

Paper CA1102_Lacueva_O - PROCESOS CRÍTICOS PARA LA SELECCIÓN DE MATERIALES Y PRODUCCIÓN DE SISTEMAS DE DEFENSA MARINOS

Lacueva Oyarzabal, Daniel; Rodero Aristoy, Eduardo.
SHIBATAFENDERTEAM GROUP

Email: d.lacueva@shibata-fender.team

ABSTRACT: La obtención de un sistema de defensa marino de alto rendimiento y calidad se considera una labor que requiere de una experiencia y conocimientos solo al alcance de un limitado número de fabricantes expertos reconocidos a nivel mundial. Dichos productos requieren del ojo crítico y la experiencia que solo los fabricantes veteranos ofrecen, valiéndose de su conocimiento de los materiales y los procesos de producción. Una selección tanto de las materias primas y aditivos como de sus cantidades determina en gran medida las propiedades físicas y mecánicas que potencialmente tendrá el producto final. Estas propiedades físicas están directamente relacionadas con el desempeño y durabilidad de las defensas. Las guías, recomendaciones y normativas deben garantizar la libertad de todos los fabricantes para proponer sus propios compuestos siempre que estos cumplan con las propiedades físicas requeridas, evitando la imposición de estándares que actúen en detrimento del avance en este campo. Los compuestos de caucho deben ser diseñados a medida para cada proyecto, estableciéndose en función de la demanda de prestaciones requeridas. La proporción de aditivos en el compuesto, como por ejemplo el negro de carbono, deben ser determinados por expertos en función de muchos parámetros: composición de polímero, tamaño y calidad de grano, grado de caucho requerido, etc. Otros aditivos como el carbonato cálcico pueden conseguir correctamente empleados mejoras en la trabajabilidad o incluso incrementos en las prestaciones del material si son empleados correctamente. Posteriormente, entran en juego los métodos de mezclado, con los que obtener la materia homogeneizada y lista para la producción, el procedimiento considerado será fundamental para la preparación del material en la entrada de dos procesos críticos para la obtención del producto acabado: producción y vulcanizado. Durante la producción, la materia informe recibe un primer conformado que permite atisbar el producto deseado, si bien todavía no dispone de las propiedades técnicas. En el vulcanizado del material, la materia se reestructura y permite la obtención de propiedades físicas y mecánicas extraordinarias. Finalmente, durante el proceso de fabricación de las piezas los parámetros de presión, temperatura y tiempo serán determinantes para conseguir las propiedades deseadas en las defensas de caucho. La excelente ejecución de estos procesos es la clave para prevenir los defectos más habituales en la producción de las defensas, capacidad al alcance de un reducido grupo de fabricantes que, en base a sus años de experiencia en productos de caucho, han desarrollado y suministrado los actuales sistemas de defensa en operación de los puertos internacionales de mayor prestigio.

1 INTRODUCCIÓN

El mundo de los sistemas de defensa ha evolucionado significativamente a lo largo de las últimas décadas. No obstante, el conocimiento técnico asimilado por los usuarios finales continúa requiriendo de la visión de expertos y profesionales para el correcto diseño y la adecuada selección de las defensas marítimas requeridas.

A este respecto, miembros de prestigio internacional en el mundo de las defensas han hecho suyo el cometido de ofrecer una visión imparcial y clara de los distintos materiales, procesos y tests disponibles que garantizan la obtención de productos de calidad y gran durabilidad. Fruto de este esfuerzo es la serie de Boletines técnicos SFT desarrollada por ShibataFenderTeam Group para explorar los pasos críticos de la composición, mezclado y producción y curado de las unidades de caucho.

Seguridad, fiabilidad, durabilidad: los requisitos de rendimiento de una defensa se reducen a estos tres aspectos. Las defensas están pensadas para crear un entorno seguro para las embarcaciones y los pasajeros, mientras se protege las infraestructuras portuarias y a todo el personal que trabaja en ellas, de forma fiable durante la vida útil del diseño e incluso más tarde. Este es el ideal que persiguen los puertos y los operadores portuarios.

En el presente documento, se presentarán los conocimientos actuales en estas áreas de conocimiento, así como sus principales connotaciones para el mundo de las defensas marítimas.

2. Desarrollo

2.1 Composición de los elementos de caucho

Existen normas y directrices internacionales que ofrecen una orientación sobre las propiedades físicas de las defensas de caucho, tales como PIANC2002, ASTM D2000, EAU 2004, ROM 2.0-11 (2012) o BS6349 (2014). Sin embargo, no existe ninguna norma internacional que especifique la composición química del compuesto de caucho utilizado en la fabricación de defensas de caucho. El motivo radica en que cada proyecto tiene sus propios requisitos que precisan composiciones de caucho personalizadas. Además, no todos los polímeros utilizados en la producción de defensas están disponibles por igual en todas las partes del mundo, lo que obliga a los fabricantes a ajustar sus compuestos de caucho en atención a ello.

En la fabricación de defensas, las propiedades físicas son el único indicador fiable de la calidad de un compuesto de caucho que está definido por las

normas internacionales. Los posibles componentes pueden ser los siguientes:

2.1.1 *Caucho natural*

Este material presenta un refuerzo natural, ofreciendo buenas propiedades físicas, así como una gran elongación y resiliencia. Del mismo modo, es conocido por su buena impermeabilidad. Sin embargo, presenta una gran pérdida de propiedades por envejecimiento del material, baja resistencia a los aceites, al agrietamiento por ozono y presencia de gran cantidad de impurezas debido a su carácter natural.

2.1.2 *Caucho sintético*

Dicho componente presenta una excelente resistencia a la abrasión, de igual forma que una buena estabilidad frente al envejecimiento, lo que complementa al caucho natural. Sin embargo, su resistencia a la tracción es inferior, del mismo modo que su resistencia al envejecimiento por calor y su procesabilidad son bajas.

Por lo tanto, los compuestos de caucho con caucho natural o SBR como único polímero tiene grandes limitaciones y en consecuencia la industria normalmente utiliza mezclas de caucho natural y SBR para aprovechar las ventajas de ambos.

Si en las especificaciones se establecen compuestos 100 % de caucho natural o SBR, los prescriptores deben asegurarse de que están familiarizados con las limitaciones de estos materiales, ya que un enfoque incorrecto podría poner en peligro un muelle. Además, se recomienda que las proporciones de aditivos y agentes de refuerzo como el negro de carbón (CB), carbonato cálcico (CC) y la sílice deben determinarlas especialistas con profundos conocimientos sobre el material, ya que la cantidad y el tamaño de las partículas influyen en gran medida en el compuesto, así como en su rendimiento y durabilidad.

En la Figura 1 se muestra el aumento de la resistencia a la tracción del compuesto al añadir CB hasta un punto de rotura. Tras alcanzar ese estadio crítico, la resistencia disminuye, al no quedar caucho suficiente para dispersar las partículas de CB, lo que significa que el compuesto está sobresaturado.

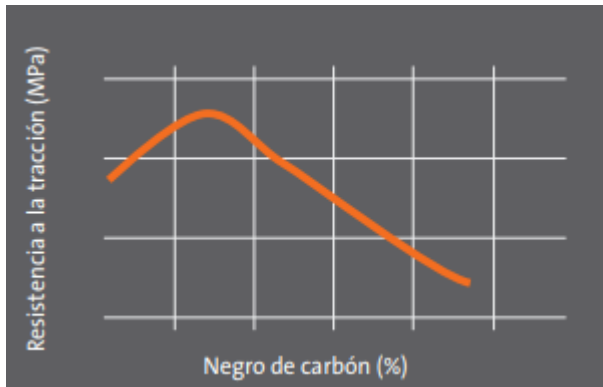


Figura 1: Influencia típica del CB en la resistencia a la tracción en compuestos de caucho natural

CALIDADES DEL CB	ISAF N220	HAF N330	FEF N550	GPF N660	SRF- LM
Tamaño medio de las partículas (nm)	22	28	45	66	78
Módulo a 300 % de caucho natural (MPa)	16.1	15.5	15.7	13.3	10.8
Módulo a 300% de SBR (MPa)	10.3	9.7	8.8	6	5.4

Tabla 1: Módulo vs. calidad de CB

El tamaño de las partículas de CB es otro factor de gran influencia en la producción de defensas y fuente de debates en la investigación. Se ha comprobado que cuanto mayor es el tamaño medio de las partículas de CB, menor es el módulo del compuesto de caucho, hecho que ha sido avalado por un gran número de estudios y pruebas.

Las pruebas realizadas por Shibata Industrial en Japón demuestran cómo cambia el módulo tanto en compuestos de solo caucho natural como de solo SBR con una dosis constante de CB dependiendo del tamaño de partícula de la carga. Al comparar los efectos del uso de CB con un tamaño promedio de partícula que iba de 22 nm a 78 nm (ver Tabla 1), el módulo del compuesto se redujo significativamente a medida que las partículas se hacían más grandes. A lo largo de todo el rango de medición, el módulo se redujo en aproximadamente un 30 % con compuestos 100 % de caucho natural y casi un 50 % con compuestos 100 % de SBR (ver Figura 2), una diferencia que prueba de forma indirecta un hecho que se discutió anteriormente: que el caucho natural requiere menos refuerzo adicional.

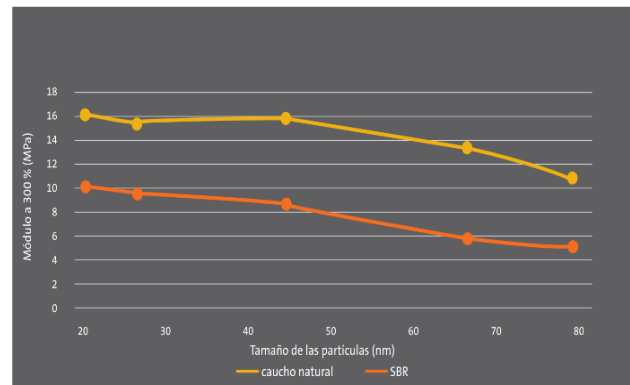


Figura 2: Módulo vs. tamaño de partícula de CB (CB 33 %)

Además del CB, los productos de caucho de alta calidad de la industria de las defensas emplean muchos otros aditivos, entre los cuales el carbonato cálcico (CC) es el más conocido. Existen dos tipos diferentes de CC: CC natural y CC sintético. Ambos se presentan en forma de polvo, aunque el tamaño de las partículas puede variar. Añadir CC mejora la procesabilidad y el comportamiento durante la vulcanización y los resultados de la deformación permanente por compresión. Además, la cantidad adecuada de CC sintético en tamaños de partícula pequeños tiene un claro efecto reforzante.

Al igual que con el CB, el origen, la calidad, la dispersión y, sobre todo, el tamaño de las partículas y la pureza del CC determinan la forma en que el aditivo influye en las propiedades físicas y la durabilidad del compuesto de caucho. Por lo tanto, no se puede generalizar que el CC solo tiene efectos negativos, pese a su consideración como alternativas de bajo coste frente a polímeros y de peores propiedades físicas. Si se usa correctamente, es útil para conferir a un compuesto propiedades físicas que cumplen o incluso superan las normas internacionales de testeo para defensas de caucho

A este respecto, conviene recordar que la composición final y propia de cada fabricante depende de la disponibilidad del polímero y de las características del producto requeridas por la defensa, por lo que afirmar de forma errónea que la composición química de un componente de caucho es el principal criterio de calidad de la defensa supone alterar los hechos de forma peligrosa. La composición química resulta importante en la producción de defensas, pero no es el único factor.

Como se ha mostrado anteriormente, son las propiedades físicas las que determinan en última instancia la calidad de una defensa.

2.2 Mezclado

A partir de lo discutido en el apartado anterior, los pasos de preparación y mezcla de las materias primas son cruciales para poder garantizar la calidad y durabilidad de los productos de caucho, siendo factores que afectan al rendimiento de las defensas marinas. Al examinar la interacción compleja entre los materiales y su procesamiento, y al presentar los diversos dispositivos de mezclado disponibles, queda claro hasta qué punto la producción de defensas de alta calidad depende de la pericia del fabricante. La elección y el funcionamiento adecuado del equipo están sujetos a una larga experiencia en esta parte importante de la fabricación de caucho y sus efectos en la calidad final de la defensa.

El procesamiento del caucho requiere de una incorporación y dispersión completas de los elementos que entran en la composición, tales como diferentes tipos de cauchos crudos, cargas y diversos productos químicos. Resulta vital prestar atención a cómo se unen estos elementos y conforman una defensa de alta calidad. La resistencia mecánica superior, la flexibilidad y la durabilidad son algunos de los requisitos que desempeñan un papel crucial en la vida de una defensa.

Existe una dependencia mutua entre todos los pasos de la fabricación de defensas, desde la elección de las materias primas y el equilibrio del diseño del compuesto, hasta la precisión del proceso de mezclado que configura el producto final predefinido. La amplia variedad de composiciones de compuestos de caucho requiere que el proceso de mezclado resuelva estas diferencias en términos de proceso y equipo. Teniendo en cuenta que no hay dos proyectos de defensa iguales, resulta esencial tratar de forma individualizada la producción de cada requerimiento.

Para obtener una distribución homogénea de los ingredientes de composición y una alta dispersión, el fabricante depende de un equipo de mezclado industrial de alto rendimiento. El siguiente procedimiento ilustra un proceso de mezclado de dos etapas que de ninguna manera pretende ser la única vía para producir una buena defensa. Sin embargo, muestra la correlación de los distintos pasos del proceso de mezclado y los factores que habrán de tenerse en cuenta para la calidad final de una defensa.

Es posible el mezclado en una sola etapa en mezcladores internos, así como el uso de un solo tipo de mezclador interno, aunque no constituye una solución ideal para todos los compuestos de caucho:

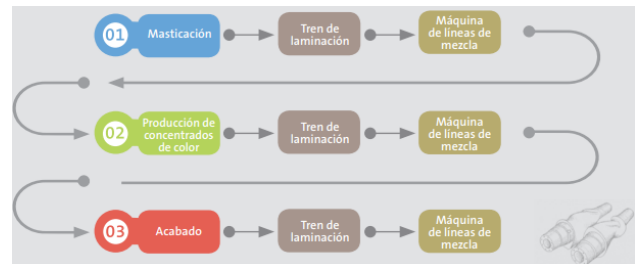


Figura 3: Proceso de mezclado – Pasos detallados

Dependiendo de la composición de la mezcla de caucho natural y sintético, los otros ingredientes de composición deberán equilibrarse de manera muy precisa para obtener las características óptimas de la defensa de caucho final. La interacción química y la influencia recíproca entre los elementos individuales debe ser considerada y ajustada para cada composición.

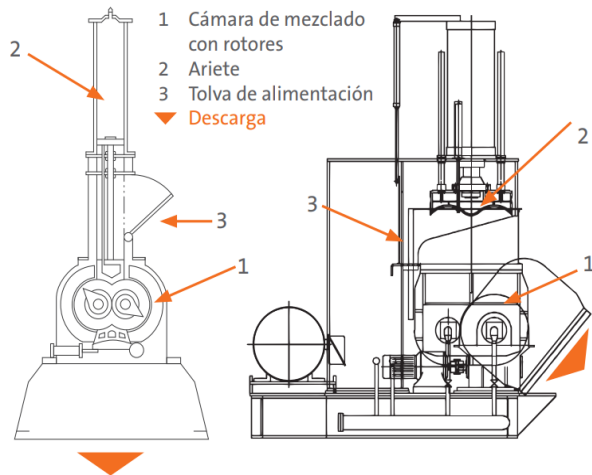
2.2.1 Masticación del caucho

El caucho natural en su forma original posee un alto peso molecular (que equivale a una alta viscosidad) y una estructura molecular desigual, una condición que complica la mezcla homogénea con caucho sintético, así como una dispersión uniforme con otros ingredientes. Por esta razón, se realiza la masticación mecánica. Durante el proceso de masticación mecánica, las fuerzas de cizallamiento de los rotores en un mezclador interno rompen la estructura molecular del caucho, acortan las cadenas moleculares largas y producen una alineación paralela de las moléculas. El resultado es un caucho de baja viscosidad con plasticidad y fluidez uniformes y, por lo tanto, pasa a ser una materia prima con propiedades de mezclado y procesabilidad ideales, con prometedoras oportunidades adicionales para la gestión de la calidad y la uniformidad del material.

2.2.2 Equipo de mezclado

Los mezcladores más comunes en la fabricación de caucho son el Banbury y el Kneader, ambos mezcladores internos, y el tren de laminación. La construcción de estos dos mezcladores internos es similar en lo que respecta a sus características mecánicas, mientras que cada máquina tiene sus preferencias para diferentes procedimientos, y se pueden utilizar de manera complementaria para optimizar el tiempo y la rentabilidad. Ambos mezcladores consisten básicamente en pares de rotores de giro opuesto, una cámara de mezclado,

un peso flotante (ariete) y una tolva de alimentación. Los dos mezcladores tienen diferentes mecanismos de salida de caucho: el caucho sale del Kneader directamente desde la cámara de mezclado, que se inclina hacia atrás para descargar el material. El Banbury tiene una puerta abatible, a través de la cual se deja caer el caucho en el tren de laminación.



Dibujo de un mezclador Banbury Dibujo de un mezclador Kneader

Figura 4: Banbury vs. Kneader

Contrariamente a la creencia popular del sector, un mezclador grande no está directamente vinculado con un proceso más eficiente o una alta calidad del resultado final: con polímeros térmicamente sensibles como CN y CEB, no se debe exceder de una cierta temperatura durante el proceso de mezclado.

La ventaja clave de los mezcladores más pequeños es una relación más favorable entre el volumen de cámara y la superficie de enfriamiento. Los sistemas de mezclado más pequeños tienen una relación de enfriamiento de superficie superior en comparación con los sistemas más grandes: el volumen aumenta al cubo, mientras que la superficie de enfriamiento aumenta al cuadrado. En consecuencia, la temperatura de mezclado siempre será considerablemente más alta en un mezclador más grande. Un mezclador más grande es económicamente beneficioso debido a sus mayores tasas de producción, pero, siguiendo el principio de la calidad como una prioridad, un mezclador de tamaño mediano debe ser la primera opción para anteponer la calidad a la cantidad.

La selección del mezclador adecuado para el paso de producción respectivo y su funcionamiento correcto requiere mucha experiencia; el uso de ambos mezcladores puede ser una gran ventaja.

2.2.3 Laminado

El caucho que se deja caer en el espacio entre los rodillos de molienda se mezcla una vez más con los rodillos de giro opuesto y las elevadas fuerzas de cizallamiento. Luego, se envuelve el rodillo delantero con caucho y se transforma en una lámina mediante los dos rodillos de molienda. Junto al tren de laminación se coloca la máquina de líneas de mezcla. Realiza cuatro pasos principales con un cortador giratorio al final de la línea (véase la figura 4). Primero, las láminas de caucho se estampan con el código del compuesto (concentrado de color y compuesto acabado únicamente) y se sumergen en un recipiente lleno de un agente antiadherente diluido que evita que las láminas de caucho sin curar se peguen entre sí. Las láminas de caucho se transfieren luego a una cámara de enfriamiento que disminuye rápidamente su temperatura y también ayuda a secar el agente antiadherente. Finalmente, el caucho se transfiere al cortador giratorio donde las láminas se cortan con la longitud deseada.

2.2.4 Concentración de color - aditivos

El proceso de mezclado de dos etapas comienza con la producción del concentrado de color: un paso crucial en el proceso de mezclado, preferiblemente realizado en el Banbury. Aquí es donde se mezclan todos los ingredientes de composición, excepto el agente vulcanizante. Se debe prestar especial atención a la secuencia de adición de ingredientes y a los tiempos de mezclado subsiguientes. Han de supervisarse con precisión varios parámetros en esta operación.

El sistema de pesaje automatizado y el controlador del proceso de mezclado automático del Banbury evitan errores humanos con respecto a la composición química del compuesto y los ajustes de mezclado. Si el mezclado es insuficiente en esta etapa, el negro de carbón no se dispersará homogéneamente, lo que afecta de modo negativo al compuesto final, requiriendo un control exhaustivo de la temperatura del proceso, la velocidad de este y el tiempo de mezcla.

2.2.5 Acabado

El azufre es el agente vulcanizante más común en las defensas de caucho. Se usa en combinación con otros productos químicos que aceleran la vulcanización y evitan las quemaduras, como el óxido de zinc y el ácido esteárico, entre otros. Si bien este paso es importante para la reticulación efectiva de las cadenas de polímeros del caucho (vulcanización), la adición y la mezcla completa de azufre aumentan la dureza final del caucho y las propiedades de elasticidad.

Después de añadir azufre, debe evitarse un aumento de temperatura con el fin de prevenir la vulcanización prematura. El Kneader es el dispositivo de mezcla preferido para el acabado porque, a diferencia del Banbury, el Kneader no suele exceder la temperatura crítica de vulcanización.

En última instancia, la coherencia de un proceso de múltiples capas, como la mezcla de caucho personalizada, depende en gran medida del control operativo en cada etapa de producción, un concepto sólido de gestión de calidad y, una vez más, la experiencia del fabricante. La selección del dispositivo de mezclado más adecuado para cada paso de producción de una gama de dispositivos disponibles y el profundo conocimiento del operador desempeñan un papel vital en la producción de una defensa que supere y cumpla los estándares internacionales de testeo. Las características del equipo de mezclado que son relevantes para la calidad final del compuesto incluyen la velocidad del rotor, la evolución de la temperatura y la relación entre la superficie de enfriamiento y el volumen de la cámara. Los mezcladores grandes pueden ser eficientes, aunque no necesariamente favorezcan la calidad del compuesto.

2.3 Producción y Curado

Considerados como dos de los procesos donde se reúnen las condiciones críticas para obtener un producto de caucho de calidad, la producción de las unidades, así como el proceso de curado de las mismas presentan una gran variedad de metodologías y consideraciones a tener en cuenta, en función del tipo de defensa o su tamaño, entre otros. Conviene tener presente que pueden existir varias posibilidades para la producción de un tipo y tamaño concreto de defensa, pero no todas ellas garantizan un producto final de calidad. Una vez más, la visión crítica y la experiencia de los profesionales son requeridas.

La producción puede ser definida como el proceso que transforma las láminas de caucho obtenidas en el mezclado en las formas finales de la defensa, bien sea sirviéndose de un mandril que se recubre de láminas, un extrusor o un molde cerrado, entre otros. Por otra parte, el curado es el proceso industrial que engloba la vulcanización del caucho, permitiendo su transformación de un comportamiento plástico a elástico y la obtención de sus propiedades físicas finales. Esto se consigue gracias a la evolución de la organización interna del caucho, que, para unos valores adecuados de presión, temperatura y tiempo, se estructura en una red entrecruzada de carácter tridimensional.

Es la labor de los fabricantes expertos garantizar y priorizar, a través de todos los procesos descritos anteriormente, la calidad final de las defensas y su durabilidad.

2.3.1 Presión, temperatura y tiempo

El control de estos tres parámetros resulta crucial para la obtención de productos caucho de calidad y duraderos.

2.3.1.1 Presión

Se debe realizar la consideración de las distintas presiones que interceden en el proceso: por un lado, se tiene la presión interna del mismo, presente en el interior de, si es utilizado, un molde presurizado que permitirá confinar el caucho y moldearlo de acuerdo con las necesidades de la defensa. Esta vendrá de la expansión térmica producida en dicho molde, que se verá comprimida por sus paredes.

En un segundo lugar, se dispone de un valor para la presión externa aplicada, que será la referencia empleada por el fabricante para considerar tanto la metodología como un rango óptimo de valores de aplicación para obtener el producto final.

Una presión interna deficiente tendrá por consecuencias la presencia de oquedades, la marca visual del flujo de caucho, una adhesión baja entre las placas internas de acero y el caucho y una delaminación de la mezcla inicial, todo ello comprometiendo la durabilidad del material. Para evitar esta clase de defectos, las presiones aplicables varían entre los 2 y 15 MPa, dependiendo del tamaño, la tipología de la defensa y el método de producción seleccionado.

2.3.1.2 Temperatura

Del mismo modo que para la presión, existen unos valores recomendados para la temperatura de las distintas operaciones. Para el caso de la producción esta se mantiene como recomendación a 90°C, mientras que para el curado suele oscilar entre 100 y 150°C. Una práctica arraigada en la industria es la reducción de los tiempos de curado a través de una mayor temperatura del proceso, lo cual no permite una correcta manipulación del producto y desemboca en la baja calidad de este.

Los defectos que pueden aparecer por una temperatura demasiado baja son una baja fluidez del caucho, imposibilitando el llenado del molde y el aumento consecuente de los tiempos de producción. Por otra parte, una temperatura demasiado elevada conduce al sobrecalentado del caucho, lo que implica una vulcanización

prematura y muestra superficies quemadas, lo que daña la integridad del producto.

El procedimiento más extendido para alcanzar resultados óptimos es el aumento escalonado de dichas temperaturas, para evitar sobrecalentar prematuramente el material.

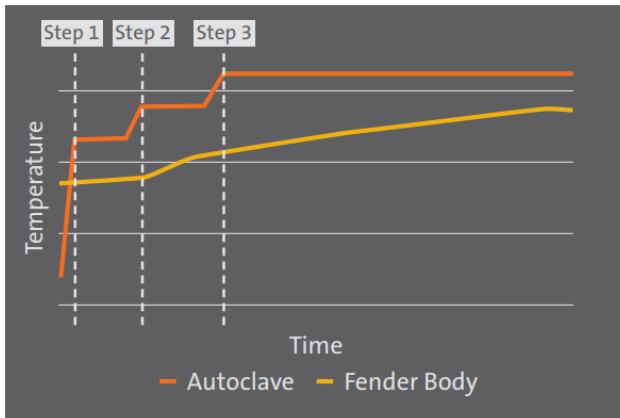


Figura 5: Aumento de temperatura en el curado

2.3.1.3 *Tiempo*

El curado debe desarrollarse en un plazo de tiempo determinado, que puede ser de un par de horas para las defensas más pequeñas hasta varios días para las defensas de mayor tamaño. El tiempo óptimo para cada defensa se determina en función de su composición y se predefine tras el proceso de mezclado.

Un tiempo de curado demasiado largo puede tener efectos similares a las bajas presiones en cuanto a la fuerza de adhesión baja entre las placas internas de acero y el caucho. No obstante, tiempos de curado demasiado cortos, incluso a la temperatura correcta, producirán defectos y productos de baja calidad, al no poder completarse el curado y por tanto no alcanzando el rendimiento especificado.

La presión, la temperatura y el tiempo son parámetros que deben ser ajustados individualmente para cada tipo de defensa, la dureza de caucho requerida para cada proyecto y su tamaño. Poder considerar los valores óptimos para estos parámetros está al alcance de solo una serie de fabricantes de reconocido prestigio y experiencia, siendo su incorrecta manipulación una de las mayores fuentes de errores y consecuencias irreparables.

2.3.2 *Producción*

El método de producción empleado depende de la tipología y el tamaño de la defensa a considerar. Como ya se ha mencionado, no todos los métodos disponibles garantizan la máxima calidad para todas las defensas, por lo que el conocimiento y

la experiencia del fabricante juegan un rol crucial para una correcta implementación de los procesos productivos.

Los métodos más frecuentes para defensas de alto rendimiento son la inserción de láminas o la inyección del caucho en moldes, pudiendo ser estos moldes convencionales o revestidos. El caso particular de estos últimos consiste en un segundo sistema de pared de molde, permitiendo que entre ambas circule un vapor que propicia el curado. La presión puede obtenerse atornillando las partes o instalándolos en una prensa durante el proceso.

Para el uso de moldes, se debe introducir la cantidad correcta de caucho en los mismos, dado que un relleno insuficiente propiciará la aparición de defectos como oquedades producidas por el aire que quede atrapado en la mezcla. Por el contrario, tratar de introducir demasiado material desembocará en un mayor coste y posibles riesgos para el equipo, al no poder permitir el cierre normal del molde.

Los métodos más conocidos para la producción de las defensas son los que se describirán a continuación.

2.3.2.1 *Inyección a altas presiones*

Permite el uso en todos los modelos de defensas, especialmente recomendable para los tipos troncocónicos, de celda o de elementos. Su control ajustable permite una mejor gestión del caucho introducido en el molde, permitiendo a su vez una mayor eficiencia a través de sus ciclos cortos y constantes a temperatura uniforme. Este proceso requiere de personal experto y equipos avanzados que permitan la instalación de procesos de control para la temperatura, la presión y el tiempo, garantizando la uniformidad de la velocidad del proceso. Es el método de mayor preferencia actualmente.

2.3.2.2 *Moldeo por compresión*

Es una de las metodologías más frecuentes, en la que láminas precalentadas se insertan en el molde y se encierran por su contraparte para una forma determinada. Se emplea típicamente para las defensas de arco o trapezoidales. Como aspecto determinante, la presión aplicable es limitada, así como una necesidad de introducir una mayor cantidad de caucho mientras el molde está abierto. Su eficacia y simplicidad lo destacan entre los métodos disponibles, pero dependiendo de la situación puede comprometer la calidad y la durabilidad del producto final.

2.3.2.3 Enrollado

Láminas de caucho rodean un mandril de acero y se van apilando las unas sobre las otras capas mientras la pieza central rota sobre su eje longitudinal. Es el proceso convencional para las defensas cilíndricas, no requiriendo moldes. Los valores de presión son más bajos, lo cual aumenta el riesgo de aparición de defectos. Este proceso no se puede aplicar para defensas que requieran de placas de acero embebidas en el caucho.

2.3.2.3 Extrusión

El caucho es forzado a pasar por una sección que le da forma y permite la producción de longitudes continuas de perfil constante. Este método se emplea a presiones considerablemente más bajas que en los procesos descritos anteriormente. Mayoritariamente, se emplea para la obtención de perfiles tipo D o rectangular, no permitiendo su uso para parte de los compuestos de caucho existentes ni para aquellas defensas que requieran de placas de acero embebidas en el caucho.

2.3.3 Curado

Los aditivos y el azufre requieren de la aplicación de calor para poder iniciar el proceso de vulcanización. A lo largo de este fenómeno, las cadenas de polímero existentes en el producto mezclado pasarán de estar aisladas a formar una red tridimensional con entrecruzamientos, lo que conferirá al caucho de sus propiedades físicas. Este factor es de gran interés, dado que la defensa se encuentra constantemente sometida a esfuerzos compuestos en todos los ejes, independientemente de su tipología, tamaño o geometría.

Como cualquier otro producto de caucho, sin la vulcanización las defensas no serían operativas. Es en este proceso donde obtendrán las propiedades que garantizarán una absorción de energía adecuada para los requerimientos del proyecto, así como el resto de las propiedades que garantizarán su durabilidad a lo largo de su vida útil.

A lo largo del curado, el caucho se expone a una fuente de calor, generalmente vapor, durante un tiempo predefinido para cada unidad. El equipo empleado se denomina vulcanizador o autoclave, ofreciendo un entorno estanco y ocasionalmente empleando otros equipos a modo de soporte. Para las defensas como las de tipo extruido o enrollado, el curado se realiza en la cámara, mientras que en el caso de defensas con molde se aplica una presión adicional con una prensa incorporada en el equipo. Con esto se cumple un

doble objetivo: una mayor presión para moldes cerrados con tornillos, mejorando la calidad final, y el cierre completo de moldes sin tornillos.

Para el caso particular de los moldes revestidos mencionado anteriormente, estos no precisan de vulcanizador dado que el curado se produce en el mismo molde, gracias a su sistema de doble pared. No obstante, con frecuencia se introducen en la cámara para aplicar una mayor presión externa, consiguiendo una mejor calidad del producto final.

Tal y como se ha destacado en los procesos de producción, los siguientes métodos de curado deben ser seleccionados en función de la tipología de las defensas y sus parámetros de curado, de forma individual para los requisitos de cada proyecto.

2.3.3.1 Autoclave para uso con moldes

Los moldes con caucho por vulcanizar se introducen en la cámara, donde reciben el tratamiento individualizado. Existen limitaciones por tamaño para las defensas más grandes. Presenta como ventajas la simplicidad a la hora de controlar el proceso, permitiendo que para la temperatura y presión adecuadas se obtengan productos de gran calidad con escasa variabilidad entre las muestras.

2.3.3.2 Autoclave para uso sin moldes

Las defensas enrolladas son cubiertas por tejidos de nylon húmedo y sometidas al proceso de curado, lo que contrae las tiras de nylon y aplica la presión necesaria a través de dicha tensión. Las defensas extruidas son igualmente curadas en la cámara. Al no emplearse equipos de presión, el valor de esta es comparativamente menor frente a otros métodos. Este aspecto se presenta como el mayor causante de los defectos aparecidos en sendas tipologías.

2.3.3.3 Moldes revestidos + prensa

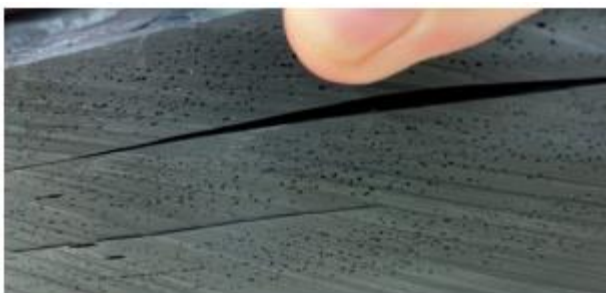
El vapor circula a través del sistema de doble pared, calentando el caucho hasta su temperatura óptima de curado. La temperatura y la presión de cada parte del molde se puede controlar de forma independiente, garantizando una distribución uniforme. Es el método recomendado para las defensas de mayor tamaño, aunque también se pueden emplear con defensas pequeñas.

2.3.3.4 Prensa por placas calientes

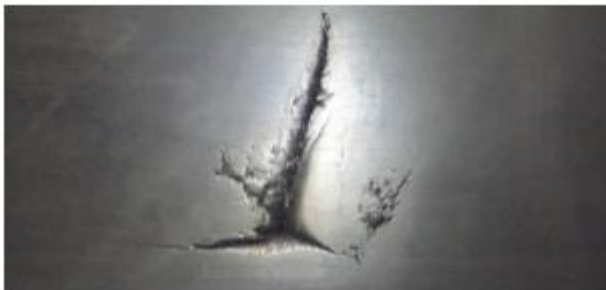
La prensa consiste en dos placas situadas arriba y abajo, que aplican una presión al tiempo que transfieren energía en forma de calor para la vulcanización. Al orientar el flujo de calor

verticalmente, el flujo en el eje horizontal no es ideal. Para moldes de grosor elevado la disipación de calor es insuficiente, siendo este el motivo por el que este método solo se aplique a defensas pequeñas.

Los procesos de producción y curado seleccionados para cada una de las distintas defensas determinarán la calidad y la durabilidad del material. Una selección incorrecta o un mal ajuste de los parámetros de presión, temperatura y tiempo resultará en la aparición inevitable de defectos, como pueden ser huecos, delaminaciones, defectos de superficie o una falta de adhesión entre las placas embebidas en el caucho.



Delamination



Surface defect



Insufficient bonding

Figura 5: Aumento de temperatura en el curado

3 Resultados

3.1 Composición

La Tabla 3 muestra de forma gráfica dos compuestos de caucho ensayados por TGA y prueba de propiedades físicas, denotando que ambos pueden tener composiciones químicas muy diferentes e incluso así poseer las propiedades físicas necesarias para cumplir con los criterios de rendimiento

requeridos para defensas marinas, y así cumplir con las normas internacionales. Esto se debe fundamentalmente a los diferentes requisitos de refuerzo que presentan el caucho natural y el SBR.

PRUEBA DE TGA						
		COMPUESTO 1		COMPUESTO 2		
COMPOSICIÓN QUÍMICA	Polímero [%]		47.5			46.9
	Negro de carbón [%]		37.5			27.5
	Residuos (cenizas) [%]		2.9			17.9
PRUEBA DE PROPIEDADES FÍSICAS						
PROPIEDADES FÍSICAS	MÉTODO DE PRUEBA	ESPECIFICACIÓN	RESULTADO COMPUESTO 1	OBSERVACIÓN	RESULTADO COMPUESTO 2	OBSERVACIÓN
Resistencia a la tracción [MPa]	ASTM D412 Troquel C - valor original antes del envejecimiento	≥ 16	20.20	✓	19.11	✓
Elongación a la rotura [%]	ASTM D412 Troquel C - valor original antes del envejecimiento	≥ 400	514.00	✓	586.08	✓
Resistencia al desgarro [kN/m]	ASTM D624 Troquel B	≥ 70	127.34	✓	104.42	✓
Deformación permanente por compresión [%]	ASTM D395 Método B, a 70°C durante 22 horas	≤ 30	19.31	✓	17.93	✓

Tabla 2: Comparación de compuestos en cuanto a composición química y propiedades físicas. Compuestos 1 y 2 tomados de defensas que han estado operativas con éxito durante años.

Se ha convertido en un fenómeno recurrente en la industria de las defensas el ocultar esta simple verdad a la vez que se difunde información engañosa. A este respecto, afirmar de forma errónea que la composición química de un componente de caucho es el principal criterio de calidad de la defensa supone alterar los hechos de forma peligrosa. Esta distorsión de los hechos resulta problemática cuando las partes interesadas invocan criterios subjetivos como indicadores de calidad de las defensas. Un buen ejemplo de esto tiene que ver con la densidad de los compuestos de caucho. La alta densidad se considera un síntoma de baja calidad, lo cual es una afirmación problemática cuando se acepta sin cuestionarla. Dado que los componentes como los aditivos y los agentes de vulcanización tienen una densidad más alta que el caucho, es probable que cualquier compuesto que necesite reforzante tenga una densidad más alta. Y, como vimos anteriormente, estos compuestos también cumplen con las normas internacionales. Así que la densidad es solo un parámetro significativo cuando se considera en contexto.

Un ejemplo más llamativo de este tipo de engaño es la práctica de evaluar la calidad de un compuesto de caucho sometándolo a un análisis termogravimétrico (TGA).

El TGA es un método de análisis térmico en el que una muestra, en este caso de una defensa de caucho, se pesa de forma continuada durante el calentamiento. Como los diferentes componentes se queman a diferentes temperaturas, la pérdida de peso constituye una indicación sobre la composición

de la muestra. Algunas partes, sin embargo, no se queman, ni siquiera a temperaturas muy altas, a pesar de añadir oxígeno atmosférico. Otras se liberan en forma de CO₂ durante el proceso. Las partes que no se queman y que quedan al final se conocen como residuos (cenizas).

Aunque el TGA es útil como un medio práctico para verificar la composición química de un compuesto, no proporciona ninguna correlación significativa con la calidad del compuesto.

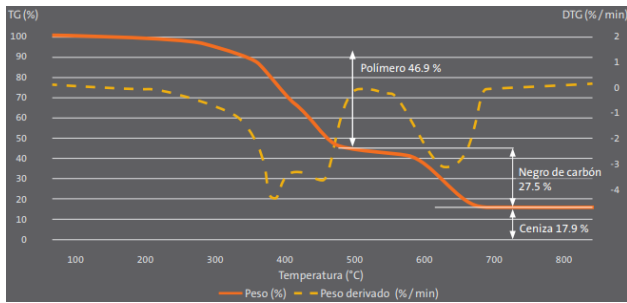


Figura 6: TGA del Compuesto 2 (ver Tabla 2)

3.2 Mezclado

Es fundamental la determinación exacta del tiempo de quemado, del tiempo de curado óptimo, así como del par mínimo y máximo. Estos parámetros pueden variar entre diferentes lotes de composición, por lo que realizar pruebas y determinar estos parámetros resulta de extrema importancia para garantizar una alta calidad de los productos de defensas.

Para este fin, se coloca una muestra del compuesto mezclado en un curómetro que determina todos los datos relevantes con arreglo a un software especial para programar los parámetros de curado ideales relacionados particularmente con cada compuesto. De esta manera, se puede reevaluar la calidad constante de cada lote de composición. La misma muestra de prueba se usa para probar las propiedades físicas del compuesto. Efectuar ambas pruebas en esta etapa de la producción de defensas permite evaluar la calidad de antemano.

Se observa a través de la experiencia de los fabricantes que, pese a la posibilidad de emplear tanto el Banbury como el Kneader para los procesos de mezclado, estos presentan ventajas específicas para cada una de las distintas etapas (ver Figura 7).

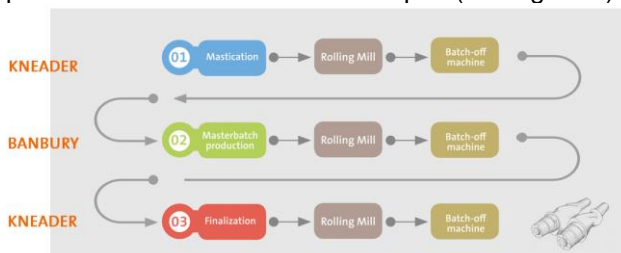


Figura 7: Detalle de las etapas de mezclado, indicando el mezclador recomendado

3.3 Producción y curado

A partir de lo descrito anteriormente y con la experiencia como fabricante internacional de éxito, la siguiente tabla (Tabla 3) puede presentarse como muestra de una posible correlación entre los distintos métodos de producción y de curado, estableciendo potenciales líneas de procesos para obtener productos finales de calidad para las distintas tipologías de defensa marina:

MÉTODO DE PRODUCCIÓN	TIPO DE DEFENSA	PROCESO DE PRODUCCIÓN	MÉTODO DE CURADO
Inyección a altas presiones	Todas	Inyección en molde	Autoclave o molde revestido (en función del tamaño)
Compresión	Defensa tipo V	Inserción de láminas	Autoclave o prensa de por placas calientes
Enrollado	Defensas cilíndricas	Caucho enrollado en el mandril	Autoclave
Extrusión	Defensas de perfil continuo	Caucho extruido a través de un perfil	Autoclave

Tabla 3: Correlación de métodos de producción y curado

Como ya ha sido descrito, el proceso de curado afecta drásticamente al rendimiento del producto final (ver Figura 8), siendo fundamental contar con el conocimiento y la experiencia necesarios para el correcto ajuste de los parámetros descritos de presión, temperatura y tiempo de cara a optimizar tanto el proceso de curado como la calidad del producto de caucho.

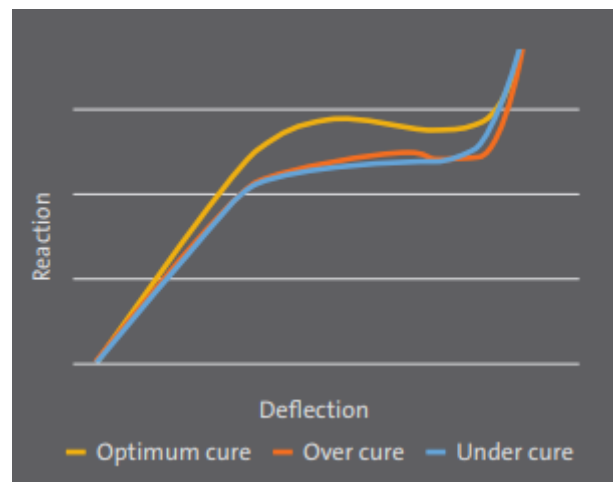


Figura 8: Impacto del curado en el rendimiento

4 CONCLUSIÓN

Las propiedades físicas son el único indicador fiable de la calidad de un compuesto de caucho, según definen las normas internacionales.

Las proporciones de aditivos y agentes reforzantes como el CB, el CC y la sílice deben ser determinadas por especialistas con un profundo conocimiento de los materiales, ya que la cantidad y el tamaño de las partículas influyen en gran medida en el compuesto, su rendimiento y durabilidad.

Los compuestos mezclados correctamente con CC por fabricantes experimentados cumplen y superan las normas internacionales de testeo; las defensas que emplean dichos compuestos tienen una alta durabilidad y alcanzan una vida útil normal de más de 20 años.

Las propiedades físicas de una defensa de caucho no solo dependen de la calidad del compuesto de caucho. El manejo correcto del material en el proceso de mezclado y la elección del equipo son igualmente importantes.

La selección del dispositivo de mezclado más adecuado para cada paso de producción de una gama de dispositivos disponibles y el profundo conocimiento del operador desempeñan un papel vital en la producción de una defensa que supere y cumpla los estándares internacionales de testeo.

Las características del equipo de mezclado que son relevantes para la calidad final del compuesto incluyen la velocidad del rotor, la evolución de la temperatura y la relación entre la superficie de enfriamiento y el volumen de la cámara. Los mezcladores grandes pueden ser eficientes, aunque no necesariamente favorezcan la calidad del compuesto.

La producción por inyección en molde a altas presiones produce productos de mayor calidad.

La presión, la temperatura y el tiempo son factores clave para la producción y el curado. Estos tres parámetros están intrínsecamente relacionados entre ellos.

La experiencia y conocimiento práctico de los fabricantes son factores fundamentales a considerar y valorar para su implementación en todas las etapas de producción para las defensas marinas.

REFERENCIAS

A menos que se indique lo contrario, todas las referencias del presente documento han sido extraídas de las siguientes fuentes:

- Abts, G. (2007). Einführung in die Kautschuktechnologie (Introducción a la tecnología del caucho). Munich: Hanser

- Hofmann, W. & Gupta, H. (2009). Handbuch der Kautschuktechnologie (Guía de referencia para la tecnología del caucho). Ratingen: Gupta

- C. Hopmann, J.P. Dering, and A. Lipski (2015). Análisis de procesos para un procesamiento de caucho eficiente (Gummi Fasern Kunststoffe, 68, No. 1, pp. 44-50). Ratingen: Gupta

- Nobuyuki, N. (2000). Science and Practice of Rubber Mixing

(Ciencia y práctica del mezclado de caucho). Shawbury: Capra Technology Limited

- Nueva edición, Basic Rubber Technology (Tecnología básica del caucho), tercera impresión de la edición revisada (2010).

- La Sociedad de Ciencia y Tecnología del Caucho, Japón