobre una placa de vidrio. Para la fabricación del material se utiliza una plantilla como molde (como cuando horneamos un pastel), en la que está grabado el negativo de la forma deseada. Luego se vierte un plástico que, una vez endurecido, puede finalmente ser desmoldado, resultando una película ligeramente rugosa. Los investigadores tienen que elaborar las formas con los complejos métodos de la industria de semiconductores. La empresa Gottlieb Binder en Holzgerlingen actualmente está desarrollando una lámina adhesiva de este tipo en un producto comercial. Las potenciales aplicaciones van desde una lámina protectora para vidrios delicados hasta accesorios adhesivos reutilizables. Adiós a los imanes para la nevera, aquí vienen los micropelos que también se adhieren a sus espejos, armarios y ventanas. El modelo para la rugosidad fungiforme de la película fue proporcionado por el escarabajo dorado (Fig. D). Así que la primera cinta adhesiva biomimética comercial es, en realidad, una cinta de insectos.

PIE DE IMPRENTA

Sociedad Max-Planck, Departamento de Información y Relaciones Públicas, Hofgartenstraße 8, 80539 München / e-mail: presse@gv.mpg.de

Redacción: Dra. Christina Beck

Texto: Roland Wengenmayr

Traducción: Ing. Agr. Roberto Neuwald

Diseño: www.haak-nakat.de

La versión en español se hizo con el apoyo del DAAD y con fondos del Ministerio de Relaciones Exteriores de Alemania.



SIEMENS

DAAD Deutscher Akademischer Austausch Dienst
Servicio Alemán de Intercambio Académico

BASF
The Chemical Company

