

Los elastómeros en la construcción: aplicaciones y valorización medioambiental

Elastomers in building industry: applications and environmental valorization

G. Alcuri¹

Recibido: abril 2018

Aprobado: agosto 2018

Resumen. - Se presenta un breve resumen sobre las características fundamentales de los elastómeros y las propiedades físicas que soportan sus capacidades para solucionar un gran número de problemas en la industria de la construcción. Los elastómeros encuentran aplicaciones múltiples en la desolidarización estructural (o desacoplamiento), los tratamientos anti-vibratorios, la estanqueidad y el acondicionamiento acústico y térmico. Se exponen ejemplos representativos de aplicación y de desarrollo de materiales y sistemas específicos. Un punto especial está reservado a técnicas de reciclado de elastómeros y las posibilidades de valorización medioambiental de los resultados prácticos en la construcción.

Palabras claves: elastómeros; construcción; desacoplamiento; estanqueidad; aislación; reciclado; devulcanización

Abstracts. *A brief summary is presented on the fundamental characteristics of the elastomers and the physical properties that support their capabilities to deal with a large number of problems in the building industry. The elastomers find multiple applications in the structural insulation, the anti vibratory treatments, the sealing systems and the acoustic and thermal conditioning. Representative examples of application and development of specific materials and systems are presented. A special point is reserved for elastomer recycling techniques and the possibilities for environmental valorization of practical results in building industry.*

Keywords. *Elastomers; building industry; insulation; sealing; recycling; devulcanisation*

1. Introducción. - Los elastómeros desempeñan un papel importante en el sector de la construcción e ingeniería civil. Múltiples aplicaciones aprovechan las propiedades específicas de este tipo de materiales en términos de elasticidad, adaptación geométrica, aislación y durabilidad. Se encuentran en la función anti-vibratoria, anti-sísmica, en el tratamiento de interfaces, la aislación térmica, la impermeabilización, estanqueidad al aire, las superficies flexibles o las protecciones mecánicas y térmicas de diferentes tipos, para citar solo algunas de las aplicaciones más corrientes. Más adelante en este artículo se evocarán de una manera organizada las orientaciones técnicas más significativas.

Dado que los elastómeros presentan dificultades intrínsecas a nivel de las posibilidades de reciclado y de valor medioambiental, un capítulo de este trabajo será reservado a la consideración

¹ ALCTRA Recherche & Développement – La Chevaucherie 61130 Dame Marie - France

de innovaciones industriales en el tratamiento de este aspecto de una materia compleja y relativamente onerosa.

Bien que en el marco de esta publicación el interés está centrado sobre las aplicaciones concretas que siguen la evolución global de las técnicas de construcción, se comenzará por una presentación conceptual de la materia elastomérica insistiendo sobre las propiedades físicas que justifican el valor de los productos derivados en la construcción y las obras públicas.

Precisamente, los elastómeros encuentran campos de valorización considerables dentro de la evolución global de la construcción en los últimos años. Esta evolución toma la forma de industrialización de tareas y métodos, la generalización de la construcción modular (creadora de numerosas interfaces que exigen tratamientos especiales), las nuevas exigencias en el plano del confort y la optimización energética y finalmente en la necesidad técnica de responder a nuevas y osadas tendencias arquitectónicas.

El autor, en relación con industriales, estudios de arquitectura e ingeniería y empresas constructoras, participó en la concepción, desarrollo y aplicación de elastómeros, productos derivados y aplicaciones prácticas. Este trabajo se desarrolló en paralelo a la creación y optimización de procedimientos de fabricación y de control en línea, en laboratorio e in situ. Ciertos principios y métodos de caracterización de la materia fueron expuestos en el número 11 de esta misma publicación [1].

Antes de exponer el tema central de las aplicaciones de elastómeros en la construcción, con ejemplos prácticos de realizaciones originales o particularmente representativas, se presentará una visión panorámica de los elastómeros y de las propiedades físicas que influyen en las aplicaciones mencionadas.

2. Los elastómeros – ideas básicas. - Los elastómeros pueden definirse como polímeros naturales o sintéticos presentando un bajo módulo de elasticidad a temperatura ambiente siendo capaces de soportar, sin alteración, elongaciones reversibles luego de estar sometidos a un proceso de reticulación. Considerando la gran variedad de estructuras posibles los elastómeros tienen una masa molar M_n comprendida entre 104 y 106 g/mol. [2].

Los elastómeros son generalmente utilizados en forma de mezclas con el fin de mejorar sus propiedades fisicoquímicas, que pueden ser insuficientes a nivel de la materia de base pura para las funciones a las que el producto industrial será destinado. Industrialmente las mezclas pueden integrar un número relativamente elevado de componentes para adaptar el producto final a diferentes exigencias funcionales, de resistencia mecánica o química, a condiciones de fabricación en procedimientos de moldeado o de extrusión o de costo del producto final. In fine, el comportamiento está determinado por la naturaleza y la distribución de la masa molecular del *polímero* de origen, la densidad de reticulación de las cadenas macromoleculares, las interacciones entre los polímeros y las cargas agregadas y los aditivos incorporados.

Se designa como polímero una molécula de masa molecular elevada, generalmente orgánica. La estructura macromolecular está constituida de una asociación de una cantidad importante de unidades repetidas o de una serie de monómeros unidos por relaciones covalentes. Sabiendo que un monómero es una molécula pequeña que puede encadenarse a otras para formar una serie (polímero). El más simple de los monómeros es el etileno de fórmula C_2H_4 , y estructura $CH_2=CH_2$. Ciertos polímeros sintéticos interesan particularmente nuestro desarrollo como el polietileno, el polipropileno, el poliestireno, el PVC, el PTFE, los poliésteres, los policarbonatos... [3]

La mezcla obtenida, de estructura compleja, se transformará en producto final luego de su conformación por el proceso industrial y, elemento fundamental, luego que la estructura interna sea definitivamente fijada por vulcanización [4] [5]. Corresponde recordar que el término de vulcanización se aplica a un proceso industrial que pasa (en general) por la incorporación de azufre al caucho bruto que es (en general) llevado a alta temperatura. En este proceso químico las moléculas del caucho se unen entre sí a través de puentes covalentes de otros átomos (azufre) esto limita las capacidades de desplazamiento molecular de origen. La modificación del comportamiento que se obtiene es la base del interés aplicativo de esta familia de materiales.

La posibilidad de obtener una enorme variedad de propiedades caracterizando las mezclas que constituyen productos a base de elastómeros motivó un trabajo conjunto entre Hutchinson (líder mundial del caucho -o goma - industrial) y Alctra (laboratorio de investigación y desarrollo) destinado a la creación de un útil informático de guía para la formulación de nuevas mezclas presentando adaptaciones optimizadas al tratamiento de problemas industriales predefinidos. Este útil que lleva el nombre de OPTIFOR® está basado sobre la aplicación de sistemas de redes neuronales y de métodos de tratamiento avanzado de la información. Conduce a la determinación de una familia de ingredientes obedeciendo a un conjunto de objetivos funcionales (propiedades fisicoquímicas) e, inversamente, a la predicción de propiedades a partir de formulaciones dadas. Cinco etapas fundamentales describen (sin entrar en las técnicas de trabajo ni en los algoritmos) la estructura y el funcionamiento del sistema:

- I) Construcción sistemática de la base de datos según un formalismo operacional que clasifica los datos en dos categorías: a) parámetros (componentes de la mezcla) y b) propiedades (criterios de apreciación de la mezcla).
- II) Análisis primario de dependencias y de correlaciones multiparamétricas. Se obtiene un indicador de la calidad de la base de datos.
- III) Calibración, por errores circulantes y aprendizaje neuronal. Dentro de las experiencias representativas, una parte es utilizada para entrenar el modelo neuronal, la parte restante sirve a la validación del modelo propuesto. Numerosas combinaciones de estos sub conjuntos son automáticamente ensayadas y el sistema retiene la más pertinente de las arquitecturas neuronales.
- IV) Predicción de nuevas fórmulas. El modelo neuronal permite la predicción de propiedades de una mezcla según los parámetros definidos por el operador. La red neuronal establece, además, la sensibilidad de cada propiedad con respecto a cada parámetro correspondiente a la mezcla.
- V) Optimización de fórmulas. El modelo neuronal permite la identificación de mezclas que responden a las exigencias definidas por el utilizador integrando los parámetros y las propiedades.

El sistema, que funciona sobre un soporte informático corriente, no exige del operador el conocimiento de los mecanismos matemáticos subyacentes. Guía al especialista de la formulación en el trabajo de identificación de formulaciones pertinentes, pero no se sustituye a la realización del trabajo experimental tradicional para la finalización y validación del producto industrial que se encontrará en las múltiples aplicaciones prácticas en el automóvil, la aeronáutica, los transportes, la industria manufacturera y naturalmente en la construcción, nuestro tema central.

Este punto, tratado de una manera superficial, se inscribe en una voluntad de mostrar la enorme diversidad de productos que responden a la definición de elastómeros (justificando hasta el recurso

a herramientas neuronales), que son muchas veces englobados en los términos de “caucho” o “goma” ignorando a menudo las enormes disparidades estructurales y funcionales y el interés de estudiar con profundidad la selección y adaptación de productos en aplicaciones críticas. Se recuerda la exigencia en obras públicas de la integración en la construcción de puentes de apoyos en “neopreno”, nombrando en realidad una marca comercial a base de poli-cloropreno aparecida en 1931. Un criterio bastante reductor.

En la formulación de los elastómeros se busca la obtención de propiedades necesarias a la solución de diferentes problemas que se presentan en cada terreno de aplicación, sabiendo además que en múltiples situaciones físicas los elastómeros están asociados a otras estructuras y componentes (piezas metálicas o composites, inclusiones...) y que se busca entonces en los elastómeros capacidades para integrar piezas compuestas. La lista siguiente resume las propiedades fundamentales que caracterizan ese tipo de material:

- Ductilidad
- Deformabilidad
- Elasticidad
- Resistencia a la abrasión
- Resistencia al desgarro
- Resistencia a los choques
- Resistencia a las sollicitaciones múltiples – fatiga
- Impermeabilidad
- Aptitud a la integración de mezclas
- Aptitud a la autoadhesión al estado crudo










Los valores relativos dados a cada una de esas propiedades condicionan las aplicaciones posibles. El trabajo del formulador consiste en “dosificar” los valores respectivos en una convergencia con los costos y los medios de producción disponibles.

El listado de los principales elastómeros de uso corriente y la presentación comparativa de las propiedades mecánicas y químicas fundamentales son organizadas en forma de cuadro. Se propone una nota global correspondiendo a cada propiedad retenida, recordando que los productos industriales finales son el resultado de mezclas que son, en general, totalmente confidenciales. La denominación relativa a la estructura química está acompañada del símbolo normalizado, nótese que la letra R que aparece en varias apelaciones corresponde al término inglés rubber. (Tabla I)

	Caucho natural	Isopreno	Butadieno	Estireno butadieno	Nitrilo butadieno	Cloropreno	Isobutileno isopreno	Propileno dieno	Etileno Propileno
Símbolos normalizados	NR	IR	BR	SBR	NBR	CR	IIR	EPDM	
Alargamiento a la ruptura	MB	MB	F	BB	M	BB	BB	F	
Flexibilidad (baja temp)	M	M	M	MED	MED	MED	M	M	
Permeabilidad a los gases	F/mf	F/mf	MED	MED	MB	B	EX	M	
Resiliencia (temp. ambiente)	EX	MB	EX	M	M	BB	mF	F	
Resistencia a intemperies	MED	MED	BB	MED	B	BB	MB	MB	
Resistencia a ácidos diluidos	M	M	M	M	BB	B	B	MB	
Resistencia a hidroc. alifáticos	F/mf	mF	mF	mF	EX	BB	mF	N	
Resistencia a hidroc. aromáticos	N	N	N	N	B	M	mF	N	
Resistencia a la ruptura	MB	MB	mF	BB	BB	MB	mF	mF	
Resistencia a la abrasión	MB	MB	EX	B	MB/B	B	MED	M	
Resistencia a la temperatura	M	M	BB	BB	B	B	MB	MB	
Resistencia a la luz	F	F	F	F	MED	MB	MB	EX	
Resistencia a la oxidación	MED	MED	BB	M	M	B	B	MB	
Resistencia a solventes polares	M	M	M	M	mF	F	B	B	
Resistencia al desgarramiento	EX	MB	mF	MED	BB	B	MED	MED	

Tabla I-. Elastómeros de uso corriente y nota global comparativa de las propiedades fundamentales.

Las notas corresponden a las apreciaciones siguientes:

EX Excelente		MB Muy bueno		B Bueno	
BB Bastante bueno		M Medio		MED Mediocre	
F Bajo – insuficiente		mF Muy bajo		N Nulo - Deficiente	

Se incluye una breve referencia a los costos de la materia bajo forma de índices de precio (mayo 2018) con respecto a una base 100 (céntimos de euro) en 2009 para mezclas a base de elastómeros: NR : 98; SBR : 119; EPDM : 114; CR : 126; NBR : 112 [6]. Se señala que los productos industriales disponibles, incorporando en los más elaborados propiedades complementarias y caracterizaciones técnicas específicas, pueden presentar precios muy dispares (de 1 a 10) en aplicaciones equivalentes, por ejemplo, apoyos elásticos continuos.

3. Elastómeros - funciones en la construcción. - Las aplicaciones de los elastómeros en la industria de la construcción están en fuerte crecimiento siguiendo la evolución de los métodos constructivos, el proceso de industrialización de la construcción, la modularización de las etapas de realización (creando un gran número de interfaces) y las exigencias cada vez más agudas en términos de confort y economías de energía.

Las propiedades intrínsecas de los elastómeros participan en la solución de numerosos problemas presentes en las construcciones modernas complementando otros materiales en ciertas funciones o desempeñando funciones exclusivas en relación con el comportamiento fisicoquímico de esos cuerpos de estructura compleja y ajustable en un ancho espectro. Las funciones donde la presencia de elastómeros es exclusiva o fundamental pueden listarse de la manera siguiente:

Calafateo (anti-penetración de aire – polvo – gas – llamas) – hermeticidad - estanqueidad
Sellado – fijación – apoyos estructurales
Aislación anti-vibratoria de equipamientos
Acción anti-sísmica
Aislación acústica (propagación aérea)
Aislación acústica (propagación sólida)
Acondicionamiento acústico (absorción)
Impermeabilización
Aislamiento eléctrico
Encolado

La insistencia sobre la diversidad de las aplicaciones, la gran variedad estructural y comportamental de los elastómeros y la especificidad de las soluciones prácticas tiene su origen en la constatación directa de innumerables casos de fracaso en el tratamiento de problemas constructivos. Estas situaciones que pueden provocar daños estructurales, funcionales y económicos considerables son la consecuencia de la desadaptación del producto con respecto a la situación física (divergencias con respecto a las cargas estáticas o dinámicas, a la dirección de las sollicitaciones mecánicas o a la reacción frente a agresiones externas, por ejemplo), o también a la presencia de corto circuitos mecánicos (fijaciones en paralelo o ductos rígidos, en el caso de suspensiones elásticas). Otro factor de mala aplicación de soluciones conceptualmente aceptables es encontrado en la interpretación de la documentación técnica. Porque existen productos que se presentan de una manera poco diferenciable (un elastómero puede presentarse de manera similar a otro estructuralmente muy diferente), la lectura detallada y la comprensión de los datos técnicos, así como la trazabilidad de las operaciones de instalación son puntos claves en la conclusión de un tratamiento correcto. La documentación puede a veces encerrar zona “grises” difícilmente detectables. Un soporte elástico de suelo liviano (tipo parquet) mostró en un caso concreto resultados muy inferiores a los que se podía deducir de la lectura de la documentación validada por un organismo oficial. El análisis de los voluminosos documentos originales (cuya obtención es a menudo difícil) permitió la identificación de la causa de la divergencia. Los ensayos, normalizados en cuanto a las operaciones metrológicas, fueron realizados bajo una sobrecarga de 100 kg/m² (agregados a la masa del suelo liviano). El resultado es verídico, las condiciones de trabajo son, en cambio, irrealistas. Afortunadamente este ejemplo es bastante excepcional, pero ilustra la necesidad de realizar estudios serios en el marco de las intervenciones técnicas en los proyectos arquitectónicos.

3.1. Descripción sectorizada de funciones. - Sin ser exhaustivos en el tratamiento del tema global, una función (o grupo de funciones) que merece una atención especial es aquella desempeñada por las juntas elásticas ya que se observa que su importancia y su especificidad son generalmente subestimadas. Se recuerda que, aunque las capacidades de aislación térmica y acústica de las aberturas o las fachadas están referidas a los componentes transparentes (vidrios simples, sistemas compuestos), el funcionamiento global depende de los chasis y estructuras asociadas, y en definitiva de la hermeticidad del conjunto. Más profundamente aun, las capacidades finales de aislación están ligadas al funcionamiento de las columnas de aire encerradas en las cavidades de las estructuras metálicas, generalmente de aluminio o plástico, obtenidas por extrusión.

Dentro de los grandes tipos de productos a base de elastómeros, la junta, elemento frontero entre estructuras y componentes está presente en la industria de la construcción en diferentes sectores de trabajo. Los sectores de aplicación presentan exigencias técnicas, objetivos y condiciones de realización propios, globalmente a nivel de la albañilería, la carpintería de obra, las instalaciones eléctricas, en redes de canalizaciones y en las estructuras de base. Las funciones se sitúan en la aislación térmica y acústica, la hermeticidad, las terminaciones, el desacoplamiento mecánico o la protección al fuego.

A nivel de las estructuras y la albañilería las juntas cubren el espacio entre elementos de la misma naturaleza o de naturaleza diferente, con una participación activa en la estabilidad de las construcciones, la protección contra la humedad, la resistencia al fuego y cumpliendo un valor estético en una cierta concepción arquitectónica. Un caso particular es el de las juntas de dilatación, elemento deformable que permite el desplazamiento lateral de estructuras sometidas a variaciones de temperatura. Las juntas llamadas de fraccionamiento constituyen variantes muy utilizadas en métodos constructivos modernos comportando una proporción importante de elementos prefabricados.

En la carpintería de obra las juntas son funcionales en el calafateo del contorno de chasis de ventanas y naturalmente encargándose de optimizar los contactos entre componentes móviles (que reciben los vidrios) y las secciones fijas.

Resumiendo, el aspecto funcional, las juntas están destinadas a separar físicamente el medio exterior (lluvia, humedad, viento...) o un medio interno (aire saturado de humedad...) de volúmenes habitados o estructuras sensibles. La separación de medios y de volúmenes diferentes permite la regulación medioambiental de cada sector en función de la destinación o de criterios de distribución energética. Pero se verá más abajo que estos componentes elásticos pueden también desempeñar funciones complementarias de gran valor si ellos integran geometrías y composiciones adecuadamente escogidas.

En la situación actual de transición metodológica en la industria de la construcción se señala que, en el marco de las tendencias medioambientales y de optimización energética, los conceptos de hermeticidad están regidos por normas y que ellas son cada vez más exigentes. En el trabajo de racionalización de los criterios citados de hermeticidad / estanqueidad, el autor se inspiró en la evolución tecnológica aplicada a funciones análogas en la industria del automóvil, que se presentó con anterioridad con respecto a la construcción. Dos aspectos fundamentales donde se puede aplicar una transferencia de conocimientos del automóvil hacia la construcción son el de envejecimiento de los productos instalados en interfaces, con el fin que la realización conserve las propiedades de origen en un tiempo compatible con la vida útil de las construcciones y la consideración de la función mecánica.

3.2. La función mecánica de las juntas. - El funcionamiento mecánico de las relaciones entre estructuras (por ejemplo, chasis / vidrios) se refleja en el rendimiento acústico del conjunto. Estos fenómenos fueron estudiados exhaustivamente en el marco de aplicaciones en el automóvil y son hoy en aplicación en la construcción.

La geometría y los materiales constitutivos de las juntas participan en la disipación de energía vibratoria a nivel de las membranas representadas por los vidrios. De esta manera, la emisividad de las superficies transparentes es atenuada en función de las condiciones límites materializadas por las juntas y el modo de encastrado con las estructuras asociadas.

Un elemento de vidrio instalado presenta una capacidad de aislación acústica dependiente del rendimiento de tres formas de transmisión que están representadas en la Figura I. Trabajos del laboratorio ALCTRA en la industria del automóvil [7], mostraron que el rendimiento en hermeticidad con respecto a las intemperies (aire – agua) y el polvo difícilmente cuantificables están englobadas en el rendimiento acústico de los elementos compuestos, entendiéndose que el estudio del comportamiento acústico es mucho más accesible y que la caracterización física desemboca sobre parametrizaciones objetivas y cuantificables.

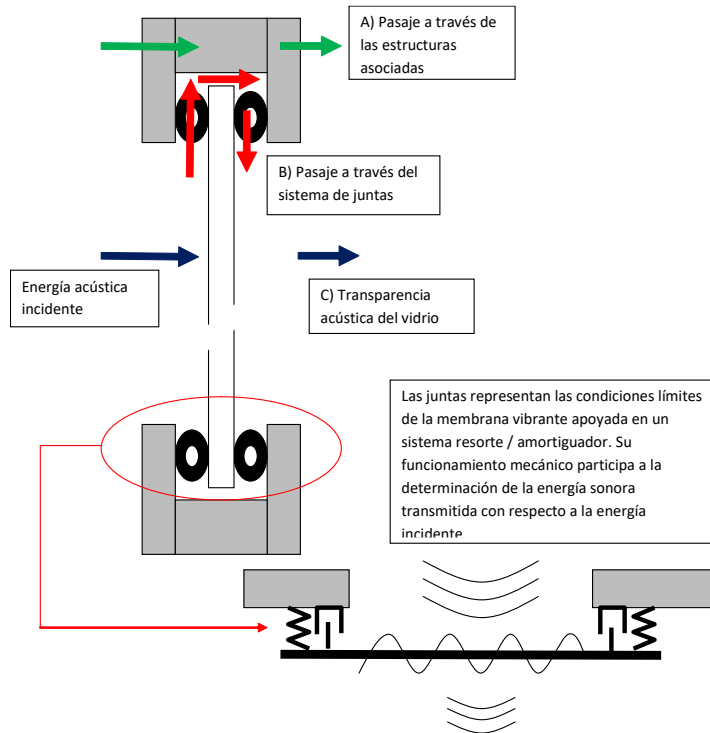


Figura I.- Funciones múltiples en un sistema de juntas de carpintería de obra.

Las juntas más elaboradas son elementos multimateria de geometría compleja obtenidos por co - extrusión, proceso que permite (luego de reglajes relativamente complicados) desembocar sobre una simultaneidad en la convergencia de componentes de materia diferente. De esta forma, integrando partes en materia deformable (por ejemplo, de estructura celular), pestañas con comportamiento de superficie específico, elementos rígidos estructurantes y hasta armaduras metálicas, se obtiene una gran capacidad de adaptación a los espacios inter estructurales, una optimización de contactos, la resistencia a los agentes externos y radiación ultra violeta, respondiendo además a criterios de durabilidad predeterminados. Las interacciones entre las geometrías y las materias y las relaciones complicadas con las estructuras asociadas fueron analizadas con la ayuda de medios de Tratamiento Avanzado de la Información (hoy llamados impropriadamente de “inteligencia artificial”) con el fin de identificar la responsabilidad funcional de cada componente y desembocando sobre útiles informatizados de asistencia a la concepción de sistemas de juntas [8].

Las juntas llamadas «de estructura» están destinadas a cortar verticalmente una construcción de dimensiones importantes en varias partes respectivamente independientes y, por una parte, compensar retracciones y dilataciones térmicas y, por otra parte, compensar aplanamientos diferenciales de cimentaciones o del suelo. Se puede identificar:

Juntas de dilatación

Compensan las variaciones dimensionales

Juntas de ruptura

Separan dos construcciones sometidas a cargas desiguales o que reposan sobre fundaciones de resistencia diferente.

Juntas “diapasón”

Se instalan en las paredes muy expuestas a diferencias térmicas, por ejemplo, en terrazas. Generalmente el espaciamiento máximo entre dos juntas de estructura consecutivas no supera 20 o 30 metros, dependiendo de las variaciones climáticas locales.

Juntas de retracción

Son creadas con el fin de absorber las retracciones consecutivas al fraguado del hormigón y morteros. Constituyen puntos de ruptura en las obras, para concentrar en ellos las fisuras inevitables debidas a las retracciones, evitando así la formación desordenada (y antiestética) de fisuras de retracción.

Juntas de fachada liviana

Son juntas de dilatación necesarias para compensar las dilataciones diferentes de estructuras de base, componentes metálicos, y paneles de vidrio.

Juntas de prefabricación pesada

Son conceptualmente juntas de dilatación.

Juntas de construcción, de encofrado o de reanudación de hormigonado

Resultan de una interrupción en la construcción y juegan el papel de juntas de retracción, de dilatación o de aislamiento.

Juntas de desacoplamiento o de aislamiento

Se encuentran sobre todo alrededor de pilares y zócalos de máquinas y equipamientos comprendiendo todo el espesor de planchas. Permiten los movimientos horizontales de los soportes estructurales causados por la retracción, y los movimientos verticales provocados por las diferentes sollicitaciones mecánicas.

Juntas de paneles de vidrio

Están situadas entre los vidrios y los marcos de paneles integrados o entre vidrio y vidrio en los casos de vidrios exteriores encolados, así como las juntas de sistemas vidriados dobles o múltiples.

Juntas rígidas

Son juntas situadas entre ensamblados o asociaciones de materiales fijos, inmóviles.

Dentro de esta clasificación de “juntas de estructura” se distinguen ciertos tipos que desempeñan funciones especiales:

Juntas anti-ácidas y medios agresivos necesarios en ciertos locales técnicos y situaciones industriales en la química, agroalimentario, tratamiento de aguas, laboratorios...

Juntas anti-fuego (presentes también en puertas y ventanas)

Juntas anti-sísmicas.

Desempeñan la función principal correspondiendo con su denominación y funciones complementarias como generalmente aquellas de juntas de dilatación. Los materiales y las técnicas constructivas usadas en la fabricación de apoyos anti-sísmicos son el objeto de normalizaciones muy estrictas, en particular, dentro de los objetivos de este trabajo, descartando el empleo de materiales reciclados.

Por otra parte, es importante subrayar que existen normas específicas (ISO, AFNOR, DIN...) y reglamentaciones nacionales precisas que organizan la fabricación y el empleo de juntas de estructura y juntas especiales. Se recuerda que globalmente las normas responden a

consideraciones de carácter científico, mientras que las reglamentaciones corresponden a legislaciones nacionales que pueden integrar otros factores en los textos legales.

La Figura II ilustra zonas de tratamiento incorporando juntas y sistemas de hermeticidad, de una manera esquemática.

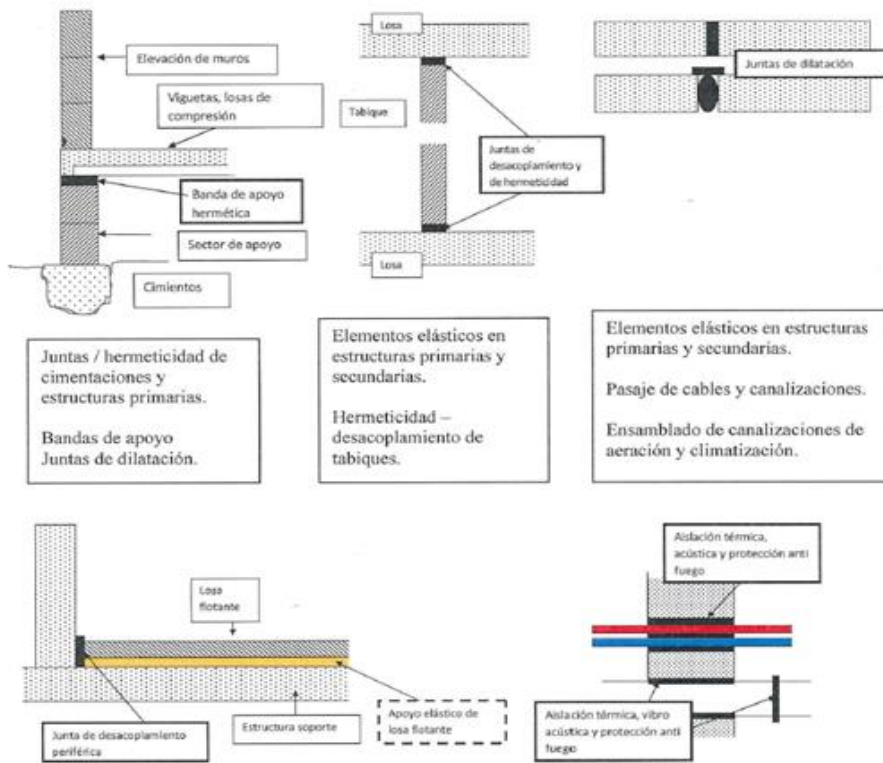


Figura II.- Ejemplos de configuraciones de tratamientos de desacoplamiento y estanqueidad.

En ciertas situaciones específicas, generalmente tratándose de construcciones originales o integradas en medios particulares, se debe recurrir a la adaptación de productos existentes a funciones y situaciones inéditas. El autor se encontró enfrentado a situaciones de ese tipo y algunos ejemplos pueden presentarse por su carácter de estimulador de nuevas ideas. En el proyecto de construcción de un gran edificio en Kazajstán los riesgos sísmicos imponen la necesidad de una libertad de desplazamiento de paredes de separación (en gran número) con respecto a los elementos de fachada, al mismo tiempo que la funcionalidad interna exige la hermeticidad de las divisiones entre volúmenes contiguos. Se propuso la instalación de una extremidad de tabique realizada en elastómero poliuretano cortado en forma de bandas presentando el espesor y la capacidad de deformación por compresión necesaria, asociados a un comportamiento térmico y acústico compatible con aquellos del tabique de origen. En la gama de productos destinados a la aislación vibratoria de un fabricante reconocido se encontró el material adecuado. El fabricante es capaz de presentar una documentación abundante y detallada del comportamiento físico y químico de sus productos, lo que es necesario de destacar (Figura IIIA). El conocimiento del comportamiento físico intrínseco del material permitió la transposición funcional con éxito.

El otro ejemplo se refiere a la constatación que las puertas y ventanas corredizas son siempre sectores de debilidad térmica y acústica. Independientemente de las superficies ciegas o vidriadas principales, el problema se sitúa a nivel de las juntas que, al no trabajar en compresión (en las fabricaciones usuales), son sectores de intercambios energéticos privilegiados. El modularidad buscada por los arquitectos en salas de conferencias, congresos o reuniones está acompañada por la aplicación de elementos corredizos. Aquí, la adaptación de piezas creadas para los transportes ferroviarios aportó soluciones pertinentes desde el punto de vista técnico y económico, teniendo en cuenta que en ese sector industrial los productos homologados gozan de caracterizaciones técnicas avanzadas. La Figura IIIB ilustra ese tipo de solución indirecta. Las puertas corredizas se instalan en cavidades que reciben juntas equipadas de perfiles elásticos y lengüetas de contacto. En las extremidades la hermeticidad esta lograda por los contactos múltiples (encastrado) en piezas deformables de geometría complementaria.

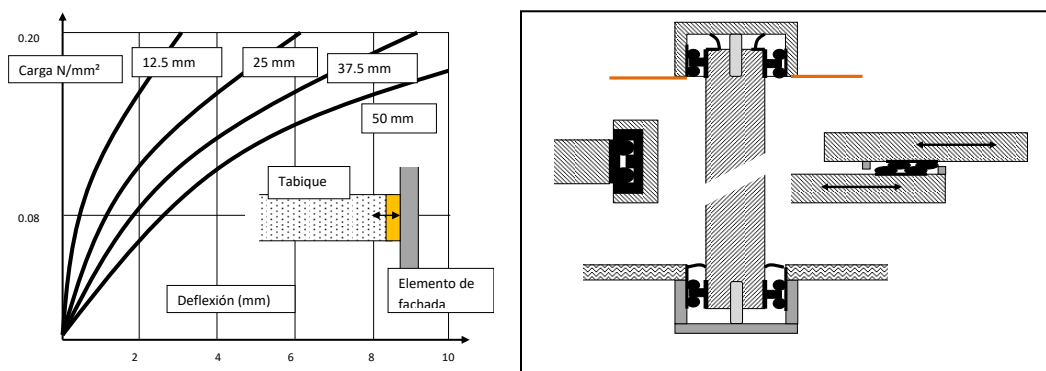


Figura III.- Soluciones a problemas de la construcción encontrados en elastómeros de sectores industriales diferentes.

A) Extremidad de tabique deformable y hermética y relación deflexión / carga por el elastómero según los espesores disponibles

B) Obtención de hermeticidad en puertas corredizas.

Juntas de expansión

Constructores e industriales están confrontados al clásico problema de instalación de juntas en cavidades existentes. Aquí, o la instalación es particularmente complicada (o imposible) o la junta no estará en contacto con las superficies limitando la cavidad. El problema se presenta tanto en las condiciones estructurales, por ejemplo, entre estructuras de hormigón, como en la carpintería metálica donde los perfiles de aluminio incorporan estructuras internas complejas. Una solución que integra varios conceptos innovadores y pertinentes es la utilización de juntas de expansión. El material constitutivo presenta la capacidad de aumentar sensiblemente su volumen por una expansión en un sentido transversal. La transformación es provocada por la acción de un agente externo, por ejemplo, la humedad o la temperatura sobre la materia. En el caso de perfiles de aluminio las juntas introducidas en las cavidades son sometidas a la acción de la temperatura, que es necesaria al laqueado de las superficies externas. La materia se expande entonces para ocupar la totalidad de los volúmenes a tratar con un perfecto contacto con la superficie interna de las cavidades. El tratamiento tiene como consecuencia el bloqueo de fenómenos de convección que disminuyen sensiblemente la capacidad de aislación térmica del sistema aluminio / vidrio.

En las aplicaciones estructurales primarias los objetivos de hermeticidad y de protección con respecto al agua y otros agentes atmosféricos justifican el empleo de juntas de expansión activadas por el contacto con el aire y el agua o por humidificación. Productos eficaces existen y son generalmente acompañados por documentaciones técnicas que describen los comportamientos

físicos y químicos de los mismos. Esos datos, que una vez más, describen elementos sofisticados (muy lejos de la imagen de un “cordón de goma”) deben estar seriamente considerados en el marco de un proyecto de construcción, como los factores siguientes:

Masa volúmica aparente – resistencia a la compresión – compresión remanente – alargamiento a la ruptura – reacción de dimensiones a la compresión – hermeticidad a la lluvia normalizada – permeabilidad al aire – resistencia a la radiación UV – reacción al fuego – resistencia a la difusión de vapor de agua – conductividad térmica – transparencia acústica – durabilidad – compatibilidad con los materiales de construcción

Esta tecnología es particularmente interesante en las construcciones modulares prefabricadas con sus numerosas interfaces estructurales, que constituyen una tendencia fuerte en la industria de la construcción actual, por ejemplo, obras de gran valor arquitectónico realizadas a base de containers.

3.3. Elastómeros en placas – tratamiento de superficies. - Elastómeros presentando propiedades específicas sirven al desacoplamiento mecánico entre estructuras limitadas por superficies más o menos grandes. En disposición vertical, elastómeros en placas cumplen la función de aislación vibratoria con respecto a solicitaciones capaces de provocar desplazamientos de estructuras enterradas o contiguas a otras construcciones. Aparte los movimientos sísmicos, las solicitaciones perturbadoras son generalmente debidas a la circulación pesada, trenes o transportes subterráneos. Los elementos elásticos que integran las funciones de resorte y amortiguador (propiedad intrínseca de los elastómeros) instalados horizontalmente constituyen sistemas eficaces de aislación vibratoria de construcciones con respecto a agresiones mecánicas externas y como sistemas de aislación vibro-acústica interna, especialmente en la atenuación de las consecuencias de impactos sobre los pisos duros. Sin entrar en el estudio del tema del tratamiento vibro – acústico de construcciones que es una disciplina técnica en sí, más abajo se recordarán ciertos conceptos en relación con el comportamiento mecánico de apoyos elastoméricos. Se insiste sobre la especificidad de los productos disponibles y la necesaria adecuación entre el producto industrial, los métodos de aplicación y el problema local que se presenta al ingeniero responsable del proyecto.

Un resumen esquemático de las situaciones prácticas donde la aplicación de elementos elásticos planos es pertinente se presenta en la Figura IV.

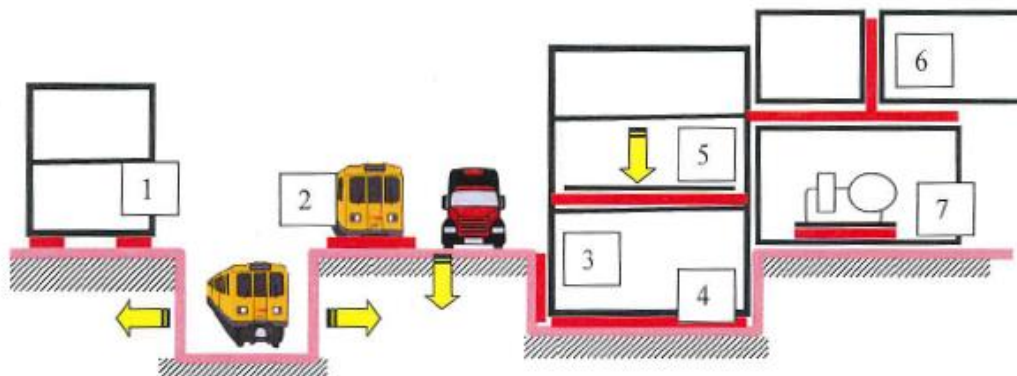


Figura IV. Situaciones de aplicación de elastómeros en placas frente a perturbaciones mecánicas (transportes, impactos, equipamientos)

1. *Apoyos parciales de estructuras completas.*
2. *Suspensión de vías ferroviarias (tratamiento a nivel de la fuente de perturbaciones).*
3. *Desacoplamiento vertical.*
4. *Apoyos en superficie total de estructuras.*
5. *SopORTE de losas flotantes (control de impactos).*
6. *Desacoplamiento de módulos en construcciones prefabricadas.*
7. *Suspensión de equipamientos mecánicos en losas de repartición de cargas.*

La definición de placas elastómeras que deben soportar construcciones completas o módulos constructivos, vías férreas o aún losas de repartición de cargas en instalaciones técnicas exige el conocimiento detallado del comportamiento físico del material, de su resistencia a agentes externos y de la conservación de sus propiedades en extensiones de tiempo en relación con la vida de estructuras básicas. Como ejemplo representativo de agentes que pueden afectar la materia se encuentran los hidrocarburos, donde su presencia (muy común en locales industriales) determina el tipo de elastómero a utilizar, en este caso nitrilos. Los productos industriales deben incluir siempre documentaciones técnicas expresando los resultados según normalizaciones nacionales e internacionales, así como las homologaciones y certificaciones necesarias producidas por organismos reconocidos.

Se presentará más abajo un ejemplo de soporte elástico (poliuretano) capaz de cubrir grandes superficies. La lectura de las curvas de caracterización funcional utilizadas en la previsión del comportamiento físico (Figuras V, VIA, VIB y VIC) permite apreciar la capacidad de trabajar bajo cargas importantes, en el dominio de las utilizaciones estructurales indicadas. La responsabilidad del autor del proyecto reposa sobre la correspondencia entre el comportamiento del producto y las condiciones físicas de la construcción y sobre la conservación en el tiempo del comportamiento anunciado.

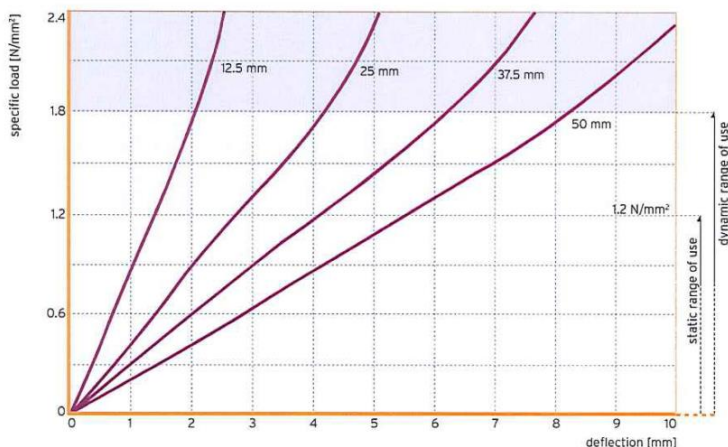


Figura V.- Comportamiento de un apoyo elástico poliuretano a gran capacidad de carga. Curvas de deflexión con respecto a la carga para un factor de forma = 3. Las curvas corresponden a espesores de una gama industrial [9].

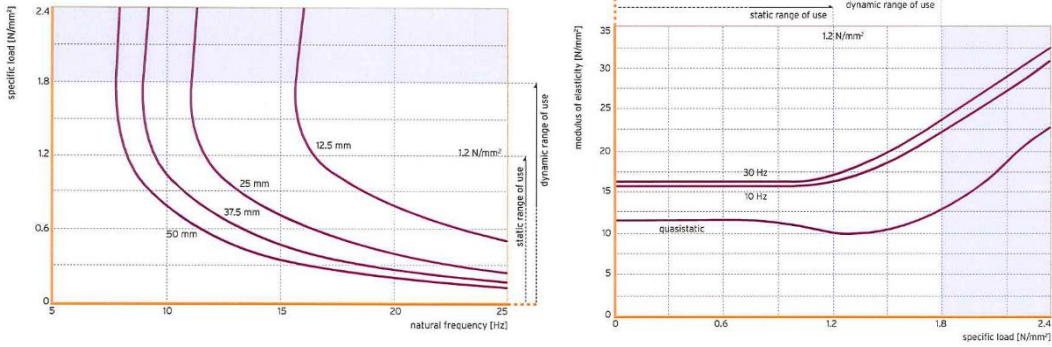


Figura VIA.- Frecuencia propia para diferentes espesores de la misma referencia industrial en función de la carga.

Figura VIB.- Módulo de elasticidad con respecto a la carga. El módulo de elasticidad dinámico resulta de una excitación sinusoidal $v = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$

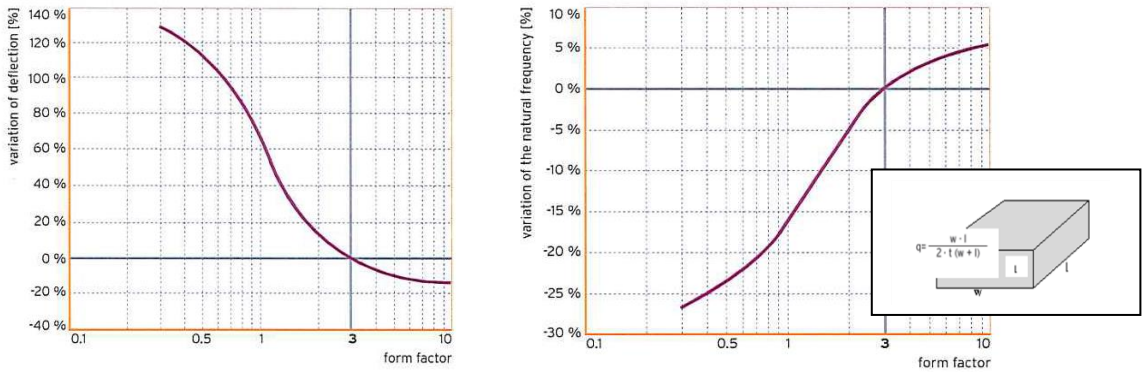


Figura VI C.- Incidencia del factor de forma q en el funcionamiento del elastómero (deflexión y frecuencia propia).

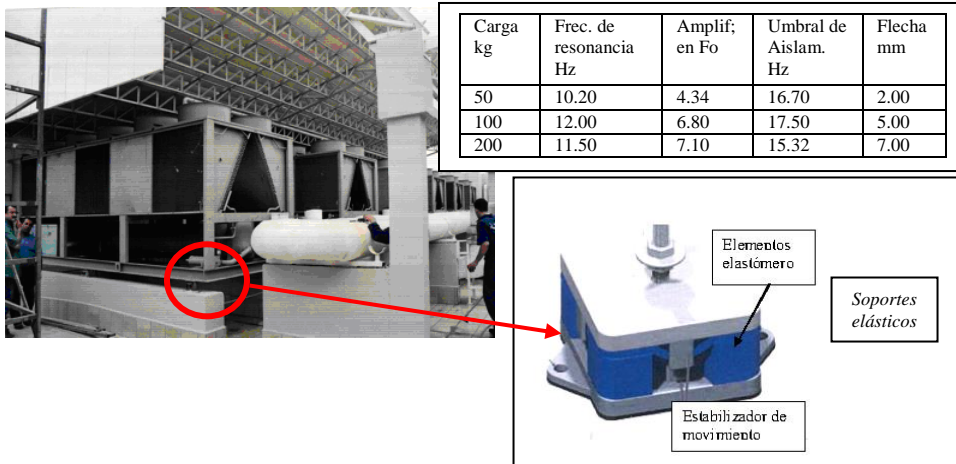


Figura VII.- Ejemplo de tratamiento acústico global (protección de los ocupantes de un hotel y protección del medio ambiente) de equipos de condicionamiento de aire instalados en terraza. Documento Alctra Middle East.

Los equipamientos mecánicos, electromecánicos y aéraulicos son cada vez más numerosos en las construcciones modernas y muchas veces esos dispositivos destinados al confort de los ocupantes son fuentes de incomodidad y molestias importantes (y desvalorización de los inmuebles) (Figura VII). Al mismo tiempo, los ejemplos de suspensiones mal dimensionadas o con vicios de instalación son innumerables. La extrema diversidad de medios de control a nivel de la materia (nuestro tema central) y la diversidad de sollicitaciones mecánicas posibles confirma la necesidad de recordar que, en relación con las propiedades físicas de los elastómeros, una aplicación práctica dada puede ser responsable de una ineficacia funcional o inclusive de una agravación de la reacción vibratoria de un sistema mecánico [10]. La explicación grafica siguiente sostiene la afirmación precedente. (Figura VIII)

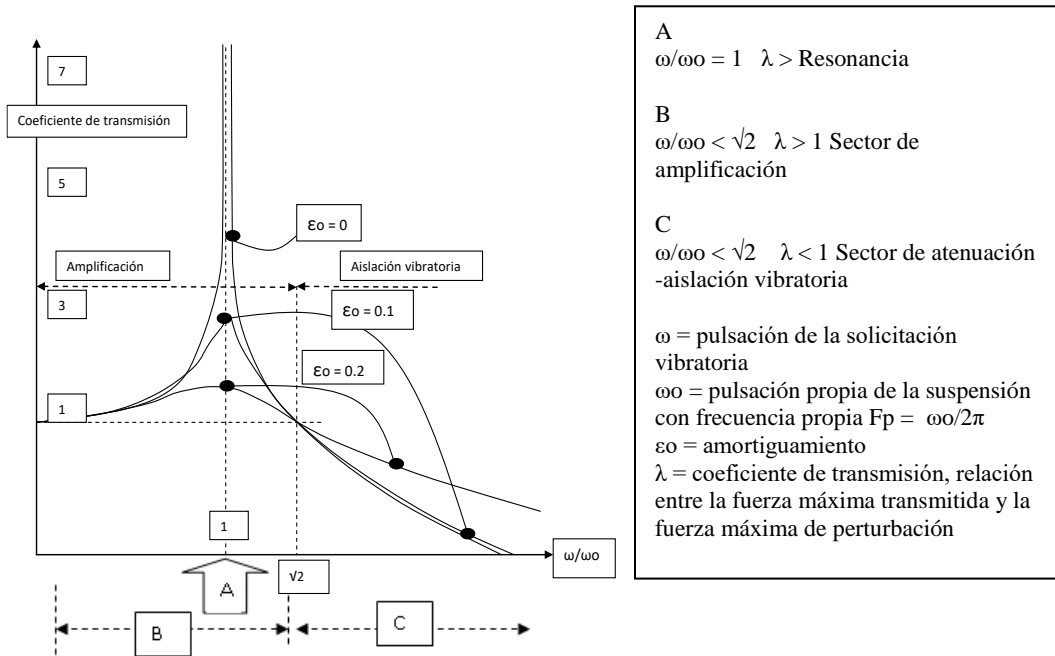


Figura VIII.- Transmisibilidad de un sistema suspendido integrando un elastómero con respecto a la relación entre la frecuencia de excitación y la frecuencia propia.

Se observa que, según la posición de los valores en las curvas, el conjunto suspendido puede aproximarse a un sistema rígido (la perturbación es transmitida integralmente) y puede llegarse a la amplificación del efecto vibratorio derivado de la aparición de sobre- oscilaciones.

Los materiales elastómeros que se presentan en superficies más o menos importantes en forma de placas o rollos pueden desempeñar otras funciones que las estudiadas en los puntos anteriores, como el acondicionamiento térmico y acústico. Este tipo de aplicación con sus múltiples facetas será el tema de otra presentación conceptual y aplicativa.

4. Empleo de materia reciclada – visión medioambiental global. - El concepto de valor medioambiental global se aplica cada vez con más intensidad en el sector de la construcción. Significa que más allá de la consideración del impacto energético o del valor ambiental y sanitario de los materiales (el amianto es un caso extremo) las disposiciones administrativas o los términos contractuales regulan la vida completa de la construcción, desde la fabricación de los materiales hasta la futura “deconstrucción” de las obras. Métodos de cálculo y útiles informatizados son disponibles hoy para evaluar objetivamente la situación, como el criterio ACV – Análisis del Ciclo

de Vida de las construcciones [11]. Las piezas en elastómero en la construcción (con más peso aún en el automóvil) tienen una incidencia desfavorable en el balance medioambiental global dado que el proceso de vulcanización fija la estructura molecular. Pero, al mismo tiempo, la construcción representa un campo de aplicación considerable de los elastómeros reciclados proviniendo fundamentalmente de las cantidades enormes de neumáticos usados. Naturalmente, los procesos de transformación de neumáticos (u otros productos a base de elastómeros, como los sistemas de hermeticidad de carrocerías) deben desembocar sobre una materia prima más económica que la propuesta por la industria tradicional. Se habla del costo del proceso (logística incluida) porque el costo de base de los neumáticos es generalmente negativo. Tres caminos principales se identifican en los procesos de reciclado: (a) la obtención de un granulado de la materia de origen y la aglomeración por la incorporación de un aglutinante; (b) la extracción de un componente de base útil, el negro de carbono (por pirolisis) y finalmente, (c) la devulcanización del elastómero con el fin de recuperar la materia de origen y recomenzar el ciclo industrial.

Antes de analizar los métodos mencionados, es necesario subrayar que la estructura y la composición de un neumático son de gran complejidad y que existen diferencias substanciales entre los neumáticos de automóvil, los destinados a camiones y los agrícolas e industriales. La composición es bastante uniforme cuando se trata de grandes constructores internacionales, pero diferencias importantes aparecen en los productos de industriales secundarios. Todo proceso de reciclado debe comenzar entonces por la separación más completa posible de los componentes de esta estructura de gran complejidad y alta tecnología.

El primer método de recuperación de productos derivados de los neumáticos usados es el más simple y económico. Se trata de separar (los medios industriales no serán descriptos) los componentes principales con fin de disponer de la materia “caucho” lo más homogénea posible. Equipamientos apropiados proceden luego al fraccionamiento de la materia para llegar a acumular granos de dimensiones adaptadas a la utilización final. La granulación puede hacerse a temperatura ambiente o puede recibir una asistencia térmica. La crio trituración es particularmente eficaz en los procesos de micronización donde el objetivo es obtener partículas de dimensiones menores de 500 μm . Con este tipo de materia, con granos libres o aglomerados con la ayuda de diferentes aditivos se producen materiales utilizados en la construcción y actividades afines. El granulado de caucho (con su estructura molecular de origen) es visible en los revestimientos de caminos y carreteras, en revestimientos para la práctica de deportes, en el césped sintético y en productos más elaborados destinados a ciertas funciones descritas en puntos anteriores. El caso del césped sintético merece una atención especial. De gran difusión últimamente, gracias a las ventajas en mantenimiento y costo global, esta técnica reemplaza los céspedes naturales en terrenos deportivos de muchos países. El granulado constituye un sustrato elástico asociado a las hebras plásticas que simulan el césped. Estas están fijadas a un soporte continuo y los granos de caucho se encuentran libres, entre las hebras, en contacto con el medio ambiente. Se constata que en ciertas condiciones la superficie ocupada por el césped sintético se transforma en radiador térmico (los deportistas lo perciben directamente) y se señalan también emanaciones odorantes que son, por lo menos, molestas para los habitantes próximos. Estas observaciones tienen que tenerse en cuenta, sobre todo cuando hablamos de valorización ambiental del producto. Además, existen observadores que subrayan un posible efecto patógeno del granulado libre depositado en grandes cantidades en contacto directo con la atmosfera y, por definición, sin la consolidación derivada de la inclusión de aglutinantes y sin tratamientos de eliminación de componentes volátiles presentes en la materia de origen. Estudios detallados e independientes son necesarios para identificar los orígenes del problema e imaginar soluciones.

Ciertos ejemplos representativos de productos elaborados y respondiendo a las normas y reglamentaciones constructivas y ambientales están presentados en la figura IX.

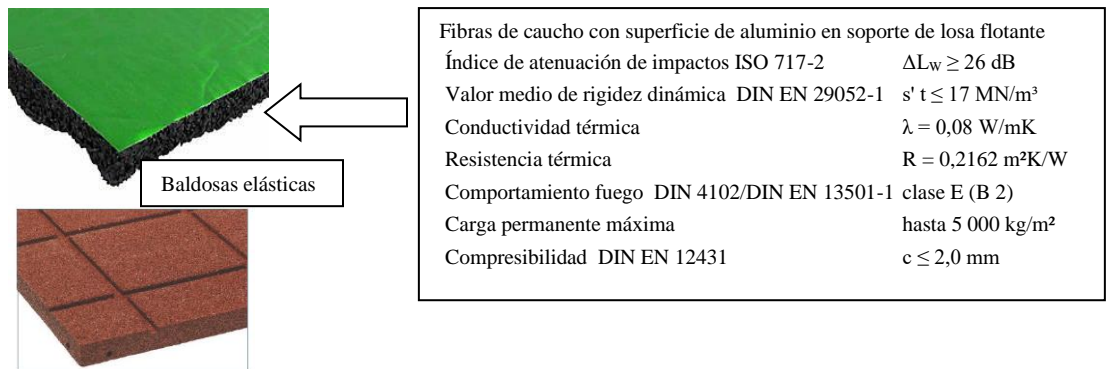


Figura IX.- Productos gozando de homologaciones técnicas fabricados en fibras de caucho y enrobado poliuretano [12].

El segundo método citado se basa sobre el fenómeno de pirolisis. La pirolisis se define como la descomposición de un producto carbonado por efecto del calor en ausencia de oxígeno. En nuestra orientación de reciclado de neumáticos con un objetivo de aplicación en la construcción el proceso permite la extracción (además de metales) de aceite de pirolisis, de gas y de negro de carbono. Este último podría (estudios están en curso) ser utilizado en la producción de mezclas elastómeras que pueden dar lugar a la creación de aplicaciones en la construcción. Se considera que esta posibilidad está todavía condicionada a estudios profundizados sobre la equivalencia entre el negro de carbono resultante del proceso de pirolisis y el producto industrial obtenido por las vías tradicionales.

El tercer método, la devulcanización [13] es conceptualmente el más prometedor porque tiene como objetivo la ruptura de la “trama” construida en la vulcanización para reencontrar el elastómero de base salido de la operación de mezclado de sus ingredientes. Ese elastómero será utilizado como tal en la fabricación de todos los productos que lo puedan integrar. Estudios importantes están en curso para probar la pertinencia industrial del método, para verificar el comportamiento de la materia resultante y para integrar el producto en aplicaciones en la construcción, dado que este sector industrial es capaz de absorber los volúmenes que puede proporcionar el “yacimientos” de origen que son las montañas de neumáticos usados. La ruptura de los lazos que permiten la reticulación del caucho puede materializarse con la ayuda de diferentes procedimientos: termo-mecánicos – ultrasonoros – termo-químicos / mecano-químicos – biológicos – acción de medios supercríticos.

El proceso de devulcanización es difícilmente completo (ruptura de todos los enlaces), entonces para apreciar el resultado del trabajo de ruptura de enlaces moleculares se debe recurrir al concepto de densidad de reticulación, definida en forma de energía de los lazos de reticulación por unidad de volumen del polímero. Aunque teóricamente por los casos de vulcanización con azufre la devulcanización sería obtenida aplicando un nivel de energía dado y controlado, en la práctica la repartición de la energía en el volumen de materia es desigual, lo que trae como consecuencia que los lazos químicos son fracturados solo donde la energía introducida es mayor que la energía de cohesión (más en detalle se diría que los lazos C-C pueden romperse, mientras que lazos C-S o S-S pueden perdurar según la forma de inyección de la energía en la materia). En el resultado final esta situación se traduce como una degradación de las propiedades mecánicas del polímero con respecto a la materia virgen. La eficacia del método de devulcanización se apreciará entonces por la capacidad de conservación de las propiedades de origen. (Tabla II)

Enlaces	Energía kJ/mol
C-S	310
S-S	270
C-C	370

Tabla II.- Energía asociada a enlaces químicos

El sujeto central de este artículo son las aplicaciones en la construcción y en este punto final, interesa la capacidad de reutilización de elastómeros reciclados en esta industria. En esta óptica se retiene un procedimiento llevado ahora a una escala industrial por Phenix Technologies en Francia [14], orientación en la que trabaja el autor. La materia de base, vulcanizada, es primeramente fraccionada para obtener un granulado más o menos fino según la situación físico-química y los objetivos de transformación. El granulado es sometido a un proceso de extrusión donde la materia es sujeta a presiones y temperaturas reguladas según las condiciones de trabajo y el estado de la materia. En ciertas condiciones es necesario asociar un tratamiento complementario por acción de gas carbónico supercrítico, pero no se incluye ningún agente químico que relativizaría el valor medio ambiental del ciclo de recuperación de materia. Actualmente el método es operacional para los elastómeros siguientes: NR, BR, SBR, IIR, EPDM, GTR (ver las denominaciones usuales más arriba). En resumen, el procedimiento incluye las etapas siguientes: selección del yacimiento de materia prima, transporte, la granulación, la extrusión con o sin incorporación de CO₂ supercrítico, acondicionamiento de la materia devulcanizada.

Un fluido supercrítico es aquel que está sometido a una temperatura superior a su temperatura crítica (T_c) y a una presión superior a su presión crítica (P_c), por encima de las cuales no puede haber una licuefacción al elevar la presión o vaporización al aumentar la temperatura. El punto crítico es característico de cada sustancia, por el CO₂ los valores son: T_c °C = 31.1 --- P_c MPa = 7.20 --- ρ_c g/mL = 0.47. En general, se puede afirmar que los fluidos supercríticos tienen una densidad próxima de aquella de los líquidos, una viscosidad próxima de los gases, una difusividad más elevada que los líquidos y una muy baja tensión de superficie.

El dióxido de carbono, empleado en el proceso, presenta coordenadas críticas que se obtienen fácilmente sin toxicidad ni inflamabilidad. Su disolución en un polímero modifica las propiedades intrínsecas en particular la temperatura característica, la viscosidad y la tensión interfacial. La acción combinada con la temperatura y los esfuerzos en corte en la extrusora permite llegar a las condiciones de ruptura de los enlaces de reticulación de una forma fiable y económica.

La Figura X muestra un ejemplo de resultado de ensayo de laboratorio integrando un elastómero obtenido en el proceso de reciclado. Para ciertas aplicaciones (con respecto a ciertos elastómeros) la materia reciclada puede transformarse directamente, mientras que en otros casos ésta debe incorporar una proporción dada de materia virgen (figura X) [14].

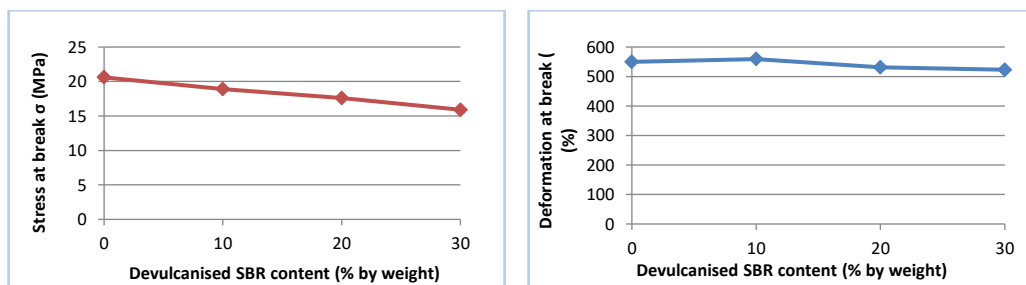


Figura X.- Resultados en elongación y deformación a la ruptura. El producto industrial puede integrar diferentes proporciones de elastómero reciclado.

Actualmente, elastómeros reciclados sobre la base de la devulcanización por fraccionamiento + extrusión + (según condiciones) CO₂ supercrítico toman la forma de soportes estructurales, films de impermeabilización, tratamiento de pasajes a nivel ferroviarios y cargas en matrices elastómeras. Numerosas otras aplicaciones están en desarrollo, en el marco de estudios de validación rigurosos.

5. Conclusiones.- Se ha mostrado que las propiedades intrínsecas de los elastómeros y las funciones que pueden desempeñar asociaciones específicas de elastómeros diferentes o elastómeros con metales o armaduras o inclusiones orgánicas son capaces de aportar soluciones a numerosos problemas encontrados en la construcción y obras públicas. Las nuevas tendencias arquitectónicas y constructivas generadoras de interfaces estructurales y de exigencias de confort y seguridad crecientes son campos de aplicación privilegiados de los resultados de investigación y desarrollo en el sector de los elastómeros, intersección de disciplinas físicas, químicas y de las tecnologías de procedimientos industriales. Esta materia extraordinariamente multiforme es capaz también de jugar un papel fundamental en el trabajo global de la optimización energética. Habiendo llegado al tema medio ambiental, la industria de la construcción es un terreno de valorización de productos reciclados realmente eficaz, puesto que puede absorber grandes cantidades de desechos que terminarían, en el mejor de los casos, en incineración.

Finalmente, se hace hincapié en la necesidad de comprensión profundizada de los elastómeros y sus aplicaciones por parte de los responsables de proyectos en la construcción dado que la complejidad estructural y de comportamiento de la materia y de los productos derivados puede estar en la base de aplicaciones no optimizadas o inclusive disfuncionantes.

6. Bibliografía

- [1] Alcuri, G. Control de procesos y caracterización de situaciones industriales por métodos globalizantes. Memoria Investigaciones en Ingeniería, núm. 11 (2013) 43. ISSN 2301-1092 • ISSN (en línea) 2301-1106
- [2] Cheymol, André, Mise en œuvre des élastomères T.1. Hermes – Lavoisier, Paris. 322 pp. 2006.
- [3] Mark, J.E., Physical Properties of Polymers Handbook. Second Edition. Springer-Verlag New York, 2007.
- [4] Cheymol, A., Limper, A. Mise en œuvre de produits secs. Mise en œuvre des élastomères, Hermes-Lavoisier T2 17-178. 2006.
- [5] Freakley, P. K. Rubber Product Manufacturing Systems. In Rubber Processing and Production Organisation. Springer, 443 pp. 1985.
- [6] Syndicat National du caoutchouc et des Elastomères (France), Tableau de bord matières premières, Paris 2018.
- [7] Ribeiro, C., Alcuri, G. ; Poggi, S. Etude de l'amortissement vitre / joint. Rapport Altra. 178pp 2005..
- [8] Ribeiro, C., Alcuri, Analyse paramétrique avancée de systèmes vitre / joint. Rapport Altra.156pp 2006.
- [9] Getzner. Sylomer Product datasheet. 4pp. 2018.
- [10] Harris, J.A., Design Principles for Vibration Isolation and Damping with Elastomers Including Nonlinearity. Rubber Chemistry and Technology: Vol. 62, No. 3, pp. 515-528. 1989
- [11] Direction régionale Île-de-France (Analyse du Cycle de Vie 30pp 2017) + ANR Benefis Rapport final N° 20146. 237 pp.
- [12] BSW Regupol. Documentation technique. 27pp 2018.
- [13] Danielli Bastos de Sousa, F. Devulcanization of Elastomers and Applications 10, 209-230. In Elastomers, Nevin Cankaya Ed. IntechOpen. 2017.
- [14] Gruffat, M. Application d'élastomères recyclés pour le BTP. M. Journée AXE "Elastomères et BTP" CSTB Nantes. 2018