

# Silicona y construcción

RUFINO J. HERNÁNDEZ MINGUILLÓN

DR. ARQUITECTO

Las siliconas han alcanzado en pocos años un éxito difícilmente comparable al de otros materiales por su vinculación al material mágico por excelencia: el vidrio. La naturaleza química de la silicona y de sus uniones con diferentes sustratos le permiten alcanzar una eficacia óptima con diversos materiales. No obstante, la utilización de siliconas exige un estudio cuidadoso de la compatibilidad con los sustratos utilizados, el cálculo dimensional de las uniones, el análisis de los factores que pueden afectar a las características de la unión y el control de las condiciones específicas durante la ejecución

In just a few years, silicone has achieved a success difficult to match by other materials. This is due to its association with a material which is both excellent and magical: glass.

The chemical nature of silicone and of its union to other substrata allows it to get maximum efficiency with different materials. Its use, however, requires a careful study of the compatibility with the substrata being used, calculation of the dimensions of the unions, analysis of the factors which can affect the characteristics of the union, and control of the specific conditions when it is implemented

## DE LA ARCILLA A LA SILICONA

### Sobre adhesivos y sellantes

No es fácil encontrar con claridad una primera referencia constructiva arcaica que permita establecer diferencias entre el adhesivo y el sellante.

La arcilla que debió unir por primera vez las piedras de una fábrica le aportaba unas características propias de cerramiento acondicionante, pero también contribuía notablemente al mecanismo resistente. En cualquier caso, el material de unión tenía la doble función de adhesivo y sellante, característica del amplio grupo de materiales constructivos destinados a la solución de las uniones.

Podríamos pensar que ésta es una situación común a otros campos de actividad, pero tal extrapolación resulta incierta: en la antigua construcción naval la breña se reservaba para el sellado sin intervenir en la transmisión de esfuerzos, y los carpinteros aseguraban sus uniones mediante colas, mientras sellaban con masillas basadas en aceites vegetales.

Las cales, cementos y yesos (productos todos ellos capaces de generar al ser hidratados estructuras materiales estables, capaces de implementar la capacidad mecánica e higrotérmica de las uniones) han sido utilizados con profusión en la construcción con una funcionalidad diversa, sin que haya sido preciso resolver la dicotomía adhesivo o sellante, hasta el punto de que los términos "unión" o "junta" se utilizan indistintamente para referirse a ambas situaciones.

### Junta de fábrica de hormigón

La capacidad adhesiva y sellante de las pastas hidráulicas basada en fenómenos físico-químicos de adsorción, reacción oxidación-reducción y adhesión mecánica, ha sido en general suficiente para resolver las uniones entre los elementos y componentes constructivos tradicionales sin exigir averiguaciones más profundas; aunque si podemos advertir cierto grado de diferenciación funcional en la especificación de dosificaciones o composiciones diversas atendiendo al uso en determinados elementos compuestos.

La diferencia en la composición es efectivamente la expresión de una diferencia profunda en el cometido que se enmarcara en la coexistencia perpetua de una multiplicidad de funciones. Cuando la sollicitación es preferentemente mecánica la exigencia de adherencia es sobrepasada por la de cohesión, y el aumento de fisuración en el proceso de fraguado correspondiente a la adición del conglomerante redundante en la disminución de la capacidad como sellante.

De forma antagónica, la búsqueda de una mayor capacidad sellante se corresponde con una mayor presencia de moléculas de agua en el interfaz adhesivo-sustrato du-

rante el proceso de adhesión, y posteriormente ante la presencia de agua exterior. La pasta sufre una reducción de su cohesión como consecuencia de la disminución de la proporción del conglomerante y simultáneamente una reducción del módulo resistente y de la resistencia total.

Sin una conciencia explícita de las relaciones causa-efecto entre las variaciones de composición en las pastas y las variaciones en las propiedades físico-constructivas, las pastas producidas mediante conglomerantes hidráulicos han sido utilizadas a través de la historia de la arquitectura con la maestría que el conocimiento empírico alcanza en entornos reducidos, ofreciendo productos que aparentemente asimilables estaban dotados de notables especificidades.

La incorporación a la industria constructiva de nuevos materiales; en una primera etapa fundamentalmente las aleaciones metálicas y posteriormente los productos de naturaleza orgánica sintética y los materiales compuestos de naturaleza diversa, ha exigido la elaboración de nuevas soluciones para unas juntas o uniones en las que las pastas hidráulicas se mostraban inoperantes.

El desarrollo y la comprobación de resultados de nuevos productos en un plazo reducido y en un ambiente tecnológico profundamente acelerado ha producido innumerables fracasos, pero también ha inducido el estudio profundo de fenómenos implicados en las uniones con adhesivos y una investigación en el campo de los materiales que ha conseguido la mutación de la desconfianza en los nuevos productos de los primeros tiempos por una "casi fe" que en ocasiones no se corresponde con las posibilidades intrínsecas a las características de aquellos.

La evolución de los procesos edificatorios hacia una construcción menos condicionada por los factores incontrolables propios de la ubicación del edificio y por las habilidades diferentes de los trabajadores intervinientes, y la necesidad de optimización del resto de factores que afectan al rendimiento final de la actividad constructiva, han sido causa y efecto alternativamente del desarrollo de nuevos productos adhesivos capaces de satisfacer la demanda de unión de los nuevos elementos o subcomponentes premontados en taller que se incorporan progresivamente en el proceso de innovación tecnológica.

Superado también el mito de la junta universal que, acompañando a una estructuración modular unificada, debía producir la simplificación tecnológica de un proceso que por el contrario ha tendido hacia una mayor complejidad, las uniones han experimentado una evolución rapidísima hacia su simplificación que se ha fundamentado en gran medida en los nuevos materiales adhesivos.

## LOS NUEVOS ADHESIVOS

Los polisulfuros fueron los únicos adhesivos utilizables en los nuevos "muros cortina" de principios de los años

50, y su producción y utilización experimentó un rápido incremento hasta 1975, a pesar de que a principios de los años 60 habían aparecido ya los adhesivos acrílicos. Aunque éstos tenían un precio inferior a los primeros, su menor capacidad de deformación, 12,5% frente al 25% de los polisulfuros, limitaban su uso a uniones con movimientos limitados, principalmente entre carpinterías y construcciones de fábrica.

La aparición de los poliuretanos a mitad de los años 60 quebró la hegemonía de los polisulfuros que verían disminuir su mercado en muy pocos años. Los poliuretanos tienen mayor capacidad de deformación, mayor resistencia al agua, son más baratos y se fabrican con mayor rapidez. La utilización de polisulfuros y poliuretanos, que a mitad de los 60 resultaba favorable a los primeros en una proporción 2 a 1, se invertía al cabo de tres lustros y diez años después la proporción era ya de 1 a 6.

Aunque las siliconas tenían ya una considerable presencia en la construcción a principios de los 60, su baja capacidad de deformación, la deficiente adherencia a las fábricas y el elevado precio le restaban competitividad, por lo que hubo que esperar hasta los primeros 70 para que aparecieran siliconas que superasen los parámetros de comportamiento de los poliuretanos y polisulfuros.

### ADHESIVOS CAPACIDAD DE DEFORMACIÓN

Poliuretanos	± 25%
Ad. acrílicos	± 25% (+ 40%)
Siliconas	± 12,5% BM ± 25% MM ± 50% AM + 100% - 50%
Látex acrílico	± 25% (inicial 10%)
Butilo	± 5 a 10%
Hypalon	± 12,5%

Capacidad de deformación de los adhesivos más comunes

Actualmente la presencia de las siliconas en la construcción edificatoria es casi hegemónica en el campo de los adhesivos, hasta el punto de que la expresión "arquitectura de la silicona" se ha convertido en habitual y en las publicaciones sobre sistemas de cerramientos su tratamiento es considerado en capítulos específicos.

La silicona se introdujo en la construcción como sellante, vinculado a las uniones del vidrio, uso en el que ha ocupado totalmente el mercado. Sin embargo, en muy pocos años la investigación ha permitido desarrollar una amplia variedad de productos que han superado con claridad los parámetros de referencia de sus competidores, a la vez que disminuía

progresivamente el diferencia de precio que durante algún tiempo limitó su completa expansión en el mercado.

El desconocimiento general de las características, funciones específicas, exigencias, composición, tipos y sistemas globales correspondientes a las siliconas por una sociedad que apoya los comportamientos masivos basados en el más arraigado empirismo ha conducido a una situación paradójica, casi taumatúrgica, en la que la sociedad completa, con sus chamanes a la cabeza ofrecen su admiración y culto a un material que ha logrado despertar sus inquietudes sensoriales.

La victoria sobre la todopoderosa gravedad, el misticismo implícito a un “plástico inorgánico”, su parentesco molecular con otro material mágico: el vidrio o su desarrollo paralelo al de los semiconductores del silicio, no pueden despreciarse para la comprensión de la actitud social respecto al material estrella del final del siglo XX.

**EL ÉXITO DE LA SILICONA**

El éxito social de la silicona puede considerarse además superior al que otros materiales (hierro, hormigón armado, baquelita, acero, aramidas, etc.) han obtenido en diferentes períodos de la historia, ya que éstos se mostraban directamente con todo su poder, mientras la silicona, más todavía que las argamasas de siempre, permanece casi oculta, escondida tras los paramentos o protegida por las sombras. El éxito de la silicona es el de la inteligencia sobre los sentidos, un éxito parásito que se arroga de la magia máxima del vidrio, de su transparencia y sus reflejos, de su solidez cristalina y su vacua ingravidez.

La silicona parece acercar la realidad construida a visión imaginaria que debió sugerir a Scheebart la contemplación en 1914 del Pabellón de Cristal de Bruno Taut en

la Exposición Verkbund de Colonia de 1914, y que le animó a escribir:

*”Para elevar nuestra cultura a un nivel más alto, nos vemos obligados, nos guste o no, a cambiar nuestra arquitectura. Y esto sólo será posible si libramos las habitaciones en las que vivimos de su carácter cerrado. Sin embargo, esto sólo podemos hacerlo mediante la introducción de una arquitectura de vidrio que admita la luz del sol, de la luna y de las estrellas en las habitaciones, no sólo a través de unas cuantas ventanas, sino a través de tantas paredes como sea posible, consistentes por entero en vidrio, en vidrio coloreado”*

PAUL SCHEEBART

Los edificios que se levantan en nuestro derredor nos persuaden de lo contrario. Tensas fachadas de vidrio coloreado ocultan cual decorado cinematográfico la calidad del edificio envuelto, sin que el espacio interior deba corresponderse con una organización concreta. La luz del sol, la luna y las estrellas son filtradas hasta la anulación para limitar la contaminación térmica exterior. Toda la fachada es de vidrio coloreado, pero la ventana existe. La presencia urbana es el duro reflejo distorsionado de un contenedor metálico pulido. Como en las antiguas argamasas hidráulicas, el término mágico englobante desdibuja los límites del uso, olvida las especificidades de un conjunto de productos diversos que gozan de la doble cualidad de adhesivo y sellante

**DEL COMPORTAMIENTO DE LAS SILICONAS**

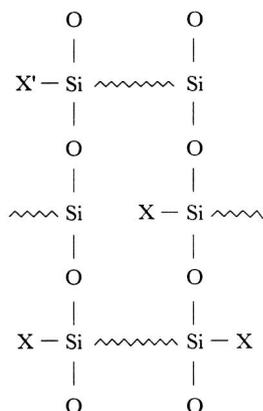
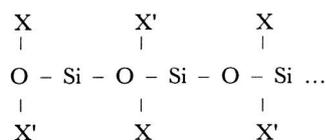
Tienen en común su raíz generadora, su composición química basada en la cadena del siloxano cuya configuración consta de unidades estructurales repetitivas de silicio y oxígeno y donde los radicales x y x' pueden ser átomos de hidrógeno o grupos tales como metilo o fenilo.

**TENSIONES Y DEFORMACIONES DE TRABAJO DE LOS ADHESIVOS DE SILICONA Y POLIURETANO DE LOS ADHESIVOS TRADICIONALES Y SOMETIDOS A ESFUERZO CORTANTE**

Silicona de	A.M.		S.M.M.		S.B.M.		Poli A.M.		P.M.M.	
Deformación máxima recomendada	25%		50%		100%		25%		50%	
Tensión y deformación	kg/cm <sup>2</sup>	%	kg/cm <sup>2</sup>	%	kg/cm <sup>2</sup>	%	kg/cm <sup>2</sup>	%	kg/cm <sup>2</sup>	%
Tensión de tracción A	2,39	25	3,87	50	2,25	100	4,22	25	1,62	50
Tensión cortante long. B	1,90	25	3,30	50	1,41	100	4,50	25	1,55	50
	2,39	43	3,87	65	2,25	430	4,22	21	1,62	53
Tensión cortante transv. C	1,83	25	3,02	50	1,488	100	3,94	25	1,48	50
	2,39	44	3,87	73	2,25	355	4,22	28	1,62	56

\* Silicona, P: poliuretano, A.M.: alto método, M.M.: módulo medio, B.M.: bajo módulo

Características resistentes de los adhesivos más comunes



Estructura de la red intermolecular de una silicona tipo

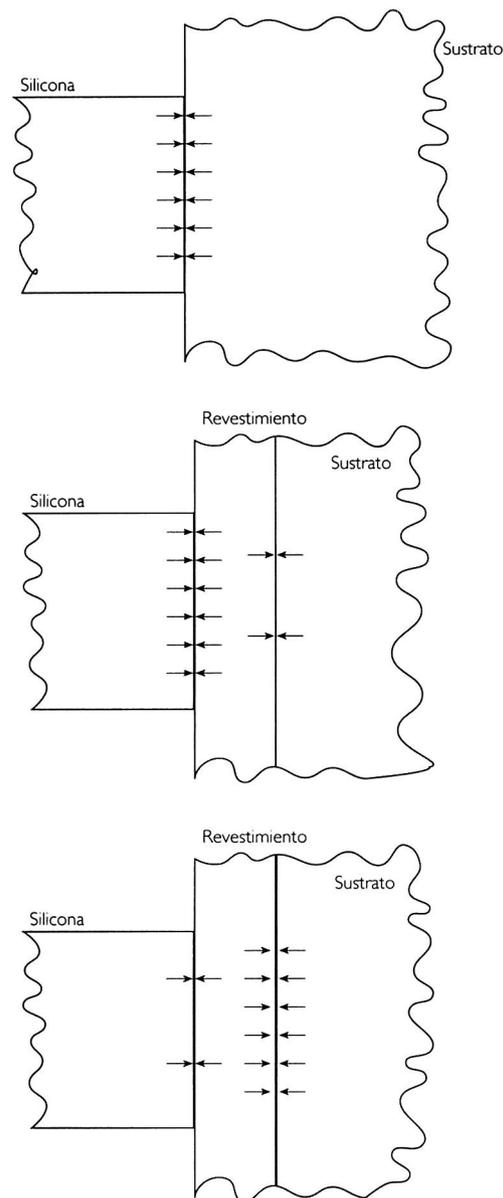
La cohesión interna y el carácter elastómero dependen de la reacción inducida de los radicales laterales de la cadena de siloxano para formar una red intermolecular.

La naturaleza covalente de los enlaces intramoleculares e intermoleculares y por tanto su gran energía interna tienen consecuencias en la resistencia térmica y el punto de fusión, en la cohesión interna, la resistencia mecánica y el módulo elástico y aparentemente un menor efecto en los parámetros de adherencia, en los que radica fundamentalmente el éxito de las siliconas.

La existencia de fuerzas de adhesión en la interfaz entre la silicona y el sustrato de módulo superior a las existentes entre las propias moléculas de silicona constituye la principal garantía del sistema.

Sin embargo, la aplicación de revestimientos protectores o de acabado sobre los sustratos base hace variar sustancialmente las características de la unión y puede tener consecuencias graves cuando de ésta depende la estabilidad de algún elemento constructivo. Para garantizar la durabilidad y la resistencia de la unión debe conseguirse la adhesión con la superficie del sustrato directamente o a través de recubrimientos que ofrezcan totales garantías de estabilidad y adherencia respecto al sustrato y a la silicona.

Las fuerzas de adhesión deben resistir todas las tensiones estáticas y dinámicas en la interfaz silicona-sustrato debidas a fuerzas gravitatorias, presión del viento, acciones sísmicas, variaciones de temperatura o deformaciones de los elementos que proporcionan el sustrato.



Las características de la unión entre la silicona y el sustrato base pueden variar de forma notable al interponer un revestimiento

## ADHESIÓN Y ENERGÍA DE INTERACCIÓN

Aunque existen varias teorías para justificar los fenómenos de adhesión (atracción electrostática, difusión intermolecular, adhesión mecánica) es ampliamente aceptado que el mecanismo de adhesión se fundamenta principalmente en fenómenos de adsorción y que ésta es el resultado de fuerzas interatómicas e intermoleculares que se ejercen a través de la interfaz entre los átomos y las moléculas del sustrato y del adhesivo.

La gran energía de la unión exige la existencia de enlaces primarios: iónicos y covalentes, o la existencia junto con

**VALORES DE LA ENERGÍA SUPERFICIAL  
Y DE LA ENERGÍA DE INTERACCIÓN DE MATERIALES COMUNES  
EN CERRAMIENTOS ACRISTALADOS**

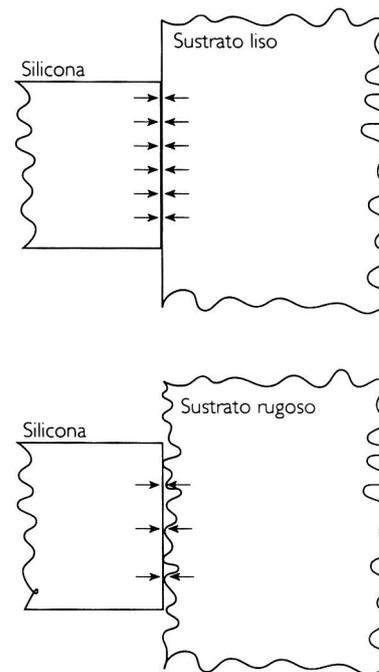
MATERIAL	ENERGÍA SUPERFICIAL GLOBAL (mj/m <sup>2</sup> )	ENERGÍA DE INTERACCIÓN ACIDO - BASE (mj/m <sup>2</sup> )
Vidrio	64,51	31,57
Aluminio	52,80	21,38
Nylon 6 - 6	53,44	21,86
ABS	53,56	19,21
Copolímero vinílico	55,78	20,36
Acetato	43,43	11,06
Polietileno baja densidad	40,32	10,70
Polietileno de muy alto poro molecular	40,66	8,85

\* Extraído de S.W.Gutowski. Adhesive properties of silicone sealants ASTM - 1069, Baltimore, MD 1990

enlaces secundarios dipolares de un pequeño número de enlaces covalentes o iónicos intermoleculares o resultantes de reacciones ácido-base (hay que tener en cuenta que en todos los materiales, con excepción de los hidrocarburos saturados, puede identificarse un carácter ácido o básico).

En una unión que ha experimentado un curado correcto, con condiciones de tiempo, humedad y temperatura adecuadas, los enlaces correspondientes a reacciones de interacción ácido-base pueden contribuir a un grado elevado de energía superficial. Esta energía de interacción depende de las características del sustrato y del adhesivo utilizado y puede llegar a constituir hasta el 50% del valor de la energía total superficial según el tipo de silicona y las características del sustrato.

El valor de la energía de interacción está relacionado con la existencia de una polaridad direccional no dispersa intermolecular en los materiales afectados. En general las siliconas de alto módulo presentan mayor polaridad y como consecuencia, mayor energía de interacción superficial y por lo tanto mayor energía superficial global. Entre los materiales utilizados como sustratos habitualmente en construcción el mayor valor de la energía de interacción es obtenido por el vidrio, que presenta una polaridad y una energía superficial superiores al resto de los materiales. Otros materiales con una alta energía superficial son el aluminio, el nylon y el ABS. El polietileno y el acetato tienen por el contrario una baja polaridad y presentan energías de interacción y globales bajas.



La fuerza de adhesión disminuye al aumentar la rugosidad

Además de la influencia de la energía de interacción ácido-base sobre la energía superficial, y por lo tanto sobre la fuerza de adhesión entre las siliconas y los sustratos, existe una relación directa entre la energía de interacción y el tipo de fallo de la unión. Cuando esta energía es baja se produce un fallo por adhesión, con energías medias el fallo es mixto y con energías elevadas se produce el fallo en la cohesión del adhesivo.

Los resultados demuestran que se obtienen mayores energías de interacción con siliconas de alto módulo, lo cual es perfectamente coherente con su estructura interna, en la que existe una mayor densidad de cadenas siloxánicas y por lo tanto la actividad química y la polaridad se presumen más elevadas.

Atendiendo a lo expuesto, e independientemente de las responsabilidades consecuentes a los distintos tipos de fallo en una unión con silicona, se debe extremar el control sobre la idoneidad de la unión de una silicona con un sustrato cuando la exigencia principal sea la estanqueidad en uniones sometidas a movimientos importantes, especialmente cuando los sustratos adyacentes presentan baja polaridad superficial, debido a la necesidad de utilizar un adhesivo de bajo módulo elástico.

### FACTORES QUE MODIFICAN LA ADHESIÓN

La necesaria comprobación de la adecuación de la silicona prescrita y los sustratos unidos debe continuarse du-

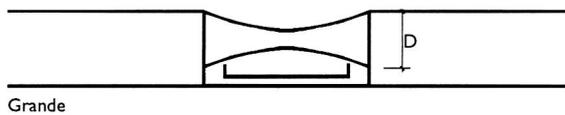
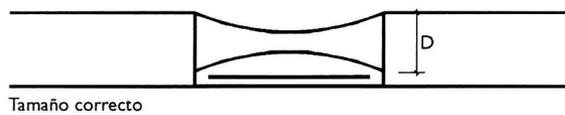
rante la ejecución, controlando la correcta preparación de las superficies. La presencia de polvo, agua, disolventes, aceites, hielo u otros productos puede interferir negativamente en la adherencia. Gran parte de los fallos de adherencia detectados en uniones mediante silicona estructural se deben a descuidos en las operaciones de preparación y limpieza. El hielo constituye un enemigo peligroso cuando se opera con temperaturas ambientales inferiores a 0° C, ya que se forman películas imperceptibles por medios sensoriales. Si se detecta su presencia debe suspenderse la actividad o eliminarlo de la superficie mediante disolventes adecuados al sustrato y la silicona utilizada.

Otro factor que afecta considerablemente a la adherencia es la variación de las condiciones superficiales prescritas

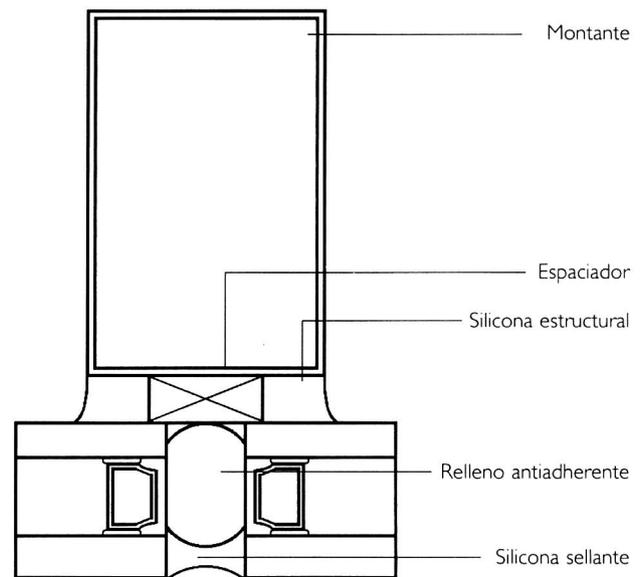
para el sustrato. Debido a la dependencia de la energía de interacción en la interfaz de la unión respecto a la polaridad superficial, la fuerza de adhesión disminuye al aumentar la rugosidad, sin que ésta aporte un incremento de la fuerza de adhesión. Hay que tener en cuenta que a diferencia de los adhesivos hidráulicos, las siliconas presentan una alta viscosidad, por lo que la rugosidad no sólo no aumenta la superficie de adhesión sino que impide la continuidad de la unión y la distribución equilibrada de las tensiones.

**DIMENSIÓN DE LA UNIONES**

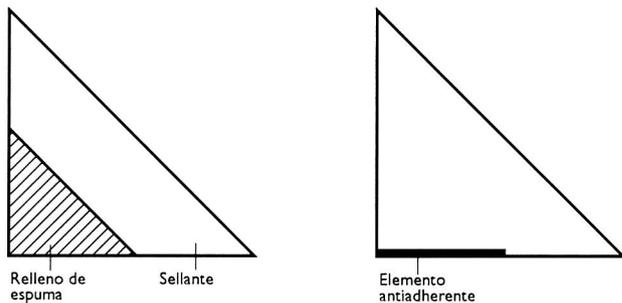
Son muy habituales los fallos de uniones por adhesión debidos a errores cometidos en el diseño o la ejecución de la



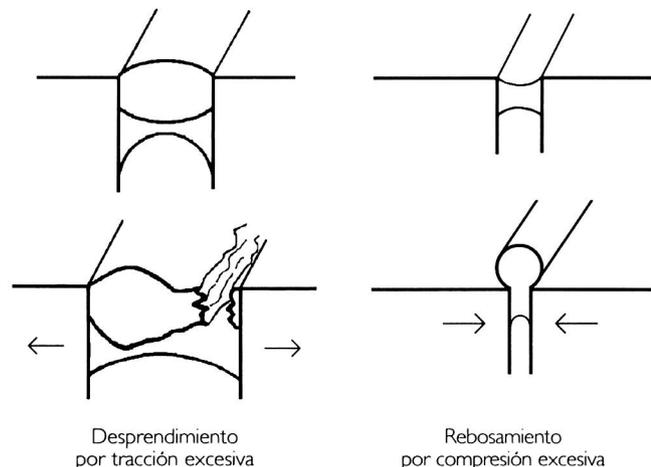
Problemas relacionados con la dimensión del elemento antiadherente



Soporte de cuatro caras del montante vertical con el cristal aislante



El funcionamiento correcto del elemento adhesivo no depende exclusivamente de la vinculación a los sustrato sino también a su configuración



geometría de la unión. Es necesario analizar el efecto de las tensiones y deformaciones en cada punto de la unión para garantizar que su funcionamiento se adapta al previsto.

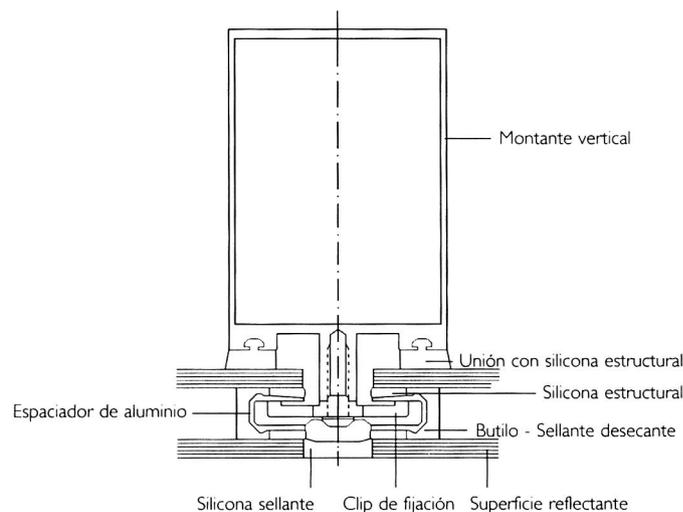
La utilización de espumas o elementos separadores no tiene por objeto reducir la cantidad de silicona y con ello el costo sino ajustar la geometría de la adhesión a las exigencias de la unión. Cualquier variación de esa geometría repercute negativamente en la unión independientemente de su costo.

En las aplicaciones no estructurales sometidas a movimientos pequeños, juntas de trabajo o de construcción, el adhesivo se elige atendiendo a su capacidad de adhesión y su carácter hidrófugo. En las juntas de control de

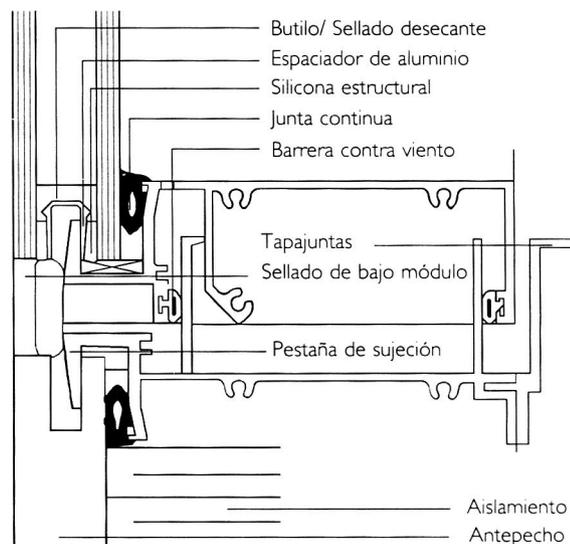
dilataciones, retracciones y en general en todas las sometidas a movimientos apreciables la anchura de la junta debe calcularse para que el sellante no sea sometido a extensiones y reducciones superiores a su capacidad de deformación, habitualmente comprendida entre el 50 y el 100%.

Como la capacidad de deformación es consecuencia de su módulo y por tanto proporcional a su capacidad resistente, que influye también en la durabilidad, en las uniones muy solicitadas y en climas extremados es recomendable diseñar juntas amplias y utilizar siliconas cuya deformabilidad se ajuste al movimiento previsto.

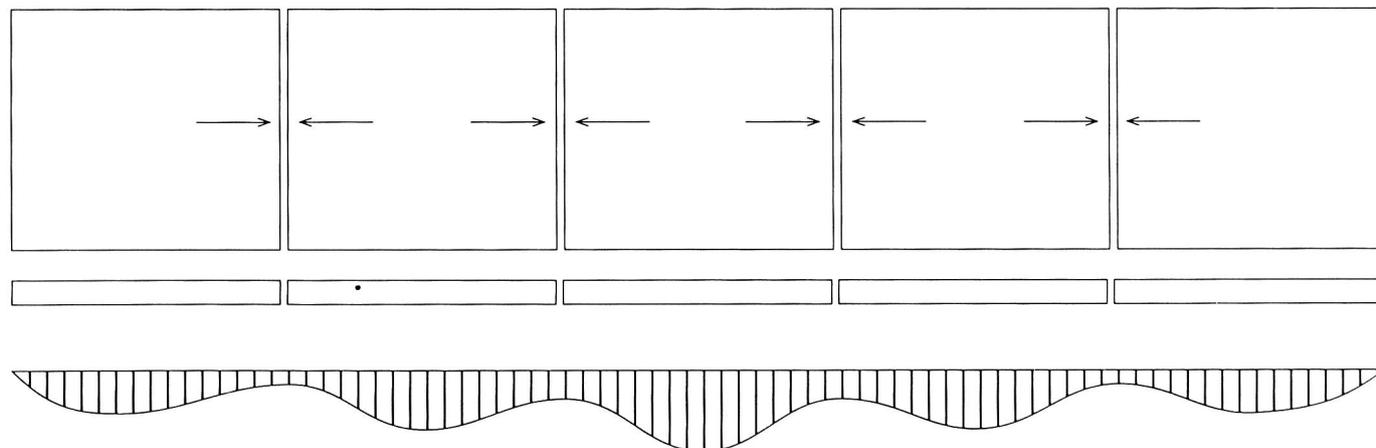
En zonas sometidas a fríos intensos se debe tener en cuenta que la reducción de la elasticidad que experimen-



Acristalamiento doble estructural fijado con clips de seguridad. Montaje sobre montante desde el exterior



Aislamiento doble estructural fijado con clips de seguridad Montaje sobre montante formado por bastidores premontados



Tensión de compresión de una fachada de vidrio con una transmisión importante de esfuerzos en las juntas debida a dilataciones térmicas

tan las siliconas al descender la temperatura se corresponde con la sollicitación de extensión máxima.

En construcciones sometidas a fuertes calentamientos se produce el efecto inverso, por lo que hay que diseñar juntas con una amplitud tal que permita la compresión de la silicona sin superar su capacidad resistente o la de los elementos unidos.

### ACCIONES MEDIOAMBIENTALES

Los sistemas de unión por adhesión son mucho más sensibles que los mecánicos a las acciones medioambientales originadas por las variaciones de temperatura y humedad, el hielo, los agentes contaminantes (lluvia ácida) y la variación solar. Aunque los enlaces primarios Si-O y Si-C, que tienen una gran trascendencia en la estabilidad de las siliconas sometidas a altas temperaturas, son más fuertes que los enlaces C-C, la reticulación se produce por reacción entre los radicales orgánicos de las moléculas básicas de polisiloxano. Los enlaces C-C y especialmente los C-H son sensibles a la temperatura y muy sensibles a los rayos ultravioleta. Para mejorar su comportamiento las formulaciones comerciales incluyen aditivos que mejoran su comportamiento; pero debemos prever una menor durabilidad cuando la situación de la unión resulta con un grado de exposición a los agentes agresivos elevado.

Esta precaución no es en general necesaria en las uniones estructurales por estar el adhesivo protegido por el elemento de cerramiento; sin embargo en estos casos hay que asegurar la estabilidad de la unión en las condiciones prescritas por la normativa de protección contra incendios.

Las uniones estructurales exigen un cálculo preciso de la anchura y del espesor de las bandas de sellado, que de-

ben ser suficientemente flexibles para permitir los movimientos diferenciales entre la pieza sustentada y la subestructura y estar dotados de un grado de elasticidad suficiente para mantener la posición relativa de equilibrio sometiendo a las piezas envolventes a las menores tensiones posibles.

Es necesario considerar que toda tensión se corresponde con una deformación, que en el caso de elementos que exploran los límites dimensionales puede dar origen a roturas; deformaciones antiestéticas o que reduzcan su durabilidad.

En estas uniones hay que tener en cuenta que las tensiones tangenciales son de mayor módulo que las tracciones o compresiones simples, y que incluso cuando el cerramiento está sometido a esfuerzos dinámicos de viento o a dilataciones o contracciones térmicas la deformación de las piezas redundará en un aumento de la tensión tangencial, lo que debe ser tenido en cuenta al realizar los cálculos correspondientes.

Un aspecto que debe considerarse en las fachadas de vidrio compuestas por piezas delgadas es la acumulación de tensiones transmitidas a través de las juntas de sellado, que no pueden despreciarse al realizar los cálculos de las uniones estructurales y de las tensiones en los vidrios. Las tensiones de compresión correspondientes a acciones de dilatación pueden superar al acumularse la capacidad resistente de las piezas por efecto de su esbeltez. Cuando la acumulación de las tensiones de compresión en el plano del cerramiento es máxima en una junta, puede también superarse la capacidad resistente de la unión estructural y producirse la rotura de la pieza o un fallo cohesivo de la unión (si está realizada con silicona) debido a la tracción puntual producida por el pandeo del cerramiento.