UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

DESARROLLO DE BALDOSAS DE SEGURIDAD A BASE DE CAUCHO RECICLADO PARA USO EN PARQUES INFANTILES

Trabajo Final de Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba conforme a los requisitos para obtener el título de Ingeniero Químico

por

TRIVELLI, Leandro Daniel
YSEA, Nadia Belén

CÓRDOBA 2017

El Proyecto Integrador “Desarrollo de baldosas de seguridad a base de caucho reciclado para uso en parques infantiles”, desarrollado por los alumnos Trivelli, Leandro Daniel y Ysea, Nadia Belén, ha sido dirigido por el Prof. Ing. Vaca Chávez, José y codirigido por el Prof. Ing. Zanoni, Héctor Raúl.

Director del Proyecto Integrador	**Co-Director del Proyecto Integrador**
Nombre y Lugar de Trabajo	Nombre y Lugar de Trabajo
VACA CHÁVEZ, José	ZANONI, Héctor Raúl
UNC – FCEFyN	UNC – FCEFyN
Firma	**Firma**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

El presente Proyecto Integrador de la carrera Ingeniería Química

ha sido aprobado el …../…../……..., mereciendo la calificación de .....(……)

Tribunal Evaluador

Firma **Firma** **Firma**

AGRADECIMIENTOS

Mi intención es expresar a través de unas palabras el agradecimiento a todas aquellas personas que nos han acompañado en la realización del presente proyecto y durante toda la etapa universitaria, en especial a nuestro director y amigo José Vaca Chávez por la orientación, el seguimiento y la supervisión continua, pero sobre todo por la motivación y el apoyo que nos ofreció a lo largo de este año.

Quisiera hacer extensiva mi gratitud a las empresas Todos Retenes S.A., Dayco Argentina S.A. y Veng S.A., quienes nos brindaron información, materiales, equipos y tiempo para poder desarrollar el trabajo.

También quiero dar las gracias a mi compañera de proyecto Nadia Ysea, a nuestro codirector Héctor Zanoni y a los integrantes del Laboratorio de Estructuras, del Laboratorio de Materiales y de la Planta Piloto de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Córdoba, quienes colaboraron en la realización de ciertos ensayos.

Un agradecimiento muy especial merece la comprensión, la paciencia y el ánimo recibido por parte de mi familia y amigos, destacando a mis padres y a mi esposa que han sido mis pilares fundamentales durante este proceso. Ellos han estado presentes durante todas mis alegrías y desánimos en el transcurso de la carrera, siempre incondicionales y motivándome día a día con sus palabras y afecto.

No quiero olvidarme de mi hijo Agustino que con su presencia me incentiva a luchar todos los días y ver la vida de otra manera.

A todos ellos, muchas gracias.

Leandro Daniel Trivelli

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo y todo el nivel de grado.

A Dios, quien me dio la vida, la fuerza, la confianza y el ánimo para perseverar, quien me ayudó a enfocarme en mis fortalezas y me sostuvo con su amor y fidelidad. Gracias por usar a mi carrera como una excusa para conocerte y a cada paso para crecer.

A mi esposo David, que me alentó a seguir, me fue de ejemplo, me presionó justamente en ocasiones, me brindó su apoyo y trabajó arduamente permitiendo que pueda terminar mis estudios de grado. Por su comprensión, paciencia y ánimo.

A mis padres Irene y Roberto, que me ayudaron a elegir carrera, me apoyaron económica y anímicamente, me alentaron, se interesaron por mi avance en todo momento y cuidaron a mis niños para que yo estudiara.

A mis hijos Lucio y Allegra, que son el regalo más precioso que me hizo Dios y toleraron que mamá los dejara muchos ratitos para hacer sus cositas. Dios los usó para darme ímpetu.

A mi hermano Matías que me ayudó a elegir facultad, a la que amé y consideré mía.

A mis suegros y cuñados, que me ayudaron cuidando a mis tesoros cada vez que lo necesité. A mis sobrinos, que jugaron con ellos y nos regalaron muchos momentos de alegría.

A mis pastores y líderes, que me alentaron a conquistar esta meta.

A mis amigos, que me apoyaron y se gozaron con mi avance.

A Leandro y Lucía, por su generosidad. A toda la familia Trivelli por abrirme las puertas de la fábrica, confiar en mí casi sin conocerme y por el buen ánimo que siempre me brindaron. Gracias por su hospitalidad.

A nuestro director José Vaca Chávez, por dedicarnos tiempo de calidad, aclarar nuestras dudas, darnos libertad para elegir, ayudándonos a hacerlo con criterio, y por brindarnos buenas ideas y directrices concretas y eficientes.

A nuestro codirector Héctor Zanoni, que colaboró con buenas ideas, realistas y sabias, para mejorar el diseño del producto a desarrollar.

A Raúl Chacón que con su vasto conocimiento y experiencia nos ayudó con la formulación.

A la gente de Dayco S.A. que nos brindó su apoyo y nos facilitó recursos e información.

A la gente de Conae que nos ayudó a realizar el ensayo de impacto, sin su ayuda y generosidad no hubiéramos podido lograrlo.

A los departamentos de Materiales, de Estructuras, de Química Industrial y Aplicada y a la Planta Piloto de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la UNC, que nos permitieron realizar los ensayos.

A todos ellos, muchas gracias.

Nadia Belén Ysea

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos V

Índice general VIII

Índice de abreviaturas XII

Índice de figuras XV

Índice de tablas XVII

Resumen XIX

Summary XX

1. Introducción 1

1.1 Empresas involucradas 4

Dayco Argentina S.A. 4

Todos Retenes S.A. 5

2. Marco Teórico 6

2.1 Tipos de caucho 6

2.1.1 Caucho Natural 6

2.1.2 Caucho Sintético 8

2.1.2.1 Cloropreno (Neopreno) 10

2.1.2.2 Etileno - Propileno - Dieno (EPDM) 10

2.1.2.3 Estireno - Butadieno (SBR) 11

2.1.2.4 Nitrilo - Butadieno (NBR) 11

2.2 Diversos productos químicos para el caucho 12

2.2.1 Base Elastomérica 13

2.2.2 Agentes Reforzantes 13

2.2.3 Ayuda Procesos 13

2.2.4 Antidegradantes 16

2.2.5 Sistemas de vulcanización 17

2.3 Fabricación del caucho 20

2.3.1 Formulación y mezcla de los compuestos del caucho 21
2.3.1.1 Malaxador Banbury 21
2.3.1.2 Mezclador abierto 21
2.3.2 Tipos de moldeo 22
2.3.2.1 Moldeo por inyección: 22
2.3.2.2 Moldeo por compresión: 23
2.3.2.3 Extrusión: 24
2.4 Dureza 25
2.4.1 Dureza Shore 26
3. Objetivos 28
3.1. Objetivo general 28
3.2. Objetivos particulares 28
4. Caracterización Polverino 29
4.1. Granulometría 29
4.2. Composición y dureza 30
4.3. Conclusiones 32
5. Selección Caucho Base 33
5.1. Materiales y métodos 33
5.2. Resultados y análisis 35
5.3. Conclusiones 38
6. Producción de baldosas 40
6.1. Matriz 41
6.2. Mezclado 41
6.3. Prensado 43
7. Ensayo de impacto: Determinación de la altura de caída crítica 44
7.1. Materiales y métodos 44
7.2. Resultados y análisis 47
7.2.1. Ensayo baldosa rosa 47

7.2.2. Influencia de la dureza en el impacto 49
7.2.3. Influencia del espesor en el impacto 50
7.3. Conclusión 51
8. Ensayos complementarios 52
8.1. Evaluación de homogeneidad en la mezcla 52
8.2. Determinación de la resistencia a la abrasión 53
8.2.1. Materiales y métodos 53
8.2.2. Resultados y análisis 55
8.3. Determinación de la deformación permanente por compresión 56
8.3.1. Materiales y métodos 56
8.3.2. Resultados y análisis 59
8.4. Envejecimiento 60
9. Balance de masa y energía 62
9.1. Balance de masa 62
9.1.1. Mezclado 62
Caucho Regenerado 62
Capa superficial protectora (EPDM) 63
9.1.2. Prensado 63
9.2. Balance de energía 64
9.2.1. Mezclado 64
9.2.2. Prensado 66
10. Capacidad productiva 70
11. Análisis de costos 71
12. Conclusión 75
13. Sugerencias 77
14. Anexos 78
14.1. Resumen de normas consultadas 78

Norma UNE-EN 1177: Revestimientos de las superficies de las áreas de juego absorbedores de impactos. Determinación de la altura de caída crítica. 78

Norma IRAM 113010: Caucho vulcanizado o termoplástico. Determinación de la deformación permanente por compresión. 78

Norma IRAM 113004: Caucho. Determinación de las propiedades de tracción – deformación. 79

Norma IRAM 113130: Caucho. Método para la determinación de la resistencia a la abrasión mediante un dispositivo de tambor giratorio. 79

14.2. Análisis de varianza 80

15. Bibliografía 82

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

a	Aceleración
ACC	Altura de Caída Crítica
ACM	Acrylic Rubber (Caucho Poliacrílico)
AN	Acrilonitrilo (Caucho Nitrilo Butadieno)
ANOVA	Analysis of Variance (Análisis de Varianza)
BE	Balance de Energía
C	Carbono
C_B	Deformación permanente por compresión
CEN	Comité Europeo de Normalización
cm	Centímetro
cm^3	Centímetro cúbico
Cp	Calor específico
CR	Caucho regenerado
CRP	Polverino en caucho regenerado
D	Dureza
DIN	Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemán de Normalización)
DOP	Dioctyl Phthalate
Dpc	Diámetro de corte
DY	Dayco
e	Espesor
Ec	Energía cinética
Ep	Energía potencial
EPDM	Etileno Propileno Dieno Monómero
EPDMP	Polverino en EPDM
EPM	Etileno Propileno Monómero
etc.	Etcétera
FKM	Forschungskuratorium Maschinenbau (Caucho Fluorado)
g	Gramo

G	Fuerza G (Aceleración)
H	Entalpía
h	Hora
HIC	Head Injury Criterion (Criterio de Lesión en Cabeza)
IRAM	Instituto Argentino de Normalización y Certificación
J	Joule
kg	Kilogramo
kJ	Kilo Joule
kW	Kilo Watt
kWh	Kilo Watt Hora
m	Metro
M	Masa
$\dot{m}$	Flujo másico
m^2	Metro cuadrado
Máx.	Máximo
MBT	2-mercaptobenzothiazole
MBTS	Dibenzothiazole disulfide
min	Minuto
mL	Mililitro
mm	Milímetro
Mod.	Módulo
MPa	Mega pascal
ms	Milisegundo
N°	Número
Nat	Caucho Natural
NBR	Nitrile Butadiene Rubber (Caucho Nitrilo Butadieno)
NR	Natural Rubber (Caucho Natural)
P	Producto
PI	Proyecto Integrador

PP	Polverino en el producto
ppc	Partes por ciento de caucho
Q	Calor
S	Azufre
SBR	Styrene Butadiene Rubber (Caucho Estireno Butadieno)
t	Tiempo
T	Temperatura
T_{max}	Tamaño máximo
TMQ	Poli(2,2,4-trimetil-1,2-dihidroquinolina) (Antioxidante)
TMTD	Disulfuro de tetrametiltiuram
TR	Todos Retenes
U	Energía Interna
U$S	Dólar
UNE-EN	Una Norma Española – European Norm
UV	Ultravioleta
W	Trabajo
X	Fracción másica
ZnO	Óxido de Zinc
ε	Eficiencia
$	Peso argentino
°C	Grado Celsius
ΔH_R	Entalpía de Reacción

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Polverino Dayco 4

Figura 2. Polverino Todos Retenes 5

Figura 3. Estructura semidesarrollada del caucho natural y su isómero gutapercha 6

Figura 4. Plantación de *Hevea brasiliensis* 7

Figura 5. Corte y exudado del látex 7

Figura 6. Durómetro Shore (estático) 27

Figura 7. Escala de durezas Shore A y D para distintas aplicaciones 27

Figura 8. Granulometría polverinos 30

Figura 9. Composición polverino de Todos Retenes 31

Figura 10. Vista frontal de mezcladora de rodillos a cielo abierto 34

Figura 11. Vista frontal de prensa hidráulica 34

Figura 12. Durómetro Shore A 34

Figura 13. Diagrama de flujo del proceso productivo 40

Figura 14. Esquema matriz 41

Figura 15. Mezcladora de caucho 42

Figura 16. Prensa hidráulica 43

Figura 17. Diferentes baldosas producidas 43

Figura 18. Hemiesfera de aluminio y acelerómetro 44

Figura 19. Arreglo de baldosas para el ensayo 45

Figura 20. Zonas de impacto en el arreglo 45

Figura 21. Curva típica de impacto 46

Figura 22. Gráfica típica HIC vs altura de caída 47

Figura 23. Gráfico obtenido en ensayo de impacto 47

Figura 24. Gráfico HIC vs Altura de Caída en baldosa rosa 48

Figura 25. Gráfico HIC vs Altura de Caída para diferentes durezas 49

Figura 26. Gráfico HIC vs Altura de Caída para diferentes espesores 50

Figura 27. Baldosa cuadriculada para medición de dureza 52

Figura 28. Durezas medidas en cada cuadrícula 52

Figura 29. Distribución de frecuencia de durezas medidas 53

Figura 30. Equipo para medición de desgaste 54

Figura 31. Probetas sometidas a desgaste 55

Figura 32. Comparación de desgaste entre el Caucho Base y el Caucho Regenerado 56

Figura 33. Aparato utilizado para la compresión 57

Figura 34. Probetas dispuestas para la compresión 57

Figura 35. Probetas comprimidas dentro del horno 58

Figura 36. Calibre digital 58

Figura 37. Baldosas expuestas a la intemperie 60

Figura 38. Diagrama etapa de mezclado 65

Figura 39. Reacción de vulcanización 67

Figura 40. Diagrama etapa de prensado 68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Cauchos sintéticos 9

Tabla II. Diferencias entre caucho sin vulcanizar y caucho vulcanizado 18

Tabla III. Análisis granulométrico - Polverino Todos Retenes 29

Tabla IV. Análisis granulométrico - Polverino Dayco 29

Tabla V. Variación anual de tipos de caucho producidos por Todos Retenes 30

Tabla VI. Variación anual de durezas producidas por Todos Retenes 31

Tabla VII. Variación mensual de durezas producidas por Todos Retenes..... 32

Tabla VIII. Comparación de costos para distintos tipos de caucho virgen 33

Tabla IX. Mezclas caucho - polverino 35

Tabla X. Fórmula caucho base 37

Tabla XI. Fórmula caucho capa superficial 38

Tabla XII. Altura de caída crítica de baldosa rosa 48

Tabla XIII. HIC de baldosas azul y roja 49

Tabla XIV. HIC de baldosa gruesa..... 50

Tabla XV. Pérdida de masa para cauchos base, regenerado y EPDM 55

Tabla XVI. Deformación permanente por compresión en cauchos base y regenerado 59

Tabla XVII. Dureza medida en baldosas expuestas a la intemperie..... 60

Tabla XVIII. Fracción másica de componentes del caucho regenerado 62

Tabla XIX. Fracción másica de componentes de la capa superficial 63

Tabla XX. Datos para balance de energía en mezclado 66

Tabla XXI. Resultados BE en mezclado..... 66

Tabla XXII. Datos para balance de energía en prensado 69

Tabla XXIII. Resultados BE en prensado 69

Tabla XXIV. Baldosas producidas por hora en las etapas de mezclado y prensado 70

Tabla XXV. Capacidad productiva en uno o tres turnos de trabajo 70

Tabla XXVI. Cálculo del costo de caucho regenerado por unidad de masa 71

Tabla XXVII. Cálculo del costo de EPDM por unidad de masa 72

Tabla XXVIII. Cálculo del costo de transporte de polverino por unidad de masa..... 72

Tabla XXIX. Cálculo del costo de consumo eléctrico del proceso 73

Tabla XXX. Análisis de costos directos por baldosa 73

Tabla XXXI. Comparación con competencia..... 74

RESUMEN

La seguridad de los parques infantiles es un aspecto básico que hay que garantizar en el diseño de los mismos si se quiere reducir el riesgo de accidentes graves. Es por ello que los elementos de pavimentación se vuelven un elemento clave para la reducción de los daños derivados de las caídas.

Por otro lado, como la vulcanización del caucho es un proceso de cura irreversible, se generan grandes cantidades de residuos no reutilizables y surge la necesidad de desarrollar aplicaciones alternativas con enfoque sustentable.

Por ambas razones, se desarrolló una baldosa de seguridad compuesta por caucho reciclado en polvo en un 50 % en peso. Además, se incorporó en la misma una capa superficial de protección contra el envejecimiento y la abrasión, que también permitió brindarle color.

Una vez elaborada la baldosa se sometió a un ensayo de impacto según la Norma UNE-EN 1177, utilizando un acelerómetro y una hemiesfera de aluminio que simuló ser la cabeza de un niño, la cual se dejó caer sobre un arreglo de baldosas desde diferentes alturas y en diferentes posiciones. Se registraron las curvas aceleración-tiempo que permitieron calcular el índice HIC para cada altura de caída y luego se obtuvo la altura de caída crítica (ACC) para el material.

El resultado fue una ACC de 1 metro para una baldosa de 15 mm de espesor y 35 Shore A de dureza. Además, se observó que la ACC y el nivel de seguridad se incrementan aumentando el espesor o disminuyendo la dureza del material.

Complementariamente, se realizaron ensayos como evaluación de homogeneización en la mezcla, determinación de resistencia a la abrasión, determinación de la deformación permanente por compresión y envejecimiento. De los mismos se evidenció un buen nivel de homogeneidad en la mezcla, una reducción de desempeño del material regenerado con respecto a un caucho puro en cuanto a resistencia a la abrasión y deformación permanente, y una efectiva protección por parte de la capa superficial contra el envejecimiento y el desgaste.

Palabras Claves: Caucho Regenerado, Caucho Reciclado, Polverino, Baldosas de Seguridad, Absorción de Impactos, Parques Infantiles.

SUMMARY

The safety of playgrounds is a basic aspect that must be guaranteed in the design of the same if you want to reduce the risk of serious accidents. This is why the paving elements become a key element in reducing the damage caused by falls.

On the other hand, as rubber vulcanization is an irreversible curing process, large amounts of non-reusable waste are generated and the need arises to develop alternative applications with a sustainable approach.

For both reasons, a safety tile composed of 50% recycled rubber powder was developed. In addition, a surface layer of protection against aging and abrasion was incorporated therein, which also allowed it to give it color.

Once the tile was made, it was subjected to an impact test according to the UNE-EN 1177 standard, using an accelerometer and an aluminum hemispheres that simulated the head of a child, which was dropped onto a tile arrangement from different heights and in different positions. The acceleration-time curves were used to calculate the HIC index for each fall height and then the critical fall height (ACC) was obtained for the material.

The result was an ACC of 1 meter for a tile of 15 mm thickness and 35 Shore A of hardness. In addition, it was observed that the ACC, and the safety level, are increased by increasing the thickness or decreasing the hardness of the material.

Complementarily, tests were carried out as evaluation of homogenization in the mixture, determination of resistance to abrasion, determination of the permanent deformation by compression and aging. There was a good level of homogeneity in the mixture, a reduction in the performance of the regenerated material with respect to a pure rubber in terms of abrasion resistance and permanent deformation, and an effective protection by the surface layer against the aging and wear.

Keywords: Regenerated Rubber, Recycled Rubber, Polverino, Safety Tiles, Impact Absorption, Playgrounds.

1. INTRODUCCIÓN

El caucho es un polímero elastomérico que puede producirse a partir de fuentes naturales o sintéticas. El caucho natural es en su mayoría isopreno (C_5H_8) polimerizado y surge como una emulsión lechosa en la savia de varias plantas, principalmente del árbol *Hevea brasiliensis*, originario de América del Sur. Por otro lado, el caucho sintético se obtiene por reacciones químicas, conocidas como condensación o polimerización, a partir de determinados hidrocarburos insaturados de masa molecular relativamente baja. Actualmente más de la mitad del caucho usado en la industria es sintético, pero aún se producen varios millones de toneladas de caucho natural anualmente.

El caucho natural y los diferentes tipos de cauchos sintéticos se utilizan en gran variedad de productos finales por sus excelentes propiedades de elasticidad y resistencia ante los ácidos y las sustancias alcalinas. Además, son aislantes de la temperatura y de la electricidad. El destino más importante es el de los neumáticos que implica alrededor de la mitad del consumo total de elastómeros. Por otro lado, se encuentran los productos de caucho en general, que incluyen mangueras, cinturones, calzados, retenes, correas, instrumentos quirúrgicos, entre muchos otros.

Para mejorar las propiedades mecánicas del caucho crudo y ampliar sus aplicaciones en la industria se lo somete a un proceso de curado conocido como vulcanización, mediante el cual se transforma un elastómero desde una masa termoplástica débil sin propiedades mecánicas útiles, en un caucho fuerte, elástico y tenaz. En la vulcanización sucede una reacción química entre el azufre y los dobles enlaces de carbono presentes en el elastómero formando moléculas voluminosas que restringen el movimiento molecular. En esta etapa se agregan también diferentes aditivos que mejoran las propiedades del caucho como son: reforzantes, plastificantes, agentes de procesado, acelerantes y antioxidantes. Esto forma un caucho más estable, más duro, más resistente al ataque químico y sin perder la elasticidad natural. Por las condiciones y esfuerzos a los que va a ser sometida la pieza, se determina el tipo de caucho y los aditivos que se van a utilizar.

El proceso de vulcanización fue descubierto casualmente en 1839 por Charles Goodyear, quien mejoró enormemente la durabilidad y la utilidad del caucho. La vulcanización en frío, desarrollada en 1846 por Alexander Parkes, consiste en sumergir el caucho en una solución de dicloruro de disulfuro (Cl_2S_2).

Como la vulcanización es un proceso de cura irreversible, una vez que el producto cumple con su vida útil generalmente no puede ser reprocesado o reutilizado para cumplir nuevamente con su finalidad original, como así tampoco el scrap resultante en su obtención. Por esta razón, surge la necesidad de innovar en las aplicaciones del caucho ya vulcanizado, implementando un reciclado del mismo con el fin de reducir este tipo de residuos en los vertederos. El compromiso asumido es preservar la calidad del medio ambiente y minimizar cualquier impacto ambiental que pudiera producir el desecho de este tipo de materiales. Las principales dificultades generadas por este residuo tienen que ver con el gran apilamiento del material debido a su extenso tiempo de degradación que supera los quinientos años, el incremento de la posibilidad de incendios y emanación de gases tóxicos y la proliferación de focos infecciosos y enfermedades, como así también de roedores, insectos y otros animales.

En las operaciones industriales de acabado se obtienen residuos de caucho ya vulcanizado que hoy en día no tienen un destino bien definido. Por ello este proyecto pretende reutilizar un residuo de la industria del caucho en forma de polvo, conocido comúnmente como polverino, mezclándolo con caucho sin vulcanizar para obtener un producto final de valor agregado: baldosas de seguridad.

Las principales industrias que generan polverino son las fábricas de cilindros engomados, más específicamente en la etapa de rectificado de dichos cilindros, y todas aquellas que realizan alguna operación de corte o rectificado sobre piezas de caucho vulcanizado, como las fábricas de correas de transmisión. Los otros residuos que no son polvos y se obtienen en las demás industrias, como astillas, rebabas, etc., pueden ser sometidos a molienda para disminuir su granulometría y utilizarse para el fin propuesto.

El proceso para la obtención de las baldosas consta de los siguientes pasos básicos: confección de matriz, formulación, mezcla, prensado, vulcanizado y rebabado.

Las baldosas de seguridad se utilizan para acondicionar superficies y reducir el impacto en zonas de riesgo, ya sea para proteger las superficies propiamente dichas o los objetos que puedan caer sobre ellas. Su uso es común en gimnasios, zonas fabriles y parques infantiles, siendo ésta última aplicación de mayor relevancia y objeto del presente proyecto.

Los parques infantiles y las áreas de recreo de nuestras ciudades se han convertido en lugares cotidianos de encuentro en los que niños y niñas disfrutan de los juegos, adquieren destreza motriz, se sociabilizan y cultivan diversas habilidades.

Sin embargo, cualquier ciudadano puede comprobar que el mantenimiento y estado de conservación de muchos parques infantiles es manifiestamente mejorable. Pintadas, desperdicios y elementos arrancados, rotos o quemados se han convertido en habituales de algunas zonas de juego infantil que no invitan precisamente a su uso.

Pero por encima de la limpieza y del aspecto visual, la preocupación de los propietarios y usuarios, debería enfocarse a la seguridad que estas zonas de recreo ofrecen a los más pequeños, incluyendo:

- Planificar adecuadamente la localización de las áreas infantiles.
- Protegerlas suficientemente de riesgos externos.
- Hacerlas fácilmente accesibles para personas discapacitadas.
- Indicar la edad de los niños que pueden usar los diferentes juegos.
- Respetar las distancias mínimas de seguridad.
- Los juegos deberán ser resistentes, seguros y visiblemente atractivos.
- **Los suelos deberán ser de materiales adecuados para que amortigüen golpes y caídas.**
- Las áreas de juego deberán mantenerse en perfectas condiciones de limpieza y seguridad, impidiéndose la entrada de animales.

Durante los años 1998 y 1999 el Comité Europeo de Normalización (CEN) desarrolló, a partir de Normas DIN, las primeras Normas Europeas sobre seguridad e instalaciones de áreas de juegos infantiles que en España constituyen la serie UNE-EN 1176 y UNE-EN 1177.

Bajo todos los equipamientos que tengan altura de caída libre superior a 600 mm deberá haber superficie de amortiguación del impacto en toda la superficie de impacto.

En caso de materiales sintéticos, se deberá comprobar el HIC (Criterio de Lesión en Cabeza), de acuerdo con los requisitos de la Norma UNE-EN 1177/2009. (1)

1.1 EMPRESAS INVOLUCRADAS

DAYCO ARGENTINA S.A.

Dayco es líder global en investigación, diseño, fabricación y distribución de productos esenciales para motores, sistemas de propulsión y servicios para automóviles, camiones, construcción, agricultura e industria. Siendo la fabricación de correas a base de caucho el principal producto de su producción.

En el proceso productivo, más específicamente en el rectificado de correas, se generan grandes cantidades de polverino. Este residuo, al ser obtenido por la acción de lijadoras de banda, está integrado por partículas fibrosas o granulares gruesas como puede observarse en la **Figura 1**.

Figura 1- Polverino Dayco

Dayco produce 20.000 kg de polverino por mes cuya composición es 50% EPDM, 25% cloropreno y 25% acrilonitrilo hidrogenado. En general las durezas de sus productos, y por lo tanto las del polverino generado, son elevadas rondando los 80 – 90 Shore A.

TODOS RETENES S.A.

Todos Retenes se dedica a la fabricación de diversos artículos de caucho. Entre ellos se destacan retenes, piezas especiales y engomado de cilindros. El mayor volumen de residuos es generado en el proceso productivo de este último producto, específicamente en la etapa de rectificación.

El residuo obtenido está integrado por pequeñas partículas granulares de caucho ya que el acabado se consigue mediante la utilización de muelas esmeriles montadas debidamente sobre rectificadoras, como se puede observar en la siguiente **Figura 2**.

Figura 2. Polverino Todos Retenes

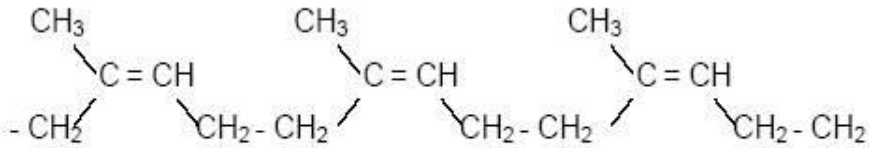
La cantidad de polverino generado por esta empresa ronda los 1250 kg anuales. Su composición es variada debido a su desempeño tipo taller, es decir de acuerdo a las distintas solicitudes de productos que reciben. En promedio la composición es 31% acrilonitrilo, 27,1% EPDM, 27% SBR, 2,3% natural y 12,7% otros varios. Por su parte la dureza, por la misma razón de variabilidad, presenta un valor promedio de 55 Shore A.

2. MARCO TEÓRICO

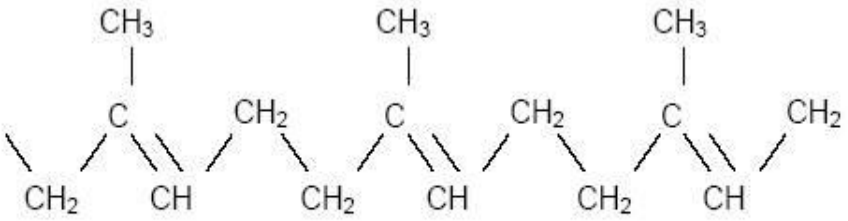
2.1 TIPOS DE CAUCHO

2.1.1 CAUCHO NATURAL

La estructura de los cauchos naturales está formada por cis-1,4 polisopreno mezclado con pequeñas cantidades de proteínas, lípidos y sales orgánicas, entre otros. Se encuentra así un polímero de cadena larga y enredada en forma de espiral con un peso molecular medio de $5x10^5$ g/mol. Esta cadena se complementa con su isómero estructural trans conocido como gutapercha. (**Figura 3**)



Segmento de una cadena de polímeros de caucho natural



Segmento de una cadena polimérica de gutapercha

Figura 3. Estructura semidesarrollada del caucho natural y su isómero gutapercha

Existen un gran número de plantas productoras de caucho: grandes árboles como los de género Hevea, el más conocido es *Hevea brasiliensis*; arbustos (*Parthenium argentatum* o guayule), plantas tropicales (landolphia) y otras plantas parecidas al diente de león. A pesar de los esfuerzos que se han realizado en la búsqueda de nuevas especies productoras el cultivo de Hevea es el único de tipo industrial. Estas plantas pueden alcanzar una altura de 30 a 40 m y un diámetro de 30 a 60 cm. (**Figura 4**)

Figura 4. Plantación de *Hevea brasiliensis*

Para recoger el látex de las plantaciones, se practica un corte diagonal en ángulo hacia abajo en la corteza del árbol. El látex exuda desde el corte y se recoge en un recipiente. La cantidad de látex que se extrae de cada corte suele ser de unos 30 mL. (2) (**Figura 5**)

Figura 5. Corte y exudado del látex

El látex fresco es transformado en caucho después de la recolección. Primeramente se cuela por un tamiz de lámina perforada para eliminar partículas de hojas y corteza. Después de la dilución se deja el látex en reposo un corto tiempo para que las materias no separadas por el tamiz (arena y cieno) se sedimenten. Entonces está dispuesto para la coagulación (3). Como coagulantes se emplean ácido fórmico o acético.

Un método de fabricación del caucho consiste en coagular el látex bruto con ácido y pasarlo después por una máquina de cortado y por una serie de cilindros de crepado. A continuación, con una trituradora de martillos o un granulador, se convierte el producto en grumos de caucho que son tamizados, lavados, secados y embalados. Otro método de producción de caucho consiste en añadir un agente disgregante antes de la coagulación seguido de la trituración con cilindros de crepado.

Para obtener el caucho natural en forma de planchas estriadas ahumadas comúnmente comercializadas se pasa el látex coagulado a través de una serie de cilindros, de los que salen planchas finas que se estampan con un patrón estriado para aumentar la superficie del material y mejorar su secado. Las planchas se tratan en un ahumador a 60°C durante una semana y a continuación se clasifican visualmente y se acondicionan en balas. (4)

Sólo se usa el caucho en bruto para la confección de suelas de calzado y para gomas de pegar o adhesivos. Para los demás usos, el caucho bruto se mezcla con distintos aditivos según las propiedades finales que se deseen. (5)

PROPIEDADES DEL CAUCHO NATURAL

- Excelente propiedades mecánicas, como carga de rotura, elasticidad y resistencia al desgarro.
- Alta resiliencia, excelentes propiedades dinámicas y baja deformación remanente.
- Buena resistencia a ácidos, bases y sales.
- No es aconsejable su uso en contacto con aceites, grasas o hidrocarburos.
- No resistente al oxígeno, ozono y luz UV. (4)
- Campo de temperaturas: entre - 50ºC y 90ºC.
- Amplia gama de durezas, desde 35º a 90º Shore A. (6)

2.1.2 CAUCHO SINTÉTICO

La búsqueda de productos sintéticos comenzó en la primera guerra mundial, siendo Alemania pionera en la investigación. Dado que son derivados del petróleo se incluyen dentro de la petroquímica. Algunos tipos de cauchos conocidos son los siguientes (**Tabla I**):

Tabla I. Cauchos sintéticos

TIPO	NATURALEZA	APLICACIONES
SBR	Copolímeros del butadieno y del estireno	Neumáticos, pavimentos, mecánica, usos generales
NBR	Copolímeros del butadieno y del acrilonitrilo	Productos resistentes al calor o a los agentes químicos
Butilo	Copolímeros del isobutileno y del isopreno	Cámaras de aire, usos que exigen impermeabilidad de los gases
Neopreno	Polímeros del cloropreno	Productos resistentes al envejecimiento, a los hidrocarburos y a los ataques químicos
Vinilo	Cloruro de polivinilo y alcohol	Usos generales
Poliuretano	Poliésteres o poliéteres unidos por diisocianatos	Espuma, calzado, juntas, almohadillas, colchones
Siliconas	Clorosilanos (obtenidos por reacción de la sílice con un cloruro de arilo o alquilo)	Juntas para altas presiones y altas temperaturas, equipos mecánicos
Polisulfuros	Productos resultantes de la reacción de dicloruros orgánicos y polisulfuros alcalinos	Rodillos de imprenta
Acrílicos	Derivados de la clorhidrina etilénica o del acetileno	Productos resistentes al envejecimiento o a los hidrocarburos a alta temperatura
Diversos	Poliisopreno, polibutadieno	Neumáticos, aisladores y otras aplicaciones que exigen condiciones estrictas

Por razones de disponibilidad para este Proyecto Integrador se amplían las siguientes variedades:

2.1.2.1 CLOROPRENO (NEOPRENO)

Caucho de Policloropreno (Neopreno®) es un homopolímero de Clorobutadieno, o Cloropreno. El cloropreno es un líquido que se parece al isopreno en cuanto a su estructura química, salvo que tiene un átomo de cloro, mientras que el isopreno tiene un grupo metilo (7). El átomo del cloro aumenta el nivel de resistencia a los aceites, situándolo entre el caucho natural y el caucho nitrílico. Ofrece el conjunto más equilibrado de propiedades deseables. Es apropiado para muchas aplicaciones.

PROPIEDADES

- Excelentes propiedades mecánicas y de abrasión.
- Tiene una buena adhesión al metal.
- Algunos tipos presentan tendencia a la cristalización a bajas temperaturas.
- Resistente a productos químicos inorgánicos, excepto ácidos oxidantes y halógenos.
- No resiste a la mayoría de compuestos orgánicos, excepto alcoholes.
- Moderada resistencia a los hidrocarburos alifáticos (parafinas, aceites vegetales, grasas animales, etc.).
- Resiliencia algo inferior al NR, en vulcanizados de baja dureza, pero superior a partir de durezas de 60º Shore A.
- Es autoextinguible y no propaga la llama.
- Buena resistencia a la temperatura, el ozono y la intemperie.
- Campo de temperaturas: entre - 25ºC y 125ºC.

2.1.2.2 ETILENO - PROPILENO - DIENO (EPDM)

Los copolímeros Etileno y Propileno (EPM) sólo se pueden vulcanizar por peróxidos o radiación, mientras que añadiendo el Dieno (EPDM) es posible realizar la vulcanización convencional con azufre, mejorando con ello el desgarro.

PROPIEDADES

- Excelente resistencia al envejecimiento, ozono y luz ultravioleta, siendo prácticamente inalterable a la intemperie.
- Excelente propiedades eléctricas y estabilidad en la radiación.
- No resiste los aceites y es atacado por solventes halogenados e hidrocarburos alifáticos y aromáticos.
- Moderada adhesión al metal.

- Campo de temperaturas: entre - 45ºC y 120ºC.
- Limitada resistencia a los ácidos oxidantes.
- Altamente resistente a los ácidos minerales, detergentes, éteres fosfóricos, cetonas, alcoholes y glicoles de bajo peso molecular.
- Capacidad de aceptar grandes cargas de aceites de extensión sin pérdida de las propiedades físicas. (6)

2.1.2.3 ESTIRENO - BUTADIENO (SBR)

Este tipo de caucho fue preparado por primera vez en Alemania en 1929. El SBR es un copolímero de butadieno y estireno en el cual un 25% de las unidades de estireno están distribuidas al azar entre el 75% de las unidades de butadieno en las cadenas moleculares.

El SBR sin vulcanizar es soluble en la mayoría de los solventes hidrocarbonados. La vulcanización es más lenta en el SBR que en el caucho natural y se requiere por lo tanto de aceleradores más poderosos.

Alrededor del 70% del SBR es utilizado por la industria llantera, este tipo de caucho es el que más se emplea, suponiendo algo así como el 60% de la producción de caucho consumido ya sea natural o sintético.

PROPIEDADES

- Excelentes propiedades mecánicas, moderada al desgarro.
- Inferior resiliencia en comparación con el caucho natural.
- Moderada resistencia al envejecimiento y a la temperatura. Su resistencia puede aumentarse con una formulación adecuada.
- Campo de temperatura: entre - 50ºC y 100ºC.
- Buena resistencia química a muchos productos químicos inorgánicos, pero mala con ácidos oxidantes.
- No es aconsejable su uso en contacto con aceites, grasas o hidrocarburos.
- Amplia gama de durezas, desde 35º a 90º Shore A. (8)

2.1.2.4 NITRILO - BUTADIENO (NBR)

Este es un copolímero de acrilonitrilo y butadieno, en el cual la proporción de acrilonitrilo puede variar desde el 18% al 40%. Cuanto más alta es la proporción de acrilonitrilo, más pobres son las propiedades físicas, pero es mejor la resistencia al aceite.

La resistencia al aceite y al calor es ligeramente más alta que en el caucho cloropreno, pero la resistencia a la luz solar no es tan buena.

PROPIEDADES

- Excelente resistencia a los aceites.
- Muy buenas propiedades mecánicas.
- Muy buena resistencia a los solventes.
- Muy buena adhesión a los metales.
- Temperatura de trabajo mayor 120°C.
- Buena resistencia a la flexión.
- Escasa resistencia al ozono.
- No resiste grasas azufradas.
- Baja resistencia a la llama.
- Baja permeabilidad a los gases.
- Elevado costo en comparación de los cauchos ordinarios.
- Puede ser atacado por el ozono, hidrocarburos aromáticos, cetonas, ésteres y aldehídos. (9)

2.2 DIVERSOS PRODUCTOS QUÍMICOS PARA EL CAUCHO

Las pastas de caucho se producen a partir de formulaciones que incluyen una gran variedad de componentes orgánicos e inorgánicos que se mezclan para formar un compuesto con características y propiedades específicas, siendo la selección de los componentes de una formulación la parte inicial para la obtención de un producto adecuado a las necesidades del consumidor y con un costo mínimo.

Para una formulación en particular, las propiedades y el desempeño dependerán de:

- la selección del caucho.
- la selección del tipo y cantidades de aditivos.
- la forma de realizar la mezcla.
- los métodos de moldeo empleados.
- la vulcanización.

En una formulación se pueden utilizar entre 20 y 30 componentes. La gran variedad de compuestos que existen y la forma en que cambian las propiedades de una mezcla al combinarse son una de las características más notables de la tecnología del caucho.

En general, una formulación está constituida por una base elastomérica, agentes reforzantes, ayuda procesos, antidegradantes y un sistema de vulcanización.

2.2.1 BASE ELASTOMÉRICA

Es una clase de material que se distingue del resto por su propiedad viscoelástica, es decir, recupera su forma original casi por completo después de liberar una fuerza que se le aplicó. La base elastomérica puede estar compuesta por caucho natural, sintético, mezcla de caucho natural con caucho sintético, mezcla de cauchos sintéticos, caucho reciclado y/o látices.

La selección del caucho está basada principalmente en sus propiedades, es decir, según las solicitaciones físicas y químicas a las que estará expuesto como pieza terminada. Por otro lado, también se tienen en cuenta su costo y la facilidad de mezclado.

2.2.2 AGENTES REFORZANTES

Se incorporan al caucho para modificar sus propiedades mecánicas, eléctricas y ópticas, economizar y ayudar en el proceso. Aunque el propósito original era bajar costos, actualmente son más importantes en la modificación de las propiedades. Estos pueden ser rellenos orgánicos e inorgánicos, fibrosos, sílicas, cargas negras y blancas, pueden actuar como relleno reforzante, semirreforzante y no reforzante. (10) (11; 12)

En la selección de un relleno se toma en consideración: el tamaño de partícula, el área superficial, la estructura y la actividad superficial. (13; 14)

2.2.3 AYUDA PROCESOS

Se usan para reducir el tiempo y la energía durante el mezclado, además de mejorar la dispersión de los componentes en polvo, proporcionando elasticidad y mejor procesabilidad del caucho. Se manejan en concentraciones de 5 ppc (partes por ciento de caucho), con un mínimo efecto en la vulcanización.

Para la selección de las ayudas de proceso se consideran los siguientes factores (15): su compatibilidad, costo, eficiencia, manchado y las propiedades a bajas temperaturas. Estos pueden ser peptizantes, ablandadores, plastificantes, aceites, agentes de adhesión, suavizantes, ayudas de dispersión, resinas, etc. (existen ayuda procesos que cumplen más de una de estas funciones):

Peptizantes - son usados principalmente en el caucho natural para ayudar a incrementar la eficiencia en la masticación del caucho e incrementar la velocidad del

rompimiento molecular evitando la formación de radicales libres (16). Se añaden al inicio del mezclado debido a que el azufre inhibe su acción. Los cauchos sintéticos necesitan de altas concentraciones de peptizantes.

Los primeros peptizantes utilizados fueron los mercapturos aromáticos. Los complejos de quelatos como hierro, cobalto y manganeso son muy eficientes para reducir la viscosidad y se usan en concentraciones de 0,1 - 0,5 ppc.

Semipeptizantes - son llamados así debido a que ayudan en el rompimiento de las moléculas de los cauchos naturales y sintéticos. En algunos casos facilitan el mezclado y procesado. Estos se mezclan generalmente con componentes orgánicos sulfurados y aceites minerales con densidades de 0,82 - 1,23 g/cm^3. Generalmente son líquidos aunque también se los encuentra en forma de polvo. Se usan en concentraciones de 1 - 3 ppc y en ocasiones hasta 5 ppc para piezas de esponja.

Ablandadores - se aplican en pequeñas cantidades para facilitar la incorporación de los rellenos, ablandar la pasta de caucho durante la vulcanización y así facilitar el procesamiento. Los principales ablandadores se obtienen de:

1. Petróleo
2. Pino
3. Alquitrán de hulla
4. Aceites y grasas naturales
5. Compuestos orgánicos sintéticos

La selección de un ablandador puede ser por: (a) la estructura química "polaridad y aromaticidad", la cual determina el grado de compatibilidad con el caucho; (b) el peso molecular, que controla la viscosidad del material y (c) la reactividad química, la cual cubre el efecto catalítico en la oxidación.

Plastificantes - se usan para mejorar la deformación de la pieza y una de las ventajas es que no se volatilizan. Los plastificantes tipos éster derivados de ciertos ácidos orgánicos y alcoholes se aplican en los cauchos nitrilo-butadieno y cloropreno para obtener una viscosidad de procesado apropiada, además ayudan a la incorporación de rellenos en pastas rígidas y para una mejor flexibilidad a bajas temperaturas.

También se usan en el sistema de vulcanización con peróxido, proporcionan pegajosidad durante el procesado y polimerizan durante el curado.

Ácidos grasos y sales - se usan en pequeñas cantidades como parte del sistema de vulcanización con azufre. El ácido esteárico también actúa como un plastificante, ayuda a la dispersión del negro de humo y otros rellenos, además reduce la tendencia de adhesión a los rodillos. Bajo las mismas circunstancias el estearato de zinc se usa en lugar del ácido esteárico y óxido de zinc. Algunas veces son usados como ayudas de proceso el laureato de zinc y las sales de zinc de alto peso molecular.

Aceites y extendedores - en contraste con los peptizantes, los aceites de petróleo actúan mejor de forma física que de manera química. Su efecto no depende de la temperatura de mezclado y se usan en intervalos de concentración de 5 - 10 ppc. Además actúan como un plastificante durante el procesado causando una reducción en la viscosidad, facilitando la incorporación del relleno y logrando un ablandamiento durante la vulcanización. Por otro lado, se usan como extendedores para disminuir el costo de la pieza. Estos aceites se clasifican en:

- Aceites Aromáticos: son buenos para ayudar a la dispersión del negro de humo durante el mezclado, presentan un efecto de decoloración en la pieza, además presentan un efecto adverso en la resistencia al calor y radiación ultravioleta.
- Aceites Parafínicos: son menos eficientes como ayudas de proceso, pero tienen mejor efecto durante el envejecimiento, en la decoloración o la estabilidad al calor. Su desempeño a bajas temperaturas es mejor que los aromáticos.
- Aceites Nafténicos: su efecto se sitúa entre los aceites aromáticos y parafínicos.

Facticio - durante el mezclado controlan el nervio del caucho y logran una mejor dispersión e incorporación de los componentes en forma de polvo. Se usan como ayudas de proceso en la extrusión de los cauchos naturales y sintéticos ya que proporcionan un filamento de buena calidad y previenen la deformación durante la vulcanización. Su rango de aplicación es de 5 - 30 ppc. A altas concentraciones se utilizan en piezas muy blandas.

Asfalto - es una ayuda de proceso que se usa como extendedor de baja densidad por su bajo costo, disminuye la temperatura de procesado y la tendencia a un sobrecurado. Se obtienen piezas de apariencia oscura brillante. No presenta problemas al incorporarse con el caucho. Se utiliza en un intervalo de concentración de 5 - 20 ppc.

Resina Coumarona - es usada como plastificante en cauchos sintéticos para adherirse a los rodillos. Su apariencia varía desde líquidos viscosos hasta sólidos, en el caso de los líquidos varían en el color desde café oscuro a crema y en los sólidos se caracterizan por el punto de fusión de 65 a 110°C.

Resinas de Estireno - contienen un 85 por ciento de estireno, se usan como ayudas de proceso para termoplásticos debido a su acción reforzante, particularmente en piezas que necesitan tener una alta dureza. Para asegurar una buena dispersión de la resina la temperatura de mezclado debe ser mayor a 95°C.

2.2.4 ANTIDEGRADANTES

La función de los antidegradantes es prevenir que las propiedades cambien durante su servicio debido a una degradación por oxidación como el ataque por ozono (17; 18). La volatilidad es un factor importante a considerar y es mejor que sea soluble en el caucho pero insoluble en los componentes líquidos. La pérdida durante el procesado y servicio ocasiona una disminución en su duración. Para la selección de los antidegradantes se consideran los siguientes criterios: costo, solubilidad, aplicación de la pieza, estabilidad al calor, a la luz, al oxígeno y a otros factores. Estos se dividen en antioxidantes y antiozonantes.

Antioxidantes - son usados para prevenir una posible degradación de la pieza (19). La mayoría de los cauchos están sujetos a la oxidación, aunque los materiales plásticos insaturados son más sensibles que los saturados. Los factores que influyen en acelerar la oxidación son el calor, la luz ultravioleta, la humedad y los iones metálicos pro-oxidantes (como el cobre, aluminio, manganeso, cobalto).

Los antioxidantes se dividen en primarios y secundarios. La función de los primarios es atrapar los radicales libres antes de que estos reaccionen con el caucho. Se clasifican en aminas secundarias y fenoles substituidos con hidrógenos muy reactivos. Los antioxidantes secundarios, se usan para evitar la formación de hidroperóxidos antes que estos puedan descomponerse en radicales libres. Los fosfitos del tipo alquil y alquilaril son usados hoy en día para proteger al caucho durante su almacenamiento y durante su procesado, sin embargo, estos se descomponen durante la vulcanización. Con la combinación de fenoles y fosfitos se logra un efecto sinérgico.

Antiozonantes - se utilizan para evitar una degradación en la superficie del caucho al exponerse al ozono (20). Para evitar esto es necesario formar una barrera en la superficie de la pieza. El ozono se encuentra presente en la atmósfera formándose por la acción de la luz solar con las partículas de contaminación presentes en el ambiente.

El mecanismo de degradación inicia por la reacción del ozono con los dobles enlaces del caucho para formar ozonidas, las cuales se descomponen al romper los dobles enlaces y bajo esfuerzo aparece la fractura, siendo una reacción repetitiva.

Ceras - las ceras protegen al caucho del deterioro ambiental que ocasiona un envejecimiento prematuro formando una película en la superficie del caucho que lo protege del ataque por el ozono, presentando un efecto barrera que depende de la solubilidad y temperatura (21; 22). Existen dos tipos de ceras (23): la cera parafínica y la microcristalina; esta última tiene menos tendencia a ser visible en la superficie. Por lo general se recomienda mezclar las dos para una máxima protección en un amplio rango de temperaturas de exposición. Su ventaja es que son de bajo costo, no manchan y no afectan la vulcanización.

2.2.5 SISTEMAS DE VULCANIZACIÓN

Los sistemas de vulcanización se usan para retardar o acelerar el sistema de entrecruzamiento (24). Sin su uso la vulcanización del caucho sería muy lenta y tardaría días o meses en obtenerse un material vulcanizado con determinadas propiedades. Son un conjunto de sustancias químicas que al reaccionar con las moléculas del caucho forman una red tridimensional entre los segmentos de la cadena formando enlaces C-C, C-S-C y C-S_x-C. A todo este proceso se lo conoce como vulcanización, curado, entrecruzamiento o reticulación.

Con la vulcanización se incrementa el esfuerzo tensil, el módulo de elasticidad, la dureza, la resistencia a la abrasión y por consiguiente disminuye la elongación, compresión permanente y la solubilidad.

Con un entrecruzamiento excesivo se obtienen productos rígidos, con un entrecruzamiento normal se mejora la propiedad de resistencia a la tensión y al rasgado, además de la fatiga. Un entrecruzamiento pobre proporciona una degradación oxidativa y térmica con una baja compresión permanente. En la **Tabla II** se describen las propiedades del caucho crudo y vulcanizado.

Tabla II. Diferencias entre caucho sin vulcanizar y caucho vulcanizado

Caucho sin vulcanizar	Caucho vulcanizado
Baja tensión	Alta tensión
Alta retención	Baja retención
Termoplástico	Termoestable
Pegajosidad	Ausencia de pegajosidad
Baja viscosidad	Alta viscosidad
Alto ablandecimiento	Bajo ablandecimiento
Bajo módulo	Alto módulo
Bajo esfuerzo a la tensión	Alto esfuerzo a la tensión
Alta elongación	Baja elongación
Baja dureza	Alta dureza
Alta deformación permanente	Baja deformación permanente
Bajo rebote	Alto rebote
Alto hinchamiento ante solventes	Bajo hinchamiento ante solventes

a) Sistema de vulcanización con azufre

Es el agente de vulcanización más ampliamente usado en los cauchos cuya estructura está conformada por dobles ligaduras como en el caso de los cauchos: natural, estireno-butadieno (SBR), polibutadieno, nitrilo, policloropreno y polisopreno (25). Es insoluble en el caucho por lo que migra a la superficie antes de la vulcanización, es de bajo costo y baja toxicidad, compatible con otros aditivos.

Un sistema de vulcanización típico está compuesto por el azufre, un óxido metálico como el óxido de zinc, un ácido graso (para ayudar a solubilizar el óxido metálico) y uno o más aceleradores orgánicos. Se usa en una concentración de 1 a 3 ppc. Los métodos para la vulcanización pueden ser:

- Azufre solo
- Azufre convencional y aceleradores
- Baja cantidad de azufre y aceleradores
- Sistema donador de azufre

Activadores - ayudan a incrementar la velocidad de vulcanización reaccionando primero con los aceleradores y activando luego al azufre para iniciar la vulcanización. Éstos pueden ser orgánicos, inorgánicos o metálicos. Los activadores más comunes son la combinación de óxido de zinc en concentraciones de 2 - 4 ppc y el ácido esteárico que puede variar desde 1 - 3 ppc; este último actúa como un lubricante para reducir la viscosidad durante el mezclado.

Aceleradores - son usados para reducir el tiempo de vulcanización, mejorar las propiedades físicas y aumentar la estabilidad al envejecimiento (26; 27). Estos pueden ser aceleradores ultra rápidos, rápidos, rapidez media y de acción retardada dependiendo del sistema de vulcanización y producto. La cantidad requerida del componente es relativamente pequeña, generalmente de 0,5 a 1,0 ppc. Algunos aceleradores requieren la presencia de ZnO para ejercer su efectividad y algunos otros requieren de un ácido orgánico.

Retardadores - se usan para retardar el tiempo de quemado previniendo una vulcanización prematura bajo determinadas condiciones de procesamiento, a un intervalo de concentración de 0,1 - 0,3 ppc (28). Se pueden combinar con aceleradores como MBT y MBTS para obtener un procesado sin problemas, una velocidad de curado óptima y buena calidad del producto. No se recomienda mezclarlos con los agentes de vulcanización como resinas o con óxido metálico.

b) Sistema de vulcanización sin azufre

Los cauchos que no contienen dobles ligaduras en su estructura molecular no pueden ser vulcanizados con azufre y requieren de un agente entrecruzante alterno capaz de reaccionar con una ligadura. Para este tipo de cauchos se pueden usar los peróxidos. Los agentes del tipo óxidos metálicos o compuestos difuncionales son usados en casos especiales.

Peróxidos - son los agentes más usados después del azufre por su habilidad para:

- El entrecruzamiento con una variedad de cauchos insaturados y saturados.
- Proporcionar estabilidad térmica en el enlace carbono-carbono, formado durante el entrecruzamiento.

Al usar peróxidos, los compuestos presentan mejores propiedades en el envejecimiento térmico, baja compresión permanente y buena flexibilidad a bajas temperaturas. Se deben tomar medidas de precaución durante su manejo y almacenamiento ya que son sustancias de riesgo. Comparadas con otras materias primas, producen un olor desagradable durante la vulcanización y reaccionan con otros componentes, por lo que se restringe el uso de antioxidantes en este sistema.

No es recomendable usarlos en presencia de oxígeno, como en el caso de la vulcanización continua en aire caliente, la razón es que el radical de transferencia de la cadena del caucho se oxida, formándose hidroperóxidos responsables del inicio de la degradación. (29; 30)

Óxidos metálicos - los cauchos que contienen halógenos (ejemplo cloro) tales como el caucho neopreno, halobutilo y el polietileno clorosulfonado son entrecruzados con la ayuda de óxidos metálicos, típicamente óxido de zinc. En ocasiones se prefiere el uso del óxido de plomo para mejorar la resistencia a la absorción de agua. También se puede usar el óxido de magnesio. Si alguno de estos agentes presenta trazas de otros elementos ocasionará un efecto adverso durante el mezclado o en la vulcanización.

Entrecruzamiento con aminas - los cauchos fluoroeslastómeros (FKM) y los poliacrilatos (ACM) contienen una pequeña cantidad de monómero reactivo que reacciona con las aminas. Estos tipos de cauchos no pueden ser vulcanizados a través de azufre, el cual puede ser añadido solamente como un retardador de la vulcanización.

Compuestos difuncionales - ciertos componentes bifuncionales son usados para llevar a cabo el entrecruzamiento formando puentes entre las cadenas del caucho. Los componentes de este tipo son: p-quinona dioxima, la cual es oxidada a p-dinitrisobenzeno para formar el puente con los dobles enlaces del caucho, se usa en el caucho butilo; la resina epoxi para el caucho nitrilo y la resina fenólica para el caucho butilo y EPDM. (31)

2.3 FABRICACIÓN DEL CAUCHO

Los métodos de fabricación del caucho son similares para todos los fabricantes de caucho de todo el mundo. Pueden ocurrir, sin embargo, variaciones en relación con los compuestos específicos, los métodos de producción de cada fabricante y los niveles de complejidad.

2.3.1 FORMULACIÓN Y MEZCLA DE LOS COMPUESTOS DEL CAUCHO

Se procesan una variedad de materiales de caucho, tanto naturales como sintéticos, para hacer compuestos adecuados en cuanto a criterios medioambientales y de rendimiento.

Los cauchos naturales son suministrados por los países tradicionales del Este Lejano como Malasia e Indonesia. En cambio, el caucho sintético se fabrica principalmente en industrias químicas de Europa y EE.UU.

En sí mismo, el caucho básico tiene poco uso y habrá de formularse para hacerlo adecuado según las propiedades deseadas en los productos acabados.

Después de desarrollarlas en el laboratorio, se utilizan formulaciones precisas en las operaciones de mezclado para combinar los distintos componentes y obtener así el producto deseado. Esto se hace utilizando un proceso de molienda y mezcla.

2.3.1.1 MALAXADOR BANBURY

En el malaxador Banbury se introduce la mezcla de caucho, negro de humo y otros productos químicos para obtener un material de caucho homogéneo. El tiempo, el calor y las materias primas utilizadas son los factores decisivos en la composición del producto final. Por lo general, los ingredientes llegan a la planta en paquetes ya pesados o en cantidades a granel que son preparadas y pesadas allí por el técnico encargado. Los ingredientes pesados se colocan en un transportador que los carga en el malaxador para iniciar el proceso de mezclado.

MASTICACIÓN

El laminado del caucho comienza con el proceso de masticación. Una vez finalizado el ciclo de mezclado con el equipo Banbury, el caucho se coloca en un laminador. Este proceso transforma las placas de caucho en largas láminas al pasar a través de dos cilindros que giran en dirección opuesta y a diferentes velocidades. (4)

2.3.1.2 MEZCLADOR ABIERTO

Para mezclar el caucho con los distintos aditivos en producciones de bajo volumen, en vez de un malaxador Banbury se utiliza directamente una mezcladora abierta, cuyo funcionamiento es igual al de la laminadora antes mencionada. De esta manera se mezcla y se lamina en el mismo equipo.

El material procesado es ahora adecuado para moldear. También se envían muestras de cada lote a Control de Calidad y se someten a un programa de pruebas antes de enviarlo al departamento de producción.

2.3.2 TIPOS DE MOLDEO

Los productos de caucho se fabrican normalmente por uno de los siguientes métodos:

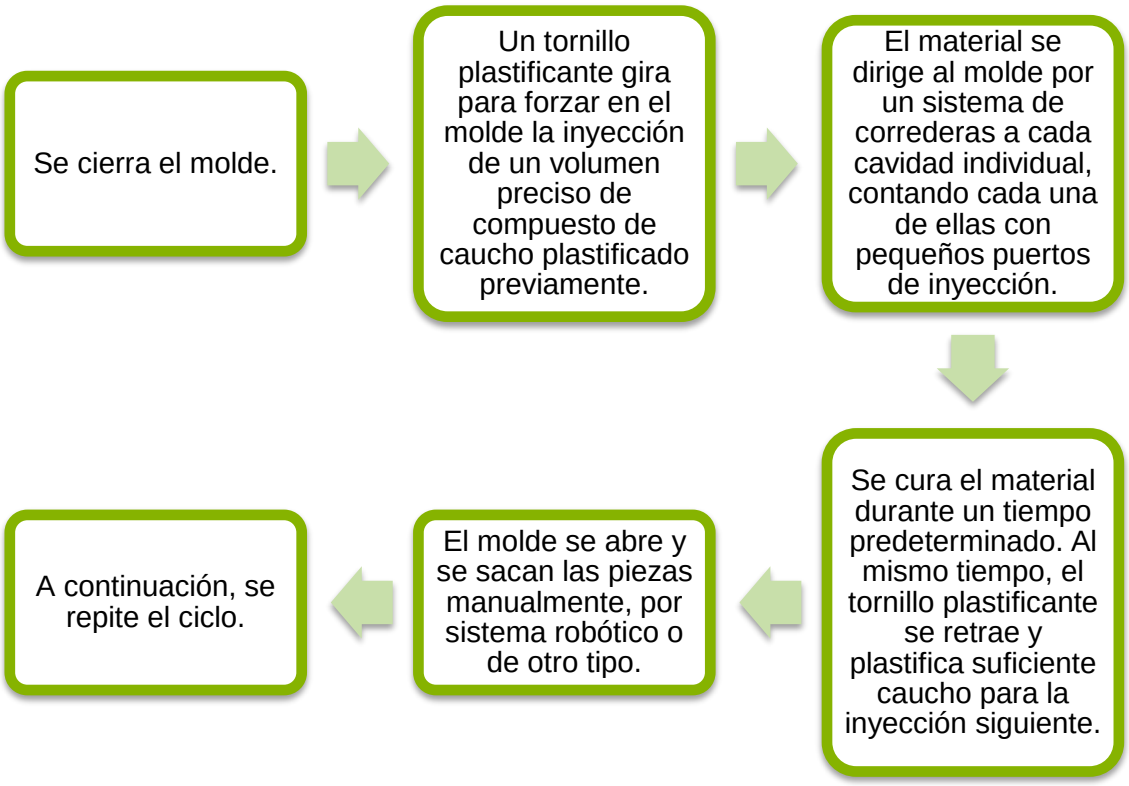
- Moldeo por inyección
- Moldeo por compresión
- Extrusión

El moldeo por inyección y compresión requiere moldes de una o de muchas cavidades, fabricados normalmente en acero de alta calidad. (32)

2.3.2.1 MOLDEO POR INYECCIÓN:

El moldeo por inyección tiene una serie de elementos que operan automáticamente en secuencias cronometradas con temperaturas de moldeo normalmente entre 165°C y 200°C.

Ciclo de moldeo:

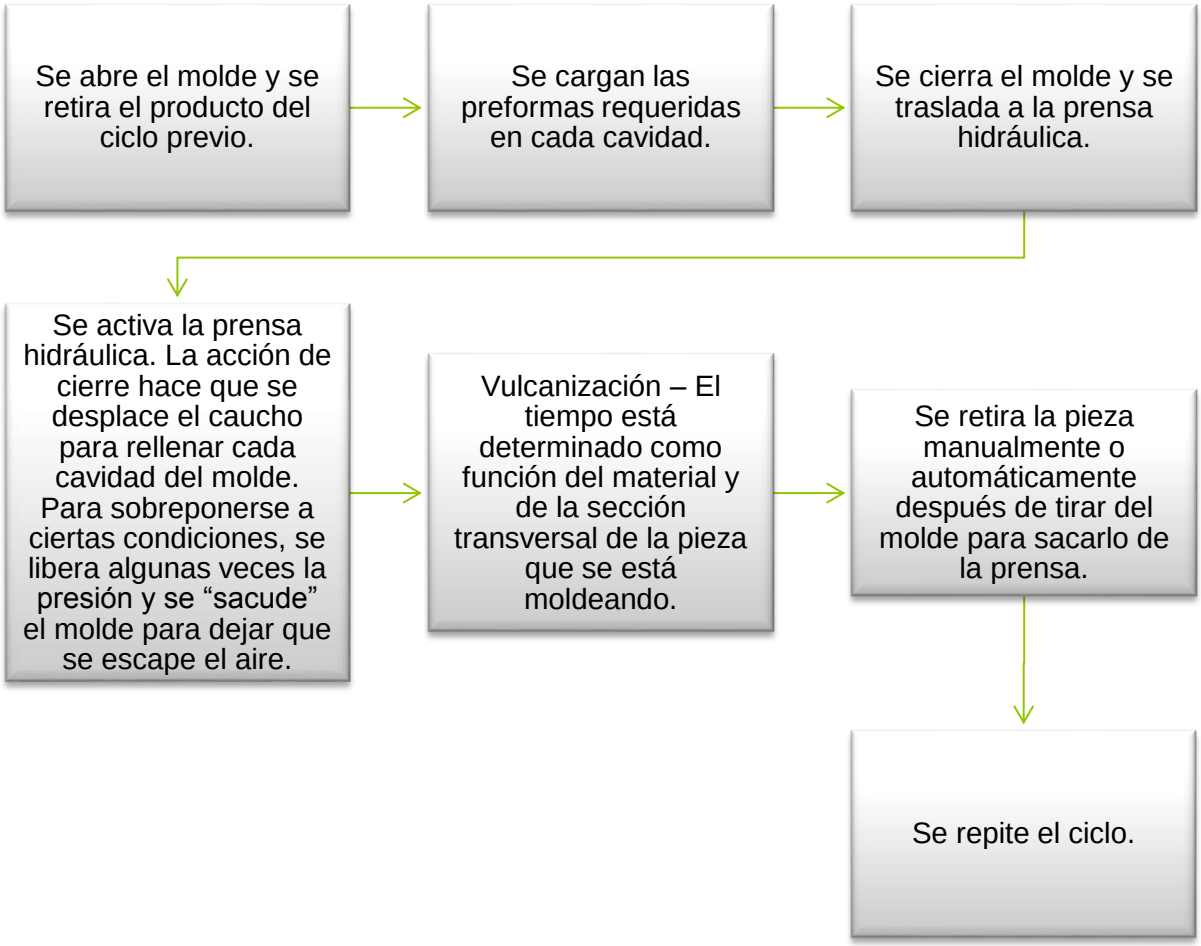


Durante cada ciclo de la máquina el operario puede realizar una serie de operaciones: recortar el exceso de caucho (rebaba lateral), inspeccionar, envasar o ensamblar la pieza. Alternativamente, se puede enviar la pieza para que sea recortada por otros métodos.

2.3.2.2 MOLDEO POR COMPRESIÓN:

Este proceso más simple es más lento en su operación que el moldeo por inyección porque se utilizan preformas previamente pesadas sin vulcanizar. El proceso utiliza prensas hidráulicas con platos precalentados entre 150°C y 170°C que a su vez calientan el molde.

Ciclo de moldeo:



Una vez más, el operario puede que tenga tareas que realizar como se describe en el moldeo por inyección. El moldeo por compresión es generalmente más adecuado para una producción de poco volumen o cuando se tienen que mantener los costes de las herramientas al mínimo. El moldeo por compresión no es idóneo para moldear piezas complejas.

2.3.2.3 EXTRUSIÓN:

La extrusión se utiliza para una de las dos funciones siguientes:

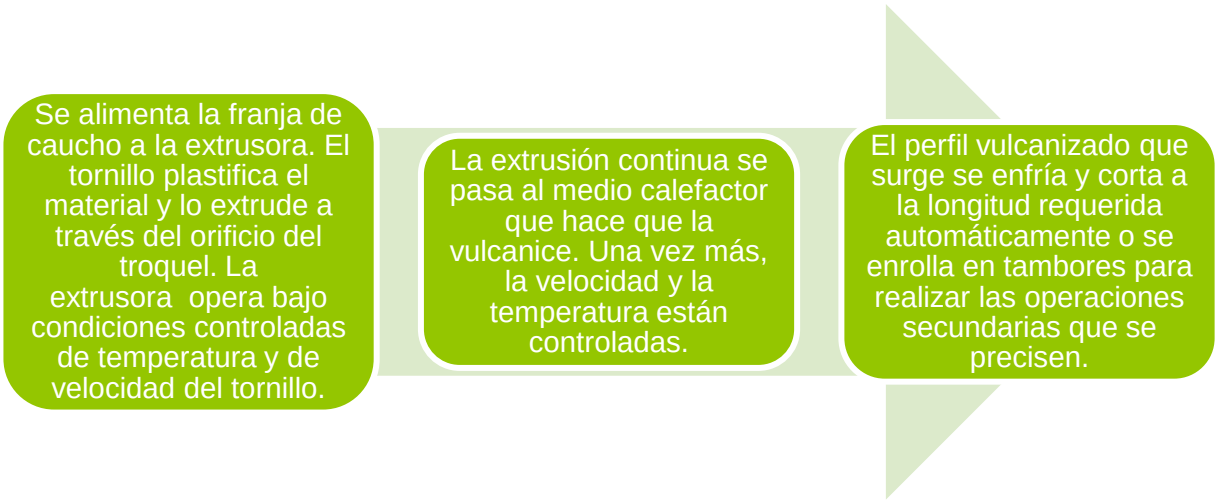
1. La fabricación de secciones vulcanizadas de gran tamaño como para moldearlas por inyección o compresión.
2. La producción de preformas para el moldeo por compresión.

Se utiliza un proceso de fabricación conocido como vulcanización continua para la producción de extrusiones vulcanizadas.

Se requieren dos piezas de maquinaria para realizar este proceso:

- Una extrusora con un barril, un tornillo y un troquel de sección transversal correcta en el extremo de salida.
- Una fuente de calor para vulcanizar el caucho que puede ser uno de lo siguiente:
  - Un horno de aire caliente.
  - Una combinación de microondas y horno de aire caliente.
  - Un baño especializado que contiene sal fundida.

El proceso de " Vulcanización Continua" es como sigue:



2.4 DUREZA

La dureza es una condición de la superficie del material, no representa ninguna propiedad de la materia y está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas del material. Si bien, es un término que nos da idea de solidez o firmeza, no existe una definición única acerca de la dureza y se la suele definir arbitrariamente en relación al método particular que se utiliza para la determinación de su valor. De esta manera algunas definiciones son:

1) Resistencia a la indentación permanente bajo cargas estáticas o dinámicas (dureza por penetración).

2) Absorción de energía bajo cargas de impacto o dinámicas (dureza por rebote).

3) Resistencia a la abrasión (dureza por desgaste).

4) Resistencia al rayado (dureza por rayado).

Independientemente de las definiciones enumeradas, en general, se entiende por dureza la propiedad que tienen los materiales de resistir la penetración de un indentador bajo carga. En este sentido definiremos dureza como la resistencia de un material a la deformación plástica localizada.

Los diferentes métodos desarrollados para medir la dureza en general consisten en producir una deformación local, en el material que se ensaya, a través de un indentador. Los valores obtenidos son siempre dependientes del método y las condiciones en las que se ensaya por lo que para que un valor de dureza sea útil y permita su comparación debe estar acompañado de la indicación del método utilizado y las condiciones del ensayo.

Los diferentes métodos utilizados para obtener los valores de dureza se pueden clasificar en dos grandes grupos según la forma de aplicación de la carga:

- Ensayos estáticos en lo que la carga se aplica en forma estática o cuasi-estática. En este caso un indentador se presiona contra la superficie de ensayo con una carga que se aplica en forma relativamente lenta. En general, la medida de dureza en este tipo de ensayo resulta del cociente de la carga aplicada y el área de la huella que deja el indentador en la superficie, como es el caso de los método Brinell, Vickers y Knoop, o bien es una medida de la profundidad de la indentación como en el ensayo Rockwell y el Shore estático.

- Ensayos dinámicos en los que la carga se aplica en forma de impacto. En general el indentador es lanzado sobre la superficie a ensayar con energía conocida y el valor de dureza se obtiene a partir de la energía de rebote del penetrador luego de impactar en la muestra, como sucede en el método de Shore dinámico y en el de Leeb, ambos conocidos como métodos de dureza por rebote.

En general se mide dureza cuando se ha establecido una correlación entre la dureza y alguna otra propiedad del material, como por ejemplo la resistencia a la abrasión o al desgaste, la resistencia a la tracción, etc. Sin embargo debe advertirse que dichas correlaciones son aplicables en forma muy cuidadosa sobre un rango acotado de materiales sobre los cuales se conoce, empíricamente, las condiciones en que se cumple la relación entre la propiedad buscada y el valor de la dureza. (33)

2.4.1 DUREZA SHORE

La escala de esta dureza fue definida por Albert Shore alrededor de 1920, aunque no fue el primer dispositivo inventado en la historia para medir dureza.

Mide la reacción elástica del material cuando dejamos caer sobre él o intentamos penetrarlo con un material más duro. Mientras más blando sea el material, mayor cantidad de la energía que lanzamos o presionamos sobre él se absorbe en el choque. El resto de la energía se traduce en un rebote, que es lo que medimos en este ensayo.

El método de laboratorio se basa en dejar caer un percutor desde una altura de unos 250 mm por una guía escalada, midiéndose la altura del rebote. Debemos tener la seguridad de que la superficie a ensayar sea plana pues de lo contrario se desvirtúa el ensayo. Se considera un ensayo no destructivo.

El método *in situ* mide con qué profundidad un cuerpo penetra dentro de un material. A mayor dureza del material, menor la profundidad de penetración y mayor es la carga que tendremos que aplicar. (34) (**Figura 6**)

Figura 6. Durómetro Shore (estático)

Existen varias escalas definidas acorde a las diferentes propiedades de los materiales, pero para este dispositivo las más comunes son las escalas A y D, la primera para elastómeros blandos y la segunda para los más duros. (**Figura 7**)

Figura 7. Escala de durezas Shore A y D para distintas aplicaciones

El método de medición consiste en generar una indentación o impronta profunda en el material con una fuerza normalizada a través de un penetrador. La profundidad depende de la dureza del material, de sus propiedades viscoelásticas, la forma del penetrador de presión y la duración del ensayo. Cuando se está haciendo la impronta en el material, la medida de la profundidad se transmite a un resorte interno de un reloj comparador, que puede ser analógico o digital, dando un valor determinado de dureza. (35; 36)

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Obtener baldosas de caucho prensado a partir de una mezcla de caucho virgen y caucho reciclado en polvo.

3.2. OBJETIVOS PARTICULARES

- Caracterizar el caucho reciclado en polvo.
- Definir las distintas combinaciones de las materias primas para la elaboración del producto.
- Determinar propiedades mecánicas y químicas de los productos obtenidos mediante distintos ensayos.
- Seleccionar las formulaciones más adecuadas en base a las propiedades evaluadas.
- Realizar costeo del producto.

4. CARACTERIZACIÓN POLVERINO

En este apartado se describen la granulometría, la composición y la dureza de cada polverino en estudio.

El estudio de granulometría se realizó en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad Nacional de Córdoba. Ambos materiales fueron secados en estufa a 105°C durante tres días antes del ensayo. Al ser extraídos de la misma se observó la formación de esferas de material, las cuales fueron desintegradas manualmente para ensayarlas. Se utilizaron tamices de 3/8´´ al N°100.

Como la producción de Todos Retenes es por pedido, el cálculo de la dureza y composición promedio se realizó en base a registros disponibles de la producción de cilindros engomados comprendida entre los años 2012 y 2015. En el caso de Dayco la composición y dureza fueron notificadas directamente por la empresa.

4.1. GRANULOMETRÍA

Los resultados del tamizado para el polverino de Todos Retenes se presentan en la **Tabla III** y se grafican luego en la **Figura 8**:

Tabla III. Análisis granulométrico - Polverino Todos Retenes

ENSAYO			RESULTADO							NORMA IRAM	
Análisis granulométrico			Mod. Fineza: 2,27				Tmax: 3/8´´			1505	
Tamiz N°	1 1/2´´	1´´	3/4´´	1/2´´	3/8´´	4	8	16	30	50	100
Pasante %					100	93,2	85	76,1	63	38,7	17,2

Luego del tamizado se observaron pequeñas esferas bien definidas que se pueden romper con una pequeña presión.

Los resultados del tamizado para el polverino de Dayco se presentan en la **Tabla IV** y se grafican en la **Figura 8**:

Tabla IV. Análisis granulométrico - Polverino Dayco

ENSAYO			RESULTADO							NORMA IRAM	
Análisis granulométrico			Mod. Fineza: 4,8				Tmax: 3/8´´			1505	
Tamiz N°	1 1/2´´	1´´	3/4´´	1/2´´	3/8´´	4	8	16	30	50	100
Pasante %					100	50,7	24,3	19	15,1	8,2	2,4

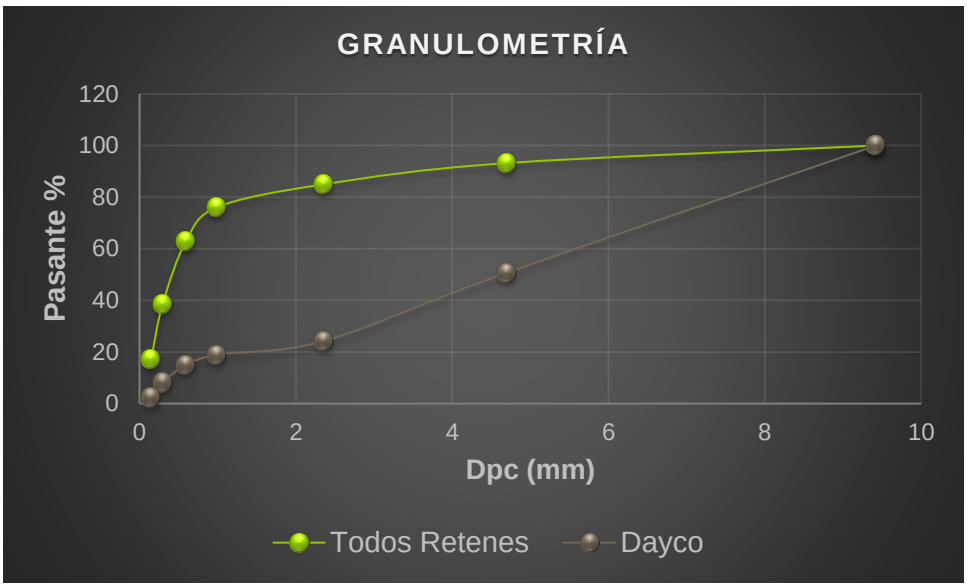


Figura 8. Granulometría polverinos

Como puede observarse el polverino de la empresa Todos Retenes presenta una menor granulometría que el polverino generado por Dayco al tener un mayor porcentaje de pasante para cada abertura de malla.

4.2.COMPOSICIÓN Y DUREZA

En la **Tabla V** se presentan los porcentajes en masa anuales de los distintos tipos de caucho utilizados por la empresa Todos Retenes en sus procesos productivos que generan polverino. El análisis fue realizado a partir de registros provistos por la empresa.

Tabla V. Variación anual de tipos de caucho producidos por Todos Retenes

Año	AN %	EPDM %	NAT %	SBR %	OTROS %
2012	44,7%	21,0%	3,8%	22,9%	7,7%
2013	28,1%	36,1%	3,0%	22,2%	10,7%
2014	25,9%	27,1%	2,0%	32,1%	12,8%
2015	25,3%	24,1%	0,4%	30,7%	19,4%
Promedio	**31,0%**	**27,1%**	**2,3%**	**27,0%**	**12,7%**

Para una mejor visualización se grafican dichos resultados en la **Figura 9**. Como puede observarse las mayores fracciones corresponden, casi en igual parte, a AN, EPDM y SBR.

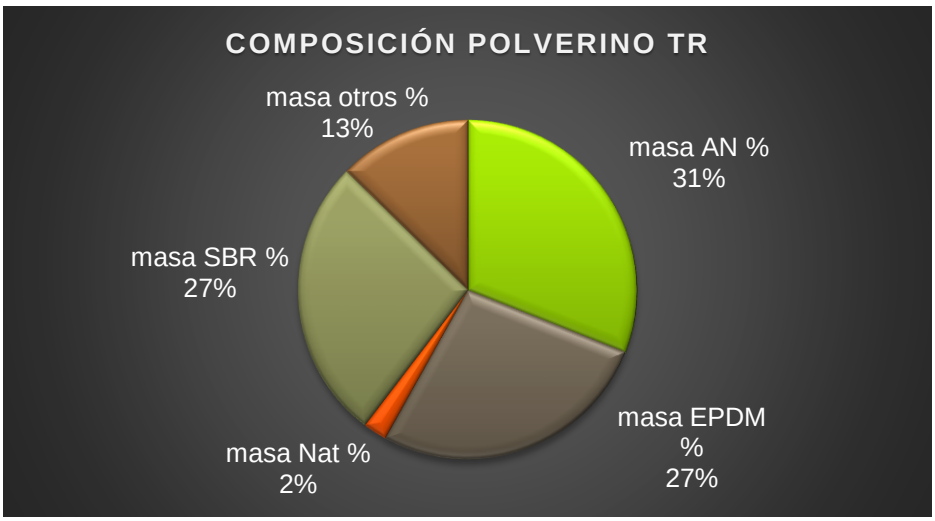


Figura 9. Composición polverino de Todos Retenes

En la **Tabla VI** se presentan los porcentajes en masa anuales correspondientes a las fracciones de polverino generado a partir de piezas de diferente dureza (Shore A) producidas por la empresa Todos Retenes. Se consideró que el polverino generado posee la misma dureza que la pieza que le dio origen. Además, se consideró que se sigue la regla de las mezclas.

Tabla VI. Variación anual de durezas producidas por Todos Retenes

Año	D30 (%)	D40 (%)	D50 (%)	D60 (%)	D70 (%)	D80 (%)	D90 (%)	D100 (%)	Dureza Promedio
2012	13,2%	25,2%	7,7%	25,2%	12,0%	9,2%	5,5%	2,0%	**50,71**
2013	4,5%	9,3%	3,3%	47,1%	13,3%	14,8%	5,0%	2,6%	**58,28**
2014	0,6%	14,2%	16,9%	38,0%	9,9%	11,5%	5,8%	3,2%	**56,60**
2015	13,5%	12,6%	8,7%	31,1%	15,5%	8,3%	5,6%	4,8%	**54,38**
Promedio	**7,9%**	**15,3%**	**9,2%**	**35,4%**	**12,7%**	**11,0%**	**5,5%**	**3,1%**	**54,99**

En la **Tabla VII** se muestran los datos correspondientes a los meses de agosto a diciembre del 2015 en los cuales se recogió el polverino para la realización del presente PI.

Tabla VII. Variación mensual de durezas producidas por Todos Retenes

Mes	D30 (%)	D40 (%)	D50 (%)	D60 (%)	D70 (%)	D80 (%)	D90 (%)	D100 (%)	Dureza Promedio
Ago-15	24,8%	19,3%	0,0%	32,9%	11,5%	8,5%	0,0%	3,0%	**47,78**
Sep-15	9,4%	0,0%	12,1%	54,0%	10,3%	6,3%	1,9%	6,0%	**56,22**
Oct-15	3,9%	33,0%	16,0%	13,8%	16,0%	0,1%	13,0%	4,3%	**52,86**
Nov-15	1,8%	3,9%	17,6%	32,8%	28,1%	7,2%	0,9%	7,7%	**59,53**
Dic-15	36,4%	19,4%	3,3%	26,4%	4,5%	4,8%	0,0%	5,2%	**43,38**
Promedio	15,2%	15,1%	9,8%	32,0%	14,1%	5,4%	3,2%	5,3%	**51,96**

Según lo visualizado, la dureza promedio de los últimos cuatro años es de 55 Shore A pero el polverino recogido durante los meses mencionados tiene una dureza promedio ligeramente menor de 52 Shore A aproximadamente.

Para la composición y dureza del polverino provisto por Dayco no se realizó ningún estudio y solo se tomó en cuenta lo informado por la empresa. Dicho polverino está compuesto principalmente por EPDM, Cloropreno y Acrilo Nitrilo Hidrogenado, en porcentajes aproximados de 50%, 25% y 25% respectivamente. Por su parte la dureza es elevada, puede variar de 70 a 90 Shore A aproximadamente.

4.3. CONCLUSIONES

Ambos polverinos presentan tendencia a aglomerarse por lo que su granulometría no ha sido correctamente establecida, sin embargo se pudo apreciar que el polverino proveniente de Dayco S.A. es de un particulado más grueso que el provisto por Todos Retenes S.A.

Por otro lado, ambos son de color oscuro -gris a negro- lo que sugiere que al mezclarlo con caucho crudo se obtendrá un producto también de color oscuro. Para obtener un producto de color controlado se ha propuesto el recubrimiento superior con una fina capa de caucho sin incorporación de polverino.

Por último, debido a que la composición y la dureza de los polverinos no es estable en el tiempo se propuso una producción por lote, debiéndose ajustar para cada lote las proporciones de los demás componentes a adicionar en la mezcla para obtener las características deseadas.

5. SELECCIÓN CAUCHO BASE

5.1. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se describen las distintas pruebas que se llevaron a cabo para la selección del caucho base. La selección se basó en esta instancia en la cantidad de carga (polverino) que admite cada caucho y en las características propias de cada uno, observando su resistencia a las solicitaciones a las que va a estar expuesto durante la vida útil del producto: principalmente resistencia al envejecimiento en intemperie.

En primer lugar, basado en una disponibilidad de remanente de caucho, se iniciaron las pruebas con Acrilonitrilo. Además se realizaron mezclas con Caucho Base de EPDM debido a su buena resistencia al envejecimiento y con Caucho Natural debido a su bajo costo (**Tabla VIII**), excelente resistencia al impacto y alta admisión de carga.

Tabla VIII. Comparación de costos para distintos tipos de caucho virgen

Tipo de caucho	Costo por kilogramo (U$S)
Caucho natural	3,7
Acrilonitrilo	4,4
EPDM	4,8

Se realizaron distintas mezclas en una amasadora de rodillos a cielo abierto, las cuales fueron posteriormente vulcanizadas en prensas hidráulicas calefaccionadas. En todos los casos se midió dureza Shore A a las probetas vulcanizadas ya que es una medida rápida de obtener *in situ* para entender cómo es afectada esta magnitud con la adición del polverino.

La mezcladora de rodillos utilizada es un equipo que consta de un motor trifásico de 30 hp, 1000 rpm y 22 kW, tipo sk65/6ma cuyo número de serie es 23508. Además, los rodillos de amasado tienen un diámetro de 404 mm y un largo de 765 mm. Ambos rodillos giran en sentido opuesto y a distinta velocidad. (**Figura 10**)

La prensa empleada para la vulcanización de probetas de las distintas mezclas es un equipo que consta de un motor trifásico de 3 cv, 1400 rpm, 5,2 A y 50 Hz, tipo 103 cuyo número de serie es 6291. Además, cuenta con platos de 500 x 500 mm calefaccionados a través de resistencias, un cilindro hidráulico de 144 mm de diámetro y una presión de cierre de 100 kg/cm^2. (**Figura 11**)

Figura 10. Vista frontal de mezcladora de rodillos a cielo abierto

Figura 11. Vista frontal de prensa hidráulica

Para la medición de dureza se empleó un durómetro Shore A estático como el de la **Figura 12**.

Figura 12. Durómetro Shore A

5.2. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la **Tabla IX** se detallan pruebas con distintos tipos de caucho base y distintas cantidades de polverino.

Tabla IX. Mezclas caucho - polverino

Caucho Base	Kg de Polverino / Kg de Caucho	Tipo de Polverino Utilizado	Dureza (Shore A)
Acrilonitrilo	0	-	50
	1	TR	57
	2	TR	60
	3	TR	62
EPDM	0	-	40
	1	TR	35
	2	TR	32
	3	TR	27
Natural	0	-	42
	2	TR	41
	3	TR	45
	0	-	65
	2	TR	50
	3	TR	49
	0	-	50
	1	DY	65
	2	DY	70
	3	DY	75
	4	DY	78
	4,5	DY	78
	5	DY	80

En primera instancia se utilizó acrilonitrilo como caucho base con el fin de determinar si la mezcla con polverino era posible, es decir, que la incorporación fuera factible y que dicha mezcla vulcanizara favorablemente al proporcionarle calor y presión. Dicha prueba resultó exitosa, lográndose incorporar cantidades relativamente altas de polverino y buenas propiedades de maquinabilidad.

Posteriormente las pruebas se realizaron con EPDM como caucho base ya que este polímero posee excelentes propiedades de resistencia contra el envejecimiento a la intemperie. Se observó que este caucho admite menores cantidades de polverino que el AN, situación incompatible con el objetivo de este trabajo ya que se trata de recuperar la mayor cantidad posible de este residuo generado. A esto se le suma el hecho de que las mezclas vulcanizadas a partir de este elastómero resultaron ser muy pobres en cuanto a propiedades de tracción y compresión manual. Cabe aclarar que las probetas no fueron sometidas a ensayos formales de tracción y compresión, sino que se estimaron cualitativamente estas propiedades mediante inspección manual y visual.

Finalmente se realizaron las mezclas con caucho natural como base obteniendo los mejores resultados en cuanto a cantidad de polverino incorporado. En este punto se decidió utilizar un diseño en bicapa: una capa inferior de mayor espesor con caucho natural como base e incorporación de polverino y una capa superior fina compuesta por EPDM para evitar el envejecimiento con alternativas de color.

Se observó que superando los 3 kg de polvillo por kg de caucho base la mezcla perdía cohesión, pasando de ser una masa continua a una masa desintegrada difícil de maquinar. Superando los 4,5 kg de polverino las probetas vulcanizadas se rompían fácilmente al estirarlas con la mano. Por estos motivos se decidió emplear 3 kg de material recuperado por kg de caucho base en las mezclas.

En las pruebas con caucho natural se emplearon mezclas base de distintas durezas:

- Con una mezcla base de 42 Shore A se observó que al incorporar el material recuperado de Todos Retenes la dureza aumentó levemente.
- Con una mezcla base de 65 Shore A se observó que al incorporar el material recuperado de Todos Retenes la dureza disminuyó.
- Con una mezcla base de 50 Shore A se observó que al incorporar el material recuperado de Dayco la dureza aumentó notablemente. Además se pudo apreciar que la vulcanización se retardó, es decir que aumentó el tiempo de vulcanizado, superando los 6 minutos utilizados para vulcanizar las probetas anteriores.

De lo anterior se puede inferir que el polverino afecta la dureza de la mezcla final y que incluso puede afectar la vulcanización, situación que hay que tener en cuenta a la hora de la formulación de las mezclas.

Es notable y negativo el efecto que produjo el polverino de Dayco en la dureza alcanzada ya que se supone necesario obtener un producto de baja dureza para absorber un impacto y amortiguar una posible caída.

La prueba siguiente consistió en mezclar 2 kg de caucho bruto de dureza 50 Shore A con 5 kg de polverino proveniente de Dayco y 2,5 kg de aceite aromático. La incorporación de dicho aceite se realizó con el fin de disminuir la dureza final obtenida. Se advirtió nuevamente el problema de la vulcanización retardada y el material se adhirió levemente a la matriz. Por estas razones se agregó una cantidad adicional de acelerantes en la mezcla (20 g de TMTD y 40 g de azufre) y se empleó desmoldante. Con estas modificaciones el material vulcanizó correctamente y se alcanzó una dureza final de 50 Shore A.

Teniendo en cuenta lo anterior se formuló una mezcla base definitiva con mayor cantidad de aceite y de acelerante. La fórmula se detalla en la **Tabla X**. Esta mezcla base arrojó una dureza de 45 Shore A.

La mezcla de 1 kg de esta base y 3 kg de polverino proveniente de Dayco produce un material de 60 Shore A; por tal motivo se agregó 1 kg de aceite extra a la mezcla y se obtuvo un producto de 40 Shore A.

Tabla X. Fórmula caucho base

Código	Nombre Material	Cantidad (g)
C01	Caucho Natural	3000
X05	Óxido de Zinc	150
X25	Estearato de Zinc	36
X21	Resina WW	90
X13	Santoflex 13	60
X43	TMQ HS	45
X31	Negro de Humo MT	1200
X17	Aceite Aromático	750
X01	Azufre	105
X02	MBTS	45
X03	TMTD	60

La formulación empleada para la capa superficial protectora se detalla en la **Tabla XI**. Como ya se mencionó, se utiliza EPDM por sus conocidas propiedades de resistencia al envejecimiento en intemperie. Además, se aprovechó esta capa para proporcionar color a las baldosas.

Tabla XI. Fórmula caucho capa superficial

Código	Nombre Material	Cantidad (g)
C05	Caucho EPDM	10000
X05	Óxido de Zinc	250
X25	Estearato de Zinc	50
X28	Sílice	1000
X34	Carbonato de Calcio	2000
X18	Aceite Parafínico	4000
X23	Resina líquida	160
S/N	Colorante	150
X01	Azufre	150
X02	MBTS	90
X03	TMTD	90

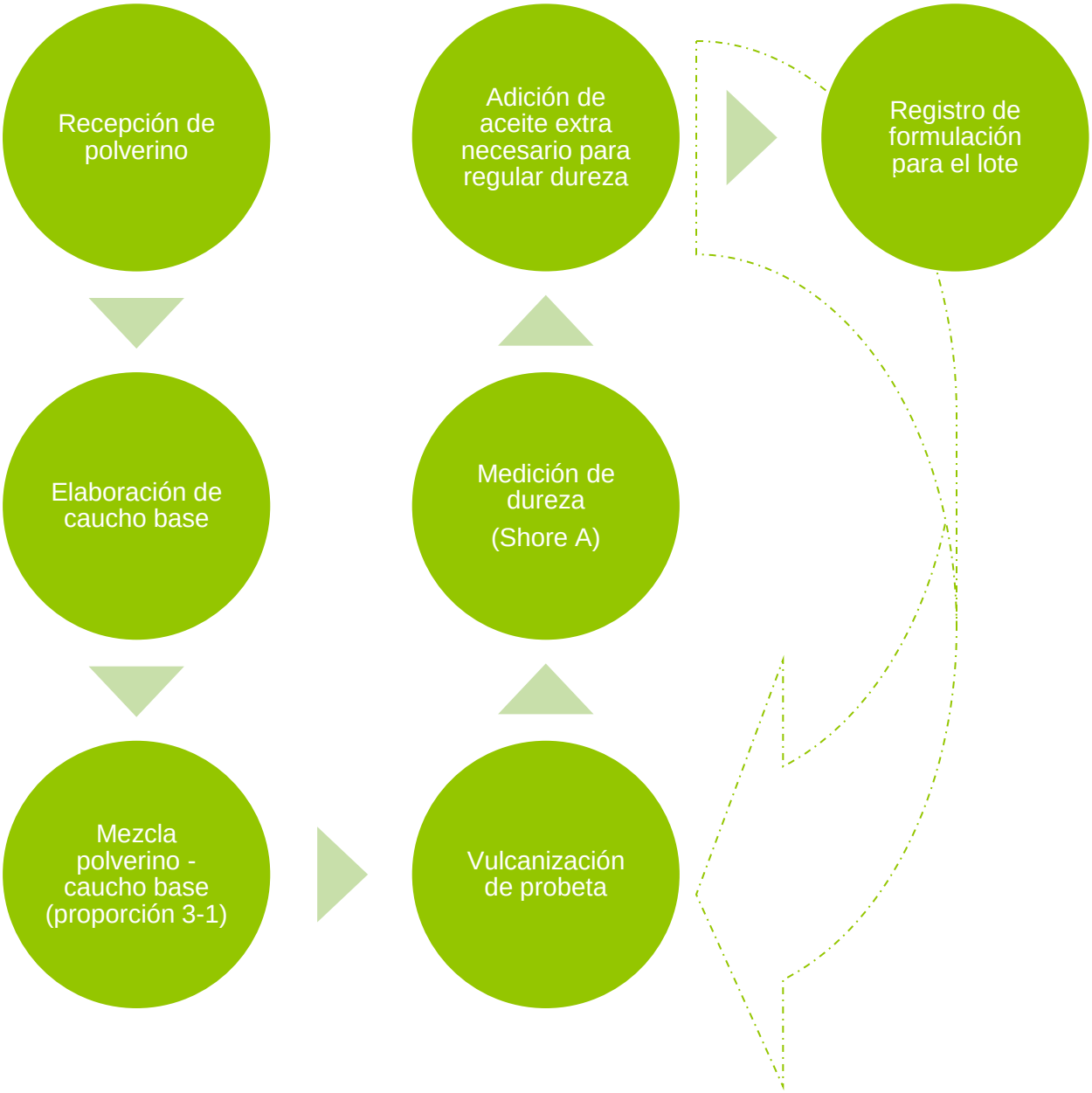
En un primer momento se utilizó DOP para la fabricación de la capa protectora, pero al ver que el mismo era exudado durante varios días posteriores a la vulcanización se optó por reemplazarlo por el aceite parafínico. La utilización de dicho aceite fue satisfactoria ya que se eliminó el exudado superficial.

5.3. CONCLUSIONES

Resumiendo, se eligió caucho natural como base para las mezclas con polverino debido a su bajo costo y mayor admisión de carga. La relación másica polverino – caucho base escogida fue de 3 a 1.

Otro punto importante a destacar es el diseño en bicapa, por el que se optó para proteger el material regenerado contra el envejecimiento a la intemperie mediante una fina capa superior de EPDM. A su vez esto permite disponer de alternativas de color para mejorar la aceptación visual de las baldosas.

Por último, cabe aclarar que la relación entre caucho base, polverino y aceite se modificarán según las propiedades del lote de polverino que se disponga, debido a que el mismo no es estable en el tiempo en cuanto a composición y dureza, afectando las propiedades finales de la mezcla. El procedimiento a seguir una vez recibido el lote de polverino sería el siguiente:



6. PRODUCCIÓN DE BALDOSAS

En la **Figura 13** se presenta el diagrama del proceso completo para la producción de baldosas a partir de caucho regenerado.

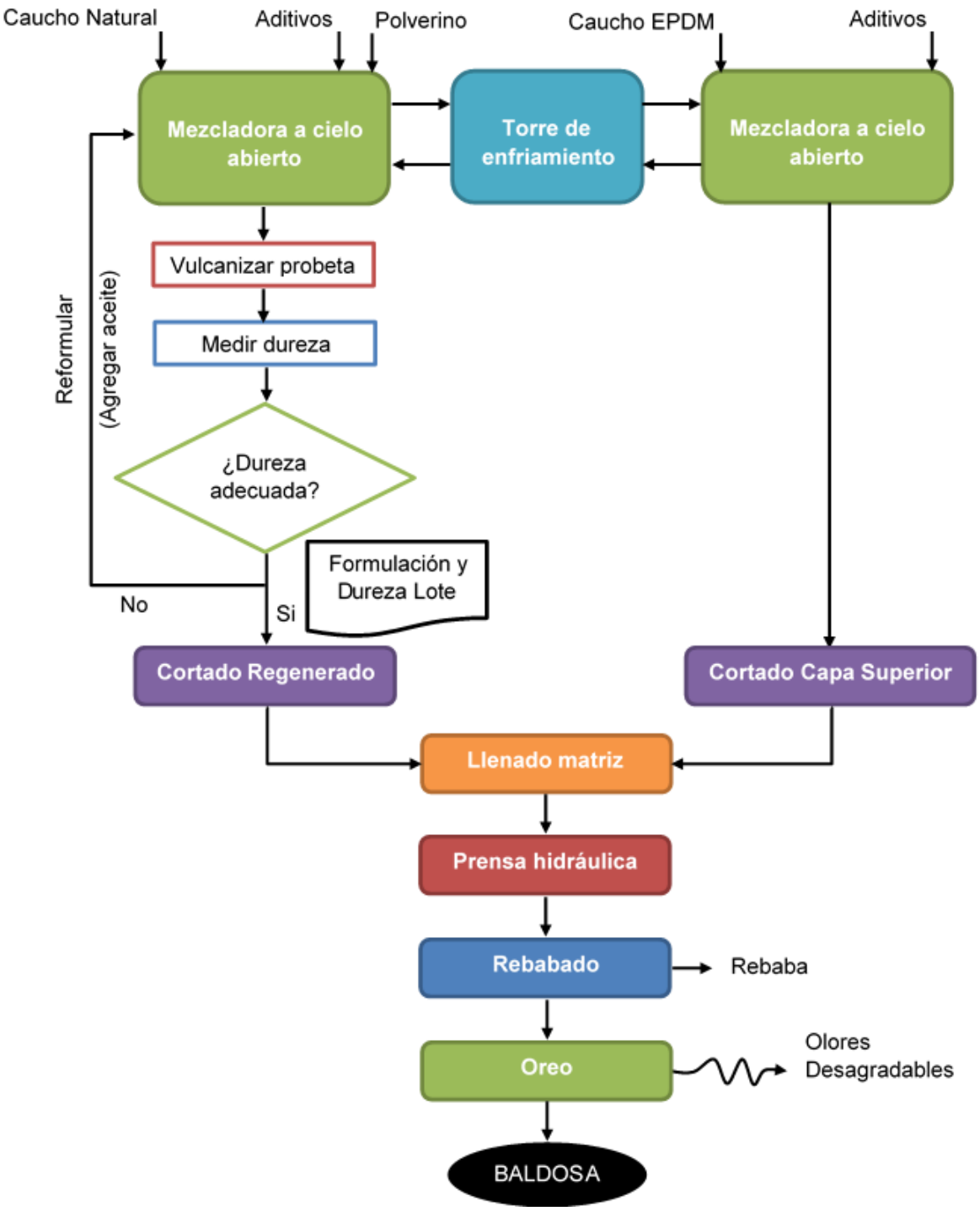


Figura 13. Diagrama de flujo del proceso productivo

6.1. MATRIZ

Para la fabricación del molde se empleó un diseño básico con el fin de reducir los costos de materiales y horas de trabajo. Dicho diseño permitió la obtención de baldosas lisas sin encastres para lograr una menor incertidumbre en los resultados de los ensayos de impacto. En un futuro diseño se pretenden incorporar aspectos como: textura superficial, laterales encastrables y ranuras inferiores de desagüe.

Los materiales empleados para la elaboración de la matriz fueron dos placas de acero de 800 x 800 mm y 2 mm de espesor y cuatro planchuelas de acero de 15 mm de espesor dispuestas como se muestra en la **Figura 14**. Estas planchuelas se soldaron a una de las placas, mientras que la otra se utilizó como tapa.

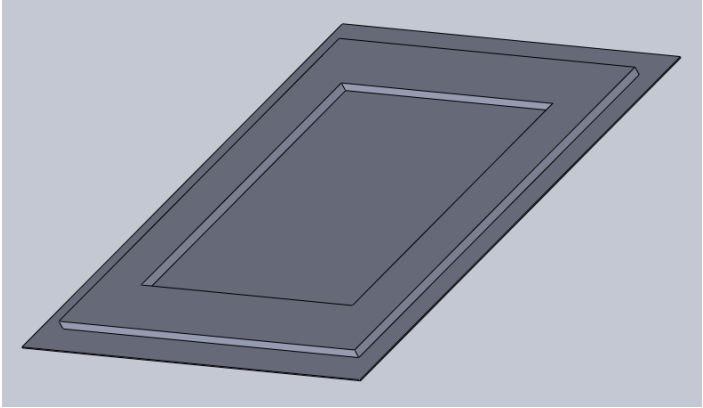


Figura 14. Esquema matriz

Las dimensiones de la baldosa se escogieron de 500 x 500 mm para cumplir con las especificaciones 4.4.1.4, 4.5.2.2 y 4.5.3.1.1 de la norma UNE-EN 1177. En cuanto al espesor se optó por 15 mm dado a que las baldosas alternativas disponibles en el mercado rondan esos valores.

6.2. MEZCLADO

El primer paso es introducir el caucho natural en la mezcladora (**Figura 15**), el cual se deja maquinar durante unos 5 minutos para reducir su viscosidad y facilitar la incorporación del resto de los ingredientes. Normalmente este paso se realiza junto a la adición de un óxido metálico, que funciona como activador de los acelerantes, y de un ácido graso que sirve para solubilizar al óxido metálico.

Figura 15. Mezcladora de caucho

Posteriormente se incorporan la resina, los antioxidantes, el negro de humo y el aceite aromático, etapa que suele durar unos 20 minutos para lograr una homogenización adecuada. El producto final de esta mezcla es lo que llamamos mezcla base.

El siguiente paso es agregar una cantidad extra de aceite aromático junto con el polverino en las cantidades establecidas. Este aceite extra incorporado sirve para reducir la dureza del producto final vulcanizado. Esta etapa es muy lenta y puede durar unos 40 minutos. Todos los tiempos mencionados son para una mezcla equivalente que se inicia con 3 kg de caucho natural. Cabe aclarar que la adición de cantidades crecientes de aceite extra para reducir la dureza del producto final, trae aparejado algunos inconvenientes como dificultar y prolongar el tiempo de mezclado y reducir la cohesión de la mezcla final dificultando su manejo.

El producto final de esta última etapa se lamina a un espesor de 18 mm cuando se retira de la mezcladora. Al colocarlo en la mesa se aprovecha para cortar los cuadrados o preformas que se introducirán en la matriz para su posterior vulcanización.

Se utilizaron tres mezclas finales para producir baldosas cuyas proporciones se variaron como sigue y se identificaron con distintos colores en la capa de protección superficial:

Mezcla 1 (Azul): 1 kg de caucho base, 1 kg de aceite aromático y 3 kg de polverino proveniente de Dayco.

Mezcla 2 (Rojo): 1 kg de caucho base, 0,5 kg de aceite aromático y 3 kg de polverino proveniente de Todos Retenes.

Mezcla 3 (Rosa): 1 kg de caucho base, 1,5 kg de aceite aromático y 3 kg de polverino proveniente de Dayco.

6.3. PRENSADO

Como primer paso se coloca el molde en la prensa (**Figura 16**) para su precalentado. Posteriormente se introduce la preforma dentro de dicho molde, se pincela con un adhesivo especial y se coloca sobre ella una lámina de 1 mm de espesor de una capa protectora. Se cierra el molde con la placa de acero utilizada como tapa y se procede a su prensado. Aquí se utiliza una presión 20 MPa y una temperatura de 160°C. El tiempo empleado para la vulcanización de las baldosas es de 15 minutos.

Figura 16. Prensa hidráulica

Las durezas aproximadas que se obtuvieron en las caras supriores de las baldosas según las tres mezclas empleadas para su producción fueron:

- Baldosa Azul: 45 Shore A
- Baldosa Roja: 45 Shore A
- Baldosa Rosa: 35 Shore A

Figura 17. Diferentes baldosas producidas

7. ENSAYO DE IMPACTO: DETERMINACIÓN DE LA ALTURA DE CAÍDA CRÍTICA

7.1. MATERIALES Y MÉTODOS

Se determinó la altura de caída crítica según la Norma UNE-EN 1177:2008. Las probetas sometidas al ensayo se golpearon con una cabeza-maniquí en una serie determinada de impactos desde diferentes alturas de caída. Dichas alturas se consiguieron mediante la utilización de un malacate sujeto al techo del laboratorio, una cinta métrica y una cuerda para amarrar el proyectil. Se procesaron las señales emitidas durante cada impacto por un acelerómetro (Endevco 5000 G) montado sobre la cabeza-maniquí para obtener, a partir de los valores medidos de la energía de cada impacto, un nivel de gravedad que se define como criterio de lesión en cabeza (HIC). Se realizó sólo un impacto por altura de caída debido a una cuestión de disponibilidad de recursos, excepto en los casos donde fue necesario repetir la medición.

Se representaron gráficamente los valores de HIC obtenidos en cada impacto y se calculó la altura de caída crítica, que corresponde a la altura de caída más baja que produce un valor de HIC de 1000.

Como se mencionó, el dispositivo de ensayo consiste en una cabeza-maniquí con un acelerómetro triaxial acoplado en el centro de gravedad. La cabeza-maniquí consiste en una hemiesfera de aluminio cuyo diseño puede observarse en la **Figura 18**. Dicho proyectil tiene una masa aproximada de 4,6 kg.

Figura 18. Hemiesfera de aluminio y acelerómetro

El equipo para la medición de impactos es un sistema compuesto por el acelerómetro, un dispositivo de registro y un programa de cálculo de HIC. Este sistema es capaz de medir, registrar y mostrar la aceleración y el tiempo de duración de cada impacto completo.

Para los ensayos se colocaron cuatro baldosas de 500 x 500 mm tal que las dimensiones totales del arreglo fueran de 1 x 1 m sobre un soporte rígido y plano. (**Figura 19**)

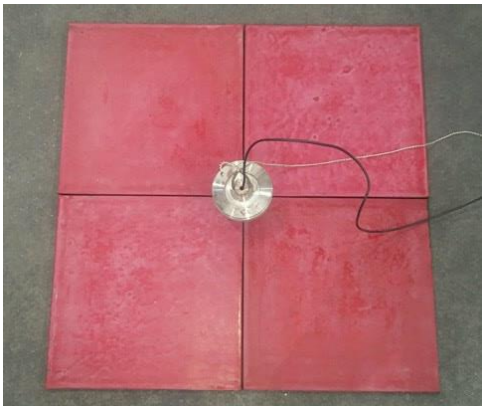


Figura 19. Arreglo de baldosas para el ensayo

Se realizaron ensayos de caída en distintas posiciones sobre las probetas. Cada ensayo de caída constó de al menos cuatro alturas de caída diferentes. Las posiciones elegidas, ilustradas en la **Figura 20**, fueron las siguientes:

- En el centro de una baldosa.
- En la unión de dos baldosas adyacentes.
- En la unión de cuatro baldosas.

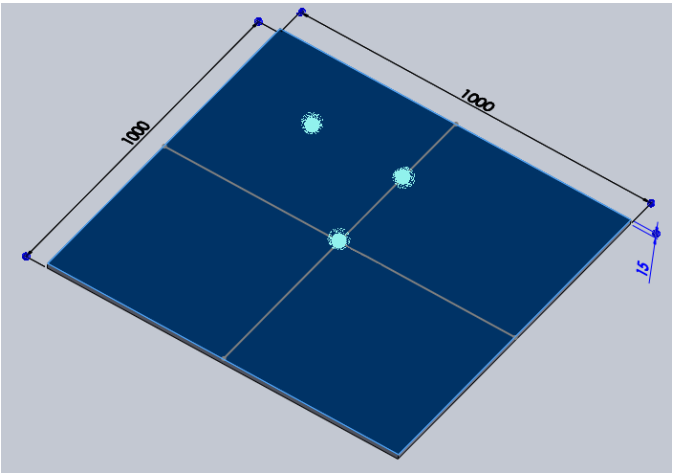


Figura 20. Zonas de impacto en el arreglo

Se calculó el criterio de lesión en cabeza (HIC) para cada curva aceleración – tiempo según la fórmula:

$$HIC = \left[\left(\frac{\int_1^2 a\ x\ dt}{t_2 - t_1}\right)^{2,5} x\ (t_2 - t_1)\right] máx.$$

Para todos los intervalos de tiempo [t_1,t_2] con una frecuencia de 10 kHz, entre t_{inicio} y t_{final} donde,

t_{inicio} Tiempo al principio del impacto donde la aceleración de la cabeza-maniquí es igual o superior a cero.

t_{final} Tiempo al final del impacto donde la aceleración de la cabeza-maniquí es por primera vez igual o inferior a cero.

a Aceleración que experimenta la cabeza-maniquí expresada en G.

t_1,t_2 Son dos de los valores intermedios de t entre t_{inicio} y t_{final}

Este procedimiento únicamente es válido para los impactos con una duración superior a 3 ms, esto es (t2 – t1) ≥ 3 ms, como puede verse en la **Figura 21**. Para el cálculo los tiempos se expresan en segundos. (37)

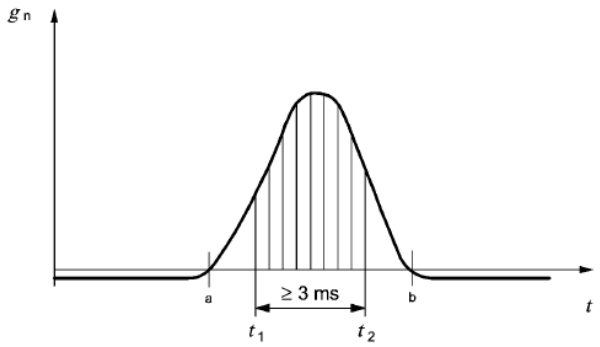


Figura 21. Curva típica de impacto

Por último, se seleccionó la altura de caída más baja equivalente a un índice HIC de 1000 conseguida durante cualquiera de los ensayos de caída realizados, utilizando mediciones de impacto con al menos dos valores con un índice HIC por debajo y al menos dos valores con un índice HIC por encima de 1000. Dos de las alturas de caída deben estar dentro de los 500 mm por debajo de la altura de caída crítica y otras dos dentro de los 500 mm por encima de la altura de caída crítica. Lo anterior se ilustra en la **Figura 22**.

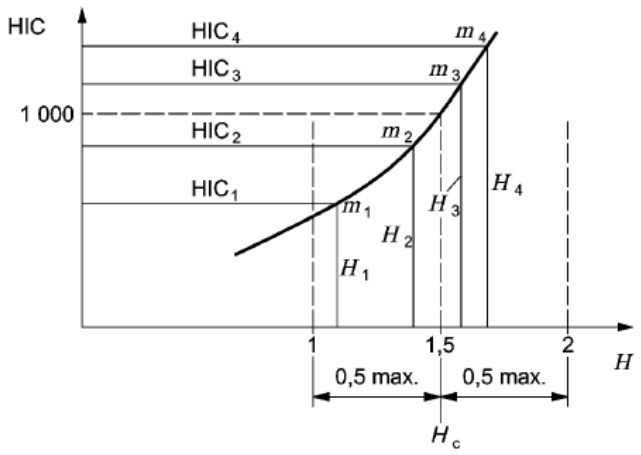


Figura 22. Gráfica típica HIC vs altura de caída

7.2.RESULTADOS Y ANÁLISIS

7.2.1. ENSAYO BALDOSA ROSA

A través de ensayos preliminares se determinó que las placas cuya capa protectora es de color rosa, es decir las placas de menor dureza obtenidas, serían más adecuadas para la protección de superficie. Por esta razón, a estas baldosas se les realizó un ensayo completo en todas las posiciones. Además, según los valores registrados, se determinó que el acelerómetro disponible más adecuado para el ensayo fue el Endevco 5000 G.

En la **Figura 23** se observa una curva tipo de un ensayo de impacto. Esta curva pertenece a un test realizado con el acelerómetro antes mencionado en la unión de cuatro baldosas rosas desde una altura de 0,75 metros. Todos los ensayos se realizaron a 25°C.

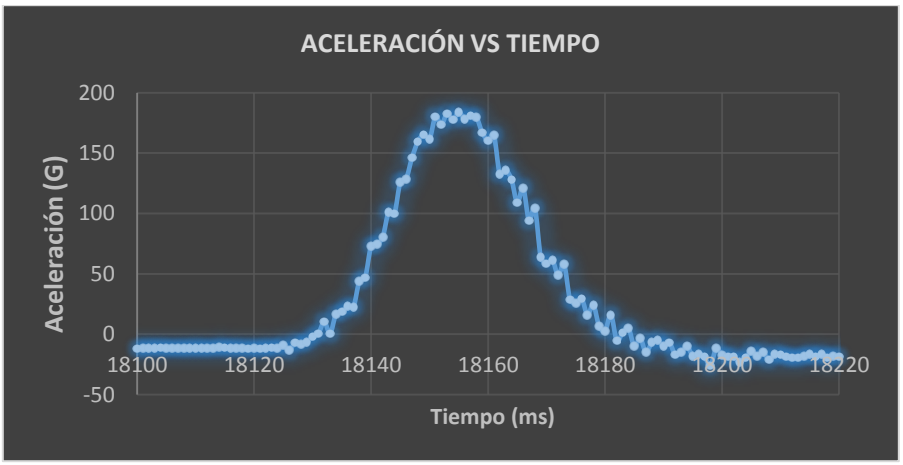


Figura 23. Gráfico obtenido en ensayo de impacto

En la **Tabla XII** se pueden observar los datos obtenidos de HIC y altura de caída crítica de acuerdo a la posición y las alturas de impacto utilizadas en el ensayo. Dichos datos se ilustran en la **Figura 24**. Se realizaron regresiones exponenciales de los datos HIC en función de las alturas de caída en cada posición y se utilizaron las expresiones obtenidas para calcular las alturas de caída crítica, es decir las alturas de caída correspondientes a un HIC de 1000.

Tabla XII. Altura de caída crítica de baldosa rosa

Posición de Impacto	Altura de Impacto (m)	HIC	Altura de Caída Crítica
Unión 4 placas	0,6	289,060	1,10
	0,75	334,748	
	1	944,594	
	1,25	1288,902	
	1,5	3327,576	
Unión 2 placas	0,5	295,974	0,97
	0,75	514,499	
	1	1357,857	
	1,25	1840,330	
	1,5	1955,072	
Centro 1 placa	0,5	155,172	1,16
	1	666,736	
	1,25	1140,245	
	1,5	2755,539	

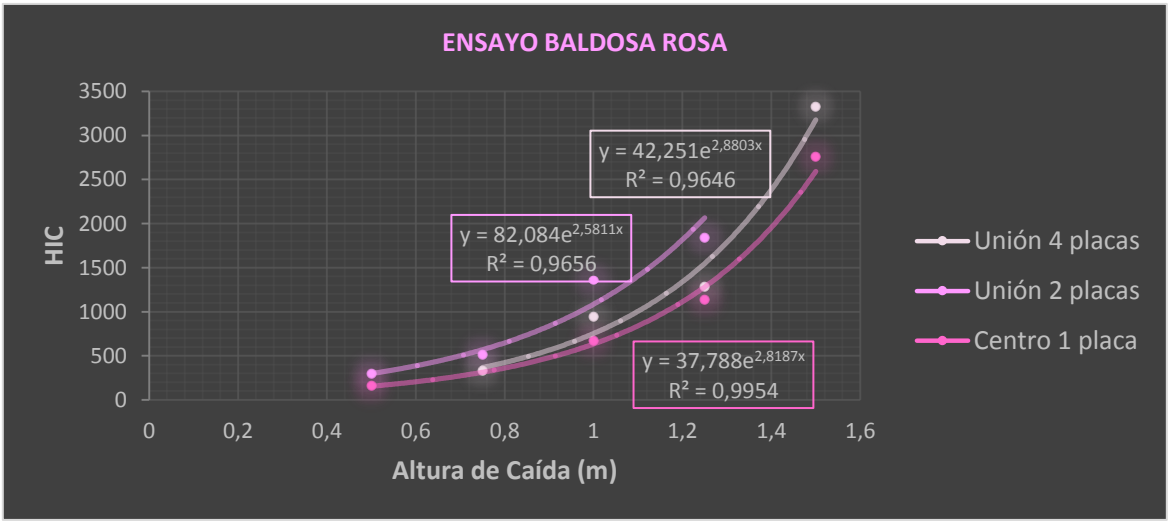


Figura 24. Gráfico HIC vs Altura de Caída en baldosa rosa

El resultado del ensayo fue una altura de caída crítica para el material de 0,97 metros, por ser la menor altura crítica obtenida en las posiciones de impacto. Como puede observarse, esta altura pertenece a los impactos ubicados en la unión de dos baldosas adyacentes.

7.2.2. INFLUENCIA DE LA DUREZA EN EL IMPACTO

Por ser este un ensayo comparativo solo se realizaron impactos en el centro de las baldosas roja y azul. En la **Tabla XIII** se pueden ver los valores de HIC correspondientes a las distintas alturas de impacto empleadas y en la **Figura 25** se ilustran dichos datos y se comparan a su vez con sus homónimos de las baldosas rosas.

Tabla XIII. HIC de baldosas azul y roja

Posición de Impacto	Altura de Impacto (m)	HIC
Centro placa Azul	0,5	268,45
	0,75	542,06
	1	889,21
	1,25	1903,14
Centro placa Roja	0,5	225,17
	0,75	503,64
	1	821,88
	1,25	1949,75

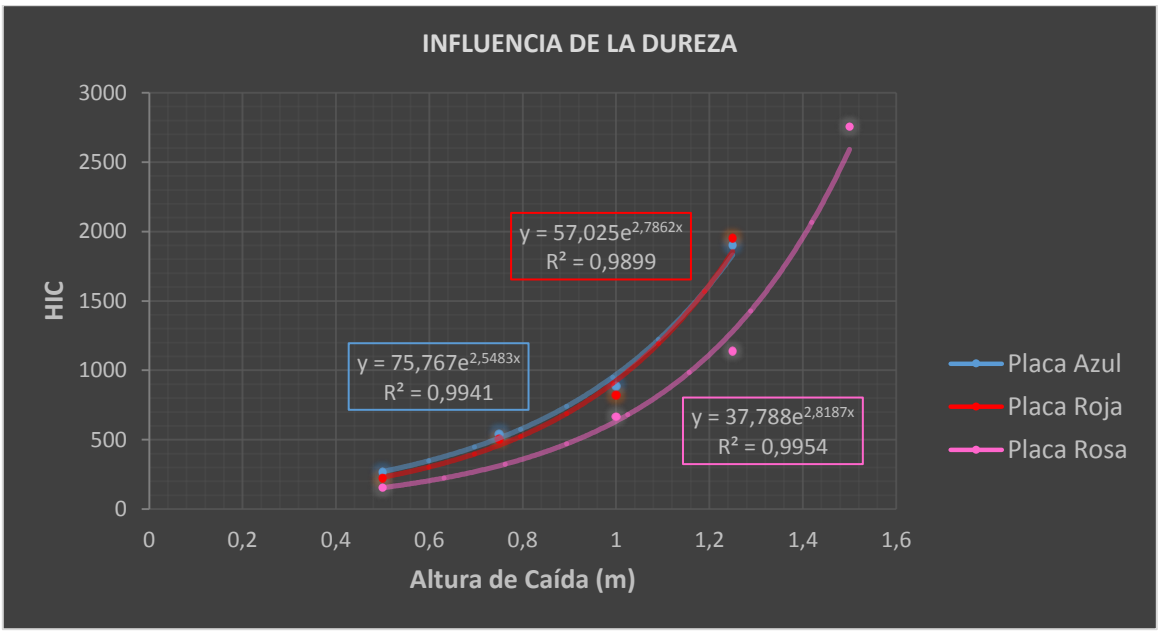


Figura 25. Gráfico HIC vs Altura de Caída para diferentes durezas

Se observa que los valores de HIC obtenidos para las baldosas roja y azul son muy similares entre sí. Esto demuestra que la dureza es quien define los resultados de un ensayo, dado que en este caso ambas poseen la misma, sin importar la composición que tenga el material (proporciones polverino y aceite extra).

Por otro lado se observa que los valores de HIC de las baldosas rosas son comparativamente menores a los índices de las baldosas rojas o azules para las mismas alturas. Esto indica que a menor dureza se obtienen mayores alturas de caída crítica, situación que favorece el desempeño del material.

7.2.3. INFLUENCIA DEL ESPESOR EN EL IMPACTO

En este caso se empleó una baldosa cuyas dimensiones eran 300 x 300 x 30 mm, con la misma composición de la baldosa rosa pero sin capa superficial protectora y sólo se hicieron ensayos en el centro de la misma. En la **Tabla XIV** se observan los valores de HIC obtenidos según las alturas de ensayo empleadas.

Tabla XIV. HIC de baldosa gruesa

Posición de Impacto	Altura de Impacto (m)	HIC
Centro placa gruesa	0,5	148,58
	0,75	207,83
	1	495,28
	1,25	552,83
	1,5	1207,03
	1,75	1721,89

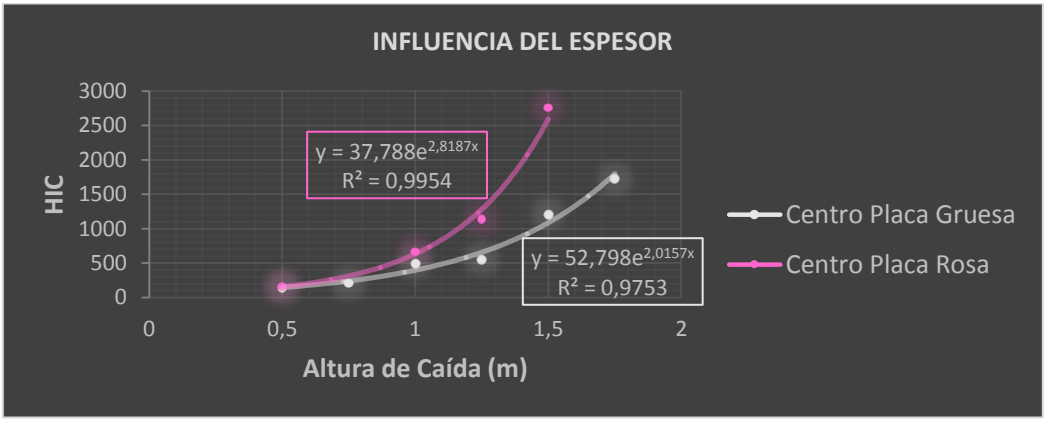


Figura 26. Gráfico HIC vs Altura de Caída para diferentes espesores

En la **Figura 26** se ilustran los valores de HIC en función de las alturas de caída y puede observarse que aumentando el grosor de las baldosas se pueden obtener valores de HIC cada vez menores, lo que resulta en un incremento en la altura de caída crítica y un mejor desempeño del material.

Un aspecto para tener en cuenta es que al vulcanizar la baldosa de mayor grosor se produjo una falla interna en la cohesión del material, lo que generó una gran oclusión de gas en la zona media de la pieza. Por esta razón debería solucionarse este inconveniente si se desea producir baldosas de mayor espesor. Algunos aspectos que pueden considerarse son: sistema de vulcanización (acelerantes), tiempo de vulcanizado, presión y temperatura de vulcanizado.

7.3.CONCLUSIÓN

La altura de caída crítica para una baldosa de 15 mm de espesor y 35 Shore A de dureza es de 0,97 metros. Según Serrano Ortiz en su “Análisis de la evolución natural de la propiedad de amortiguación de impactos en pavimentos de seguridad de caucho reciclado para parques infantiles” (37), el césped o sustrato natural posee una ACC menor o igual a 1 metro. Si bien el valor alcanzado para la baldosa es similar, la utilización de este pavimento presenta una serie de ventajas no menores frente al césped:

- ✓ Las baldosas no requieren tanto mantenimiento, el césped debe ser cortado y rastrillado.
- ✓ Las baldosas son más limpias y no manchan la ropa.
- ✓ En zonas de alto tránsito el pasto no sobrevive, dejando a la tierra sin cobertura y compactada. En dichas zonas se reduce la absorción de impactos y se generan charcos en días de lluvia.
- ✓ Las baldosas resultan más fáciles de inspeccionar, con lo cual es más factible detectar elementos peligrosos como elementos cortantes o insectos.
- ✓ Las baldosas mantienen sus propiedades en las distintas épocas del año.

Se concluye además que la altura de caída crítica para una baldosa de caucho regenerado es dependiente de la dureza y del espesor e independiente de la composición. Por lo tanto, con asegurar una determinada dureza para un lote de producción y fijar un espesor determinado, se debería obtener una altura de caída crítica definida, independientemente de las características del lote de polverino con el que se esté trabajando.

8. ENSAYOS COMPLEMENTARIOS

8.1. EVALUACIÓN DE HOMOGENEIDAD EN LA MEZCLA

Con motivo de evaluar la eficacia en el mezclado del caucho regenerado debido a la incorporación de grades volúmenes de polverino y a que el mismo evidenció previamente tendencias a aglomerarse, se procedió a dividir la superficie inferior de una baldosa vulcanizada en 25 partes iguales. (**Figura 27**)

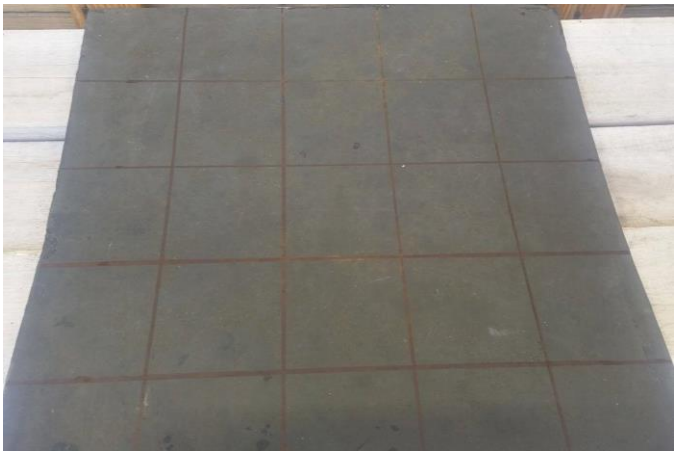


Figura 27. Baldosa cuadriculada para medición de dureza

Una vez trazada la cuadrícula se realizaron mediciones de dureza en cada sección demarcada, obteniendo los siguientes valores (**Figura 28**):

40	39	40	41	43
41	41	40	44	43
40	41	45	45	42
41	41	42	44	42
40	43	42	41	42

Figura 28. Durezas medidas en cada cuadrícula

Los colores aumentan su intensidad al aumentar la dureza para una visualización más clara. Con los datos obtenidos se realizó un gráfico de distribución de frecuencia (**Figura 29**) con una media de 41,7 Shore A y una desviación estándar de 1,62.

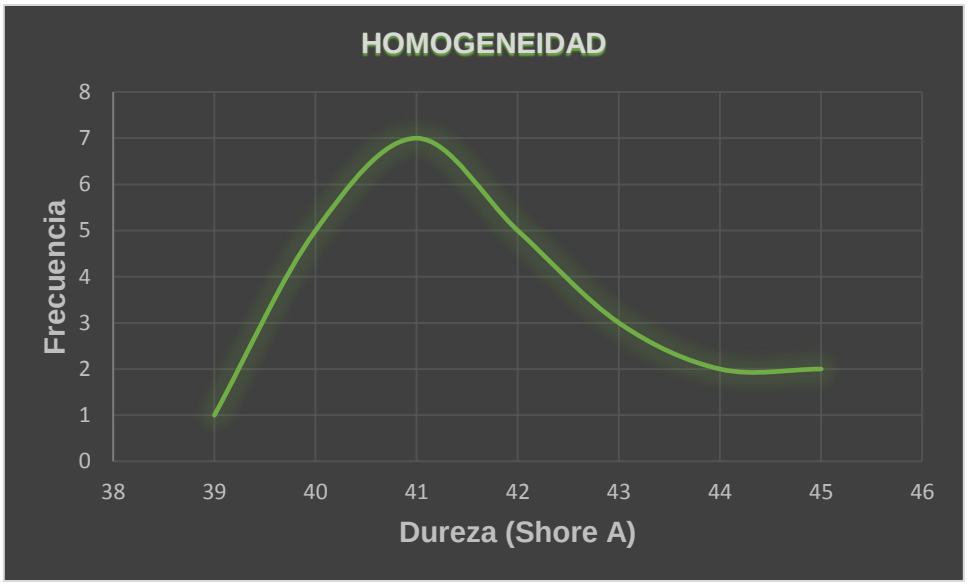


Figura 29. Distribución de frecuencia de durezas medidas

Posteriormente se realizó un análisis estadístico de varianza, ANOVA (por sus siglas en inglés), y se pudo determinar que la variación en las mediciones se debe al azar y no a una pobre homogeneización del material, lo que indica que la integración del polverino en la mezcla es eficaz. Ver anexo 13.2.

8.2. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA ABRASIÓN

8.2.1. MATERIALES Y MÉTODOS

Se determinó la resistencia a la abrasión expresada como pérdida de masa mediante un dispositivo giratorio, utilizando la Norma IRAM 113130 como base.

El equipo utilizado para este ensayo consistió en un cilindro montado sobre un torno donde se adhirió un abrasivo y un dispositivo pivotante montado sobre la torre de dicho torno. Sobre el brazo pivote se sostuvo el porta muestra, la muestra respectiva y las pesas que se emplearon para cargar el sistema.

El método consistió en someter una de las superficies planas de una probeta de caucho de forma cilíndrica a la acción de desgaste de un abrasivo adherido al tambor giratorio.

Las dimensiones de las probetas fueron 25 mm de diámetro y 20 mm de altura y se obtuvieron por moldeo en prensa. El abrasivo que se empleó fue una lija al agua Doble A®, código AX-51 y grano 240, cuyo respaldo es papel impermeable y el mineral es óxido de aluminio. El tambor giratorio junto con el papel abrasivo constituyeron un diámetro de 77 mm. (**Figura 30**)

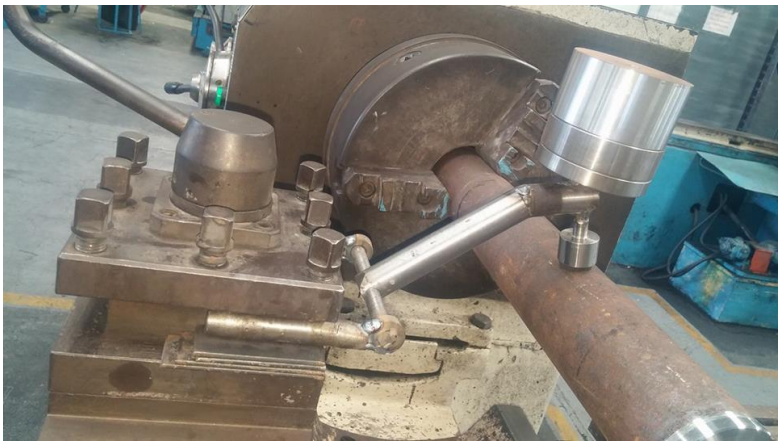


Figura 30. Equipo para medición de desgaste

Se fabricaron probetas con caucho base, caucho regenerado y EPDM, con el fin de comparar sus resistencias a la abrasión. Antes de iniciar cada ensayo se limpió todo residuo de material que el papel abrasivo pudiera contener.

El procedimiento empleado para los ensayos fue el siguiente:

1. Se pesó la probeta antes de someterla al desgaste.
2. Se colocó la probeta en el portaprobeta.
3. Se colocaron las pesas sobre el dispositivo (3,5 kg).
4. Se activó el movimiento del cilindro.
5. Se ubicó la probeta sobre el abrasivo.
6. La corrida de ensayo se detuvo manualmente a los 71 segundos, lo que equivale a una distancia aproximada de 40 metros con una velocidad de giro de 140 vueltas por minuto.
7. Se pesó la probeta luego de someterla al desgaste.

Con los datos recogidos se calculó la pérdida de masa porcentual de la siguiente manera:

$$\Delta M\% = \frac{M_i - M_f}{M_i} x\ 100$$

Siendo:

$\Delta M\%$ Pérdida de masa porcentual

M_i Masa inicial

M_f Masa final

8.2.2. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la **Tabla XV** figura la masa promedio y el porcentaje de pérdida obtenido para cada tipo de probeta. Los ensayos se hicieron por duplicado.

Tabla XV. Pérdida de masa para cauchos base, regenerado y EPDM

	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Pérdida de masa (%)
Caucho Base	10,750	10,115	5,9
Caucho Regenerado	10,819	9,586	11,4
EPDM	10,222	9,500	7,1

Es notorio que el caucho base posee una mayor resistencia a la abrasión que el caucho regenerado y el EPDM utilizado en la capa superficial protectora de las baldosas. Si se comparan los desgastes sufridos por el caucho regenerado y el EPDM, se puede ver que la capa superficial ofrece protección adicional contra la abrasión.

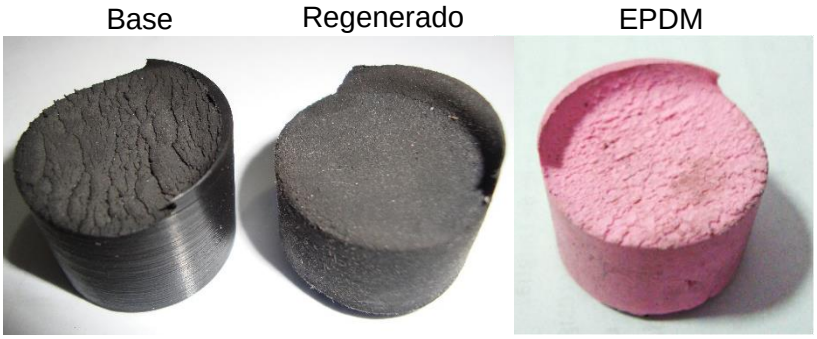


Figura 31. Probetas sometidas a desgaste

En las **Figuras 31 y 32** pueden observarse las diferencias en el desgaste y en el residuo producido entre el caucho regenerado, el caucho base y el EPDM.

Figura 32. Comparación de desgaste entre el Caucho Base y el Caucho Regenerado

8.3. DETERMINACIÓN DE LA DEFORMACIÓN PERMANENTE POR COMPRESIÓN

8.3.1. MATERIALES Y MÉTODOS

Se determinó la deformación permanente por compresión a deformación constante en base a la norma IRAM 113010. Se ensayaron las probetas de cada muestra por triplicado. Las mismas se obtuvieron por moldeado con las siguientes dimensiones: 29,0 ± 0,5 mm de diámetro y 12,5 ± 0,5 mm de espesor.

Para los propósitos del ensayo, las probetas fueron ensayadas dentro de un periodo de tiempo específico que fue desde las 16 horas como mínimo hasta las 4 semanas como máximo, contando desde la formación de las mismas.

El aparato de compresión utilizado se ilustra en la **Figura 33** y consiste de dos platos de acero abulonados de suficiente espesor para que no flexionen ni se deformen. Sus superficies de trabajo son cromadas y pulidas y se mantuvieron limpias y secas durante los ensayos. Se utilizaron espaciadores de acero de 9,5 ± 0,02 mm de espesor al comprimir las probetas.

Figura 33. Aparato utilizado para la compresión

Inicialmente se midió el espesor original de las probetas con un calibre digital. Se dispusieron las probetas sobre el plato inferior del aparato de compresión y se colocaron los espaciadores, dejando bastante espacio para el ensanche de las probetas durante la compresión (**Figura 34**). Se les colocó un lubricante siliconado a las placas para permitir el deslizamiento de las probetas al comprimirse. Los tornillos fueron apretados de manera que las placas se acercaran uniformemente hasta el contacto con los espaciadores.

Figura 34. Probetas dispuestas para la compresión

Una vez comprimido el conjunto se mantuvo a temperatura ambiente y antes de transcurridas las dos horas se colocó el conjunto en una estufa a 100°C durante 24 horas (**Figura 35**). Estos parámetros se dispusieron por convenio previo dado que se estima que una baldosa puede alcanzar los 60°C en un día de verano durante un periodo de 8 horas. Los valores del ensayo se escogieron superiores para intensificar su efecto.

Figura 35. Probetas comprimidas dentro del horno

Al final del tiempo de exposición se sacó la probeta de la estufa descomprimiéndola inmediatamente y se dejó sobre una superficie de madera durante 30 minutos a temperatura ambiente (25°C).

Por último se midió el espesor de las probetas con un calibre digital. (**Figura 36**)

Figura 36. Calibre digital

Las muestras sometidas a ensayo fueron moldeadas a partir del caucho base y a partir del caucho regenerado correspondiente a las baldosas más blandas obtenidas, es decir, aquellas cuya capa superficial protectora fue de color rosa. Cabe aclarar que la capa superficial no se somete a ensayo debido a que su influencia en la compresión del producto final se supone despreciable al ser muy pequeño su espesor.

8.3.2. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se determinó la deformación por compresión, expresada como porcentaje de la compresión inicial, aplicando la fórmula siguiente:

$$C_B = \left(\frac{e_0 - e_1}{e_0 - e_S}\right) x\ 100$$

Siendo:

C_B La deformación permanente por compresión, expresada en porcentaje de la compresión inicial.

e_0 El espesor inicial de la probeta, en mm.

e_1 El espesor final de la probeta luego de la recuperación, en mm.

e_s El espesor de los espaciadores, en mm.

Se tabularon los resultados para cada material en la **Tabla XVI**:

Tabla XVI. Deformación permanente por compresión en cauchos base y regenerado

	Espesor inicial (mm)	Espesor final (mm)	C_B
Caucho Base (Muestra 1)	12,43	10,84	54,3
Caucho Base (Muestra 2)	12,43	11,33	37,5
Caucho Base (Muestra 3)	12,43	11,14	**44,0**
Caucho Regenerado (Muestra 1)	12,88	10,58	68,0
Caucho Regenerado (Muestra 2)	13,06	10,75	64,9
Caucho Regenerado (Muestra 3)	13,06	10,75	**64,9**

La deformación permanente por compresión se expresa como la mediana de los resultados obtenidos, corresponde a 44 % para el caucho base y 64,9 % para el caucho regenerado.

Como puede observarse, el caucho base posee una menor deformación permanente por compresión que el caucho regenerado. Por esta razón se podría suponer que aumentando el porcentaje de polverino en la mezcla se disminuye la elasticidad del material resultante.

8.4. ENVEJECIMIENTO

Con motivo de evaluar el envejecimiento del material y su influencia en la capacidad de amortiguación de impacto se colocaron dos baldosas a la intemperie con sus caras protegidas con EPDM hacia arriba. Una se mantuvo 5 meses almacenada y 4 meses en el exterior. Otra estuvo aproximadamente 8 meses almacenada y 2 semanas afuera. También se tomó como referencia una baldosa que se mantuvo almacenada los 9 meses posteriores a su elaboración. En todos los casos la dureza inicial aproximada fue de 45 Shore A, por tratarse de las baldosas fabricadas con la capa protectora superficial azul. Transcurrido los tiempos especificados se midió nuevamente la dureza estática en diferentes zonas relevantes, como se muestra en la **Tabla XVII**:

Tabla XVII. Dureza medida en baldosas expuestas a la intemperie

	Dureza Promedio en Superficie EPDM	Dureza Promedio en Superficie Regenerada	Dureza Promedio en Laterales
9 meses almacenada	48,2	46,6	46,6
2 semanas intemperie	49,2	45,2	46,5
4 meses intemperie	53,0	43,6	47,9

Se observa que la cara expuesta a la radiación solar y demás fenómenos sufrió un aumento en su dureza y una decoloración considerable, como puede evidenciarse en la **Figura 37**.

Figura 37. Baldosas expuestas a la intemperie

Si bien es notorio el cambio de pigmentación que sufrió la baldosa con mayor tiempo de exposición, su superficie se mantuvo íntegra y suave sin rasgos mayores de deterioro (resequedad, opacidad, cuarteamiento, etc). La pérdida de color podría solucionarse utilizando un pigmento alternativo.

En cuanto a la superficie de caucho regenerado y los laterales de las baldosas, se puede ver que el efecto de cambio en su dureza no fue tan marcado debido a su menor exposición. Incluso, en la superficie regenerada se observa un leve descenso de dureza que podría deberse a un efecto combinado de absorción de agua y calentamiento por estar en contacto directo con el suelo.

9. BALANCE DE MASA Y ENERGÍA

9.1. BALANCE DE MASA

A continuación se indican los balances de masa para cada etapa del proceso productivo.

9.1.1. MEZCLADO

En esta etapa se calculan por separado los balances de masa del caucho regenerado y del caucho empleado en la capa superficial. En las **Tablas XVIII y XIX** se calculan las fracciones másicas de cada componente en las mezclas.

CAUCHO REGENERADO

Debido a que, dependiendo de las características del lote de polverino que se utilice varía la cantidad de aceite extra que se incorpora en la etapa final de mezclado, para los cálculos siguientes se tomaron en cuenta las cantidades utilizadas para la producción de las baldosas rosas. Esto es, por cada kg de caucho base tres kg de polverino Dayco y 1,5 kg de aceite aromático.

Tabla XVIII. Fracción másica de componentes del caucho regenerado

Materiales	Cantidad (g)	Fracción Másica
Caucho Natural	3000	0,098
Óxido de Zinc	150	0,005
Estearato de Zinc	36	0,001
Resina WW	90	0,003
Santoflex 13	60	0,002
TMQ HS	45	0,001
Negro de Humo MT	1200	0,039
Aceite Aromático	750	0,025
Azufre	105	0,003
MBTS	45	0,001
TMTD	60	0,002
Polverino	16623	**0,545**
Aceite Aromático Extra	8311,5	0,273
TOTAL	30475,5	1

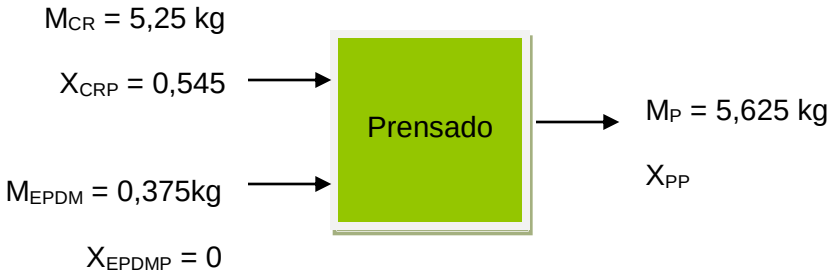
CAPA SUPERFICIAL PROTECTORA (EPDM)

Tabla XIX. Fracción másica de componentes de la capa superficial

Materiales	Cantidad (g)	Fracción Másica
EPDM	10000	0,557
Óxido de Zinc	250	0,014
Estearato de Zinc	50	0,003
Sílice	1000	0,056
Carbonato de Calcio	2000	0,111
Aceite Parafínico	4000	0,223
Resina Líquida	160	0,009
Colorante	150	0,008
Azufre	150	0,008
MBTS	90	0,005
TMTD	90	0,005
TOTAL	17940	1

9.1.2. PRENSADO

Cada baldosa pesa aproximadamente 5,625 kg, de los cuales 375 g corresponden a la capa superficial y 5,25 kg corresponden a caucho regenerado.



Por un balance de masa por componente para el polverino se obtiene la siguiente ecuación, considerando que el polverino no participa en la reacción de vulcanización.

$M_{CR} \times X_{CRP} + M_{EPDM} \times X_{EPDMP} = M_P \times X_{PP}$ Reacomodando, $X_{PP} = \frac{M_{CR} \times X_{RP}}{M_P}$

X_{PP} = 0,51 kg de polverino / kg total de baldosa

Por lo tanto, el 51% de la baldosa terminada corresponde a la masa de polverino utilizada.

9.2. BALANCE DE ENERGÍA

El principio que rige los balances de energía es la ley de la conservación de la energía, que establece que la energía no se crea ni se destruye (excepto en procesos nucleares). En este proyecto se realizan balances de energía en las etapas de mezclado (caucho regenerado) y de prensado. Ambas etapas son en batch. Los sistemas se consideran cerrados y constituidos por la masa de caucho.

El balance integral de un sistema cerrado es:

Energía final del sistema - Energía inicial del sistema = Energía neta transferida al sistema

Considerando a la energía interna (U), la energía cinética (E_C) y la energía potencial (E_P) como las energías del sistema y al calor (Q) junto con el trabajo (W) como las energías transferidas al sistema, se obtiene la siguiente expresión:

$$\Delta U + \Delta E_C + \Delta E_P = Q + W$$

Siendo Q el calor transferido al sistema por los alrededores y W el trabajo realizado por los alrededores al sistema.

Esta expresión, aplicada a las etapas antes mencionadas, se modifica según lo siguiente:

- $\Delta U \neq 0$ por haber cambios de temperatura y, además, reacción química en la etapa de prensado.
- $\Delta E_C = 0$ porque el sistema no se encuentra acelerando ni desacelerando.
- $\Delta E_P = 0$ porque el sistema no asciende ni desciende.
- $Q \neq 0$ porque el sistema no se encuentra aislado.
- $W \neq 0$ porque existen movimiento de partes de los equipos que presionan y mueven los límites del sistema.

9.2.1. MEZCLADO

En la etapa de mezclado (**Figura 38**) la ecuación del balance de energía queda expresada de la siguiente manera:

$$H_F - H_I = Q + W$$

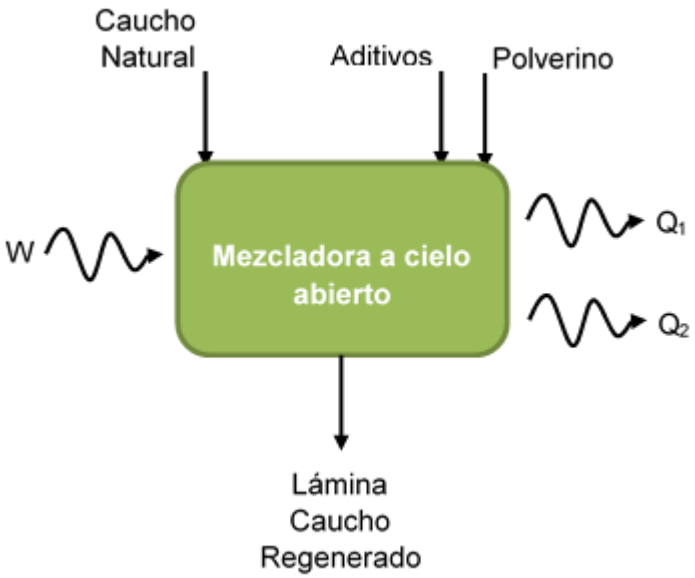


Figura 38. Diagrama etapa de mezclado

La diferencia de entalpía puede enunciarse como sigue, considerando al calor específico del caucho constante al ser el ΔT pequeño:

$$H_F - H_I = M_{caucho}.C_{P\ caucho}.(T_F - T_I)_{caucho}$$

Al calor intercambiado se lo considera como la suma del calor intercambiado con el refrigerante (Q_1) y el calor intercambiado con el ambiente (Q_2).

$$Q = Q_1 + Q_2$$

$$Q_1 = (\dot{m}_{refrigerante}.t_{refrigeración}).C_{P\ agua}.(T_{entrada} - T_{salida})_{agua}$$

Se supuso que la torre de enfriamiento es capaz de mantener constante la temperatura del agua de entrada a la mezcladora. La temperatura de salida del agua se tomó como promedio ya que su variación durante la refrigeración fue sólo de 2°C.

El calor intercambiado con el ambiente (Q_2) se supone despreciable aceptándose el error incorporado por ello, ya que la diferencia de temperatura alcanzada entre el caucho y el ambiente no es considerablemente elevada.

El trabajo efectuado al sistema por el mezclado en sí es el objetivo del cálculo, para luego obtener la eficiencia de la operación.

$$\varepsilon = \frac{W_{teórico}}{W_{real}}$$

$$W_{real} = Potencia.t_{mezclado}$$

Se considera que la potencia del equipo utilizado es de 22 kW. El resto de los datos se observan en la **Tabla XX** y los resultados obtenidos en la **Tabla XXI**.

Tabla XX. Datos para balance de energía en mezclado

T_F caucho	70	°C
T_I caucho	20	°C
C_P caucho	1,1	kJ/kg.°C
M caucho	30,475	kg
T_S agua	26	°C
T_E agua	20	°C
C_P agua	4,186	kJ/kg.°C
$\dot{m}_{refrigerante}$	0,36	kg/s
$t_{refrigeración}$	3600	s
$t_{mezclado}$	3900	s

(38) (39)

Tabla XXI. Resultados BE en mezclado

$H_F - H_I$	1676 kJ
Q_1	- 32550 kJ
$W_{teórico}$	34226 kJ
W_{real}	85800 kJ
ε	**0,4**

Por lo tanto, la eficiencia del equipo de amasado es de 40%.

9.2.2. PRENSADO

Para el balance de energía de la etapa de prensado se considera un sistema cerrado con reacción química exotérmica. Los cálculos se realizan por baldosa y la reacción química de vulcanización es la siguiente (**Figura 39**):

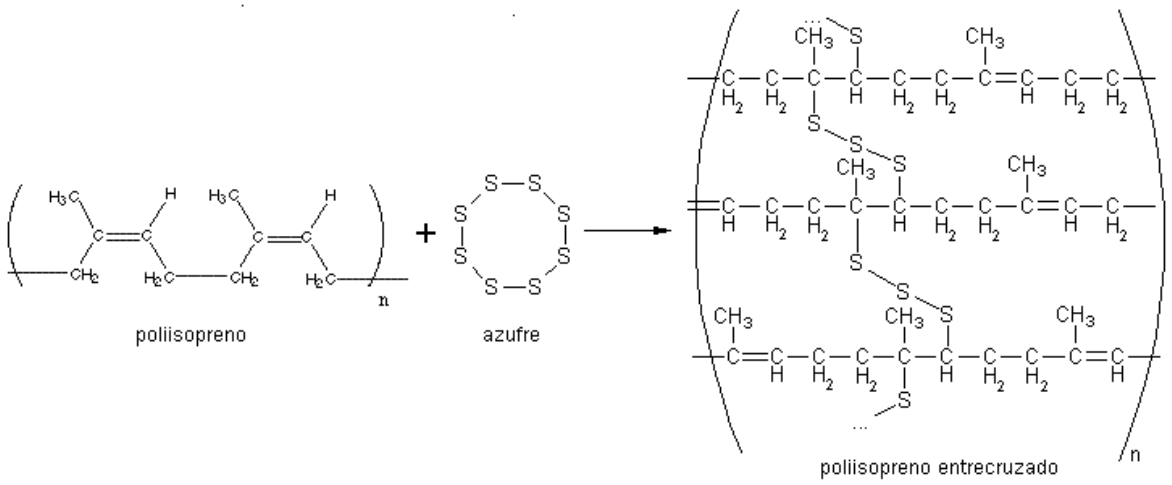


Figura 39. Reacción de vulcanización

Como puede observarse, la estequiometría de la reacción es indefinida y poco se conoce sobre ella. Un elastómero sin vulcanizar tiene pobres propiedades fisicoquímicas, limitando al material para ser aprovechado comercialmente, por lo tanto, el proceso de vulcanización es el que influirá directamente en la resistencia mecánica y térmica del material a partir de la generación de un grado de entrecruzamiento en la estructura del elastómero. Este proceso depende principalmente de la formulación y de las condiciones de temperatura y de tiempo. (40)

Aunque la densidad de entrecruzamiento es variable en cada caso y depende de múltiples factores, Urrego y Álvarez (40) plantean un calor de vulcanización para el caucho natural de 14,44 Joule por gramos de caucho puro. Para este caso se considera válido este valor dado que se estima que las diferencias de composición y variables del proceso no afectan considerablemente el resultado. Aun así, debe tenerse en cuenta que este dato es sólo una aproximación.

En la etapa de prensado (**Figura 40**) la ecuación del balance de energía queda expresada de la siguiente manera:

$$H_F - H_I = -\Delta H_R + Q$$

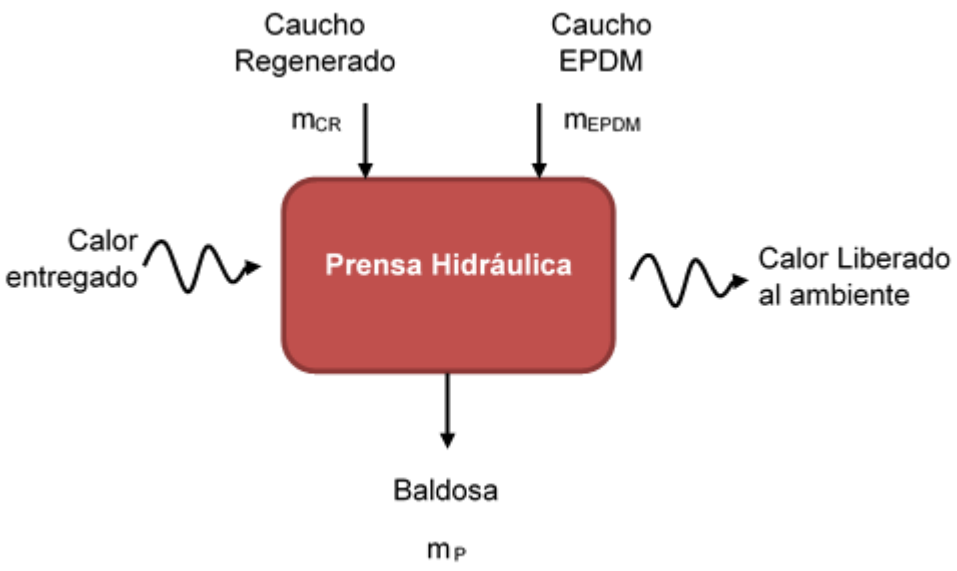


Figura 40. Diagrama etapa de prensado

En la expresión anterior no se incluye el trabajo debido a que no hay cambio de volumen considerable y, una vez que desborda el material excedente y cierra la matriz, no hay movimiento de los límites del sistema.

El calor (Q) es el calor entregado al sistema por los alrededores y representa un calor neto producto de la diferencia entre el calor total generado por las resistencias y el calor perdido hacia el ambiente. Este valor es la incógnita a calcular.

La entalpía de reacción (ΔH_R) se calcula como sigue, siendo M_{NR} la masa de caucho natural virgen en una baldosa, X_{CRNR} la fracción másica de caucho natural en caucho regenerado y M_{CR} la masa de caucho regenerado en una baldosa.

$$\Delta H_R = -14{,}44\ \frac{J}{g}.M_{NR}$$

$$M_{NR} = X_{CRNR}.M_{CR}$$

Por cuestiones de disponibilidad de datos y dado que su influencia en el resultado final no es significativa, no se consideró la reacción de vulcanización del EPDM superficial.

La variación de entalpía en la baldosa se calcula de la siguiente manera:

$$H_F - H_I = (M_{CR}.C_{P\ CR} + M_{EPDM}.C_{P\ EPDM}).(T_F - T_I)_{caucho}$$

En la **Tabla XXII** se presentan los datos obtenidos y en la **Tabla XXIII** los resultados.

Tabla XXII. Datos para balance de energía en prensado

T_F caucho	160	°C
T_I caucho	25	°C
C_{PCR}	1,1	kJ/kg.°C
M_{CR}	5,25	kg
M_{EPDM}	0,375	kg
C_{PEPDM}	1	kJ/kg.°C
X_{CRNR}	0,098	

Tabla XXIII. Resultados BE en prensado

ΔH_R	- 7,43 kJ
$H_F - H_I$	830,25 kJ
Q	**822,82 kJ**
Q/M_P	**146,28 kJ/kg**

Como ya se mencionó, el valor Q representa el calor neto entregado al sistema por las resistencias, descontando el calor perdido hacia los alrededores; y el valor Q/M_P representa a dicha energía calórica por unidad de masa de baldosa construida.

10. CAPACIDAD PRODUCTIVA

A continuación se verifica cual es la etapa de producción más lenta para ser considerada cuello de botella. (**Tabla XXIV**)

Tabla XXIV. Baldosas producidas por hora en las etapas de mezclado y prensado

MEZCLADO	
Tiempo total de mezclado (min)	65
Kg obtenidos por mezcla	30,5
Kg por baldosa	5,62
Cantidad de baldosas por mezcla	5,42
Baldosas producidas por minuto	0,08
Baldosas producidas por hora	5

PRENSADO	
Tiempo total de vulcanizado (min)	15
Tiempo de carga y descarga (min)	5
Tiempo total de ciclo (min)	20
Baldosas producidas por minuto	0,05
Baldosas producidas por hora	3

La **Tabla XXV** se realizó tomando a la etapa de prensado como cuello de botella, considerando que la misma dura 20 minutos incluyendo tiempos de carga y descarga, y que se dispone de una sola prensa.

Tabla XXV. Capacidad productiva en uno o tres turnos de trabajo

	1 turno	**3 turnos**
Horas de producción diaria	8	24
Baldosas producidas por día	24	72
Superficie cubierta por día (m^2)	6	18
Superficie cubierta anual (m^2)	1500	4500
Parques cubiertos por año	**60**	**180**
Kg de baldosas producidas por día	135	405
Kg de polverino utilizado por día	68,85	206,55
Kg de baldosas producidas por año	33750	101250
Kg de polverino utilizado por año	**17212,5**	**51637,5**

	Datos complementarios:
3	baldosas producidas por hora
0,25	m^2 de una baldosa
250	días laborales en el año
25	m^2 por parque infantil
5,625	kg de una baldosa
0,51	fracción másica de polverino

De acuerdo a los cálculos presentados en la tabla se puede ver que, según la capacidad productiva de la planta, es factible cubrir entre 60 y 180 parques infantiles al año dependiendo de los turnos que se trabajen. Esto generaría un consumo anual de polverino que va desde 17212,5 kg a 51637,5 kg. En ambos casos la demanda de polverino estaría cubierta, utilizándose la totalidad producida por Todos Retenes y el remanente proveniente de Dayco (Todos Retenes genera 1250 kg anuales y Dayco 20000 kg mensuales).

11. ANÁLISIS DE COSTOS

Para el análisis de costos no se tuvo en cuenta la fabricación del molde dado que se lo consideró un costo de inversión. Dicho valor alcanza los 1500 pesos aproximadamente. Además, dado que el polverino es un residuo en las empresas generadoras, su costo se tomó como nulo y sólo se contempló su traslado.

Por otro lado, resulta necesario aclarar que sólo se consideraron los costos directos para la producción de las baldosas.

En las **Tablas XXVI y XXVII** se indican las formulaciones utilizadas para el caucho regenerado y para la capa superficial con el costo de cada ingrediente y el costo parcial que aporta cada uno de ellos a un lote de mezcla. Además, se especifica el costo unitario ($/kg) de cada mezcla.

Tabla XXVI. Cálculo del costo de caucho regenerado por unidad de masa

Caucho Regenerado				
Materia Prima	Precio por Kilogramo (U$S)	Precio por Kilogramo ($)	Cantidad utilizada por mezcla (g)	Costo Parcial ($)
Caucho Natural	3,7	57,72	3000	173,16
Óxido de Zinc	4,2	65,52	150	9,83
Estearato de Zinc	1,84	28,70	36	1,03
Resina WW	3,2	49,92	90	4,49
Santoflex 13	5,7	88,92	60	5,34
TMQ HS	4,2	65,52	45	2,95
Negro de Humo MT	2,6	40,56	1200	48,67
Aceite Aromático	1,27	19,81	750	14,86
Azufre	1,02	15,91	105	1,67
MBTS	5,3	82,68	45	3,72
TMTD	4,2	65,52	60	3,93
Polverino	0	0	16623	0
Aceite Aromático Extra	1,27	19,81	8311,5	164,67
Total			30475,5	434,32
			COSTO UNITARIO ($/kg)	14,25

Tabla XXVII. Cálculo del costo de EPDM por unidad de masa

Caucho Superficie				
Materia Prima	Precio por Kilogramo (U$S)	Precio por Kilogramo ($)	Cantidad utilizada por mezcla (g)	Costo Parcial ($)
EPDM	4,8	74,88	10000	748,8
Óxido de Zinc	4,2	65,52	250	16,38
Estearato de Zinc	1,84	28,70	50	1,44
Sílice	2,26	35,26	1000	35,26
Carbonato de Calcio	0,65	10,14	2000	20,28
Aceite Parafínico	1,8	28,08	4000	112,32
Resina Líquida	7,4	115,44	160	18,47
Colorante	17,4	271,44	150	40,72
Azufre	1,02	15,91	150	2,39
MBTS	5,3	82,68	90	7,44
TMTD	4,2	65,52	90	5,90
Total			17940	1009,38
			COSTO UNITARIO ($/kg)	56,26

En la **Tabla XXVIII** se indica la cantidad de polverino que se traslada en un viaje y el costo del mismo, con lo que se calculó el costo que representa el transporte de un kilogramo de polverino.

Tabla XXVIII. Cálculo del costo de transporte de polverino por unidad de masa

Kg Flete	Costo Flete	Costo Unitario ($/kg)
20000	3000	0,15

En la **Tabla XXIX** se observa el consumo bimestral de energía eléctrica de una planta productora de piezas de caucho (TR) y el costo asociado a dicho bimestre. Además, se indican las potencias eléctricas de la amasadora y la prensa utilizadas en la fabricación de baldosas. Con estos datos se pudieron calcular los costos por hora que genera la utilización de estos equipos.

Tabla XXIX. Cálculo del costo de consumo eléctrico del proceso

Consumo bimestral (kWh)	8482	Equipo	Potencia (kW)	Costo unitario ($/h)
Costo bimestral ($)	26907,08	Mezcladora	22	69,79
Costo unitario ($/kWh)	3,17	Prensa hidráulica	25	79,31

Con los valores obtenidos en los cálculos antes mencionados se elaboró un costeo para la producción de una baldosa, el cual se resume en la **Tabla XXX**. Se arribó a un costo de fabricación de 198,5 pesos argentinos por baldosa.

Tabla XXX. Análisis de costos directos por baldosa

ANÁLISIS DE COSTOS POR BALDOSA					
ARTÍCULO:	Baldosa para parques infantiles				
1 MATERIA PRIMA					
DESIGNACIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO PARCIAL	COSTO TOTAL
CAUCHO REGENERADO	Kg	5,25	14,25	74,81	**103,84**
CAUCHO SUPERFICIE	Kg	0,375	56,26	21,10	
ADHESIVO	L	0,01	750	7,5	
FLETE POLVERINO	Kg	2,87	0,15	0,43	
2 MANO DE OBRA					
DESIGNACIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO PARCIAL	COSTO TOTAL
MEZCLADO	h	0,20	116,76	23,42	**54,21**
PRENSADO	h	0,33	88,63	29,54	
REBABADO	h	0,017	72,97	1,24	
3 SERVICIOS					
DESIGNACIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO PARCIAL	COSTO TOTAL
ELECTRICIDAD MEZCLADO	h	0,20	69,79	14,00	**40,44**
ELECTRICIDAD PRENSADO	h	0,33	79,31	26,44	
COSTOS DE FABRICACIÓN					**198,49**
COSTO PARA CUBRIR 25 M²					**19.848,60**

Comparando los resultados obtenidos con los de la competencia (41) en la **Tabla XXXI**, se puede observar que el producto desarrollado en este PI, a pesar de ser más costoso, ofrece mejores prestaciones al alcanzar la misma altura de caída crítica con un menor espesor.

Tabla XXXI. Comparación con competencia

Baldosa	Espesor (mm)	Precio ($)	Altura de Caída Crítica (m)
PI	15	198,49 *	1
Competencia	20	189,97	1

* Sólo incluye costos directos de fabricación

12. CONCLUSIÓN

Se desarrollaron baldosas de caucho prensado a partir de una mezcla de caucho virgen y caucho reciclado en polvo. Para su elaboración se emplearon una mezcladora a cielo abierto y una prensa hidráulica. Como base para las mezclas se escogió caucho natural debido a su bajo costo y mayor admisión de carga. La relación másica polverino – caucho base de mejor desempeño fue de 3 a 1.

Debido a que la composición y la dureza del polverino recibido no es estable en el tiempo se propuso una producción por lote, debiéndose ajustar para cada lote las proporciones de aceite extra y acelerantes a adicionar en la mezcla para obtener las características deseadas de dureza y vulcanización.

Es importante destacar que la cantidad de polverino utilizado en una baldosa rondará el 50 % en peso, conforme al compromiso asumido de buscar un desarrollo sustentable y minimizar cualquier impacto ambiental que pudiera producir este residuo.

Otro punto importante a destacar es el diseño en bicapa que se ideó para proteger el material regenerado contra el envejecimiento y el desgaste, permitiendo a su vez disponer de alternativas de color para las baldosas.

Si bien las baldosas sometidas al ensayo de envejecimiento sufrieron una pérdida importante de coloración, sus superficies se mantuvieron íntegras y suaves, sin rasgos significativos de deterioro ni aumentos excesivos de dureza. Esto indica que la protección contra el envejecimiento es efectiva, aunque debería completarse el ensayo sometiendo a una baldosa sin protección a las mismas condiciones para comparar los resultados. También sería importante solucionar el inconveniente de la pérdida de color que sufrieron las baldosas expuestas.

Del ensayo de desgaste se evidenció que incorporar polverino o caucho reciclado a una mezcla reduce notablemente su resistencia a la abrasión. Sin embargo, se confirmó la capacidad de la capa superficial de EPDM para proteger al material regenerado contra el desgaste, justificando aún más su presencia en el producto.

Del ensayo de deformación permanente por compresión se determinó que el caucho regenerado recupera sus dimensiones en una menor proporción que el caucho base. Por esta razón se podría suponer que el aumento del porcentaje de polverino en la mezcla disminuye la

elasticidad del material resultante. Esta situación pareciera no ser favorable para el empleo de caucho reciclado en baldosas de seguridad, pero debe tenerse en cuenta que el ensayo realizado sólo es comparativo y que las condiciones empleadas en los mismos fueron severas en comparación a las condiciones reales a las que serán expuestas las baldosas.

Por otro lado, de acuerdo a un análisis estadístico de varianza realizado, se pudo determinar que a pesar de la tendencia a la aglomeración del polverino se alcanza una homogeneización satisfactoria en el mezclado.

Del ensayo de impacto se obtuvo una altura de caída crítica (ACC) de 1 metro para una baldosa de 15 mm de espesor y 35 Shore A de dureza. En estudios adicionales se dedujo que la ACC puede incrementarse aumentando el espesor o disminuyendo la dureza del material empleado, lo que mejoraría sus prestaciones en cuanto a seguridad o absorción de impactos.

Además, gracias a los estudios adicionales antes mencionados, se infirió que la ACC se relaciona directamente con la dureza del material para un espesor constante. Por lo tanto, se puede garantizar un nivel de seguridad regulando dicha dureza, que es una propiedad cuya medición es sencilla en planta.

Según un estudio de capacidad productiva realizado es factible cubrir entre 60 y 180 parques infantiles al año, ya sea que se trabajen 1 o 3 turnos diarios. Esto generaría un consumo anual de polverino que va desde 17.212,5 kg a 51.637,5 kg. Teniendo en cuenta una generación conjunta anual de 241.250 kg de polverino entre las empresas mencionadas, se reciclaría entre un 7,13 y un 21,4 % de este residuo. Esta situación es factible de mejora ya que la prensa hidráulica empleada permite moldear con dos matrices a la vez, lo que implicaría un aumento en la capacidad productiva de la planta y por lo tanto un mayor consumo de polverino. Debe tenerse en cuenta que no se efectuó un estudio de mercado para verificar la factibilidad de dichos volúmenes de producción de acuerdo a la posible demanda del producto.

13. SUGERENCIAS

En caso de constituir una unidad de negocio, habría que terminar de desarrollar el análisis de costos para incluir los costos indirectos y la utilidad, a fin de determinar el precio del producto. Además, se podría diferenciar el precio de baldosas negras o de color, con o sin capa protectora para su uso en exterior o interior.

Si la intención es comercializar el producto en un futuro, resultaría necesario reducir los costos de fabricación para ser competentes en el mercado. Como ya se mencionó, una opción sería confeccionar una segunda matriz para vulcanizar dos baldosas a la vez, con lo que se reduciría el costo de mano de obra y el consumo energético.

A modo de sugerencia, y con la intención de completar la caracterización del material regenerado obtenido, podrían realizarse ensayos de tracción y de envejecimiento acelerado por UV en cámara con ciclos de lluvia.

14. ANEXOS

14.1. RESUMEN DE NORMAS CONSULTADAS

NORMA UNE-EN 1177: REVESTIMIENTOS DE LAS SUPERFICIES DE LAS ÁREAS DE JUEGO ABSORBEDORES DE IMPACTOS. DETERMINACIÓN DE LA ALTURA DE CAÍDA CRÍTICA.

Esta norma europea aporta un método para la evaluación da la amortiguación del impacto de las superficies destinadas a las áreas de juego, según se define en la Norma EN 1176-1.

Las lesiones producidas por caídas en las áreas de juego se pueden producir por diversos motivos, pero se estima que las lesiones más graves son las que afectan a la cabeza. En consecuencia, se ha considerado prioritario establecer un criterio para los materiales de revestimiento con el fin de evaluar su capacidad para reducir las probabilidades de lesiones en la cabeza.

En virtud de análisis estadísticos realizados sobre las bases de datos disponibles, se ha utilizado el Criterio de Lesiones en la Cabeza (HIC) de un nivel de tolerancia de 1000, como límite superior para la gravedad de las lesiones que no sean susceptibles de tener consecuencias que produzcan una discapacidad o la muerte. Al elegir la medición del HIC como criterio de seguridad, el método sólo toma en consideración la energía cinética de la cabeza en el momento del impacto con las superficies.

El valor 1000 de HIC es simplemente un punto de referencia en una curva de gravedad de riesgo donde un HIC de 1000 es equivalente a un 3% de probabilidad de una lesión crítica, un 18% de probabilidad de una lesión muy grave en la cabeza, un 55% de probabilidad de una lesión grave en la cabeza, un 89% de probabilidad de una lesión moderada en la cabeza, y un 99,5% de probabilidad de una lesión leve en la cabeza, para un adulto masculino medio.

NORMA IRAM 113010: CAUCHO VULCANIZADO O TERMOPLÁSTICO. DETERMINACIÓN DE LA DEFORMACIÓN PERMANENTE POR COMPRESIÓN.

Esta norma establece los métodos para determinar la deformación permanente por compresión que sufre el caucho.

En esta norma se describen dos métodos:

a) Deformación permanente por compresión bajo carga constante (método A)

b) Deformación permanente por compresión a deformación constante (método B)

Se comprime una probeta por deflexión o mediante una fuerza especificada en un dispositivo apropiada bajo condiciones de deformación especificadas y se mantiene bajo esta condición durante un tiempo y a una temperatura especificada. Se mide la deformación residual de la probeta luego de 30 minutos de retirarla del dispositivo de compresión apropiado.

NORMA IRAM 113004: CAUCHO. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE TRACCIÓN – DEFORMACIÓN.

Esta norma establece un método para determinar las propiedades de tracción del caucho. Las propiedades que se pueden determinar son: la resistencia a la tracción, el alargamiento a la rotura, el esfuerzo a un alargamiento dado, y el alargamiento a un esfuerzo dado. No es aplicable a cauchos duros y/o ebonitas.

Se estiran las probetas normalizadas, ya sea las alargadas o las anulares, en una máquina de ensayo de tracción a velocidad constante. Se toman las lecturas de la fuerza y del alargamiento durante el estiramiento ininterrumpido de la probeta y en el momento de la rotura.

NORMA IRAM 113130: CAUCHO. MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA ABRASIÓN MEDIANTE UN DISPOSITIVO DE TAMBOR GIRATORIO.

En esta norma se establece el método para la determinación de la resistencia a la abrasión del caucho vulcanizado mediante un dispositivo de tambor giratorio.

El método que se describe es el de pérdida de volumen relativo utilizando un portaprobeta giratorio.

El método consiste en someter una de las superficies planas de una probeta de caucho de forma cilíndrica a la acción de desgaste de una tela abrasiva, de grado específico, que está adherida a un tambor giratorio.

La probeta efectúa un recorrido sobre este tambor sobre el que se apoya en un área y con una presión de contacto determinados.

Se determina la pérdida de masa de la probeta y se calcula la pérdida de volumen tomando en cuenta la densidad del material.

Debido a que existen factores que modifican los valores absolutos de resistencia a la abrasión, tales como el grado de partículas abrasivas, el adhesivo empleado en la elaboración

de la tela, contaminación debido al uso, etc., se ha incorporado un compuesto tipo de caucho al que se refieren los valores de pérdida de volumen del compuesto en estudio. Esto permite obtener resultados comparativos referidos a una tela abrasiva calibrada previamente respecto del compuesto tipo.

14.2. ANÁLISIS DE VARIANZA

Análisis de varianza de un factor en columnas

RESUMEN

Grupos	*Cuenta*	*Suma*	*Promedio*	*Varianza*
Columna 1	5	202	40,4	0,3
Columna 2	5	205	41	2
Columna 3	5	209	41,8	4,2
Columna 4	5	215	43	3,5
Columna 5	5	212	42,4	0,3

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	*Suma de cuadrados*	*Grados de libertad*	*Promedio de los cuadrados*	*F*	*Probabilidad*	*Valor crítico para F*
Entre grupos	21,84	4	5,46	2,65048544	0,063471642	2,866081402
Dentro de los grupos	41,2	20	2,06			
Total	63,04	24				

Análisis de varianza de un factor en filas

RESUMEN

Grupos	*Cuenta*	*Suma*	*Promedio*	*Varianza*
Fila 1	5	203	40,6	2,3
Fila 2	5	209	41,8	2,7
Fila 3	5	213	42,6	5,3
Fila 4	5	210	42	1,5
Fila 5	5	208	41,6	1,3

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	*Suma de cuadrados*	*Grados de libertad*	*Promedio de los cuadrados*	*F*	*Probabilidad*	*Valor crítico para F*
Entre grupos	10,64	4	2,66	1,01526718	0,42320478	2,8660814
Dentro de los grupos	52,4	20	2,62			
Total	63,04	24				

En ambos casos F es menor al F crítico y P es mayos a α (tolerancia de error de 0,05), por lo que se confirma la hipótesis nula y no hay diferencias significativas en las medias de los grupos.

15. BIBLIOGRAFÍA

1. ASES XXI. Normas de 2009. Áreas de juegos infantiles. Guía para su evaluación práctica. *REQUISITOS DE ÁREAS DE JUEGOS INFANTILES Y SU EVALUACIÓN PRÁCTICA.* [En línea] Noviembre de 2009. [Citado el: 08 de Julio de 2016.] http://www.basepaisajismo.com/secciones/archivos_utilidades/guia%20de%20normas%20sobre%20areas%20infantiles.pdf.

2. Polímeros Naturales. *Extracción del Caucho Industrial.* [En línea] 28 de 11 de 2009. [Citado el: 10 de JUNIO de 2016.] https://polimerosnaturales.wordpress.com/2009/11/28/extraccion-de-caucho/.

3. Goodyear. *Caucho Natural.* [En línea] [Citado el: 10 de JUNIO de 2016.] http://www.goodyear.cl/comp_info/did_you_know/natural_rubber.html.

4. Beliczky, Louis D. y al., et. *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo.* Madrid : Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, 2003. pág. 80.1 a 80.20. Vol. 3.

5. EIS UVA ES. *El caucho.* [En línea] [Citado el: 07 de JUNIO de 2016.] http://www.eis.uva.es/~macromol/curso03-04/automovil/paginas/El_caucho.htm.

6. S.L., Bove-ag. Cauchos elastómeros. [En línea] [Citado el: 07 de Junio de 2016.]

7. prenexltda. *Caucho sintético: definición y tipos.* [En línea] [Citado el: 01 de Diciembre de 2015.] http://www.prenexltda.com/macros/TextContent_I.jsp?contentid=57&version=1.

8. Erica. *Caucho Sintético. SBR Estireno Butadieno.* [En línea] [Citado el: 8 de Julio de 2016.] http://www.erica.es/web/sbr-butadieno-estireno/.

9. Tecnología de los Plásticos. *Caucho nitrilo (NBR).* [En línea] 25 de Enero de 2012. [Citado el: 8 de Julio de 2016.] http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.ar/2012/01/el-caucho-nitrilo-tambien-conocido-como.html.

10. *Reinforcement of Elastomers.* Kraus, Gerard. s.l. : Interscience Publishers, 1965, págs. 491 – 511.

11. *Rubber World.* Blume, Bernhard Schwaiger and Anke. 222, 2000, Vol. 1, págs. 32 – 38. 222, 1.

12. —.Dieter Berkemeier, Walter Haeder and Maik Rinker. 224, 2001, Vol. 4, págs. 34 - 39.

13. Blow, C.M. *Rubber Technology and Manufacture.* s.l. : Butterworths London, 1971.

14. *Rubber Chemical and Technology.* Hamed, Gary R. 73, 2000, Vol. 3, págs. 524 - 533.

15. *Rubber Age.* Beatty, J. R. and Studebaker,M. L. 107, 1975, Vol. 9, págs. 39 – 44.

16. *Rubber World.* Larsen, Lars C. 207, 1997, Vol. 3, págs. 22 – 24.

17. Hewitt, Peter A Ciullo and Norman. *The Rubber Formulary.* s.l. : Noyes Publications Norwich New York, 1999.

18. *Rubber Chemical and Technology.* Lattimer, Robert W. Layer and Robert P. 63, 1990, Vol. 3, págs. 425 - 450.

19. *Rubber Chemistry and Technology.* S. A. Pushpa, P. Goonetilleke and N. C. Billingham. 69, 1996, Vol. 5, págs. 885 - 896.

20. *Rubber World.* Co, Robert F. Ohm and R. T. Vanderbilt. 208, 1993, Vol. 5, págs. 18 – 22.

21. *Rubber Age.* Michalak, H. 106, 1974, Vol. 6, págs. 40 – 41.

22. *J. Appl. Polym. Scie.* Cahi, Sung Seen. 73, 1999, Vol. 13, págs. 2587 - 2593.

23. *Rubber Chemistry and Technology.* P. I. Dimauro, H. L. París and M. A. Fath. 52, 1979, Vol. 2, págs. 973 - 985.

24. *Rubber World.* Fath, Michael A. 209, 1993, Vol. 1, págs. 22 – 25.

25. *J. Appl. Polym. Sci.* E. Koczorawska, B. Jurkowsko and B. Jurkowski. 69, 1998, Vol. 8, págs. 1531 – 1536.

26. W., Barlow Fred. *Rubber Compounding: Principles, Materials and Techniques.* s.l. : Marcel Dekker Inc., 1988.

27. *Rubber Chemistry and Technology.* Mark, Herbert Morawetz and Herman F. 73, 2000, Vol. 3, págs. 405 - 426.

28. *Rubber World.* Fath, Michael A. 209, 1993, Vol. 3, págs. 17 – 20.

29. *Elastomerics.* Barbour, Arthur L. 110, 1978, Vol. 6, págs. 23 - 27.

30. *Rubber Chemistry and Technology.* Dluzneski, Peter R. 74, 2001, Vol. 3, págs. 451 - 492.

31. González Cantú, Mª Concepción. Interempresas.net. *Componentes involucrados en la formulación de Caucho.* [En línea] 15 de Septiembre de 2003. [Citado el: 14 de Junio de 2016.] Saltillo, Coahuila. México. http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/6744-Componentes-involucrados-en-la-formulacion-de-caucho.html 14/6.

32. vip-polymers. *Fabricación del Caucho.* [En línea] [Citado el: 14 de JUNIO de 2016.] http://www.vip-polymers.com/es/fabricacion/fabricacion-del-caucho/#sthash.xSZuVJwV.dpuf.

33. Materiales. *Ensayos de Dureza.* [En línea] [Citado el: 05 de Julio de 2016.] http://190.105.160.51/~material/materiales/presentaciones/ApunteDureza.pdf.

34. Patologías+Rehabilitación+Construcción. Web de información y formación para profesionales y estudiantes. *Medición de la Dureza en Materiales.* [En línea] [Citado el: 5 de Julio de 2016.] http://www.patologiasconstruccion.net/2014/10/medicion-de-la-dureza-en-materiales-4/ .

35. De máquinas y Herramientas. *Introducción al Durómetro.* [En línea] 23 de Febrero de 2015. [Citado el: 5 de Julio de 2016.] http://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-de-medicion/durometro-tipos.

36. Tecnología de los Plásticos. *Propidades Mecánicas.* [En línea] 27 de Junio de 2011. [Citado el: 5 de Julio de 2016.] http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.ar/2011/06/propiedades-mecanicas.html.

37. Ortiz, José Francisco Serrano. Análisis de la evolución natural de la propiedad de amortiguación de impactos en pavimentos de seguridad de caucho reciclado para parques infantiles. [En línea] 2013. [Citado el: 30 de Marzo de 2017.] https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/33513/An%C3%A1lisis%20de%20la%20evoluci%C3%B3n%20natural%20absorci%C3%B3n%20impactos%20en%20cauchox.pdf?sequence=1.

38. Erica. *Aislamiento térmico.* [En línea] [Citado el: 21 de Abril de 2017.] Erica/www.erica.es/web/aislamiento-térmico.

39. CTE. Cte-web. [En línea] [Citado el: 21 de Abril de 2017.] Cte-web.iccl.es/materiales.php?a=18.

40. *RELACIÓN ENTRE EL CALOR DE VULCANIZACIÓN Y LA DENSIDAD DE ENTRECRUZAMIENTO DE MEZCLAS REFORZADAS DE CAUCHO NATURAL COLOMBIANO Y CAUCHO ESTIRENO BUTADIENO (NR-SBR).* Urrego, William y Álvarez, Mónica. 5, Medellín, Colombia. : s.n., 2012, Revista Colombiana de Materiales, págs. 28-34. Edición Especial Artículos Cortos.

41. Mercado libre. *Pisos amortiguadores de impacto fabricados con caucho reciclado.* [En línea] Baldosas Antitrauma. [Citado el: 10 de 05 de 2017.] http://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-617851229-pisos-caucho-reciclado-antigolpes-baldosas-goma-_JM.

42. *Rubber Age.* Beatly, J. R. and Studebaker, M. L. 107, 1975, Vol. 8, págs. 20 – 38.

43. Geissman, T. A. *"Principios de Qímica Orgánica".* Segunda Edición. s.l. : Editorial Reverté S.A., 1974.