

Las acciones térmicas en las cubiertas planas

JUAN LAHUERTA VARGAS, PROF. DR. ARQUITECTO
MIGUEL ANGEL GUTIERREZ FERNANDEZ, PROF. DR. ARQUITECTO

1. INTRODUCCION.

El comportamiento de las cubiertas planas ante las acciones de origen térmico es extremadamente complejo, ya que intervienen simultáneamente en él un gran número de factores.

Es preciso comenzar por el análisis del cómo y por qué se originan las acciones térmicas e higrotérmicas que actúan en las cubiertas; continuar con el estudio de las características térmicas y mecánicas de los materiales de los distintos elementos de la cubierta para, así, poder analizar los fenómenos que dichas acciones producen, y terminar viendo cómo influyen la disposición, los sistemas de colocación y la configuración de los distintos tipos de cubierta en los efectos que pueden llegar a producirse.

Los materiales y elementos que conforman la cubierta, debido a las funciones que tienen que desempeñar, necesitan poseer unas características y propiedades muy diferentes. Han de ser estudiados no sólo como tales, sino, también, integrados en el conjunto de la cubierta, pues muchos de los efectos que aparecen, son inducidos o potenciados por los otros materiales o elementos que configuran la cubierta.

En las cubiertas no es verdad el dicho de que el orden de los factores no altera el producto, aquí, sí se altera el orden, los efectos que aparecen son muy distintos según el orden en que estén dispuestos los elementos.

Las acciones térmicas no sólo han de considerarse sobre la cubierta ya terminada, están también presentes durante su ejecución y en algunos casos pueden producir efectos perjudiciales para el buen comportamiento posterior de la cubierta.

2. ACCIONES TÉRMICAS.

Las acciones térmicas modifican la energía calorífica de los materiales, se deben a la captación o cesión de calor por parte de éstos, produciéndose por ello una variación de su temperatura, debido a lo cual se desarrollan una serie de fenómenos en los materiales y elementos de la cubierta.

Pueden originarse por la radiación solar incidente sobre la superficie de la cubierta, o producirse por intercambios de calor entre los materiales superficiales de la cubierta y el aire, el agua de lluvia

o la nieve. En los elementos que no tienen su superficie en contacto con el aire, el intercambio se produce por la transmisión de calor entre los materiales de los distintos elementos que componen la cubierta.

Se caracterizan por su régimen variable e intermitente. La intensidad y duración de estas acciones varía con la localización geográfica del edificio y con las estaciones del año que determinan unas condiciones atmosféricas distintas y variables.

La energía calorífica que recibe una superficie horizontal por la radiación infrarroja solar, puede estimarse en 800 kcal/m^2 hora, cuando el sol incide perpendicularmente y la atmósfera está limpia. Si varía el ángulo de incidencia o la atmósfera está polucionada o cubierta de nubes, esta intensidad disminuye mucho.

Dos materiales que reciben la misma radiación solar pueden no experimentar un incremento igual de su temperatura. Ello se debe a que la captación de la radiación infrarroja solar por parte de cada material depende de una serie de factores. La composición química, el colorido, el brillo y la textura del material influyen en el grado de absorción de la radiación y por tanto de la energía que reciben por radiación.

En los colores claros el coeficiente de absorción es de 0,2 mientras que en los negros se aproxima al 1,0. Asimismo las superficies pulidas y brillantes pueden llegar a tener una reflexibilidad del 90 por ciento, mientras que en las rugosas y mates es muy pequeña.

Algunas de las características propias del material como son el calor específico, la densidad, la masa son también determinantes de la temperatura que alcanza el material cuando recibe energía en forma de calor. Cuando dos materiales con distinto calor específico reciben la misma cantidad de energía calorífica, se calienta más el que tiene menor calor específico.

La energía calorífica que acumula un material depende también de la naturaleza del elemento sobre el que se encuentra colocado, si está sobre un elemento aislante que tiene una conductividad muy pequeña, se frena la difusión del calor acumulado en el material y por tanto su calentamiento será mayor y más rápido.

El viento es otro factor que influye en la conservación de la energía calorífica acumulada, su temperatura y sobre todo su velocidad influyen en la

dispersión del calor. Con el aumento de la velocidad del aire la difusión del calor es mayor. Las cubiertas con antepechos ciegos en sus bordes experimentan un mayor calentamiento.

La velocidad con que se produce la captación o cesión de calor en un material depende del calor específico y de la conductividad que tenga. Con un calor específico bajo y una conductividad alta, la absorción de energía es más rápida y el incremento de temperatura también.

Si existen edificios adosados que sobrepasan la altura de la superficie de la cubierta, la radiación solar se ve incrementada con la radiación reflejada proveniente de los paramentos verticales.

La temperatura que llega a alcanzar la superficie de una cubierta plana en verano puede ser superior a los 70°C. En un mismo día, por tanto, pueden producirse variaciones de temperatura superiores a los 50°C. (Cuadro 1)

Esta acción no siempre es uniforme en toda la superficie de la cubierta. Si en ella existen elementos emergentes, aparecen zonas en sombra que no reciben la radiación por lo que se mantendrá a una temperatura próxima a los 30°C, que es la del aire con el que están en contacto. Esta falta de uniformidad en la intensidad de la acción -diferencia de unos 40°C- da lugar a que los fenómenos que se desarrollan en ambas zonas tengan distinta magnitud, apareciendo efectos que de otra forma no se producirían.

En verano es frecuente que se produzcan tormentas de lluvia fría o de granizo, debido a lo cual se produce un enfriamiento brusco en el elemento de terminación de la cubierta, descendiendo rápidamente su temperatura desde los 70°C que había alcanzado por la radiación solar, hasta los 20°C, dando lugar a un choque térmico.

Los intercambios de calor con el aire exterior se producen principalmente por convección.

La temperatura del aire tiene diariamente una oscilación entre la máxima y la mínima del orden de 10°C a 20°C. A lo largo del año esta variación puede estar comprendida entre -20°C y 40°C.

VARIACIONES DE TEMPERATURA EN LA SUPERFICIE DE UNA CUBIERTA PLANA	
Anual	-20° a +70°C
En un mismo día	50°C
Entre zonas sombreadas y soleadas	40°C
Por enfriamiento brusco	50°C

Cuadro 1

En las figuras 1 y 2 se recogen las gráficas de la elevación de temperatura que experimentan dos tipos de láminas impermeabilizantes que inicialmente se encuentran a 25°C y que son sometidas a una acción térmica capaz de elevar su temperatura a 80°C. Se ve en ellas la relación que existe entre el

incremento de su temperatura y la velocidad de crecimiento de ésta. En ambos casos el ensayo se realizó situando la lámina sobre dos materiales distintos, uno de los soportes fue hormigón y el otro un panel de poliestireno expandido de 4 cm. de espesor.

La primera gráfica (figura 1), corresponde a una lámina de oxiasfalto con una armadura de polietileno, protegida por una capa de grava de 5 cm de espesor.

Se observa cómo el aislante frena la transmisión del calor que recibe la lámina. La elevación de temperatura es mucho mayor y se produce más rápidamente que cuando el soporte es el hormigón.

El aislante hace que en la lamina se incremente mucho la intensidad de la acción. De un modo semejante, cuando se produce un descenso de la tem-

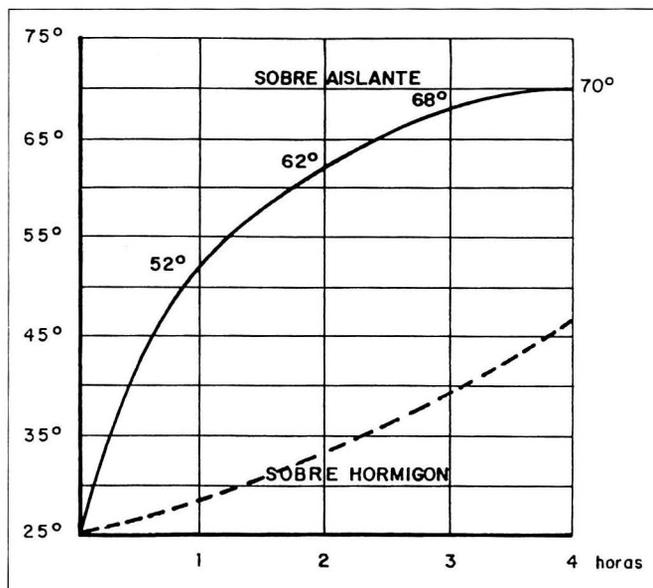


Figura 1
Lámina de oxiasfalto con armadura de polietileno y capa de grava de 5 cm

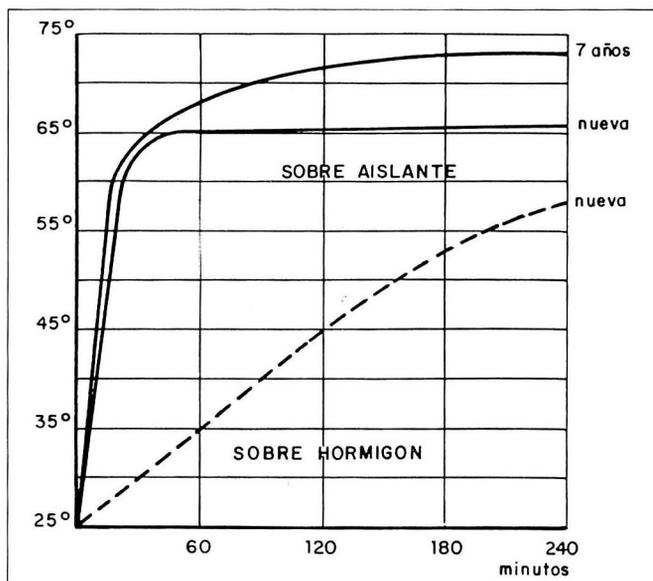


Figura 2
Lámina de oxiasfalto autoprottegida con aluminio

peratura del ambiente exterior, el aislante frena el paso del calor procedente del interior y la lámina se enfría más y con mayor rapidez.

La segunda gráfica (figura 2), corresponde a una lámina de oxiasfalto autoprottegida con aluminio. El ensayo se ha realizado en las mismas condiciones que en el caso anterior. El ensayo sobre aislante se ha hecho con una lámina nueva en la que la superficie de aluminio estaba brillante y con otra del mismo tipo envejecida que ya había perdido el brillo. El contraste entre hallarse sobre hormigón o sobre el aislante es parecido al anterior.

La comparación nueva-envejecida nos hace ver cómo influye el estado de la superficie. La absorción de la energía es mayor en un caso que en otro al haber disminuido la reflexibilidad del aluminio.

3. ACCIONES HIGROTÉRMICAS.

Más que hablar de acciones higrotérmicas, es mejor referirse a los fenómenos que, debido a las variaciones de temperatura, se producen en el vapor de agua y en el agua, y estudiar sus efectos en los materiales y elementos que integran la cubierta.

El agua ocluida en los materiales experimenta cambios de estado físico (vapor, agua, hielo) en función de su temperatura.

En invierno, el aire frío del exterior contiene menos vapor de agua que el aire interior. Al existir distinta presión de vapor y temperatura entre los dos ambientes que separa la cubierta, se produce a través de ésta un fenómeno de difusión de calor y del vapor de agua que trata de establecer el equilibrio entre ambos ambientes.

Debido al flujo de calor a través de la cubierta, la temperatura es distinta en cada punto de las diferentes capas que la componen, en invierno va descendiendo gradualmente desde su cara interior-caliente hasta su cara exterior-fría. En verano es al contrario. Si en el proceso de difusión del vapor de agua, la temperatura en algún punto de la cubierta es inferior a la temperatura de rocío del vapor de agua existente en él, se produce una condensación. Esta agua condensada puede aparecer en los intersticios o poros de los materiales, en las superficies de los elementos o en la cara caliente de la cubierta.

En verano, con el calor, debido sobre todo a la radiación solar, el agua contenida en los materiales se vaporiza. Su posterior calentamiento produce un incremento en su volumen, dicho incremento es 1/273 por grado de temperatura, por lo que puede llegar a ser hasta del 18% si la temperatura sube de 20°C a 70°C. Si el vapor de agua no puede difundirse, en lugar de aumentar su volumen, lo que aumenta es su presión. Esta presión del vapor de agua ejerce un empuje, principalmente sobre las láminas impermeabilizantes, que puede llegar a despegar la lámina de su soporte, dando lugar a que se formen en ella abombamientos.

Es bien conocido que los fenómenos de condensación y vaporización dependen en gran parte de la humedad relativa y de la temperatura del espacio cubierto, así como de su régimen de calefacción y ventilación. La aparición de condensaciones superficiales o en el interior de los distintos elementos que integran la cubierta va a depender de la naturaleza de los materiales que se utilicen y de las condiciones de temperatura y humedad de los ambientes exterior e interior que se dan a ambos lados de la cubierta.

El riesgo de que se produzcan condensaciones es pequeño si la humedad relativa interior se mantiene entre el 60 - 65%, en cambio es grande para humedades relativas del 80 - 85%.

El agua condensada y el agua de obra retenida por los materiales, si la temperatura desciende por debajo de 0°C, se convierte en hielo pudiendo generar fenómenos de heladicidad.

4. COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES.

Para poder estudiar los fenómenos térmicos y los efectos que se producen en los distintos elementos de la cubierta, hay que analizar antes el comportamiento de los materiales que constituyen dichos elementos; es necesario conocer sus características térmicas y mecánicas y, sobre todo, cómo varían y se modifican estas últimas en función de la temperatura.

4.1 Aislantes térmicos.

4.1.1 Clases.

Se pueden distinguir tres tipos de materiales aislantes según su origen:

- **SINTÉTICOS:** poliestireno expandido, poliestireno extruido, espumas de poliuretanos, espumas fenólicas, espumas de cloruro de polivinilo, espumas de urea-formol, espumas elastoméricas, polietileno reticulado.

- **MINERALES:** arcilla expandida, perlita expandida, vermiculita, fibra de vidrio, fibras minerales, vidrio celular.

- **VEGETALES:** corcho expandido aglomerado, fibras de madera aglomeradas.

No se incluyen los hormigones ligeros o celulares y materiales similares puesto que, su empleo como único material de aislamiento, no es recomendable por los problemas de condensaciones y heladicidad que pueden desarrollarse en ellos.

Las características de los materiales sintéticos vienen condicionadas, entre otros factores, por su composición química, la densidad del producto, el sistema de fabricación y por las temperaturas y presión de moldeo. Debido a lo cual, no se pueden establecer fácilmente unas características generales de ellos. Se particularizan para productos comerciales concretos. La determinación de las característi-

cas entraña una gran dificultad debido a las múltiples particularidades y anomalías que presentan.

Los datos obtenidos hasta ahora en los laboratorios no son totalmente representativos del comportamiento real, pues no se realizan los ensayos en las mismas condiciones en que después se van a encontrar en la cubierta. Se miden aisladamente distintos parámetros físicos sin tener en cuenta conjuntamente otros factores que estarán presentes y que influyen en su comportamiento. Su estudio conjunto en muchos casos sería difícil de hacer con los medios técnicos disponibles habitualmente. Aunque se ha avanzado mucho en las técnicas operativas y en la simulación de las condiciones de ensayo, falta mucho para acercarse a la realidad. Existe disparidad en los resultados obtenidos según sean las técnicas de ensayo empleadas.

4.1.2 Comportamiento mecánico.

Los materiales poliméricos presentan un comportamiento mecánico de carácter viscoelástico. En ellos no se cumple la ley de HOOKE. En los paneles fabricados con estos productos esta diferencia es todavía mayor, pues, aproximadamente, un 95% de su volumen es gas. El comportamiento no es el de un sólido, sino que presenta un carácter neumático, debido a lo cual son más sensibles a los fenómenos de fluencia y fatiga.

El diagrama de tensión-deformación en todos ellos, presenta al comienzo una gran deformación sin que exista proporcionalidad entre las tensiones y las deformaciones, esto se debe en gran parte a que, inicialmente, se produce una compresión del gas ocluido en los alveolos. Sigue un periodo más o menos corto de proporcionalidad, en el que se determina un límite de proporcionalidad inferior (L.I) y otro superior (L.S), ese tramo se considera como periodo elástico, en el que se define el módulo de

elasticidad del material, para entrar finalmente en un periodo plástico, en el que se producen roturas en los tabiques de los alveolos por la fuerte presión a la que queda sometido el gas, lo que explica que las deformaciones sean irreversibles (figura 3).

Por el sistema de fabricación no tienen un comportamiento isótropo. Tienen distinto módulo de elasticidad y resistencia en el sentido longitudinal y transversal (cuadro 2).

POLIESTIRENO EXPANDIDO			
Densidad Kg/m ³	Coeficiente dilatación 10 ⁻⁵ m/m ²	Módulo de elasticidad Kg/cm ²	
		Longitudinal	Transversal
15	9	29	12
20	8	36	18
30	7	48	30

Cuadro 2

Las características mecánicas se ven influenciadas por la variación de temperatura, los módulos de elasticidad disminuyen con el aumento de temperatura y se incrementan con el descenso.

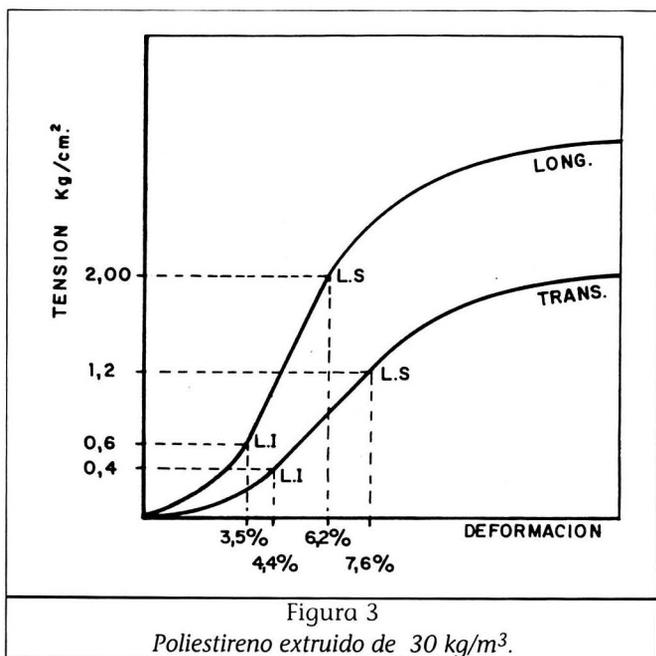
Los materiales de origen mineral de estructura fibrosa también son anisótropos. Los paneles ROOFING de fibra de vidrio tienen una resistencia en sentido longitudinal de 0,8 kg/cm², mientras que en sentido transversal es de 0,1 kg/cm².

Los vidrios celulares tienen un comportamiento más próximo al de los sólidos compactos. Su módulo de elasticidad es el mismo para las dos direcciones con un valor de 10.000 kg/cm² para la densidad de 125 kg/m³ y de 12.000 kg/cm² para la de 135 kg/m³.

4.1.3 Comportamiento térmico.

El comportamiento térmico de los materiales sintéticos celulares presenta un carácter anisótropo análogo al mecánico, siendo aun más anárquico. En las gráficas de las figuras 4, 5 y 6 puede observarse el comportamiento tan diferente que presentan las espumas fenólicas, el poliuretano y el poliestireno expandido en relación con las variaciones de temperatura y como aparece en todos ellos una contracción residual

El coeficiente de dilatación se mantiene constante dentro de un campo de temperaturas que suele estar comprendido entre los 0°C y los 50°C. Para temperaturas por encima de los 50°C dicho coeficiente suele disminuir e incluso invertir su signo. Si el material ha estado sometido a temperaturas superiores a los 50°C, al descender la temperatura no se recupera totalmente, aparecen deformaciones residuales irreversibles. Si la acción térmica se mantiene durante largo tiempo, se produce un fenómeno semejante al de la fluencia y las deformaciones se incrementan.



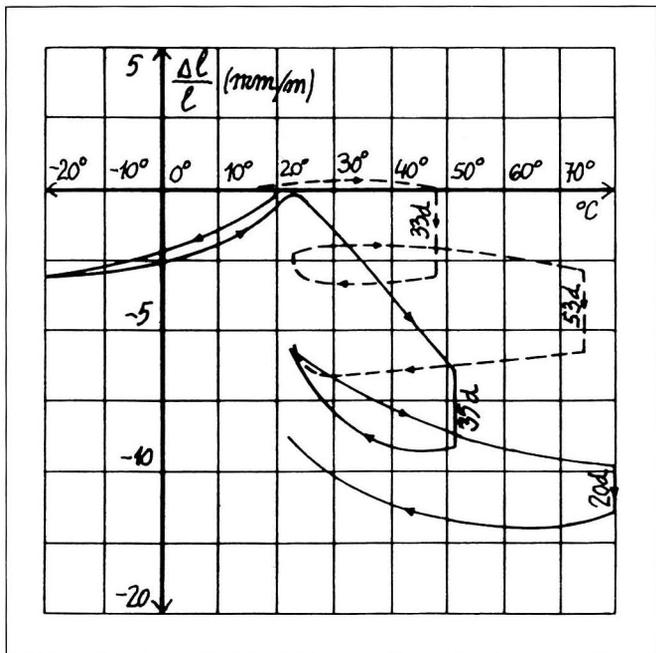


Figura 4
Espumas fenólicas de distintas densidades.

Estos materiales, debido a su anisotropía, presentan unas ciertas anomalías. Inicialmente tienen un coeficiente de dilatación longitudinal y transversal distinto que, con el tiempo llega a igualarse (figura 6). Esto se debe a que se libera de las tensiones producidas durante el proceso de fabricación por la forma de moldeo.

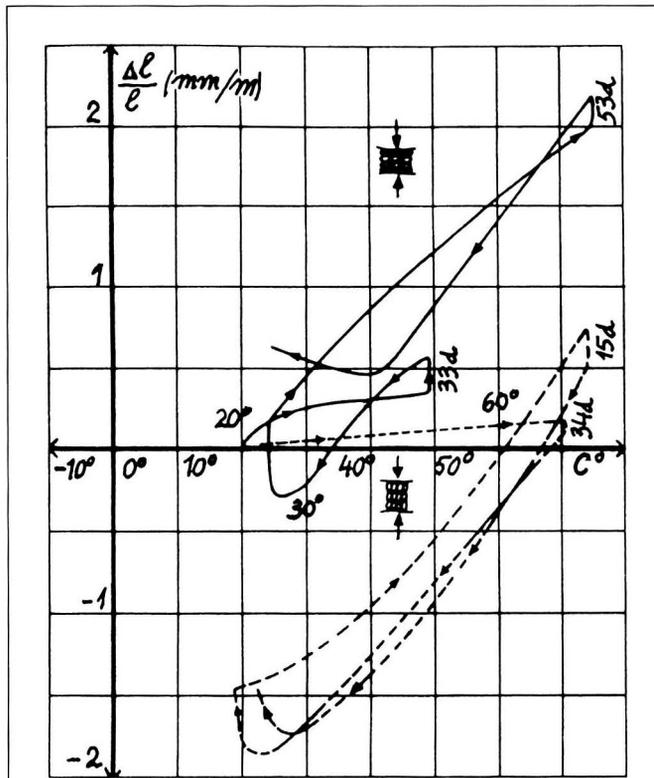


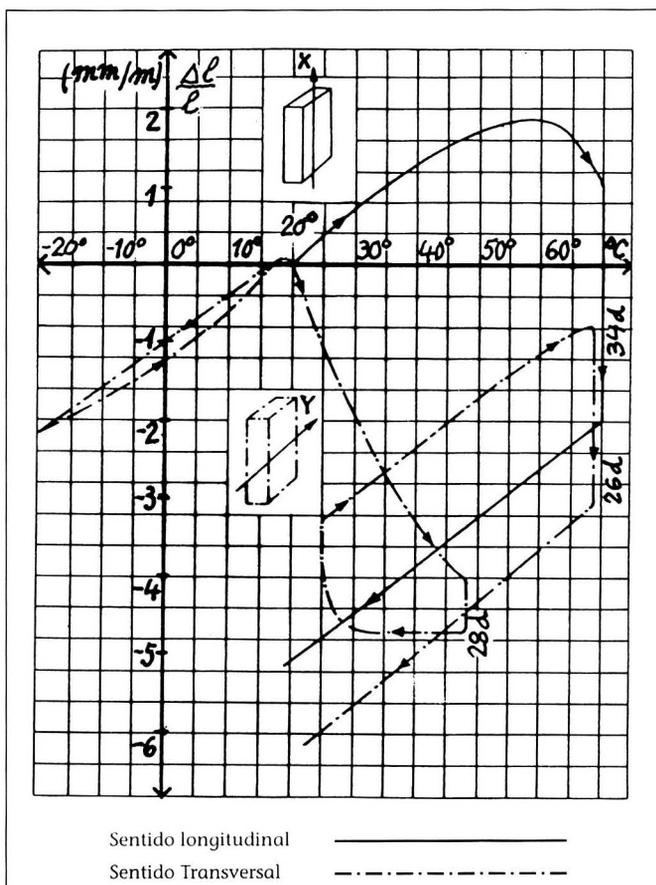
Figura 5
Poliuretano de 45 Kg/m³.

El alto coeficiente de dilatación que tienen los materiales sintéticos celulares se debe en gran parte a la expansión que se produce en el gas que contienen, por eso dentro de un mismo tipo de material el coeficiente de dilatación es inversamente proporcional a la densidad del mismo (cuadro 2).

El coeficiente de dilatación presenta, a su vez, pequeñas variaciones con el espesor del material, es mayor para espesores gruesos.

Los coeficientes de dilatación lineal de los materiales sintéticos celulares son mayores que los de origen mineral o vegetal, siendo en algunos casos hasta 11 veces mayor, dato que es importante tener en cuenta, como se verá más adelante, al estudiar los movimientos de las juntas existentes entre las placas de dichos materiales cuando forman parte del aislamiento de una cubierta (cuadro 3).

Otro punto a tener en cuenta es que la placa, una vez colocada en la cubierta, debido a su baja conductividad térmica, no va a tener normalmente



Sentido longitudinal —————
Sentido Transversal - - - - -

Figura 6
Poliestireno expandido de 35 Kg/m³

COEFICIENTES DE DILATACION	10 ⁻⁵ m/m ²
Corcho expandido aglomerado	2
Perlita expandida aglomerada	2,5
Fibra de vidrio	1,2
Vidrio celular	0,8
Poliestireno expandido	6 - 9
Poliuretano	5
Espuma fenólica	4

Cuadro 3

su superficie superior e inferior a la misma temperatura, por lo tanto no es igual la dilatación que se produce en todo su espesor, lo que hace que aparezca, si el material está libre, una incurvación de doble sentido, dando lugar a un arqueamiento si la superficie superior es la más caliente, o un levantamiento de las esquinas si está a menor temperatura (figura 7). Estas incurvaciones pueden llegar a ser hasta de 6 mm por metro.

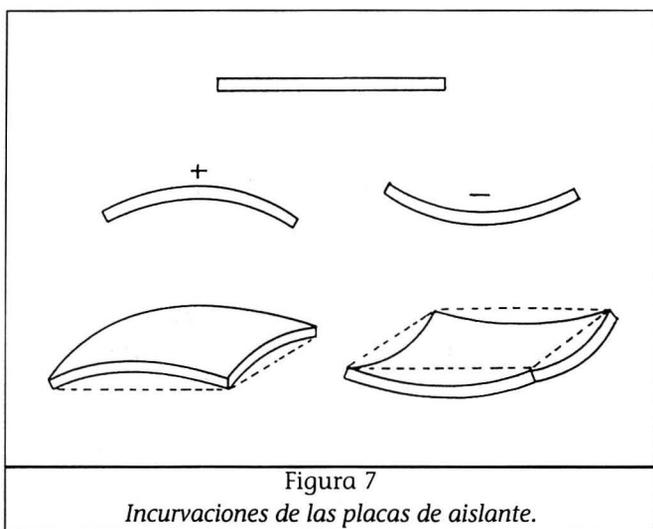


Figura 7
Incurvaciones de las placas de aislante.

Si los paneles están lastrados este efecto no se suele acusar. De todas formas se recomienda que si el espesor necesario para el aislamiento es superior a 5 cm, se realice en dos capas.

4.1.4 Variaciones dimensionales.

Como ya se ha indicado, las variaciones dimensionales que se producen en las placas de materiales aislantes pueden ser de origen mecánico o deberse a los cambios de temperatura, pero también pueden deberse a modificaciones en su contenido de humedad, o a procesos de estabilización del material posteriores a su fabricación, debido a los cuales se pueden producir en la placa aislante entumecimientos o contracciones.

La capacidad de absorción de vapor de agua y de agua líquida es distinta de unos materiales a otros, por lo que su estabilidad dimensional también lo es. Se acusan más las contracciones que se producen por la desecación (figuras 8 y 9).

La mayoría de los materiales no experimentan entumecimientos sensibles en ambientes a temperaturas normales si la humedad relativa no es superior al 90%.

Los vidrios celulares tienen una perfecta estabilidad al tener una absorción nula. En las placas de fibras minerales el entumecimiento por humedad se manifiesta principalmente como un aumento de su espesor, es 10 veces mayor en este sentido que en el longitudinal o transversal de la placa que aproximadamente es de 1 mm/m.

Las espumas de PVC tienen un entumecimiento

por humedad de 1,5 mm/m al pasar del 65% al 100% la humedad relativa del aire ocluido en su interior, y un acortamiento de 3,5 mm/m al pasar del 65% al 1%. Las deformaciones en este material son reversibles sin aparecer deformaciones permanentes (figura 9).

Los poliuretanos para las mismas variaciones de la humedad relativa presentan deformaciones de 6 mm/m y 10 mm/m respectivamente, apareciendo además deformaciones irreversibles de 0,6 a 0,8 mm/m si se ha producido una desecación, y de 0,5 mm/m cuando se ha producido un incremento de humedad.

En las espumas fenólicas humedecidas, por la acción del calor se producen, además, reacciones químicas que degradan el material.

En las placas de espumas rígidas se producen variaciones dimensionales como consecuencia de la estabilización que experimentan estos materiales después de su fabricación. En el caso del poliestireno expandido esta estabilización se produce entre 30 y 70 días después de su fabricación. De todos modos, el tiempo de estabilización depende de la densidad aparente del material, puesto que, en cada caso, el agente de expansión del producto se difundirá con mayor o menor rapidez según sea su concentración, la cual aumenta con la densidad

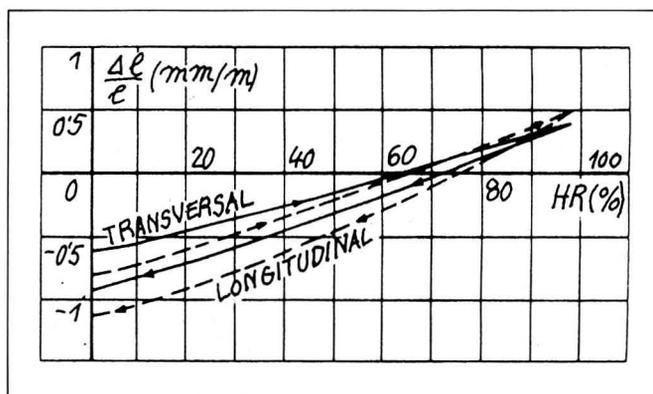


Figura 8
Variaciones dimensionales de un poliestireno expandido durante un ciclo de humificación y secado.

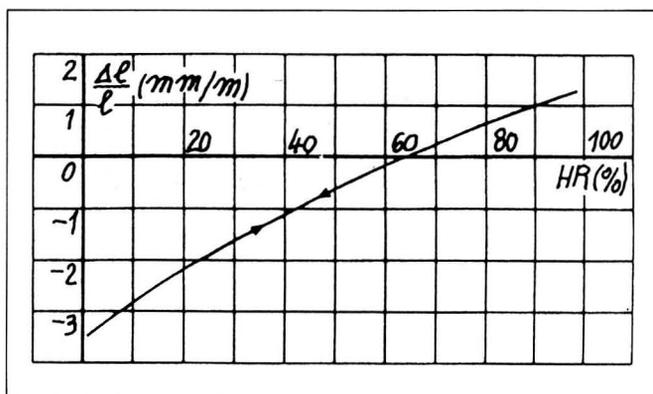


Figura 9
Variaciones dimensionales de una espuma de P.V.C. en función de la humedad relativa del aire ocluido en su interior.

aparente. En términos generales, dicha estabilización del poliestireno expandido provoca una contracción, denominada contracción posterior residual, del 0,2% (2 mm/m).

4.2 Láminas impermeabilizantes.

4.2.1 Generalidades.

Supuesto que el elemento estructural cumple su función resistente y de estabilidad, la función que sigue en importancia en la cubierta es la estanqueidad. Por ello la membrana impermeabilizante además de poseer la propiedad de la impermeabilidad ha de tener unas determinadas características mecánicas que garanticen su durabilidad, pues debido a las acciones térmicas va a estar sometida a sollicitaciones cíclicas y alternantes de compresiones y tracciones que puedan desarrollar fenómenos de plasticidad como son la fluencia, la relajación, el cansancio y la fatiga.

El conocimiento que tenemos del comportamiento ante las acciones térmicas y de las características de los productos de estanqueidad es muy pobre, carecemos de muchos datos que ayudarían a elegir bien los materiales y a proyectar las soluciones constructivas más adecuadas.

Los datos acerca de estas características de las distintas láminas impermeabilizantes que figuran en la documentación de publicidad técnico-comercial que recibimos son incompletos y, algunas veces, equívocos. La confusión e incertidumbre aumenta al encontrar que un mismo producto comercial, en el plazo de 2 años, presenta valores de sus características sensiblemente modificados.

Entre las características de las láminas impermeabilizantes suelen figurar la tensión y alargamiento en rotura obtenidos a una temperatura de 20°C mediante un esfuerzo unidireccional. Estos datos tiene muy poco interés pues, en las cubiertas, la lámina estará sometida a esfuerzos bidireccionales y además a 20°C casi nunca se dará un estado de tracción; lo que realmente interesa conocer son esas

mismas características para temperaturas inferiores a los 0°C, con las que si aparecen tracciones en las láminas.

La gran variedad de productos de impermeabilización que, en la actualidad, pueden ser utilizados para la ejecución del elemento de estanqueidad de una cubierta plana, conlleva el que sean muy distintas las características y el comportamiento tanto térmico como mecánico de dichos productos.

Las láminas impermeabilizantes están compuestas de un material impermeable que puede ser un betún o una sustancia polimérica, en muchos casos armadas con un fieltro, un film, o un tejido de distintos materiales.

4.2.2 Láminas impermeabilizantes asfálticas.

a) Betunes asfálticos.

Existen tres clases de betunes asfálticos:

- **Oxiasfalto normal.** Tiene muy limitado su empleo pues sólo mantiene sus propiedades entre los 5°C y los 50°C. Por debajo de los 5°C se endurece y fragiliza y por encima de los 50°C se reblandece y puede fluir.

- **Oxiasfalto catalítico.** Aunque se comporta mejor, también tiene limitado su uso para temperaturas inferiores a los -5°C y se reblandece a los 80°C. Se produce la rotura por tracción para alargamientos del 3%.

Estas dos clases de betunes no suelen emplearse en la actualidad en la fabricación de láminas.

- **Betunes poliméricos.** Son mezclas de oxiasfalto catalítico con polímeros. Los polímeros más utilizados son el estireno-butadieno-estireno, el polipropileno atáctico y el copolímero de etileno que dan lugar a los llamados betún SBS, betún APP y betún ECB.

Con estas mezclas se consiguen materiales que se comportan bien hasta temperaturas de -15°C. Tienen su límite elástico para un alargamiento del 0,7%, y un coeficiente de dilatación de 20×10^{-5} m/m° a los 20°C.

A pesar de esta mejora de las características y propiedades del material existen limitaciones para su empleo, por lo que se tiende más a la fabricación de láminas armadas.

b) Láminas armadas.

Las láminas armadas están compuestas de dos o más capas de betún polimérico y una armadura central que suele ser un velo de fibra de vidrio, un film de polietileno o un fieltro de poliéster. Con la incorporación de la armadura se consigue aumentar el límite elástico, la resistencia mecánica y el alargamiento a rotura de la lámina, y lograr una mayor resistencia al punzonamiento (figura 10).

Las láminas de betún polimérico armadas con fibra de vidrio, tienen su límite elástico para un alargamiento del 2%, que corresponde a una tracción

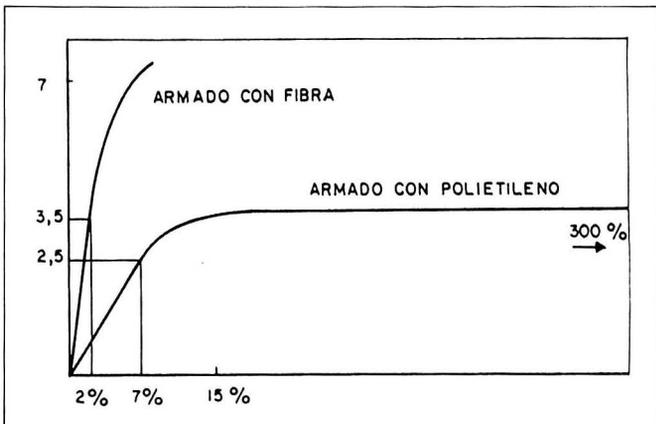


Figura 10
Diagrama tensión-deformación
en láminas asfálticas armadas.

de 3,5 kg/cm. La rotura sobreviene con un esfuerzo de 8 kg/cm y alargamiento del 8%.

Armadas con film de polietileno, tienen su límite elástico para alargamientos del 6 ó 7%, para una tracción de 2,5 kg/cm. La rotura se produce con un esfuerzo de 3,5 kg/cm y alargamiento del 300%.

Armadas con fieltro de poliéster la rotura se da para esfuerzos de 10 kg/cm y alargamiento del 40%. Tiene su límite elástico para alargamientos del 20%.

Estos datos, obtenidos a una temperatura de 20°C, son sólo orientativos pues varían en función de la composición del betún, tipo y proporción del polímero y de la clase y gramaje de la armadura.

Existen también láminas compuestas de 3 capas de betún polimérico con doble armadura que lógicamente tienen mayor resistencia. Las láminas autoprotectidas con láminas metálicas de aluminio o cobre gofrado o con gránulos de pizarra, tienen unas características muy semejantes.

El coeficiente de dilatación de estas láminas varía entre $20 \times 10^{-5} \text{ m/m}^\circ$ y $2 \times 10^{-5} \text{ m/m}^\circ$. Las que tienen un menor coeficiente de dilatación son las armadas con fibra de vidrio, debido a que el coeficiente de dilatación de la fibra es de $1'1 \times 10^{-5} \text{ m/m}^\circ$ frenando en cierto modo la dilatación del betún cuyo coeficiente es de $20 \times 10^{-5} \text{ m/m}^\circ$. Esta diferencia de ser 18 veces mayor el coeficiente de dilatación del betún que el de la fibra puede dar lugar a que se produzca la desolidarización de los dos materiales o microrroturas de las fibras.

La temperatura de reblandecimiento es superior a los 85°C, por lo que no suelen presentarse problemas, no obstante si alcanzan los 70°C pueden aparecer deformaciones residuales.

4.2.3 Láminas impermeabilizantes poliméricas.

Los materiales poliméricos sintéticos son de dos tipos: los elastómeros y los termoplásticos.

a) ELASTOMEROS:

- Caucho butilo: IIR (copolímero de isobutileno-isopreno).
- Etileno propileno: EPT (terpolímero de etileno-propileno).
- Policloropreno: CR (NEOPRENO).
- Polietileno clorosulfonado: CMS (HYPALON).
- Caucho nitrilo: NBR (copolímero de nitrilo-butadieno).

b) TERMOPLASTICOS:

- Polietileno clorado: CPE.
- Poliisobutileno: PIB.
- Copolímero de etileno y acetato vinilo: VAE.
- Cloruro de polivinilo: PVC.
- Polivinilo fluorado: PVF (polímero de fluoruro de polivinilo).

Definir las características de estos materiales es muy difícil puesto que, además de la diferente com-

posición química de cada uno de ellos, dentro de una misma composición se dan diferencias estructurales que radican en la proporción de cada monómero en la cadena del polímero.

Como dato orientativo se puede decir que los elastómeros tienen un módulo de elasticidad para una temperatura de 20°C entre 40 kg/cm^2 y 100 kg/cm^2 , ese módulo se suele establecer para la tensión que produce un alargamiento del 100%, ya que de otro modo es casi imposible determinarlo. Los alargamientos en rotura oscilan entre el 300% y el 1000%.

Tienen un coeficiente de dilatación muy alto, entre $14 \times 10^{-5} \text{ m/m}^\circ$ y $20 \times 10^{-5} \text{ m/m}^\circ$.

Los termoplásticos son menos elásticos, sus alargamientos en rotura no suelen llegar al 100%. Las tensiones de rotura suelen ser de unos 8 kg/cm^2 y tienen el límite elástico para tensiones entre 2,5 y 3 kg/cm^2 . Su coeficiente de dilatación es similar al de los elastómeros.

Al igual que en los betunes, para temperaturas inferiores a los 0°C se endurecen, aumenta su módulo de elasticidad y la tensión de rotura. Concretamente, en el PVC, la tensión de rotura a 20°C es de 7 kg/cm^2 , y a -10°C de 22 kg/cm^2 . Disminuye mucho su límite elástico.

Las láminas pueden ser también armadas con fibra de vidrio, la tensión de rotura llega a ser de 100 kg/cm^2 , y su coeficiente de dilatación pasa a ser de $1,7 \times 10^{-5} \text{ m/m}^\circ$.

4.2.4 Comportamiento térmico y mecánico de las láminas impermeabilizantes.

Los betunes y los materiales poliméricos que constituyen la base de las láminas impermeabilizantes, al ser sólidos viscoelásticos, tienen un com-

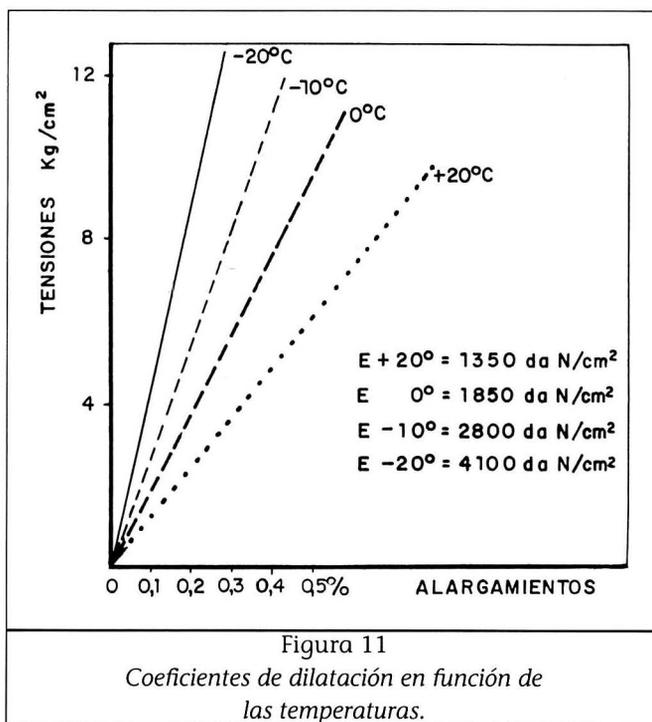


Figura 11
Coeficientes de dilatación en función de las temperaturas.

portamiento térmico y mecánico muy diferente al que tienen los materiales pétreos o metálicos.

En los materiales pétreos y metálicos, debido al carácter regular y ordenado de los retículos atómicos que componen su estructura interna, la transmisión de esfuerzos es directa de molécula a molécula y las deformaciones que se producen en ellos al actuar una fuerza son locales. En cambio en los betunes y polímeros, debido a la configuración de sus moléculas, cada una de ellas, cuando transmite esfuerzos, ejerce una influencia sobre un volumen mucho mayor que el de la propia molécula.

Las características térmicas y mecánicas de las láminas impermeabilizantes bituminosas varían con la temperatura. El calor específico disminuye al descender la temperatura, mientras que el coeficiente de dilatación aumenta. Por ejemplo, los valores de los coeficientes de dilatación a distintas temperaturas de una lámina bituminosa son los siguientes:

- de + 20° a 0° C.....1'9x10⁻⁵ m/m°.
- de + 0° a -10° C.....4'8x10⁻⁵ m/m°.
- de -10° a -20° C.....6'0x10⁻⁵ m/m°.

Lo mismo ocurre con el módulo de elasticidad que también aumenta. El material se endurece y fragiliza, sus límites elástico y de rotura se reducen (figura 11).

Las tensiones inducidas se incrementan mucho al descender la temperatura. Conviene recordar que la tensión inducida en la lámina por una variación de temperatura viene determinada por la ecuación $\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$, en la que E es el módulo de elasticidad, α el coeficiente de dilatación y ΔT la diferencia en grados de la temperatura. Como al

enfriarse el material aumentan el módulo de elasticidad y el coeficiente de dilatación, las tensiones crecen de forma logarítmica, resultando tensiones que pueden provocar la fisuración de la lámina.

Es importante observar cómo se modifican algunas características con el paso del tiempo. En la gráfica de la figura 12 se aprecia la variación en las tensiones inducidas que aparecen en un mismo tipo de lámina, en estado nuevo o con 7 años de vida, prácticamente se duplican. El endurecimiento se debe en gran parte a fenómenos tensionales, de plasticidad (fluencia, relajación y fatiga) que producen deformaciones irreversibles, que aunque de muy pequeña magnitud, al repetirse muchas veces hacen que el material pierda elasticidad.

Al someter una lámina a un esfuerzo mantenido, se producen en ella, tres tipos de deformaciones: una elástica instantánea, otra elástica diferida y, finalmente, puede aparecer una deformación viscosa.

La deformación elástica instantánea se produce a escala atómica, en tanto que la deformación elástica diferida se desarrolla en los segmentos que componen las macromoléculas, produciéndose una gran deformación progresiva en función de la duración de la acción. La deformación viscosa aparece cuando se sobrepasa el límite elástico del material, siendo ya en parte irreversible. La recuperación de la deformación al desaparecer la fuerza que la produjo sigue un proceso semejante, aunque si se produce muy rápidamente pueden producirse dislocaciones y enrollamientos en las moléculas que se traducen en deformaciones permanentes. Esta es una de las causas de que al irse acumulando deformaciones, con el tiempo el material vaya perdiendo elasticidad.

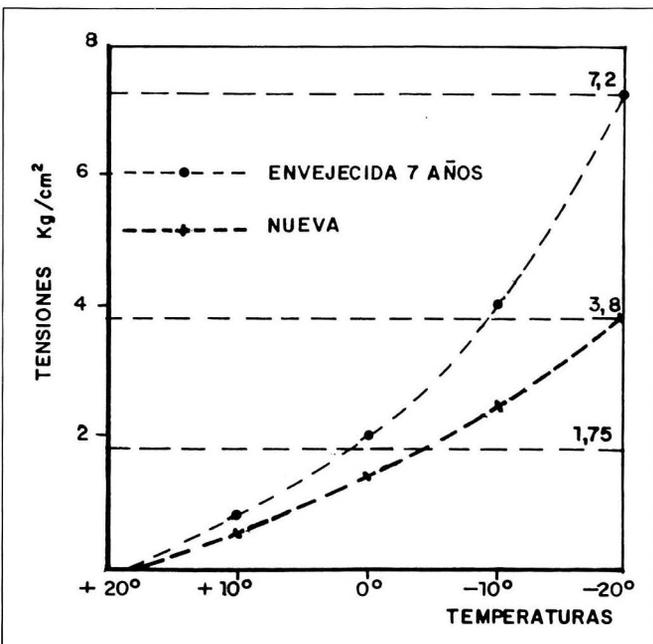


Figura 12

Modificación de las respuestas ante los estados tensionales en función del paso del tiempo.

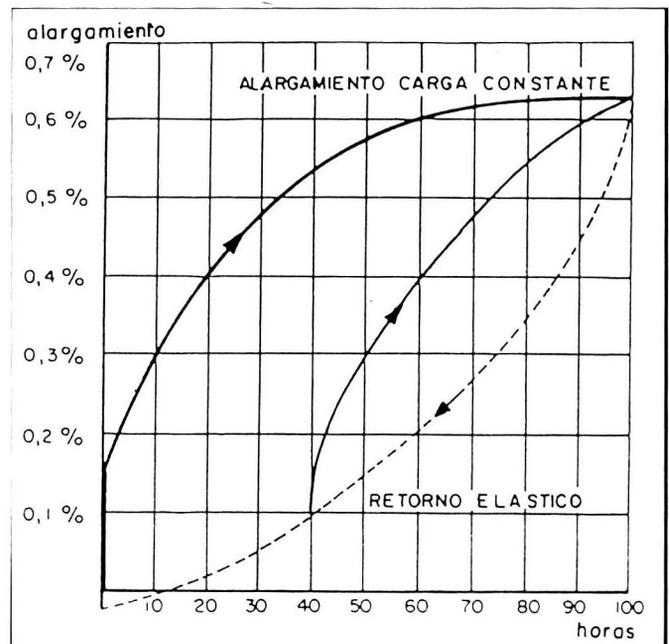


Figura 13

Alargamiento bajo carga constante y recuperación al desaparecer la acción.

Bajo carga constante, la deformación total no aparece hasta las 48 ó 100 horas, dependiendo de los materiales. Al desaparecer la acción, la recuperación es muy lenta, si ésta no ha llegado a producirse del todo y vuelve a entrar en carga, es muy fácil que se produzca una deformación residual irreversible. Las acciones térmicas, que son cíclicas y alternantes, tienen un carácter en cierto modo similar a los esfuerzos dinámicos, debido a ellas los materiales también se endurecen y fragilizan (figura 13).

Los fenómenos de plasticidad (fluencia y relajación) son más peligrosos en invierno, ya que la lámina puede permanecer varios días a la misma temperatura, sobre todo si se ha formado una capa de hielo sobre ella.

El problema es aún más complejo, antes se ha visto que el módulo de elasticidad y el coeficiente de dilatación varían con la temperatura, por tanto, estas deformaciones no se producen del mismo modo que en la gráfica que refleja el comportamiento mecánico de la lámina para una temperatura de 20°C.

4.3 Materiales pétreos.

Los hormigones de los elementos estructurales y las piezas de los pavimentos, tienen un coeficiente de dilatación que se mantiene prácticamente constante en el intervalo de temperatura de -20°C a +80°C que está entre $0,9 \times 10^{-5}$ m/m° y $1,2 \times 10^{-5}$ m/m°. Las características mecánicas no varían con la temperatura en el intervalo antes indicado.

Es necesario, sin embargo, tener en cuenta las retracciones que se producen ya que provocan fisuras cuya anchura oscila entre 0,1 mm y 0,5 mm pudiendo producir roturas en las láminas impermeabilizantes.

5. FENOMENOS TÉRMICOS.

Conocidas las características y el comportamiento de los materiales que constituyen los diversos elementos de la cubierta, podemos pasar a estudiar los fenómenos que producen las acciones térmicas.

Todos los materiales, al aumentar o disminuir su temperatura, experimentan una dilatación manifestada como una expansión o contracción de su volumen.

Si el material no tiene coartada su deformación, la dilatación se manifiesta como un movimiento -alargamiento o acortamiento- sin que se modifique su estado tensional, sólo varía la energía acumulada. La magnitud de ese movimiento para un elemento de longitud L es $\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T$, siendo α el coeficiente de dilatación lineal del material e ΔT la variación de temperatura en grados centígrados.

El movimiento que se produce en un elemento por la dilatación está caracterizado por su ampli-

tud, su naturaleza y su velocidad.

La amplitud depende del tipo de material, que tiene un coeficiente de dilatación determinado, de las dimensiones del elemento y de la variación de temperatura que se produzca en él.

La naturaleza de la deformación se manifiesta como una extensión o contracción, según que el material experimente un incremento o un descenso de su temperatura.

La velocidad viene determinada principalmente por la capacidad de captación o cesión de la energía por parte del material, que como se ha visto al hablar de las acciones térmicas, depende de su calor específico, del estado de la superficie y de las condiciones de difusión y transmisión del calor y, también, de la duración y evolución de la intensidad de la acción.

Si todos los elementos de la cubierta pudiesen desarrollar libremente su dilatación, los materiales no estarían sometidos a tensiones y no existiría ningún problema, pero esta situación nunca se da.

Si se coarta la deformación, obligando a que las dimensiones permanezcan invariables, aparecen reacciones que modifican su estado tensional, el elemento queda sometido a una tensión $\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$, siendo E el módulo de elasticidad del material. Esta tensión es de compresión si el incremento de temperatura es positivo y de tracción en el caso de producirse un descenso.

Tanto en el caso de encontrarse el material libre o coartado, hay que tener en cuenta que, al ser un elemento superficial y no lineal, los movimientos o las tensiones se manifiestan en dos direcciones (la tercera dimensión no es necesario considerarla en las láminas impermeabilizantes por su pequeño espesor).

La dilatación que produce una determinada acción no es igual en los diversos elementos de la cubierta, ello es debido a que es distinta la temperatura que alcanza cada uno y a que el coeficiente de dilatación de cada material es diferente. Por ello, si están libres, se hace patente el movimiento de un elemento sobre otro.

Si la intensidad de la acción térmica no es uniforme en toda la superficie, la dilatación que se produce no es igual y por tanto tampoco el movimiento desarrollado en cada una de las partes que se encuentran a distinta temperatura. Existe una zona intermedia de transición en la que aparecen unas tensiones denominadas termoelásticas inducidas de una parte a la otra. Estas tensiones dan lugar a esfuerzos de cortadura. Esta situación se da cuando hay unas zonas soleadas y otras en sombra.

En las cubiertas que existen vuelos correspondientes a aleros o terrazas abiertas al exterior, se puede dar también una falta de uniformidad si en el vuelo o terraza no se ha colocado el elemento aislante como en el resto de la cubierta, y porque, en el invierno, la superficie inferior en esa zona de

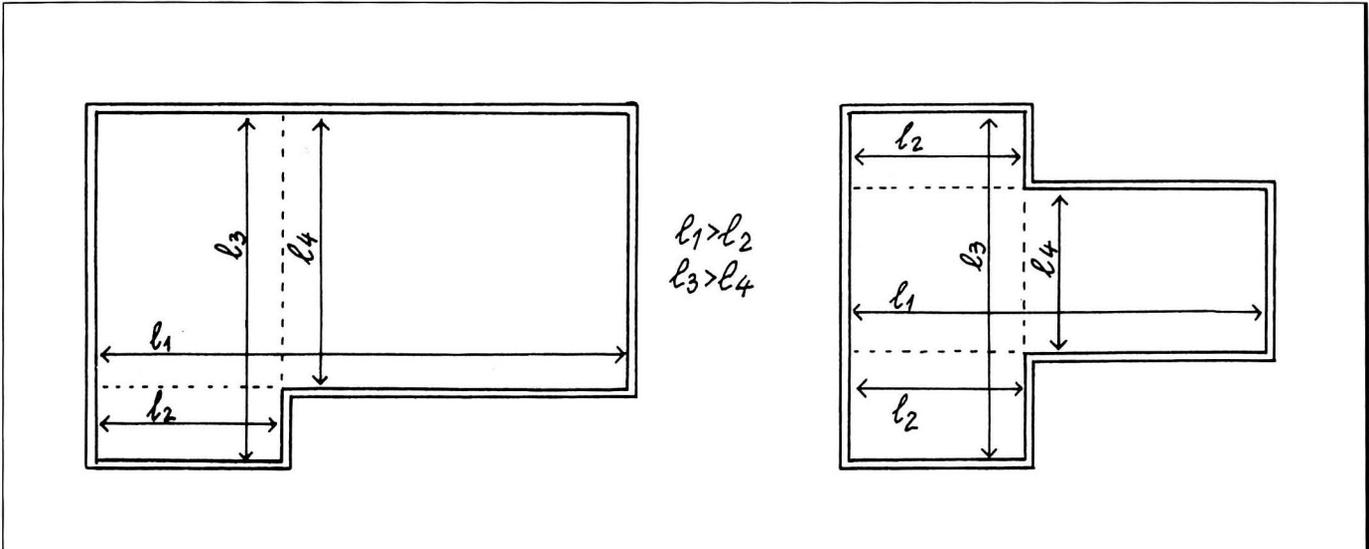


Figura 14

Esfuerzos de cortadura en puntos de las plantas con diferencias dimensionales.

la cubierta va a estar a distinta temperatura que la del resto. Las condiciones térmicas de las dos zonas no son iguales.

De modo semejante, la falta de regularidad de la planta de la cubierta, da lugar a que las dilataciones finales no sean iguales, los movimientos y desplazamientos son proporcionales a su longitud, por lo que en los puntos que existen diferencias dimensionales aparecen esfuerzos de cortadura (figura 14).

6. SISTEMAS DE COLOCACION DE LAS MEMBRANAS IMPERMEABILIZANTES.

La impermeabilización de una cubierta es un problema delicado, cada vez que se comete un error de concepción o de ejecución tiene consecuencias graves. Es muy importante conocer como trabaja un revestimiento de estanqueidad y apreciar su comportamiento con el paso del tiempo.

Para el estudio de los efectos que pueden producirse hay que tener en cuenta la distinta configuración de los elementos. El elemento de estanqueidad es siempre un elemento continuo, el estructural lo es también en la mayoría de los casos, mientras que son elementos discontinuos el de aislamiento que está conformado por placas con juntas abiertas entre ellas y el de terminación o pavimentación que está constituido por recuadros de baldosas con juntas elásticas selladas.

Las membranas impermeabilizantes pueden colocarse de varias formas: adheridas, semiadheridas, apoyadas sobre otro elemento, encerradas entre dos elementos y ancladas o fijadas en sus bordes.

6.1 Por adherencia sobre un soporte continuo.

Este sistema es el que se emplea para la fijación

de las láminas autoprotectidas u otros tipos de membranas que están situadas en la superficie exterior de la cubierta.

Dos elementos que en estado de independencia desarrollan dilataciones distintas, se comportan como un único elemento si se encuentran unidos entre sí, por ejemplo, mediante un adhesivo. El de mayor coeficiente de dilatación encuentra coartado su movimiento ya que sólo puede dilatarse hasta la dilatación que experimenta el de menor dilatación cuando éste es más rígido que él, quedando por tanto tensionado (figura 15).

Entre la superficie de contacto de los dos elementos aparece un esfuerzo rasante que ha de ser resistido por el adhesivo; si éste no es capaz de soportar dicho esfuerzo, la adherencia desaparece y los elementos se separan. La pérdida de la adherencia puede producirse tanto por dilataciones de extensión como de contracción.

El despegue de la lámina no se produce en su totalidad, sino que se localiza en puntos o líneas.

En la zona despegada la lámina se libera de la tensión a que estaba sometida y la dilatación se convierte en movimiento. Las partes que permanecen adheridas actúan como topes, impidiendo que

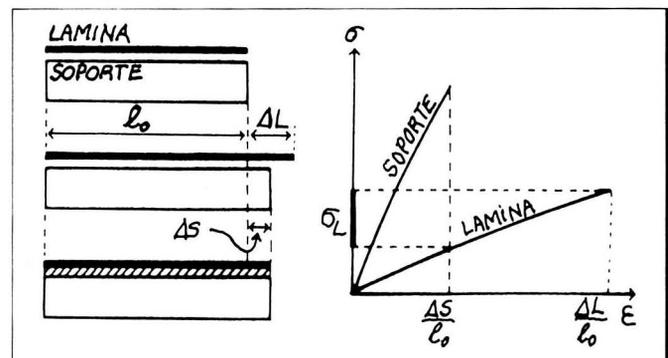


Figura 15

Deformaciones diferenciales entre lámina y soporte.

el movimiento pueda desarrollarse con total libertad.

En el verano, con la elevación de temperatura, la zona despegada de la lámina se dilata y, al no poder moverse, se comprime. Debido a su débil espesor, la lámina pandea y se arquea. A continuación, el vapor de agua ocluido entre la lámina y el soporte, al dilatarse por el calor, ejerce una presión contra la lámina que contribuye a que progrese el despegue. En una segunda etapa, la acción del peso propio de la lámina hace que el arco formado se hunda, dando lugar a dos ondas más pequeñas y de mayor curvatura. Más tarde, la zona central que tiene libertad para dilatarse va comprimiendo las ondas hasta convertirlas en pliegues en forma de lira. Estos pliegues cada vez son más cerrados. La parte interior del pliegue queda comprimida y la exterior traccionada. Los pliegues aparecen en verano, cuando la temperatura de la lámina puede ser de 70°C y el material se encuentra próximo al reblandecimiento y, por tanto, su resistencia a tracción y compresión están muy disminuidas. Las tensiones de la lámina pueden verse incrementadas por la presión del vapor de agua acumulado bajo el pliegue.

En las dos caras de la lámina aparecen deformaciones irreversibles, en la traccionada como microfisuras y, en la comprimida, como pequeñas protuberancias. Con la repetición diaria de la acción aumentan esas deformaciones. La penetración de las microfisuras en el interior de la lámina y la pérdida de material por la cara comprimida, debilitan progresivamente la lámina. La rotura se produce en el invierno, por esfuerzos de tracción. En verano, aunque es muy difícil, puede producirse la rotura por un enfriamiento brusco (figura 16).

Si se producen retracciones en el soporte pueden aparecer roturas en la lámina. La tracción inducida

en la lámina, en el momento de producirse la fisuración del soporte como consecuencia de su retracción, es muy grande e instantánea, generalmente la lámina no es capaz de resistirla y se fisura (figura 17).

En las láminas adheridas totalmente a soportes formados por piezas prefabricadas colocadas a tope entre sí, se produce este mismo comportamiento de la lámina impermeabilizante (y de cualquier otra clase de revestimiento adherido totalmente) cuando las juntas entre las piezas se abren posteriormente por causas térmicas y/o mecánicas.

6.2 Por adherencia sobre un soporte discontinuo.

La colocación de las láminas impermeabilizantes adheridas a un soporte discontinuo lleva consigo el que, los efectos que se producen en la lámina, sean distintos a los que se dan cuando se encuentra adherida sobre un soporte continuo.

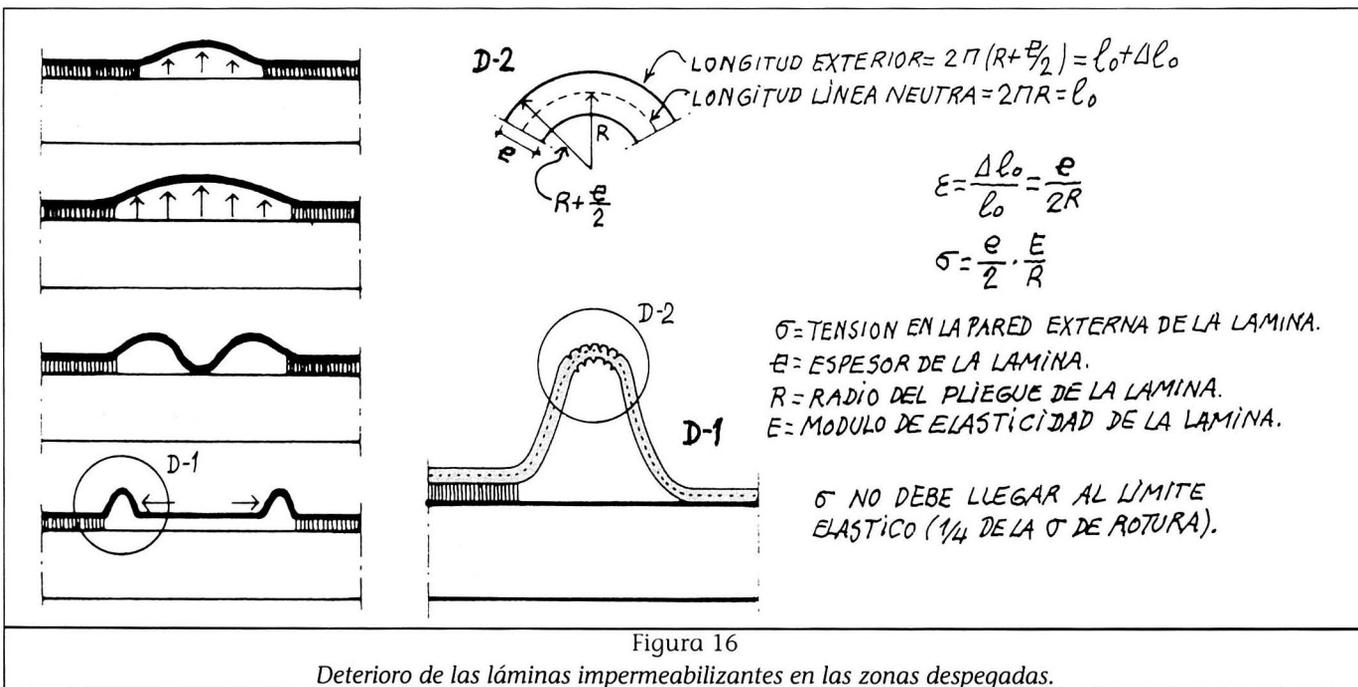
La existencia de juntas abiertas entre las placas de los aislantes térmicos posibilita la dilatación de estas, que se traduce en movimientos de extensión o contracción de las placas.

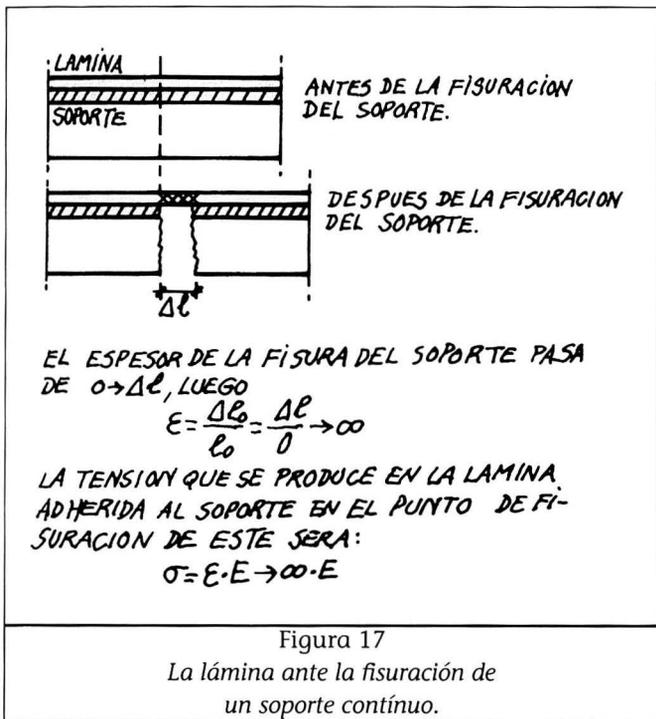
Esas juntas además facilitan el que se produzca en ellas la condensación del vapor de agua y la formación interior de hielo.

En una lámina adherida sobre placas aislantes existe una zona de la lámina, coincidente con el ancho de la junta, que se encuentra independiente. Inicialmente el ancho de esa junta tiene que tener una dimensión A, necesaria para que las placas aislantes puedan desarrollar su dilatación. Este ancho A viene determinado por la longitud de la placa, su coeficiente de dilatación y el incremento de temperatura que pueda producirse.

$$A = L \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

De aquí se deducen dos conclusiones: que el





ancho de la junta ha de estar dimensionado en función del tipo de material, de las dimensiones de la placa aislante, y que es más recomendable utilizar placas cuadradas que rectangulares, pues en estas últimas las juntas tendrán que tener distinta amplitud en una dirección que en otra debido a la diferente longitud de sus lados.

Al dilatarse el soporte por un aumento de su temperatura, la junta entre placas aislantes se cierra y la lámina se ve obligada a deformarse produciéndose un pliegue. Por el contrario, si el soporte se contrae, la junta se amplía y la lámina experimenta un alargamiento (figura 18).

En el primer caso, la formación del pliegue da lugar a que aparezcan en esa zona de la lámina

esfuerzos de flexión, produciéndose unos efectos muy similares a los desarrollados en los pliegues que se forman sobre los soportes continuos, con una diferencia, como la incurvación suele ser hacia el interior de la junta, el pliegue puede resultar comprimido por las placas aislantes y ser, por tanto, mayor su deformación, incrementándose las tensiones tanto de compresión como de tracción en el pliegue de la lámina.

Es más peligroso el efecto que aparece al contraerse el soporte de placas aislantes. El ancho de la junta aumenta ya que la contracción de la placa es de varios milímetros. El alargamiento que se produce en esa zona de la lámina puede ser mayor que el de su límite de rotura.

$$B/A > \text{Alarg. Rot.}$$

No es corriente que este caso se dé, no obstante, si el alargamiento de la lámina es mayor que el de su límite elástico, se produce una deformación irreversible y, dado el carácter cíclico de las acciones térmicas, esas deformaciones se van acumulando y termina por fisurarse la lámina.

La contracción de las placas aislantes por la acción térmica, se ve incrementada con las retracciones que se producen en las placas, debidas a la estabilización después de su fabricación como anteriormente se ha visto. El aumento de la anchura de la junta por retracción de las placas aislantes es función de la clase de material aislante, siendo especialmente notables en el caso de aislantes térmicos constituidos por materiales sintéticos expandidos o por espumas rígidas; la magnitud de esta junta depende, además de la naturaleza del material, del espesor y dimensiones de las placas aislantes y del grado de unión de la placa al soporte y a la lámina impermeabilizante.

Las deformaciones debidas al entumecimiento por causa de la humedad son de signo contrario.

Hay que tener en cuenta que las variaciones dimensionales de la superficie de las placas de aislantes térmicos colocadas en obra en contacto con su soporte y con la lámina impermeabilizante son distintas de las que se producirían en ellas si se encontrasen libres.

Para valorar la magnitud de las juntas entre placas aislantes es necesario tener en cuenta la amplitud de su movimiento a lo largo de un ciclo completo considerando los movimientos reversibles total o parcialmente.

La rotura de la lámina no se produce por lo general el primer año, sino, a partir del segundo, cuando ha pasado por lo menos un invierno y un verano. Suele producirse al final del invierno, estación en la que las láminas, con las bajas temperaturas, se rigidizan y su elasticidad está muy disminuida, ya que el alargamiento a rotura a -10°C es diez veces menor que a 20°C.

