



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

CAMPO TECNOLOGÍA

FACTIBILIDAD **T**ECNICA DE LA **A**PLICACIÓN DE
POLÍMEROS CON **M**EMORIA DE **F**ORMA EN
CUBIERTAS **L**IGERAS **A**RQUITECTÓNICAS.

Tesis para optar por el grado de:
MAESTRO (A) EN ARQUITECTURA
(Campo de Conocimiento Tecnología)

PRESENTA

ARQ. ROSA MARÍA ESPINOZA VAZQUEZ

Tutor: M. Arq. Ernesto Ocampo Ruiz - Facultad de Arquitectura

Sinodales:

M. Arq. Francisco Reyna Gomez - Facultad de Arquitectura

M. Arq. Jorge Rangel Davalos - Facultad de Arquitectura

Dra. Arq. Jeanine Da Costa Bischoff - Facultad de Arquitectura

Dr. Jacinto Cortes Perez - Facultad de Arquitectura, FES Aragón

México, D.F. OCTUBRE, 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central

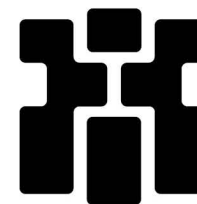


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Índice

01

Introducción 13

Metodología de Investigación 15

- 1.1 Objetivos
- 1.2 Objetivos específicos
- 1.3 Hipótesis
- 1.4 Concepto
- 1.5 Proceso Metodológico

02

Envolvente 23

- 2.1 Desarrollo Tecnológico de los Materiales

03

Materiales Inteligentes 29

- 3.1 Materiales con Memoria de Forma (SMM)
- 3.2 Inicio de los Materiales con Memoria de Forma

04

Polímeros con Memoria de Forma (SMP) 37

- 4.1 Aspectos macroscópicos
- 4.2 Proceso de programación
- 4.3 Efecto de Memoria de Forma en SMP
- 4.4 Propiedades de los Polímeros con Memoria de Forma
- 4.5 Aplicaciones de los Polímeros con Memoria de Forma en la actualidad

05

Elastómeros Termoplásticos 53

- 5.1 Copolímeros de bloque
- 5.2 Elastómeros Iónicos

06

Etapa Experimental

63

6.1 Material

6.2 Desarrollo

6.2.1 Elastómero Iónico - Caucho Nitrílico Carboxilado (XNBR)

- I. Definición de la materia prima
- II. Obtención de la dosificación de mezcla
- III. Obtención de la mezcla.
- IV. Obtención de curvas de vulcanización
- V. Moldeo de Mezclas
- VI. Programación de Memoria de Forma
- VII. Caracterización de las propiedades del XNBR con memoria de forma
- VIII. Análisis del efecto de memoria de forma
Aspecto Cualitativo
- IX. Análisis de ciclo termo mecánico -
Cuantificación del efecto de memoria de forma

6.2.2 Caucho Etileno - Propileno con Anhídrido Maleico (EPM AnM)

- I. Definición de la materia prima
- II. Moldeo de Mezclas
- III. Métodos de prueba
- IV. Efecto de Memoria de Forma - Aspecto Cualitativo

07

Resultados

95

7.1 Elastómero Iónico - Caucho Nitrílico Carboxilado

7.2 Caucho Etileno - Propileno con Anhídrido Maleico

08

Propuesta de Aplicación

146

8.1 Evaluación del perfil de riesgo

8.2 Hoja de producto

Conclusiones

155

Bibliografía

159

Glosario

165

Anexos

171



Agradecimiento a:

GRUPO DE ELASTOMEROS

del Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros (ICTP), de Madrid, España.

De manera especial al **Dr. Juan Lopez Valentín**, por abrirme las puertas en el Instituto y guiarme en el entendimiento de los Polímeros con Memoria de Forma.

Al grupo en general, formado por: Marta Alonso - Celia Chamorro - Pilar Posadas - Antonio Gonzalez - Andrés Rodríguez – Ángel Marcos – Luis M^a Ibarra, por su valiosa colaboración para el desarrollo de la etapa experimental del presente trabajo.

“El crecimiento del ser humano esta en el intercambio de ideas, conocimientos, habilidades y aprendizajes.”



Agradecimiento a:

CONACYT

Por el apoyo brindado durante el desarrollo de la Maestría.



CONACYT

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Agradecimiento a:

Cada una de las personas que han estado a mi lado apoyandome a lo largo de estos años.

MI FAMILIA:

Mis padres María Antonia y Jesus Antonio, mis hermanos Sergio, Araceli, Lety, Jesus y Luis, a mis abuelitos Celestina y Antonio, mi cuñada y sobrina Carmen y Marycarmen - todos ellos pilares valiosos en mi vida.

MIS AMIGOS

No quisiera olvidar a nadie, por eso agradezco a cada una de las personas que me brindaron su apoyo a lo largo de estos dos años. En especial a Omar y Campeón, por que estuvieron a mi lado en buenos y malos momentos, desveladas y demás.

MIS MAESTROS

A cada una de las personas que dedicaron su tiempo a brindarme nuevos conocimientos e invitarme a descubrir un mundo increíble dentro de la Arquitectura.

ROSY

“Dejar de luchar, es comenzar a morir”





INTRODUCCIÓN

La envolvente de un elemento arquitectónico se encuentra en interacción constante con el medio, siendo este un elemento modificador del bienestar habitacional de un espacio. Por tal razón es importante que en su diseño se contemplen una serie de factores que lo definirán como un buen producto, por ejemplo las condiciones climatológicas del lugar donde se encuentra, el tipo de actividad y condiciones de comodidad requeridas por el usuario, el horario de uso de la edificación, entre otros.

Para su creación es necesario analizar cómo cada uno de estos factores influye en los materiales a emplear, ya que no todos cuentan con las propiedades necesarias para lograr un producto óptimo.

Hoy en día el empleo de nuevas tecnologías de materiales está en auge, conforme transcurre el tiempo los diseños arquitectónicos buscan incorporar a sus propuestas calidad e innovación, por lo cual se convierte en requisito indispensable conocer cada una de sus cualidades y propiedades para que sean utilizados de la mejor forma.

Una de estas nuevas tecnologías de materiales son los denominados Polímeros con Memoria de Forma

(SMP), tema central de esta investigación, en la cual se busca analizar la factibilidad de su uso así como los beneficios que puedan aportar a un elemento arquitectónico a partir de emplearlos en envolventes, como por ejemplo las aportaciones que dan al bienestar habitacional, la imagen y diseño del mismo.

Hoy en día se conocen algunos tipos de SMP, entre ellos encontramos a los “elastómeros iónicos”, los cuales se caracterizan por ser un material deformable capaz de dar respuesta a cambios térmicos sin perder su característica de elasticidad, de acuerdo a esto se analiza si el material cuenta con la capacidad de responder a un estímulo dado por el medio ambiente (temperatura), entendiendo su naturaleza y forma de actuación, para después evaluar su capacidad de ser empleado en Arquitectura.

Como “Nuevas Tecnologías”, los SMP pueden llegar a ser un componente que influya en un ámbito económico, ya que son parte fundamental de toda una revolución científica – tecnológica impactando en la producción, además de atacar nuevos desafíos y buscar hacer eficiente un elemento arquitectónico sin dañar al medio ambiente.



1

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 OBJETIVO

Evaluar la factibilidad de uso de los elastómeros iónicos con memoria de forma como material a emplearse en una envolvente de un elemento arquitectónico.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Describir los factores involucrados en el proceso que determinen el efecto de memoria de forma de un material polimérico.

Identificar en los elastómeros iónicos cualidades que aporten innovación en el campo de la Arquitectura.

Proponer aplicaciones de los elastómeros iónicos con memoria de forma en una envolvente, la cual persiga regenerar las condiciones de bienestar habitacional al interior de un espacio.

1.3 HIPÓTESIS

“Si se utilizan los materiales denominados elastómeros iónicos con memoria de forma en las envolventes se mejorarán las condiciones de confort interna (temperatura, iluminación y ventilación), siempre y cuando los estímulos para el material provenientes del medio ambiente (temperatura) actúen correctamente sobre el elemento.”

1.4 CONCEPTO

La idea inicial sobre el uso de los polímeros con memoria de forma se debe a la concepción de una envolvente respondiendo a dos efectos:

- Efecto Helio trópico.

Cada uno de los módulos constituidos con polímeros con memoria de forma tendrán un efecto Helio trópico, definido como: el movimiento que realizará cada módulo en respuesta y búsqueda a la luz del sol, lo que genera protección solar y modificación de entradas de luz natural y aire.

- Elementos Activos.

El elemento “envolvente con memoria” se conceptualiza como un elemento activo, ya que permitirá al usuario la interacción del exterior con el interior de su espacio habitable sin necesidad de su manipulación, ya que por la naturaleza de los materiales que lo componen se generan un mecanismo de activación y desactivación por la energía que reciben del medio ambiente.

CONCEPTO – ENVOLVENTE CON MEMORIA



Figura 1. Concepto

Fuente: Realizado por Arq. Rosa María Espinoza Vazquez, 2013

-BENEFICIOS AL ESPACIO INTERIOR

a) Ventilación

El diseño de la envolvente impulsa a que exista un flujo de aire (ventilación cruzada) con el fin de obtener una temperatura agradable y óptima al interior. Al lograr esto se elimina la posibilidad de usar y gastar en elementos de climatización artificial.

b) Luz Natural y Temperatura

La colocación de una envolvente realizada con polímeros con memoria de forma es un recurso que

mejora la sensación del hombre al estar en el interior de un espacio. Además el diseño logra la distribución uniforme de la luz, así como un juego de contrastes entre luz y sombra a diferentes horas del día.

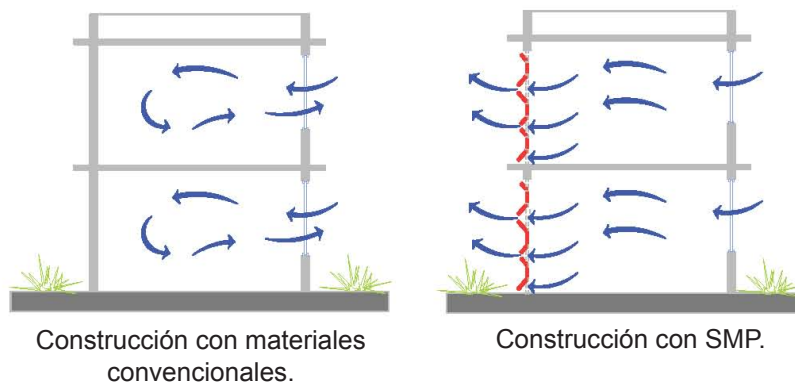


Figura 2. Beneficios al edificio - Ventilación

Fuente: Realizado por Arq. Rosa María Espinoza Vazquez, 2013

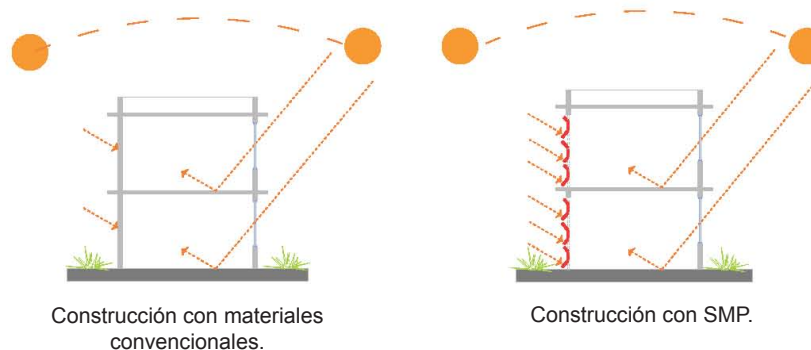


Figura 3. Beneficios al edificio - Luz Natural y Temperatura

Fuente: Realizado por Arq. Rosa María Espinoza Vazquez, 2013

DISEÑO

La propuesta de aplicación de los elastómeros iónicos con memoria de forma en una envolvente responderá a la capacidad y características del mismo. Se contempla que su funcionamiento se encamine a obtener módulos capaces de abrir y cerrar por si solos, doblarse sobre un eje o deformarse logrando una forma curva (ver figura no. 4) en respuesta a la interacción y absorción de temperatura que el sol les brinda.

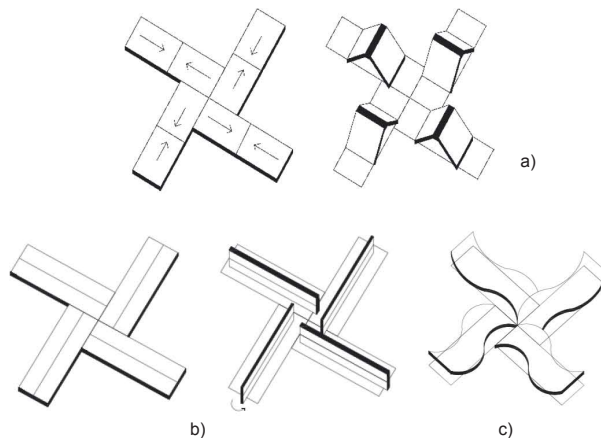


Figura 4. Módulos con diferentes características.

Los módulos que se observan en la imagen, corresponden: a) piezas que se abren y cierran, b) piezas con la habilidad de girar sobre un eje y doblarse, c) piezas que se doblan en formas curvas, evitando que la luz del sol entre de forma directa, ya que la superficie de contacto es diferente en cada punto.

Fuente: Realizado por Arq. Rosa María Espinoza Vazquez, 2013

1.5 PROCESO METODOLÓGICO

El proceso metodológico de este tema de investigación se basa en el TRL (Technology Readiness levels)¹ y el Desarrollo de paquetes de Innovación Tecnológica, Modelo de D. G. Marquis y S. Myers². Estas metodologías evalúan el desarrollo tecnológico como un proceso integrado por una serie de pasos enfocados a cumplir un objetivo, ya que se empieza desde la concepción de un modelo hasta su propuesta industrial, lo que implica observar y analizar dentro del proceso una serie de riesgos y deficiencias presentes con el fin de evitar el fracaso a futuro.

La metodología se desarrolla en cuatro etapas de investigación, cada una de ellas cuenta con cuatro fases de estudio en las cuales se especifican las tareas a desarrollar, estas son:

a) Síntesis documental

Conceptos que definen la etapa y su alcance, con el fin de definir los aspectos teóricos involucrados y recopilación de información importante.

¹ TRL : Technology Readiness levels – Diseño de prototipos, es una metodología con la que se evalúa el nivel de desarrollo tecnológico de un prototipo en proceso de diseño. (Modelo de S. Sandin y R. Chase, 1995)

² El Modelo de un proceso innovador realizado por D. G. Marquis y S. Myers, explica que la innovación no es un proceso simple, es un proceso integrado por subprocesos que guardan una estrecha relación entre sí. (Cadena, G., Castaños A., (1986), Administración de proyectos de innovación tecnológica, Gernlka.)

b) Panel general

Identificación de temas con relación directa entre la investigación y el usuario involucrado, con el fin de crear temas críticos para ser debatidos en la toma de decisiones del panel sector.

c) Panel sector

Evaluación del atractivo y barreras que presenta la tecnología en desarrollo en una etapa experimental.

d) Alcance

Definición del objetivo de cada etapa, llevándose a cabo un análisis de cada una de las fases recorridas.

A continuación se presenta el proceso metodológico:

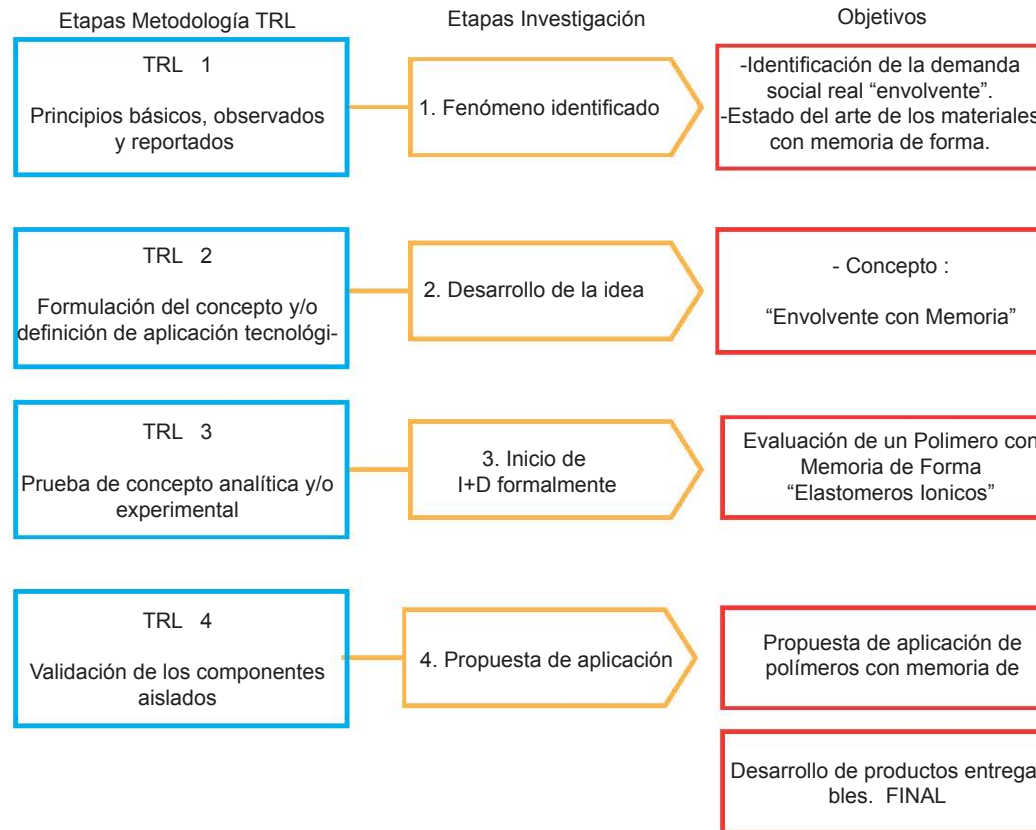


Figura 5. Metodología Propuesta

Fuente: Realizado por Arq. Rosa María Espinoza Vazquez, 2013

- **Etapa 1: Fenómeno Identificado**

El objetivo de esta etapa es identificar las problemáticas con las que cuenta las envolventes en forma general, así como los factores que condicionan su diseño.

- Síntesis documental:

Desarrollo de la base teórica del tema de investigación: 1) Envolventes, características, factores que condicionan su diseño y 2) desarrollo general de los materiales con memoria de forma.

- Panel general

Evaluación del impacto de nuevas tecnologías de materiales en la envolventes, a partir de identificar las ventajas y desventajas de su uso, el impacto y beneficios al espacio habitable.

- Panel sector

Identificar las aplicaciones de los materiales con memoria de forma en envolventes, así como los riesgos que se corre al proponer nuevas tecnologías y la búsqueda de oportunidades de desarrollo.

- Alcance

Definir el problema a resolver.

- **Etapa 2: Desarrollo de la Idea**

El objetivo de esta etapa es desarrollar el concepto, definir las características, ideas de funcionamiento, colocación del material polímero con memoria de forma (SMP) en la envolvente. Por otro lado, búsqueda de información y entendimiento específicamente de los polímeros con memoria de forma.

- Síntesis documental:

Desarrollo del concepto “envolvente con memoria”, definición de los estímulos ante los que responderán dichos materiales.

- Panel general

Análisis de los factores y condiciones del espacio necesarios para poder ser empleado un material de acuerdo a su naturaleza. Análisis de los parámetros para la obtención del grado de confort óptimo en las personas.

- Panel sector

Identificación de las variables de estudio a tomar en cuenta, a partir de las cuales se evaluará el funcionamiento del material en etapas posteriores.

- Alcance

Propuesta de materiales de estudio.

- **Etapa 3: Inicio de Investigación y Desarrollo (I+D) formalmente**

El objetivo de esta etapa es estudiar formalmente al polímero con memoria de forma (SMP) elegido, identificando su composición y funcionamiento en un elemento arquitectónico. Al mismo tiempo la identificación de las condiciones óptimas del espacio para ser colocado dicho modelo.

- Síntesis documental:

Observación y análisis de resultados de la experimentación.

- Panel general

La observación de datos representativos en la experimentación será debatida ante el equipo colaborador del tema de investigación con la finalidad de mejorar las primeras ideas creadas.

- Panel sector

En esta fase se realizará la comparación de características, ventajas y desventajas, costos sobre el empleo del material en una envolvente arquitectónica en comparación con un elemento convencional.

- Alcance

Desarrollo de la primer idea de envolvente como propuesta de aplicación, identificando problemas y modificaciones que pueda sufrir a futuro.

- **Etapa 4: Propuesta de aplicación**

Evaluación del desempeño del material de estudio en un espacio arquitectónico.

- Síntesis documental

Análisis de la etapa experimental al cual fue sometido el material de estudio comparándolo con la meta que se pretendía alcanzar.

- Panel general

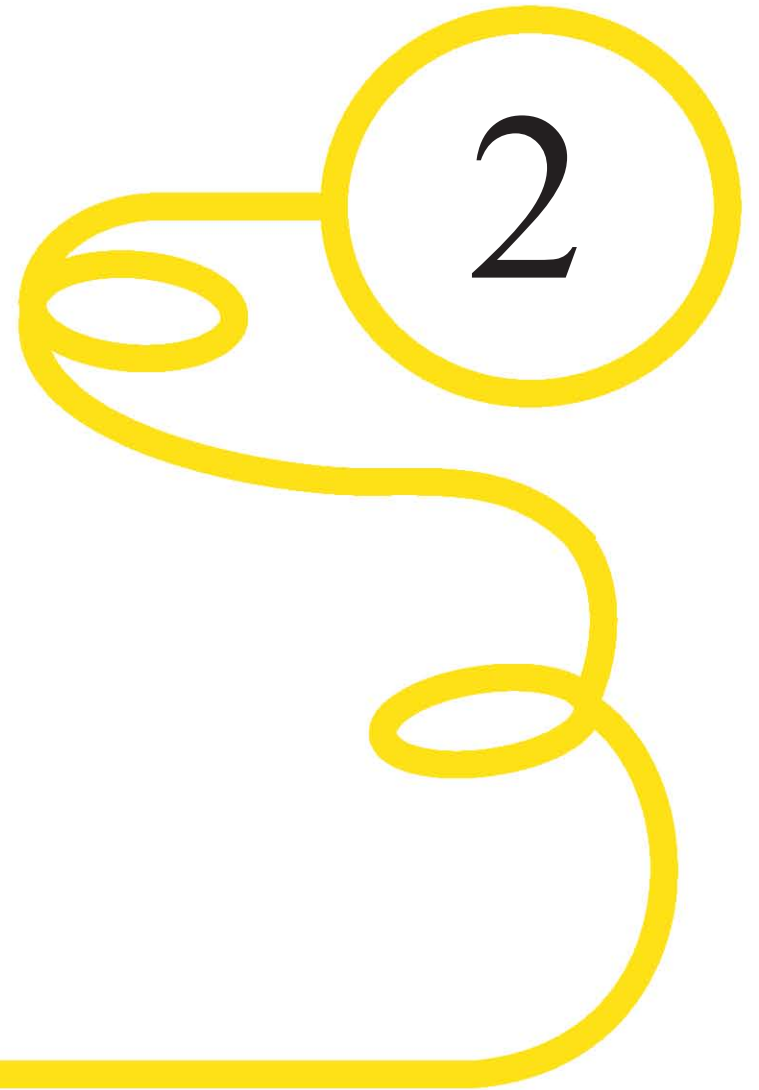
Identificar los riesgos a futuro y evaluar el ciclo de vida del material.

- Panel sector

Explicación de la aplicación del material de estudio en una envolvente arquitectónica.

- Alcance

Finalización de tesis y realización de productos finales.



ENVOLVENTE

2. ENVOLVENTE

La envolvente es aquel elemento físico que delimita dos entornos, uno exterior y otro interior, donde el primero es determinado por las condiciones climáticas naturales, las cuales se filtran o controlan de modo que el ámbito interior responda a las condiciones de confort y seguridad para su habitante

Una segunda forma de definir a una envolvente es como el elemento que es la imagen de todo espacio arquitectónico, donde cada uno de sus componentes no es inerte o indiferente a las condiciones a las que están sometidos, ya que su elección desde la etapa de diseño responde a la capacidad que tienen de dar respuesta de forma pasiva o activa a cada una de ellas.

De acuerdo al enfoque tecnológico que existe hoy en día, la envolvente se visualiza como el elemento que sufre de acciones provenientes del medio, que a su vez se solucionan con una perspectiva de optimización y mejora continua de su desempeño. Por lo que puede calificarse como un sistema complejo, el cual involucra al entorno, la economía, el bienestar de sus habitantes y la propia imagen urbana.

El objetivo de llevar a cabo un estudio sobre sus cualidades y características se debe a que a partir de su diseño se determina el grado de confort, impacto ambiental y consumo de energía en una construcción. De acuerdo con lo anterior surge un cuestionamiento: ¿Será posible, que el empleo de nuevas tecnologías en las envolventes puedan regeneren el bienestar habitacional de un elemento arquitectónico?.

El bienestar habitacional se define como el conjunto de condiciones de habitabilidad con las que debe contar un elemento arquitectónico, su forma de interacción con el medio modifica su capacidad para llegar a ser habitado, ocasionando una serie de cambios tanto en salud como en el desarrollo social del hombre.

Todo espacio habitable sufre una serie de cambios en su interior debido a la influencia que tiene el medio sobre él, lo que provoca la modificación directa del grado de “confort” (condiciones que propician bienestar y comodidad a sus habitantes). Algunos de los elementos necesarios para su cumplimiento son las cualidades térmicas, acústicas, lumínicas y la ventilación del espacio, todos ellos deben de ser analizados y tomados en cuenta desde la concepción del proyecto Arquitectónico.

De acuerdo a esto, la manera de obtener un espacio con optimas condiciones de habitabilidad puede lograrse a partir de:

a) Realizar construcción nueva, es decir, desde la etapa de concepción del proyecto realizar un estudio exhaustivo de los factores involucrados.

b) Ampliación del espacio existente con la finalidad de corregir la calidad y condiciones de habitabilidad.

c) Mejoramiento de las condiciones actuales de un espacio, a partir de nuevos materiales empleados en su estructura como en instalaciones.

De acuerdo a las soluciones propuestas, si analizamos el ciclo de vida de una construcción encontramos que parte fundamental de este son “los materiales”, ya que están presentes en todas las etapas que la componen: extracción de recursos, transporte, fabricación, construcción, uso, mantenimiento y demolición; por lo tanto es importante hacer hincapié en la forma de utilizarlos, siendo de forma eficiente y de acuerdo al contexto. Esto trae consigo a consultar las tipologías que existen dentro del mercado y analizar cada una de las ventajas y desventajas que podrían proporcionar al espacio proyectado.



Figura 6. Ciclo de vida de las construcciones.

Los materiales de construcción son los componentes principales de todo elemento arquitectónico.

Fuente: Realizado por Arq. Rosa María Espinoza Vazquez, 2014

2.1 DESARROLLO TECNOLÓGICO DE LOS MATERIALES

El contexto en el que se encuentra inmerso una construcción va en deterioro día a día, debido al descuido del hombre hacia sus recursos naturales, por lo que se obliga a emplear alternativas tecnológicas, invitando a incorporar nuevos desarrollos los cuales modifiquen las condiciones actuales en cualquier tipo de ambiente que se estudie.

El desarrollo tecnológico de los materiales en la Arquitectura es muy difícil de ser percibido, ya que por lo general nosotros los arquitectos nos fiamos de la información brindada por el fabricante o comerciante. La investigación dentro de este campo comenzó a describir los materiales básicos que solucionan las necesidades del hombre, sin embargo en la actualidad las profesiones que desarrollan una labor diaria dentro de la construcción (Ingenieros, Arquitectos, etc.) deben estar atento a la creación de materiales compuestos, siendo estos capaces de cumplir las mismas necesidades con una mayor eficiencia. Por lo cual para lograr recuperar o no seguir dañando el medio, es necesario que la elección de cada uno de ellos al ser aplicados en un edificio sea de forma consciente, analizando cada una de las características que le brindan al espacio, pues en ocasiones se eligen los que no son apropiados para cumplir determinadas funciones, por ejemplo como aislantes térmicos, de protección acústica, resistentes, durables, etc. En respuesta a ello, en México se requiere de la participación de personas preparadas

en el desarrollo de tecnologías endógenas que cumplan y sigan las características que el país demanda.

De acuerdo con el Código de la edificación de la Vivienda 2010³, “los materiales de construcción” ayudan a obtener el grado de confort óptimo al interior de un espacio. En este documento se reflejan algunas condiciones para que puedan ser empleados, como son:

- a) NO deben contener contaminantes ni sustancias tóxicas que puedan perjudicar a la salud del habitante.
- b) Deben ser resistentes y reparados con medios locales.
- c) Deben ser renovables y abundantes, no afectar al medio natural.
- d) No producir radiaciones naturales.
- e) Deben contar con cualidades térmicas y acústicas.
- f) En la producción deben generar pocos desperdicios y ser reutilizables.
- g) Deben ser resistentes al ataque de agentes agresivos.
- h) Los materiales empleados en envolventes o fachadas deben cumplir con las especificaciones de resistencia térmica total (Valor R).

³ El Código de Edificación de Vivienda es un documento cuyo propósito es contribuir a que las autoridades locales cuenten con una herramienta para normar y hacer más eficientes los procesos de edificación (CONAVI, 2010, www.conavi.gob.mx).

Por otro lado todo el Código de edificación dictamina que los elementos arquitectónicos deben de evaluarse por tres aspectos:

a) Desarrollo espacial: análisis de forma, es decir, diseño del elemento.

b) Envolvente: análisis de materiales y condiciones térmicas y de aislamiento, de sombreado y visuales que proporcionan.

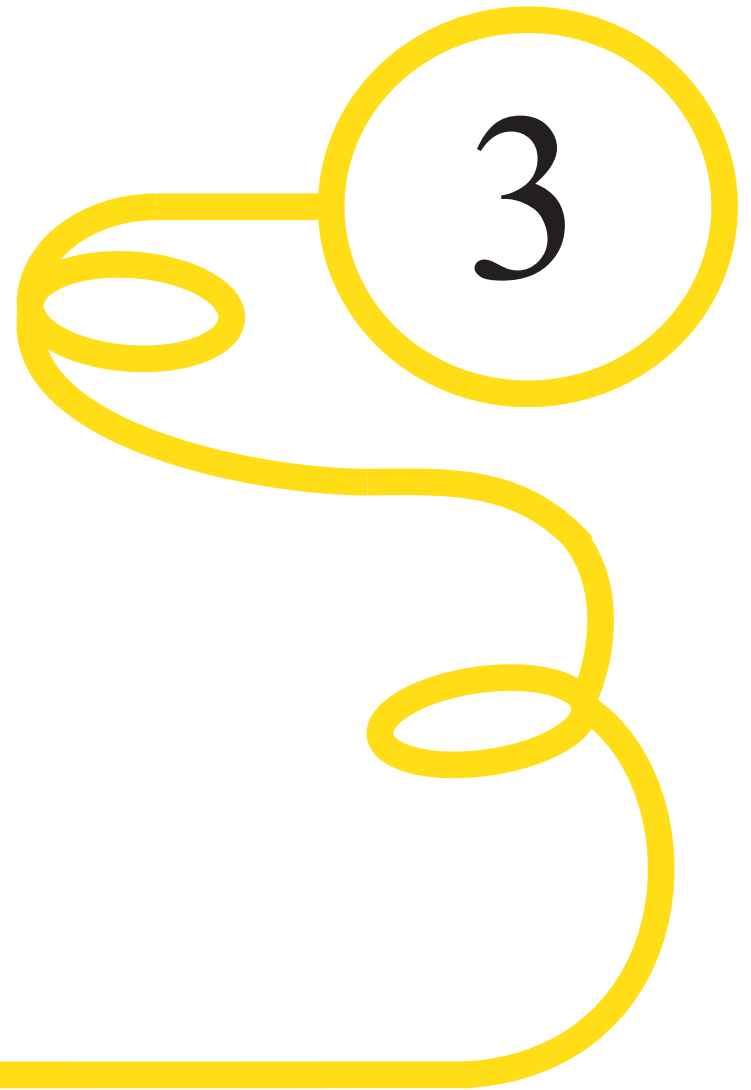
c) Impacto al medio: análisis de la eficiencia energética

Es por ello que la propuesta de emplear nuevos materiales en una envolvente implica un cambio en la concepción de los elementos que conforman al espacio, cambiando el pensamiento del investigador a estudiarlos a fondo y crear un producto en donde se aprovechen cada una de sus propiedades.

El desarrollo de una “envolvente con memoria” con materiales de nuevo desarrollo persigue la idea de cambiar un elemento estático por un elemento dinámico, que genere cambios físicos al interior de un espacio habitable. Esto puede lograrse, ya que en otras disciplinas, este tipo de materiales han respondido a necesidades básicas aplicadas al sujeto principal de su área, por otro lado los científicos han probado que este tipo de materiales y estructuras son esencialmente factibles en construcción, sin embargo, requieren de un arsenal de ayudas especiales.

Nota: Jacque Fresco⁴, dijo: “la ciudad ideal en un futuro estará compuesta por edificios hechos con materiales con memoria de forma”.

4 Jacque Fresco diseñador industrial, se dedica al diseño holístico de ciudades sostenibles, habla sobre eficiencia energética, gestión de recursos naturales y la automatización de elementos arquitectónicos. (The venus Project, 2011. <http://thevenusproject.com>)



MATERIALES
INTELIGENTES

3. MATERIALES INTELIGENTES

Hoy en día existe una nueva tecnología de materiales llamada “inteligentes” o “multifuncionales”, definidos como los materiales que cuentan con la capacidad de cambiar sus propiedades físicas (rigidez, viscosidad, forma, color, entre otras) en presencia de algún estímulo externo a ellos.

Los materiales inteligentes cuentan con sensores de reconocimiento y medida de la intensidad de estímulos ante los que son capaces de reaccionar,

dada por los “actuadores” embebidos o intrínsecos, ya que cada uno tiene un mecanismo de control y selección de respuesta ante el estímulo brindado

La innovación de estos materiales es que una vez que actúan tienen la capacidad de que su sistema regrese a su estado original tan pronto el estímulo cese.

Los materiales inteligentes se clasifican en:



3.1 MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA

Los materiales con memoria de forma son aquellos que tienen la capacidad de recordar una forma previamente establecida, lograda a partir de la respuesta que el material tiene ante un estímulo. Estos materiales además de tener la capacidad de memorizar una forma permanente, pueden ser programados para una o varias formas temporales, las cuales se modifican y se recuperan espontáneamente volviendo a sus formas originales.

Actualmente encontramos que existen cuatro tipos de Materiales con Memoria de Forma:

1. Aleaciones con Memoria de Forma (SMA – Shape Memory Alloys) [5,11]
2. Cerámicas con Memoria de Forma (SMC – Shape Memory Ceramics) [11]
3. Polímeros con Memoria de Forma (SMP - Shape Memory Polymers) [6,11]
4. Aleaciones Ferromagnéticas (FSMA – Ferromagnetic Shape Memory Alloys) [11]

Todos ellos son materiales calificados como ideales para realizar un sistema integral inteligente, es decir, en donde “el material se comporte como una máquina”, ya que pueden sentir y después generar movimiento que es pre-programado. Su innovación se basa de acuerdo a su naturaleza, donde cuentan con una variedad de estímulos que les generan cambios en su forma, como son:

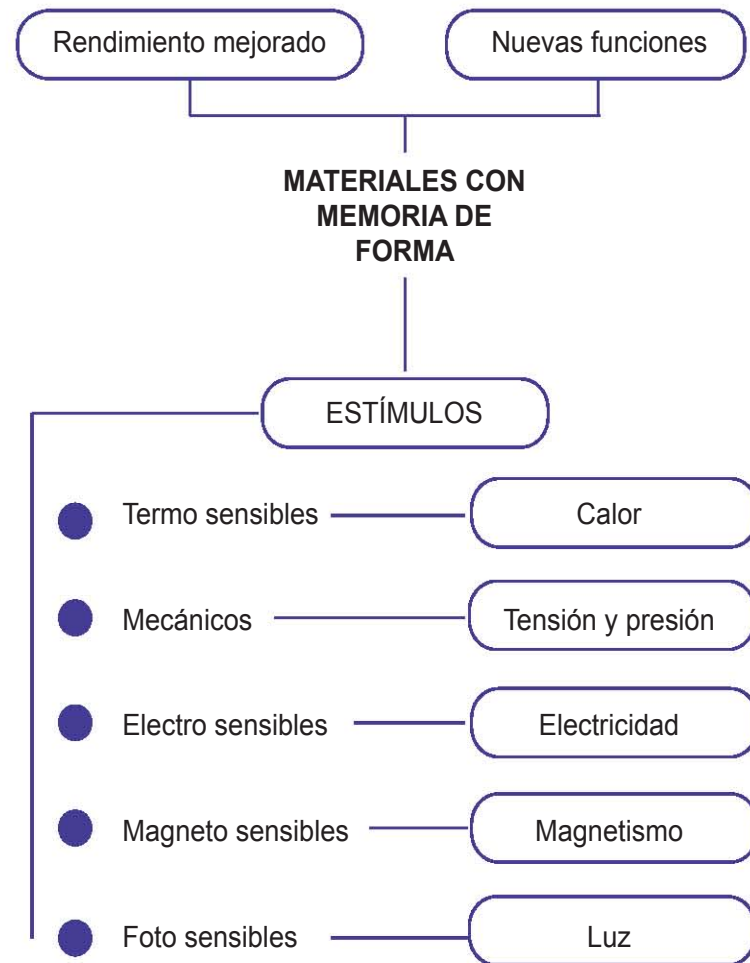


Figura 7. Estímulos a los que responden los Materiales con Memoria de Forma (SMM).

Fuente: Realizado por Arq. Rosa María Espinoza Vazquez, 2013

3.2 INICIO DE LOS MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA.

En el siglo XIX entre la transición de la Revolución Francesa y la era Napoleónica, además de la Independencia de varias naciones entre las cuales destacan México (1810-1821), Chile (1810-1818) y Colombia (1810 - 1819) surge una nueva tecnología de materiales llamados de memoria de forma. En estos días el mundo experimenta la época del Historicismo, en la cual se estudia el origen en el pasado y la recuperación de la Arquitectura de antaño. Por otro lado, sobresale la figura del artesano como la persona destacable por las maravillas que puede lograr con su trabajo.

Pues bien, en este siglo existe un desarrollo industrial y tecnológico destacable en algunas áreas. El descubrimiento de los materiales con memoria de forma es prácticamente reciente, surgen en la época donde se desarrolla un nuevo material llamado "polímero" (1839), el cual se obtiene a partir de la vulcanización del caucho, por otro lado la experimentación con nuevas aleaciones, entre las que destacan "el duraluminio" (1906). Para el año de 1932, Arne Örlander observa la capacidad de cambio de forma en la aleación oro-cadmio (AuCd), en la experimentación observa que la aleación es capaz de deformarse y permanecer en una forma temporal estando fría y para regresar a su configuración dimensional original al ser calentada.

En 1938 Greninger y Mooradian observan la apari-

ción y desaparición de fase martensita a medida que crecía y decrecía la temperatura de una aleación, en este caso cobre-zinc (CuZn). Llamo mucho la atención este acontecimiento, por lo que en 1951 Chand y Read observan el efecto de forma en otra aleación oro - cadmio (AuCd), este efecto consistió en que los materiales podían adoptar formas que recuerdan dependiendo de las temperaturas a las que son sometidos.

Una década después, William Beuhler en 1961 descubre el primer material con memoria de forma llamado "Nitinol". Dentro de la etapa experimental de este material, Beuhler buscaba obtener una aleación con alta resistencia a la corrosión, sin pensarlo obtiene un material con propiedades de memoria de forma y superelasticidad increíbles, ya que podía ser deformado fácilmente a bajas temperaturas, por otro lado observa que el incremento de la temperatura cambiaba su forma a una más dura, ejerciendo una fuerza estable.

- ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA (SMA - SHAPE MEMORY ALLOYS)

Al ser descubierto el Nitinol comienzan a surgir una serie de cuestionamientos sobre esta nueva aleación, por lo que para 1962 en los Laboratorios de Artillería Naval de EE.UU. se descubre el efecto de memoria de forma en las aleaciones de NiTi (Niquel-Titanio). Para 1963 Buehler descubre en la aleación NiTi el efecto de memoria de forma y superelasticidad, siendo evidente

al observar que el Nitinol puede ser deformado fácilmente a bajas temperaturas, pero al cambiar a altas temperaturas su forma regresa a su estado original, dando pie al comienzo de la fabricación en serie de esta aleación en 1965.

Las inquietudes continúan y sin perder interés en este gran descubrimiento para 1971 Raychem Corporation de Menlo Park, CA realiza la primer aplicación importante del Nitinol “los acoplamientos Cryofit” (ver figura 8), son acoplamientos hidráulicos de 3000 psi, empleados para unir tubería de titanio en Estados Unidos. Esta misma empresa ve futuro en productos realizados con las aleaciones con memoria de forma y desarrolla nuevos productos, para el año 1974 saca a la venta a “Cryocon” (ver figura 8), conectores eléctricos para sistemas de navegación de misil Trident,

empleados principalmente en misiles, municiones y aplicaciones navales.

Para el siguiente año, en 1975 la Marina Real británica especifica crear “Cryofit” de 6000 psi para ser empleados como acoplamientos en submarinos clase Trafalgar, para lo cual emplean la aleación NiTiFe y en 1977 se empiezan a utilizar en los buques. En 1980 Raychem desarrolla una nueva aleación “NiTiNb”, la cual tiene la capacidad de mantener las piezas a temperatura criogénica antes de la instalación. En el año de 1983 se producen tapas metálicas para las cabezeras de detonadores para AWRE UK/ROF hechas con la aleación NiTiFe.

En 1985 Raychem lanza el primer producto de NiTiNb llamado “Tinel Lock” (ver figura 8) utilizado en aplicaciones militares y aeroespaciales. Esta misma

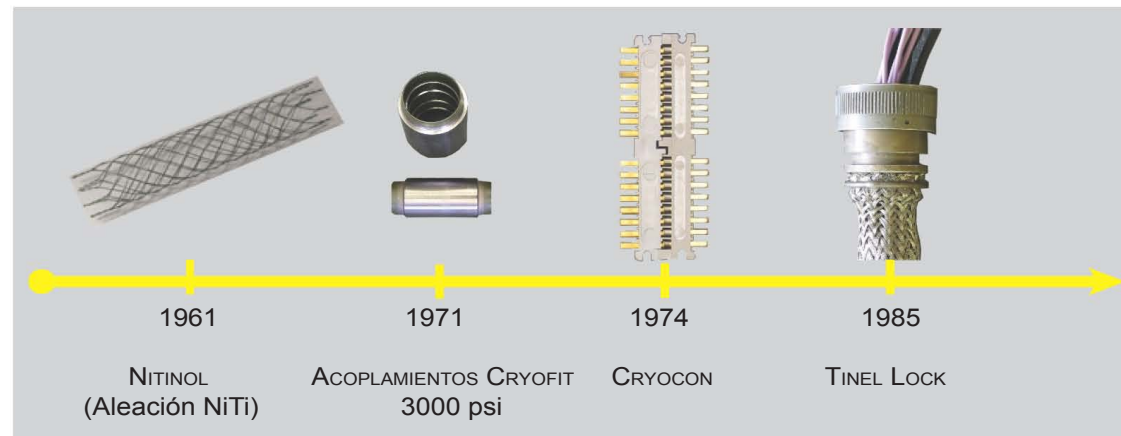


Figura 8. Primeros productos descubiertos como Aleaciones con Memoria de Forma (SMA).

El Nitinol da pie al estudio e investigación de nuevas aleaciones.

aleación en 1988 fue empleada en el montaje de acelerómetros piezoeléctricos, al año siguiente (1989) se emplea en los motores en líneas de guerra.

- POLÍMEROS CON MEMORIA DE FORMA (SMP - SHAPE MEMORY POLYMERS)

Para 1941 las palabras “memoria de forma” se dan a conocer en los polímeros por L.B. Vernon, a partir de patentar en Estados Unidos una sustancia dental de metacrilato ácido, esta cuenta con un grado de memoria ya que por su flexibilidad se le pueden generar algunas formas temporales las cuales al ser calentadas regresan a su forma permanente. En 1960, los polímeros con memoria de forma son reconocidos a partir de la patente del polietileno reticulado, siendo este empleado en la fabricación de tubos termo contraíbles.

El estudio de los polímeros en comparación con las aleaciones con memoria de forma tiene un auge importante en Japón (1984). Para 1989 la compañía Asahi Chem Ind Co Ltd comienza por patentar el poliuretano con memoria de forma (Ver figura 9).

Este tipo de material llama la atención de las automotrices entre las que destaca Mitsubishi, dentro de sus investigaciones logra patentar en 1990 la espuma de poliuretano con memoria de forma (ver figura 9). Una década después, en el año 2000 el Instituto de Tecnología en Massachusetts comienza un estudio profundo en donde se explica la forma de enseñar y fabricar este tipo de materiales, patentando “La composición base de los polímeros con memoria de forma, su uso y métodos de preparación”.

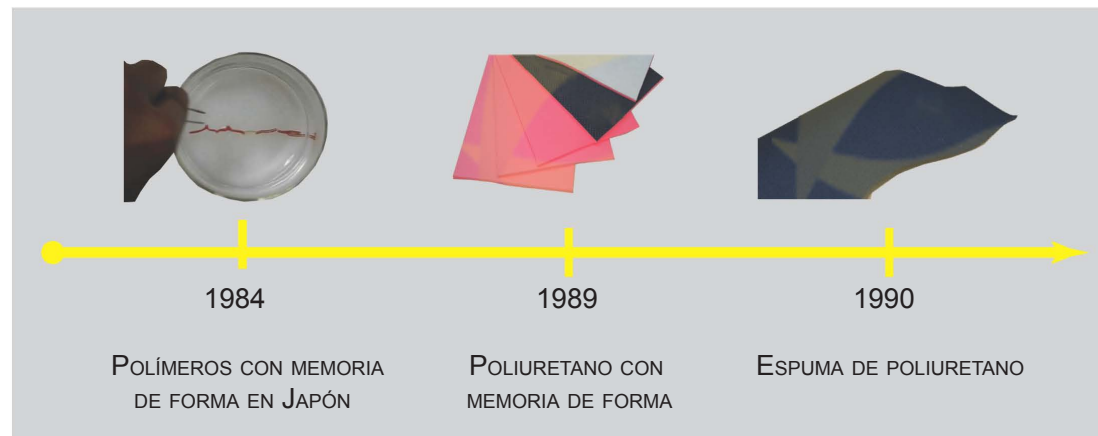


Figura 9. Primeros productos descubiertos como polímeros con memoria de forma.

El poliuretano da pie al estudio e investigación de nuevos materiales poliméricos con la capacidad de memoria de forma.

La exploración de este tipo de materiales también se realizó en Medicina, para el año 2003 la empresa SDGI Holdings Inc. patenta “los espaciadores intervertebrales”, tratándose de un tratamiento ortopédico como solución de los problemas de columna.

Por otro lado la empresa Aortech Biomaterials en el 2005 patenta un nuevo material “el poliuretano base silicio con memoria de forma”. Al año siguiente (2006) la Corporación General Motors patenta “el método de fabricación de los polímeros con memoria de forma”, este método modifica la conductividad y capacidad térmica del material. En el 2010 Livermore National Security (LLC), crea un “dispositivo médico con polímeros con memoria de forma”, el cual sirve como medio de transporte para eliminar la materia que no es necesaria en el cuerpo humano.



4

POLÍMEROS CON MEMORIA DE FORMA.

4. POLÍMEROS CON MEMORIA DE FORMA

Los polímeros con memoria de forma (SMP - Shape Memory Polymers) son una tipología de materiales que surgen a partir de la investigación de las propiedades de materiales de nueva generación. Son reconocidos por la relación que existe entre sus PROPIEDADES y ESTRUCTURA MOLECULAR. (ver figura 10).

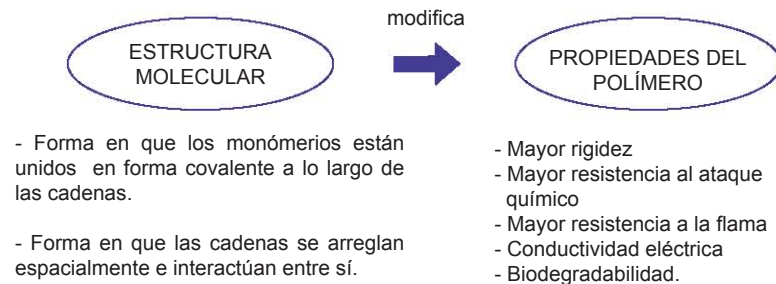


Figura10. Relación propiedades - estructura de los SMP.

Fuente: Realizado por Arq. Rosa María Espinoza Vazquez, 2012

Por lo tanto los cambios que sufren dependen de la conformación de su estructura y morfología del polímero, siendo resultado un cambio de estado, es decir, pasan de ser un polímero rígido a uno elástico.

4.1 ASPECTOS MACROSCÓPICOS

La memoria de forma en un polímero no es una propiedad intrínseca del material, ya que surge de la combinación y relación que existe entre la estructura molecular y el proceso de programación (ver figura 11) para obtener una forma temporal.

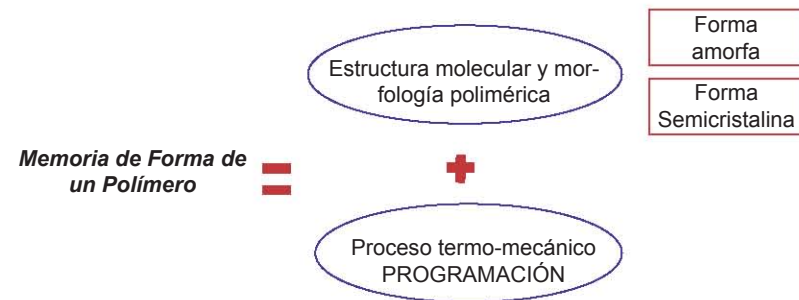


Figura11. Factores de los que depende la memoria de forma en un polímero.

Fuente: Realizado por Arq. Rosa María Espinoza Vazquez, 2012

- Estructura Molecular.

Un polímero con memoria de forma está formado por dos componentes:

1. Segmento amorfo o elástico: se encarga de mantener una alta elasticidad en el ciclo del efecto de memoria de forma en el material.

2. Segmento de transición o rígido: hace que el material cambie su rigidez dependiendo del estímulo al que sea sometido.

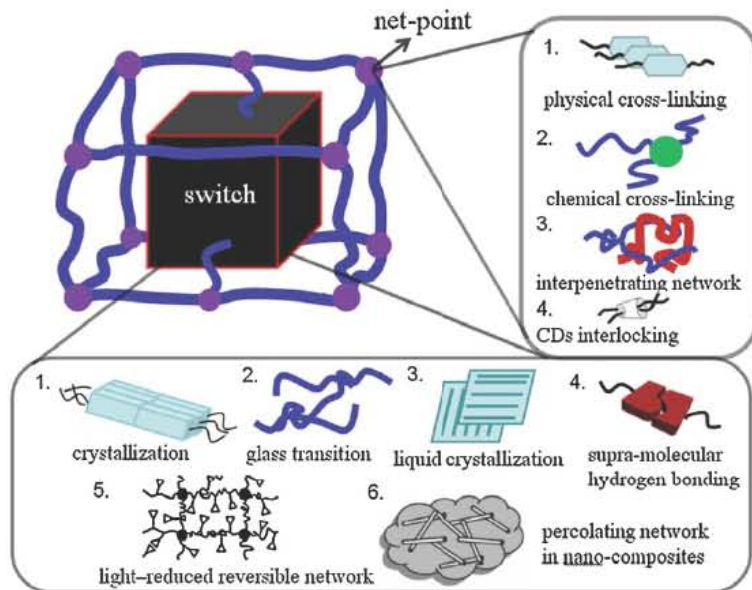


Figura12. Representación de un Polímero con Memoria de Forma.

El componente denominado “Net Point” es el segmento elástico y “switch” es el segmento reductor de rigidez.

Fuente: Artículo Recent Advances in Shape Memory Polymers, structure, mechanism, functionality, modeling and applications. [15]

Estos dos tipos de segmentos se conectan entre sí por medio de enlaces covalentes o interacciones moleculares, funcionando como moléculas sensibles a los estímulos externos para poder activar la memoria de forma.

El tipo de enlaces que conforman a un SMP se obtienen por:

- a) reticulación lineal
- b) polimerización
- c) poli-condensación de uno o varios monómeros, en donde uno de ellos debe ser tri-funcional.

4.2 PROCESO DE PROGRAMACIÓN

Un polímero con memoria de forma (SMP) ante la aplicación de un estímulo cambia su forma permanente “A” por una forma temporal “B” y viceversa. Es decir, este tipo de material tiene la habilidad de memorizar una forma macroscópica permanente, ajustarse a una forma temporal por condiciones específicas de esfuerzo (deformación) y temperatura, luego regresar a su forma original al aplicar un estímulo mediante el cual se produce una liberación o relajación del esfuerzo acumulado. La forma de deformación del polímero se genera a partir de fuerzas de tensión, compresión, doblamiento, entre otros.

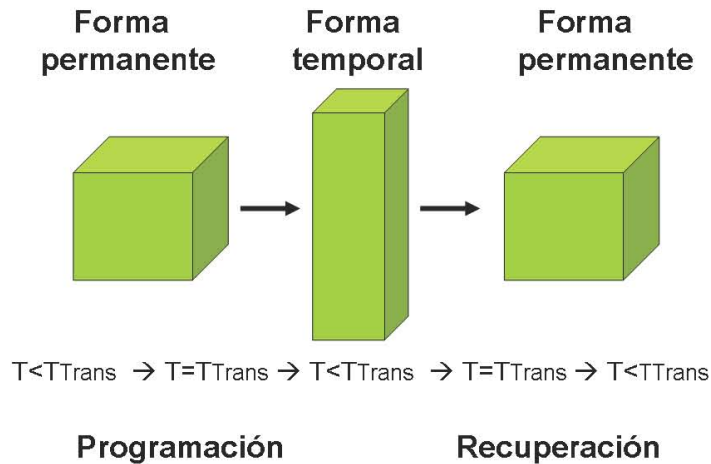


Figura13. Esquema del proceso de cambio de Polímero con Memoria de Forma.

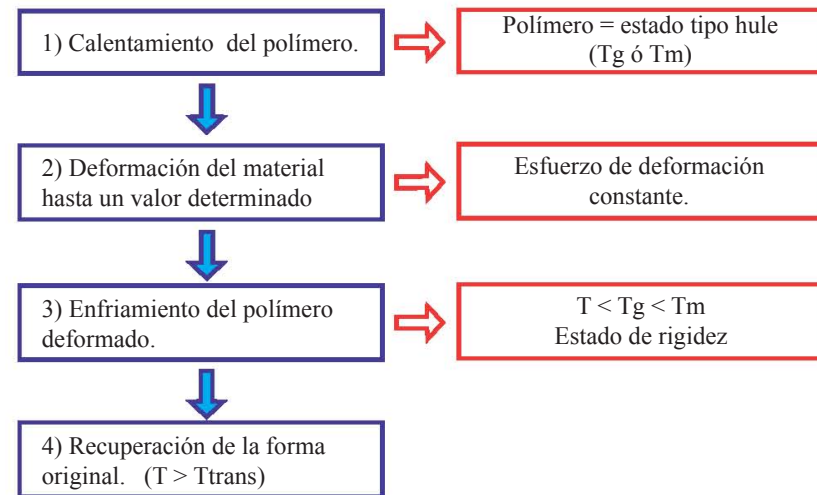
Fuente: Boletín No. 2 Polímeros con Memoria de Forma [6]

Una vez entendida la relación que existe entre la estructura molecular y la programación de un polímero, para la obtención de la memoria de forma en el material se tiene que tomar en cuenta “el aspecto macroscópico” definido como la búsqueda de sus propiedades visco-elásticas, las cuales se pueden obtenerse por medio de análisis termo-mecánicos y térmicos.

Un análisis termo mecánico determina la recuperación de la forma permanente (R_r), siendo resultado de la habilidad que tiene el material para memorizar la forma, por otro lado ajusta la forma temporal (R_f),

siendo esta la habilidad del segmento polimérico para mantener estable la deformación por cada ciclo termo mecánico.

El ciclo termo mecánico al que se hace referencia anteriormente, consiste en:



a) Mecanismos para lograr y recuperar la Memoria de Forma.

Como material inteligente los SMP y sus compuestos tienen un efecto de memoria de forma el cual es accionado por cambios térmicos. Es importante mencionar que los cambios no ocurren solo por el estímulo temperatura, ya que estudios recientemente realizados comprueban que se pueden accionar por otros estímulos externos (ver figura 14).

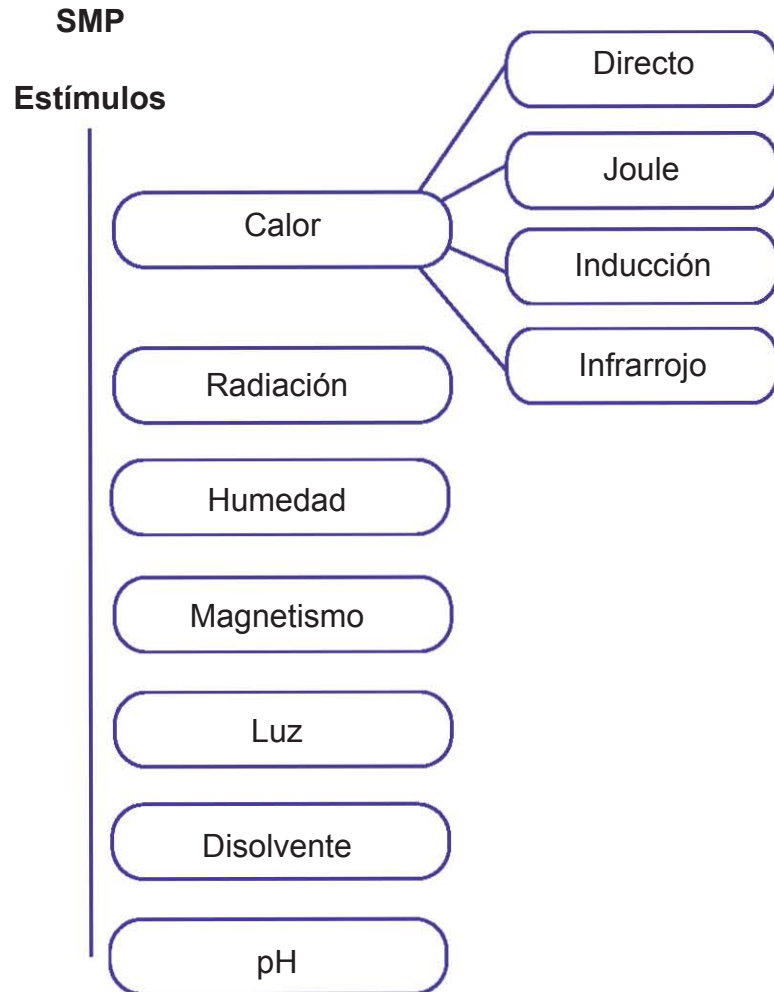


Figura14. Tipos de estímulos a los que responden los SMP.

Fuente: Artículo Review os stimuli-responsive Shape Memory Polymer. [20]

• Temperatura

Los polímeros con memoria de forma sensibles a los cambios de temperatura son llamados “termo sensibles”, siendo que el efecto de memoria es impulsado por un calentamiento térmico variando en el material la tensión y su volumen, siendo evidente una vez que el material es sometido al ciclo termo-mecánico.

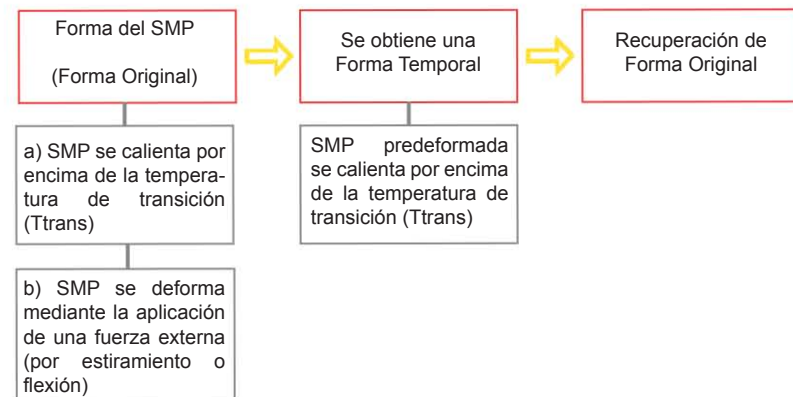


Figura15. Ciclo Termo-mecánico de un Polímero con Memoria de Forma Termo-sensible.

Fuente: Artículos. [20, 26]

Existen dos tipos SMP termosensibles y son:

a) SMP termoplástico reticulado físicamente

Este tipo de polímeros cuentan con dos componentes, uno de segmento duro y otro suave. El segmento duro se utiliza para originar la cadena de la memoria la forma, mientras que el segmento suave funciona como el controlador del cambio de la transición de forma en

en la cadena. La temperatura de transición es igual a la temperatura de fusión ($T_{trans} = T_m$). Entre ellos destacan los poliuretanos y poliéster.

b) SMP reticulado químicamente

Se llama así al proceso de post-polimerización formado a través de un enlace covalente, lo que ayuda al material a contar con una capacidad de doble forma, que puede estar formada por adición de polietileno y sus co-polímeros mediante reticulación de interacciones con radiaciones ionizantes.

Mientras tanto, la radiación de la red conduce principalmente a la escisión de la cadena molecular y la pérdida de propiedades mecánicas útiles. La temperatura de transición es igual a la temperatura de transición vítrea ($T_{trans} = T_g$).

De acuerdo a lo anterior, el efecto de memoria puede ser obtenido por dos formas diferentes:

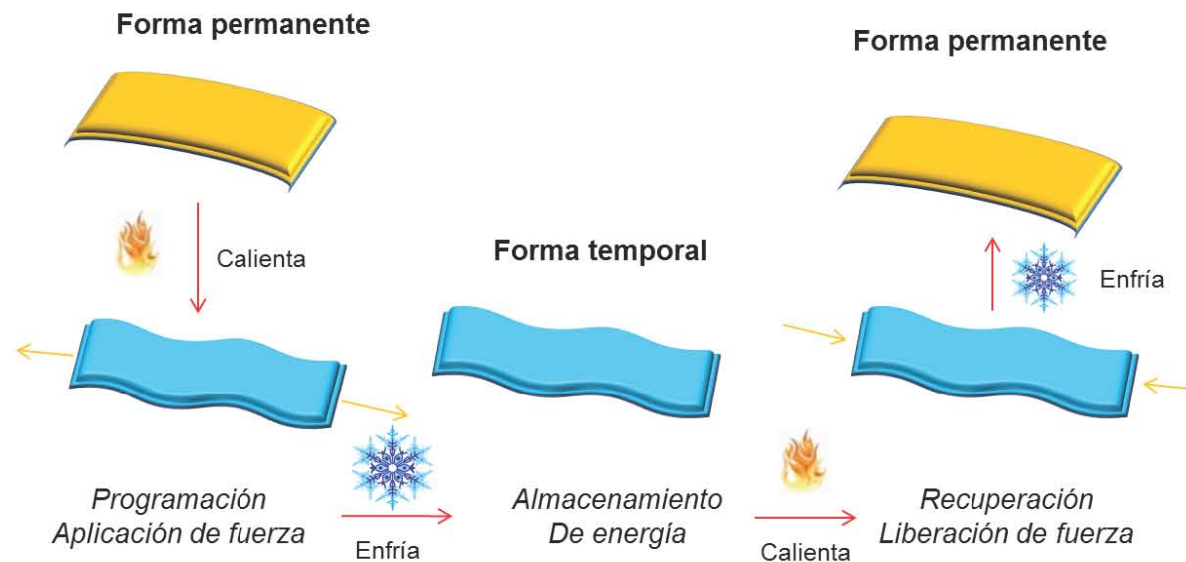


Figura 16. Polímeros con Memoria de Forma termo-sensibles.

Fuente: Esquema realizado por Arq. Rosa María Espinoza Vazquez, 2012.

1. Por transición vítrea:

Especialmente se emplean en polímeros con estructura reticulada físicamente, se caracteriza por que los polímeros en su estructura cuentan con una fase dura cristalina y un entrecruzamiento químico, por lo cual la deformación que experimentan se almacena en su estructura reticulada. La forma temporal es obtenida por estiramiento y flexión, la cual se mantiene al enfriarse por debajo de la temperatura de transición. Por otro lado, la recuperación de forma es dada una vez que el polímero se calienta por encima de la temperatura de transición. Un ejemplo de estos materiales con los poliuretanos, ya que el efecto de memoria lo presentan a nivel molecular.

2. En dirección del calentamiento:

Los polímeros son adicionados por conductores eléctricos, siendo que al pasar por la estructura cierto grado de corriente eleva la temperatura del polímero y lo activa. Por lo general la adición que sufren estos materiales es por medio de nano tubos de carbono y fibra de carbono.

4.3 EFECTO DE MEMORIA DE FORMA EN SMP.

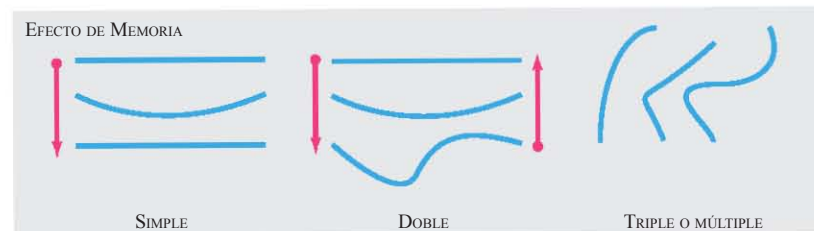
El rendimiento del efecto de memoria de forma en un polímero es afectado por:

4.3 EFECTO DE MEMORIA DE FORMA EN SMP.

El rendimiento del efecto de memoria de forma en un polímero es afectado por:

- contenido de segmento.
- peso molecular y cristalización de segmentos blandos.
- contenido iónico.
- condiciones termo-mecánicas.
- condiciones cíclicas: velocidad de deformación, fijación, tensión.
- condiciones de procesamiento.

Las condiciones antes mencionadas provocan que estos materiales cuenten con un tipo de efecto de memoria diferente, clasificándolos en tres tipos (ver figura 17).



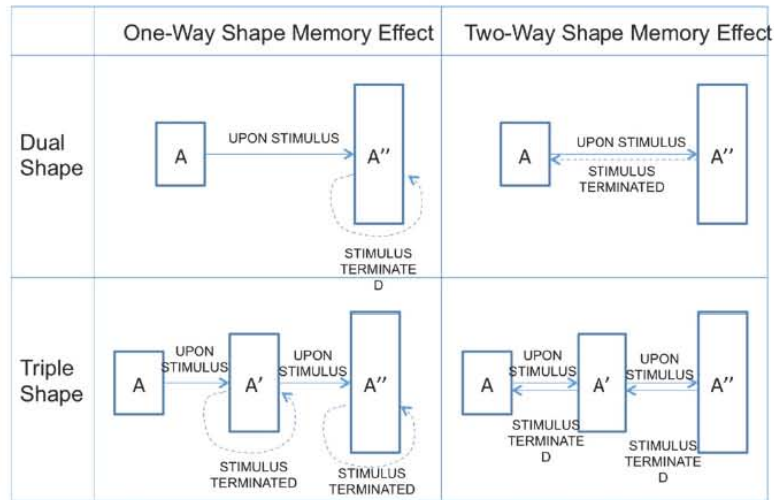


Figura17. Clasificación de los SMP de acuerdo al efecto de memoria.

Fuente: Artículo Recent advances in shape memory polymers. Structure, mechanism, functionality, modeling and applications. [15]

- Efecto de Memoria Simple

Su funcionamiento consiste en que la forma original de los SMP son predefinidas en el proceso de fabricación, las formas temporales pueden variarse dependiendo del proceso de programación de forma al que sean sometidos. Por lo general son evaluados por medio de:

- Investigación de tracción cíclica.
- Proceso de recuperación de tensión.

- Pruebas de flexión.
- Determinación de encogimiento.

- Efecto de Memoria doble

“Contracción reversible o de extensión” es el nombre que recibe el cambio de forma de un polímero por dos caminos. Aquí los polímeros son capaces de cambiar su geometría cuando se encuentran expuestos a un estímulo externo, principalmente sensibles a la temperatura y la luz. Este efecto se ha desarrollado en algunas aplicaciones como son: músculos artificiales, actuadores suaves y dispositivos ópticos, un ejemplo de SMP con doble efecto de memoria es LCE Azobenceno.

- Efecto de Memoria Triple

Los SMP son capaces de fijar dos formas temporales y recuperarlas de forma secuencialmente, es decir recuperan la primera forma temporal pasando a la segunda forma temporal y finalmente llegar a la forma permanente.

Para lograr este efecto, el polímero debe contar con una red de múltiples fases asociados a temperaturas de transición individual, por lo general estos polímeros cuentan con redes reticuladas las cuales se logran química o físicamente. El efecto de memoria se obtiene por medio de cambios de temperatura, ya que el polímero en vez de memorizar formas debe memorizar los rangos de temperaturas. Un ejemplo de estos polímeros son: los nano-compuestos.

4.4 PROPIEDADES DE LOS POLÍMEROS CON MEMORIA DE FORMA.

Los polímeros con memoria de forma se pueden fabricar en varias presentaciones, algunos de ellos son: películas delgadas, hilos, espumas, entre otros; dependiendo de su composición el tipo de material puede llegar a sufrir una deformación de hasta un 200%, siempre y cuando la temperatura de activación oscile entre los 30-260°C. Este ciclo que sufre se puede llevar a cabo “n” veces, por lo que se consideran materiales con acoplamiento termo-mecánico y con capacidad de recuperación elevada.

Tabla 1. Propiedades de los Polímeros con Memoria de Forma

Densidad (g/cm ³)	0.9 – 1.1
Modulo a T < Ttran (GPa)	0.01 – 3
Modulo a T > T tran (GPa)	(0.1 – 10) x 10 ⁻³
Deformación recuperable (%)	250-800
Temperatura de recuperación (°C)	-10 a 100
Esfuerzo requerida para la deformación (MPa)	1-3

Esfuerzo de recuperación (MPa)	1-3
Velocidad de recuperación	< 1 s – varios
Conductividad térmica (Wm 1K-1)	0.15 – 0.30
Biocompatibilidad y Biodegradabilidad	Pueden ser biocompatibles y / o biodegradables
Condiciones de procesado	<200° C), bajas presiones
Costo	bajo

- **Ventajas**

- Cambian su geometría inicial deformada a otra predeterminada para su uso.
- Son materiales más económicos que las aleaciones.
- Se pueden emplear aditivos para modificar sus propiedades.
- Permite el uso de tecnologías para prototipos rápidos.
- Permite la obtención de geometrías complejas.
- Cuenta con una amplia gama de diseño estructural, su programación suele ser flexible y por procesos individuales y de varias fases.

- Su diseño es relativamente sencillo, se lleva a cabo por medio de compuestos, mezclas y síntesis.
- Pueden ser materiales muy ligeros y ocupar un volumen amplio.

- **Desventajas**

- No se cuenta con modelos que expliquen el comportamiento termo mecánico que sufren estos materiales para poder obtener un mayor entendimiento.
- Existe una ausencia de datos de sus propiedades como son: resistencia mecánica, resistencia térmica, resistencia química, envejecimiento; todas estas se modifican de acuerdo a la composición del material.
- Son reactivos al entrar en contacto con otros polímeros.
- Son de reacción lenta ante un material actuador.

- **Tipos de polímeros con memoria de forma.**

Los polímeros que son considerados como materiales con memoria de forma son: las resinas epoxi, las resinas de poliuretano, el poliuretano, el polietileno, el poliestireno, el acrilato de estireno, el poli – isopreno, el polinorborneno, el poliglicol (PGA), el polilacturo (L-lactida) (PLLA), el policaprolactona (PCL) y los elastómeros termoplásticos iónicos. Estos últimos son el tipo de material que se estudiará específicamente

en este tema de investigación para evaluar su uso en Arquitectura.

4.5 APLICACIONES DE LOS POLÍMEROS CON MEMORIA DE FORMA EN LA ACTUALIDAD.

Los materiales con memoria de forma en especial las aleaciones han sido empleadas en áreas diversas como son la medicina, la hidráulica, electricidad, etc., sus principales aplicaciones son como pequeñas piezas auxiliares en un sistema. Propiamente en el campo de Arquitectura, en los últimos años se comienzan a desarrollar productos que se encuentran en la etapa de estudio, previo a ser lanzados al mercado, sin embargo encontramos ya algunas aplicaciones de materiales con memoria de forma en construcción, como son:

- **UNAM 2007: “Persianas Inteligentes”**

En el Centro Tecnológico de la Facultad de Estudios Superiores “FES Aragón” un grupo de universitarios, los profesores Jacinto Cortés Pérez y Alberto Reyes desarrollaron un modelo llamado “Persianas inteligentes”, este prototipo se caracteriza por el empleo de una mezcla metálica, funciona a partir de láminas hechas de aleación entre aluminio, cobre y berilio. La tecnología consiste en que las persianas se abren du-

durante el día cuando la temperatura es de 15°C y se cierran por la noche cuando desciende a 6°C, funcionando como un sensor y actuador de temperatura que regula su apertura.



Figura18. Persianas Inteligentes.

Fuente: (2013) Artículo Desarrollan persianas inteligentes útiles para el ahorro de energía. La crónica de Hoy. [22,42]

- Rob Ley & Joshua G. Stein (2009). REEF, Obra de arte. (ver anexo C)

“Reef” es un elemento que resulto de la investigación de la tecnología de materiales emergentes, analizados y dando respuesta a la duda sobre: ¿qué papel puede jugar en la reprogramación sensible de la arquitectura y el espacio público?. Es por ello que redefine el pa-

pel de la Arquitectura, apoyándose de la tecnología de materiales emergentes, brindando a los espacios la cualidad de “comportamiento”.

Con ello el público se involucra en los nuevos matices sociales revelados por la explosión de la percepción de “pared” que separa el espacio privado y público. La membrana sensible crea una amplia gama de recintos porosos y dinámicos capaces de producir respuestas flexibles y sofisticadas.



Figura19. Reef, obra de arte.

Vista exterior de la galería de arte. El diseño del espacio en conjunto con la obra de arte permite que exista una interacción entre el espacio exterior e interior.

Fuente: (2006) Reef [43,44,45]



Figura 20. Reef, obra de arte.

Obra de arte puesta colocada en exposición.

Fuente: (2006) Reef [43,44,45]

- Instituto de Tecnología de Georgia, (2012) Resistencia sísmica.

Se analiza un modelo empleando las aleaciones con memoria de forma para su uso en estructuras resistentes a terremotos. Su objetivo es que cuenten con la cualidad de recuperarse después de someterse a grandes cargas, el estudio se basa en formas complicadas donde se combinen cargas de tensión, flexión y torsión- ayudando a optimizar el uso de estos materiales ante un sismo. [24]

APLICACIONES LOGRADAS CON POLÍMEROS CON MEMORIA DE FORMA.

En comparación con las aleaciones, los polímeros con memoria de forma han sido estudiados para ser empleados como parte de una estructura, aplicaciones tecnológicas pequeñas que complementan a un todo. Pues dependiendo de la función del material es como se ha llegado a desarrollar diversas aplicaciones, como son:

Tabla 2. Aplicaciones logradas con Polímeros con Memoria de Forma

Función	Características	Ejemplos
Fijación	- Se libera la tensión almacenada al eliminar el estímulo externo, después de la deformación la forma se fija y se reduce una vez que la temperatura disminuye.	-Alambres para ortodoncia -Yesos para huesos rotos
Actuación	- Se pueden mover y controlar algún tipo de mecanismo o sistema (parecido a un motor) - Se impulsa a partir de energía externa, como por ejemplo: calentamiento, corriente eléctrica, radiación ó presión de aire.	-Músculos artificiales -Dispositivos actuadores de LCE azobenceno , convierten energía luminosa en energía mecánica.

Función	Características	Ejemplos
Despliegue	- Se puede cambiar un producto de su estado temporal a uno permanente.	-Stends expandibles -Espumas con PSM
Auto curación	Auto curación de materiales, es decir, se detecta el daño y se puede reparar en el sitio. La ventaja es que se extiende la vida del material y confiabilidad de su uso.	- Espuma sintáctica de 40% de micro-esferas de vidrio huecas.
Materiales de empaque	Se emplean como materiales para envasado debido a las películas termo-retractiles con las que cuenta.	-Materiales de contracción térmica como son: PE, PET, PVC

Por otro lado, la aplicación de los SMP en construcción se dirige a la creación de productos que han sido patentados y lanzados al mercado, como son:

- **CRG – Veriflex**

Son patentes de polímeros con memoria de forma lanzados al mercado por la empresa CRG. Son resinas de polímero, las cuales actúan en respuesta a un rango de temperatura entre -30° a 260°C, este tipo de material ha sido implementado en moldes de reuso, en la óptica y mecanismos en espacios exteriores.



Figura 21. Veriflex.

Fuente: Cornestone Research Group, Inc. 2003 - 2012 [41]

- **Tembo – polímeros con memoria de forma**

Esta marca es una familia de polímeros termoestables donde desarrollan productos con polímeros con memoria de forma, ya que se encargan de crear productos mediante la combinación de materiales, creando así un material compuesto reforzado con fibra. Desarrollan estructuras desplegadas, como por ejemplo “Rapdar” una estructura para un panel solar, reflectores de alta frecuencia, entre otros.

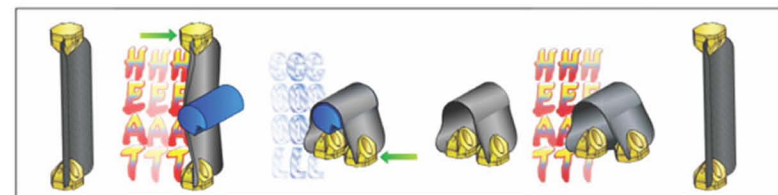


Figura 22. Tembo - rapdar.

Fuente: Composite Technology Development, Inc. 2001 - 2009 [40]

- **Hikumi – espumas con memoria de forma**

Las espumas son materiales que recuperan su forma inicial tras haber sido deformados por presión o por fuerza, se caracterizan por ser esponjosos y elásticos, son utilizados principalmente para amortiguación. Estos materiales son realizados con diferentes bases como el caucho, poliuretano y látex.

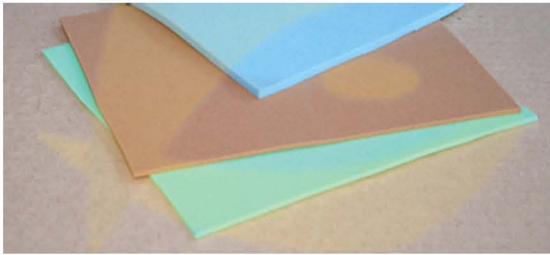


Figura 23. Espumas con memoria de forma hechas de caucho.

Fuente: Hikumi orto S.I. Productos Ortopédicos, 2012 [39]

En Arquitectura podemos encontrar el comienzo del estudio los SMP llevado a cabo por Alt N Investigación y Diseño, su inquietud se basa en la elaboración de sistemas que puedan emplearse en las viviendas los cuales cuenten con mecanismos de actuación naturales. Uno de esos estudios es el llamado:

- **Patrones Activos por Nick Puckett (anexo B)**

“Patrones Activos” es un estudio sobre el uso de polímeros con memoria de forma para ser empleados

como material en una fachada sensible. El material responde a cierto grado de temperatura, el cual es estudiado y determinado por el grupo de investigación, pudiendo ser modificado el rango alterando la proporción de la composición química del material.

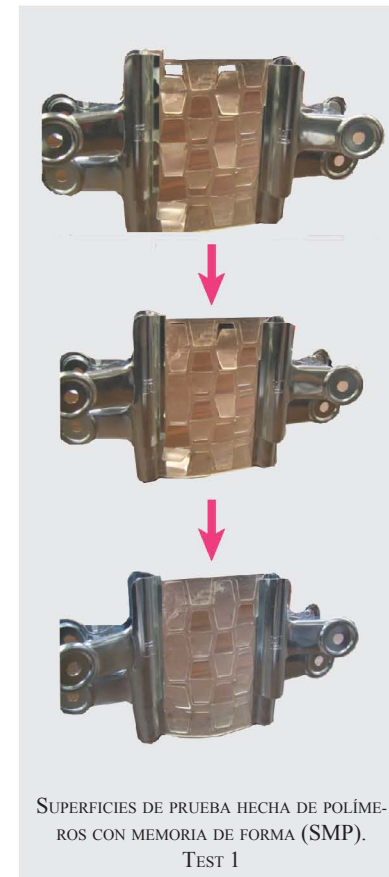


Figura 24. Patrones activos.

Fuente: AltN Research + Design, 2013 [38]



5

ELASTÓMEROS
TERMOPLÁSTICOS

5. ELASTÓMEROS TERMOPLÁSTICOS.

Hasta el día de hoy los cauchos al ser un material de carácter irreversible o termoestable no tienen posibilidades de ser reciclados provocando problemas al medio ambiente y a nivel económico. Por lo que se han creado elastómeros termoplásticos, caracterizados por ser un material de proceso termoplástico y de comportamiento elastomérico, por lo que pueden ser reciclados y procesados a partir de equipos empleados en la industria del plástico (moldeo por inyección, extrusión, soplado, etc.).

Se caracterizan por ser de alta deformabilidad elástica, obtenida a partir de las dos fases separadas con las que cuenta (ver Figura 25), una fase blanda (red polimérica de cadena flexible) con una temperatura de transición (T_g) que es baja y de elevada extensibilidad, y una fase dura o rígida (dominios que entrecruzan a la fase blanda) de baja extensibilidad, con T_g elevada y de carácter cristalino (T_m). Estas dos fases son termodinámicamente incompatibles entre sí.

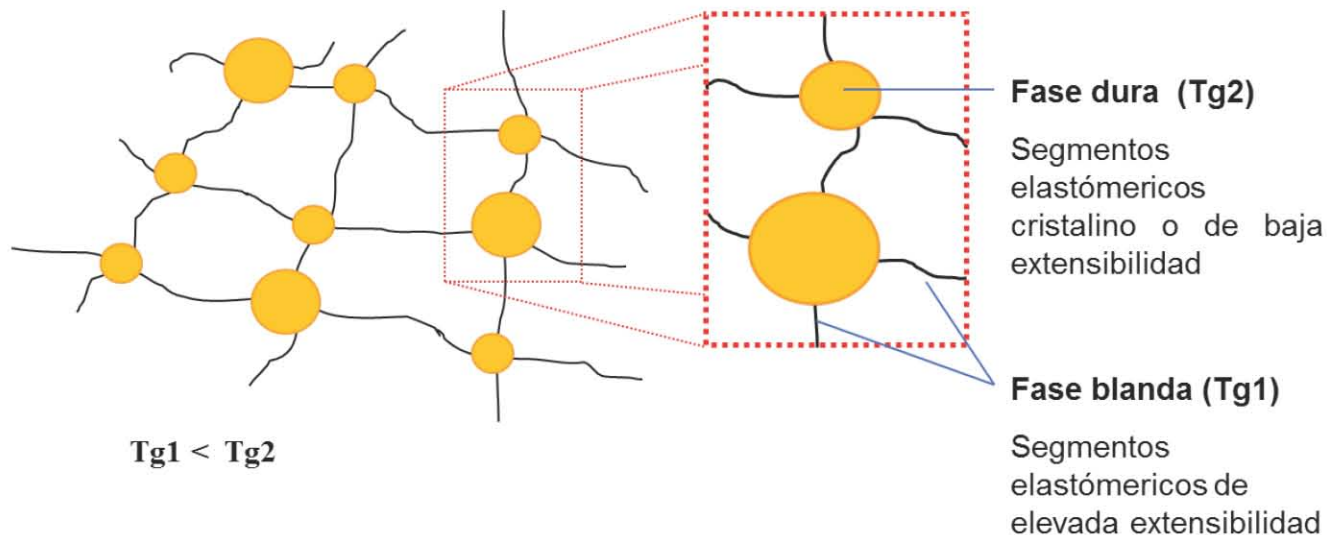


Figura 25. Fases que componen un elastómero termoplástico

Fuente: Realizado por Espinoza Vazquez Rosa María, 2013.

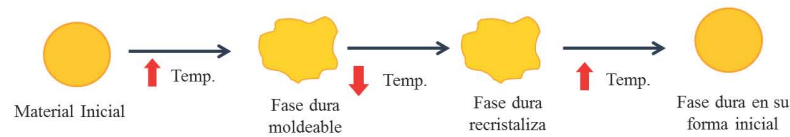


Figura 26. Fases que componen un elastómero termoplástico

Al entrar en contacto el material con un aumento en la temperatura, las interacciones en la fase dura se debilitan (fusión o aumento en la movilidad de las cadenas por encima de T_g si es amorfa), haciendo que el polímero se vuelva moldeable y al momento de enfriarse, el material recristaliza o vitrifica en su fase dura, volviendo a mantener su forma, por lo que adquiere propiedades de interés tecnológico.

Fuente: Realizado por Espinoza Vazquez Rosa María, 2013.

Las propiedades de este tipo de materiales varían debido al tipo de componentes, además de su naturaleza, proporción, tamaño, distribución y separación de las fases, llevando al material a una serie de aplicaciones diversas.

La clasificación general de los elastómeros termoplásticos se encuentra en función del micro-estructura del material, siendo esta la siguiente:

ELASTÓMEROS TERMOPLÁSTICOS

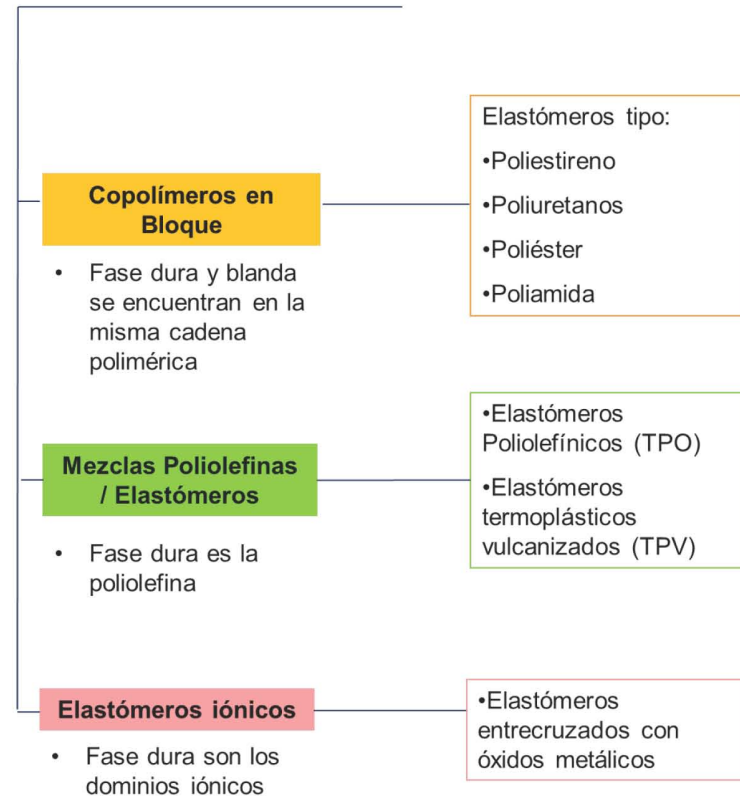


Figura 27. Clasificación de Elastómeros Termoplásticos (TPEs)

El consumo de polímeros de las dos primeras familias (copolímeros en bloque y mezclas poliolefinas - elastómeros) suponen el 90% de consumo total de TPEs.

Fuente: Alonso Malmierca Marta (2013). Elastómeros Iónicos con Memoria de Forma. Estructura, dinámica y Propiedades [2]

5.1 COPOLIMEROS DE BLOQUE

• ELASTOMEROS DE POLIURETANO CON MEMORIA DE FORMA.

Están formados por alternantes de poliésteres o poliéteres, amorfos y flexibles, y segmentos rígidos con una alta densidad de grupos uretano, producidos por acción de un diisocianato con un glicol de cadena corta. Los grupos uretanos presentan fuertes interacciones entre ellos por su carácter polar y por establecimiento de un tipo de enlace lábil, puentes de hidrogeno, entre

los hidrógenos de los grupos NH y los grupos CO de sendos grupos uretano, así se ordenan en dominios rígidos a temperatura ordinaria actuando como reticulación y elementos auto reforzantes.

Sus propiedades mecánicas y térmicas dependen de la proporción que existe entre los segmentos duros y blandos. Pues a mayor proporción de segmentos duros es menor la flexibilidad a temperaturas bajas y por lo tanto es de mayor dureza.

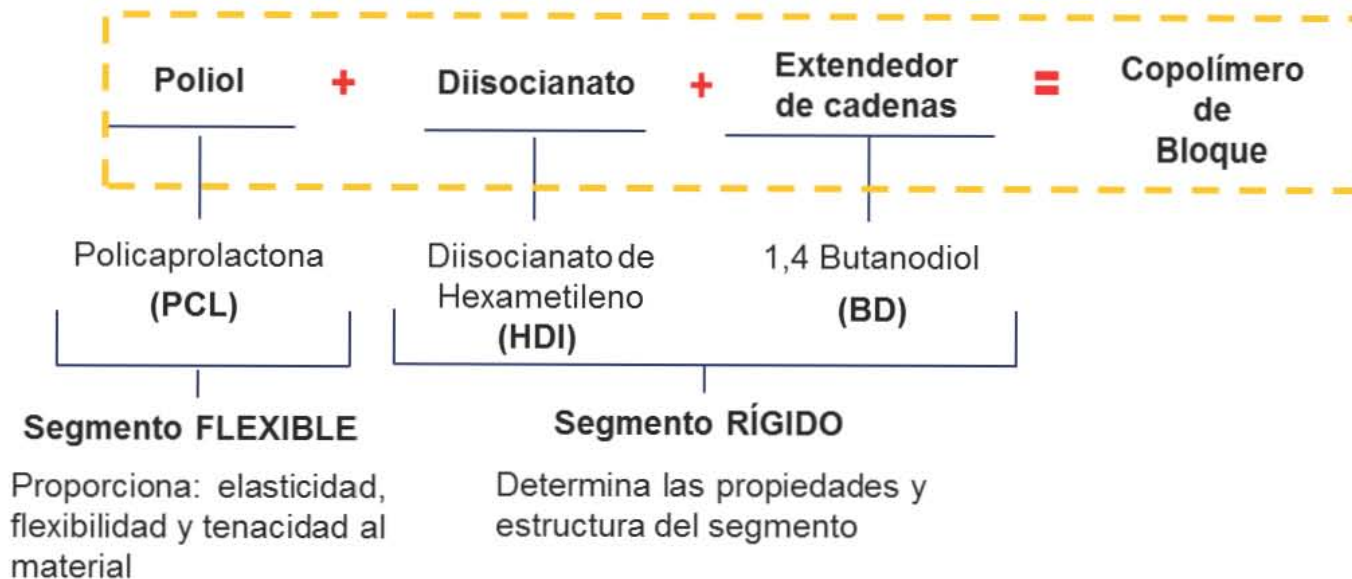


Figura 28. Composición de un Poliuretano con Memoria de Forma.

Fuente: Realizado por Espinoza Vazquez Rosa María, 2013.

a) Policaprolactona (PCL)

Polímero que forma parte de los poliésteres alifáticos, es materia biodegradable y semicristalina. Se caracteriza por ser de baja viscosidad, baja conductividad térmica y fácil procesabilidad. Esta materia prima brinda al SMPU resistencia a la degradación hidrolítica.

b) Diisocianato de Hexametileno (HDI)

Es un diisocianato alifático, ya que cuenta con dos grupos isocianato (-NCO) y una cadena compuesta de metilenos, se caracteriza por ser transparente y fluida. A los poliuretanos esta materia prima les ayuda a no ser degradados fácilmente por la luz ultravioleta, además de hacerlos resistentes a la abrasión.

c) 1,4 Butanodiol (BD)

Esta materia prima es un compuesto orgánico, líquido, viscoso e incoloro. Por lo general es utilizado como disolvente para fabricar plásticos elásticos, fibras y poliuretanos.

Para que un poliuretano pueda ser calificado como memoria de forma, su estructura debe contar con una segregación de fases, es decir, al realizar la mezcla de la materia prima antes mencionada se obtiene un poliuretano segmentado, este cuenta con segmentos rígidos o duros de las cadenas lineales, los cuales tienden a unirse unos con otros, de forma que dentro de la estructura se logra una red.

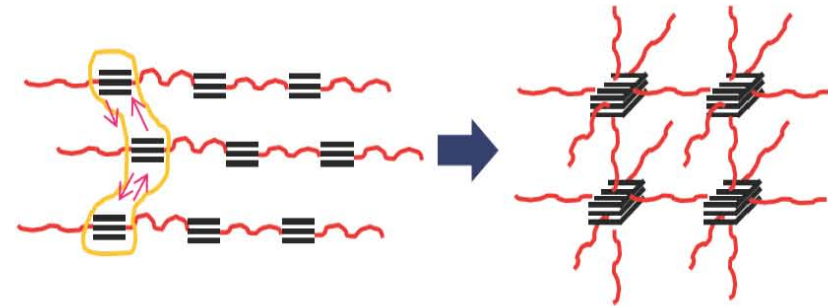


Figura 29. Segregación de fases en un poliuretano.

Fuente: Realizado por Espinoza Vazquez Rosa María, 2013.

Por otro lado, su composición debe contar con una transición reversible. En este caso la policaprolactona al formar parte del segmento blando dentro del poliuretano cuenta con la característica de ser un elemento flexible capaz de deformarse a una T_{trans} , al enfriarse o disminuir la T_{trans} esta materia cristaliza.

Una tercera condición es que se logra alcanzar que el material cuente con una estructura de esferas, donde el segmento duro se encuentre disperso, ya que al momento de ser deformado por el poco espacio con el que cuentan una fase y otra, el segmento duro puede también deformarse y ocasionar que la recuperación de forma no se logre de forma óptima.

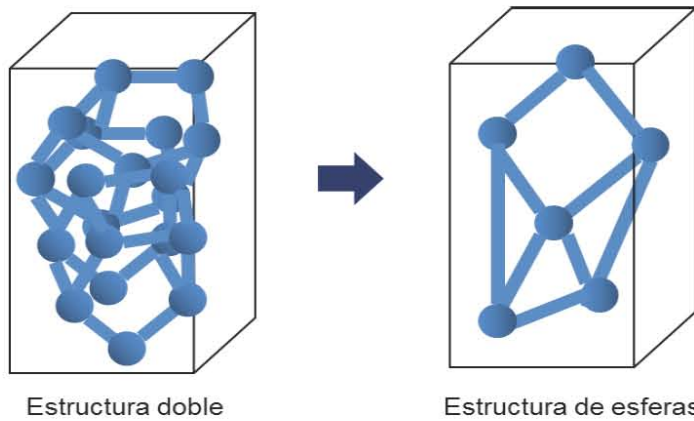


Figura 30. Estructuras de esferas en el Poliuretano.

Fuente: Realizado por Espinoza Vazquez Rosa María, 2013.

5. 2 ELASTOMEROS IÓNICOS

Los Elastómeros iónicos son aquellos materiales que cuentan con grupos capaces de ionizarse, debido a que se encuentran injertos en su cadena polimérica en cantidades menores a un 15% del total de material. Durante el proceso de vulcanización al que son sometidos se agrupan en nano-dominios los cuales son estabilizados o neutralizados por cationes metálicos.

Para que este tipo de material pueda tener la cualidad del efecto de memoria de forma debe estar compuesto por dos grupos, uno ionizable y uno neutralizador (Figura 31), los cuales al reaccionar formaran un entrecruzamiento entre uniones covalentes y amorfas.

Este tipo de materiales presentan propiedades físicas únicas debido a su microestructura característica, basada en pares iónicos (interacción entre cadenas más sencilla) al agregarse en una matriz elastomérica.

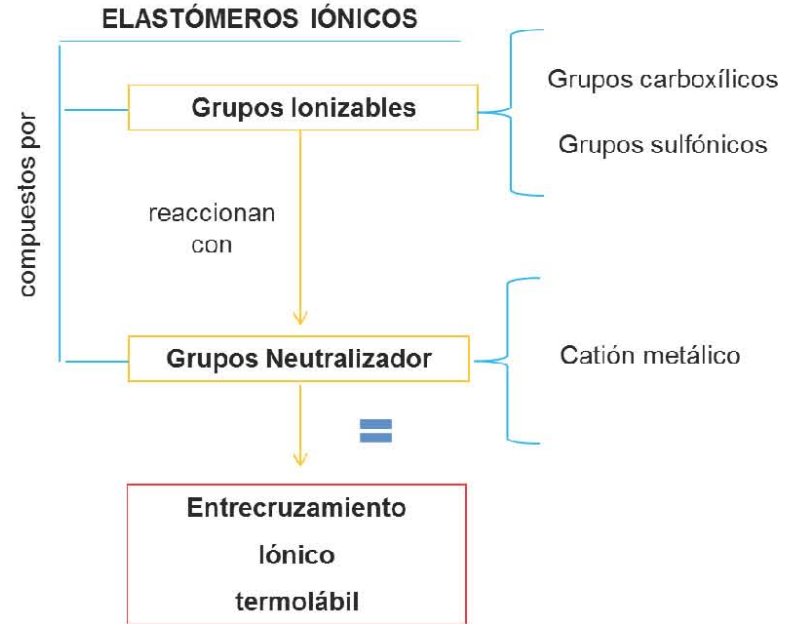


Figura 31. Conformación de los Elastómeros Iónicos.

Uno de los materiales empleados dentro del grupo ionizable es el XNBR - Caucho Nitrílico Carboxilado.

Se define como entrecruzamiento “termolábil” aquel que es sensible a la temperatura.

Fuente: Esquema realizado por Espinoza Vazquez Rosa María, 2013.

[2,12,13,21]

Las uniones iónicas formadas tienden a agruparse debido a su diferente polaridad con respecto a las cadenas hidrocarbonadas y actúan como entrecruzamientos de la red polimérica, en caso de estar en suficiente cantidad las agrupaciones pueden formar una fase segregada. La fase está formada por clusters los cuales cuentan con un núcleo iónico y polímero de movilidad reducida. El polímero atrapado cuenta con una transición térmica que se denomina transición iónica (Ti), la cual al aumentar hace que las cadenas tengan movilidad.

Al aumentar la temperatura se producen dos efectos en la red iónica. En primer lugar, el polímero atrapado dentro de las interacciones iónicas aumenta su movilidad y por otro lado los enlaces iónicos presentan un mecanismo dinámico llamado “ion hopping” el cual consiste en el salto de un par iónico desde una agrupación a otra, produciéndose una relajación de la cadena.

Por lo tanto, la condición que deben cumplir estos materiales es que a partir de una correcta conformación dentro del elastómero, es decir, la creación del enlace covalente térmicamente estable (responsable de la memoria del material) y una red iónica termolábil y reversible (responsable de la fijación de la forma transitoria) se logrará el efecto de memoria de forma. Con ello la red iónica tendrá la responsabilidad de ejercer una fuerza igual o superior que la fuerza elástica ejercida por la red covalente cuando el material se en-

cuentra en estado deformado (Ver Figura 32).

- **Elastómero iónico con Memoria de Forma = XNBR + DCP + MgO**

- a) Caucho Nitrílico Carboxilado (XNBR)

Dentro de los elastómeros iónicos el más empleado es el caucho nitrílico carboxilado (XNBR), en cuya síntesis se emplea una pequeña cantidad de ácido acrílico o metacrílico como tercer monómero. La presencia de estos grupos ácidos hace que estos materiales se puedan reticular por iones metálicos (Na^+ , Mg^{2+} o Zn^{2+}), ya que con ellos se forman dominios iónicos con propiedades termoplásticas que actúan como cargas reforzantes a temperatura ambiente y contribuyen a que estos materiales presenten elevadas propiedades de tracción.

- b) Peróxido de Dicumilo (DCP)

El peróxido de dicumilo es un peróxido orgánico que se utiliza en la vulcanización del caucho, ya que cuenta con la ventaja de poder producir enlaces carbono-carbono entre las cadenas del polímero, siendo este tipo de enlace el que se caracteriza por ser térmicamente estable.

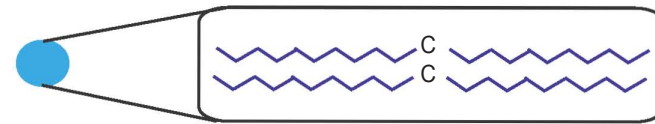
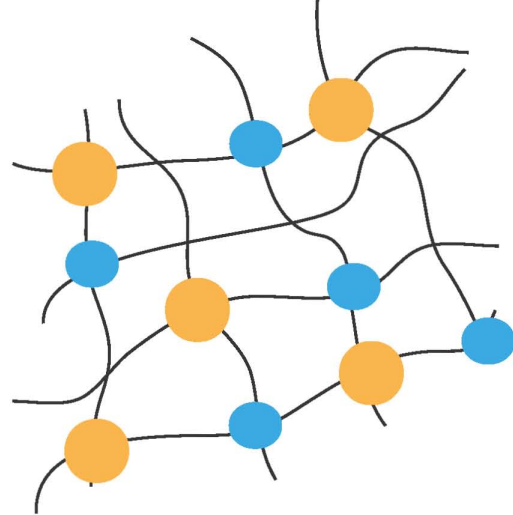
Los peróxidos en general dentro del proceso de vulca-

nización ayudan a mejorar las propiedades de los cauchos, por ejemplo mejorar su estabilidad al calor, mejorar su resistencia a la reversión, entre otros.

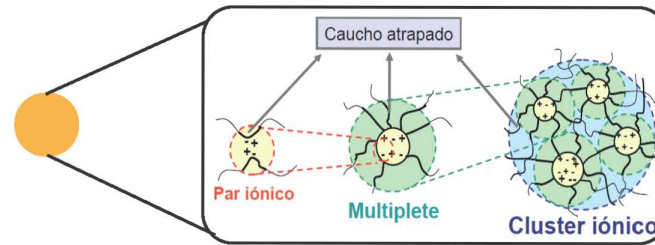
c) Oxido de Magnesio (MgO)

El óxido de magnesio tiene la capacidad de reaccionar con los grupos carboxílicos (-COOH) injertos en el caucho XNBR, por lo que se forman pares iónicos entre cadenas.

Elastómero Iónico con Memoria de Forma



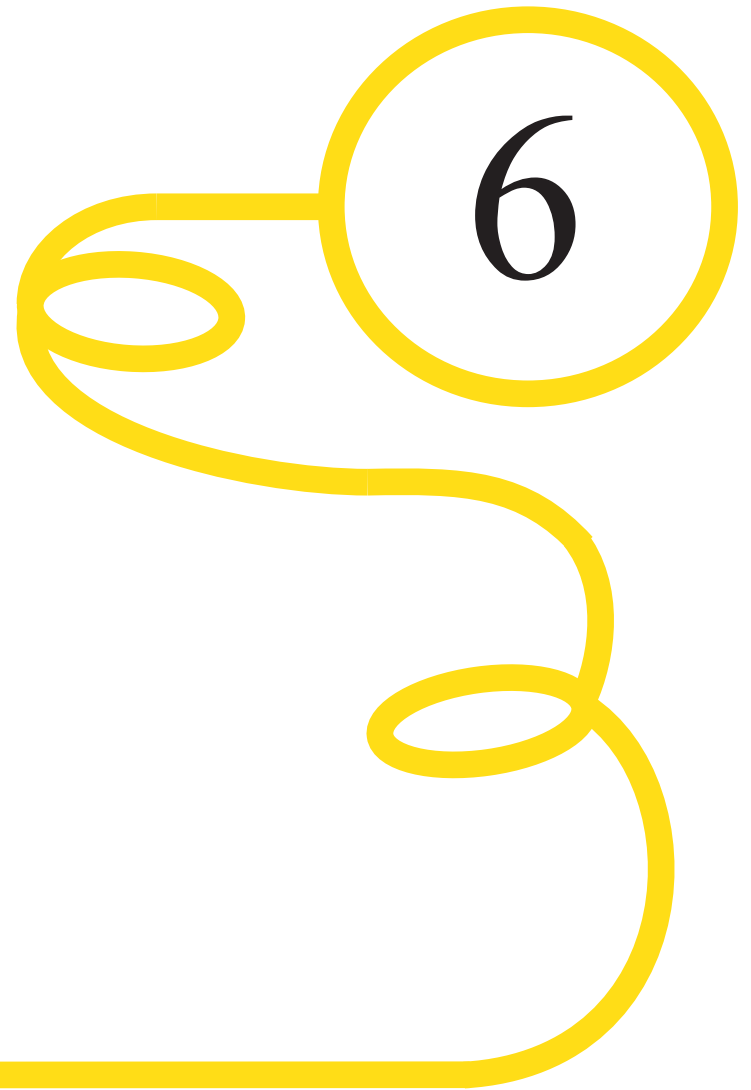
Red entrecruzada covalente
"Peróxido de Dicumilo"



Red entrecruzada iónica
"Óxido de Magnesio (MgO)"

Figura 32. Conformación de los elástomeros iónicos.

Fuente: Alonso Malmierca Marta. Elastómeros iónicos con memoria de forma. Estructura, dinámica y propiedades. 2014 [2,12,13,21]



METODO

EXPERIMENTAL

6. METÓDO EXPERIMENTAL.

El efecto de memoria de forma en un polímero no es una característica intrínseca del mismo, para ser logrado es necesario poner atención en tres aspectos: proceso, morfología y estructura. Con el procesado de la materia prima se obtiene la forma original de estudio, por otro lado la morfología y estructura del material serán los responsables de determinar su capacidad de deformación y fijeza de una forma temporal ante un tratamiento térmico adecuado, lo que implica que sea un proceso reversible.

Es por ello que la evaluación del efecto de memoria de estos materiales se llevará a cabo en tres etapas:

a. Definición de los Elastómeros con Memoria de Forma.

Análisis de la estructura que define el efecto de memoria en un elastómero, obtención de las propiedades físicas y elásticas (elasticidad, desgarró, dureza, abrasión, etc.), a partir de las cuales se respalda su factibilidad de uso ante una función específica, así como la definición del estímulo y parámetros a los que da respuesta. Por otro lado se entenderá la programación de memoria de forma obteniendo las variables que condicionan su comportamiento.

b. Comprobación de memoria de forma del material de estudio.

A partir del análisis de transiciones térmicas reversibles del polímero en estudio (transición vítrea (T_g), transición de cristalización/fusión (T_m) y transición iónica (T_i)) y el ensayo de memoria de forma se comprobará la capacidad de fijeza de una forma temporal y recuperación de la forma original.

c. Propuesta Arquitectónica.

Desarrollo de la propuesta de aplicación “Envolverte con memoria”, proceso, efecto de memoria que lo define, así como un análisis costo – beneficio.

6.1 MATERIALES

Los “Elastómeros con Memoria de Forma”, son aquellos polímeros definidos por ionómeros elásticos con propiedades de memoria de forma basada en redes iónico-covalente. Dentro de estos materiales encontramos los elastómeros iónicos (Caucho Nitrilico Carboxilado (XNBR) y Caucho Etileno Propileno adicionado con Anhídrido Maleico (EPM- MAn)) y poliuretanos elastómericos, la principal diferencia entre ellos

se debe a la naturaleza de la transformación térmica que activa el proceso de memoria de forma, por un lado en los cauchos iónicos es la pérdida de efectividad de las uniones iónicas mientras que en los poliuretanos se basa en procesos de fusión / cristalización.

6.2 DESARROLLO

6.2.1 Elastómero iónico – Caucho Nitrílico Carboxilado (XNBR)


El Caucho Nitrílico Carboxilado (XNBR) es un elastómero con memoria de forma de recién aparición, sus cualidades de efecto de memoria de forma son resultado de la red iónico-covalente con la que cuenta, dada a partir de las proporciones de materia prima que lo componen. En el siguiente apartado, analizaremos al material en las tres etapas en que consiste el método de experimentación.

Materia prima.

- Elastómero: Caucho Nitrílico Carboxilado (XNBR)
- Interacciones Covalentes: Peróxido de Dicumilo (DCP)
- Interacciones Iónicas: Óxido de Magnesio (MgO)
- Lubricante: Acido Esteárico

I. Definición de Materia Prima - Función.

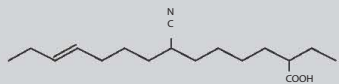
Caucho Nitrílico Carboxilado



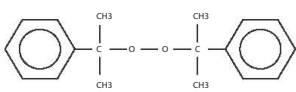




DEFINICIÓN.

El elastómero iónico con memoria de forma XNBR es un **elastómero terpolímero** (ácido acrílico o metacrílico como tercer monómero en pequeñas cantidades).

Esta compuesto por: 27% de peso de grupos acrilonitrilo (-CN) y 7% de peso de grupos carboxílicos



ELASTÓMERO	COMPONENTES
<p>CAUCHO NITRÍLICO CARBOXILADO</p> <p>Proviene de las síntesis entre el butadieno + acrilonitrilo + una pequeña cantidad de ácido acrílico o metacrílico, de forma que cuenta con un grupo carboxilo (-COOH). Se considera un material de resistencia mecánica alta y alta resistencia a la abrasión.</p>	
<p>LUBRICANTE</p>	<p>ÁCIDO ESTEÁRICO</p> <p>Mejora el procesado y dispersión en la mezcla.</p> 
<p>ENTRECRUZAMIENTOS</p>	<p>ENLACES COVALENTES</p> <p>Peróxido de dicumilo (DCP) – Fuerza de recuperación</p>  
	<p>ENLACES IÓNICOS</p> <p>Oxido de Magnesio (MgO) – Fuerza de fijación</p> 

II. Obtención de la dosificación de mezcla.

Un material es calificado como “elastómero con memoria de forma” cuando sus componentes tienen la capacidad de generar por un lado redes iónicas, las cuales cumplirán la función de fijar una forma temporal, y por otro lado redes covalentes, siendo estas las encargadas de memorizar la forma original. Estos dos tipos de redes son logradas en XNBR adicionando Óxido de Magnesio (MgO) y Peróxido de Dicumilo (DCP), los cuales generaran en la estructura entrecruzamientos iónicos y covalentes respectivamente.

a) Mezcla: XNBR + Acido Esteárico + MgO + DCP

A continuación se obtiene la proporción de MgO para una mezcla de 100 gr. necesario para formar una red iónica termolábil y reversible.

- Cantidad total de mezcla = 100 gr.

- Se requieren el 7% en peso de grupos carboxílicos, por lo tanto: COOH = 7gr.

Tabla 3. Peso Molecular COOH.

Elemento	No. moléculas	Peso atómico	
C	1	12.011	12.011
O	2	15.999	31.998
H	1	1.0079	1.0079
Peso Molecular Total =			45.0169 gr/mol

7gr

$$\text{No. de mol de COOH} = \frac{45.0169 \text{ gr/mol}}{7 \text{ gr}} = 0.155 \text{ mol}$$

$$2 \text{ mol COOH} - 1 \text{ MgO} \quad \frac{0.155 \text{ mol}}{2} = 0.0775 \text{ mol}$$

Tabla 4. Peso Molecular MgO.

Elemento	No. moléculas	Peso atómico	
Mg	1	24.305	24.305
O	1	15.999	15.999
Peso Molecular Total =			40.304 gr/mol

$$\text{gr. de MgO} = (40.304 \text{ gr/mol})(0.0775 \text{ mol})$$

$$\text{gr. de MgO} = 3.1235$$

Tabla 5. Dosificaciones finales para mezcla

Materia prima	Mezcla 1 (gr.)	Mezcla 2 (gr.)	Mezcla 3 (gr.)
XNBR	100	100	100
Acido Esteárico	1	1	1
Mg O	4	4	4
DCP	0.5	1	2

III. Obtención de la mezcla

a) Equipo:

- Bascula analítica
- Mezclador de cilindros (marca Comerio Ercole)

b) Procedimiento:

a. Preparación de la materia prima de acuerdo a la dosificación de mezcla obtenida. (ver tabla 5)

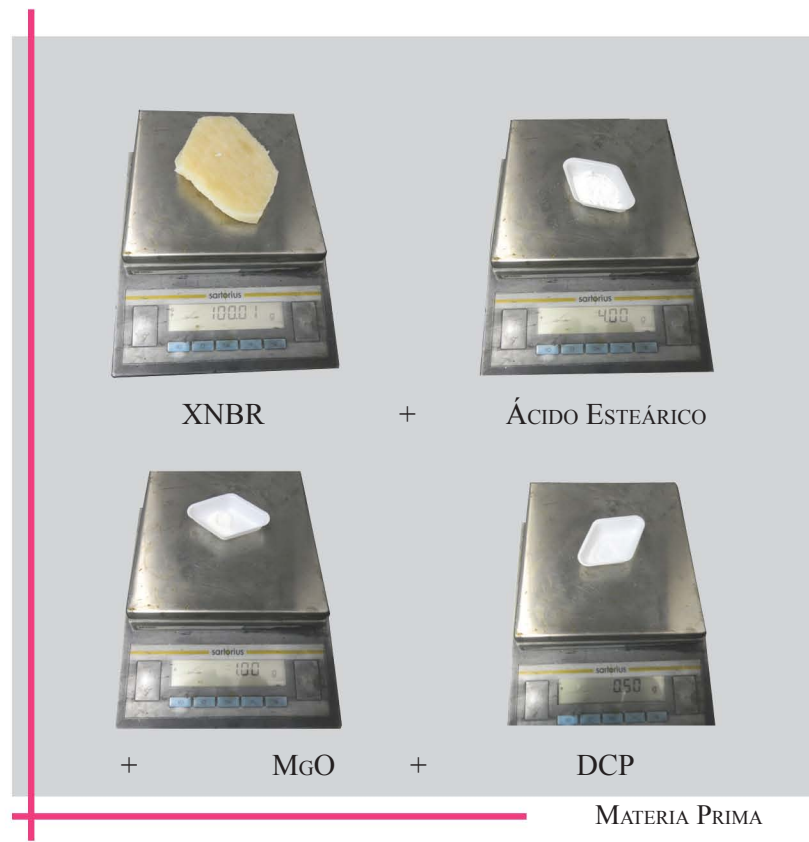


Figura 33. Preparación de materia prima.

b. Proceso de mezclado de la materia prima

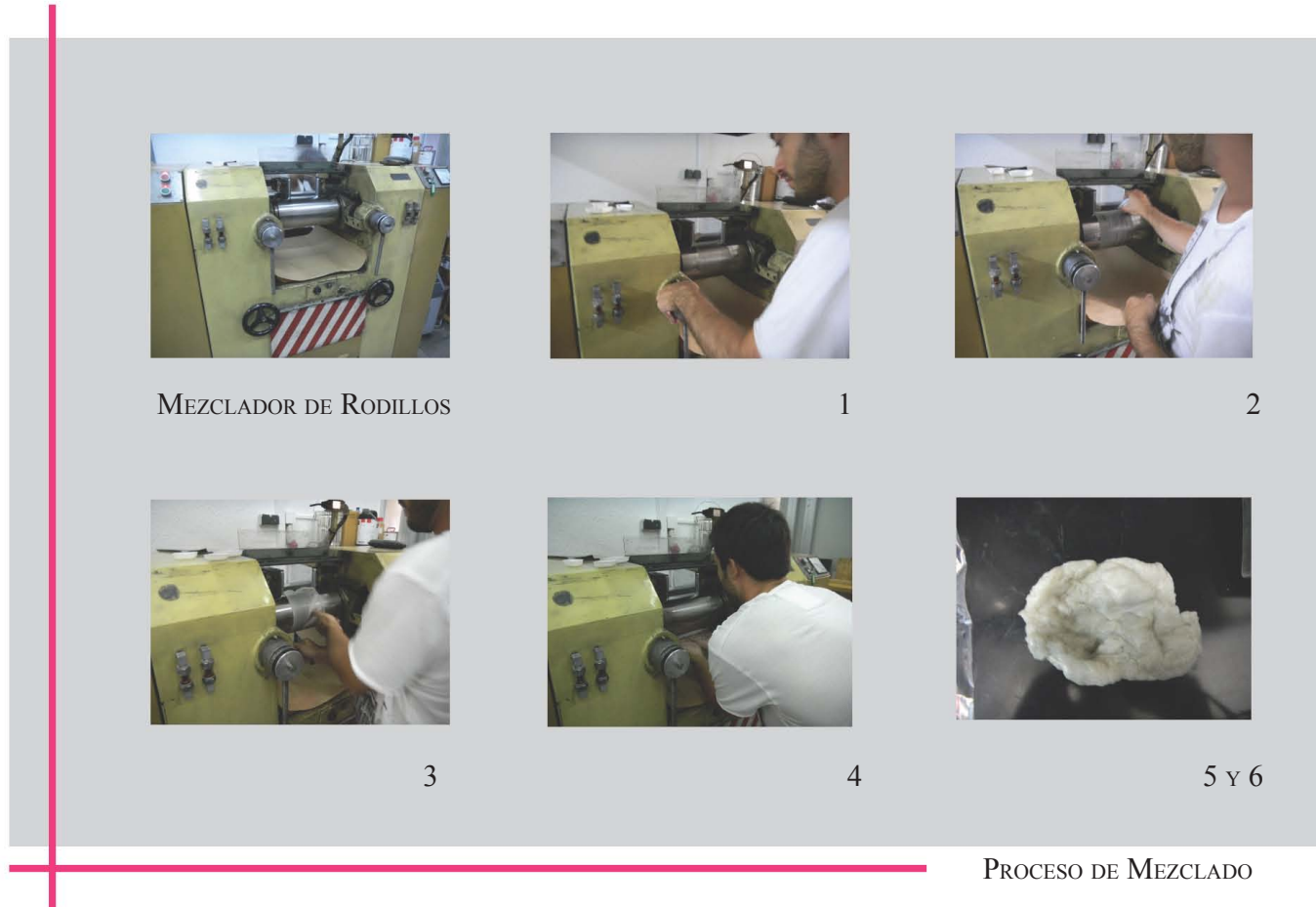


Figura 34. Proceso de mezclado

El proceso de mezclado consiste en unir los materiales en un mezclador de cilindros. Primero se moldea el caucho (1), después se adicionan los materiales siguiendo el orden: MgO, Acido esteárico y DCP (2), una vez mezclados se voltea el material 6 veces consecutivas (3). Al finalizar se enrolla el material y se pasa por los rodillos 5 veces consecutivas (4), enseguida se corta una superficie medianamente uniforme (5), la cual se identifica y refrigera para evitar el comienzo del proceso de pre-vulcanización (6). Nota: el cilindro debe contar con un sistema de enfriamiento para evitar que la mezcla empiece el proceso de pre-vulcanización.

IV. Obtención de Curvas de Vulcanización

Las curvas de vulcanización proporcionan la velocidad de vulcanizado en función del tiempo que debe tener el material para la activación de la reacción generada entre sus componentes. Por lo que, su análisis nos brinda el tiempo de vulcanizado óptimo de cada mezcla y la tendencia del plateau nos indicará si existe un cambio de propiedades del material por cada fracción de tiempo transcurrido.

a) Equipo:

- Reómetro de disco oscilante (Rubber Process Analyzer) RPA 2000

b) Procedimiento:



Figura 35. Obtención de Curvas de Vulcanización.

El proceso consiste en: una muestra cruda de 4 gramos (1) se coloca en la parte central del plato (2), el equipo es programado en función de la temperatura y tiempo a la que actuará el Reómetro(3), en este caso fue una temperatura de vulcanización de 160 ° C y tiempo de trabajo de reómetro de 120 min., finalmente se obtienen la curva de vulcanización (4) con la cual se determinará el aumento de la componente elástica del par de fuerzas en función del tiempo hasta alcanzar un Plateau en la curva de vulcanización.

V. Moldeo de Mezclas.

a) Equipo:

- Prensa hidráulica (Marca Gumix), presión 200 bares
- Moldes varios

b) Procedimiento:

La cantidad de material empleado y tiempo óptimo de vulcanización de cada mezcla se observa en las tablas 6 y 7.

Tabla 6. Cantidad de Material

Materia prima	Mezcla 1 (gr.)	Mezcla 2 (gr.)	Mezcla 3 (gr.)
XNBR	2.8	2.73	2.81

Tabla 7. Tiempo óptimo de vulcanizado por mezcla

Materia prima	Tiempo M1 (min.)	Tiempo M2 (min.)	Tiempo M3 (min.)
XNBR	39	32	31

Nota: M1, M2, M3 son las abreviaturas correspondientes a Mezcla 1, Mezcla 2 y Mezcla 3.

El cálculo del tiempo óptimo de vulcanizado se puede observar en el Anexo A.

El proceso de moldeo consiste en (ver Figura 36):

- Preparación de la prensa hidráulica y molde. Estos deben estar aclimatados con la temperatura de vulcanización, en este caso 160 ° C (1).

- Antes de colocar la muestra en el molde, este debe de limpiarse (2), sobre la base y la parte superior del molde se coloca una capa de Kapton (Poliamida – producto de Dupont), adicionando la cantidad de material (ver tabla 4) (3).

- Enseguida se introduce a la prensa el molde y vulcanizar al tiempo óptimo obtenido de acuerdo a la prueba previa “curvas de vulcanización” (ver tabla 5) (4), para al final obtener el producto.

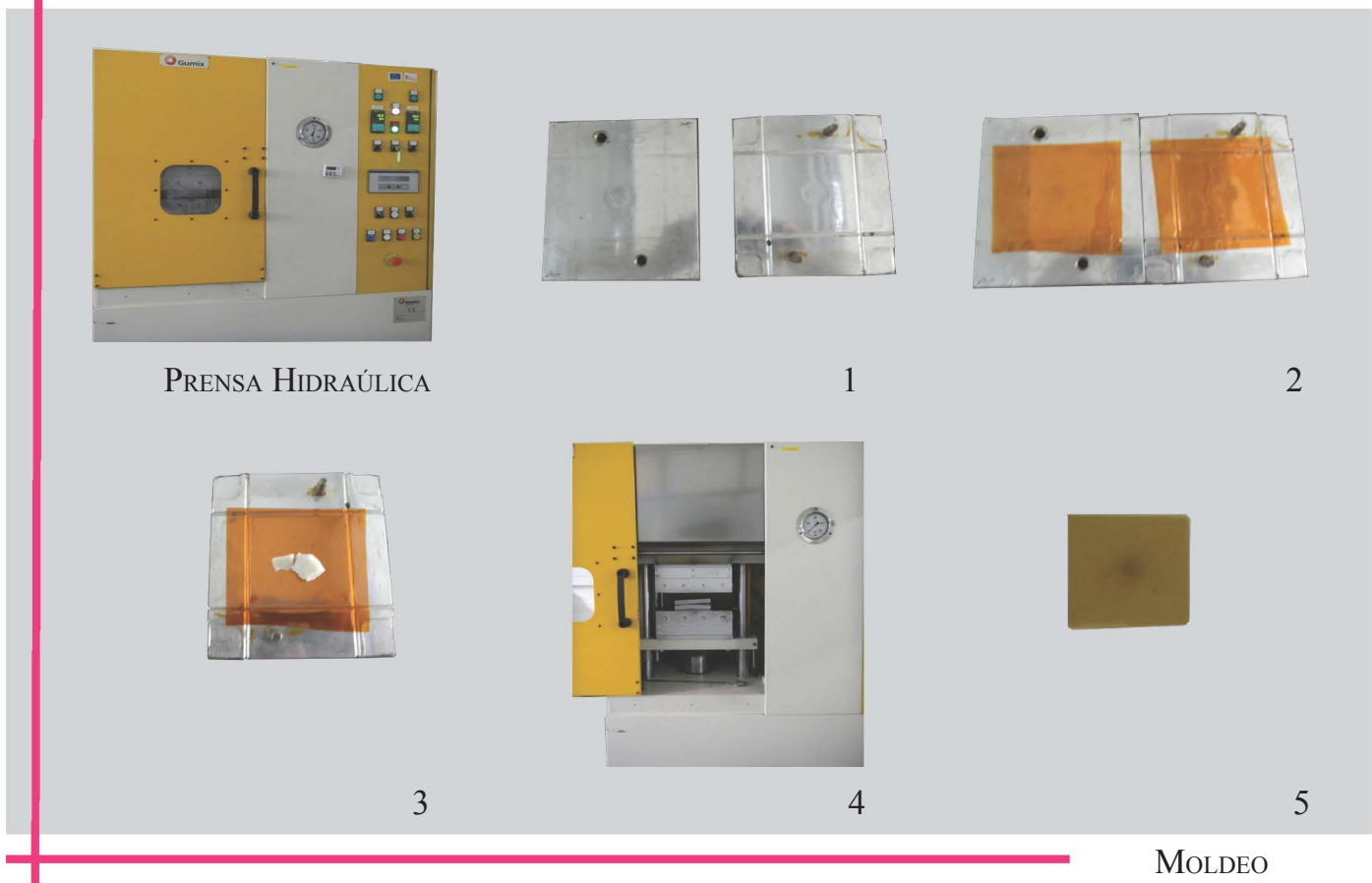


Figura 36. Moldeo de muestras.

VI. Programación de memoria de forma en XNBR.

El proceso de programación de memoria de forma consiste en la deformación de la forma original del material en una forma transitoria o temporal. Para que esta última sea estable el material deformado debe experimentar un calentamiento por encima de la temperatura de transición (T_{trans}) y posteriormente enfriarse para provocar la transformación estructural de forma adecuada. El proceso de transformación inversa (pasar de forma temporal a la forma original) se obtiene al calentarse el material a una temperatura igual o mayor a la de transición (T_{trans}), provocando que la fuerza elástica restaure su forma original.

a) Material:

- 1 Estufa (Horno eléctrico)
- 2 Soportes Universales
- 1 pistola para calentar (Marca Bosch)
- 1 calentador eléctrico (Marca IKA LABORTECHNIK)
- 1 cronometro
- 3 Dispositivos para deformación del material



Figura 37. Equipo empleado en la Programación de Memoria de Forma.

1. Estufa marca Heraeus (rangos de temperatura mayor a 100 °C), 2. Pistola de calor, cronometro, base metálica, termostato y soporte universal, 3. Dispositivo para deformación

b) Procedimiento:

1. Forma ORIGINAL – predeterminada por el proceso de moldeo y corte.

2. Programación de la forma TEMPORAL:

La deformación consiste en colocar al material en los dispositivos de deformación, donde serán sometidos a fuerzas de tensión o compresión. Posteriormente es calentado a la temperatura de transición iónica (Ti), (para el XNBR la $T_i=150^\circ\text{C}$ por 5 min), enseguida se somete a un proceso de enfriamiento a temperatura ambiente ($23 - 25^\circ\text{C}$). Al finalizar se desmolda el dispositivo y se observa la forma TEMPORAL obtenida.

3. Regreso a la forma ORIGINAL

Consiste en calentar el material por encima de su temperatura de transición iónica ($\geq 150^\circ\text{C}$). El tiempo requerido para regresar a la forma original, dependerá del contenido del elemento que genera enlaces covalentes, en este caso es el peróxido de dicumilo.

(Ver actividad “Programación de Memoria de Forma” en capítulo Resultados).

VII. Caracterización de las propiedades base del XNBR con Memoria de Forma.

El comportamiento de los elastómeros con memoria de forma ante un esfuerzo depende de la composición de su estructura, por lo que, el análisis de las propiedades físicas y elásticas determinarán tanto sus cualidades, como defectos.



Dentro de este apartado, se llevara a cabo el análisis de las propiedades de tracción, dureza, abrasión, desgarró, resiliencia de las tres mezclas de XNBR en estudio.

VII.1 Preparación de probetas

Las probetas de estudio empleadas en cada método de prueba son:

Tabla 9. Tipo de probetas de ensayo por prueba.

Tabla 8. Tipo de probetas de ensayo por prueba.

PRUEBA	TIPO DE PROBETA	CARACTERÍSTICAS	NORMA
Esfuerzo-Deformación en tracción		Probetas con forma de halterio. Espesor 2 mm ± 0,2 mm	UNE 53510
Dureza		Probeta con espesor mínimo de 4mm. Su diámetro debe ser el suficiente para realizar mediciones a 9mm del borde.	UNE – EN ISO 868
Desgarro		Probeta tipo pantalón, Espesor 2 mm ± 0,2 mm	UNE 53516-1
Resiliencia		Probeta de espesor 12.5 ± 0,5mm y diámetro percutor de 12.45 a 15.05 mm	UNE-EN 53 -604-90
Abrasión		Probeta cilíndrica, diámetro 16 ± 0,2 mm y mínimo 6 mm de altura	UNE-EN 53-520-90

VII. 2 Espesor de probetas de ensayo.

Para llevar a cabo los métodos de prueba esfuerzo-deformación a tracción y resistencia al desgarro es necesaria la determinación del espesor de cada una de las probetas.

a) Equipo

- Micrómetro

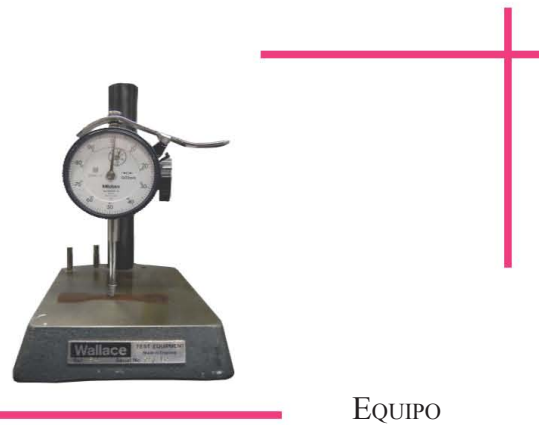


Figura 38. Micrómetro.

b) Procedimiento

Se determinan los espesores de cada probeta en tres puntos (centro, izquierda y derecha del punto central). El espesor final de ensayo es la mediana de los valores obtenidos.



Figura 39. Medición de espesor de las probetas de ensayo.

VII. 3 Métodos de Prueba

VII.3.1. Esfuerzo – deformación en tracción.

El método tiene como objetivo el análisis del rango de deformación por cada unidad de esfuerzo aplicado en una probeta.

a) Equipo

- Máquina de ensayo a tracción (ver Figura 40)

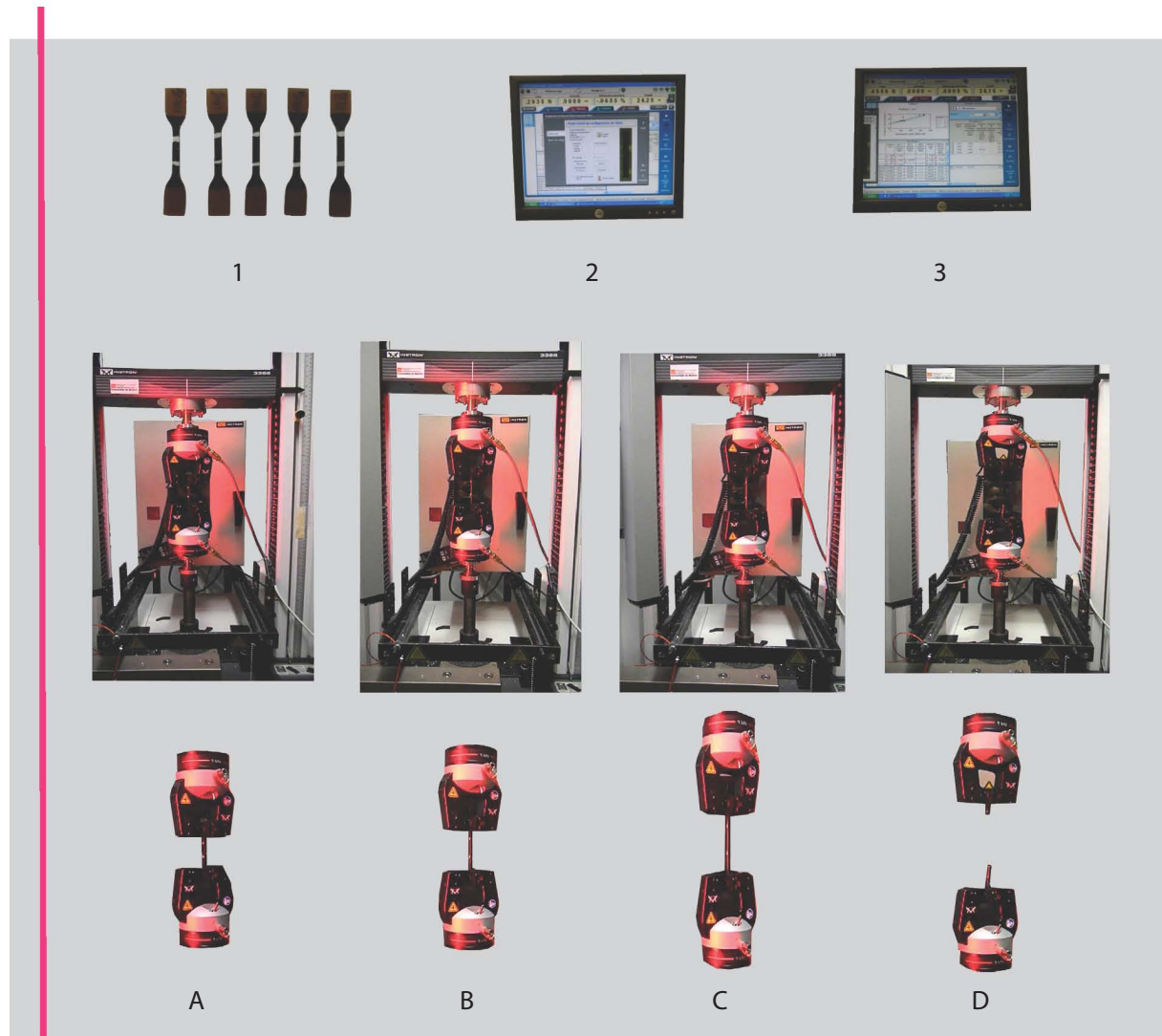
b) Procedimiento

La prueba de ensayo consiste en: se delimita el área de estudio de cada probeta de ensayo (1), con el fin de que el equipo pueda captarla mediante el video y así tener mejor visibilidad del comportamiento de la misma. Se coloca la probeta de ensayo en las mordazas cuidando que no exista deformación alguna (2), posteriormente se mide la longitud del área de referencia (3) y se colocan en el programa el valor del espesor de la probeta en mm. Una vez terminado el ensayo se grafican los resultados (4). (ver Figura 41).



EQUIPO

Figura 40. Instron - Máquina de ensayo a tracción empleada.



ESFUERZO - DEFORMACIÓN A TRACCIÓN

Figura 41. Procedimiento prueba Esfuerzo y deformación por tracción.

La probeta de ensayo experimenta un alargamiento, en tiempo y fuerza constante hasta alcanzar un punto de ruptura (ver imágenes a, b, c, d).

VII.3.2. Resistencia al desgarro

La resistencia al desgarro es la medida de la resistencia de un material que se le produce una laceración bajo los esfuerzos que ha de soportar en servicio o en su proceso de fabricación. El método empleado mide la fuerza necesaria para desgarrar completamente una probeta de ensayo.

El método de prueba se define como la mediana de la fuerza necesaria para propagar un corte en una probeta con forma de pantalón, dividida por el espesor de la probeta, actuando la fuerza en la dirección del plano de corte.

a) Equipo

- Máquina de ensayo a tracción

b) Procedimiento

El método de ensayo consiste en: se coloca la probeta en el equipo (1), se introduce el valor del espesor de la probeta de ensayo en mm (2), la probeta experimenta sin interrupción y a velocidad constante, una fuerza de tensión hasta ocasionar en ella un desgarro (3). (ver Figura 43)



EQUIPO

Figura 42. Instron - Máquina de ensayo a tracción empleada.

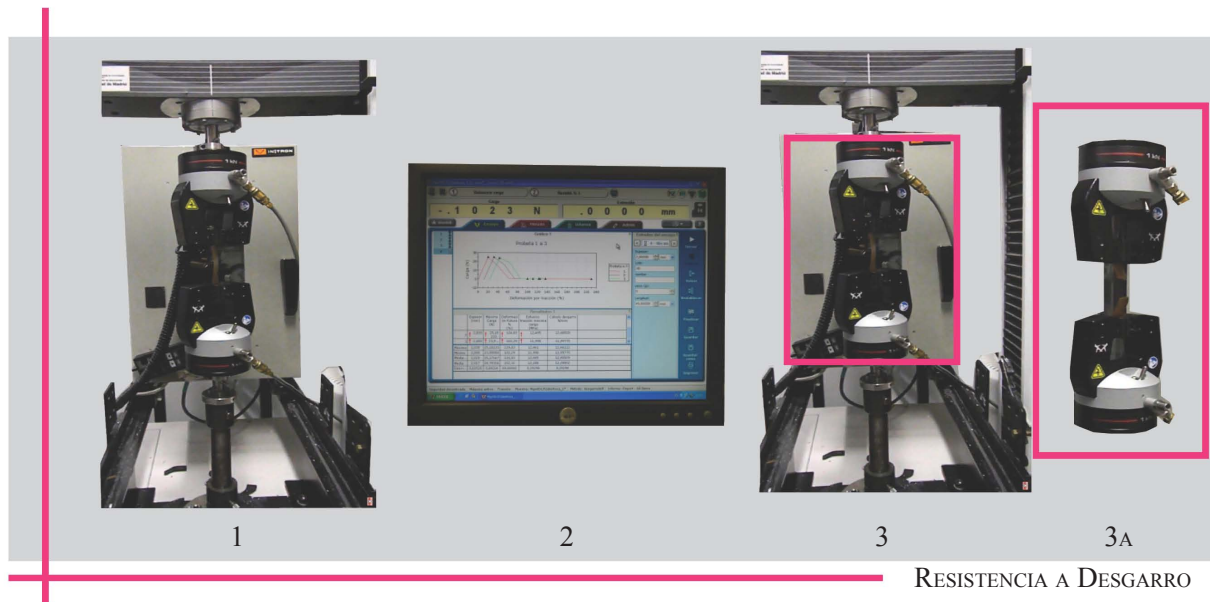


Figura 43. Procedimiento - Resistencia al Desgarro.

VII.3.3. Dureza

El método de prueba indica la resistencia de una superficie a ser penetrado y se encuentra relacionada con el módulo de elasticidad o módulo de Young. Pues bien, con ella se obtiene la profundidad de penetración de una punta troncocónica en contra de la reacción de un resorte metálico.

a) Equipo

- Durómetro Shore tipo A



EQUIPO

Figura 44. Durómetro Shore

b) Procedimiento

El método consiste: en un tiempo de 15 seg. (1), la probeta al ser colocada en la superficie de ensayo (2), experimenta una presión sobre su superficie (3). Este proceso se realiza cada 15 seg (4) y como mínimo se realiza 5 veces continuas en diferentes posiciones de la probeta. Al final se determina el valor medio de las lecturas. (ver Figura 45)

VII.3.4. Resiliencia

Para que un elastómero se deforme, se requiere de la aplicación de una cierta cantidad de energía, parte de la cual es devuelta cuando el elastómero recupera su forma original. La otra parte de la energía que no es devuelta como energía mecánica se disipa en forma de calor. Por lo tanto, la relación entre energía devuelta y energía aplicada se le denomina resiliencia. Cuando la deformación consiste en una penetración debida a un impacto simple, esta relación se le denomina resiliencia por rebote.

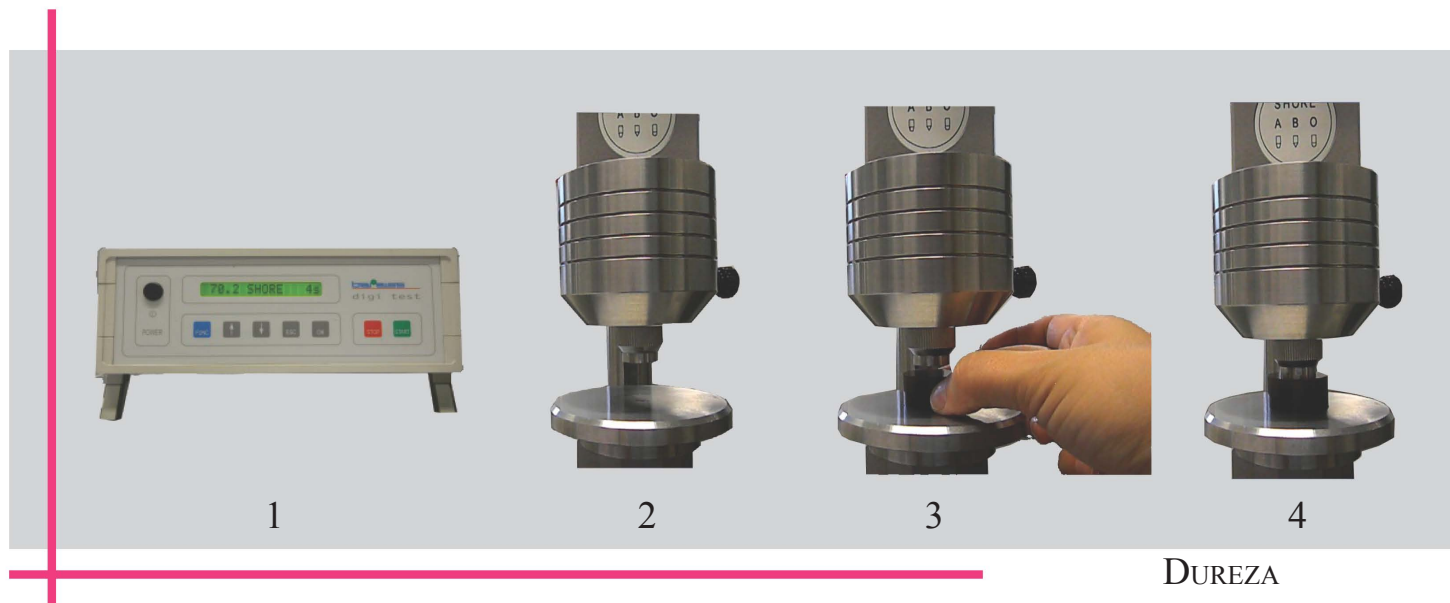


Figura 45. Procedimiento - Dureza.

a) Equipo

- Dispositivo mecánico oscilante a modo de péndulo. (Figura 46)

b) Procedimiento

El método de ensayo consiste en: una vez que el equipo ha sido tarado (1), la probeta de ensayo se coloca en el dispositivo (2), enseguida experimenta un golpe dado por el péndulo oscilante, repitiéndose por 6 veces de forma consecutiva (3). Es importante mencionar que el péndulo oscilante debe estabilizarse cada que inicie un ciclo nuevo (4), al final se registra la lectura al momento del impacto (5). (ver Figura 47)



EQUIPO

Figura 46. Dispositivo mecánico oscilante a modo de péndulo.

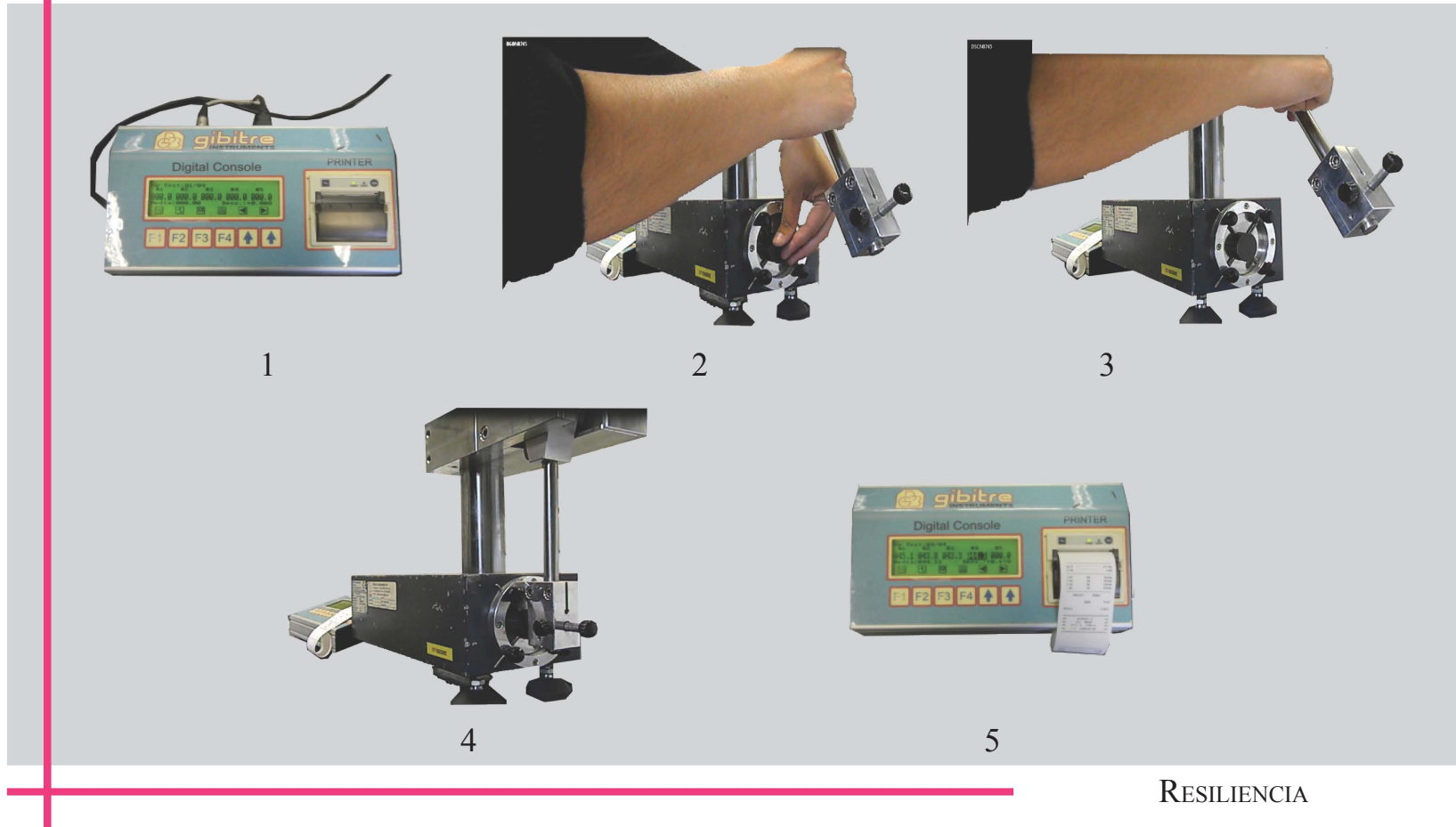


Figura 47. Procedimiento - Resiliencia.

VII.3.5. Abrasión

El método consiste en determinar la pérdida de volumen de una probeta cilíndrica, sometida a una acción abrasiva por frotamiento, bajo una presión prefijada y sobre una superficie determinada.

a) Equipo

- Abrasímetro de cilindro giratorio con tela abrasiva
- Balanza de densidades

b) Procedimiento

El método de prueba consiste en: cada una de las probetas de ensayo se pesa y se registran datos peso aire (W_1 aire) y agua (W agua) (1), enseguida se realiza el ensayo de abrasión (2), las probetas de ensayo al ser colocadas en el equipo (2a), experimentan un desgaste en la superficie de contacto (2b). Al ser retirada la probeta del equipo (2c) y se pesa obtienen el W_2 aire (3). (ver Figura 49)



EQUIPO

Figura 48. Balanza de densidades (izquierda) y Abrasímetro (derecha).

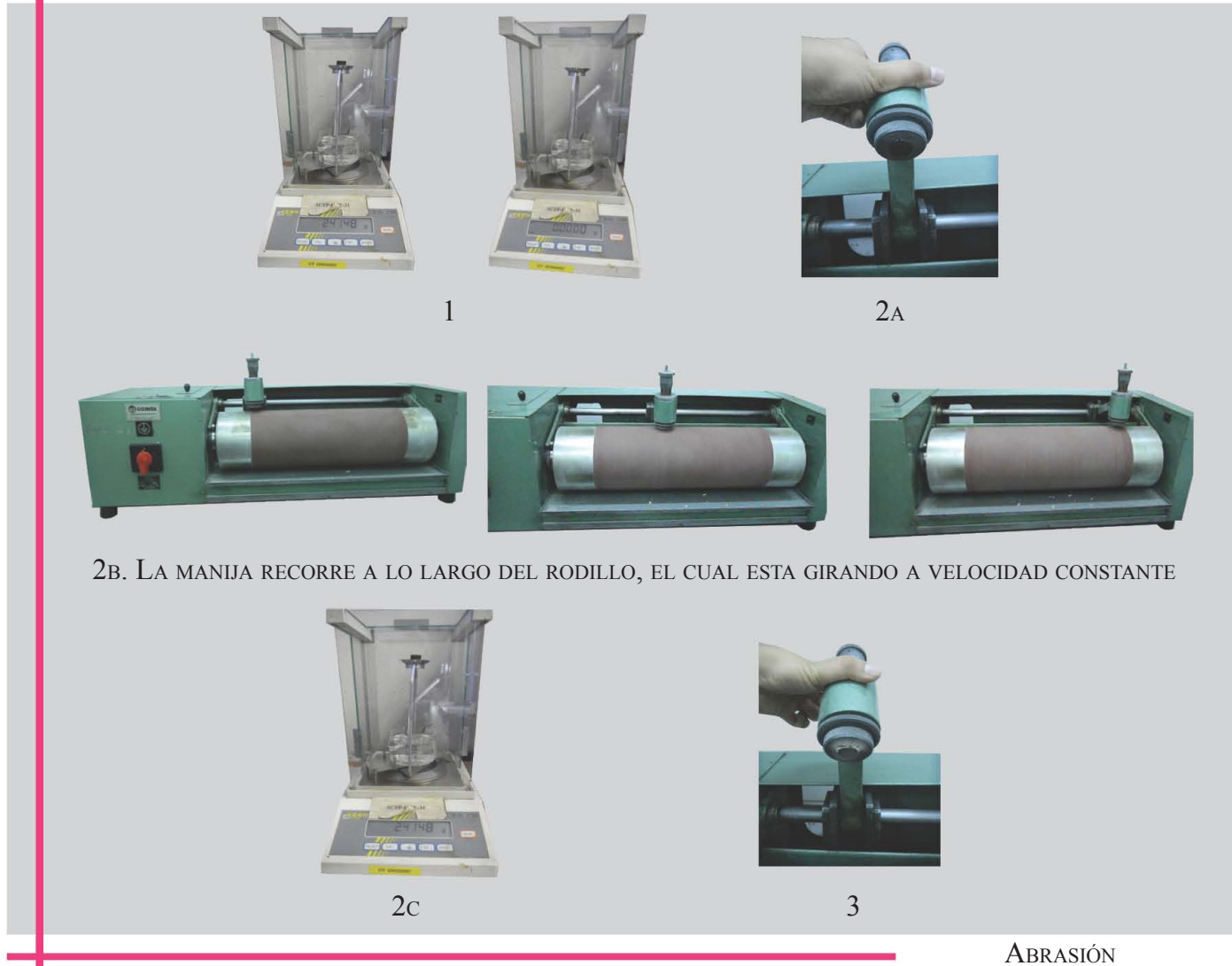


Figura 49. Procedimiento - Resistencia a la abrasión.

VIII. Análisis del efecto de memoria de forma – Aspecto cualitativo.

Como paso previo a evaluar la capacidad de memoria de forma de las mezclas de XNBR en un ensayo cuantitativo, se analizó esta característica de forma cualitativa a partir de someter una probeta de cada mezcla a diferentes fuerzas de tensión y observar lo que ocurría en él. El proceso que se siguió fue:

- Las probetas de superficie cuadrada (7.1 x 7.1 x 0.05 cm) se deformaron aplicando fuerzas de tensión en diferentes direcciones. (ver fig. 50).

Observaciones:

En la probeta de la mezcla XNBR con 0.5 DCP se logró alcanzar una deformación mayor en comparación con el XNBR con 2 DCP.

- Cada una de las probetas se deforma tres veces, obteniendo tres formas temporales distintas, posteriormente se llevó a cabo el proceso de recuperación, en el cual se midió el cambio en dimensiones originales (Dd) que pudo sufrir la probeta y el tiempo que tarda en regresar a su forma original (Tr). A continuación se presenta tres cuadros, en los cuales se exponen los resultados obtenidos en este análisis.

IX. Análisis del ciclo termo mecánico – Cuantificación del efecto de memoria de forma.

El efecto de memoria de forma se mide a partir del análisis del ciclo de memoria de forma al que se somete una probeta de estudio, este consta de dos etapas: la programación de la forma temporal y la recuperación de la forma original.

El ciclo de memoria de forma se define a partir de cinco pasos (ver fig. 51):

1. Fluencia Inicial:

La probeta de ensayo se calienta hasta alcanzar la temperatura de deformación (Td).

2. Deformación:

La muestra al estar en equilibrio térmico (se encuentra a la misma temperatura que su entorno) experimenta una fuerza de tensión constante de 0.1 N/min, hasta alcanzar el valor de carga programado. En este caso se deforman las muestras hasta alcanzar un 100% de deformación.

En este paso, las cadenas elastoméricas del material varían su configuración, los enlaces covalente dados por DCP se quedan en su posición inicial, mientras

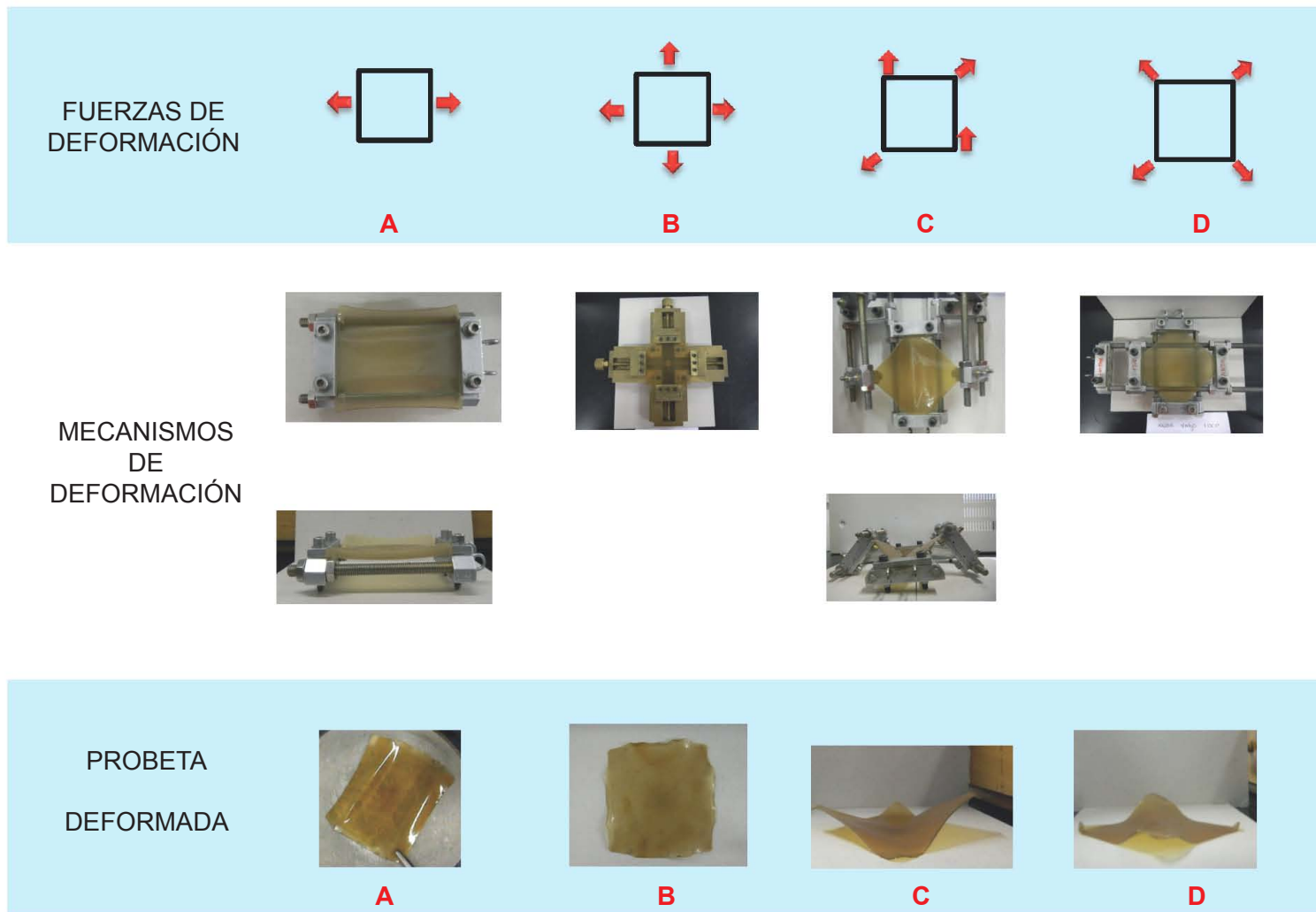


Figura 50. Cuadro resumen de los tipos de fuerzas de deformación, mecanismos empleados y formas temporales obtenidas en cada probeta.

que las cadenas iónicas aumentan su movilidad, aumentando su capacidad de deformación.

3. Enfriamiento:

La muestra una vez deformada se enfría hasta alcanzar la temperatura ambiente de 25°C, se dice que la muestra cuenta con una deformación ϵ_m . Las redes iónicas experimentan un proceso de congelación, alcanzando nuevas posiciones en el estado deformado.

4. Liberación de carga:

La muestra experimenta una liberación de carga, hasta alcanzar 0 N a una velocidad constante de 0.1 N/min. Al llegar a tener una tensión nula, la probeta de ensayo ha alcanzado una forma temporal con una deformación ϵ_u . Los dominios iónicos se encargan de fijar la forma temporal oponiéndose a la fuerza retráctil de los enlaces covalentes, los cuales quieren recuperar la forma original, a esto le llamamos, “el estado conformacional de máxima entropía” que la probeta ha alcanzado.

5. Recuperación de forma original:

Para llevar a cabo la estimulación de la memoria de forma del material, se aumenta la temperatura del medio y la muestra, hasta alcanzar su $T_d = 150^\circ\text{C}$. La

temperatura se eleva de forma constante (5°C/min), provocando la recuperación de la forma original a tensión “0 o nula”. En este paso, se provoca la relajación de las cadenas y se obtiene la máxima recuperación de forma (ϵ_p).

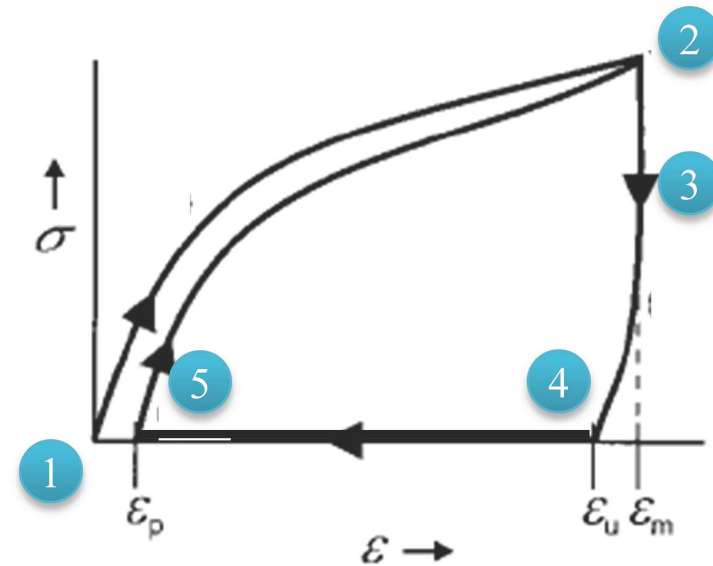


Figura 51. Diagrama esfuerzo - deformación, para el análisis del efecto de memoria de forma del material de estudio.

Para la evaluación de la capacidad de memoria de forma del material, se obtienen dos valores, la relación de recuperación de la forma original (R_r) y la relación de fijeza (R_f) de la forma temporal.

Formula – Relación de recuperación.

$$R_r(N) = \frac{\varepsilon_m(N) - \varepsilon_p(N)}{\varepsilon_m(N)} \times 100$$

donde:

R_r = Relación de recuperación

ε_m = Deformación antes de liberar la carga aplicada

ε_p = Deformación permanente tras la recuperación inducida por calentamiento

N = número de ciclos

Formula – Relación de fijeza.

$$R_f(N) = \frac{\varepsilon_u(N)}{\varepsilon_m(N)} \times 100\%$$

donde:

R_f = Relación de fijeza

ε_m = Deformación antes de liberar la carga aplicada

ε_u = Deformación tras liberar la carga

N = número de ciclos

a) Equipo

- Máquina de ensayo a tracción



EQUIPO

Figura 52. Instron - Máquina de ensayo a tracción empleada.

b) Procedimiento

Para la evaluación del efecto de memoria de forma de las mezclas hechas con XNBR y diferentes proporciones de DCP, las probetas se someterán a ciclos de deformación – recuperación.

Notas:

1. Para poderse llevar a cabo se obtienen probetas rectangulares de 5x0.5x 0.02 cm.
2. Antes de iniciar se obtiene el espesor de las probetas empleando un micrómetro.
3. La probeta se coloca en el dispositivo Instron y se calienta a 150 °C por 18 min (tiempo que tarda en alcanzar la temperatura óptima de deformación el contexto y la probeta).
4. Para el proceso de enfriamiento de la muestra y cámara de ensayo se ha empleado Nitrógeno Líquido.

6.2.2 Caucho Etileno – Propileno con Anhídrido Maleico (EPM AnM)

El Caucho Etileno – Propileno con Anhídrido Maleico (EPM AnM) es un ionómero el cual dentro de su estructura cuenta con una pequeña cantidad de grupos iónicos. El estudio de este material está dirigido a ser implementado como un nuevo polímero con memoria de forma.

El EPM AnM cuenta con un peso molecular bajo, sus uniones iónicas son capaces de interactuar con peróxidos orgánicos dentro del proceso de vulcanización. A continuación se realiza un análisis dirigido a medir la capacidad de efecto de memoria de forma resultado de la red iónico-covalente, definida a partir de las proporciones de materia prima que lo componen.

Materia prima.

- a) Elastómero: Caucho Etileno – Propileno con Anhídrido Maleico (EPM AnM)
- b) Interacciones Covalentes: Peróxido de Dicumilo (DCP)
- c) Interacciones Iónicas: Óxido de Magnesio (MgO)
- d) Lubricante: Acido Esteárico

I. Definición de la Materia Prima - Función

Caucho Etileno-Propileno con Anhídrido Maleico

E

P

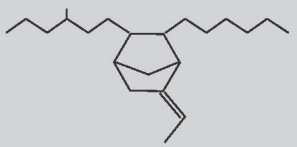
M

AnM

DEFINICIÓN.

Es un copolímero en bloque, compuesto por:

- 49% de peso de etileno
- 49% de peso de propileno
- 2.1% de Anhídrido Maleico




ELASTÓMERO

COMPONENTES

CAUCHO ETILENO-PROPILENO CON ANHÍDRIDO MALEICO


Proviene de las síntesis entre el etileno + propileno + una pequeña cantidad de anhídrido maleico de forma que es un material de bajo peso molecular con grupos iónicos.



LUBRICANTE

ÁCIDO ESTEÁRICO

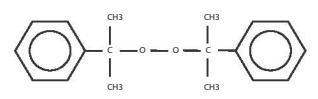

Mejora el procesado y dispersión en la mezcla.



ENTRECRUZAMIENTOS

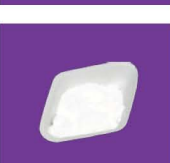
ENLACES COVALENTES

Peróxido de dicumilo (DCP) – Fuerza de recuperación

ENLACES IÓNICOS

Oxido de Magnesio (MgO) – Fuerza de fijación



II. Moldeo de mezclas

a) Equipo:

- Prensa Hidráulica (Marca Gumix), presión 200 bares
- Moldes

b) Materia Prima

La cantidad de material y el tiempo óptimo de vulcanización de cada mezcla es:

Tabla 9. Cantidad de materia

Materia prima	EPM AnM (gr.)	Ac. Esteárico (gr.)	MgO (gr.)	DCP (gr.)
Mezcla 1	100	1	1	1
Mezcla 2	100	1	1	2

Tabla 10. Tiempo óptimo de vulcanizado por mezcla

Materia prima	Tiempo Calentamiento (min.)	Tiempo Enfriamiento (min.)
EPM AnM	5	20

III. Probetas

Tabla 11. Tipo de probetas de ensayo por prueba.

PRUEBA	TIPO DE PROBETA	CARACTERÍSTICAS
Esfuerzo – deformación en tracción		Probetas con forma de halterio, espesor 0.05 mm
DMA		Probeta de 30 x 0.5 x 0.05 mm

III. Métodos de prueba

• DMA – Análisis Dinámico Mecánico

El análisis dinámico mecánico tiene como objetivo medir las propiedades mecánicas de un material visco-elástico en función del tiempo, es decir, la respuesta a esfuerzos dinámicos dados a partir de una componente elástica y otra viscosa. Al suministrarle energía al material, parte de ella es devuelta (componente elástica) y el resto es disipada en forma de calor (componente viscosa) en el interior del material.

Dentro de este análisis, el material se somete a una deformación sinusoidal de amplitud constante, por lo que los resultados obtenidos van en función del tiempo, la temperatura y la frecuencia. A partir de ellos podemos obtener dos componentes, por un lado el

módulo de almacenamiento, también conocido como módulo elástico (E') siendo este la estimación de la temperatura de transición vítrea (T_g) a partir del punto de inflexión de la curva de almacenamiento con la temperatura. Por otra parte la componente viscosa o también llamado Modulo de perdida (E''), siendo esta la energía que el polímero absorbe y disipa. Esta componente estima la temperatura de transición vítrea (T_g) a partir del punto máximo de la curva del módulo de pérdida. Por lo que la relación de estos dos módulos E' y E'' proporciona el ángulo de desfase a través de su tangente llamada "factor de perdida".

a) Equipo:

- DMA



EQUIPO

Figura 53. DMA - Analizador Mecánico Diferencial.

IV. Efecto de Memoria de Forma – Análisis Cualitativo

a) Probeta de ensayo

- Probeta rectangular de 3.00 x 0.70 x 0.05 cm
- Ver Figura 54.

b) Equipo

- 1 Estufa (Horno eléctrico)
- 1 cronometro
- Dispositivos para deformación del material

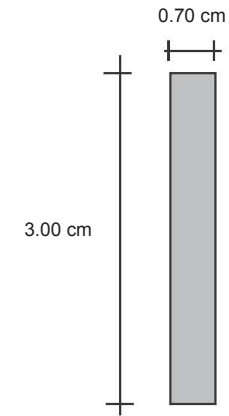


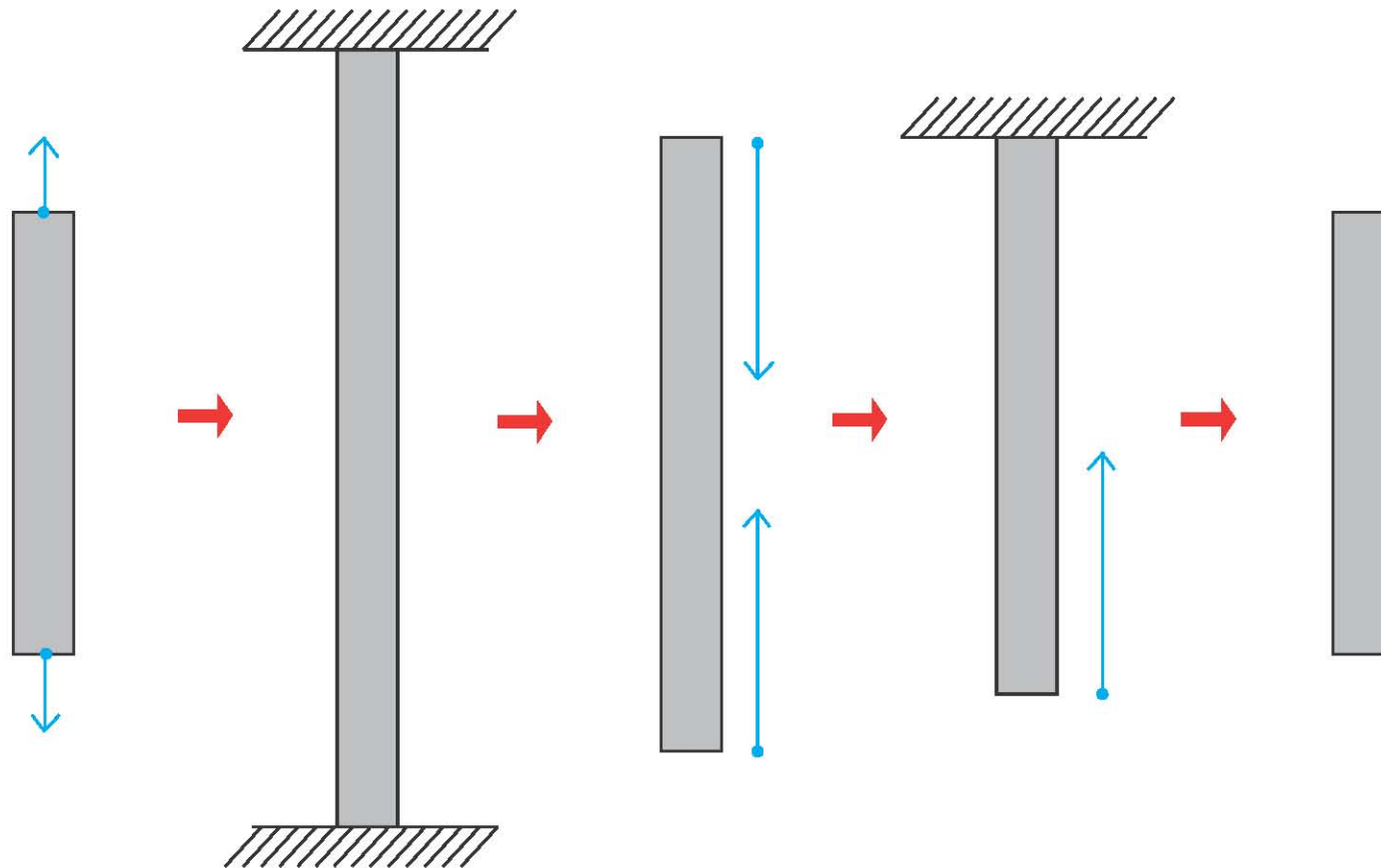
Figura 54. Probeta.



EQUIPO

Figura 55. Equipo empleado para la deformación del material.

c) Procedimiento



1. Deformación de la forma permanente al 100%

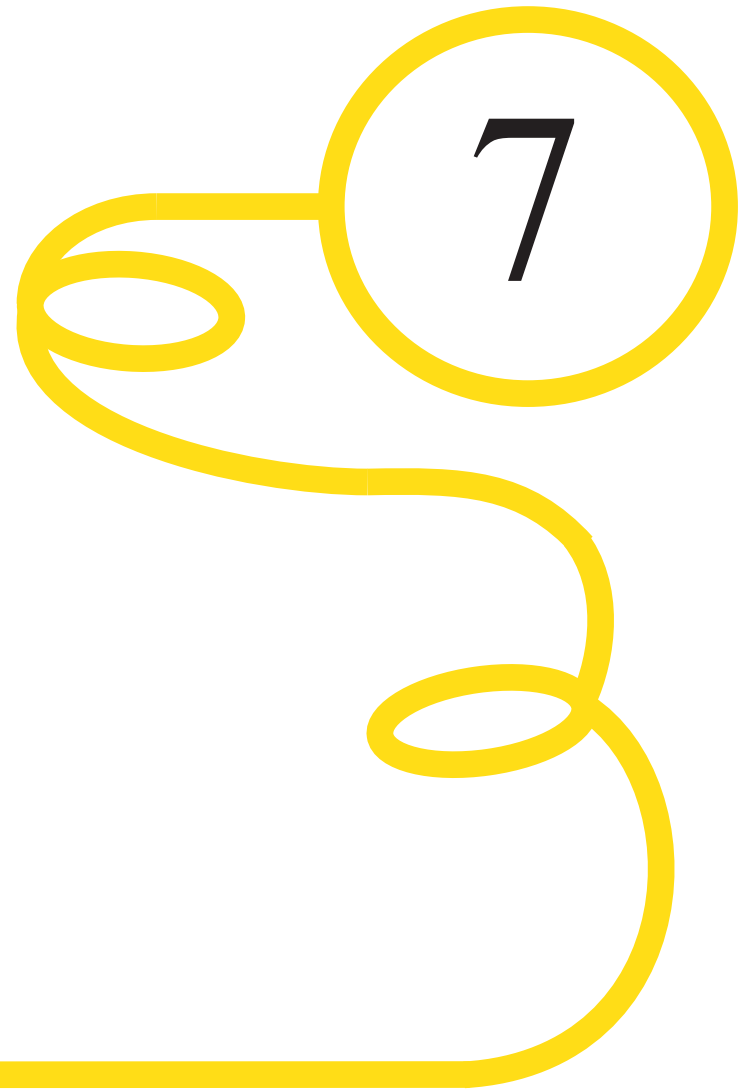
2. Calentamiento de la probeta deformada a diferentes temperaturas 80-150°C.
Tiempo: 10 min.

2a. Enfriamiento de la probeta a temperatura ambiente.
Tiempo: 10 min.

3. Medición de la fijación de forma temporal.

4. Calentamiento de la probeta deformada a diferentes temperaturas 80-150°C.
Tiempo: 10 min.

5. Medición de la recuperación de la forma permanente.



RESULTADOS

7. RESULTADOS.

De acuerdo a la etapa experimental previamente descrita, a continuación se presentan los resultados obtenidos en cada una de las siguientes etapas.

7.1. Elastómero Iónico - Caucho Nitrilico Carboxilado.

7.1.1 Curvas de Vulcanización

7.1.2 Programación de Memoria de Forma

7.1.3 Caracterización de las propiedades base de XNBR con Memoria de Forma.

- Espesor de probetas de ensayo
- Esfuerzo - deformación en tracción
- Resistencia al desgarro
- Dureza
- Resiliencia
- Abrasión

7.1.4 Análisis del efecto de Memoria de forma

7.1.5 Análisis del ciclo termomecánico - Cuantificación del efecto de Memoria de Forma.

7.1. Elastómero Iónico - Caucho Nitrilico Carboxilado.

7.1.1 Curvas de Vulcanización

A partir de las curvas de vulcanización de las mezclas XNBR adicionadas con diferentes proporciones de DCP, se obtiene el tiempo de vulcanización óptimo que requieren cada una para poder ser procesadas y evitar la pérdida de sus propiedades.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el desarrollo de la etapa experimental “6.2.1 - IV” descrito en el capítulo anterior.

Nota: el cálculo del tiempo de vulcanización se muestra en el anexo D.

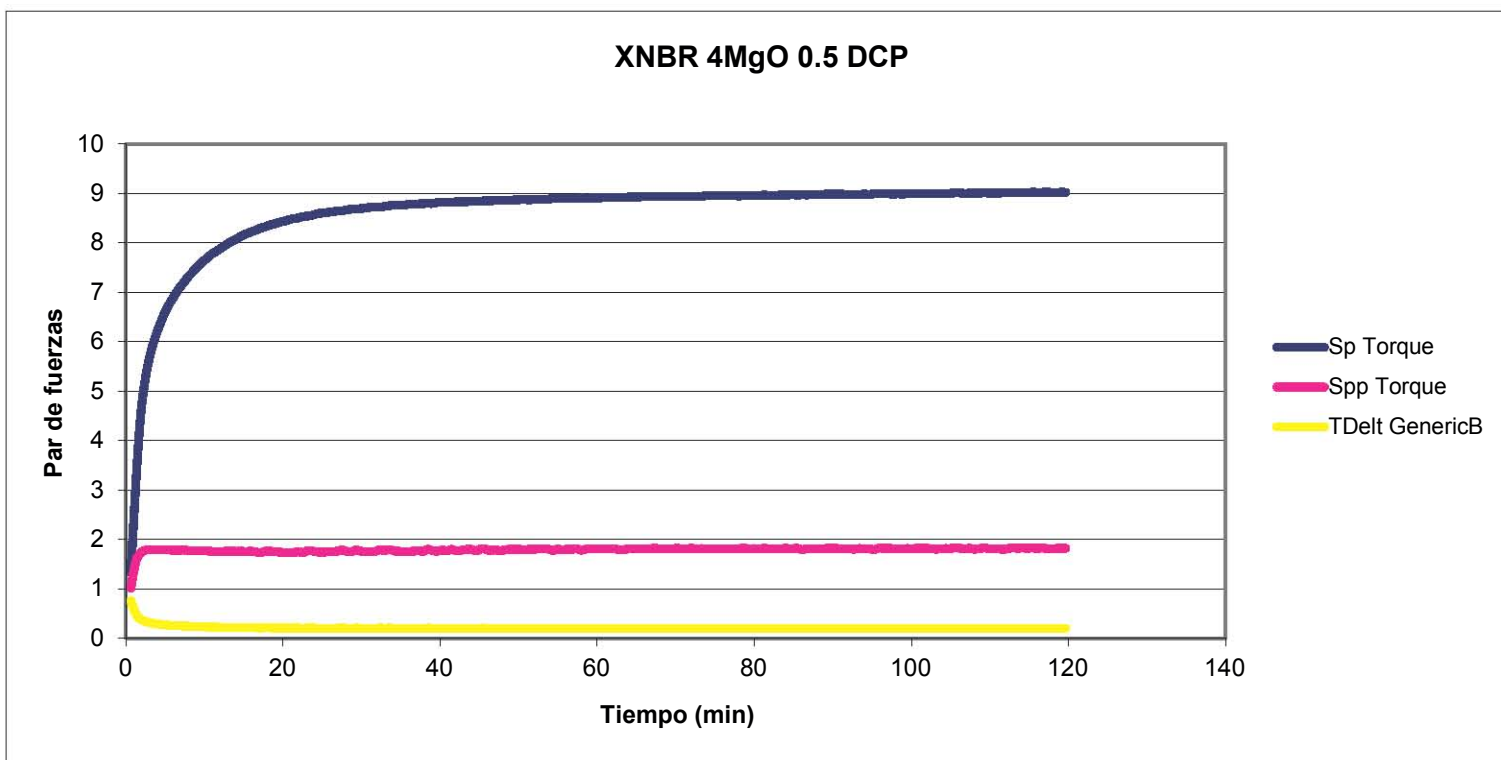


Figura 56. Curvas de Vulcanización del material XNBR 4 MgO 0.5 DCP (Mezcla 1)

Nota: $S' = S_p$ = par de fuerzas elásticas y $S'' = S_{pp}$ = par de fuerzas viscosa

Mezcla	$S'_{\min.}$	$S'_{\max.}$	$S'_{\text{óptimo}}$	Tiempo de Vulcanización (min.)
1	1.338	9.025	8.7943	39

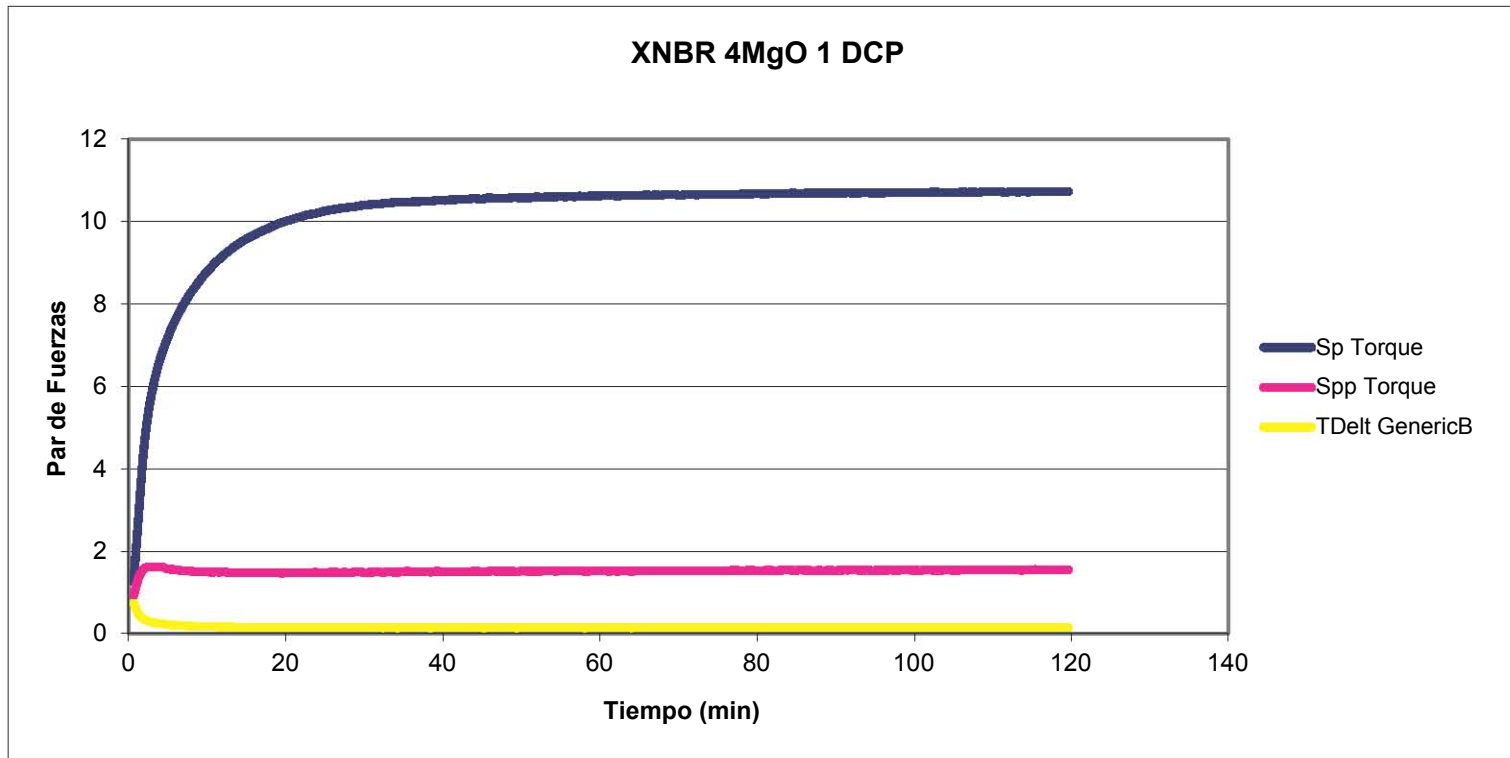


Figura 57. Curvas de Vulcanización del material XNBR 4 MgO 1 DCP (Mezcla 2)

Nota: $S' = S_p$ = par de fuerzas elásticas y $S'' = S_{pp}$ = par de fuerzas viscosa

Mezcla	$S'_{\min.}$	$S'_{\max.}$	$S'_{\text{óptimo}}$	Tiempo de Vulcanización (min.)
2	1.26	10.73	10.4459	33

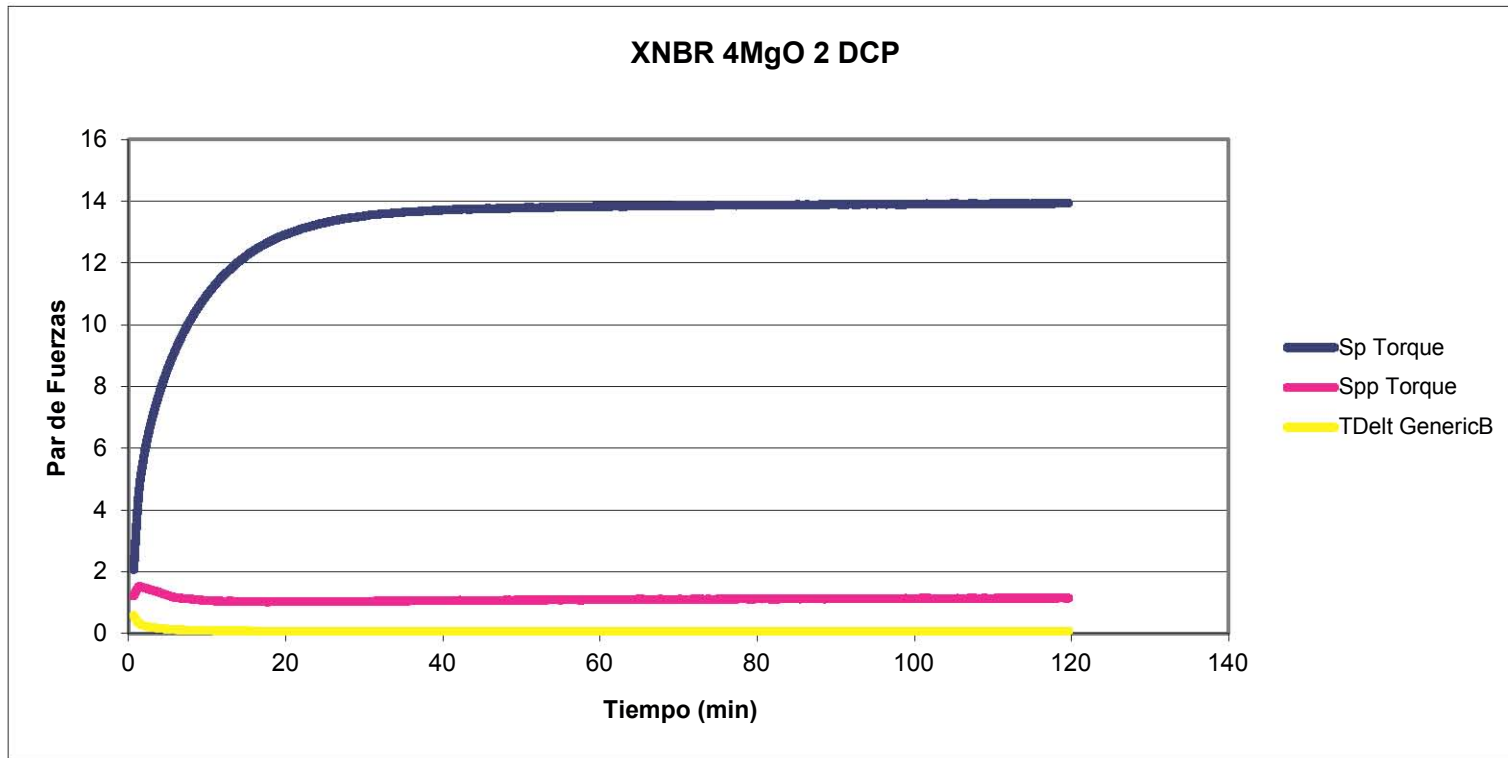


Figura 58. Curvas de Vulcanización del material XNBR 4 MgO 2 DCP (Mezcla 3)

Nota: $S' = S_p$ = par de fuerzas elásticas y $S'' = S_{pp}$ = par de fuerzas viscosa

Mezcla	$S'_{\text{min.}}$	$S'_{\text{máx.}}$	$S'_{\text{óptimo}}$	Tiempo de Vulcanización (min.)
3	2.076	13.93	13.5743	32

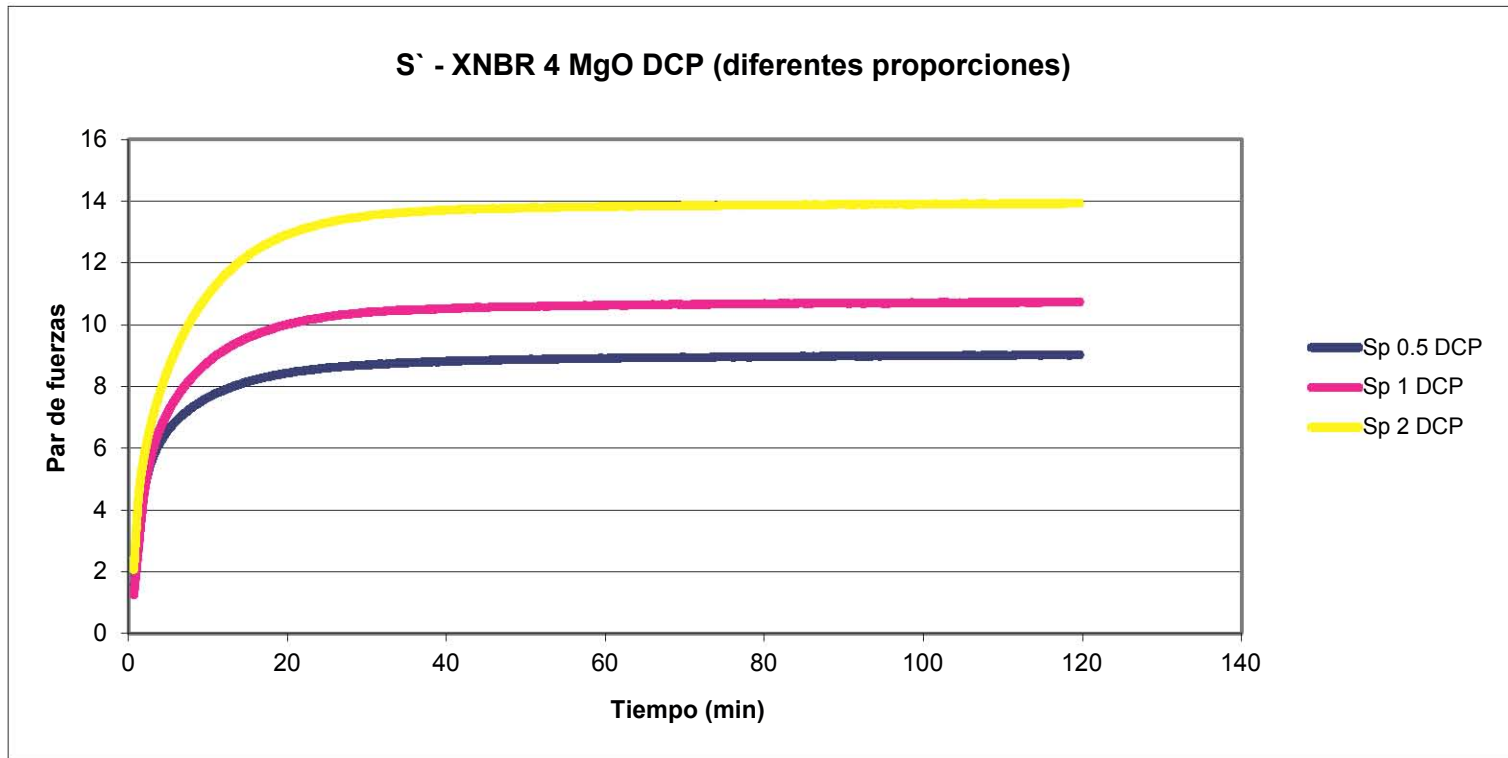


Figura 59. Comparación de S' de las mezclas XNBR 4 MgO con DCP en diferentes proporciones (0.5, 1 y 2 gr.)

Nota: $S' = S_p$ = par de fuerzas elásticas y $S'' = S_{pp}$ = par de fuerzas viscosa

En las figuras 56, 57 y 58 se observa:

a) Aumento de S'

Al inicio de las curvas se aprecia el aumento de S' , conforme pasa el tiempo sigue creciendo llegando a estabilizarse poco a poco, esto indica la creación de entrecruzamientos covalentes, lo cual genera la modificación de la estructura del compuesto con el tiempo, viéndose afectada la movilidad de la red iónica, lo que provoca que el material se haga rígido.

b) La curva S' muestra una tendencia ascendente muy ligera, esto indica que los componentes iónicos de la mezcla siguen produciendo saltos entre moléculas hasta llegar a estabilizarse.

En la figura no. 59 la comparación de resultados de S' , nos indica que a mayor cantidad de DCP en la mezcla existe un mayor número de entrecruzamientos covalentes, lo que afecta la capacidad del material a ser deformado, siendo que el número de enlaces covalentes al ser mayor condiciona y restringen su movilidad.

Por otro lado, es importante aclarar que el aumento de DCP de forma exponencial no se relaciona con que el material muestre mejores características y propiedades, ya que si observamos las curvas de S' la red iónica de la mezcla 3 tiene menos tendencia a moverse que la de 0.5.

7.1.2 Programación de Memoria de Forma.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el desarrollo de la etapa experimental "6.2.1 - VI" descrito en el capítulo anterior.

Actividad

La programación de memoria de forma se realizó en las mezclas de XNBR, en cada una de ellas se crearon diferentes formas y se observó su comportamiento.

a) Comprobación de memoria de forma en rodets.

Para hacer las primeras pruebas, fueron empleados rodets (superficies circulares de 4.5 cm. de diámetro), se clasificaron como: A) XNBR 4MgO 0.5DCP, B) XNBR 4MgO 1DCP, C) XNBR 4MgO 2DCP. Cada uno de ellos se sometió a esfuerzos de tensión y posteriormente se calentaron a 150°C, por un tiempo de 5 min., enseguida se dejaron enfriar con el fin de obtener una forma temporal fija (ver fig. 60).

Una vez obtenida la forma temporal, el proceso de recuperación de forma se realizó calentando los rodets a su temperatura de transición iónica, en este caso 150°C. Se observó la reacción de cada uno de los materiales y el tiempo que tardaron en recuperar su forma original. (ver figura 61).



Figura 60.

Programación de la forma temporal.

1

RECUPERACIÓN DE FORMA ORIGINAL



150 ° C – Tiempo es variable para cada mezcla

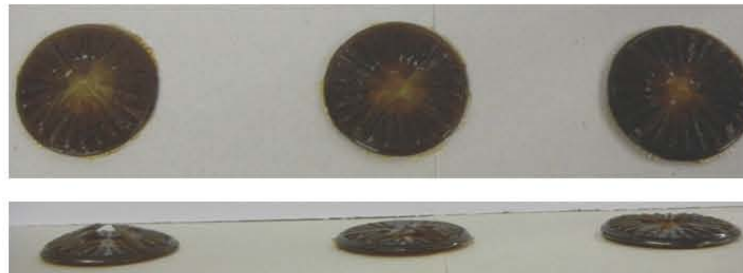
↑ T - aumenta



t = 0 min.

t = x min.

RESULTADOS FINALES



A

B

C

Mayor recuperación de forma

Figura 61. Recuperación de la forma original.

Resultados obtenidos.

Tabla 12. Tiempo de recuperación de forma de rodets de XNBR con diferentes proporciones de DCP.

Material	Tiempo de recuperación de forma (min.)
A	17.5
B	10.05
C	8

El tiempo de recuperación de forma es menor en la muestra C, siendo esta la que mejor recuperación de forma tiene, se acerca más a ser la forma original pero no en su totalidad.

b) Comprobación de memoria de forma en tiras de XNBR

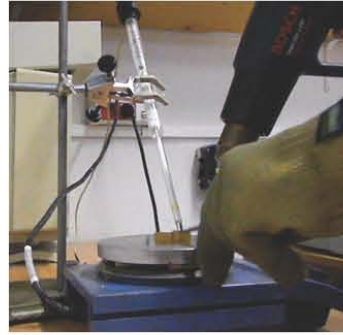
Se realizaron tiras de 1cm x 7.1 cm x 0.05 cm de espesor de cada una de las mezclas: A.XNBR 4MgO 0.5DCP, B. XNBR 4MgO 1DCP, C. XNBR 4MgO 2DCP. Con cada una de ellas se siguió el proceso de programación de la forma temporal, con la diferencia de experimentar una fuerza de compresión. (ver figura 62)



Figura 62. Programación de la forma temporal de tiras de XNBR

1

RECUPERACIÓN DE FORMA ORIGINAL



150 ° C – Tiempo es variable para cada mezcla

↑ T - aumenta



t = 0 min.

t = x min.

RESULTADOS FINALES



A

B

C

Mayor recuperación de forma

Figura 63. Recuperación de la forma original.

Resultados obtenidos.

Tabla 13. Tiempo de recuperación de forma de tiras de XNBR con diferentes proporciones de DCP.

Material	Tiempo de recuperación de forma (min.)
A	2.5
B	2.18
C	1.56

Conclusiones.

La capacidad del efecto de memoria de forma en el material XNBR se da en un solo camino, es decir, el material al ser sometido al proceso de programación es capaz de aprender una forma y regresar a su forma original, sin tener la capacidad de repetirse de forma cíclica, por lo que es un efecto en una sola dirección.

Se observó:

- La mezcla con mayor contenido de peróxido DCP tiene una mayor capacidad de recuperación de forma (entre un 95-97%).

- Una mezcla puede mejorar su fijación de forma dependiendo del tipo y cantidad de sal metálica en su matriz.

7.1.3 Caracterización de las propiedades base de XNBR con Memoria de Forma.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el desarrollo de la etapa experimental "6.2.1 - VII" descrito en el capítulo anterior.

a) Espesor de probetas de ensayo

Etapa experimental 6.2.1 Espesores probetas de ensayo VII.2

Tabla 14. Espesores de las probetas de ensayo de XNBR 4MgO 0.5 DCP. Probetas para prueba de esfuerzo - deformación a tracción.

Probeta	Espesor (mm)			
	Izquierda	Centro	Derecha	Mediana
A	1.95	1.95	1.95	1.95
B	1.98	1.98	1.99	1.99
C	1.98	1.98	1.98	1.98
D	2.04	2.04	2.04	2.04
E	2.00	1.99	1.99	1.99

Tabla 15. Espesores de las probetas de ensayo de XNBR 4MgO 1 DCP.

Probetas para prueba de resistencia al desgarro.

Probeta	Espesor (mm)			
	Izquierda	Centro	Derecha	Mediana
A	2.00	1.99	1.99	1.99
B	2.03	2.02	2.01	2.02
C	2.01	2.02	2.01	2.01

A continuación se muestran los cuadros resumen de los espesores medidos en las probetas de ensayo.

Tabla 16. Espesores de las probetas para la prueba resistencia al desgarro.

Probeta	Mediana - Espesor (mm)		
	0.5 DCP	1 DCP	2DCP
A	2.01	1.99	2.02
B	2.00	2.02	2.03
C	2.01	2.01	2.00

Tabla 17. Espesores de las probetas para la prueba de Esfuerzo - Deformación a tracción.

Probeta	Mediana - Espesor (mm)		
	0.5 DCP	1 DCP	2DCP
A	1.95	1.99	2.01
B	1.98	2.04	2.00
C	1.98	2.01	2.03
D	2.04	1.93	2.02
E	1.99	1.99	2.02

b) Método de prueba - Esfuerzo deformación en tracción.

Etapa experimental 6.2.1, Método de prueba VII.3.1

Tabla 18. Valor medio de % de deformación que resiste las probetas a esfuerzo a tracción. Mezclas XNBR 4MgO con diferentes proporciones de DCP.

Mezcla	Espesor (mm)	100% deformación	300% Deformación	500 % Deformación
		Esfuerzo a tracción en MPa		
0.5 DCP	1.99	4.465	10.466	29.036
1 DCP	2.01	4.846	12.009	-
2 DCP	2.02	5.864	-	-

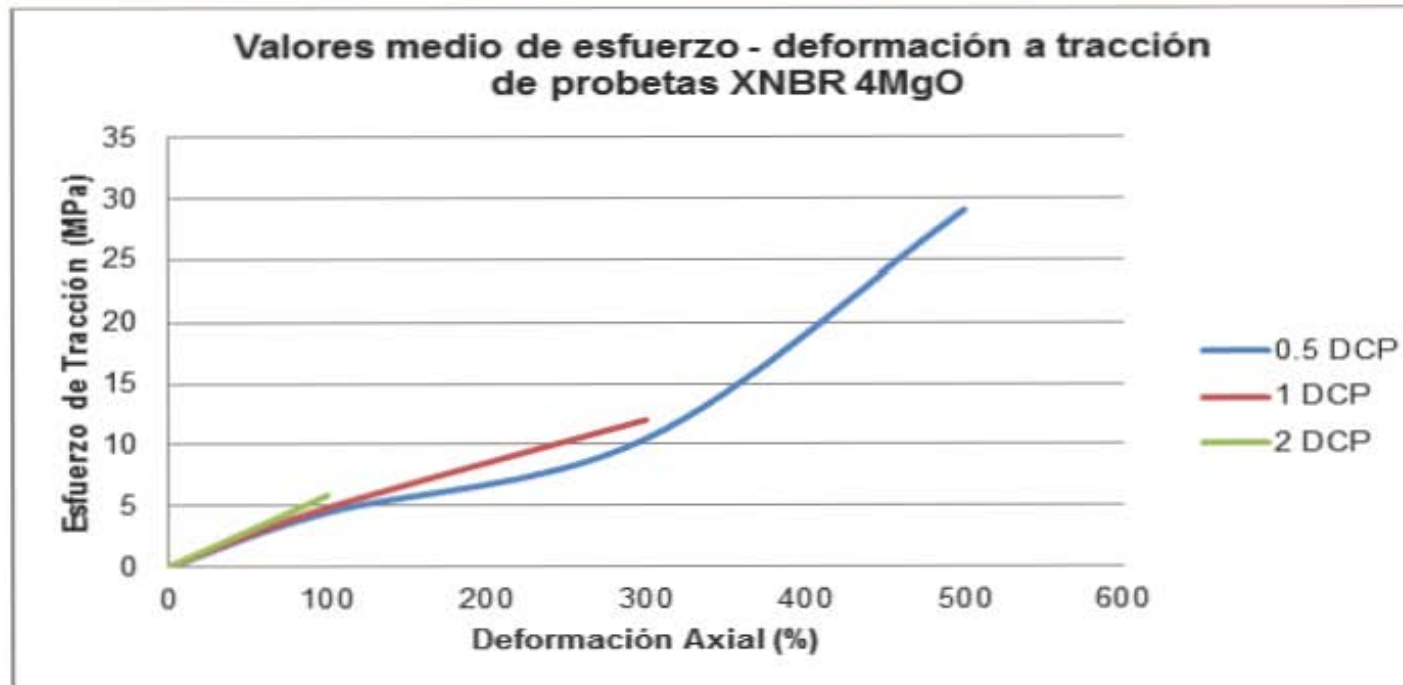


Figura 64. Grafica esfuerzo - deformación por tracción de las mezclas XNBR 4MgO - DCP.

Tabla 19. Comparativa de los valores de esfuerzo de tracción y deformación máxima en mezclas de XNBR 4 MgO con diferentes proporciones de DCP.

Mezcla	Esfuerzo de tracción, carga máxima (MPa)	Deformación Máxima (%)
0.5 DCP	36.757	530.57
1 DCP	27.769	478.76
2 DCP	18.383	297.68

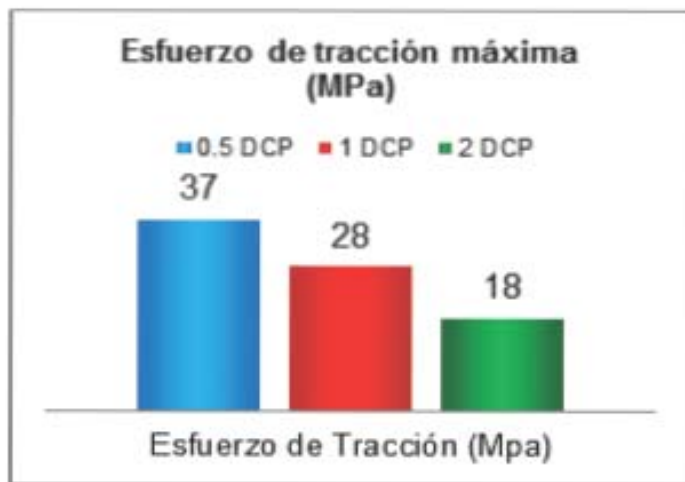


Figura 65. Comparación de Esfuerzo de tracción máximos de las mezclas XNBR 4 MgO con diferentes proporciones de DCP.

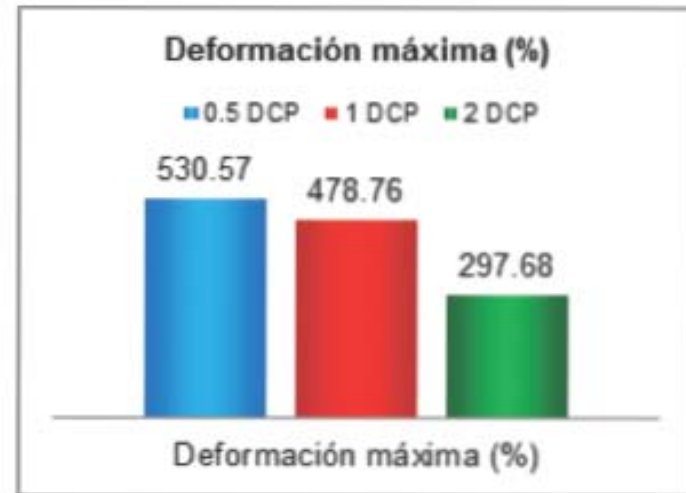


Figura 66. Comparación de Deformación máximos de las mezclas XNBR 4 MgO con diferentes proporciones de DCP.

Conclusiones

La estructura química de cada una de las mezclas se diferencia por la densidad de entrecruzamientos, el cual aumenta de acuerdo a la cantidad de peróxido agregado (DCP), generando en el material un aumento en el grado de rigidez. En la figura 46 se observa este comportamiento, la mezcla con 2DCP experimenta la disminución de capacidad de deformación, volviendo el material frágil y ocasionando su ruptura. Por otro lado, el material al contar con poca cantidad de peróxido (elemento covalente), experimenta la facilidad de alcanzar deformaciones superiores al 100%, ya que dentro de su composición, las cadenas llegan a su grado máximo de extensibilidad siendo capaces de auto-regenerarse y deformarse en un grado mayor.

c) Método de prueba - Resistencia al desgarro.

Etapa experimental 6.2.1, Método de prueba VII.3.1

Tabla 20. Comparativa de los valores de carga máxima, % de deformación a rotura y esfuerzo de tracción máxima en mezclas de XNBR 4 MgO con diferentes proporciones de DCP.

Mezcla	Espesor (mm)	Carga máxima (N)	Deformación de rotura (%)	Esfuerzo de tracción, carga máxima (MPa)
0.5 DCP	2.01	99.701	129.42	49.603
1 DCP	2.01	61.514	78.46	30.646
2 DCP	2.02	21.171	54.50	12.405

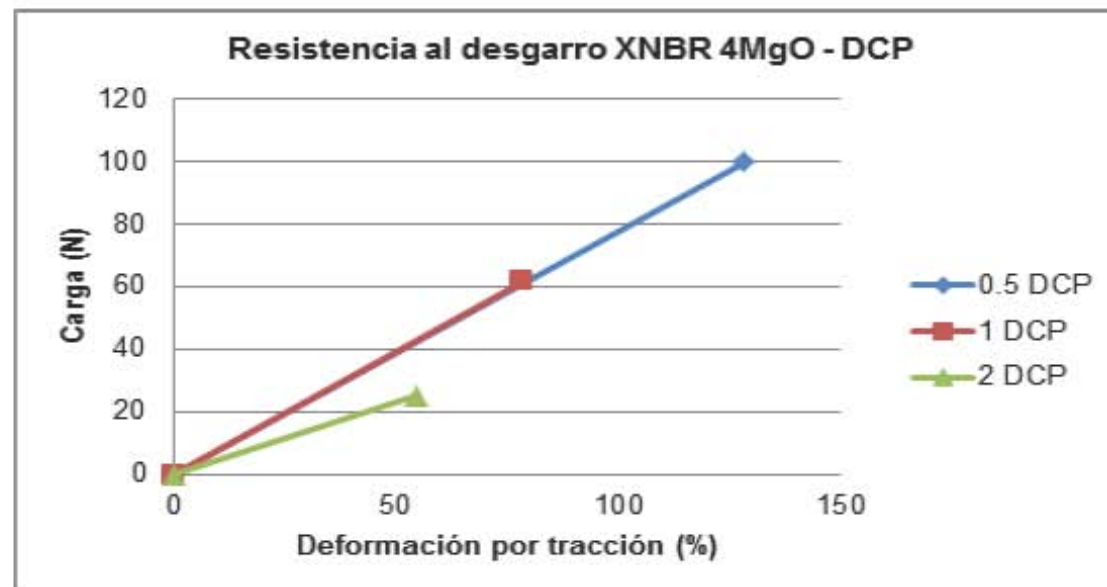


Figura 67. Grafica relación carga máxima - deformación.

Conclusiones

La capacidad de desgarro del material se ve afectada por la estructura química de cada mezcla, ya que la densidad de entrecruzamientos al ir aumentando provoca oposición a la componente elástica del material. En la fig.9 se analiza este comportamiento, en la mezcla con 2DCP el material se vuelve frágil y ante un esfuerzo de tracción desgarra con mayor facilidad. En cambio, la muestra hecha con 0.5 DCP, resiste el desgarro a un esfuerzo de tensión mayor (130%).

d) Método de prueba - Dureza.

Etapa experimental 6.2.1, Método de prueba VII.3.1

Mezcla	1	2	3	4	5	6	7	8	Valor medio
0.5 DCP	69.3	69.8	70.7	70.6	69.3	69.5	70.2	70.8	70.02
1 DCP	70.0	70.5	70.4	70.2	68.6	69.5	69.9	69.9	69.88
2 DCP	75.1	73.2	73.6	74.5	74.5	74.5	74.5	74.7	74.33

Nota: Para un caucho normal los parámetros de dureza están entre 35 – 38

Conclusiones

Los tres tipos de mezclas presentan valor similares de dureza. Mientras mayor sea la cantidad de DCP en la mezcla, el material es menos frágil a ser perforado,

ya que se opone a ser penetrado y sufrir daños evidentes en su superficie.

e) Método de prueba - Resiliencia.

Etapa experimental 6.2.1, Método de prueba VII.3.1

Tabla 21. % Resiliencia de mezclas XNBR 4MgO – diferentes proporciones de DCP.

Mezcla	Mediciones (%)				Valor medio
	1	2	3	4	
0.5 DCP	45.6	45.6	52.4	51.3	48.73
1 DCP	45.1	43.8	43.3	43.5	43.93
2 DCP	37.5	38.2	37.2	37.0	37.48

Conclusiones

El material con menor cantidad de DCP regresa una cantidad mayor de energía empleada para su deformación, en cambio la mezcla de 2DCP no tiene la capacidad de regresarla, ya que sucede lo contrario es decir, una vez llegado el impacto la disipa.

f) Método de prueba - Abrasión.

Etapa experimental 6.2.1, Método de prueba VII.3.1

Tabla 22. Mediciones de peso en agua y aire de las mezclas XNBR 4MgO – diferentes proporciones de DCP.

Mezcla	No. de probeta	W ₁ aire (gr)	W agua (gr)	W ₂ aire (gr)
0.5 DCP	1	2.6068	0.0463	2.5100
	2	2.5955	0.0463	2.4930
	3	2.5962	0.0461	2.4974
1 DCP	1	2.6066	0.0530	2.4877
	2	2.5850	0.0524	2.4682
	3	2.5977	0.0497	2.4766
2 DCP	1	2.6009	0.0610	2.3960
	2	2.5962	0.0606	2.3930
	3	2.6170	0.0620	2.4146

Para obtener los resultados finales, se emplearon las siguientes expresiones matemáticas:

$$V_1 = W_1 \text{ aire} - W \text{ agua}$$

$$d = W_1 \text{ aire} / V_1$$

$$W_{\text{final}} = W_1 \text{ aire} - W_2 \text{ aire}$$

$$V_2 = W_{\text{final}} / d$$

donde:

V_1 = volumen inicial de la probeta de ensayo (cm³)

V_2 = Volumen final de la probeta de ensayo, una vez que es sometida al ensayo de abrasión (cm³)

$W_1 \text{ aire}$ = peso inicial de la probeta de ensayo (gr)

$W \text{ agua}$ = peso de la muestra sumergida en agua destilada (gr)

W_{final} = Peso final de la probeta de ensayo, una vez que fue sometida al ensayo de abrasión (gr)

d = densidad de la probeta de ensayo (gr/cm³)

Tabla 23. Perdida de volumen y peso promedio de las mezclas XNBR 4MgO – diferentes proporciones de DCP.

Mezcla	No. de probeta	Perdida de volumen pV (cm ³)	Perdida en peso pW (gr)	Promedio	
				pV (cm ³)	pW (gr)
0.5 DCP	1	0.0951	0.0968	0.0976	0.0976
	2	0.1007	0.1025		
	3	0.0971	0.0988		
1 DCP	1	0.1165	0.1189	0.1166	0.1189
	2	0.1144	0.1168		
	3	0.1188	0.1211		
2 DCP	1	0.2001	0.2049	0.1987	0.2035
	2	0.1985	0.2032		
	3	0.1976	0.2024		

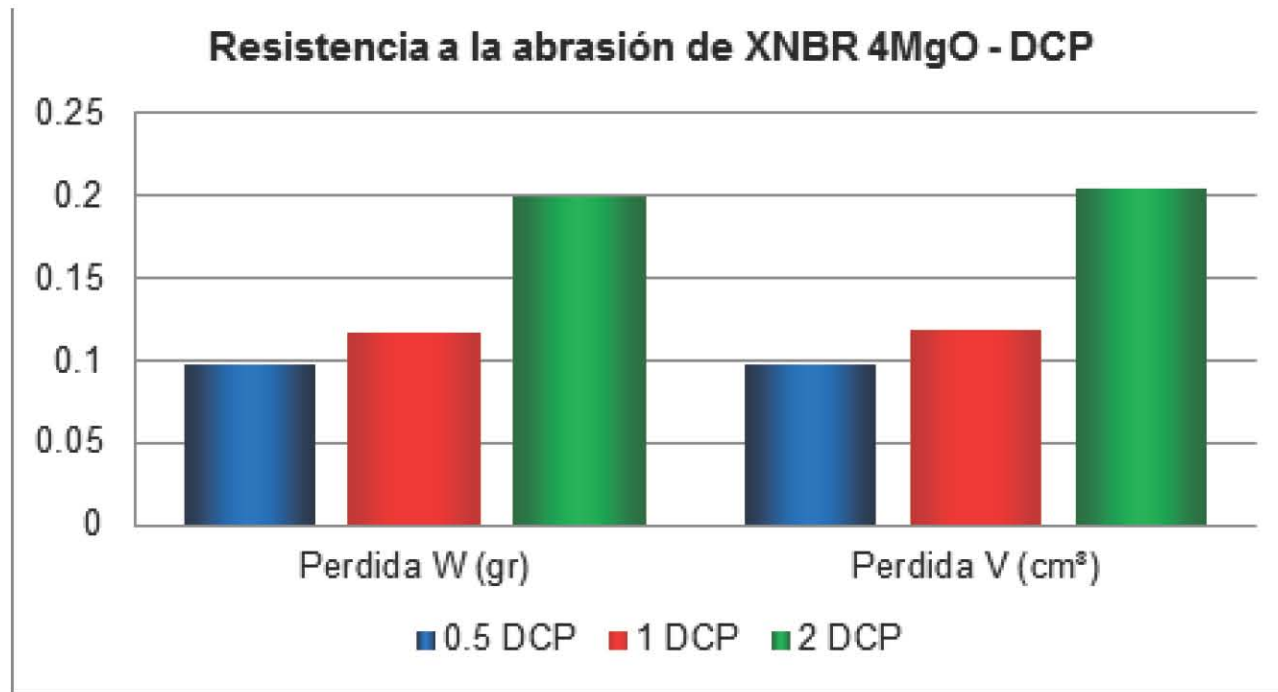


Figura 68. Grafica comparativa de perdida de volumen y peso promedio de las mezclas XNBR 4MgO – diferentes proporciones de DCP

Conclusiones

La mezcla 2DCP presenta mayor desgaste en la superficie de contacto, ya que por la composición el material, al tener mayor densidad de entrecruzamientos rígidos en comparación con las otras dos mezclas. Es por ello, que dependiendo del uso del material al que sea destinado, deben evaluarse las propiedades óptimas con las que debe contar.

RESUMEN DE PROPIEDADES.

Tabla 24. Resumen de propiedades del material XNBR, con diferentes proporciones en contenido de DCP.

PROPIEDADES	XNBR 4 MgO		
	0.5 DCP	1 DCP	2 DCP
Dureza	70.02	69.88	74.33
Resiliencia (%)	48.73	43.93	37.48
ESFUERZO DEFORMACIÓN A TRACCIÓN			
Esfuerzo a tracción (MPa)	36.757	27.769	18.383
Deformación máxima a tracción (%)	530.57	478.76	297.68
RESISTENCIA AL DESGARRO			
Esfuerzo a tracción máxima (MPa)	49.603	30.646	12.402
Deformación a rotura (%)	129.42	78.46	54.50
RESISTENCIA A LA ABRASIÓN			
Pérdida de volumen (cm ³)	0.0976	0.1166	0.1987
Pérdida de peso (gr)	0.0976	0.1189	0.2035

El cuadro resumen de las propiedades obtenidas del material XNBR explica el comportamiento de la variación de contenido de Peróxido de Dicumilo (DCP) en las mezclas evaluadas.

Comprobamos que a mayor contenido de DCP obtenemos un material con mayor dureza, mayor rigidez, capaz de absorber una cantidad mínima de energía y con la capacidad de deformarse en menor grado que las muestras de 0.5 y 1 gramos de DCP.

El que la mezcla XNBR 4MgO 2DCP cuente con valores menores en sus propiedades NO lo califica como un material de mala calidad, ya que depende de un uso específico y requerimientos que deba cumplir para su aplicación.

Para llevar a cabo el diseño de un material es importante estipular objetivos a cumplir, una vez que es alcanzado puede ser modificado para lograr mejorar sus características y cualidades.

7.1.4 Análisis del efecto de memoria de forma.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el desarrollo de la etapa experimental “6.2.1 - VIII” descrito en el capítulo anterior.

a) Recuperación de forma de la probeta XNBR 4MgO 0.5 DCP, sometida a tres tipos de deformaciones diferentes.

En la figura no. 69 se muestra el tipo de deformación realizada a la probeta y el tiempo de recuperación de forma (Tr), así como la dimensión (Dd) que alcanzo para poder compararse con la original.

Observaciones:

La muestra XNBR 4MgO 0.5 DCP pudo alcanzar mayor grado de deformación, en comparación con las otras muestras (1 y 2 DCP).

Los tiempos de recuperación de forma van en aumento conforme la probeta experimenta mayor grado de deformación. Por otro lado, la probeta al regresar a su forma original, no lo logra obtener al 100% sus dimensiones originales, ya que en ambos sentidos se modifican.

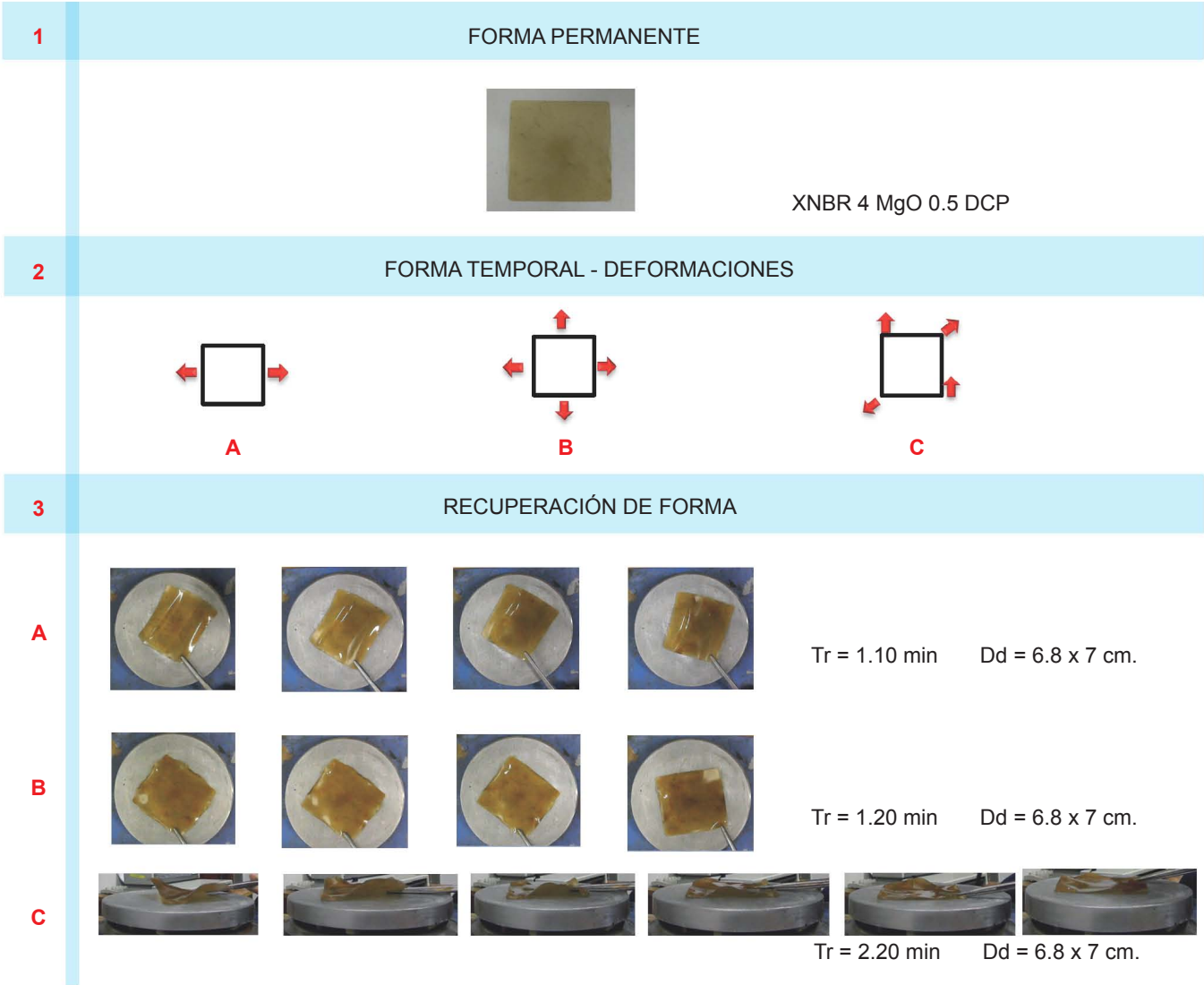


Figura 69. Cuadro - resumen de la recuperación de forma de la probeta XNBR 4MgO 0.5 DCP, sometida a tres tipos de deformaciones A, B y C.

b) Recuperación de forma de la probeta XNBR 4MgO 1 DCP, sometida a tres tipos de deformaciones diferentes.

En la figura no. 70 se muestra el tipo de deformación realizada a la probeta y el tiempo de recuperación de forma (Tr), así como la dimensión (Dd) que alcanzo para poder compararse con la original.

Observaciones:

La muestra XNBR 4MgO 1DCP experimenta un aumento en los tiempos de recuperación de forma conforme va siendo deformada. Por otro lado, la probeta al buscar regresar a su forma original, NO lo logra al 100%, ya que se observa que las dimensiones originales varían un poco.

c) Recuperación de forma de la probeta XNBR 4MgO 2 DCP, sometida a tres tipos de deformaciones diferentes.

En la figura no. 71 se muestra el tipo de deformación realizada a la probeta y el tiempo de recuperación de forma (Tr), así como la dimensión (Dd) que alcanzo para poder compararse con la original.

Observaciones:

La muestra XNBR 4MgO 2DCP experimenta tiempos menores de recuperación de forma. Este al igual que las mezclas con contenido de 0.5 y 1 DCP, no logra regresar a su forma original al 100%, siendo evidente en que las dimensiones originales varían muy poco.

En esta muestra, es importante mencionar, que el grado de deformación que experimenta es menor que las probetas con 0.5 y 1 DCP, ya que el material cuenta con mayor grado de rigidez, debido a la cantidad de DCP, es decir, cuenta con mayor densidad de entrecruzamientos covalentes.

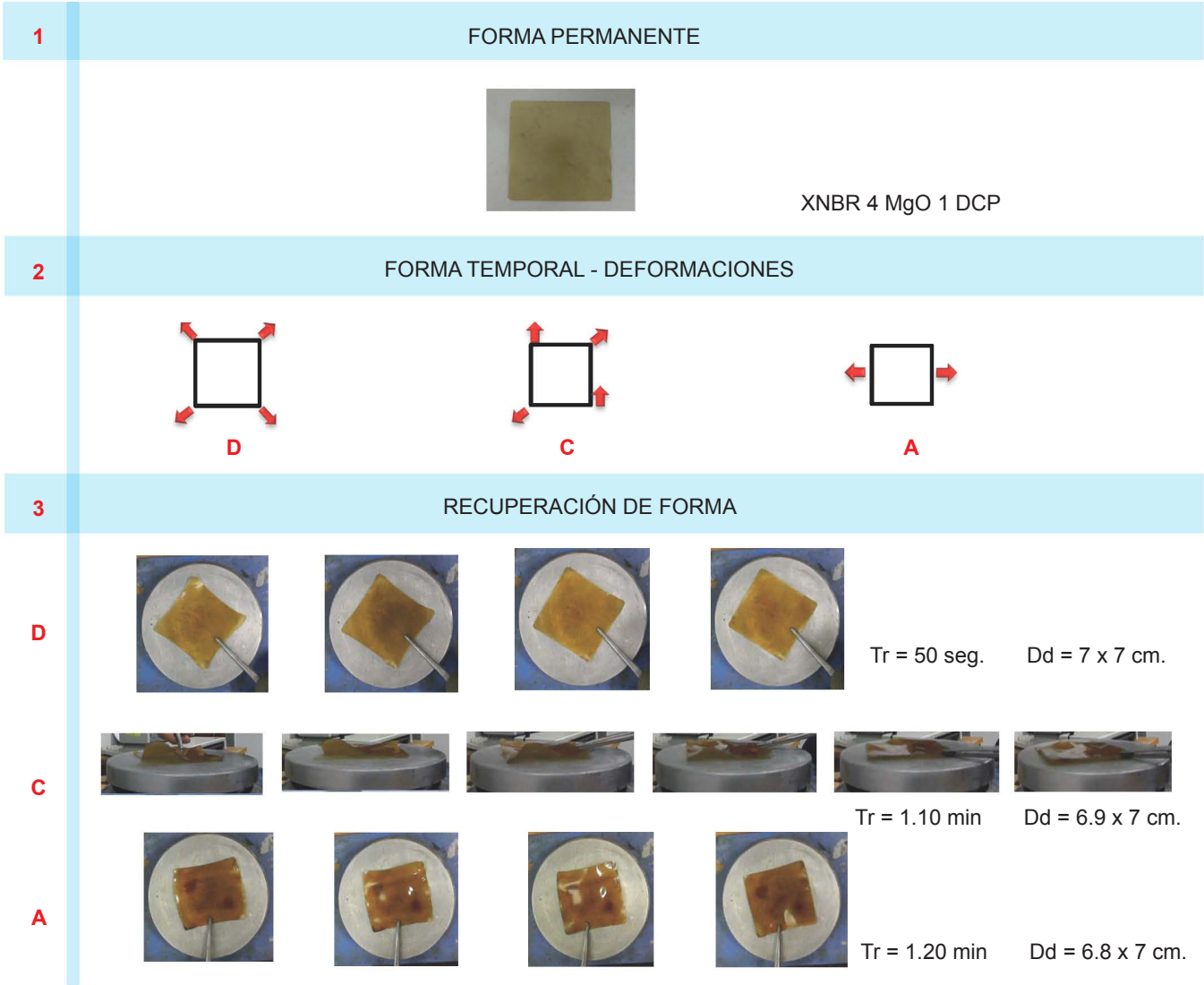


Figura 70. Cuadro - resumen de la recuperación de forma de la probeta XNBR 4MgO 1 DCP, sometida a tres tipos de deformaciones D, C y A.

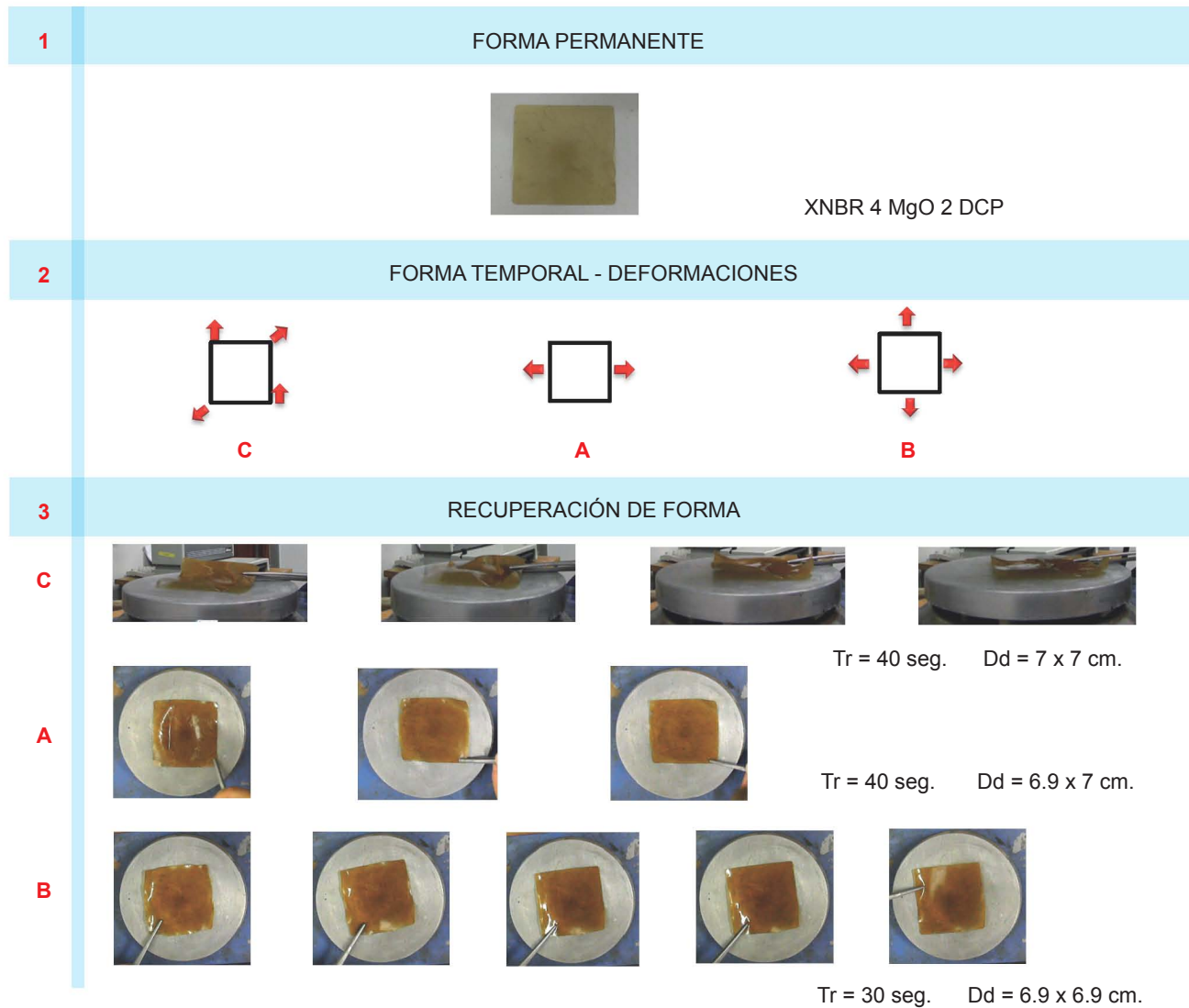


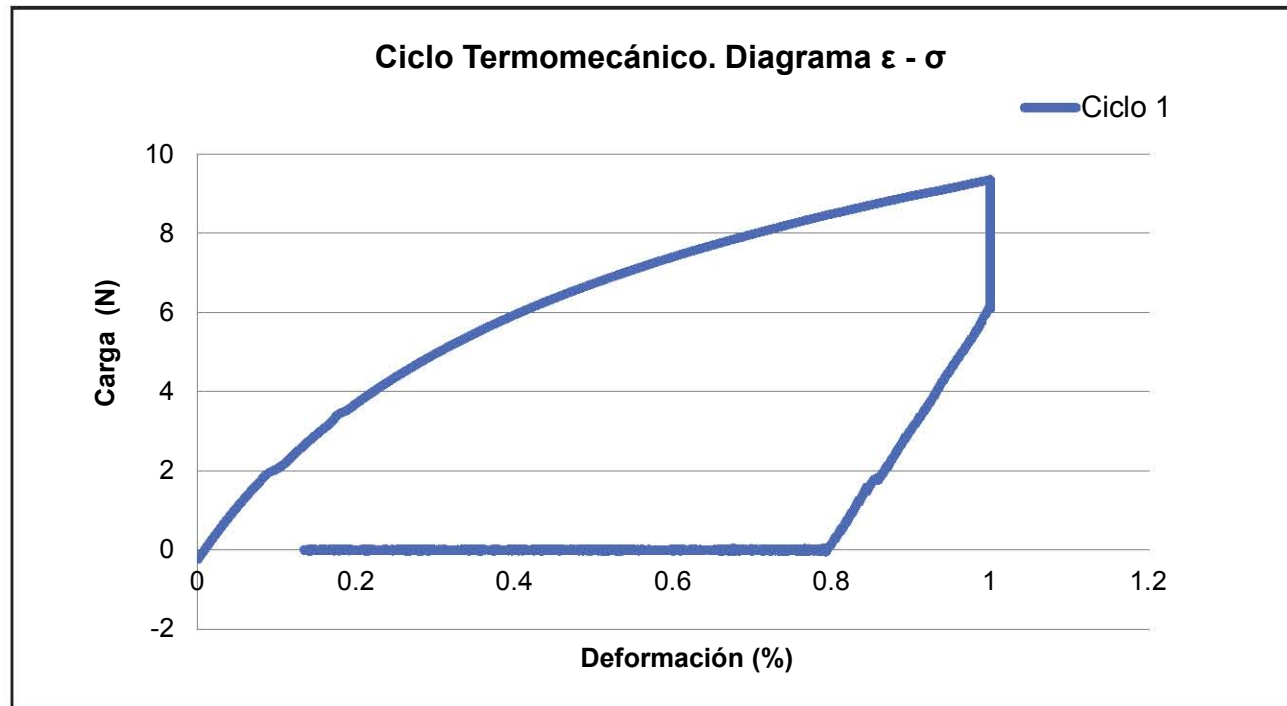
Figura 71. Cuadro - resumen de la recuperación de forma de la probeta XNBR 4MgO 2 DCP, sometida a tres tipos de deformaciones C, A y B.

7.1.5 Análisis del ciclo termo-mecánico. Cuantificación del efecto de Memoria de forma.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el desarrollo de la etapa experimental “6.2.1 - IX” descrito en el capítulo anterior.

Se presentan los diagramas ϵ - σ (esfuerzo-deformación) de las probetas XNBR, analizando el ciclo termo mecánico y el % de recuperación de forma original y % fijeza de forma temporal.

a) XNBR 4 MgO 0.5 DCP



CICLO 1	
ϵ_m	1
ϵ_p	0.1345
ϵ_u	0.7955

Figura 72. Probeta XNBR 4MgO 0.5 DCP – Ciclo 1

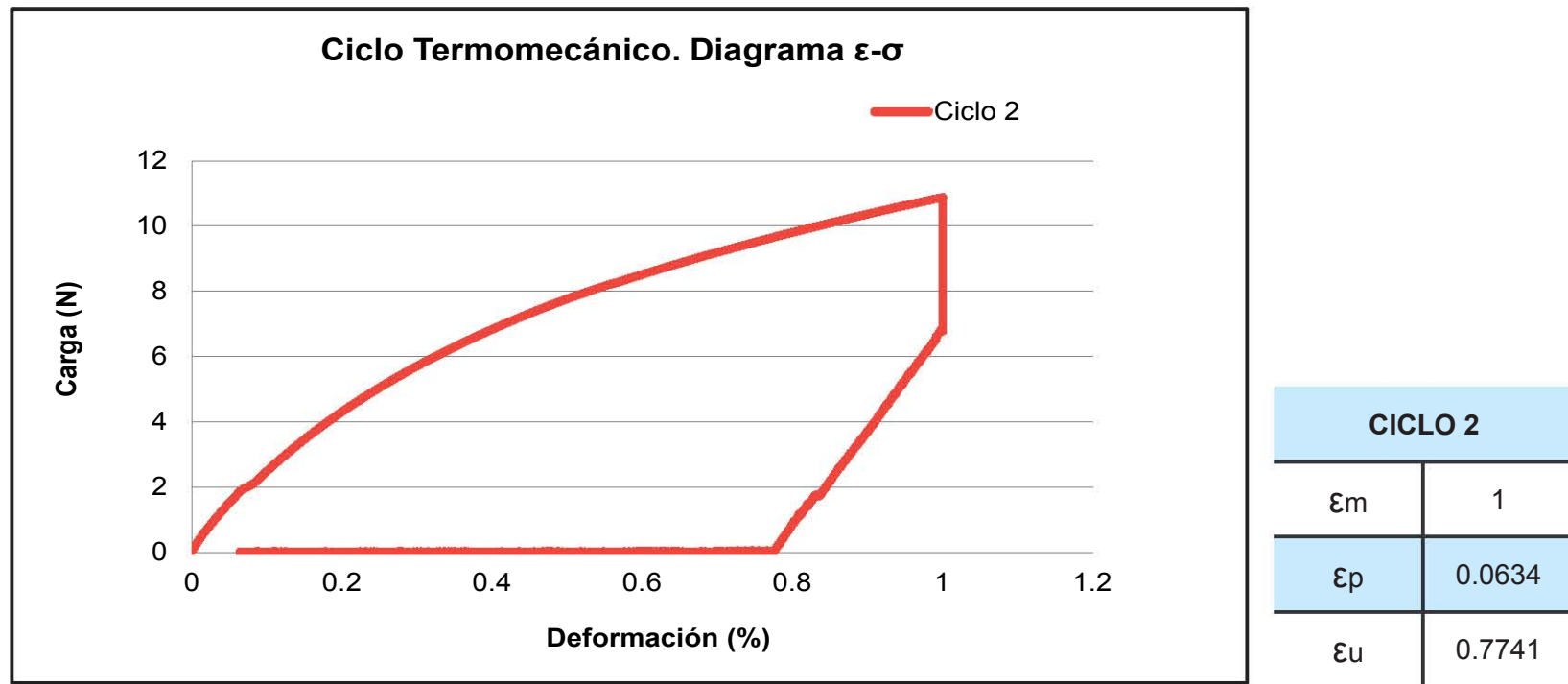
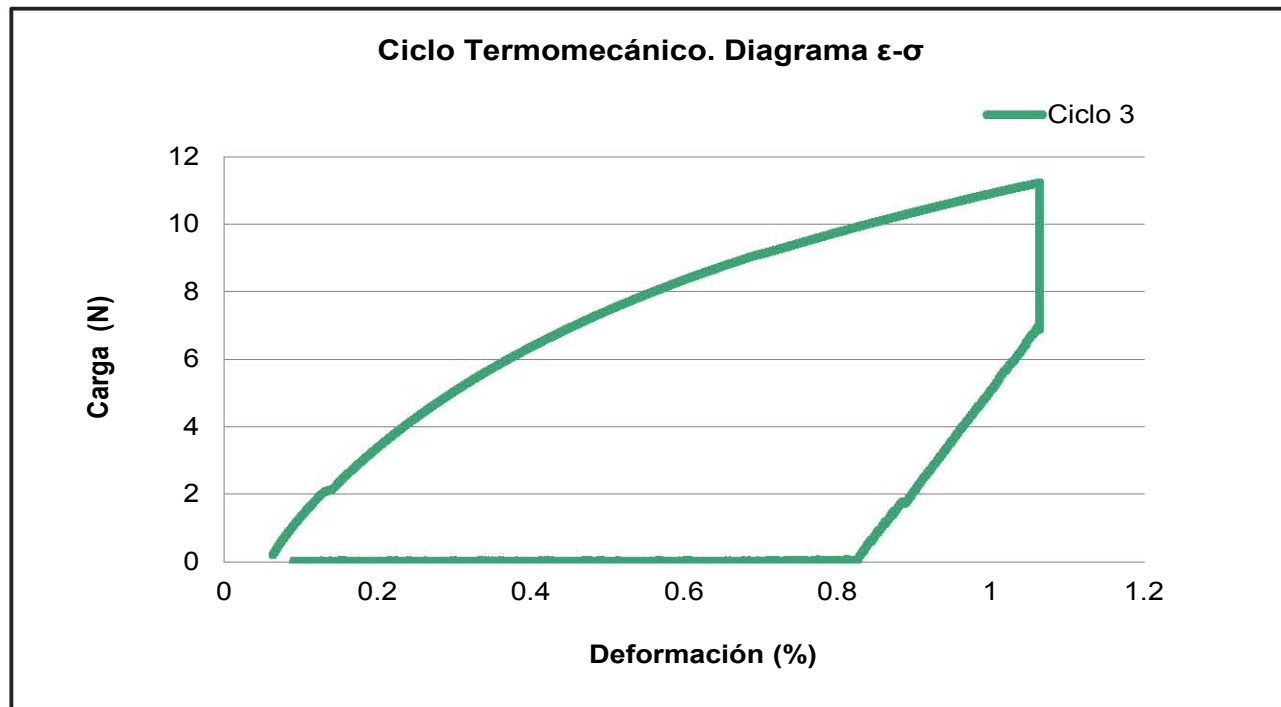
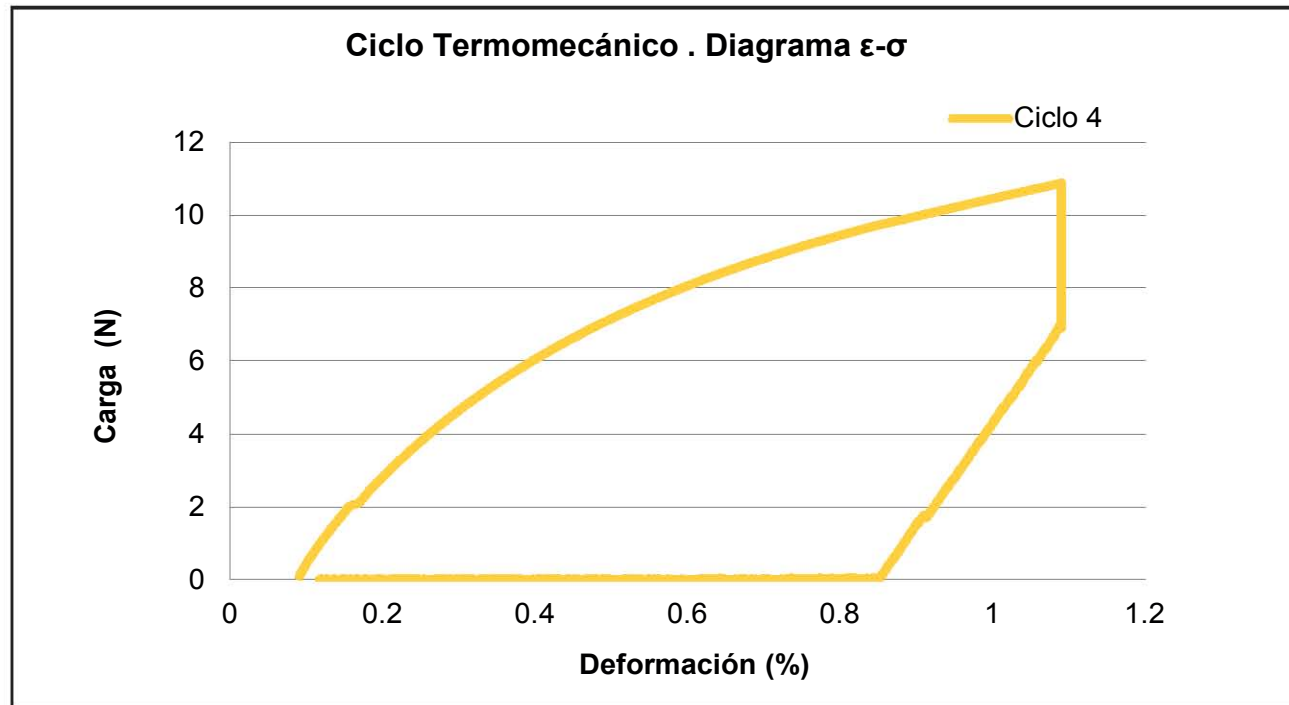


Figura 73. Probeta XNBR 4MgO 0.5 DCP – Ciclo 2



CICLO 3	
ϵ_m	1.0679
ϵ_p	0.0904
ϵ_u	0.8241

Figura 74. Probeta XNBR 4MgO 0.5 DCP – Ciclo 3



CICLO 4	
ϵ_m	1.09
ϵ_p	0.1168
ϵ_u	0.8511

Figura 75. Probeta XNBR 4MgO 0.5 DCP – Ciclo 4

Tabla No. 25 Porcentaje de fijeza y recuperación de la muestra XNBR 4 MgO 0.5 DCP, obtenida en el ciclo termo mecánico de 4 ciclos.

Ciclo	% Fijeza	% Recuperación
1	79.55	86.55
2	77.41	93.65
3	77.17	91.53
4	78.08	89.27
Promedio	77.55	91.48

Conclusiones.

La probeta XNBR 4MgO 0.5 DCP desde el primer ciclo no recupera al 100% su forma original, en promedio al ser deformada por cuatro ciclos recupera el 91.48% su forma original. Por otro lado, tiene la capacidad de fijar la forma temporal un 77.55%.

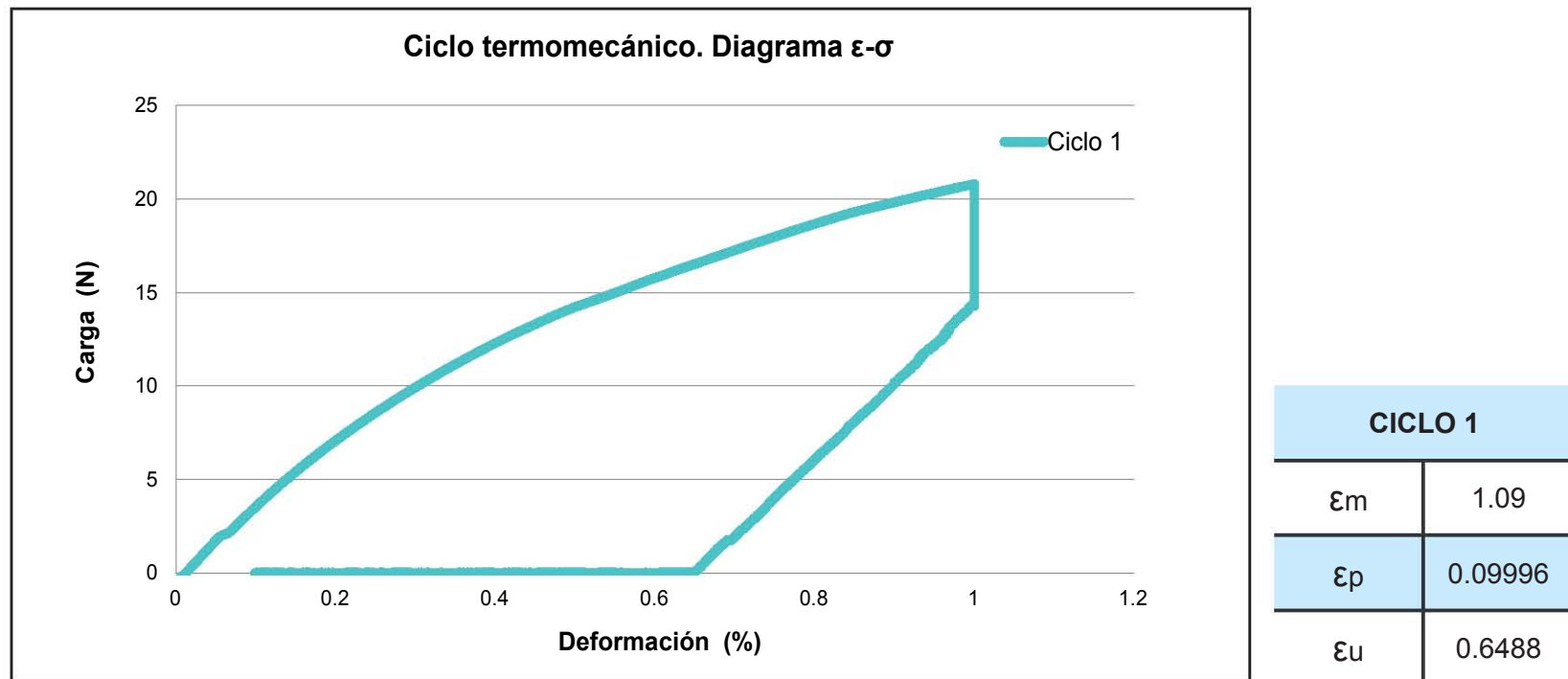
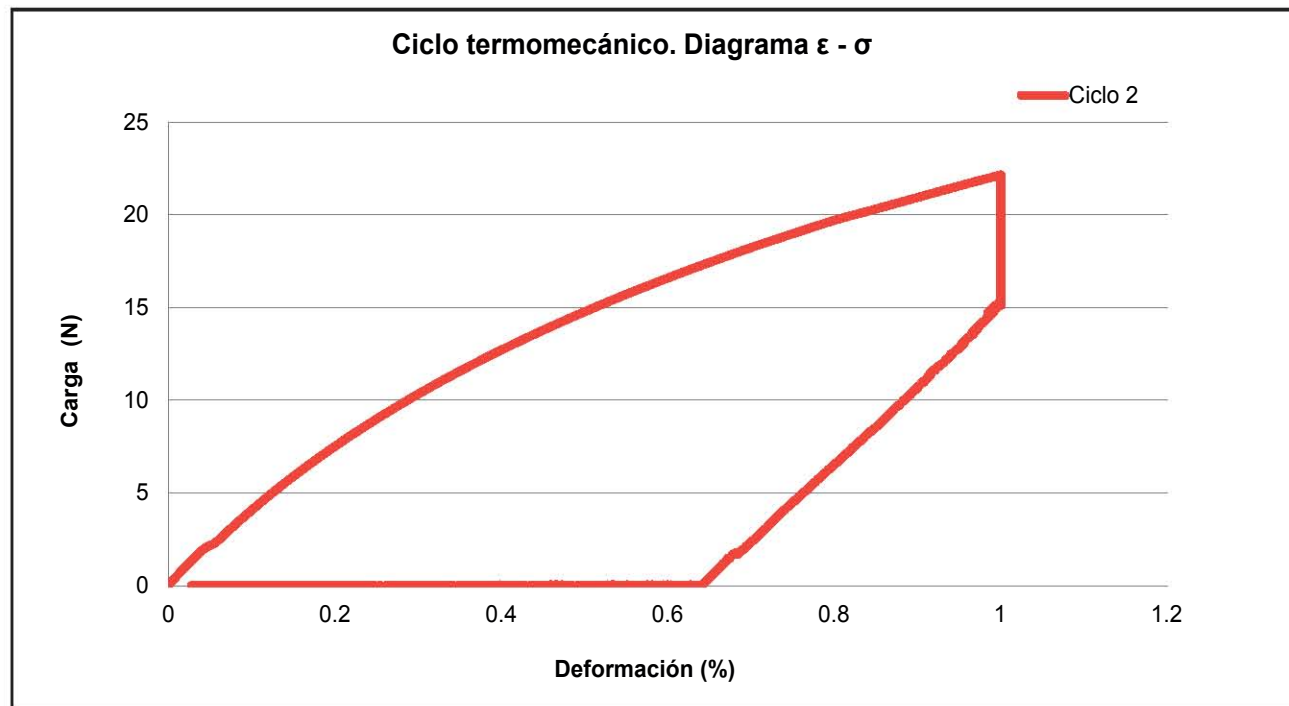
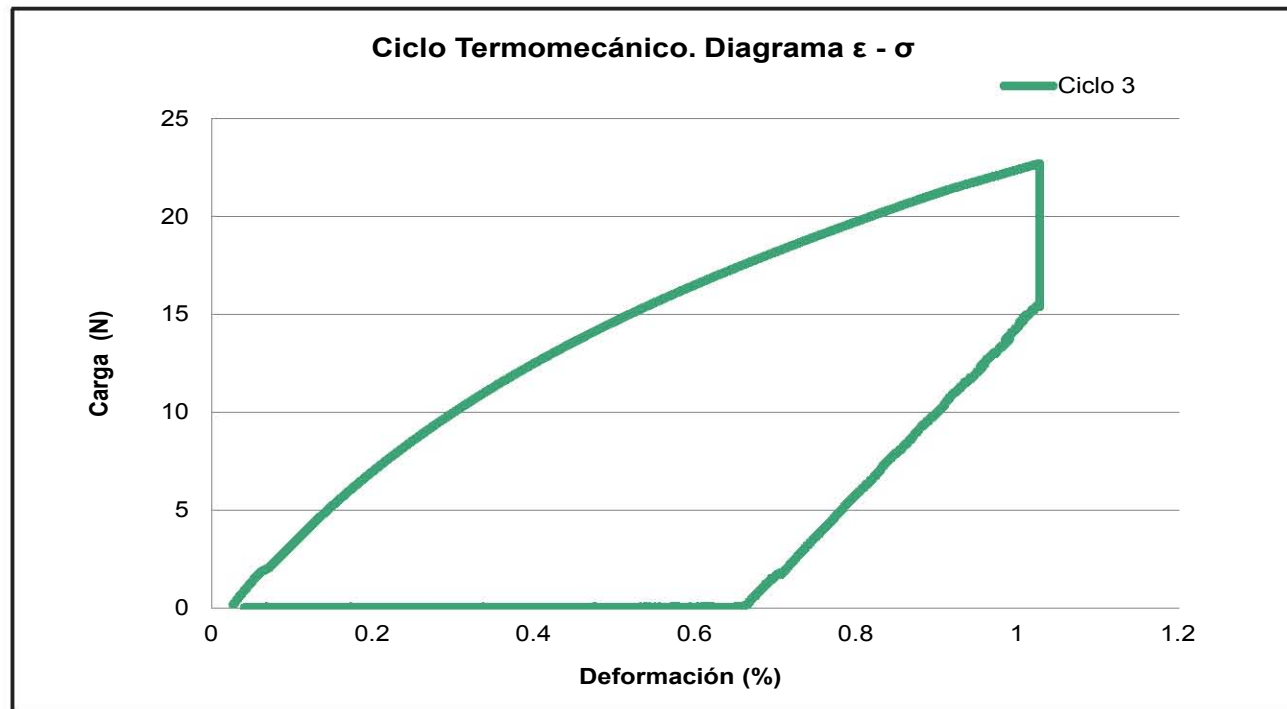


Figura 76. Probeta XNBR 4MgO 2 DCP – Ciclo 1



CICLO 2	
ϵ_m	1
ϵ_p	0.0213
ϵ_u	0.6399

Figura 77. Probeta XNBR 4MgO 2 DCP – Ciclo 2



CICLO 3	
ϵ_m	1.2340
ϵ_p	0.0411
ϵ_u	0.66006

Figura 78. Probeta XNBR 4MgO 2 DCP – Ciclo 3

Tabla No. 26 Porcentaje de fijeza y recuperación de la muestra XNBR 4 MgO 2 DCP, obtenida en el ciclo termo mecánico de 3 ciclos.

Ciclo	% Fijeza	% Recuperación
1	64.88	90.10
2	63.99	97.87
3	53.49	96.67
Promedio	58.74	97.27

Conclusiones.

La probeta XNBR 4MgO 2 DCP desde el primer ciclo no recupera al 100% su forma original, en promedio al ser deformada por tres ciclos recupera el 97.27% de su forma original. Por otro lado, tiene la capacidad de fijar la forma temporal un 58.74%. Dentro de este ensayo, se ha observado que la probeta al ser sometida al cuarto ciclo ya no es capaz de soportar la deformación, ya que la probeta rompe al inicio.

Conclusiones generales.

Hasta el momento el análisis del elastómero iónico con memoria de forma denominado XNBR ha permitido entender tanto su naturaleza como capacidad de trabajo, ayudando a razonar sobre la factibilidad de ser aplicado en envolventes arquitectónicas.

Su análisis nos indica que al ser modificada su estructura y comprobar la existencia de un efecto de memoria de forma, este material no pierde la capacidad elástica con la que cuenta por naturaleza, ya que una vez deformado y con una forma temporal fija, es capaz de soportar fuerzas de tensión secundarias. Por otro lado, lo podemos calificar como un material manejable, es decir, con él se pueden desarrollar una variedad de formas diferentes.

El efecto de memoria de forma que presenta el material es en una dirección, es decir, solo cuenta con una forma original y una forma temporal, las cuales cumplen un ciclo de memoria de forma. Este no es un proceso reversible, por lo que la programación de forma tendrá que reiniciarse cada vez cumplido el ciclo termo mecánico (deformación – recuperación).

El XNBR con memoria de forma puede llegar a emplearse en diferentes usos, ya que cuenta con un amplio rango de temperaturas de actuación oscilando entre 60 a 160°C. Sin embargo, hasta el momento solo se ha comprobado que el efecto de memoria de forma es eficiente a temperaturas entre 150 y 160°C. Para su aplicación en envolventes Arquitectónicas esto resulta ser una desventaja, ya que en elementos fijos equivaldría a disponer de un equipo mecánico externo, el cual por un lado deforme el material y por otra parte brinde la cantidad de energía suficiente para llevar a cabo la programación y recuperación de forma.

7.2. Caucho Etileno - Propileno con Anhídrido Maleico (EPM AnM)

7.2.1 DMA - Análisis Dinámico Mecánico

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el desarrollo de la etapa experimental “6.2.2 - III” descrito en el capítulo anterior.

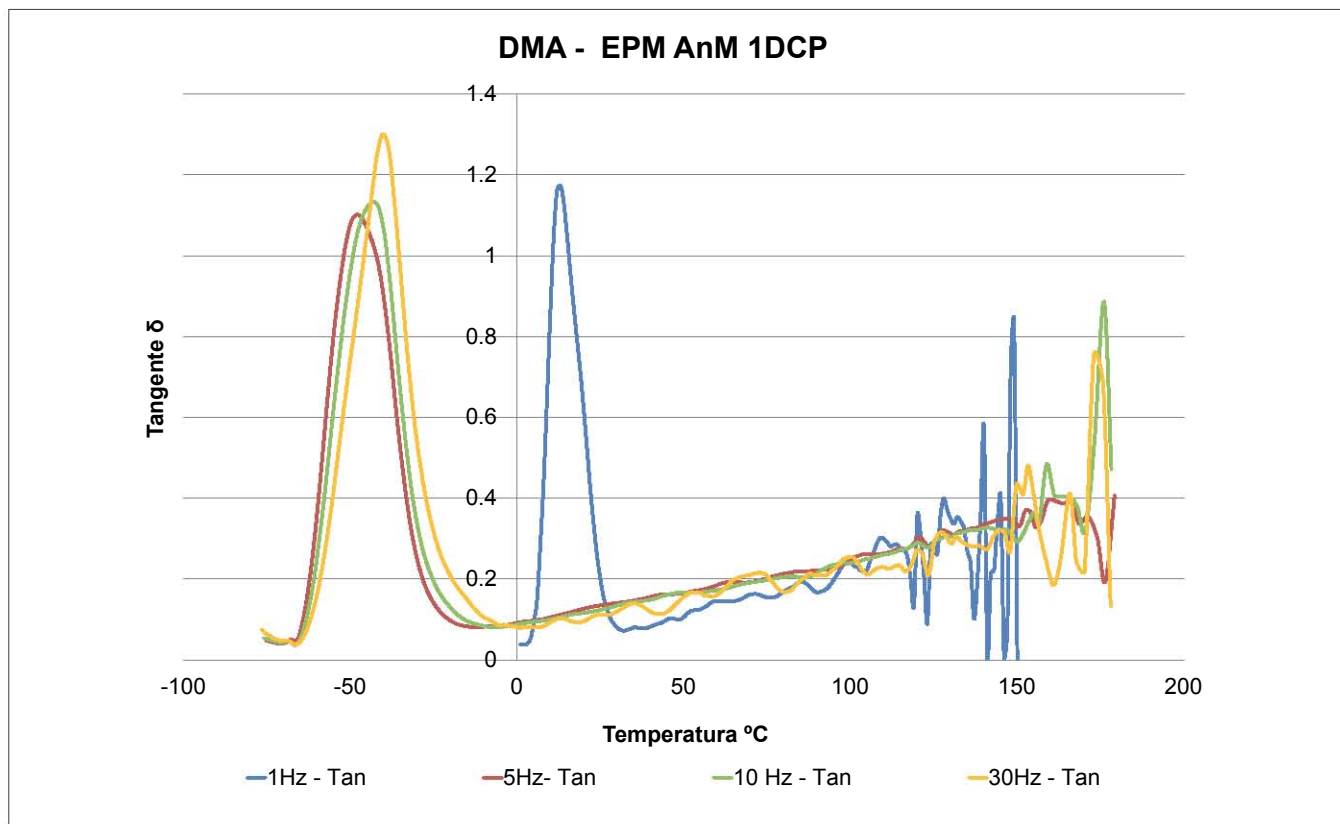


Figura 79. Factor de pérdida ($\tan \delta$) del EPM AnM 1MgO 1DCP a distintas frecuencias 1, 5, 10, 30 Hz

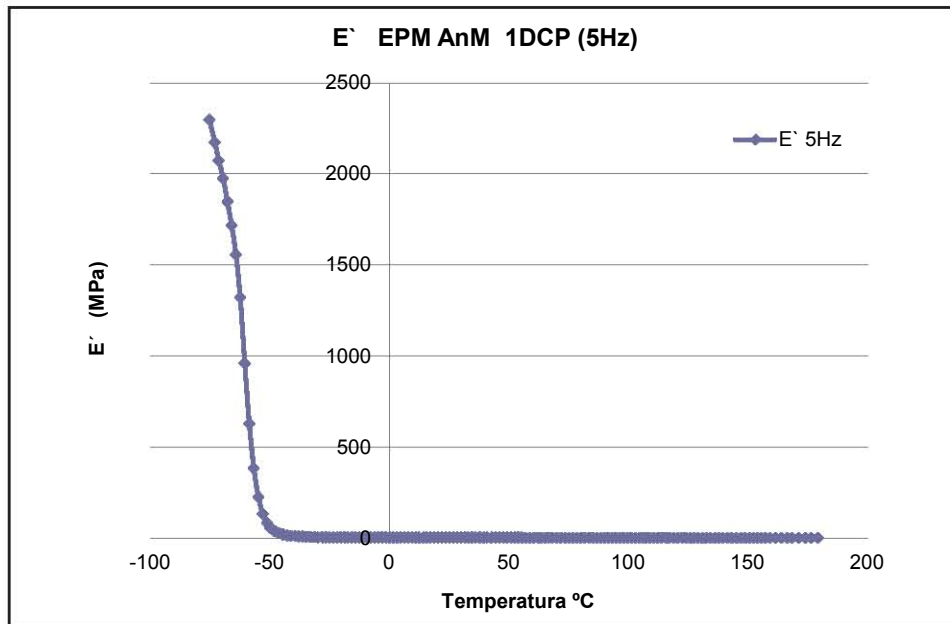


Figura 80. Módulo de almacenamiento o modulo elástico (E') del EPM AnM 1MgO 1DCP a una frecuencia de 5Hz

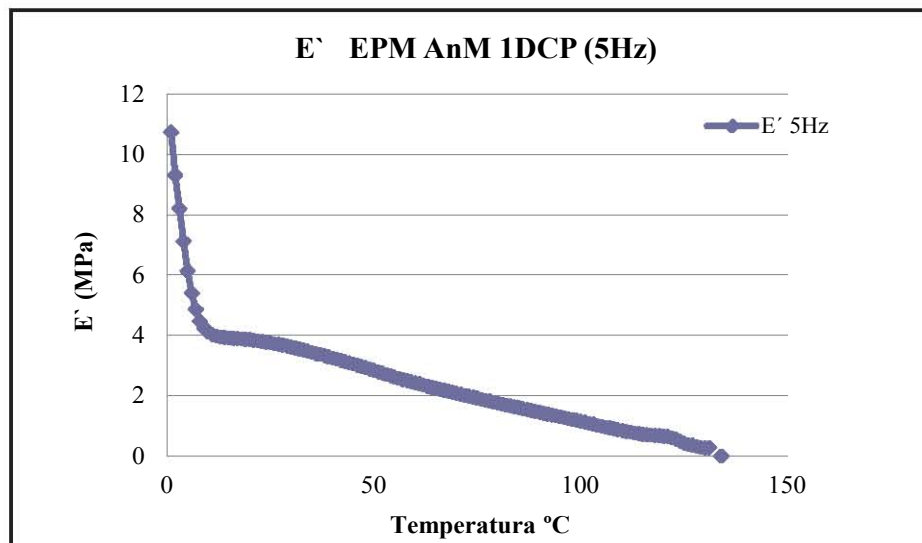


Figura 81. Acercamiento del módulo de almacenamiento o modulo elástico (E') del EPM AnM 1MgO 1DCP a una frecuencia de 5Hz

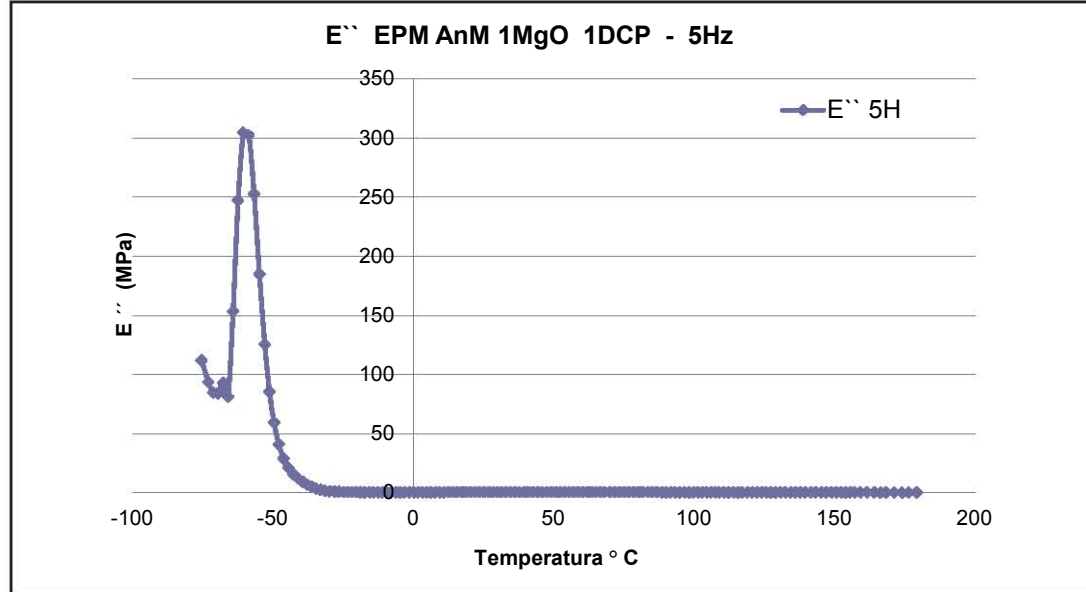


Figura 82. Módulo de pérdida (E'') del EPM AnM 1MgO 1DCP a una frecuencia de 5Hz

De acuerdo con los resultados podemos concluir que:

- En la gráfica donde se muestra la E' del EPM AnM 1DCP (ver grafica no. x) se observa una disminución en el módulo elástico a medida que la temperatura va en aumento, siendo resultado de la pérdida de efectividad de las cadenas iónicas que contiene el material. Por otro lado podemos decir que la temperatura de transición vítrea del material corresponde a $-55.63\text{ }^{\circ}\text{C}$, punto donde la caída del módulo es mayor.

- En la gráfica de E'' de la muestra EPM AnM 1DCP (ver grafica no. x) el módulo de perdidas corresponde a una temperatura de $-57.34\text{ }^{\circ}\text{C}$, punto donde

el material se relaja y cuenta con una mayor capacidad de deformarse siendo resultado del aumento de la temperatura a la que está sometido.

- En la gráfica de $\tan \delta$ de la muestra EPM AnM 1DCP (ver grafica no. x) y de acuerdo a la gráfica de E' podemos decir que la temperatura de transición vítrea de este material corresponde $-49.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, donde el material pasa de un estado vítreo a elástico.

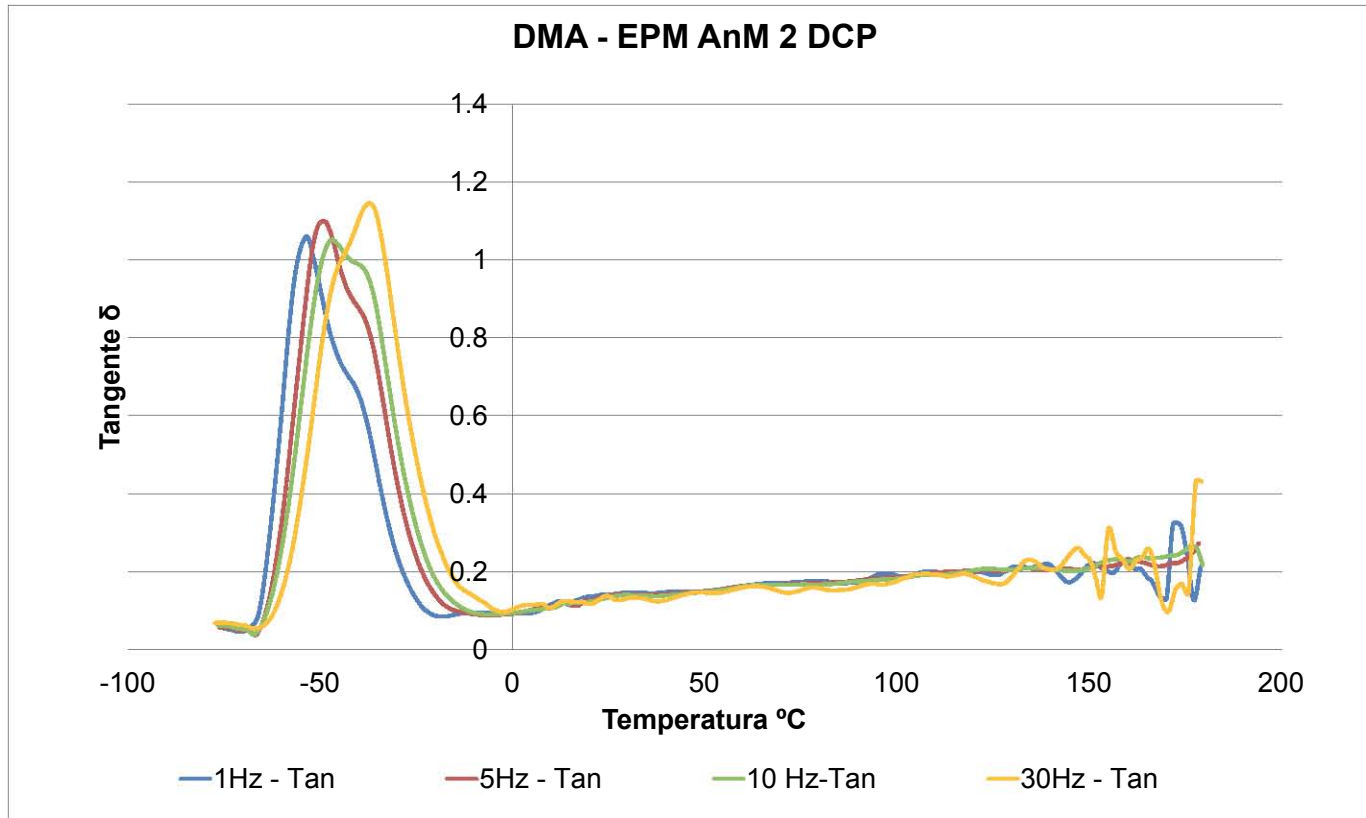


Figura 83. Factor de pérdida ($\tan \delta$) del EPM AnM 1MgO 2DCP a distintas frecuencias 1, 5, 10, 30 Hz

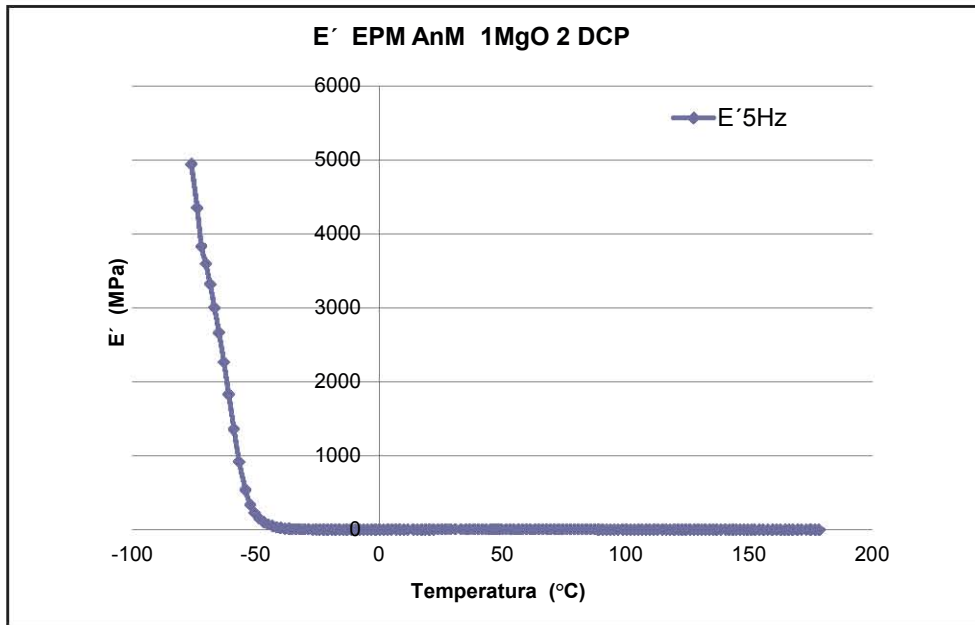


Figura 84. Módulo de almacenamiento o modulo elástico (E') del EPM AnM 1MgO 2DCP a una frecuencia de 5Hz

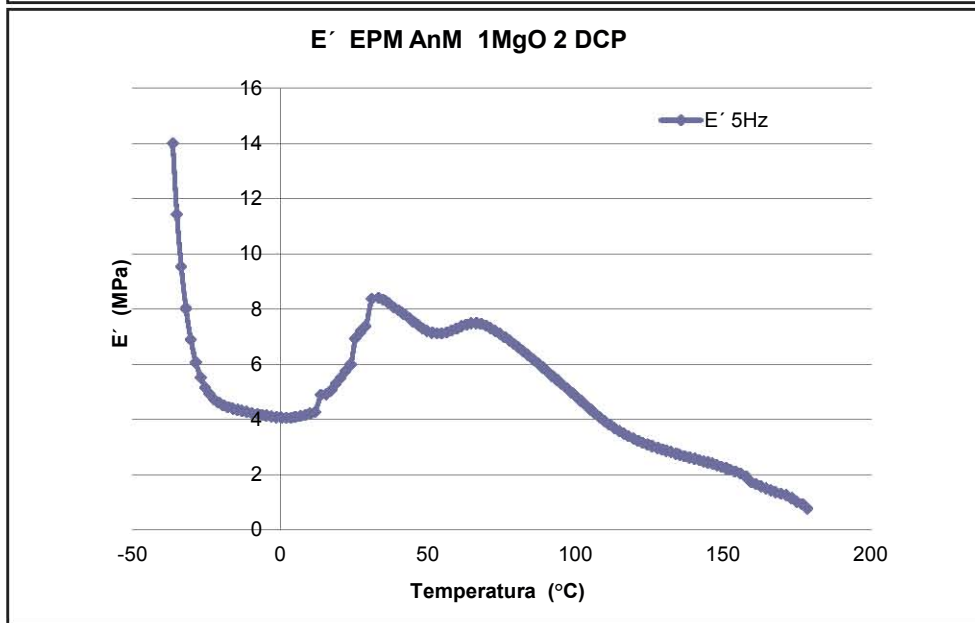


Figura 85. Acercamiento del módulo de almacenamiento o modulo elástico (E') del EPM AnM 1MgO 2DCP a una frecuencia de 5Hz

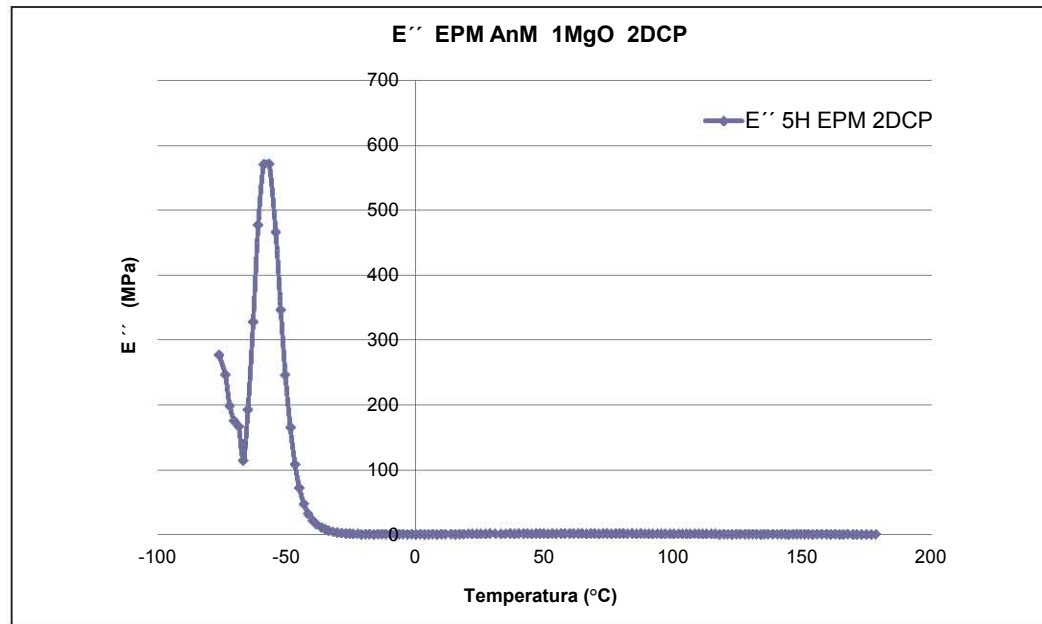


Figura 86. Módulo de pérdida (E'') del EPM AnM 1MgO 2DCP a una frecuencia de 5Hz

De acuerdo a los resultados obtenidos, podemos concluir que:

- En la gráfica de E' de la muestra EPM AnM 2DCP (ver grafica no. x) se observa una disminución del módulo elástico a medida que la temperatura a la que se somete va en aumento, siendo resultado de una pérdida de efectividad de las cadenas iónicas que contiene el material. Por otro lado podemos decir que la temperatura de transición vítrea del material corresponde a $-59\text{ }^{\circ}\text{C}$, punto donde la caída del módulo es mayor.

- En la gráfica de E'' de la muestra EPM AnM 2DCP (ver grafica no. x) el módulo de pérdidas corresponde a una temperatura de $-56.73\text{ }^{\circ}\text{C}$, punto donde el material se relaja y cuenta con una mayor capacidad de deformarse siendo resultado del aumento de la temperatura a la que está sometido.
- En la gráfica de $\tan \delta$ de la muestra EPM AnM 2DCP (ver grafica no. x) y de acuerdo a la gráfica de E' podemos decir que la temperatura de transición vítrea de este material corresponde $-50.43\text{ }^{\circ}\text{C}$, donde el material pasa de un estado vítreo a elástico.

7.2.2 Esfuerzo - deformación en tracción

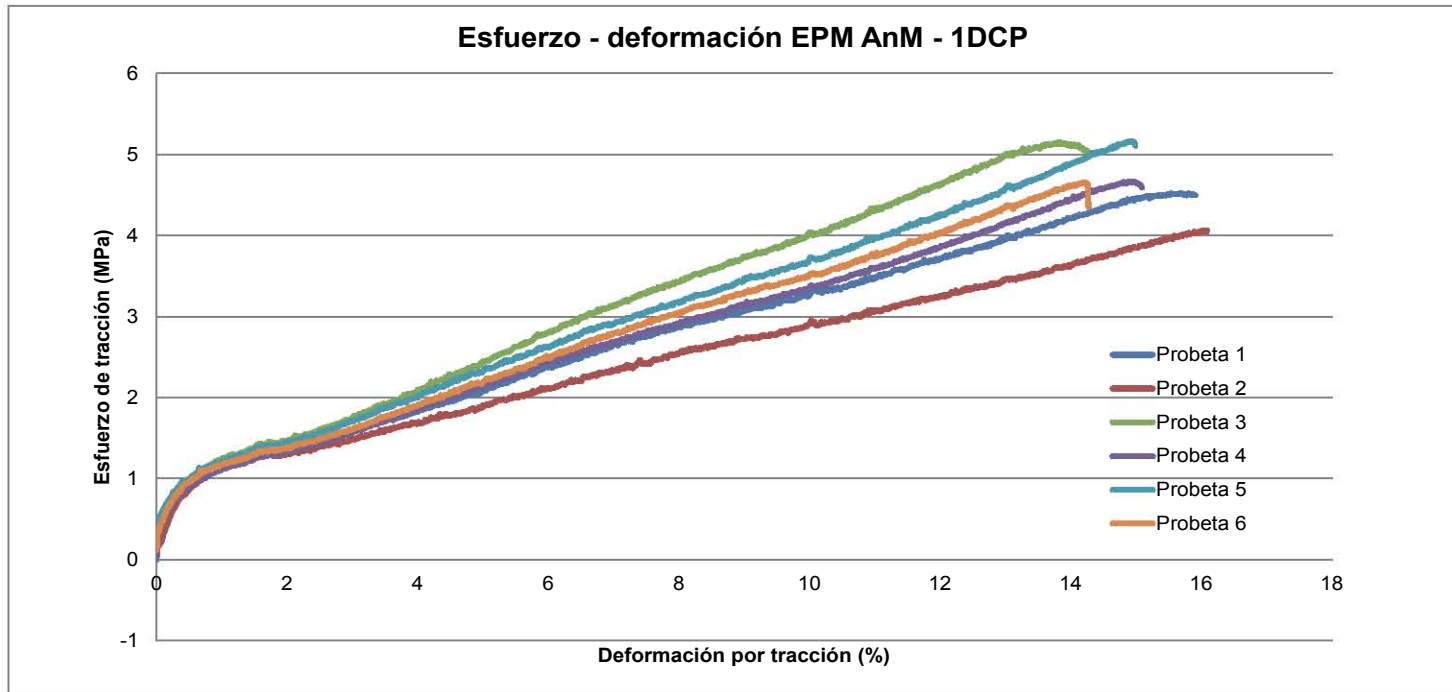


Figura 87. Esfuerzo - Deformación por tracción de la muestras de EPM AnM 1MgO 1DCP

Tabla 27. Resultados del método de prueba esfuerzo – deformación a tracción de la mezcla EPM AnM 1MgO 1DCP.

Esfuerzo de tracción (MPa)						
Espesor (mm)	100%	300%	500%	Máxima carga (N)	Esfuerzo Máximo	Deformación Máxima
0.475	1.18	1.62	2.18	4.79	4.70	1491.94

7.2.2 Esfuerzo - deformación en tracción

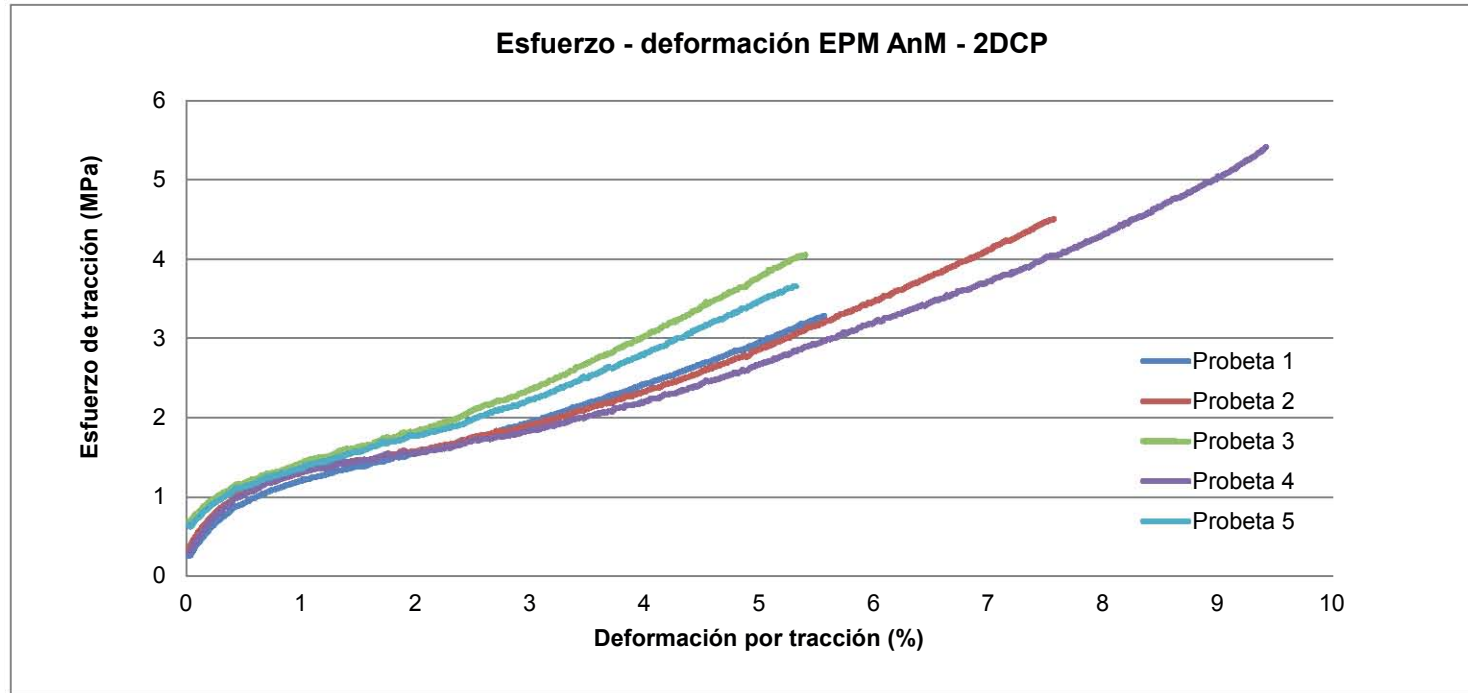


Figura 88. . Esfuerzo - Deformación por tracción de la muestras de EPM AnM 1MgO 2DCP

Tabla 28. Resultados del método de prueba esfuerzo – deformación a tracción de la mezcla EPM AnM 1MgO 2DCP

Esfuerzo de tracción (MPa)						
Espesor (mm)	100%	300%	500%	Máxima carga (N)	Esfuerzo Máximo	Deformación Máxima
0.52	1.32	2.05	3.14	4.52	4.18	665

Conclusiones

Al comparar las dos muestras, se puede percatar que al aumentar la densidad de entrecruzamientos dada por la cantidad de peróxido agregado (DCP), el material EPM AnM experimenta un aumento en el grado de rigidez, esta observación es evidente en la capacidad de deformación con la que cuentan las dos muestras, ya que mientras la muestra EPM AnM con 1DCP puede llegar a deformarse hasta un 1400%, la muestra con contenido 2DCP llega a deformarse hasta un 665%, por lo tanto existe una mayor cantidad de enlaces covalentes que vuelven al material rígido.

De acuerdo a este método de prueba el material EPM AnM es un material de mayor elasticidad en comparación con el XNBR.

7.2.3 Análisis del efecto de Memoria de forma

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el desarrollo de la etapa experimental “6.2.2 - IV” descrito en el capítulo anterior.

Se muestran:

$$\epsilon = (L_f - L_o) / L_o$$

- Obtención de la relación de fijeza.

$$R_f(N) = \frac{\epsilon_u(N)}{\epsilon_m(N)} \times 100\%$$

- Obtención de la relación de recuperación.

$$R_r(N) = \frac{\epsilon_m(N) - \epsilon_p(N)}{\epsilon_m(N)} \times 100$$

Tabla 29. Obtención de la deformación ϵ_u y relación de fijeza (Rf) en muestras de EPM AnM 1DCP.

Temperatura (°C)	Lo (cm) Longitud inicial	Lf (cm) Longitud final	ϵ_u	Rf (%)
80	3	5.1	0.700	70.0
90		5.3	0.766	76.6
100		5.5	0.833	83.3
110		5.5	0.833	83.3
120		5.4	0.800	80.0
130		5.7	0.900	90.0
140		5.6	0.866	86.6
150		5.7	0.900	90.0

Tabla 30. Obtención de la deformación ϵ_p y relación de recuperación (Rr) en muestras de EPM AnM 1DCP

Temperatura (°C)	Lo (cm) Longitud inicial	Lf (cm) Longitud final	ϵ_p	Rr (%)
80	3	5.1	0.700	70.0
90		5.3	0.766	76.6
100		5.5	0.833	83.3
110		5.5	0.833	83.3
120		5.4	0.800	80.0
130		5.7	0.900	90.0
140		5.6	0.866	86.6
150		5.7	0.900	90.0

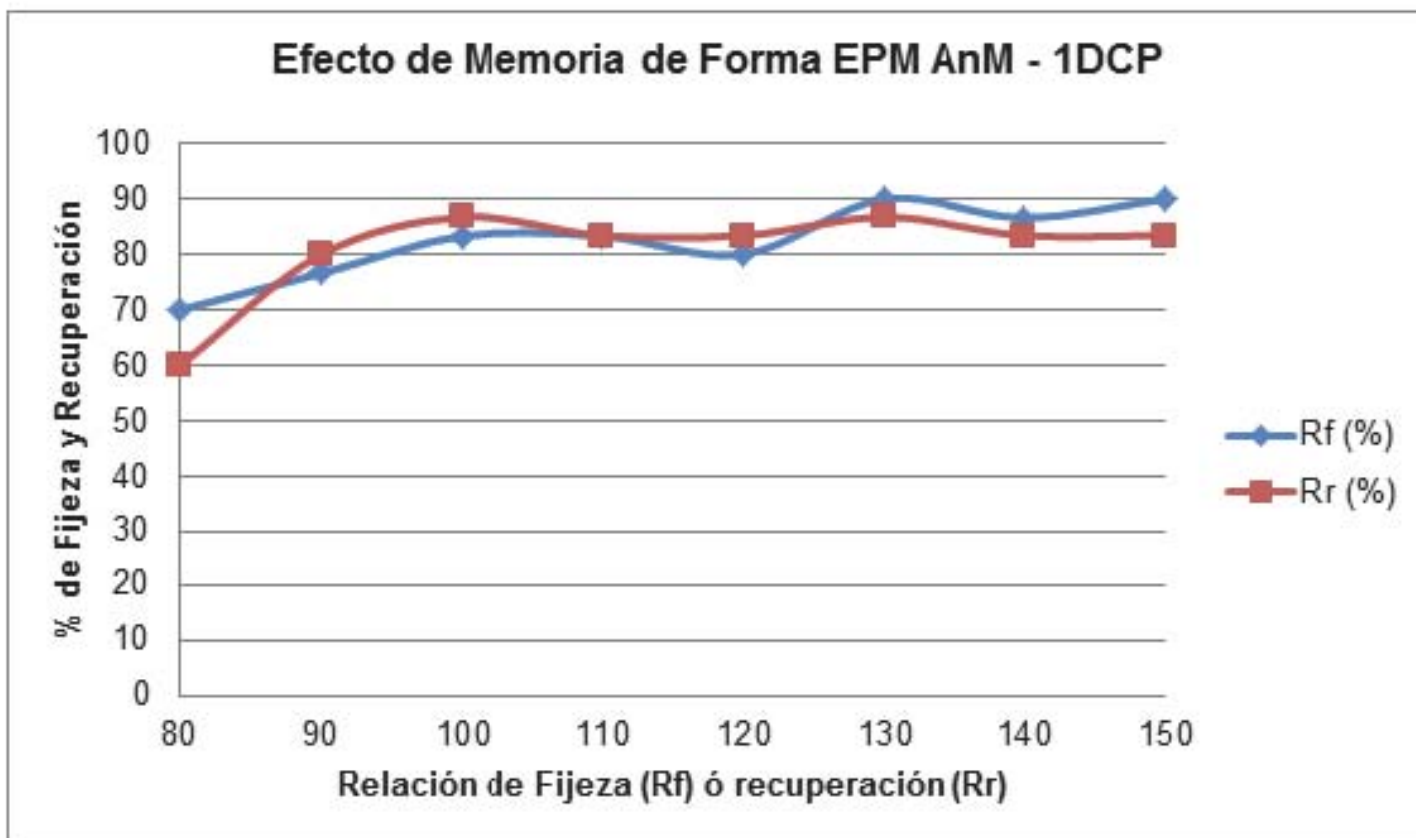


Figura 89. Análisis cualitativo del efecto de memoria de forma de las muestras de EPM AnM 1MgO 1DCP

Tabla 31. Obtención de la deformación ϵ_u y relación de fijeza (Rf) en muestras de EPM AnM 2DCP.

Temperatura (°C)	Lo (cm) Longitud inicial	Lf (cm) Longitud final	ϵ_u	Rf (%)
80	3	4.5	0.500	50.0
90		4.7	0.566	56.6
100		4.9	0.633	63.3
110		4.9	0.633	63.3
120		4.8	0.600	60.0
130		5.0	0.666	66.6
140		5.1	0.700	70.0
150		5.2	0.733	73.3

Tabla 32. Obtención de la deformación ϵ_p y relación de recuperación (Rr) en muestras de EPM AnM 2DCP

Temperatura (°C)	Lo (cm) Longitud inicial	Lf (cm) Longitud final	ϵ_p	Rr (%)
80	3	3.5	0.166	83.4
90		3.3	0.100	90.0
100		3.4	0.133	86.7
110		3.2	0.066	93.4
120		3.3	0.100	90.0
130		3.2	0.066	93.4
140		3.3	0.100	90.0
150		3.5	0.166	83.4

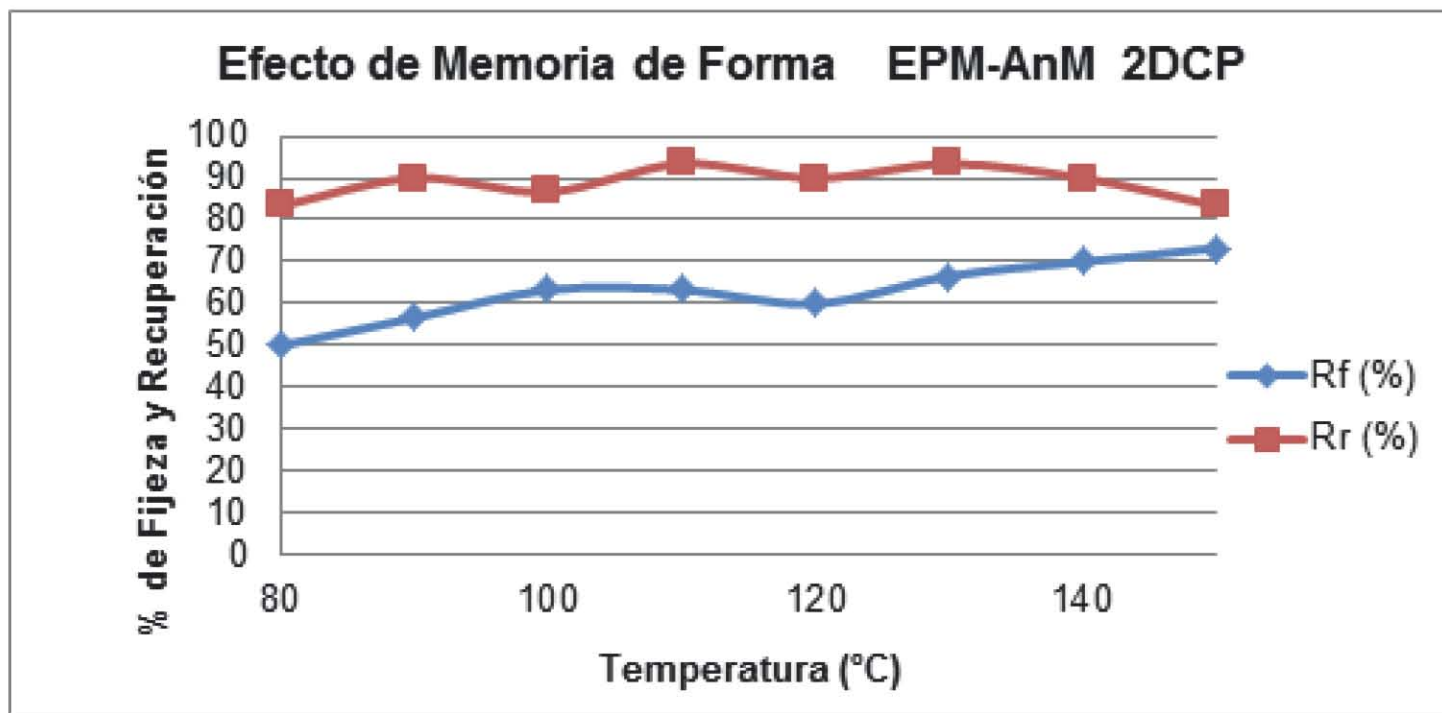


Figura 90. Análisis cualitativo del efecto de memoria de forma de las muestras de EPM AnM MgO 2DCP

Conclusiones

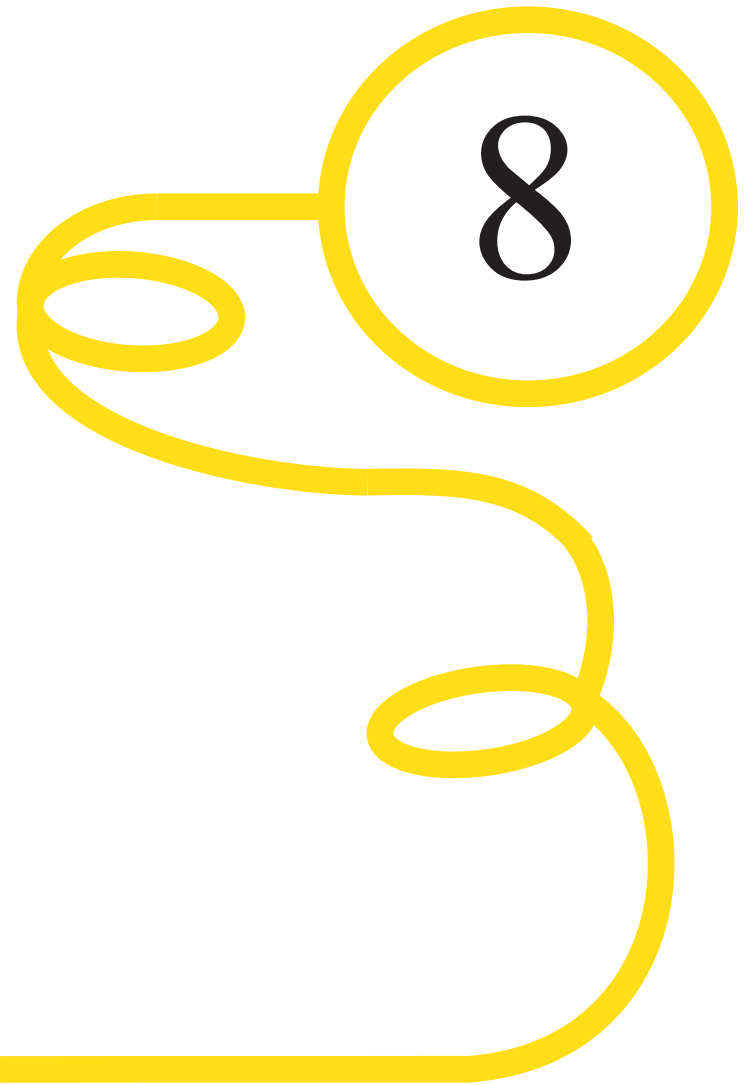
El análisis cualitativo de efecto de memoria de forma realizado a las muestras de EPM AnM arrojan los siguientes resultados:

- La muestra con un 1DCP cuenta con una relación de fijeza buena (Rf) en los rangos de temperaturas entre 100 – 150 °C, debido a que los grupos iónicos cuentan con la capacidad de contrarrestar la fuerza elástica ejercida por los entrecruzamientos covalentes formados por el DCP. Por otro lado la capacidad de recuperación de la forma (Rr) permanente del material dentro del mismo rango de temperaturas oscila entre el 83 y 86%.

- La muestra con 2DCP cuenta con una relación de fijeza regular en los rangos de temperaturas entre 100 – 150 °C, debido a que existe una mayor cantidad de entrecruzamientos covalentes, por lo que los grupos iónicos cuentan con menor capacidad de contrarrestar la fuerza elástica ejercida por ellos y por lo tanto retener la forma temporal. Por otro lado la capacidad de recuperación de la forma (Rf) permanente del material dentro del mismo rango de temperaturas aumenta y se califica como buena, ya que oscila entre el 85 y 93%.

El análisis cualitativo de memoria de forma realizado en las dos muestras nos muestra que la relación de fijeza aumenta en relación al aumento de temperatura que experimentan, por lo que podríamos decir que el material cuenta con una transición ancha, a partir de la cual los entrecruzamientos iónicos se pueden activar en diferentes grados de temperatura, proporcionando al material una cualidad para poder ser trabajado.

Para poder optimizar el material es necesario poner atención en la materia prima principal el EPM AnM, ya que contiene poca cantidad de uniones iónicas dadas por el Anhídrido Maleico. Por lo tanto para llegar a obtener un material con mejor efecto de memoria de forma es importante incrementar el número de grupos ionizables dentro de la estructura del polímero.



PROPUESTA DE APLICACIÓN



8. PROPUESTA DE APLICACIÓN.

Envolvente de uso temporal

Se propone utilizar el elastómero iónico XNBR como material para ser empleado en el desarrollo de superficies ligeras, cuya función se dirige a ser cubiertas de claros cortos en servicio durante lapsos de tiempos cortos.

Esta propuesta es resultado del análisis previo de las características de los materiales XNBR y EPM AnM realizado en la etapa experimental, pues de acuerdo a ello sabemos que no son materiales capaces de actuar en envoltentes fijas debido al rango de temperaturas a partir de las cuales actúan.

Como cubiertas ligeras el material XNBR tendrá la capacidad de ser usado varias veces, mientras no pierda la capacidad de memoria de forma y así generarse diseños diferentes al aplicarle fuerzas en distintas direcciones.

Su empleo como material en Arquitectura tiene algunas ventajas y desventajas, como son:

Ventajas:

-El material es un elastómero, el cual se caracteriza por tener una elasticidad elevada, siendo capaz de alcanzar grandes deformaciones a tensión (hasta un 250%).

-El XNBR tiene la capacidad de memoria de forma, aprovechando esta cualidad se pueden generar diferentes diseños en una misma placa y colocarla en contextos y tiempos diferentes, por lo que se califica al material como reutilizable.

-El ciclo de efecto de memoria de forma puede repetirse un “n” número de veces, sin pérdida de efectividad del material y con ello lograr su reciclaje.

Desventajas:

- El rango de temperatura de actuación es elevado, por lo que para la programación de memoria de forma es necesario emplear una máquina externa que provoque el ciclo esfuerzo – deformación, para así obtener el grado de temperatura requerido para la actuación del material.

- El material deberá ser trabajado en módulos cuyas dimensiones sean pequeñas para poder ser transportados.

Para corroborar esta propuesta es necesario el estudio de las propiedades óptico – solares del material, es decir, la transmisión, reflexión y absorción del calor con el fin de dar soporte a su uso específico en cubiertas ligeras.

Por otro lado dentro del mercado competirá con los materiales de uso común en Arquitectura Textil, como son las membranas estructuradas de PVC, de fibra de vidrio, de PTFE (Politetrafluoroetileno), entre otras; estos materiales se distinguen por tener la capacidad de cubrir grandes claros y cerrar espacios a un costo re-

ducido. Por otro lado, cuentan con una gran rapidez de ejecución en su montaje.

Al realizar un comparativo en propiedades de los materiales de uso común con las de XNBR, observamos lo siguiente:

Material	Espesor (mm)	Resistencia a tracción (MPa)	Resistencia al desgarro (Mpa)
Membrana estructural de PVC	0.58	274	25
Fibra de Vidrio	0.7	687	68
PTFE	0.7	588	68
XNBR 0.5 DCP	2	36.75	49

El XNBR cuenta con una resistencia a tracción inferior a la capacidad que tienen los materiales convencionales, en cambio es una material capaz de competir por la resistencia al desgarro con la que cuenta.

De acuerdo con el análisis realizado en la etapa experimental, podemos decir que el material XNBR en cubiertas ligeras tendría ciertas ventajas y desventajas en comparación con los materiales convencionales, como son:

8.1 Evaluación del perfil de riesgo.

De acuerdo al método “Definición, Clasificación, Impacto y Potencial”, Materiales Emergentes autor Mtro. Ernesto Ocampo Ruíz se definirá el perfil de riesgo del material XNBR para ser empleado en Arquitectura.

La evaluación del perfil de riesgo contempla tres campos principales el mercado, la tecnología y la organización, los cuales se representan en un esquema de ejes cartesianos (ver figura 91).

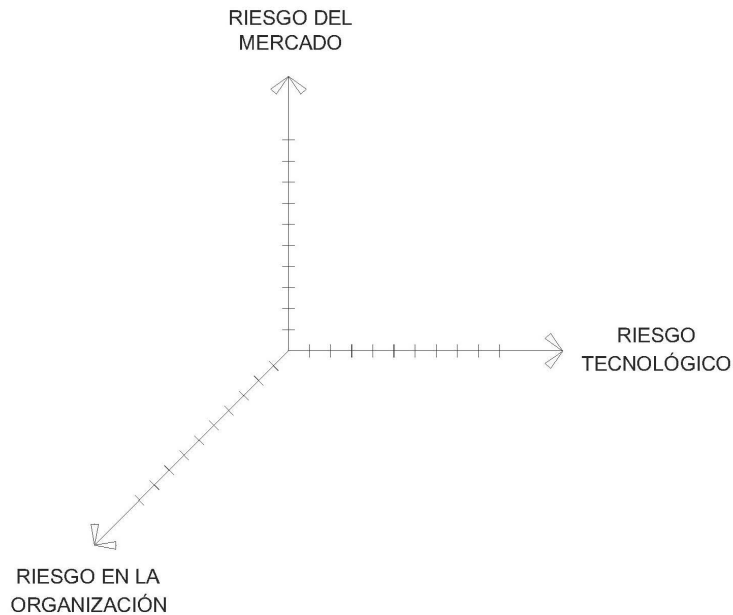


Figura 91. Esquema empleado para la evaluación del perfil de riesgo.

Dentro de cada campo se evalúa:

- **Riesgo del mercado.**

Se analizan los factores que repercuten colocar el material en el área comercial, para lo cual se evalúan la reacción de la competencia y el cliente para el cual se ha destinado su desarrollado. El riesgo toma en cuenta: tamaño y alcance del mercado, definición

de la base de clientes, conocimientos de las necesidades del cliente, canales de distribución, entorno regulatorio, reglas de propiedad intelectual, posición y reacción de la competencia.

- **Riesgo Tecnológico.**

Se evalúa la viabilidad del desarrollo de un producto y las desventajas que tiene con respecto a otro producto ya conocido. El riesgo tecnológico toma en cuenta: la viabilidad tecnológica, incertidumbre en los estándares, peligros físicos, desventajas del producto, abastecimiento de la materia prima y posibilidad de fabricación.

- **Riesgo de Organización.**

Se evalúan algunos aspectos como la adecuación de sus capacidades, el costo, velocidad de cambio organizacional, la dependencia de una nueva organización, la dependencia de socios externos, la calidad y disponibilidad del personal, tasa de consumo frente a efectivo y per capita.

Procedimiento:

1. Una vez realizado el análisis de la tecnología en este caso el material XNBR, se colocó un límite de evaluación dado por los autores del mismo, siendo este de 10 unidades en cada eje cartesiano.

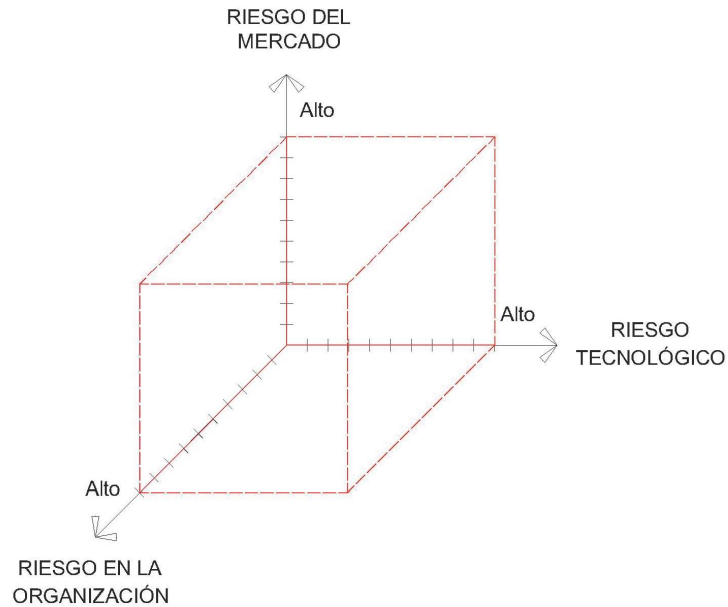


Figura 92. Límite de evaluación del perfil de riesgo

2. Se evalúan el riesgo que existe entre dos campos.

2.1 Evaluación del riesgo entre el área de Mercado y el área Tecnológica.

Se ha calificado de la siguiente manera:

Riesgo en el mercado = 7

Riesgo tecnológico = 5

El valor dado al área de mercado es resultado del análisis con el que se cuenta del material XNBR, ya que aún no se considera su comportamiento en el área comercial. Se requiere de un análisis profundo de competencia entre una cubierta ligera realizada con materiales convencionales y una cubierta ligera realizada con XNBR y su aceptación con proveedores y público.

El valor dado al área de riesgo tecnológico se evalúa a la mitad, pues aún existen puntos de desarrollo para confirmar el uso en cubiertas ligeras como son las propiedades ópticas del material, así como la definición de un proceso de fabricación a gran escala.

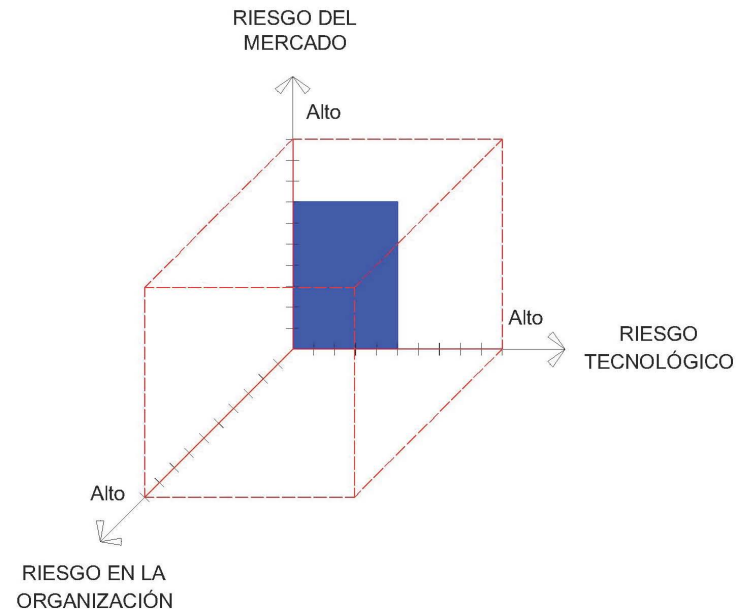


Figura 93. Evaluación del riesgo entre el área de Mercado y el área Tecnológica.

2.2 Evaluación del riesgo entre el área de Mercado y el área de Organización.

Se ha calificado de la siguiente manera:

Riesgo en el mercado = 7

Riesgo organizacional = 5

Ambos campos en caso de no estar estudiados a profundidad significaría un alto riesgo que el material XNBR con un nivel de estudio de TRL 4 sea puesto a la venta como material nuevo con memoria de forma.

El valor dado al área de riesgo organizacional se evalúa a la mitad, ya que falta el estudio de costos, calidad de materiales y la velocidad de cambio entre empresas al ser empleado como material de construcción. (ver Figura 94)

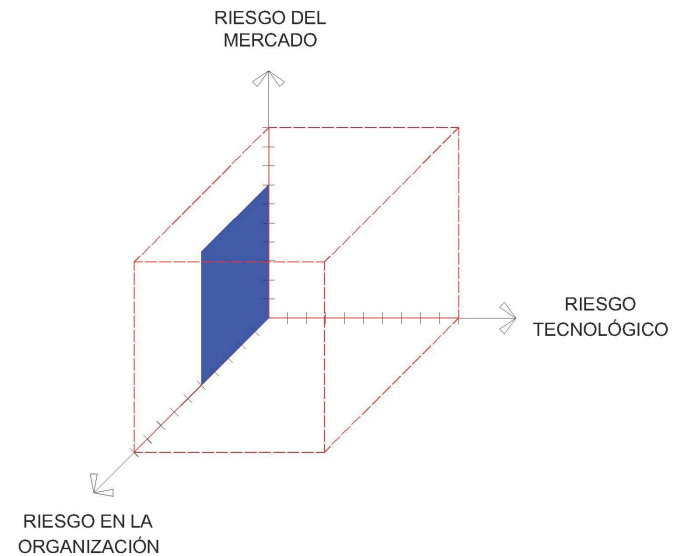


Figura 94. Evaluación del riesgo entre el área de Mercado y el área Organización.

2.3. Evaluación del riesgo entre el área Tecnológica y el área de Organización.

Se ha calificado de la siguiente manera:

Riesgo en el mercado = 5

Riesgo organizacional = 5

Se evaluó de esta manera ya que depende de la relación que exista entre ambas áreas para generar un producto nuevo. El desarrollo del XNBR como nuevo material aplicado en Arquitectura cuenta con un plus a favor, siendo la capacidad de memoria de forma de material y el cual debe ser estudiado minuciosamente para poder así lograr una competencia con materiales convencionales.

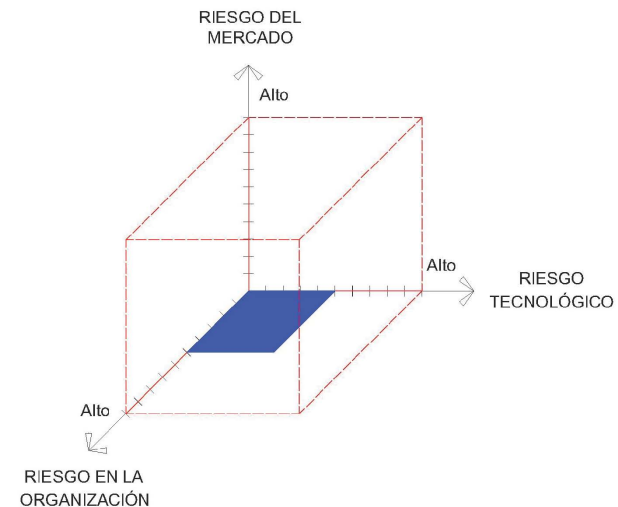


Figura 95. Evaluación del riesgo entre el área Tecnológica. y el área de Organización.

Conclusión.

El estado actual de la investigación “Envolvente con Memoria” se ha evaluado como riesgo medio, ya que por el momento el desarrollo del mismo debe profundizar en el estudio de mercado y terminar por corroborar el área tecnológica.

Se han identificado una serie de aspectos por profundizar en el estudio realizado:

- 1) Estudio de propiedades ópticas del material.
- 2) Análisis del proceso de fabricación para obtener módulos de dimensiones mínimas (1m x 1m).
- 3) Análisis de su comportamiento en modelos a escala, empleando el material como cubierta ligera.
- 4) Análisis del mercado de cubiertas ligeras.

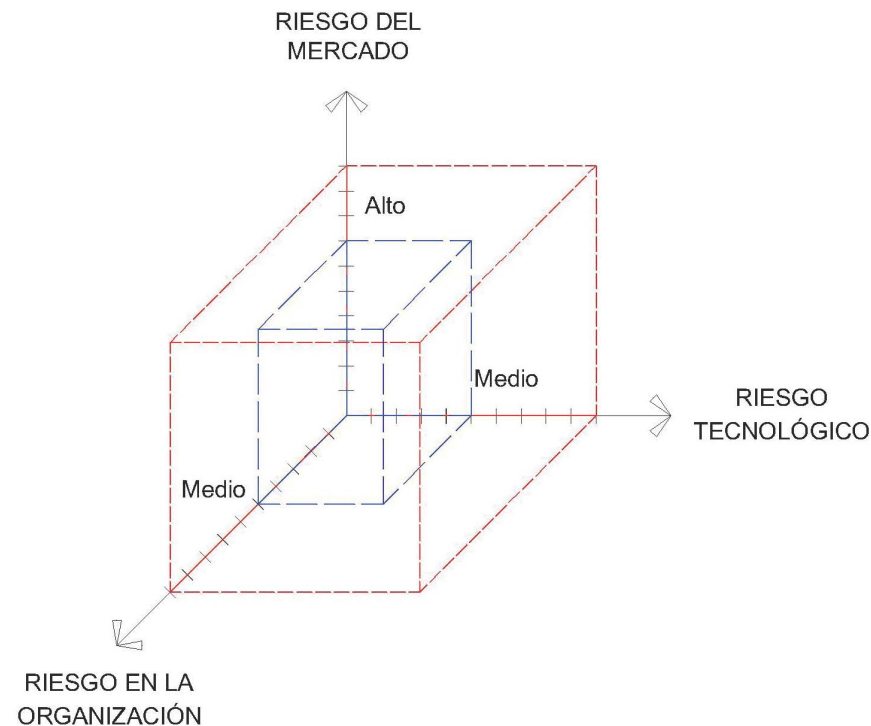


Figura 96. Evaluación de perfil de riesgo final.

HOJA DE PRODUCTO

Elastómero Iónico con Memoria de Forma

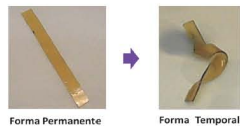


Compuesto por:

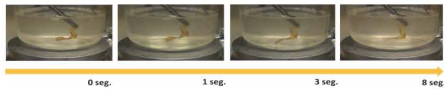
- | | | |
|------------------------------|---|---|
| ELASTÓMERO | + | INTERACCIONES COVALENTES |
| Caucho Nitrílico Carboxilado | | Peróxido de Dicumilo DCP "Fuerza de Recuperación" |
| XNBR | | |
| Ácido Esteárico | | IÓNICAS |
| | | Óxido de Magnesio MgO "Fuerza de Fijeza" |

El elastómero iónico con memoria de forma XNBR es un **elastómero terpolímero** (ácido acrílico o metacrílico como tercer monómero en pequeñas cantidades).

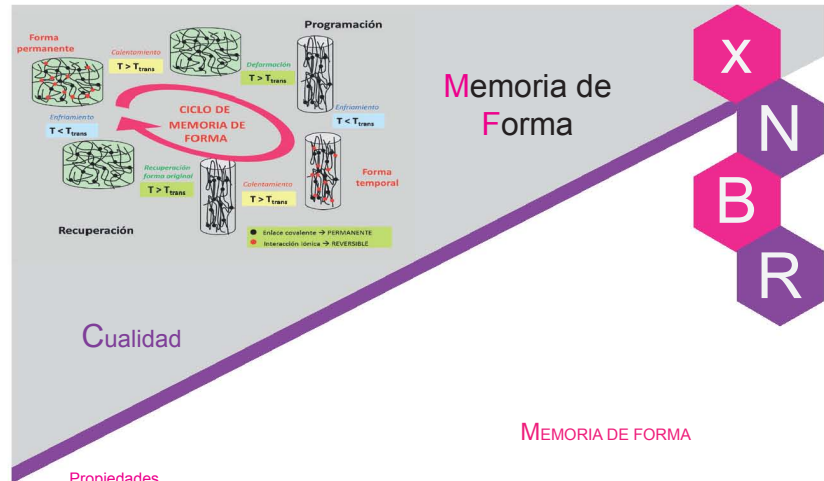
Esta compuesto por:
 - 27% de peso de grupos acrilonitrilo (-CN)
 - 7% de peso de grupos carboxílicos



PROGRAMACIÓN

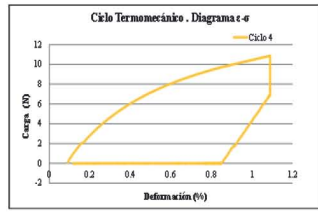


Recuperación de forma ORIGINAL



Propiedades

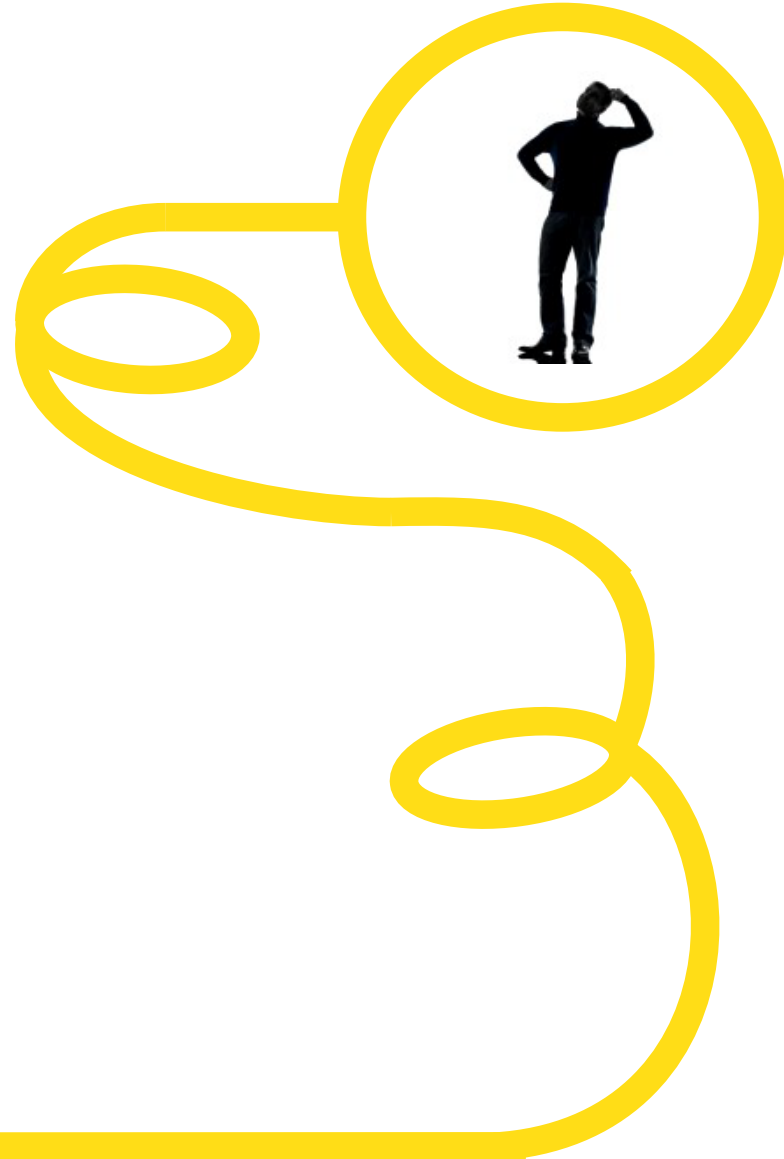
- Dureza 70.02
- Resiliencia (%) 48.73
- Esfuerzo a Tracción (MPa) 36.75
- Deformación Máxima a Tracción (%) 530
- Resistencia al desgarro (MPa) 49.6
- Deformación a Rotura (%) 129
- Resistencia a la abrasión (cm3) 0.09



	% Rf	% Rr
XNBR 0.5 DCP	78	98
XNBR 2 DCP	59	97



CONCLUSIONES



CONCLUSIONES.

Hoy en día el estudio de los polímeros con memoria de forma es un tema en desarrollo, actualmente existen grupos de investigación que se encuentran estudiando las características que lo hacen un material innovador (composición química, propiedades, efectos, costos, entre otros) para poder ser aplicados en diferentes campos.

En un principio el tema de investigación estaba dirigido a emplear los polímeros con memoria de forma como elementos de las envolventes de edificios, los cuales actuarían a partir de la energía empleada por el sol y al ser activados, la modificación de la forma permanente permitiría obtener iluminación y ventilación adecuada para un espacio habitable sin la necesidad que el hombre se involucre en su funcionamiento.

Pues bien, esta idea poco a poco fue tomando otro rumbo, ya que de acuerdo al proceso metodológico, la etapa experimental dio pauta al entendimiento de la naturaleza de esta nueva tipología de materiales, lo que implicó analizar profundamente sus características en beneficio de la Arquitectura.

Existen diferentes tipos de polímeros con memoria de forma, los cuales se diferencian por la forma de producción, composición y características, por lo tanto para comprender mejor su funcionamiento es necesario estudiar la base teórica del material de forma general.

La evaluación de la factibilidad de uso de “los elastómeros iónicos con memoria de forma” en Arquitectura trajo consigo la responsabilidad de un Arquitecto de adentrarse en el área de Química, estudiar conceptos nuevos, manejar equipos especiales, entablar conversaciones con profesionales en física y química para así poder lograr un objetivo.

Dicha evaluación consistió en comprender diversos términos que para un Arquitecto al no estar directamente familiarizado con ellos fue necesario estudiar, por ejemplo el concepto de un elastómero, caucho, enlaces covalentes, enlaces iónicos, etc.; por otro lado el desarrollo del concepto “memoria de forma”.

Un elastómero por su naturaleza es uno de los materiales con mayor capacidad de recuperación de una forma inicial, ya que al ser elástico y recibir una fuerza externa que lo deforme, de manera inmediata al cesar dicha fuerza recupera su forma original, por lo que no es capaz de establecer una forma temporal.

A diferencia de un elastómero común, los elastómeros iónicos con memoria de forma son materiales que se caracterizan por tener una forma permanente y lograr una forma temporal, la cual regresa a su estado original siempre y cuando el estímulo que le genera dicho cambio vuelve actuar sobre él.

Un elastómero iónico con memoria de forma se caracteriza por contar con una transición iónica, siendo esta la transición térmica reversible para obtener la memoria de forma en un elastómero, por lo que dentro de su estructura química el material requiere de la presencia de enlaces iónicos, los cuales se encargaran de dar una forma temporal al material. Por otro lado los enlaces covalentes presentes serán los que brindan al material la forma permanente, dando al material un comportamiento termo-estable.

A lo largo del proceso, se observaron virtudes e inconvenientes que un elastómero iónico específicamente el XNBR con memoria de forma para su empleo en envolventes arquitectónicas.

Se comprobó que el XNBR es un material que NO cuenta con la capacidad de actuar bajo la energía brindada por el sol, debido a que los rangos de temperatura obtenidos en el ambiente no son los óptimos para lograr su activación, requiriendo temperaturas muy altas entre 60 – 160°C, por lo que requeriría de un mecanismo externo que proporcione el nivel de estímulo necesario.

Este material se caracteriza por contar con una transición vítrea y una transición iónica siendo esta última de mayor eficiencia entre 60 – 160°C, en dichos rangos de temperatura los enlaces iónicos son capaces de actuar y generar la forma temporal.

Por otro lado, el estudio del aspecto cualitativo realizado al material XNBR y análisis de sus propiedades ayudo a encontrar una propuesta de aplicación en Arquitectura, la cual es necesario reforzar con estudios más profundos, entre ellos la obtención de las propiedades ópticas del material para así realizar un comparativo con los materiales de uso común en este tipo de estructuras, además de un estudio de comportamiento del material con agentes reforzantes, la aplicación de aditivos adicionales que le proporcionen durabilidad, el comportamiento del material sometido a fuerzas de tracción como lo están los textiles empleados en cubiertas ligeras, por otro lado el estudio de los elementos y factores del clima del lugar de estudio donde se proponga su colocación, con el fin de justificar la compatibilidad que existe del material con el contexto.

De forma general, el estudio de los polímeros con memoria de forma permitió entender que proceso de desarrollo de un nuevo material es resultado de la identificación de varios factores entre ellos el entendimiento de su estructura molecular, comportamiento y relación que existen entre cada uno de sus componentes. Por otro lado, es importante buscar un destino final de aplicación a cada uno de ellos, con el fin de aportar innovación en los diferentes campos que existen y buscar beneficios que se pueden alcanzar con ellos sin la necesidad de perjudicar al medio ambiente.

La realización de este tema de investigación permitió darnos cuenta que el desarrollo de nuevos materiales requiere de un enfoque multidisciplinar, ya que el proceso de investigación requiere de diferentes niveles de conocimiento en donde se involucran profesionales

como físicos, químicos y especialistas en las diversas áreas de aplicación hacia el cual se pretenden dirigir.

Existen muchos desarrollos de nuevos materiales que solo llegan a ser patentados y no salen al mercado por la falta de un análisis profundo, pensando que este los pueda dirigir a ser utilizados en la vida diaria del hombre y que puedan competir y brindar mejores cualidades y características de los que existen en el mercado. Es por ello que se propone abrir líneas de investigación de materiales innovadores en donde la Arquitectura y profesionales que forman parte de ella se involucren más su estudio, siendo la materia principal a partir de los cuales obtienen la construcción de un nuevo edificio.

Por otro lado, se recomienda continuar con esta nueva línea de investigación que se abre con este tema, ya que existen diversos polímeros con memoria de forma, diferenciados entre sí por su naturaleza, características, propiedades, producción diferentes las cuales es necesario entender para la propuesta de un uso óptimo. Una de las tipologías con mayor estudio son los poliuretanos con memoria de forma, estos actúan bajo el estímulo “temperatura” pero en un grado menor a los elastómeros, activándose el efecto de memoria de forma en un rango de temperaturas entre los 25-40°C, sería interesante evaluar su comportamiento y compatibilidad con los estímulos que brinda el medio ambiente que le rodea.

Otro aspecto a desarrollar como investigación futura es la identificación de aquellos polímeros con memoria de forma que cuentan con diferentes tipos de efecto de memoria y analizar su aplicación en Arquitectura, ya que al contar con la cualidad de efecto de memoria en una, dos o tres dimensiones, reversibles o no, se podrían lograr materiales destinados a ser empleados en automatizaciones de edificios.



BIBLIOGRAFÍA



BIBLIOGRAFÍA.

[1] Abrahamson, ER, Lake MS, Mecánica de un elástico con la combinación de resinas y materiales con memoria de forma. Diario de los sistemas, materiales y estructuras inteligentes, Vol.14, 10 ed. 623-632.

[2] Alonso Malmierca Marta. (2013). Elastómeros iónicos con memoria de forma. Estructura, dinámica y propiedades. (Tesis Doctoral). CSIC. Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros. Madrid-España. 9-32

[3] Alvarado, Tenorio Bonifacio.(2010). “Nano-estructura y orden cristalino en Nano-híbridos poliméricos con memoria de forma”. (Tesis Doctoral)

[4] Arias Maya, Luz. Stella. Vanegas, Useche. Libardo.(2004). Materiales compuestos inteligentes. Scientia et Technica Año X, No. 25. UTP ISSN 0122-1701.

[5] Boletín No. 1 Vigilancia tecnológica. (2010). Aleaciones con Memoria de Forma, FECYT, Ministerio de Ciencia e Innovación, España.

[6] Boletín No. 2 Vigilancia tecnológica. (2010). Polímeros con Memoria de Forma, FECYT, Ministerio de Ciencia e Innovación, España.

[7] Cano Serrano, Encarnación. Urbina Fraile, Marina. (2008) Polímeros Inteligentes, Cimtam-Madrid, Círculo de Innovación en Materiales, Tecnología Aeroespacial y Nanotecnología.

[8] Eslora, Jinsong. Liu, Yanju.(2010) Polímeros con memoria de forma: materiales con potencial para cambiar el futuro. Actas de la conferencia ASME: Materiales Inteligentes, estructuras de adaptación y sistemas inteligentes. Vol. 2, 87

[9] Gall K., Dunn ML., Liu Y.P. (2002). Nanocompuestos para polímeros con memoria de forma. Artículo del Acta Materialia. Vol. 50. 20 ed. 5115-5126.

[10] Ghassemieh, Mehdi. Mostafazadeh, Mahnaz. (2012). Control sísmico de muros de concreto con aleaciones con memoria de forma. Artículo del Diario de los Sistemas, materiales y estructuras inteligentes. Vol.23. 5 ed. 535-543.

[11] ICMA.(2010). Materiales con Memoria de Forma, Materiales Inteligentes ¿Puede un material recordar?.

[12] Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros (CSIC). (2004). Ciencia y Tecnología de Materiales Poliméricos. Vol. I. Madrid,España.

[13] Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros (CSIC). (2004). Ciencia y Tecnología de Materiales Poliméricos. Vol. II. Madrid,España.

[14] Iqbal, D. Haris, S. M. (2013) Photo-responsive shape memory and shape-changing liquid-crystal polymer networks. Artículo Materials, Vol. 6, 116-142.

[15] Jinlian Hu, Yung Zhu, Huahua Huahua, etal. (2012). Recent advances in shape memory polymers, structure, mechanism, functionality, modeling and applications. Artículo. Progressive Polymers Science. 37. 1720-1763.

[16] Leng, Jinsong. Du, Shanyi. (2010). Shape Memory Polymers and Multifunctional Composites, CRC PRESS.

[17] Leng, Jinsong. Lu, Haibao. (2009). Polímeros con memoria de forma: una clase de nuevos materiales inteligente. Artículo del Boletín de la Sra. Vol. 34. 11 ed. 848-855.

[18] Leng, J. Lu, Haibao. Liu, Y. et.al. (2009) Shape Memory Polymers – A class of Novel Smart Materials. Artículo MRS Bulletin. Vol. 34.

[19] Meng, H. Hu, J. (2010) A brief review of stimulus-active Polymers responsive to thermal, light, magnetic, electric and water/solvent stimuli. Artículo Journal of intelligent material systems and structures. Vol. 21.

[20] Meng, H. Li, G. (2013) A Review of Stimuli-responsive Shape Memory Polymer Composites. Artículo Polymer.

[21] Mora Barrantes I. Malmierca. M. A. Valentín. J. L. Rodríguez. A.(2012) Effect of covalente cross-links on the network structure of thermo – reversible ionic elastomers. Soft Mater, The Royal Society of Chemistry, 8, 5201-5213

[22] Noticia: Crean prototipo de persiana inteligente en la UNAM. UNAM. DYCTY <http://www.dicyt.com>

[23] Otsuka, K. Wayman, C.M.(1998) "Shape Memory Materials". Cambridge. 1 publication

[24] Parulekar, Y.M. Reddy, G.R. (2012) Atenuación de la respuesta sísmica de las estructuras a partir de amortiguadores hechos con aleaciones con memoria de forma. Artículo de Control Estructural y Vigilancia de la Salud. Vol. 19. 1 ed.102-119

[25] Royo. Joaquín. Manual de Tecnología del Caucho. Consorcio Nacional de Caucho.(2ºed.)

[26] Sun, L. Huang, W.M. Ding, Z. et.al. (2012) Stimulus-responsive shape memory materials: a review. Artículo de Materials and Design. Vol. 33. 577-640

[27] (2002) UNE 53510 Caucho, vulcanizado o termoplástico. Determinación de las propiedades de esfuerzo-deformación en tracción. Asociación Española de Normalización y Certificación. (AENOR)

[28] (2001) UNE 53516-1 Caucho, vulcanizado o termoplástico. Determinación de la Resistencia al Desgarro. Asociación Española de Normalización y Certificación. (AENOR)

[29] (2003) UNE-EN ISO 868 Determinación de la Dureza de indentación por medio de un durómetro (dureza Shore). Asociación Española de Normalización y Certificación. (AENOR)

[30] (1990) UNE-EN 53-604-90 Elastómeros. Determinación de la resiliencia por rebote de vulcanizados. Asociación Española de Normalización y Certificación. (AENOR)

[31] (1971) UNE-EN 53-520-90 Elastómeros. Determinación de la resistencia a la abrasión de elastómeros vulcanizados. Asociación Española de Normalización y Certificación. (AENOR)

[32] Van der Mee.M.A.J. l'Abée.R.M.A. Portale.G. (2008) Synthesis, structure, and properties of Ionic Thermoplastic Elastomers base don Maleated Ethylene / Propylene Copolymers. Macromolecules. American Chemical Society. 41.5493-5501

[33] Velte, Daniela. et al. (2011) Informe de prospectiva de nuevos materiales inteligentes, FECYT, OPTI.

[34] Walker.B.M. (1979).Handbook of Thermoplastic Elastomers. Van Nostrand Reinhold Company.1-10.

[35] Xie, T. (2011) Recent Advances in polymer shape memory. Article de Polymer. Vol. 52. 4958-5000

[36] Ying, L. Boyles, J. K. Genzer, J. Dickey, M. (2012) Self-folding of polymer sheets using local light absorption. Artículo Soft Matter. Vol.8. Núm. 6. 1703-2044.

[37] Zhang, Qiang. Yang, Qing. Sheng. (2012) Polímeros con memoria de forma; avances en modelos termo-sensibles. Artículo de Journal of Applied: Ciencia de los Polímeros. Vol. 123. 3 ed.1502-1508.



a b c d e f g
h i j k l m n
o p q r s t u
v w x y z

GLOSARIO

B**C****Bienestar Habitacional**

Es la percepción y valorización que los habitantes de un elemento arquitectónico (vivienda, comercio, oficina, etc.) en cuanto a sus diversas propiedades o atributos, en sus interacciones mutuas y con el contexto donde se inserta, estableciendo distintas jerarquizaciones de orden fisiológico, psicosocial, económico, etc.

Características visco-elásticas

Propiedades elásticas del caucho basadas en el movimiento de las cadenas

Consistencia: se divide en dos:

Viscosidad: consistencia del caucho como un líquido.
Plasticidad: consistencia del caucho como un sólido.

Copolímero

Polímero formado por dos monómeros.

Comportamiento Visco elástico

Este efecto lo sufren los polímeros que cuentan con comportamientos viscosos como elásticos, ya que sufren una deformación permanente y una recuperable. Este depende directamente de la temperatura y el tiempo (velocidad de deformación).



E

H

Efecto Heliotrópico

Es el movimiento que realiza un organismo buscando la luz del sol.

Enlace Covalente

Es la unión generada entre átomos con pequeñas o nula diferencia de electronegatividad, al compartir los electrones sus cadenas cuentan con mayor estabilidad. Este tipo de enlaces se lleva a cabo en los plásticos, polímeros con enlaces de tipo C-C, C-H, C-N, C-O.

Entropía

Es la energía que no se puede utilizar para llevar a cabo un trabajo, ya que describe el grado de irreversibilidad de un efecto.

Estructura Molecular

Es la forma tridimensional de los átomos de una molécula, dependiendo de su forma se pueden definir.

Habitabilidad

Relación y adecuación entre el hombre y su entorno. Se refiere a como cada una de las escalas territoriales es evaluada según su capacidad de satisfacer las necesidades humanas.

Histéresis

Es la tendencia de un material a conservar un comportamiento, al ser expuesto n número de veces a un estímulo.

Característica visco elástica de un polímero que consiste en la cantidad de energía absorbida en el proceso de vulcanización

Homopolímero

Polímero formado por un monómero

I

Interacción iónica:

Entrecruzamientos y puntos de reforzamiento de una red polimérica con propiedades elásticas.

P

Poli condensación

Es una reacción química en la cual el polímero se crea a partir de la unión sucesiva de monómeros, las moléculas condensadas se emplean en este proceso, algunas de ellas son agua, alcohol y amoniaco.

M

Polimerización

Es una reacción química en la cual un monómero se endurece y activa a otro, de forma que se extiende a lo largo de la cadena hasta llegar a formar el polímero.

Monómeros

Son las moléculas de bajo peso molecular que se unen a otras hasta formar una cadena larga, esta unión se conoce como polímero.

Polímero

Son materiales sintéticos, constituidos por la unión química de los monómeros.

Plateau:

Periodo de tiempo a la temperatura de vulcanización, contando desde que se alcanza el óptimo de vulcanización, durante el cual las propiedades de vulcanizado no varían o lo hacen ligeramente.

Precocidad

Tendencia a vulcanizar prematura -mente las mezclas, antes del momento deseado de vulcanización.



Reómetro de disco oscilante

Equipo que analiza los diferentes procesos de curado o vulcanización del caucho. Cuya deformación es de 6.98% y una frecuencia de oscilación de 1.667 Hz.

Resiliencia

Característica visco elástica de un caucho vulcanizado que consiste en la relación de cantidad de energía restituida de una deformación y la energía total suministrada para producir dicha deformación.

Reticulación Lineal

Es la formación y acomodo de las cadenas de un poliméricas. Cada molécula se una en dos o más puntos a otras moléculas.

Rezago Habitacional

Precariedad de las condiciones físicas de las viviendas existentes y problemas de hacinamiento.



Tacticidad

Es la forma de distribución espacial de los átomos, de esto depende la definición de propiedades y reacción con otros compuestos.

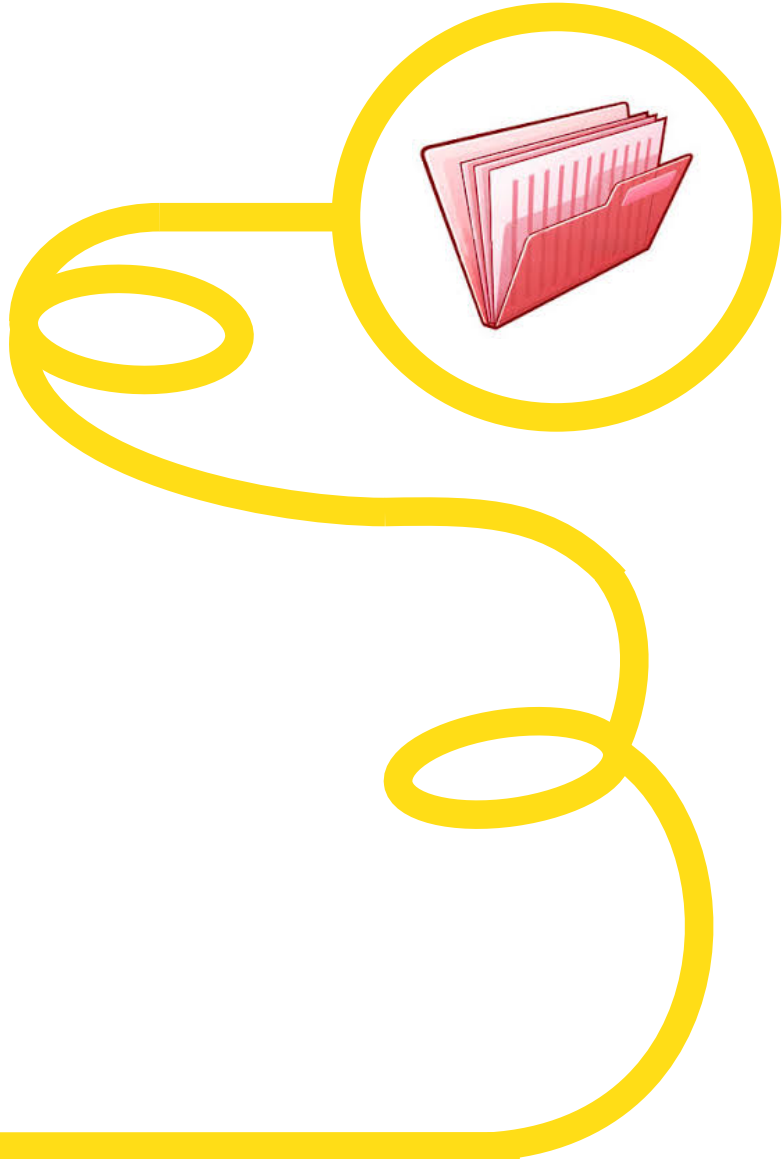
Terpolímero

Polímero formado por tres polímeros.



Velocidad de Vulcanización

Es el menor o mayor grado de activación de la reacción entre el caucho y el peróxido o azufre.



ANEXOS

TEORÍA BÁSICA ELASTOMEROS

Arq. Espinoza Vázquez Rosa María

Co-tutor: Dr. Juan López Valentín

1. Caucho

El “caucho” es un material de elevada elasticidad, debido a que es capaz de experimentar deformaciones considerables ante esfuerzos de fuerza débil, pudiendo recuperar su forma y dimensiones originales cuando cesa dicha fuerza.

Características:

- Módulo de elasticidad = esfuerzo aplicado / deformación producida
- Es un material AMORFO, es decir, cuenta con cadenas moleculares flexibles e interacciones entre ellas más débiles.

El término elastómero se emplea para designar al caucho vulcanizado y a veces al caucho en general, ya sea crudo o vulcanizado. La elasticidad de este material es de origen entrópico, ya que una vez vulcaniza-

dos sus cadenas macromoleculares forman una red tridimensional, la cual pierde entropía conformacional al ser estiradas, por lo que al cesar la fuerza externa, el sistema tiende a su estado de máxima entropía, volviendo a su estado inicial sin deformar a través de la fuerza elástica.

La propiedad de elasticidad se presenta en este tipo de material cuando la temperatura ambiente se encuentra por encima de la temperatura de transición vítrea (T_g), para lo cual el polímero se encontrará en su estado amorfo y regresará a su forma original cuando cesa la carga que se le aplico al deformarlo.

2. Obtención de Elastómeros. Proceso de Vulcanización

Para que un caucho obtenga una elevada elasticidad es necesario unir sus cadenas moleculares entre sí, es decir, formar una red que se obtiene a partir de someter al material a un proceso de vulcanización. Este es el proceso de convertir el caucho crudo, cuyo comportamiento es plástico, hacia un caucho de comportamiento altamente elástico, ya que sus redes sufren cambios en las

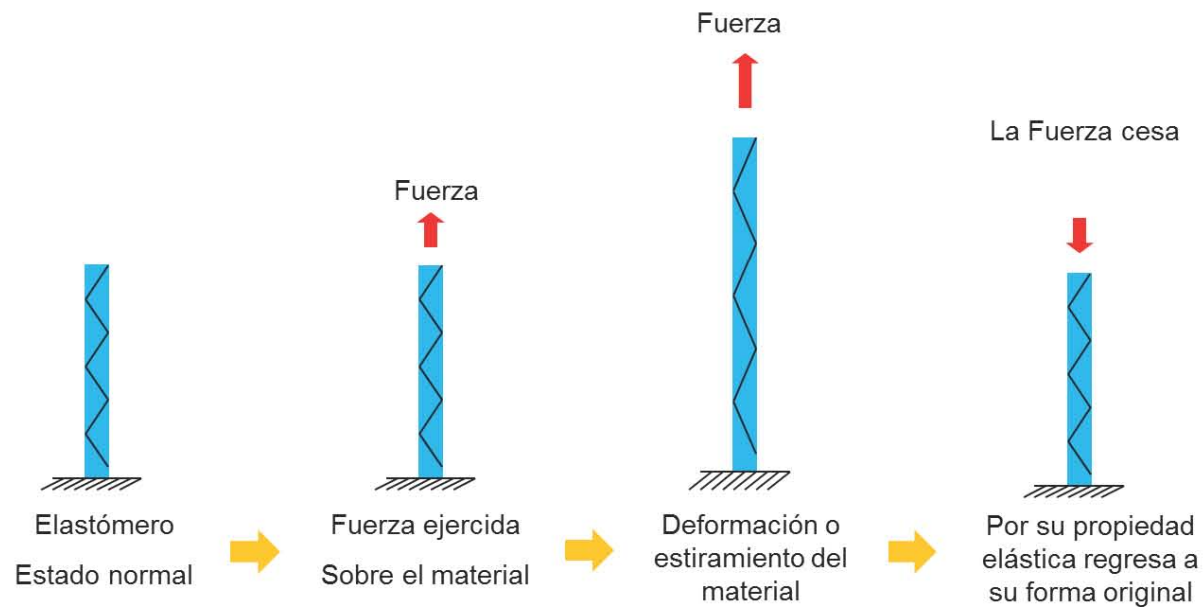


Figura 1. Propiedad de elasticidad de un elastómero.

Por lo general la temperatura T_g de un elastómero es inferior a 0°C , por lo tanto se encontrará en estado amorfo.

Fuente: Realizado por Espinoza Vázquez Rosa María

uniones de forma física o química existentes entre las cadenas macromoleculares para llegar a contar con una red tridimensional. Este proceso es irreversible y se lleva a cabo a alta temperatura y presión.

Para llevar a cabo el proceso de vulcanización existen algunos componentes que definirán las características de la mezcla, como son:

- Acelerantes

Son compuestos que aceleran la reacción entre el

el caucho y el azufre, reducen el tiempo de vulcanización y ayudan a obtener materiales de mejores propiedades, así como evitar eflorescencias.

- Anti degradantes

Al ser el caucho una sustancia orgánica, es un material susceptible a la oxidación provocada por el oxígeno (provoca envejecimiento en el caucho) y el ozono (provoca agrietamiento en dirección perpendicular al estiramiento).

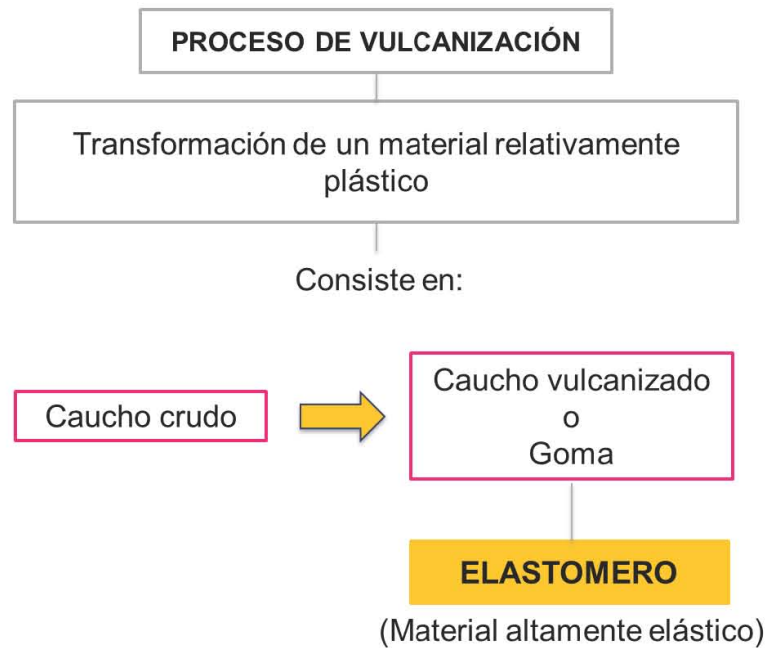


Figura 2. Elastómero

Fuente: Realizado por Espinoza Vázquez Rosa María

- **Cargas**

Son partículas sólidas que se añaden a los materiales elastoméricos para modificar sus propiedades físicas y mejorar el procesado del mismo. Se aplican para obtener un material en forma de goma lo más pura posible.

- **Agentes de acoplamiento**

Son compuestos con dos grupos reactivos OH y silanos, los cuales cumplen la función de dar facilidad

a la incorporación y dispersión de los componentes, así como mejorar la resistencia de abrasión y desgarramiento, siendo características viscoelásticas.

- **Peptizantes**

Son productos que tienen la función de acelerar el proceso y aumentar la eficacia de la plastificación del caucho.

- **Plastificantes**

Son las sustancias que plastifican la mezcla cruda, es decir, aumentan su plasticidad y reducen su viscosidad.

- **Facticios**

Son productos que se emplean en mezclas que han de ser extruidos.

- **Esponjantes**

Se emplean para la fabricación de gomas celulares.

- **Colorantes y pigmentos**

Son empleados en el caucho, ya que son solubles. Su deficiencia se encuentra en que son extraíbles fácilmente con el agua, aceite, entre otros.

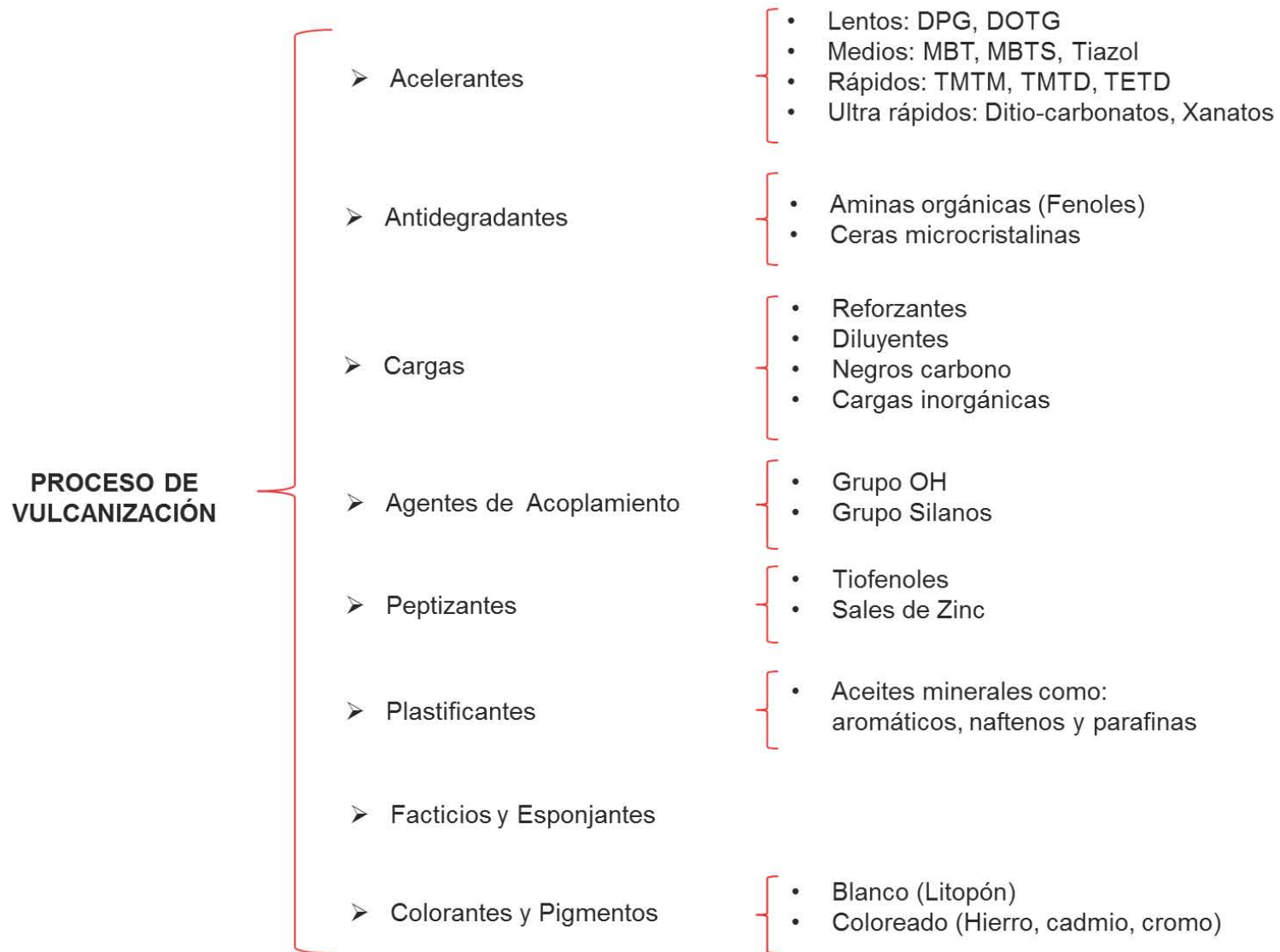


Figura 3. Componentes para llevar a cabo el Proceso de Vulcanización

Fuente: Realizado por Espinoza Vázquez Rosa María

3. Tipos de caucho

Existen diferentes tipos de cauchos entre los que se distinguen:

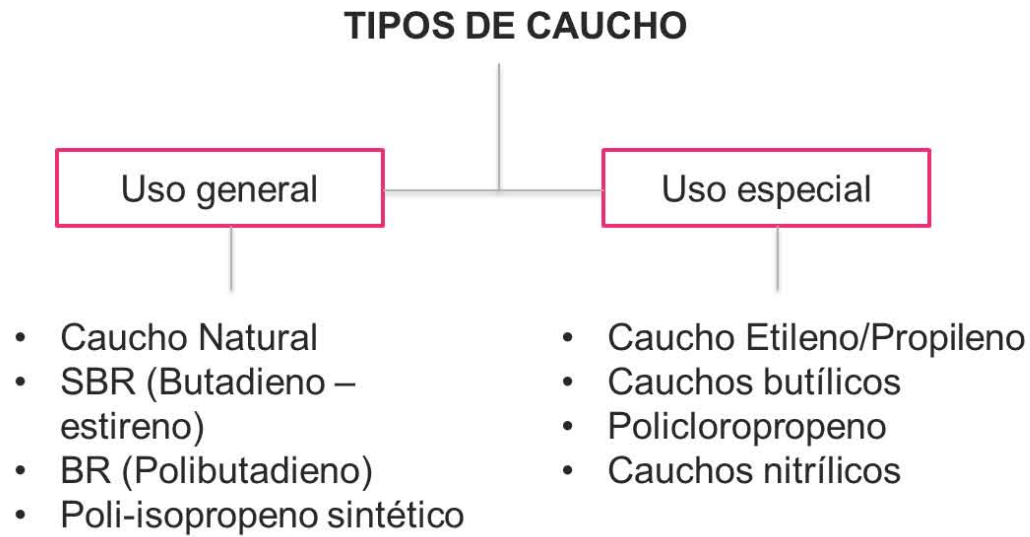


Figura 4. Tipos de caucho

Fuente: Realizado por Espinoza Vázquez Rosa María



ANEXO B.

PATRONES ACTIVOS

Autor: Nick Puckett ²

Empresa: Alt N Investigación + Diseño¹

Introducción.

Alt N en colaboración con el Departamento de Química de la Universidad de Kentucky ha comenzado un proyecto de investigación, en donde se estudia el desarrollo de nuevos potenciales para la fabricación y diseño de polímeros sensibles.

Al mismo tiempo Alt N desarrolla un estudio para elaborar sistemas de materiales integrados por medio de robots y actuación de los materiales de acuerdo a las propiedades inherentes con las que cuenta.

La unión de estas dos investigaciones tiene como objetivo crear y formar polímeros sensibles empleados en una casa, alterando su comportamiento a nivel molecular y de forma química.

Descripción.

“Patrones Activos” es un estudio sobre el uso de polímeros con memoria de forma para ser empleados como material en una fachada sensible. El material responde a cierto grado de temperatura, siendo estudiado y determinado por el grupo de investigación, el cual puede modificar el rango alterando la proporción de la composición química del material.

El comportamiento general se programa a partir de la geometría “patrón de corte” mostrada en la placa de polímero. El trabajo que desarrollan a futuro es cuantificar la relación de la geometría de la placa para la creación de movimiento en el sistema de forma global.

El material empleado es producido a partir del Proyecto Black Box.



Figura No. 1 Investigación sobre la capacidad de respuesta ante un estímulo de los polímeros con memoria de forma.

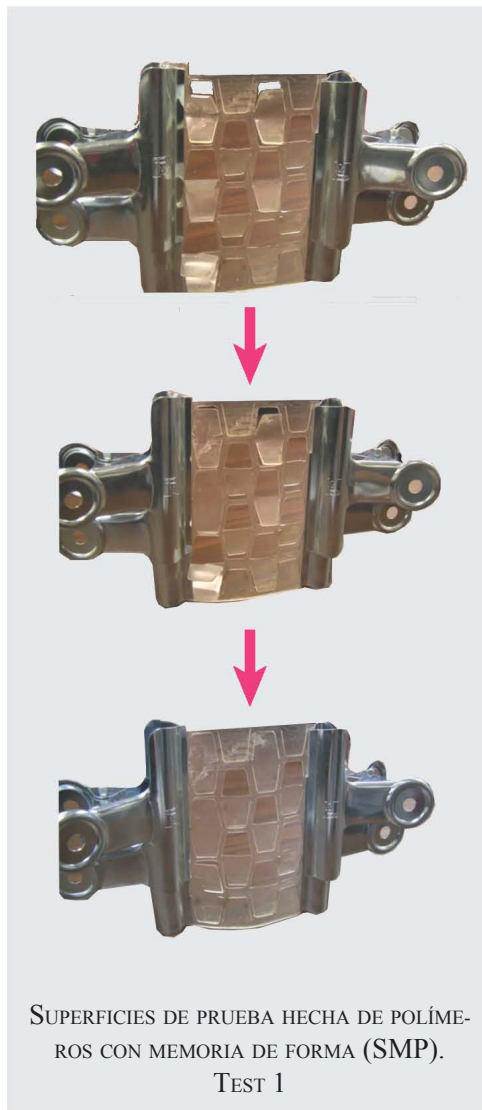


Figura No. 2 Patrones activos, test 1

- **Superficie de prueba hecha de polímeros con memoria de forma (SMP). Test 1 (ver Figura No. 2)**

En esta prueba se emplean polímeros con memoria de forma creados en el laboratorio usando la BlackBox 3. La superficie responde al aumento de la temperatura mediante el cierre de las lengüetas que están polímero, las cuales fueron cortados con láser.

Proyecto Black Box, es un dispositivo de producción que permite la creación de paneles de polímeros con memoria de forma e hidrogeles. Este transfiere las propiedades y comportamientos desarrollados como muestras de material y se amplían para ser empleados en prototipos.



- **Superficie de prueba hecha de polímeros con memoria de forma (SMP). Test 2 (ver Figura No. 3)**

En esta prueba se emplean polímeros con memoria de forma creados en el laboratorio usando la Black-Box. La superficie responde al aumento de la temperatura mediante el cierre de las lengüetas que están polímero, las cuales fueron cortados con láser.

Proyecto Black Box, es un dispositivo de producción que permite la creación de paneles de polímeros con memoria de forma e hidrogeles. Este transfiere las propiedades y comportamientos desarrollados como muestras de material y se amplían para ser empleados en prototipos.

Figura No. 3 Patrones activos, test 2

1 AltN Investigación + Diseño se fundó en el 2005 por Nick Puckett, se centra en la creación de vínculos dinámicos entre software, robótica, agentes biológicos, ingeniería química y comportamiento de materiales que generan nuevas posibilidades para el diseño de entornos inteligentes. La investigación desarrollada se ha expuesto a nivel internacional. <http://altnresearch.com/category/resources/>

2 Nick Puckett profesor adjunto de Tecnología de Diseño en la Iniciativa de Futuros Digital en el Colegio de Arte y Diseño de Ontario.

ANEXO C.

REEF

Autor: Rob Ley¹ & Joshua G. Stein²

Lugar: Storefront for Arch y Arquitectura, Nueva York, NY, 2009

Introducción.

Este proyecto desarrolla cierta pretensión en encontrar la eficacia racional de los materiales, buscando cumplir una función por medio de un mecanismo espectacular, simulando una máquina.

Se persigue que la Arquitectura forme parte de la interacción social, es decir, lograr una relación entre el hombre y la tecnología de un espacio.

Descripción.

“Reef” es un elemento que resulto de la investigación de la tecnología de materiales emergentes, analizados y dando respuesta a la duda sobre: ¿qué papel puede jugar en la reprogramación sensible de la arquitectura y el espacio público?



Figura No. 1 Vista exterior de la galería de arte, interacción entre espacio interior y exterior.



Figura No. 2 Vista en el interior de la obra de arte Reef.

Concepto.

La idea que desarrollan los autores de la obra se asocia a las plantas y organismos de nivel inferior que se consideran sensibles a los estímulos brindados por la naturaleza, pero que no son conscientes. Por ejemplo: un campo de girasoles que siguen al sol a través del cielo o un arrecife simulando el movimiento de las anémonas de mar.

Morfología.

La superficie del modelo se diseñó de forma estriada, contando con patrones o módulos en forma de aleta que corren paralelos a la fachada. Cuenta con una capa secundaria en donde se coloca la energía del espacio creado, lo que permite al espacio abrir la visual de los transeúntes al ir recorriendo el modelo.

A medida que más personas se reúnen en la calle para mirar por el giro de la fachada, las aletas se abren en respuesta a la luz a la que están expuestas, ofreciendo mayores niveles de interacción con el interior.



Figura No. 3 La estructura de Reef es modular la cual recorre la longitud de la galería.

Movimiento.

Se explora y se estudia el movimiento del Arrecife, pasando de una tecnología biomimética a la biocinética, ayudando a la liberación y la ampliación de la capacidad de la Arquitectura para producir un sentido de voluntariedad.

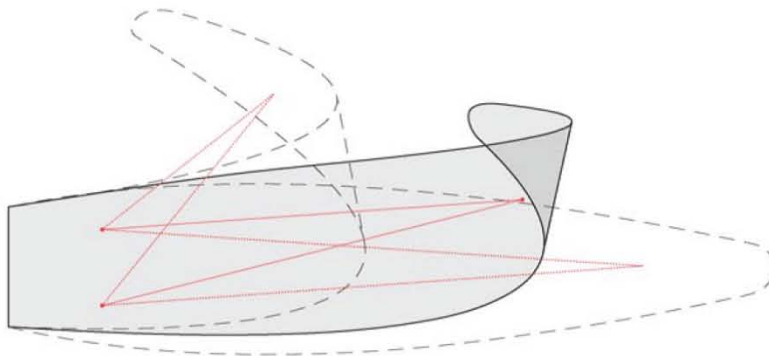


Figura No. 4 Las aletas son de plástico reforzado con fibra, la estructura es de aluminio reciclado y los alambres que general movimiento son hechos de NiTi, la aleación principal de memoria de forma.

Materiales.

Los materiales empleados fueron las aleaciones con memoria de forma (SMA), una categoría de metales que cambian de forma en respuesta al grado de temperatura que experimentan. Resultan ser materiales eficientes con un movimiento fluido, sin la necesidad de adquirir el movimiento mecanizado.



Figura No. 5 Vista de la forma de la estructura de la obra de arte, aparenta ser un túnel.

Aportación.

Reef redefine el papel de la Arquitectura, apoyándose de la tecnología de materiales emergentes, brindando a los espacios la cualidad de “comportamiento”.

Con ello el público se involucra en los nuevos matices sociales revelados por la explosión de la percepción de “pared” que separa el espacio privado y público. La membrana sensible crea una amplia gama de recintos porosos y dinámicos capaces de producir respuestas flexibles y sofisticadas.

La instalación de la fachada ocupa un espacio entre la galería y la calle, cumpliendo con la conexión entre espacios.

1 Rob Ley es el principal fundador de “Urbana o una arquitectura y un diseño de estudio de Los Ángeles”. Urbana dedica material actual y las tecnologías formales para desarrollar entornos que respondan a habitar en conjunto con la experiencia humana. Sr. Ley actualmente enseña estudios de diseño de postgrado y seminarios en el Instituto de Arquitectura de California Southern (SCI-Arc). Tiene una maestría en Arquitectura de la Universidad de California, Los Ángeles (UCLA) y una Licenciatura en Ciencias en Arquitectura desde el University of Illinois, Urbana-Champaign.

2 Joshua G. Stein dirige Craft radical, un estudio basado en los Ángeles que investiga los patrones urbanos y los materiales, centrándose en la intersección de la artesanía tradicional y las técnicas de fabricación actuales. Ha sido profesor de estudios de diseño seminarios de la Universidad de Cornell, SCI-Arc, Woodbury University y el Instituto de Arte de Milwaukee y diseño, así como talleres de fabricación en Barcelona.



Figura No. 6 Los transeúntes pueden percatarse de la obra de arte desde el exterior de la galería por el diseño con el que cuenta.

ANEXO D.

CALCULO.**TIEMPO DE VULCANIZACIÓN ÓPTIMO.**

Tipo de Material: **XNBR 4Mg 0.5 DCP**

Procedimiento.

1. Una vez efectuado el ensayo sobre la obtención de curvas de vulcanización, se obtienen los valores de S_p (S') máximo y mínimo, correspondiente al valor de par de fuerzas.

S' min.	S' máx.
1.338	9.025

$$100 \% = 9.025 - 1.338 = 7.687$$

$$97\% = x$$

$$X = (7.687 - 97\%) / 100\% = 7.4563$$

$$97 \% = 7.4563 + 1.338 = 8.7943 = S' \text{ Optimo}$$

$$97 \% = 7.4563 + 1.338 = 8.7943 = S' \text{ Optimo}$$

S' Optimo, , es el valor que requiere el material vulcanizar y con el cual llega a contar con las propiedades óptimas.

El valor S' óptimo se observa en la tabla y buscamos su tiempo correspondiente, en este caso es: 33 min.

A continuación se presenta una tabla resumen de los tiempos de vulcanización empleados dentro de la etapa experimental para cada una de las mezclas realizadas.

Tabla resumen.

Tiempos de vulcanización empleados dentro de la etapa experimental para cada una de las mezclas realizadas.

Mezcla	S´min.	S´máx.	S` Optimo	Tiempo de vulcanización
1	1.338	9.025	8.7943	39
2	1.26	10.73	10.4459	33
3	2.076	13.93	13.5743	32