

# Guía sobre aplicaciones de reciclaje y gestión de las llantas de desecho en EE.UU. y México



**EPA**

United States  
Environmental Protection  
Agency

EPA530-R-10-010S



# **Guía sobre aplicaciones de reciclaje y gestión de las llantas de desecho en EE.UU. y México**

**Diciembre 2010**



Oficina de Conservación y Recuperación de Recursos  
1200 Pennsylvania Avenue NW  
Código postal: 5304P  
Washington, DC 20460  
[www.epa.gov/waste](http://www.epa.gov/waste)

EPA530-R-10-010S

## **ACLARACIÓN**

Este documento ha sido revisado internamente por USEPA y externamente por expertos en el tema. Todos los sitios de web ofrecidos en este documento estuvieron correctos y válidos a la hora de la publicación. La mención de marcas comerciales o de productos comerciales no constituye el endoso o la recomendación para el uso.

Varios sitios de web proporcionaron en este documento no están contenidos en dominios creados o mantenidos por USEPA. Estos sitios de web proporcionan simplemente el acceso a información adicional de acuerdo con el propósito previsto de este documento. La USEPA no puede atestiguar a la exactitud de la información o a la protección de la privacidad proporcionada por ningún sitio de web externo. Proporcionar sitios de web externos no constituye un endoso por la USEPA de los patrocinadores del sitio o la información o los productos presentados en los sitios web.

# CONTENIDO

<b>Agradecimientos .....</b>	<b>ii</b>
<b>Acrónimo .....</b>	<b>iii</b>
<b>Capítulo 1 Introducción .....</b>	<b>1</b>
Antecedentes sobre la región fronteriza México-EE.UU.....	1
Esquema general de la guía.....	2
<b>Capítulo 2 Características del programa de gestión de llantas de desecho .....</b>	<b>3</b>
Participación del estado en los EE.UU. ....	3
Planeación del saneamiento .....	7
Contratistas.....	14
Gestión del proyecto.....	17
Resumen.....	20
<b>Capítulo 3 Hule molido .....</b>	<b>21</b>
Principales mercados para el hule molido en los EE.UU.....	21
Mercado de superficies deportivas y recreativas.....	22
Productos moldeados y extruidos.....	28
Asfalto modificado con polímero .....	30
Otros mercados.....	32
Resumen.....	33
Referencias.....	33
<b>Capítulo 4 Aprovechamiento energético .....</b>	<b>34</b>
Características químicas de las llantas de desecho .....	34
Hornos cementeros .....	38
Industria de la pulpa y el papel .....	44
Calderas de centrales termoeléctricas .....	47
Energía combinada / recuperación de materiales pirólisis/gasificación .....	48
Resumen.....	50
Referencias.....	50
<b>Capítulo 5 Agregado derivado de llantas y llantas enteras para aplicaciones de ingeniería civil.....</b>	<b>51</b>
El ADL como agregado para drenaje.....	52
El ADL como relleno ligero.....	57
Llantas enteras para la construcción de muros .....	65
Referencias.....	66
<b>Capítulo 6 Aspectos económicos del transporte y procesamiento .....</b>	<b>71</b>
Recolección y transporte .....	71
Procesamiento.....	73
Sensibilidad económica.....	79
Resumen.....	80
<b>Capítulo 7 Conclusión .....</b>	<b>81</b>
<b>Glosario .....</b>	<b>G-1</b>
<b>Apéndice A Especificaciones para el material ADL .....</b>	<b>A-1</b>
<b>Apéndice B Lineamientos de diseño para minimizar el calentamiento interno de los rellenos de llantas trituradas .....</b>	<b>A-2</b>
<b>Apéndice C Propiedades técnicas del ADL .....</b>	<b>A-4</b>
<b>Apéndice D Cálculo del peso unitario final in situ y el sobredimensionamiento .....</b>	<b>A-9</b>
<b>Apéndice E Estudio de caso – Uso del ADL como relleno ligero para un terraplén.....</b>	<b>A-13</b>
<b>Apéndice F Ejemplo comparativo de los costos del transporte.....</b>	<b>A-19</b>
<b>Apéndice G Parámetros económicos para las plantas de procesamiento de llantas de desecho .....</b>	<b>A-20</b>
<b>Apéndice H Comparación de la susceptibilidad al volumen de las plantas de procesamiento de llantas .....</b>	<b>A-24</b>

# AGRADECIMIENTOS

Mediante el programa México-EE.UU. Frontera 2012, la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. (U.S. EPA), en colaboración con SEMARNAT, elaboró esta guía a manera de recurso para el desarrollo de mercados para las llantas de desecho en la región fronteriza México-Estados Unidos, aunque la información que en ella se encuentra puede resultar de utilidad para cualquier país.

U.S. EPA agradece especialmente al Sr. Terry Gray de la empresa T.A.G Resource Recovery, así como al Dr. Dana Humphrey, de la Universidad de Maine, como los autores principales de este documento. Ambos son especialistas ampliamente reconocidos en el campo de la gestión de llantas de desecho. Ninguno de los dos, el Sr. Gray o el Dr. Humphrey, es empleado de la U.S. EPA.

Agradecemos también a las siguientes personas por sus importantes aportaciones al documento:

Jose Arreola, Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF)

Michael Blumenthal, Rubber Manufacturers Association

Jack Brunner, Tetra Tech EM Inc.

Bethany Hand, Tetra Tech EM Inc.

Ellie Kanipe, Oficina de Conservación y Recuperación de Recursos de U.S. EPA, Programa Frontera 2012

Todd Marvel, EPA de Illinois

Christopher Newman, U.S. EPA , Región 5

Adriana Oropeza, SEMARNAT

Rick Picardi, Oficina de Conservación y Recuperación de Recursos, México/Equipo de la Comisión de Cooperación Ambiental

Emily Pimental, U.S. EPA, Región 9, Programa de Gestión de Desechos México-EE.UU.

Paul Ruesch, U.S. EPA, Región 5

Julie Shannon, División de Prevención de la Contaminación de U.S. EPA

Mary Sikora, Asociación de la industria de llantas

# ACRÓNIMO

° C	Grados centígrados	F&B	F&B Enterprises
° F	Grados Fahrenheit	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxido de hierro
ρ	Densidad	FIFA	Federación Internacional de Fútbol Asociado
%	Por ciento	ft <sup>2</sup>	Pies cuadrados
AASHTO	Asociación Americana de Oficiales de Transporte en Carreteras	g/m <sup>2</sup>	Gramos por metro cuadrado
ADL	Agregado derivado de llantas	GIS / SIG	Sistema de información geográfica
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxido de aluminio	GPS	Sistema de posicionamiento global
AMP	Asfalto modificado con polímero	GRS	Gas de relleno sanitario
AP	Aromáticos polinucleares	H <sub>2</sub> O	Agua
ARA	Asociación Americana de Recauchutadores	HAPs	Hidrocarburos aromáticos polinucleares
ASTM	Sociedad Americana de Pruebas y Materiales	HCl	Acido clorhídrico
BPCs	Bifenilos policlorados	ISC	Industrial Source Complex
Btu	Unidad térmica británica	ISTEA	Ley de Eficiencia en el Transporte Intermodal Terrestre de 1991
c	Coeficiente	K	Coeficiente de presión de tierra
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de calcio	K <sub>2</sub> O	Oxido de potasio
CalRecycle	Departamento de Reciclaje y Recuperación de Recursos de California	kcal/kg	Kilocalorías por kilogramo
CaO	Oxido de calcio	kg	Kilogramo
CDL	Combustible derivado de llantas	kh	Valor semi-empírico
CFR	Código de Reglamentos Federales de EE.UU.	km	Kilómetro
CIWMB	Consejo para la Gestión Integrada de Residuos en California	Ko	Coeficiente de presión lateral de tierra en reposo
cm	Centímetro	kPa	KiloPascuales
CM	Columbus McKinnon	kW	Kilowatt
cm/s	Centímetros por segundo	kW/año	Kilowatt por año
CNIH	Cámara Nacional de la Industria Hulera	lbs	Libras
CO	Monóxido de carbono	lbs/hora	Libras por hora
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono	m	Metros
CRL	Convenio para la remoción de llantas de desecho	m <sup>2</sup>	Metros cuadrados
CRMAC / CAMHM	Concreto asfáltico modificado con hule en miga	m <sup>3</sup> /seg	Metros cúbicos por segundo
CRREL	Laboratorio de Investigación e Ingeniería de las Regiones Frías	MEPD	Monómero de etileno-propileno-dieno
DDPC	Dibenzodioxinas policloradas (dioxinas)	Mg/m <sup>3</sup>	Macrogramos por metro cúbico
DFPC	Dibenzofuranos policlorados	MgO	Oxido de magnesio
EBE	Estireno-butadieno-estireno	mm	Milímetros
EE.UU.	Estados Unidos	MR	Módulo de ruptura
EQUIV	Equivalente	mw/año	Megawatts por año
		NA	No aplica
		Na <sub>2</sub> O	Oxido de sodio
		NAPA	Asociación Nacional de Pavimentos de con Asfalto



NCAA	Asociación Nacional de Deportistas Universitarios	TOX	Toxicidad
ND	No detectado	TRIB	Dirección de Información sobre Recauchutado de Llantas de EE.UU.
NO <sub>x</sub>	Oxido de nitrógeno	TRRMMG	Grupo de Fabricantes de Caucho y Materiales para Reparación de EE.UU. (anteriormente llamado el Grupo de Fabricantes de Caucho)
NTDRA	Asociación Nacional de Comerciantes de Llantas y Recauchutadores de EE.UU.	USACE	Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU.
OGFC	Granulometría abierta friccional	USDOT	Departamento de Transporte de los EE.UU.
oz/yd <sup>2</sup>	Onzas por yarda cúbica	USEPA	Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU.
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pentóxido de fósforo	UV	Ultravioleta
pcf	libras por pie cúbico	YCCL	Relleno Sanitario Central del Condado de Yolo
PE	Precipitadores electrostáticos		
psf	Libras por pie cuadrado		
psi	Libras por pulgada cuadrada		
PTE	Equivalente en llantas para automóvil		
PVC	Policloruro de vinilo		
Q	Sobrecarga		
RAC	Revestimiento de arcilla compactada		
RCRA	Ley de Conservación y Recuperación de los Recursos de EE.UU.		
Ref	Referencia		
RMA	Asociación de Fabricantes de Caucho de EE.UU.		
RN	Resistencia nominal		
RPA	Asociación de Pavimento Ahulado de EE.UU.		
RSDM	Relenos sanitarios para desechos municipales		
RSM	Residuos sólidos municipales		
RUMAC	Concreto asfáltico modificado con polímero		
SAM	Stress Absorbing Membrane		
SBR	Estireno-butadieno- Styrene-butadiene rubber		
SCEL	Sistema de captación y extracción de lixiviados		
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales		
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de silicio		
SO <sub>3</sub>	Trióxido de azufre o anhídrido sulfúrico		
SO <sub>x</sub>	Oxido de azufre		
STMC	Consejo para la Gestión de las Llantas de Desecho de EE.UU.		
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de titanio		
TISC	Consejo para la Seguridad de la Industria Llantera		
TMA	Tamaño máximo de agregado		



# CAPÍTULO 1

## Introducción

### ANTECEDENTES SOBRE LA REGIÓN FRONTERIZA MÉXICO-EE.UU.

Las llantas de desecho representan un problema tanto para México como para Estados Unidos. Tan solo en los Estados Unidos, en el 2003 ya había 275 millones de llantas acumuladas en apilamientos, además de los 290 millones más que se generaron, según la Asociación de Fabricantes de Caucho de EE.UU. En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) calcula que anualmente se generan cerca de 40 millones de llantas de desecho. Millones de estas llantas terminan en montones a lo largo y ancho de la región fronteriza México-EE.UU., poniendo en peligro la salud pública y el medio ambiente de los dos países.

Estos acumulamientos de llantas constituyen una problemática de salud pública, ya que son caldo de cultivo para los mosquitos y otros vectores que propagan el dengue, la fiebre amarilla, la encefalitis, el virus del Nilo Occidental, y la malaria. El manejo inadecuado de las llantas que se encuentran en apilamientos, en tiraderos clandestinos, y dispersas a la orilla de las carreteras, se convierte en un importante problema ambiental en la frontera a consecuencia del proceso de lixiviación, el riesgo de incendios y la contaminación del agua. Una vez iniciado, un incendio de llantas es difícil de extinguir. Cuando se aplica agua para apagar el fuego, puede generarse una grave contaminación del aire y de las aguas subterráneas y superficiales. Las emisiones tóxicas provocadas por los incendios de llantas, como las de ácido sulfúrico y ácido nítrico gaseoso, pueden irritar la piel, los ojos y las membranas mucosas, así como afectar el sistema nervioso central, generar depresión, efectos nocivos sobre el sistema respiratorio y, en casos extremos, causar mutaciones y cáncer.

El problema de las llantas de desecho se exagera en la zona fronteriza México-EE.UU. Se sabe que en esta región existen 46 sitios de llantas apiladas, según el Informe ejecutivo del inventario de llantas de desecho en la frontera México-EE.UU. de Frontera 2012 [Border 2012: U.S.-Mexico Border Scrap Tire Inventory Summary Report] (Mayo de 2007). La región fronteriza se define como la franja de 100 kilómetros (km) hacia cada lado de los más de 3,200 km (2,000 millas) de la línea que divide a los dos países. En toda la región fronteriza se encuentran llantas amontonadas en rellenos sanitarios municipales, deshuesaderos de autos, pequeños comercios y otros inmuebles particulares o públicos. En el 2008, el cúmulo de llantas más grande se encontraba cerca de Ciudad Juárez y contenía más de 4 millones

de llantas. Asimismo, durante las primeras etapas de la gestión de llantas en los EE.UU., se calculaba que había más de mil millones de llantas de desecho en montones acumulados en todo el territorio de Estados Unidos. El problema de las llantas de desecho se plantea con más detalle en el 12º Informe del Buen Vecino que se encuentra en [www.epa.gov/ocem/gneb/gneb12threport/English-GNEB-12th-Report.pdf](http://www.epa.gov/ocem/gneb/gneb12threport/English-GNEB-12th-Report.pdf).

El problema de las llantas de desecho se agrava con las actuales variaciones económicas en la región fronteriza México-EE.UU. Millones de llantas usadas provenientes de los Estados Unidos se trasladan a los estados de la frontera norte de México para su reutilización y disposición. Debido a su menor costo, aproximadamente la mitad de todas las llantas que se compran en las ciudades fronterizas mexicanas son llantas que han sido desechadas en los Estados Unidos y tienen una reducida vida útil, ya que son llantas que tienen generalmente de 15,000 a 30,000 km (10,000 a 20,000 millas) de desgaste. Las leyes mexicanas permiten que cada año se importe por la frontera un millón de llantas usadas que se reservan para los puertos de entrada de Baja California (Tijuana y Mexicali) y Chihuahua (Ciudad Juárez). El estado de Sonora también tiene políticas que rigen la importación de llantas usadas. Sin embargo, es probable que cada año entre una cantidad mayor de llantas de desecho a México sin autorización. Es por estos motivos que el problema de las llantas en la región fronteriza se considera de gran magnitud.

Las llantas de desecho se procesan en forma distinta en México y en Estados Unidos. En muchos estados de la Unión Americana se regulan como residuo sólido municipal conforme a la Ley de Conservación



Región fronteriza México-Estados Unidos

y Recuperación de los Recursos de EE.UU. [U.S. Resource Conservation and Recovery Act ó RCRA]. La normatividad se aplica a nivel estatal y la mayoría de los estados han promulgado leyes que rigen el manejo de las llantas de desecho. Algunas de las características que los programas de gestión en EE.UU. tienen en común son las siguientes:

- Impuestos sobre llantas o automóviles para financiar programas
- Requisitos de registro para los transportistas, almacenadores, procesadores y algunos usuarios finales
- Manifiestos para los envíos de llantas de desecho
- Limitaciones sobre quiénes pueden hacerse cargo del manejo de llantas de desecho
- Requisitos de garantía financiera para los gestores de llantas de desecho
- Desarrollo de mercados

Con estas iniciativas Estados Unidos ha incrementado el número de llantas de desecho que se envían a los mercados de consumo final, de un 17 por ciento en 1990 a más del 89 por ciento en el 2007, según datos de la Asociación de Fabricantes de Caucho de EE.UU. Hasta el 2007, la mayoría de las llantas en los Estados Unidos se procesaban para generar combustible derivado de llantas (CDL) (54 por ciento), además de usarse en ingeniería civil y en forma de hule molido para el desagüe de rellenos sanitarios, como asfalto ahulado, para la filtración de sistemas sépticos, y en otros mercados.

En México la gestión de las llantas de desecho se rige por la "Ley General para la Prevención y la Gestión Integral de los Residuos" de 2004. Conforme a esta ley, todo generador de residuos, incluyendo los municipios y las plantas industriales, deben desarrollar planes para la gestión integral de sus residuos. Las llantas de desecho se consideran un "residuo de manejo especial" según esta ley y por lo tanto, se requiere un plan integral para su gestión.

A través del Programa Frontera 2012 México-EE.UU. (Frontera 2012), SEMARNAT y la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. (U.S. Environmental Protection Agency o USEPA) están trabajando en forma conjunta para lograr el saneamiento de los acumulamientos de llantas de desecho en la frontera e identificar opciones eficientes y ecológicas para el uso de este residuo. Derivado del Acuerdo de La Paz celebrado en 1983, el programa Frontera 2012 es una alianza de colaboración orientada a obtener resultados, que fue establecida entre los gobiernos federales, estatales y municipales, así como las tribus indígenas de México y EE.UU., para proteger la salud pública y mejorar las condiciones ambientales a lo largo de la frontera entre los dos países. A través de Frontera 2012, SEMARNAT y USEPA promueven alianzas con la industria, los círculos académicos y todos los niveles de gobierno, para limpiar los apilamientos de llantas (de

2003 a 2009 se logró el saneamiento de más de 5 millones de llantas de desecho) y tomar medidas para prevenir más acumulamientos, las cuales incluyen el desarrollo de esta guía; un inventario fronterizo de apilamientos de llantas; un compendio de proyectos fronterizos para la gestión de las llantas de desecho; y un grupo permanente de diversos participantes clave que se reúnan anualmente para colaborar en la identificación de soluciones. Estas medidas y otros recursos y publicaciones adicionales se pueden encontrar en el sitio web del Foro de Políticas sobre Residuos de Frontera 2012: <http://www.epa.gov/usmexicoborder/fora/waste-forum/index.html>.

## ESQUEMA GENERAL DE LA GUÍA

La Guía de recursos para la gestión de las llantas de desecho (la Guía) constituye un recurso para que los gobiernos federales, estatales y locales, junto con la industria privada, desarrollen mercados para los valiosos recursos que contienen las llantas de desecho. Algunos de los mercados específicos y las aplicaciones que se mencionan son la generación de energía, agregados derivados de llantas, y el hule triturado. Se aborda además el tema de los aspectos económicos del transporte y procesamiento de las llantas. La intención de esta Guía es agilizar las iniciativas de desarrollo de mercados para las llantas de desecho proporcionando información fundamental basada en experiencias anteriores. Asimismo, se presenta información técnica, ambiental, económica y de consulta sobre las principales aplicaciones de reciclaje de llantas de desecho, que permita a la industria y a las instancias gubernamentales evaluar, jerarquizar, dirigir esfuerzos y desarrollar mercados de la manera más rápida y eficiente posible. Finalmente, la Guía presenta información y conocimientos adquiridos por quienes han establecido y logrado administrar eficazmente programas de gestión de llantas de desecho. Con esta información se impulsarán los esfuerzos que se realizan para prevenir la creación de más acumulamientos de llantas de desecho, colaborando así al saneamiento de las comunidades fronterizas. Esta Guía ha sido elaborada específicamente para la frontera México-EE.UU., aunque la información que contiene puede resultar de utilidad para cualquier país.



Muro de llantas para el control de la erosión en Los Arroyos, México

# CAPÍTULO 2

## Características del programa de gestión de llantas de desecho

En este capítulo se presenta información basada en las experiencias de los estados de la Unión Americana en el establecimiento e instrumentación de programas regulatorios para la gestión de las llantas. Cabe mencionar que, aunque tanto México como EE.UU. tienen sistemas federales de gobierno, históricamente México cuenta con un gobierno federal más centralizado y coordinado, mientras que en los Estados Unidos los poderes tienen a estar más distribuidos y a pasar a los niveles estatales y locales. En los EE.UU., aunque la gestión de los residuos obedece a un mandato federal, cada estado tiene la facultad de establecer el camino a seguir para dar cumplimiento a la responsabilidad de administrar el programa. Esta información se basa en la Guía para el saneamiento de las llantas de desecho: Un recurso para los gestores de residuos sólidos en Estados Unidos [Scrap Tire Cleanup Guidebook: A Resource for Solid Waste Managers across the United States] de USEPA. En el sitio web de USEPA: <http://www.epa.gov/epawaste/conservation/materials/tires/live.htm> se puede encontrar más información sobre los programas de gestión de llantas de desecho de las entidades federativas. En este capítulo se explican los aspectos relacionados con la creación y administración de un programa de gestión de llantas de desecho a partir de los conocimientos adquiridos y los estudios de caso de varios estados. Las secciones son:

- **Participación del Estado:** Se describen los enfoques alternativos que los estados han empleado para el desarrollo y financiamiento de programas para la gestión de las llantas de desecho.
- **Planeación:** Se presenta información sobre la forma en que los estados identifican los apilamientos de llantas de desecho y trazan mapas de localización,

sus técnicas para el cálculo de cantidades, y sus enfoques para establecer prioridades en cuanto a la gestión de los apilamientos de llantas.

- **Contratistas:** Se describe la forma en que los estados evalúan los perfiles de los posibles contratistas (también llamados consultores), sus procesos de licitación, los tipos de contratos que usan, y aspectos relacionados con garantías y seguros de cumplimiento, así como evaluación de capacidades.
- **Administración de proyectos:** Esta sección aborda ideas para mejorar la gestión e instrumentación de proyectos de eliminación o saneamiento de los apilamientos de llantas de desecho a partir de experiencias previas en los Estados Unidos.

### PARTICIPACIÓN DEL ESTADO EN LOS EE.UU.

En los Estados Unidos, las entidades federativas son el motor que promueve el control y la eliminación de los apilamientos de llantas de desecho. La amplia adopción de normas regulatorias por parte de los estados y su coordinación en el ámbito regional y con los gobiernos locales han contribuido a reducir dramáticamente la incidencia del acopio y disposición de llantas de desecho en forma clandestina. Sin embargo, las regulaciones locales tienen un impacto limitado en el control del movimiento y la acumulación de llantas de desecho en el nivel estatal. Las llantas de desecho se pueden transportar en forma económica a distancias cortas, por lo que generalmente se llevan a la jurisdicción más cercana que no esté sujeta a la normatividad, o al destino donde el costo

### Factores que influyen en los programas de saneamiento de las llantas de desecho

- **Cantidad:** El número de pilas de llantas y la cantidad de llantas acumuladas afectan el calendario de saneamiento.
- **Recursos:** Debe de contarse con los recursos financieros y humanos requeridos para planear, contratar, y monitorear los diversos proyectos de saneamiento de sitios.
- **Acceso:** Obtener acceso a un sitio de acopio para su saneamiento puede ser un proceso jurídico prolongado, dependiendo de los procedimientos definidos en la legislación correspondiente.
- **Infraestructura:** Se deben reconocer las limitaciones en la capacidad tanto de los contratistas como de los mercados, a fin de evitar impactos nocivos en el uso de las llantas de desecho que se generen. El objetivo general debe ser crear una infraestructura sustentable para el uso a largo plazo de los recursos derivados de las llantas de desecho.



de disposición sea menor. Los costos y los peligros relacionados con los grandes acumulamientos, así como la proliferación de nuevos apilamientos de llantas, son los factores que han impulsado la mayor parte de la legislación en los Estados Unidos.

En esta sección se define el importante papel normativo y de aplicación de la ley que los estados de la Unión Americana han asumido para controlar y eliminar los apilamientos de llantas de desecho, muchos de los cuales se formaron hace décadas, cuando no se regulaba su acopio. En consecuencia, muchos de los estados se han visto forzados a financiar el saneamiento de estos apilamientos “heredados”, ya que quienes los crearon carecen de los recursos necesarios para estas acciones. Además, no existe un programa de saneamiento que se pueda aplicar en forma universal, ya que los estados tienen características industriales, económicas, políticas y geográficas distintas. Por lo tanto, en esta sección se abordan diversas alternativas que los estados han utilizado con éxito para el desarrollo y financiamiento de este tipo de programas.

### Programas para el saneamiento de las llantas de desecho y su financiamiento

Los apilamientos de llantas de desecho no tienen un valor neto positivo, ya que la eliminación de los apilamientos cuesta más que lo que se pueda generar como ingreso por concepto del uso de las llantas de desecho. Si los propietarios de los apilamientos no pueden o no están dispuestos a financiar su limpieza, éstos se convierten en una carga para la ciudadanía, por lo cual debe proveerse financiamiento para eliminar los peligros que representan para la salud pública y el medio ambiente.

Los estados de la Unión Americana generalmente establecen mecanismos de financiamiento dentro de su legislación para emprender programas de gestión de llantas de desecho. En general, la mayoría de los programas empiezan documentando la magnitud del problema mediante la identificación de apilamientos, su cuantificación y el establecimiento de prioridades. Asimismo, es importante que exista una infraestructura para el procesamiento y mercadeo, ya que la mayoría de los programas de saneamiento buscan reutilizar las llantas de desecho que se eliminan de los lugares de acopio.

Los programas efectivos de gestión de llantas de desecho generalmente tienen las siguientes características financieras:

#### Fuente de financiamiento exclusiva

Para ser efectivos, los programas de gestión de llantas de desecho necesitan financiamiento sistemático y continuo, ya que se requieren programas permanentes de monitoreo y medidas coercitivas para prevenir la formación de nuevos acumulamientos una vez que se han eliminado los existentes. Anteriormente se

### Uso de un fideicomiso especial para el saneamiento de llantas de desecho en Oregon

Oregon inició su programa de gestión de llantas de desecho en 1988, depositando en un fideicomiso especial los ingresos netos del cobro de una cuota de \$1.00 dólar por cada llanta (menos \$0.15 para el concesionario y \$0.035 para gastos administrativos). De 1988 a 1993, Oregon eliminó 3,823,440 llantas en 63 sitios de acopio, a un costo de \$3,749,041 dólares, y emprendió otros 101 proyectos voluntarios de saneamiento. Con el fondo también se apoyó el desarrollo de mercados y se estableció un marco regulatorio permanente para los procesadores y transportistas. Cuando terminó el programa en 1993, quedaban alrededor de \$1.4 millones de dólares en el fideicomiso. Las iniciativas para la aplicación de la ley ahora reciben apoyo que se deriva de las cuotas para la gestión de residuos sólidos que se imponen a los rellenos sanitarios.

### Saneamiento de las llantas de desecho y el Fondo de Gestión para el Reciclaje de Llantas en California

En conjunto con la Ley de Reciclaje de Llantas de California de 1989, el estado estableció el Fondo de Gestión para el Reciclaje de Llantas [Tire Recycling Management Fund]. Los recursos se recaban a través del Departamento de Reciclaje y Recuperación de Recursos de California [California Department of Resources Recycling and Recovery o CalRecycle], antes conocido como el programa del Consejo para la Gestión Integrada de Residuos en California [California Integrated Waste Management Board], que cobra \$1.75 dólares por llanta sobre la venta de vehículos motorizados nuevos, equipo de construcción, o llantas para maquinaria agrícola. Los ingresos que genera el programa se usan para la gestión de las llantas de desecho, por ejemplo, en investigaciones sobre nuevos usos para las llantas recicladas, asistencia a programas locales de gestión, la regulación de transportistas y plantas recicladoras para proteger la salud pública y el medio ambiente, educación pública, acopio de llantas, y desarrollo de comercios. A través de este programa, el estado de California calcula que aproximadamente al 75 por ciento de las llantas de desecho generadas en el 2004 se le dio algún uso. Desde que inició el programa, California ha podido emplear algunos de los fondos recabados en subsidios para la gestión de llantas de desecho, incluyendo programas de saneamiento y amnistía, pavimentación con asfalto ahulado y concreto, agregados derivados de llantas, asistencia a empresas, y aplicación de las leyes que rigen la gestión de las llantas. Estos subsidios han servido para garantizar la sustentabilidad de los programas de gestión de llantas en el estado. Se puede encontrar más información sobre la Gestión de Llantas en California en el sitio web <http://www.calrecycle.ca.gov/Tires>.

### Iniciativas de aplicación de la ley en Florida dirigidas a transportistas y propietarios de llanteras

Como parte de sus esfuerzos para controlar la tira clandestina y la formación de apilamientos de llantas de desecho, Florida ha desarrollado normas que exigen que los transportistas de llantas se registren con el estado y que las tiendas de llantas únicamente usen transportistas registrados. En un condado se realizó un operativo en el que oficiales encubiertos se hicieron pasar por transportistas sin registro y ofrecieron a las tiendas llevarse las llantas de desecho a un costo menor al del mercado. Al concluir el operativo, 24 gerentes que habían aceptado el ofrecimiento recibieron citaciones judiciales de la procuraduría del estado por infracciones tipificadas castigables con multa de hasta \$1,500 dólares y un año de cárcel. El juez generalmente fue benévolo con los gerentes por ser la primera vez que cometían un delito. El operativo sirvió como advertencia a los propietarios y para captar la atención del público sobre la forma correcta de disponer de las llantas usadas.

han usado con éxito fondos fiduciarios para lograr uniformidad, pero los recursos de los fideicomisos se pueden reasignar a otras prioridades no relacionadas con las llantas en caso de algún déficit en el presupuesto estatal. Existe más información sobre los programas y su financiamiento en la página web <http://www.epa.gov/epawaste/conservation/materials/tires/laws.htm>.

### Recursos adecuados

En general, los niveles de financiamiento equivalentes a por lo menos \$1 dólar por cada llanta de desecho han resultado adecuados para implementar programas integrales en los que inicialmente se compromete del 35 al 50 por ciento de los fondos para la eliminación de los apilamientos de llantas. Con frecuencia se dispone de subsidios para el desarrollo de mercados que ayudan a lanzar estos programas. El otorgamiento de subsidios sería una opción viable para los programas que buscan apoyo en México.

### Flexibilidad y acumulación de fondos

Los fondos para saneamiento generalmente se acumulan en las etapas iniciales del programa, cuando se están identificando, priorizando y abordando por la vía legal los apilamientos de llantas de desecho. Estos fondos permiten que posteriormente se cumplan los compromisos contractuales y se disponga de fondos para contingencias. A medida que se completa el saneamiento, generalmente es conveniente redirigir el financiamiento a otras prioridades del programa o reducir los ingresos.

### Programas normativos y de otorgamiento de permisos

Los estados han visto que es necesario contar con reglamentos e infraestructura para que sus programas de saneamiento sean eficientes y efectivos. Si la gestión, el transporte y la disposición de las llantas de desecho que se generan diariamente no se controlan mediante reglas, se crearán nuevos acumulamientos a medida que se vayan eliminando las anteriores. Aunque algunos estados han tenido éxito otorgando permisos limitados o sin requerir ningún permiso, otros monitorean el movimiento de las llantas con sistemas de manifiestos integrales y exigen permisos a todas las empresas involucradas. Con ambos enfoques ha habido éxitos y fracasos. El objetivo principal de los programas normativos o de permisos generalmente es garantizar que el transporte, almacenamiento, reciclaje y disposición de las llantas sean adecuados, así como prevenir la formación de apilamientos clandestinos.

### Centros de procesamiento y acopio

Algunos de los apilamientos de llantas de desecho más grandes se han formado en centros de acopio que se crearon previendo un posterior procesamiento, generalmente antes de que se instrumentaran los programas estatales. Prácticamente todos los programas estatales regulan los centros de procesamiento y acopio para controlar la acumulación de llantas de desecho.

Generalmente los centros de acopio deben contar con permiso o estar registrados para almacenar llantas

de desecho en cantidades mayores a un mínimo establecido que normalmente oscila entre 50 y 10,000. Se debe considerar cuidadosamente el número mínimo que habrá de establecerse. La experiencia indica que la cantidad óptima es de 1,500 a 2,500 piezas, lo cual permite a una tienda de llantas nueva llenar un camión completo y así lograr una eficiencia óptima en el transporte.

Los centros de procesamiento y acopio a mayor escala generalmente cuentan con permiso y registro. Normalmente se establecen límites máximos de acopio al expedir el permiso. Un límite bajo puede afectar la eficiencia en las operaciones al impedir que se tenga un buen mantenimiento o un inventario adecuado para compensar las variaciones inherentes en las remesas, el tiempo muerto del equipo, o las fluctuaciones del mercado. Por otro lado, un límite demasiado alto puede incrementar el nivel de peligro para la ciudadanía.

### Transportistas

Los transportistas se pueden considerar el eslabón más débil en la cadena de gestión de las llantas de desecho. En el negocio de las llantas de desecho, la parte que corresponde al transporte es extremadamente competitiva y en última instancia, la cuota de disposición representa un porcentaje considerable de lo que los transportistas cobran a los nuevos comerciantes de llantas. Generalmente se necesitan controles para reducir la posibilidad de que los transportistas usen medidas de disposición inadecuadas.

Una de las opciones que utilizan los estados es registrar a los transportistas anualmente y entregarles engomados, distintivos, o placas que deben colocar en lugares predeterminados en los vehículos. Esta opción permite a los encargados vigilar el cumplimiento desde sus

propios vehículos. Algunos estados exigen garantías financieras para cada vehículo o empresa que participe en el manejo de llantas de desecho, en montos de hasta \$20,000 dólares por empresa. Los transportistas pequeños generalmente están exentos de esta medida; sin embargo, este es el grupo que más tiende a tirar llantas en forma clandestina. La mayoría de los estados no exigen fianzas a los transportistas, o exigen sólo fianzas relativamente bajas por vehículo o por empresa.

### Llanteras

Las tiendas de llantas pueden desempeñar un papel clave en la prevención de la disposición clandestina de las llantas de desecho. Si el propietario o encargado de una llantera recibe una cotización para la disposición de las llantas menor al precio de mercado, probablemente se trata de algún tipo de disposición ilícita. Sin embargo, si se exige al propietario o encargado conservar registros de los números de engomado del transportista y las cantidades que recogió, se mantiene un rastro documental susceptible de ser auditado. Si el estado cuenta con un sistema de manifiestos se puede recalcar la responsabilidad de las llanteras exigiéndoles que conserven una copia de cada manifiesto que muestre el sitio final de disposición, tal como se hace en Oklahoma y Texas. Otros estados exigen que se conserven recibos del transporte y la disposición en la tienda; sin embargo, los recibos no tienen que entregarse al órgano regulador. Este sistema permite, no obstante, que la dependencia audite los registros de la llantera sin incurrir los costos administrativos de un sistema formal de manifiestos.

### Aplicación de la ley y tácticas para la recuperación de costos

La aplicación de la ley y las tácticas para la recuperación de fondos están íntegramente ligadas. Dado que la meta es facilitar el acceso a los sitios

### Uso de convenios para la remoción de llantas en Illinois

Una opción para evitar obstáculos para la aplicación de la ley y recuperar costos es el uso de un convenio de remoción voluntaria de llantas entre el propietario del inmueble donde se encuentren las llantas y la dependencia o el órgano regulador. Este convenio voluntario que se celebra por escrito permite que se retiren del lugar las llantas de desecho sin costo para el estado. Se deben establecer disposiciones para garantizar que las llantas acumuladas se retiren sin descuidar la protección de la salud humana y el medio ambiente durante toda la vigencia del convenio. Las autoridades pueden establecer plazos máximos para la remoción, como 3 meses si en el sitio hay 1,000 o menos llantas, o 1 año si el sitio tiene más de 10,000 llantas. Se pueden conceder prórrogas en el plazo de remoción si el propietario del inmueble está obrando de buena fe para cumplir con el convenio.

### Saneamiento forzoso en Illinois

El Estado de Illinois constituyó el Reglamento 415, Título XIV, que rige todas las prácticas de la gestión de las llantas de desecho; la Sección 55.3 de este reglamento permite a la EPA de Illinois notificar a los propietarios de terrenos sobre los peligros ambientales y de salud pública relacionados con el acopio de llantas de desecho, para que a su vez el propietario tenga la oportunidad de desarrollar, presentar a la EPA de Illinois, e implementar, un plan de saneamiento. Si el propietario no está dispuesto o en posibilidades de cumplir con el plazo de remoción, o no presenta un calendario de remoción en respuesta a la notificación, las autoridades conceden al estado acceso a la propiedad. Como una precaución adicional para confirmar que se protejan los derechos constitucionales del propietario, la EPA de Illinois utiliza un convenio de acceso que el propietario firma antes de que se realice el saneamiento. Si el propietario se niega a firmar el convenio de acceso, la EPA de Illinois puede acudir a los tribunales a solicitar a un juez el acceso. El convenio de acceso de la EPA de Illinois se puede consultar en <http://www.epa.gov/reg5rcra/wptdiv/solidwaste/tires/guidance/index.htm>.

de acopio y eliminar los apilamientos de llantas de desecho, es importante evitar crear obstáculos legales y económicos que puedan retrasar el saneamiento. Varios estados permiten que sus dependencias celebren convenios de acceso y saneamiento de apilamientos de llantas a expensas del erario y sin recuperar costos. Este enfoque agiliza la limpieza de los centros de acopio, y el propietario o encargado generalmente aceptan de buen grado la ayuda; sin embargo, incrementa los gastos para el estado y no representa ningún incentivo para el control de los centros de acopio. Esta medida condescendiente también puede suscitar que se formen más acumulamientos, ya que los propietarios pueden simplemente optar por abrir otro centro de acopio en un lugar cercano.

Otros estados — Illinois, Nebraska, Nueva York, y Ohio, por ejemplo, cuentan con disposiciones que permiten a las dependencias ingresar a los centros de acopio a realizar labores de saneamiento sin perder el derecho a reclamar la recuperación de los costos.

### Asistencia jurídica especializada

Obtener apoyo de los expertos de un órgano regulador puede representar un obstáculo mayúsculo, por lo que asignar personal jurídico especializado, tanto en la dependencia como en la procuraduría, puede ayudar a obtener buenos resultados en las iniciativas de tipo jurídico.

### Apoyo jurídico inicial

Apoyar firmemente las diligencias jurídicas iniciales (denuncia, testimonio y toma de declaraciones) con una preparación sólida, una buena investigación, y el testimonio de expertos, puede incentivar a los encausados a tomar decisiones y enviar un mensaje a otros elementos que participan en la industria de las llantas de desecho.



## Negociaciones

Cuando el caso es sólido y se determina cuál es la dependencia reguladora a la que corresponde, algunos propietarios de apilamientos de llantas reconocen la ventaja económica de tramitar ellos mismos el saneamiento. Normalmente ellos pueden movilizar a los contratistas y seleccionar métodos de disposición a un costo más bajo que la dependencia reguladora. Asimismo, pueden evitar los gastos jurídicos y administrativos que se incurrirían si el caso se maneja por la vía jurídica.

## Cobro de una sentencia judicial

Únicamente un pequeño porcentaje de las acciones judiciales o sentencias emitidas contra los propietarios y operadores logran llegar a buen término. Los infractores pueden ocultar sus bienes, declararse en quiebra, o desaparecer. La finalidad principal de la recuperación de costos no es lograr que se emitan sentencias judiciales contra infractores que no tienen bienes con que pagar, sino crear un incentivo para que los propietarios de un sitio realicen el saneamiento de los mismos.

## Embargos

Los embargos pueden ser el método más efectivo para recuperar costos de los propietarios de apilamientos de llantas. La mayoría de los estados no ejecutan el embargo, sino pretenden obtener algún ingreso de los pagos provisionales que se negocien o de la posterior venta de la propiedad (especialmente si es de tipo comercial).

## PLANEACIÓN DEL SANEAMIENTO

La eliminación de los apilamientos de llantas de desecho representa un reto técnico, económico y político. La limpieza implica factores complicados, como el clima, el contenido de los acumulamientos, y la topografía subyacente. En esta sección se presentan importantes observaciones que los estados han considerado tanto para los programas generales de saneamiento como para los proyectos individuales de eliminación.

## Identificación de apilamientos de llantas y trazo de mapas de localización

La identificación de los apilamientos de llantas de desecho es el primer paso para definir la magnitud del problema en cualquier jurisdicción. Los métodos más efectivos han involucrado a todos los niveles de gobierno y a las autoridades encargadas de la aplicación de las normas, así como a los grupos industriales y la denuncia ciudadana.

## Gobierno estatal

Las dependencias estatales encargadas de la gestión de residuos sólidos y salud pública desempeñan un importante papel en las iniciativas de identificación de los apilamientos de llantas, y tienen una amplia gama de estructuras organizacionales. Las dependencias centralizadas despachan personal a todas las regiones del estado para trabajar con los funcionarios delegacionales, municipales y locales en la identificación y clasificación de apilamientos. Otras dependencias designan una persona en cada región para que identifique los apilamientos,

o distribuyen la responsabilidad a todo el personal de acuerdo a zonas geográficas o áreas de especialización industrial. Los grupos de identificación pequeños son más fáciles de capacitar y adquieren más conocimientos a través de su experiencia y profundización en el tema. Sin embargo, estas ventajas se contrastan con un mayor tiempo de viaje, mayor costo, y las dificultades para hacer visitas periódicas para examinar el cambio en las condiciones del sitio.

Una solución intermedia efectiva es usar una amplia base de personal que identifique los apilamientos de llantas en su área de servicio y luego encargar a un grupo más pequeño que clasifique y establezca prioridades para el saneamiento. Los contratistas o consultores pueden ayudar a complementar los recursos de las instancias en las etapas iniciales de la implementación del programa.

## Gobiernos del condado y locales

Los programas más efectivos se han apoyado en los gobiernos municipales y locales para identificar los apilamientos de llantas de desecho. El personal de policía, limpia, control de plagas, gestión de residuos sólidos, salud pública, parques, bomberos, y vigilancia forestal ha ayudado a identificar acumulamientos de llantas que han encontrado durante sus actividades cotidianas.

Uno de los estados de la Unión Americana envió encuestas a todos los gobiernos de los condados y municipios pidiendo que identificaran la ubicación, domicilio, y propietario de los apilamientos. La cooperación en estas iniciativas se puede reforzar en los objetivos y la metodología de la encuesta, y explicando que el programa cuenta con la capacidad de ayudar a los gobiernos locales a sanear apilamientos sin que tengan que hacer uso de sus propios recursos.

## Métodos de identificación adicionales

También se pueden usar otros métodos para realizar la identificación, incluyendo los siguientes:

- Se puede establecer un número telefónico al que la ciudadanía puede llamar gratuitamente para denunciar los apilamientos y la tira clandestina de llantas.
- Tanto los anuncios de servicios públicos como la promoción de las actividades iniciales de saneamiento animan a la gente a denunciar otros acumulamientos de llantas.
- Los representantes de los llanteros, de los deshuesaderos de autos, y de los transportistas pueden hacer labor de difusión dentro de sus ramos para exhortar a sus miembros a que identifiquen los apilamientos de llantas.

## Información necesaria

Una vez que se identifica un una pila de llantas, se realiza una clasificación para recabar información necesaria para la priorización, la estabilización y el saneamiento. La siguiente información resulta especialmente útil,



## Frontera 2012: Inventario y mapeo de las llantas de desecho en la frontera México-EE.UU.

En el 2007, con la intención de mejorar la gestión de las llantas de desecho en la frontera México-EE.UU., la Oficina de Residuos Sólidos de la USEPA (actualmente denominada Oficina de Conservación y Recuperación de Recursos [Office of Resource Conservation and Recovery]) emprendió un proyecto para crear un inventario completo de los tiraderos de llantas de desecho (incluyendo sitios en donde existieran llantas o sitios que hubieran sido recientemente saneados). El objetivo principal era compilar los datos existentes para crear un inventario de todos los apilamientos de llantas que se hubieran identificado en el lado mexicano de la frontera oriente (a lo largo de Nuevo México y Texas). En el 2002, la Región 9 de la EPA elaboró un inventario de apilamientos de llantas en la frontera poniente (a lo largo de California y Arizona) de México y Estados Unidos, el cual se actualizó en el 2003 y 2004. Después de compilar datos sobre el lado mexicano de la frontera oriente, éstos se combinaron con otros datos para crear un mapa de información geográfica sobre los apilamientos de llantas de desecho en la región fronteriza. Esta información se encuentra en [www.epa.gov/epawaste/conserves/materials/tires/pubs/2012-tires.pdf](http://www.epa.gov/epawaste/conserves/materials/tires/pubs/2012-tires.pdf).

particularmente en el caso de acumulamientos de gran tamaño

- Ubicación, incluyendo domicilio, ciudad, condado, y coordenadas del sistema de posicionamiento global (GPS).
- Nombre, domicilio, número telefónico y participación del propietario u operador.
- Características de la pila, tales como dimensiones, tamaño de las llantas, antigüedad, compactación de las llantas, si están amontonadas o intercaladas, el porcentaje de llantas enteras y trituradas, y presencia de rines y otro tipo de desechos.

### Sugerencia para el mapeo

La revisión de los antecedentes del sitio, tales como fotografías aéreas, mapas topográficos, o mapas tributarios antes de calcular la cantidad de llantas de desecho, puede ayudar a reducir el trabajo necesario para realizar el mapeo de campo. Esta información generalmente se encuentra en las bases de datos gubernamentales o en otras disponibles en Internet. La Guía para el Saneamiento de las llantas de desecho [Scrap Tire Cleanup Guidebook] de la EPA también contiene una sección sobre mapeo, la cual se puede encontrar en la dirección [www.epa.gov/epawaste/conserves/materials/tires/pubs/2012-tires.pdf](http://www.epa.gov/epawaste/conserves/materials/tires/pubs/2012-tires.pdf).

- Características del sitio, incluyendo espacio entre los montones de llantas, tipo de suelo, topografía, acceso, vías de desagüe, así como aguas superficiales cercanas, zonas habitacionales, comercios, y densidad de población.
- Condiciones del sitio que tengan algún efecto sobre el control de incendios, como vías de acceso, recursos hidráulicos, líneas cortafuego en el perímetro y en el interior, árboles y arbustos.

La información sobre las características y las condiciones del sitio sirve para realizar la estabilización y planear el control de incendios en los tiraderos de mayor tamaño. En el caso de los tiraderos pequeños, únicamente se necesita información sobre la ubicación, el propietario u operador, y las características de la pila de acopio.

### Trazo de mapas

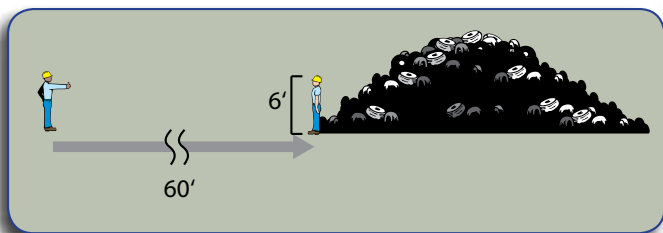
El trazo de mapas de los tiraderos de llantas ofrece beneficios políticos, técnicos y económicos, ya que permite que los funcionarios públicos y la ciudadanía entiendan la magnitud del problema al ilustrarse gráficamente la amplia distribución de los acumulamientos de llantas de desecho en el estado. El mapeo ayuda a incrementar la eficiencia, ya que sustentan la coordinación de las actividades relacionadas con los tiraderos, como las inspecciones.

### Técnicas para el cálculo de cantidades

Luego de identificar los tiraderos, se calcula la cantidad de llantas para realizar la priorización, la planeación del programa, elaborar un presupuesto, y gestionar contratos. La estimación de cantidades es relativamente sencilla en principio, pero puede verse afectada por muchas variables.

Durante la identificación e inspección inicial del sitio se pueden verificar las dimensiones de cada segmento de llantas usando alguna técnica como la medición con cinta, con rueda de medición, o con pasos calibrados. Se requieren dos personas para medir con cinta de fibra de vidrio de 100 pies de longitud, y esta técnica se recomienda más para terrenos desnivelados o en casos en los que se tenga que dar testimonio en un juzgado. En superficies firmes y niveladas se puede usar una rueda de medición de gran diámetro, pero no se recomienda para terrenos accidentados o lodosos. En la mayoría de las superficies se puede usar la medición con paso calibrado, pero su exactitud depende de la capacidad de la persona que mide para mantener un paso uniforme. Si se toman medidas desde el punto central del apilamiento, los cálculos posteriores se simplifican. Asimismo, se deben tomar fotografías durante las inspecciones de campo para documentar las condiciones del sitio, monitorear los cambios entre una inspección y otra, y para que sirvan como prueba en el ámbito jurídico.

Generalmente resulta difícil calcular la profundidad o elevación de un apilamiento de llantas, ya que los lados están en declive y no es fácil medirlos. Una técnica consiste en que una persona cuya estatura se conozca se acerque lo más posible al montículo, mientras que otra persona observa a cierta distancia y mide la profundidad



*Determinación de la profundidad de la pila de llantas*

en términos de la estatura de la primera persona. El observador se debe colocar por lo menos a una distancia equivalente a 10 veces la profundidad estimada del montículo, a fin de minimizar la distorsión del ángulo. También se puede usar un catalejo o algún artefacto compacto para la medición. En el caso de apilamientos grandes, es conveniente subirse a ellos para recabar información sobre el contorno superior, las características del montículo, sus dimensiones, y su firmeza (la cual refleja las variaciones de densidad relacionadas con la compactación, la antigüedad y el intercalado). Las llantas acumuladas tienen formas irregulares, son flexibles, e inestables, por lo que se deben extremar cuidados al subir al montículo. Existen además otros riesgos para los encargados de la medición, como son los mosquitos, roedores y serpientes, que son portadores de enfermedades, por lo que deben estar alertas y realizar sus movimientos con cuidado.

Se pueden usar fotografías aéreas para definir las dimensiones de los apilamientos grandes, pero se debe establecer una escala con base en objetos cercanos. Para ser efectivas, las fotografías aéreas deben tomarse verticalmente a fin de evitar la distorsión dimensional. Para calcular la profundidad y la densidad se requiere observación desde la superficie. Se pueden hacer reconocimientos aéreos detallados, pero se debe conocer o estimar la topografía del suelo sobre el cual se encuentra el apilamiento. Los reconocimientos aéreos son costosos, y su exactitud es cuestionable, a menos que el apilamiento de llantas sea lo suficientemente denso como para reducir el margen de error asociado con las irregularidades en la profundidad.

Como primer paso, el volumen del apilamiento se calcula usando datos basados en las dimensiones. En algunos casos, las formas irregulares del apilamiento de llantas se pueden convertir a rectángulos, círculos, u otras formas geométricas sencillas, para simplificar los cálculos sin afectar la exactitud. En otros casos, un apilamiento único con forma irregular se puede medir como si fueran dos o más segmentos rectangulares conectados con diferentes dimensiones. Si se tomaron medidas desde el punto central de la pendiente, el volumen del apilamiento rectangular es simplemente el total que se obtiene al multiplicar la longitud, anchura y profundidad. Aunque este método no es perfecto desde el punto de vista de la geometría, la

### El volumen de los apilamientos de llantas que tienen formas comunes se puede calcular con las siguientes fórmulas:

#### Círculo:

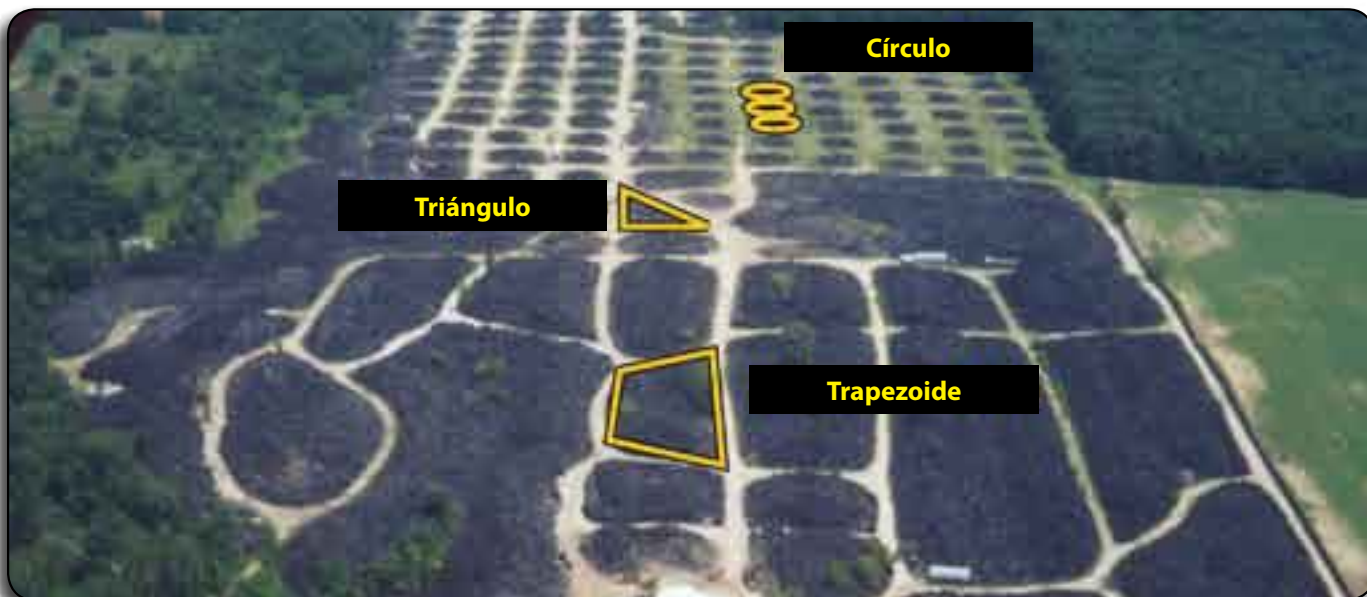
$$\pi r^2 d = 3.14 \times \text{radio del círculo} \times \text{radio del círculo} \times \text{profundidad}$$

#### Triángulo:

$$\frac{1}{2} \text{lap} = \frac{1}{2} \times \text{longitud} \times \text{anchura de la base} \times \text{profundidad (de la base a la punta del montículo)}$$

#### Trapezoide:

$$\frac{1}{2} l (a_1 + a_2) p = \frac{1}{2} \text{longitud} \times (\text{anchura de la base} + \text{anchura en la parte superior}) \times \text{profundidad}$$



*Determinación del volumen de los apilamientos de llantas*

**Cuadro 1. Cálculo de cantidades en los apilamientos: Llantas enteras vs trituradas**  
**Factores que afectan la densidad de las llantas**

Apilamiento de llantas enteras	Apilamiento de llantas trituradas
<p><b>Profundidad:</b> Al aumentar la compactación de las llantas en el apilamiento se incrementa la densidad</p> <p><b>Antigüedad:</b> Permite más compactación con el tiempo y por lo tanto, incrementa la densidad</p> <p><b>Calor:</b> Al aumentar la flexibilidad del hule se incrementan la compactación y la densidad</p>	<p><b>Tamaño de los trozos:</b> A menor trozo de llanta generalmente aumenta la densidad.</p> <p><b>Contenido de alambre:</b> Al remover el alambre se reduce la densidad.</p> <p><b>Profundidad:</b> El aumento en la profundidad incrementa la compactación y la densidad generada por la superposición de las tiras (trozos) de llanta.</p> <p><b>Movimiento del equipo:</b> El movimiento del equipo en las rampas o superficies durante el apilamiento aumenta considerablemente la densidad, así como la probabilidad de que la pila de llantas se incendie espontáneamente</p>

simplificación no altera significativamente la estimación del volumen total.

El segundo paso para calcular la cantidad de llantas en una pila de acopio consiste en calcular la densidad del apilamiento, o la cantidad de llantas de desecho que contiene cada metro cúbico. El volumen se convierte en cantidad o peso al asignarle una densidad. Dado que la mayoría de las pilas de acopio contienen una mezcla de llantas de varios tamaños, la densidad normalmente se expresa en términos del equivalente en llantas de pasajero (PTE, por sus siglas en inglés), que es igual a 9 kg (20 libras) por definición. Las densidades de la mayoría de las llantas de desecho son más o menos equivalentes cuando se expresan en términos de PTE/yarda cúbica. Por ejemplo, la llanta de una camioneta mediana pesa aproximadamente 45 kg (100 libras o cinco PTE) y ocupa un volumen equivalente a cuatro o cinco llantas de pasajero en una pila de acopio. La equivalencia refleja en forma más precisa el uso, procesamiento y disposición posterior de la llanta, ya que la mayoría de las actividades de saneamiento y de otro tipo se basan en el peso.

La densidad de un apilamiento de poca altura con llantas sueltas y enteras es normalmente de 10 PTE/yarda cúbica, pero puede variar de 8 a 27 PTE/yarda cúbica. Una densidad de menos de 10 PTE/yarda cúbica corresponde a llantas con rin sin compactar, pero se contabiliza únicamente el peso del hule, ya que se presupone que los rines se retiran antes de transportar las llantas. El apilamiento o entrelazado incrementa la densidad efectiva hasta 12 a 15 PTE/yarda cúbica en el caso de las llantas de pasajeros, y 13 a 18 PTE/yarda cúbica en el caso de las llantas para camionetas medianas.

La densidad de los apilamientos de llantas trituradas puede variar de 30 a 90 PTE/yarda cúbica (de 600 a 1,800 libras/yarda cúbica). El rango más bajo de densidad le corresponde a las pilas de poca altura sin compactar y con partículas grandes y uniformes, como es el caso de las llantas que han pasado una sola vez por la trituradora. El rango intermedio representa montones más altos

de combustible derivado de llantas (CDL) que se han compactado con varios movimientos de la maquinaria pesada durante el apilamiento. El rango más alto corresponde a la mezcla de trozos de llantas y tierra.

Una vez que se han calculado el volumen y la densidad del apilamiento, se calcula la cantidad de llantas (o su peso) multiplicando el volumen (yardas cúbicas) por la densidad (PTE/yarda cúbica). El resultado es una cantidad de llantas expresado como PTE. La cantidad de llantas también se puede expresar como el peso (toneladas), dividiendo entre 100 PTE/tonelada.

Aunque el método de cálculo anteriormente descrito se ha usado en cientos de apilamientos de llantas de desecho, los siguientes factores pueden afectar su exactitud:

- **Topografía:** La topografía del subsuelo puede afectar considerablemente el volumen del apilamiento y la cantidad de llantas, pero tal vez no se alcance a apreciar en las observaciones. Los apilamientos más grandes son más difíciles de calcular, ya que pueden ocultar barrancos o fosas llenos de llantas. Los apilamientos de llantas que se encuentran en las laderas también son difíciles de calcular debido a que las llantas pueden ocultar curvas o partes más empinadas de la ladera.
- **Falta de uniformidad:** Un apilamiento puede dar la apariencia de tener únicamente llantas sueltas en la superficie, pero puede haber en él llantas entrelazadas o trituradas, con lo cual aumenta considerablemente la densidad y la cantidad de llantas.
- **Contaminación:** Los apilamientos se pueden contaminar con agua, tierra, partes de automóvil, u otros desechos que no se alcanzan a ver desde la superficie. El agua y la tierra pueden incrementar considerablemente la densidad del apilamiento y los costos del saneamiento.



**Cuadro 2. Factores a considerar al evaluar los impactos de los apilamientos de llantas de desecho**

IMPACTO	AIRE	AGUA	POBLACIÓN
<b>PROBLEMA</b>	Impacto de la columna de fuego sobre los habitantes, comercios, y la calidad atmosférica regional	Impacto de los contaminantes que se encuentran en el hule y los residuos de cenizas de las llantas sobre el agua superficial o subterránea	Impacto de los apilamientos existentes sobre los habitantes de la zona
<b>FACTORES A CONSIDERAR</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dirección preponderante del viento</li> <li>• Características del apilamiento, como altura, árboles y arbustos, y líneas cortafuego</li> <li>• Uso de suelo en los alrededores</li> <li>• Receptores sensibles, como escuelas, aeropuertos, e instalaciones públicas de gran tamaño (en un perímetro de 0.5 a 5 millas)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Características del suelo, como permeabilidad</li> <li>• Características del acuífero, como profundidad de los mantos y uso del agua potable</li> <li>• Desagüe en el sitio</li> <li>• Proximidad a cuerpos de agua superficial</li> <li>• Receptores sensibles, como humedales, pesquerías, o especies en peligro</li> <li>• Características del apilamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cercanía a la población</li> <li>• Especies de mosquitos</li> <li>• Enfermedades transmitidas por mosquitos identificadas en la localidad o la región</li> <li>• Plagas de roedores/serpientes</li> <li>• Características del apilamiento</li> </ul>

### Priorización de los apilamientos de llantas

Como se entiende que los recursos son limitados, la estabilización, el saneamiento, o ambos, se deben iniciar sólo después de realizar una secuencia priorizada que se base en la comparación de los peligros que representan los distintos apilamientos. El sistema de priorización puede reflejar los impactos a la ciudadanía y el medio ambiente, y especialmente los impactos sobre receptores sensibles, como son las escuelas, hospitales, guarderías, y asilos de ancianos.

En uno de los métodos de priorización se usa el tamaño del apilamiento como multiplicador, ya que éste normalmente magnifica los impactos de un incendio de llantas. Los rangos deben reflejar las cantidades de llantas en los apilamientos que se pretenden priorizar. Por ejemplo:

Menos de 100,000 llantas =	1
100,000 a 250,000 llantas =	2
250,000 a 1,000,000 llantas =	3
Más de 1,000,000 llantas =	4

El impacto potencial de las categorías generales de aire, agua y población normalmente se evalúa en forma independiente (con base en los datos de la evaluación inicial del sitio) usando una escala del 1 al 10, siendo 10 el valor que indica el mayor impacto potencial. Estos tres índices se suman y multiplican por el factor del tamaño. El tamaño del apilamiento es un elemento importante, pero el impacto es el factor principal.

Los apilamientos se pueden priorizar con base en la puntuación obtenida, por lo que la mayor puntuación representará la prioridad más alta. Los apilamientos generalmente se clasifican en grupos con el mismo índice de prioridad, con una separación de tipo

numérico. Dentro de los grupos, las diferencias son generalmente pequeñas y la secuencia para el saneamiento se puede basar en la facilidad de acceso al sitio, la disponibilidad del contratista, el mercado, o la ubicación.

La uniformidad es un elemento extremadamente importante de cualquier sistema de priorización de apilamientos, y usar el menor número posible de evaluadores incrementa la uniformidad. Sin embargo, puede resultar conveniente que dos o tres evaluadores comparen sus calificaciones para que se puedan identificar y corregir las inconsistencias subjetivas.

Algunos estados encomiendan a contratistas o consultores independientes la priorización con el fin de limitar las influencias de tipo político. El uso de un proceso de priorización con una buena base técnica y realizado por evaluadores sin prejuicios también optimiza el desarrollo del programa.

### Propiedad del predio

Los apilamientos de llantas de desecho generalmente se localizan en terrenos que son propiedad o están bajo en control de una o más personas. Antes de iniciar un proyecto de saneamiento de llantas de desecho, es fundamental obtener ya sea un permiso escrito de acceso otorgado por el propietario, o una orden judicial de acceso para la remoción de las llantas. En muchos predios también es necesario hacer una delimitación para verificar que las obras de saneamiento no se extiendan sin querer a propiedades colindantes, ya que en ese caso se necesitarían otros permisos de acceso u órdenes judiciales.

Antes de ingresar a algún predio para el saneamiento se deben considerar los siguientes aspectos:

- **Utilización:** El predio puede contener inmuebles, estructuras, y otros servicios públicos, como electricidad, gas natural, agua y/o drenaje, que podrían ser de utilidad para el contratista durante las actividades de saneamiento. En caso de que se vaya a usar cualquiera de ellos, es conveniente contar con un convenio escrito en el que se establezcan las condiciones de uso, las obligaciones, y la remuneración correspondiente, a fin de evitar malos entendidos posteriormente.
- **Daños:** Algunos estados han sido demandados por daños cometidos por contratistas que fungen como sus agentes. En algunos casos, el daño ya había sido cometido por terceras partes antes de iniciar el saneamiento. Como medida preventiva, es conveniente tomar y fechar fotografías antes, durante y después del saneamiento para documentar las condiciones del sitio.
- **Restauración:** El agua en las llantas y la lluvia pueden hacer que se genere lodo si el suelo donde está el apilamiento no es estable. La maquinaria pesada puede crear surcos profundos, y los escurrimientos pueden erosionar la superficie. Después de recoger las llantas, generalmente los contratistas deben nivelar la tierra que haya quedado con surcos. En la mayoría de los casos, la erosión se puede controlar restableciendo la vegetación.

Reconocer el valor del predio y obtener y mantener la cooperación del propietario facilita las labores de saneamiento. Si el propietario no desea cooperar, se deberá obtener una orden judicial para ingresar al predio y retirar las llantas de desecho. La legislación estatal puede ayudar en este trámite si se promulgan leyes para crear un proceso administrativo para ordenar la limpieza de llantas de desecho. Un ejemplo lo constituyen las Reformas al Código de Ohio 3734.85, que se pueden encontrar en la página <http://www.ohio.gov/government.htm>.

### Comunicación

El saneamiento de los apilamientos de llantas de desecho involucra a muchos grupos, incluyendo contratistas, gobiernos municipales, políticos, y la prensa. Es fundamental informar y coordinar a estos grupos para lograr el éxito de los programas de recolección de llantas y los proyectos de saneamiento.

### Contratistas

Cualquier requisito especial para el proyecto de saneamiento se debe definir claramente en planes y especificaciones detallados que habrán de entregarse a los candidatos a contratistas antes del proceso de licitación. Los siguientes son ejemplos de algunos de los puntos que deben abordarse en dichos planes:

- Descripción del predio

- Estimación de la cantidad de llantas
- Longitud, anchura, y altura del apilamiento de llantas
- Procedimientos operativos
- Cercado perimetral
- Iluminación
- Seguridad
- Líneas cortafuego
- Secuencia para la remoción de apilamientos
- Acceso estabilizado y vialidades en el perímetro
- Control de vegetación, mosquitos y escurrimientos
- Fuente y distribución del agua
- Plan contra incendios
- Servicios públicos
- Informes de avances

Muchos contratistas han desarrollado sus propios métodos para optimizar la eficiencia de las operaciones de saneamiento con base en su experiencia. Se debe elaborar una descripción inicial del proyecto a fin de sentar una base sólida para la comunicación y reducir al mínimo la necesidad de discusiones ajenas a las actividades planeadas. La página <http://www.epa.gov/reg5rcra/wptdiv/solidwaste/tires/guidance/index.htm> contiene un ejemplo de documentos del proceso previo a la licitación elaborados por los estados de Iowa e Illinois.

### Funcionarios electos

Los funcionarios locales y estatales en puestos de elección popular desempeñan un papel decisivo en la creación y aplicación continua de los programas de saneamiento. Es importante informarles sobre los avances en la instrumentación del programa y los proyectos de saneamiento. Una buena medida de relaciones públicas consiste en invitar a los funcionarios electos a visitar los apilamientos de llantas antes y después de la limpieza.

### Gobiernos locales

Los administradores locales y los departamentos de policía y bomberos pueden proporcionar un importante apoyo a un costo bajo o nulo si se les mantienen informados sobre el proyecto. Informar a estos grupos acerca de los planes y los beneficios para la comunidad ayuda a fomentar la cooperación.

### Alianzas de colaboración

Los equipos de trabajo intergubernamentales e intragubernamentales, la colaboración entre entidades públicas y privadas, y las alianzas de nivel internacional pueden ayudar a lograr mucho, ya que abarcan toda una zona, combinan bienes y recursos, y trabajan en conjunto para crear y llevar a cabo los programas de saneamiento. Un beneficio adicional de estas alianzas es que fomentan la cooperación y fortalecen las relaciones entre ambos países. En la página <http://www.epa.gov/Border2012/fora/waste-forum/tires-done.html> existe información sobre las alianzas para el saneamiento de llantas de desecho que

## Esfuerzo Colaborativo de la Iniciativa de Llantas: Alianza de Colaboración para el saneamiento de llantas de desecho en la región fronteriza México-EE.UU.

Los estados y municipios fronterizos trabajan con la industria llantera para abordar el problema de las llantas en la frontera a través de una iniciativa de Frontera 2012 conocida como el Esfuerzo Colaborativo de la Iniciativa de Llantas, cuyo propósito es elevar el nivel de conocimiento y comprensión de la Iniciativa para la Gestión Integrada de las Llantas de Desecho en la Frontera México-EE.UU., un marco de referencia para la gestión de las llantas de desecho.

### Colaboradores

**Secretarías de Protección Ambiental:** El 14 de agosto de 2008, los dirigentes de las dependencias ambientales de los 10 Estados Fronterizos firmaron la Carta de Entendimiento de la Iniciativa de Llantas en la Conferencia de Gobernadores Fronterizos realizada en Hollywood, California. Los 10 estados fronterizos son California, Arizona, Nuevo México, Texas, Baja California, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, y Tamaulipas.

**Gobernadores de los estados fronterizos:** En la XXVI Conferencia Anual de Gobernadores Fronterizos los gobernadores firmaron una declaración conjunta para apoyar la iniciativa de llantas con los representantes de la Mesa de Trabajo de Medio Ambiente.

**Municipios fronterizos:** Varios municipios fronterizos han accedido a tomar medidas para instrumentar la Iniciativa de Llantas.

**Conferencia de Legisladores Fronterizos:** En la XVI Conferencia de Legisladores Fronterizos realizada el 19 de octubre de 2007, los legisladores estatales de México y EE.UU. expresaron su apoyo a la iniciativa de llantas.

**Industria llantera:** La industria llantera de México y EE.UU., representada por la Asociación de Fabricantes de Caucho de EE.UU. (RMA, por sus siglas en inglés) y la Cámara Nacional de la Industria Hulera de México, se han comprometido a colaborar con los gobiernos de México y Estados Unidos para resolver los problemas de las llantas de desecho en la frontera. En este sentido, la RMA firmó una carta de entendimiento el 18 de mayo de 2008.

Para más detalles sobre las alianzas vigentes entre México y EE.UU. visite la página <http://www.epa.gov/usmexicoborder/infrastructure/index.html>.

### Iniciativa para la Gestión Integrada de las llantas de desecho en la frontera México-EE.UU.

USEPA y SEMARNAT coinciden en que la instrumentación de los principios y las acciones de la Iniciativa para la Gestión Integrada de las llantas de desecho en la frontera México-EE.UU. es necesaria para la gestión adecuada de las llantas de desecho en la región fronteriza. La iniciativa de llantas fue aceptada por el Grupo de Llantas de Frontera 2012 y firmada por SEMARNAT y USEPA en octubre de 2006.

### Principios de la iniciativa de llantas

**Entender** mejor los problemas que contribuyen a la generación de llantas de desecho

**Prevenir** la formación de nuevos apilamientos de llantas

**Limpiar** los apilamientos de llantas "heredados" (existentes) con soluciones económicas, eficaces y efectivas

**Involucrar** a los grupos de interés y a las comunidades en la creación de soluciones

### Acciones de la Iniciativa de Llantas

**Recabar** información para entender mejor la generación de llantas de desecho.

**Fomentar** el desarrollo y la implementación, a través de incentivos, de mercados de consumo final ecológicamente aceptables y económicamente viables para las llantas de desecho, a fin de incrementar el reciclaje y la reutilización.

**Abatir** los apilamientos de llantas buscando financiamiento para eliminar los acumulamientos existentes e invirtiendo en centros de acopio y transferencia temporales para facilitar el reciclaje y la reutilización de las llantas.

**Involucrar** a los gobiernos federales, estatales y locales, las empresas, las universidades, y los organismos no gubernamentales, en la instrumentación de la Iniciativa para la Gestión Integral de las Llantas de Desecho.

**Apoyar** programas de difusión educativa sobre el reciclaje y el reuso de las llantas de desecho, dirigidos a diversos grupos de interés.

actualmente funcionan en México y EE.UU., así como en el 12° Informe del Consejo Ambiental del Buen Vecino: <http://www.epa.gov/ocem/gneb/gneb12threport/English-GNEB-12th-Report.pdf>.

### Difusión mediática

La publicidad permite que la ciudadanía entienda mejor el programa de saneamiento y la utilización de las cuotas de servicio que se cobran. Asimismo, la publicidad permite que los políticos y quienes participan en el programa reciban reconocimiento por lograr los objetivos de saneamiento. Sin embargo, llamar la atención sobre los proyectos de saneamiento antes de que terminen puede resultar contraproducente. Por ejemplo, muchos de los incendios de llantas los inician de hecho los operadores de sitios o los habitantes de la localidad a raíz de la publicidad sobre la limpieza. Una posible estrategia es emitir un comunicado de prensa destacando el momento en el que algún líder comunitario coloca en el camión de transporte la última llanta que se recoja del sitio; se pueden incluir en el comunicado fotografías tomadas antes y después del saneamiento.

## CONTRATISTAS

El éxito de un programa de saneamiento de llantas de desecho depende de que se seleccionen contratistas capaces de llevar a cabo las tareas requeridas en una forma rentable, de acuerdo con los procedimientos y tiempos programados. En muchas de las primeras obras de saneamiento, los procesadores de llantas de desecho estaban apenas adquiriendo experiencia en las operaciones de campo, el equipo estaba evolucionando, se estaban definiendo los requisitos de mantenimiento, las limitaciones financieras impedían que se usara equipo de remoción eficiente, y existían pocos mercados para el producto, por lo que había demoras y fallas en los proyectos. Aunque el saneamiento aún representa un importante desafío, el beneficio de las experiencias anteriores, las mejoras en el equipo, la disponibilidad de equipo adecuado, y el considerable desarrollo de los mercados, han incrementado grandemente las probabilidades de lograr el cometido. Una clave del éxito es la selección de contratistas con buenos antecedentes de desempeño y la capacidad de realizar las tareas a un costo razonable. En esta sección se definen los factores fundamentales y las alternativas para una buena evaluación y selección del contratista responsable del saneamiento.

### Evaluación del perfil del contratista

La cantidad de información que se solicita a los contratistas durante el proceso de evaluación varía considerablemente. Algunas dependencias estatales solicitan datos muy completos, mientras que otras simplemente piden información sobre el contacto y los precios. A continuación se indican los principales factores que se han usado para evaluar a los contratistas:

### Historial de la empresa

Algunos contratistas y procesadores han cambiado de razón social con frecuencia, especialmente después de fracasar en algún proyecto. Se debe exigir a los contratistas que indiquen todos sus nombres anteriores y las empresas a las que han estado afiliados para que la instancia pueda entender mejor el historial de la empresa.

### Capacidad financiera de la empresa

La solidez financiera incrementa la probabilidad de que el contratista tenga el equipo adecuado y pueda superar cualquier imprevisto. Para identificar la solidez financiera de los contratistas, algunos estados solicitan la información financiera de los últimos 2 o 3 años. Algunas empresas de capital privado se muestran renuentes a proporcionar estos datos, a menos que se les garantice la confidencialidad de los mismos. Una alternativa es exigir que el contratista documente su capacidad para depositar una fianza de cumplimiento o alguna otra garantía financiera en un monto equivalente al máximo requerido para las actividades de saneamiento que se proponen. Esta medida protege los intereses financieros del órgano gubernamental y evita problemas de confidencialidad.

### Experiencia

Las experiencias positivas incrementan la probabilidad de éxito en proyectos posteriores, por lo cual es primordial que el contratista documente su experiencia en proyectos comparables. El contratista debe describir su trabajo anterior en detalle y presentar información sobre sus clientes para que la dependencia verifique su desempeño.

### Equipo

El saneamiento de los apilamientos de llantas de desecho implica la remoción, el transporte y el procesamiento. La evaluación se facilita si se exige al contratista que enliste y describa el equipo que va a utilizar. El equipo de remoción generalmente incluye una excavadora para los sitios grandes, un cargador frontal equipado con cucharón para los sitios medianos, y un minicargadora tipo oruga con cucharón para los sitios más pequeños.



Llantas desechadas en forma incorrecta  
Foto cortesía de Brian Wright, Georgia



El equipo de transporte normalmente consiste en camiones y remolques estándar de 18 ruedas. Los tractocamiones de alto volumen son más eficientes para transportar llantas enteras. Algunos contratistas subcontratan el transporte de las llantas. En el proceso de licitación se debe exigir información sobre los subcontratistas, como su número de licencia o perfil profesional.

Las llantas se pueden procesar en el mismo sitio o en un centro de procesamiento centralizado. Los requerimientos del equipo de procesamiento dependerán de las especificaciones del producto y del mercado. Para lograr un menor tamaño de producto normalmente se requieren unidades de reducción de diversos tamaños instaladas en serie, o un extenso reprocesamiento en una misma unidad (con una reducción proporcional en la capacidad efectiva). El impacto de la tierra, las piedras y otra contaminación generalmente es proporcional a los requerimientos del proceso. Los trozos de llanta grandes que se usan para cubrir terraplenes requieren de menos procesamiento, pero se debe retirar de ellos la contaminación en forma de tierra. En los apilamientos de llantas se ha producido CDL nominal de una pulgada de diámetro, pero la contaminación con tierra incrementa considerablemente los requerimientos de mantenimiento y el tiempo muerto del equipo. Generalmente no es posible producir miga de caucho a partir de llantas acumuladas, a menos que estén excepcionalmente limpias y se recojan con mucho cuidado.

### Productos y Mercados

El contratista deberá definir cuáles serán los usos que se le darán a las llantas de desecho procesadas y qué porcentaje de los productos espera obtener a partir de las llantas de desecho. En general, este porcentaje no debe ser mayor del 15 al 25 por ciento de las llantas de la generación actual. Asimismo, el contratista debe indicar las especificaciones del producto y las bases del contrato con un cliente que desee el producto de las llantas procesadas. La falta de una base contractual incrementa la vulnerabilidad del mercado y la probabilidad de que los productos de llantas de la generación actual sean desplazados. El equipo de procesamiento que se propone debe poder generar productos que cumplan con las especificaciones.

### Residuos

En algunos casos, hay contratistas que reciben cuantiosos pagos por concepto del reciclaje de llantas, pero solamente logran recuperar un pequeño porcentaje de ellas como producto utilizable. Asimismo, otros desechan o envían a confinamiento volúmenes considerables de llantas sin informar a la dependencia gubernamental que los contrató. Es por esto que el contratista debe identificar los volúmenes de desecho proyectados y los métodos de disposición, para que la instancia gubernamental pueda considerar en su evaluación los volúmenes de recuperación. Por otro lado, la dependencia contratante

no debe impedir que se envíen a confinamiento las llantas o trozos de llanta muy contaminados.

### Personal

El contratista deberá nombrar al personal administrativo e indicar su experiencia, incluyendo quienes se encargarán de las operaciones cotidianas y el mantenimiento del equipo en el lugar de acopio

### Disponibilidad

Muchos contratistas tienen una cantidad limitada de equipo y pudieran estar comprometidos en muchos sitios antes de la adjudicación del contrato. Es por eso que el contratista deberá indicar el tiempo que va a necesitar para la movilización y la fecha de inicio que propone; otra posibilidad es fijar una fecha de inicio anticipada para detectar si el contratista puede apegarse al calendario de trabajo.

### Costo

La dependencia que contrata los servicios puede exigir al contratista que presente una oferta basada en un precio fijo para todo el saneamiento del predio. En general, los contratistas integran a sus ofertas a precio fijo un factor de seguridad incrementando el costo por tonelada de material que se va a retirar. La mayoría de las actividades de saneamiento actualmente se cotizan a un "costo por tonelada" para optimizar su rentabilidad. El riesgo asociado con este enfoque tiene que ver con los costos adicionales relacionados con la contaminación, como el tipo de suelo o la presencia de partes automotrices. A fin de evitar abusos, las operaciones de remoción y carga se deben monitorear minuciosamente, y la dependencia contratante se debe reservar el derecho de ajustar el peso para controlar el exceso de contaminación.

### Proceso de licitación y adjudicación de contratos

Los distintos estados han usado una amplia gama de enfoques para el proceso de licitación y adjudicación de contratos. Una de las principales variables ha sido la cantidad de información que se solicita en la Convocatoria. En algunos casos únicamente se pide un precio fijo, y el proyecto se adjudica en base a este factor exclusivamente. Un estado utilizó este enfoque durante sus actividades iniciales de saneamiento de sitios, y los contratistas que se seleccionaron resultaron no tener experiencia ni solvencia económica, pero hacían ofertas bajas porque entendieron mal los requerimientos del saneamiento.

Otra posibilidad en la licitación es exigir a los contratistas que presenten respuestas detalladas a los criterios que se citan en la sección anterior, a fin de contar con más datos para la evaluación. Se puede solicitar menos información en el caso de sitios pequeños o cuando la dependencia contratante ya tiene una idea bien formada de las capacidades del contratista con base en experiencias previas. A cada uno de los criterios que se incluyan en la convocatoria se le deben asignar un valor ponderado

según su importancia. Por lo menos tres miembros de la plantilla de personal con experiencia en el ramo deben evaluar y calificar las propuestas para finalmente seleccionar al contratista de acuerdo a las puntuaciones obtenidas.

Realizar un proceso de licitación detallado para cada apilamientos de llantas puede ser engorroso y tardado para todas las partes, especialmente si se necesitan sanear varios sitios. Una alternativa es precalificar a los posibles contratistas mediante un proceso modificado de convocatoria o solicitando que presenten su perfil profesional. El estado de Florida ha usado con éxito un proceso de precalificación desde 1989. Este proceso se repite cada 3 o 4 años para integrar a los nuevos participantes en la industria. Illinois usa un proceso de precalificación parecido, en el que las respuestas de los contratistas incluyen datos de costos vinculantes que se presentan como precio por tonelada. Cuando se identifica un predio que requiere saneamiento, se selecciona al contratista según la cercanía del sitio al centro de procesamiento. El hecho de no realizar una licitación individual para cada sitio no incrementa considerablemente los costos del saneamiento.

### Contratos

La forma del contrato de saneamiento depende de los procedimientos de licitación y adjudicación que se hayan usado, así como de los requisitos para la contratación establecidos por el estado. Existen dos categorías principales de contratos:

- Contratos individuales para cada sitio, que cubren únicamente actividades específicas de saneamiento relacionadas con un apilamiento individual o combinado. Estos contratos generalmente se adjudican con base en la oferta presentada para el saneamiento de un solo predio.
- Contratos de asignación de tareas, creados para cubrir las condiciones generales relacionadas con el saneamiento de más de un apilamientos. Estos contratos se complementan con documentos de asignación de tareas que contemplan condiciones específicas del predio a medida que se van adjudicando.

Cada estado tiene sus propios procedimientos y requisitos para sus contratos, por lo que no es posible presentar un contrato "modelo". Sin embargo, se pueden consultar ejemplos básicos de documentos en <http://www.epa.gov/reg5rcra/wptdiv/solidwaste/tires/guidance/index.htm>.

### Fianzas y seguros

El propósito principal de exigir fianzas y seguros es proteger a la instancia gubernamental contratante de pérdidas financieras derivadas de errores del contratista o por incumplimiento del contrato. Un segundo propósito es garantizar que el contratista cuente con

recursos adecuados y se comprometa a terminar satisfactoriamente el proyecto.

Históricamente, las instancias contratantes exigían una fianza o garantía financiera equivalente al 50 o hasta el 100 por ciento del costo estimado del proyecto. Asimismo, la fianza normalmente seguía vigente hasta que la instancia contratante confirmara que el proyecto había concluido y se liberaba la fianza. Cuando era relativamente fácil y económico obtener las fianzas, el requisito no representaba dificultad alguna, excepto para las empresas que no tenían muy buen estado de resultados o balance general.

Sin embargo, recientemente se ha hecho más difícil y costoso para las pequeñas empresas (incluyendo muchos buenos contratistas) obtener una fianza. Algunas han recurrido a métodos alternativos, como cartas de crédito o depósitos en efectivo. En algunos casos, los requisitos de la garantía financiera pueden ser engorrosos para los contratistas, ya que comprometen el capital necesario para ejecutar los contratos. En otros casos, estos requisitos pueden hacer que se excluya de la competencia a contratistas con vasta experiencia. Iowa y Virginia no exigen garantías financieras y no han tenido ningún caso de incumplimiento, pero estos estados históricamente cuentan con muy buen nivel de desempeño de los contratistas.

### Evaluación de capacidades

La industria del procesamiento de llantas y los mercados para sus productos tienen una capacidad finita para procesar y usar las llantas de la generación actual y las llantas provenientes del saneamiento. En los objetivos del saneamiento se debe considerar el contexto de la capacidad local y regional para evitar alterar el mercado. Por ejemplo, si la capacidad de los procesadores locales o regionales es limitada, se les puede informar con anticipación cuáles son los volúmenes de llantas que se prevé tener para que decidan si incrementan su capacidad. En caso de que decidan no hacerlo, se pueden conseguir otros procesadores en una zona geográfica más extensa. Si los mercados son limitados, se pueden crear otros mediante la cooperación entre los gobiernos o la aplicación de incentivos. Por ejemplo, Nueva York considera el uso de viruta de llanta proveniente del saneamiento de apilamientos para proyectos de recubrimiento de terraplenes si el costo de las virutas, incluyendo la entrega, es menor al de otros tipos de agregado. Si los desequilibrios económicos no se pueden corregir, se deben ajustar los objetivos del programa para que reflejen volúmenes más realistas o para permitir que se disponga de las llantas evitando la alteración de los mercados.

En una escala menor, evaluar la capacidad de procesamiento y mercadeo de un contratista para absorber el volumen de llantas de desecho sin alterar el uso de las llantas de las llantas que actualmente se generan puede servir para que los contratistas pongan los pies en la tierra a la hora de realizar sus proyecciones. La

identificación de la capacidad de procesamiento se debe basar en el desempeño demostrado históricamente con equipo de procesamiento similar, y no solamente en lo que manifieste el proveedor de equipo.

## GESTIÓN DEL PROYECTO

En las secciones anteriores se presentaron los fundamentos y las consideraciones para establecer un programa exitoso de saneamiento de las llantas de desecho, con base en las experiencias de estados de la Unión Americana. Sin embargo, una vez emprendido un proyecto de saneamiento, surgen nuevas problemáticas. En esta sección se abordan los factores que sirven para optimizar la gestión e instrumentación del proyecto.

### Estudio del predio

Antes de la movilización se deben revisar o estudiar los límites del predio para verificar que todas las llantas y las rutas de acceso planeadas se encuentren dentro de éste. Con frecuencia los apilamientos de llantas cruzan las demarcaciones del predio, en cuyo caso se necesita obtener de los propietarios permisos de acceso a los terrenos colindantes.

### Equipo

La selección del equipo adecuado depende de las condiciones del predio, y si éstas son singulares se podría requerir equipo especializado o procedimientos de seguridad. Por ejemplo, una excavadora tipo oruga resulta una herramienta eficiente para la remoción de grandes volúmenes de llantas, siempre y cuando existan las siguientes condiciones:

- Que se puedan colocar cajas de tractocamión descubiertas junto al apilamiento para cargar directamente, reduciendo al mínimo el movimiento de la excavadora.
- Que no se obstruya el movimiento del brazo y el cucharón de la excavadora con árboles grandes u otros obstáculos como cables de electricidad.
- Que el apilamiento sea elevado, pero se pueda llegar a la parte superior.
- Que los objetos de metal contaminantes sean lo suficientemente grandes como para alcanzar a verlos y separarlos antes de cargar.
- Que el cucharón se pueda cerrar por encima del nivel del suelo para minimizar la posibilidad de atrapar tierra al levantarlo.

En algunos casos, el equipo más pequeño como los cargadores frontales o los Bobcat tipo oruga pueden ser más eficientes y económicos que una excavadora. Por ejemplo, una excavadora pierde muchas de sus ventajas si se trata únicamente de acomodar las llantas para cargarlas en tractocamiones cerrados. Con un minicargadora se puede fácilmente colocar las llantas hasta el final de la caja del tractocamión. Asimismo, los cambios en las condiciones del predio pueden alterar las necesidades de equipo durante el proyecto. Los contratistas deben

tener flexibilidad para hacer ajustes, siempre y cuando no comprometan el calendario y la seguridad, y no aumenten la contaminación o provoquen daños en el lugar.

### Transporte

**Registros y permisos** – Muchos estados exigen que los procesadores y transportistas cuenten con registro. Todos los registros y permisos necesarios deben obtenerse con anticipación para evitar demoras innecesarias.

**Pesaje** – El peso del cargamento puede cambiar durante el transporte. Con el movimiento puede escurrirse el agua que había en las llantas, o la lluvia puede agregar peso si se queda atrapada en los cascos de las llantas. En otros casos, se pueden agregar llantas a camiones que ya van en tránsito. De ser posible, los camiones se deben pesar en básculas autorizadas cercanas al sitio de saneamiento, y de nuevo en el lugar en donde se reciban las llantas. El peso que debe usarse para la facturación debe ser el menor de los dos pesajes.

**Rines de llanta** – Los rines pueden duplicar el peso de las llantas de pasajero, por lo que retirar los rines antes de transportarlas servirá para reducir los costos de transporte y procesamiento que se basan en el peso. De no ser posible retirar los rines, se debe establecer un método de seguimiento y ajuste de peso, especialmente en el caso de sitios como los deshuesaderos, en donde el porcentaje de llantas con rin es alto. Cuando se sacan los rines de las llantas, tanto el metal de los rines como el plomo para el balanceo de las llantas representan una fuente de ingresos. Los términos del contrato deben indicar claramente si el contratista se quedará con estos ingresos, los compartirá con la dependencia gubernamental, o entregará a ésta todo lo recaudado.

**Transporte ferroviario** – El transporte de llantas trituradas en vagones tolva con descarga inferior puede ser problemático si las virutas se compactan y el agua de lluvia se congela, ya que esto dificulta la descarga en el sitio receptor. Con los vagones de descarga lateral y superior generalmente no existe este problema.

**Bitácoras de seguimiento** – Se deben conservar registros actualizados del peso de la tara de la báscula (con el contenedor vacío) y el peso de los cargamentos de todos los vehículos. Se debe anotar el número de unidad en las boletas de pesaje, a fin de evitar discrepancias que puedan retrasar el pago de las facturas.

### Factores ambientales

#### Agua

El agua puede crear graves problemas en los apilamientos de llantas. El agua de lluvia se acumula en los puntos bajos, impidiendo el movimiento del equipo y afectando la eficiencia operativa, y el agua atrapada en las llantas apiladas se puede derramar durante la remoción, creando condiciones de inestabilidad en el predio. Estos problemas se pueden resolver haciendo canales

de desagüe o construyendo caminos elevados para el equipo. Una alternativa es hacer una rotación de las áreas de trabajo para permitir que se sequen las áreas húmedas e inestables. Cuando se levantan los apilamientos y el suelo inestable queda expuesto, puede chorrear limo del predio hacia los arroyos, estanques y propiedades colindantes. Las cercas de limo pueden evitar este tipo de escurrimientos del sitio del proyecto.

### **Vialidades**

El movimiento de camiones pesados puede destruir los caminos de tierra durante periodos de humedad o deshielo. Si los habitantes de la zona utilizan estos caminos, la superficie debe mantenerse en buen estado para los vehículos normales.

### **Polvo**

Cuando las vías de acceso están secas, el movimiento del equipo sobre suelos y caminos inestables puede generar nubes de polvo. Si el polvo suspendido en el aire afecta las operaciones de saneamiento, al personal, o a las propiedades colindantes, se puede rociar agua para controlarlo.

### **Ruido**

Los tractocamiones, la maquinaria pesada para remoción y las trituradoras son equipo ruidoso. En zonas pobladas, las operaciones se pueden limitar únicamente a un horario diurno para controlar el impacto del ruido y no molestar a los habitantes de las áreas cercanas.

### **Seguridad**

Los objetivos principales de las medidas de seguridad en un sitio son evitar que se agreguen más llantas, evitar los incendios, y proteger el equipo. Las medidas de seguridad que se indican a continuación han resultado efectivas para lograr estos objetivos.

#### **Control del acceso vehicular**

El enfoque más común para controlar el acceso vehicular es colocar una cadena con candado entre dos postes. La cadena se puede retirar para realizar inspecciones o labores de saneamiento, y la mayoría de los vehículos de auxilio cargan tenazas cortadoras en caso de que tengan que ingresar a un lugar cerrado.

#### **Cercado perimetral**

Es difícil evitar el acceso de todos los vehículos y peatones al sitio, pero se puede controlar instalando una cerca perimetral. En algunos predios industriales incluso hay cercas de malla ciclónica y portones. En los terrenos rurales puede haber varios puntos de acceso, por lo que se debe revisar todo el perímetro para detectar señales de actividades no autorizadas.

### **Iluminación**

La iluminación aumenta la probabilidad de observar a cualquier intrusos, pero únicamente es efectiva si se combina como medida de seguridad con el uso de vigilantes.

### **Guardias de seguridad**

Los guardias de seguridad pueden controlar el acceso al sitio y advertir oportunamente en caso de un incendio. Para ser efectivos, los guardias deben contar con iluminación adecuada y patrullar el predio a pesar de los mosquitos y las condiciones climáticas adversas.

### **Medidas adicionales**

Los perros guardianes pueden impedir el acceso de intrusos en los sitios con cerca perimetral, pero generan problemas de responsabilidad civil y pueden lastimarse con los alambres sueltos. Se ha considerado usar detectores de movimiento en los sitios, pero el movimiento de los animales en áreas rurales provoca falsas alarmas. Se han usado cámaras en algunos lugares, pero la calidad de las imágenes generalmente no es adecuada para ayudar a capturar o aprehender a los intrusos. Se ha considerado instalar detectores de humo y de calor para prevenir incendios, pero el gasto y la logística correspondientes resultan problemáticos para los proyectos de saneamiento.

### **Planeación y prevención contra incendios**

El mayor riesgo relacionado con los apilamientos de llantas de desecho es un posible incendio. Una vez iniciados, los incendios de llantas acumuladas tienden a propagarse rápidamente, generando cantidades masivas de humo y aceite y una importante contaminación de suelos y agua que provoca daños ambientales. A continuación se abordan los factores asociados con la planeación y la prevención de incendios.

#### **Papel del propietario u operador**

Muchos incendios intencionales en los apilamientos de llantas inician cuando se emprenden medidas coercitivas para exigir el saneamiento o abatimiento inicial, lo cual indica que el propietario del predio podría estar buscando venganza o intentando evitar pagar la parte de los costos del saneamiento que le corresponden. Como regla general, es de 5 a 10 veces más caro rehabilitar un apilamiento de llantas de desecho contaminado por un incendio que simplemente retirar las llantas.

#### **Plan de respuesta a emergencias**

Para los apilamientos grandes se debe elaborar un plan de respuesta a emergencias con el que se apoye la coordinación en la notificación y respuesta en caso de algún incendio de llantas.

#### **Estabilización inicial del predio**

Los apilamientos grandes de llantas de desecho se deben estabilizar para reducir la posibilidad de incendios e incrementar la probabilidad de poder controlarlos. La estabilización la puede iniciar el propietario del predio como parte de un convenio de cumplimiento, o el contratista durante el saneamiento inicial. Algunas de las actividades importantes para la estabilización del sitio son las siguientes:

- Remoción de árboles, arbustos y pasto alrededor de los apilamientos, para evitar la propagación del



fuego desde y hacia los alrededores, especialmente si se trata de un sitio inactivo.

- Identificación de los recursos disponibles para el control de incendios e instalación de herramientas complementarias para el mismo fin.
- Creación de por lo menos dos puntos de acceso conectados entre sí para los vehículos de emergencia.
- Creación de líneas cortafuego de por lo menos 15 metros (50 pies) de ancho para dividir un apilamiento grande en segmentos aislados. La línea inicial debe en forma general dividir el apilamiento en dos, y las líneas que se tracen posteriormente deben crear segmentos que no sean de un tamaño mayor a 15 x 60 metros (50 x 200 pies). Los costados de los apilamientos se deben estrechar gradualmente para evitar que se desplomen en caso de que algún incendio provoque turbulencia.
- Estabilización de las líneas cortafuego para facilitar el acceso de los vehículos de emergencia y potenciar al máximo la eficiencia de los contratistas durante las actividades posteriores de abatimiento.

### **Saneamiento del predio**

Durante el saneamiento del predio, los segmentos de llantas apiladas se deben retirar paulatinamente para ensanchar la separación entre los segmentos que queden.

### **Combustión espontánea de los trozos de llanta**

Los apilamientos elevados de trozos de llanta compactados pueden sufrir una serie de reacciones exotérmicas que aumentan la temperatura y generan gases combustibles en forma pirolítica. Los síntomas de este fenómeno en la superficie pueden ser sutiles, como un leve olor a azufre, vapor que emana de las secciones aisladas de la superficie del apilamiento, o un leve brillo aceitoso en el agua que queda en las áreas cercanas después de una precipitación pluvial. La combustión espontánea normalmente se presenta en los apilamientos con más de 10 pies de profundidad y se han compactado con maquinaria pesada durante su formación. El fenómeno se ha presentado con trozos de todos tamaños, pero es más común con los pequeños.

La posible consecuencia de la combustión espontánea es que se puede iniciar un incendio en el momento en que se está realizando el abatimiento. A medida que se van retirando las llantas del área cercana a la zona de calor, los gases y los trozos de llanta quedan expuestos al aire y se encienden. Luego el fuego se propaga por todo el apilamiento como si hubiera iniciado en la superficie, como ha ocurrido con más de 20 apilamientos y centros de acopio. Una señal de este fenómeno es cuando se encuentra un área de caucho derretido en forma de hongo dentro del apilamiento. Es menester tener cuidado en las labores de saneamiento en apilamientos elevados de trozos compactados, además de tomar medidas para controlar inmediatamente los incendios espontáneos antes de que se propaguen.

## **Comunicación**

El éxito en el saneamiento de los apilamientos de llantas depende en gran parte de la buena comunicación entre el contratista y la dependencia gubernamental contratante. Tanto la eficiencia como el respeto mutuo son producto de la experiencia, que es fundamental para llevar a buen término los proyectos y programas de saneamiento de llantas. El monitoreo de la obra y la facturación también son elementos importantes de la comunicación, como se indica a continuación.

### **Comunicación entre el contratista y la dependencia gubernamental**

Los planes y calendarios de saneamiento son documentos de trabajo que están sujetos a cambios basados en factores como el clima, los desperfectos del equipo, y las condiciones del mercado. La buena comunicación entre el contratista y la instancia contratante constituye el fundamento para poder realizar los ajustes correspondientes. El contratista puede presentar informes de avances semanales, quincenales, o mensuales en los que describa la cantidad de llantas retiradas, el apego al calendario de obra, los obstáculos, los ajustes, y las actividades que se prevén. También cabe la posibilidad de presentar los informes de avance verbalmente, quedando lo anterior a criterio de la dependencia contratante.

### **Monitoreo de la obra**

El monitoreo del desempeño consiste en el equilibrio de los factores económicos, la necesidad, la disponibilidad, y la experiencia. Para llevar a cabo el seguimiento, los estados usan monitores de tiempo completo, facilitan la visita de funcionarios locales, revisan las bitácoras que lleva el personal de seguridad o del contratista, y realizan visitas al predio sin previo aviso, así como auditorías de los registros.

### **Facturación**

El contratista deberá presentar facturas mensuales acompañadas de toda la documentación de apoyo. Este procedimiento permite que se identifiquen los problemas oportunamente y limita la cantidad de tiempo necesario para la preparación y revisión de las facturas.

## **Restauración del sitio**

### **Conclusión del saneamiento**

El tema de la conclusión del saneamiento está sujeto a interpretación cuando quedan llantas enterradas en el predio. En general, los montones grandes de llantas se retiran del predio, pero algunas llantas sueltas se quedan en el lugar si menos del 25 por ciento de la llanta sobresale de la superficie. En el caso de los trozos de llanta, algunos estados exigen al contratista usar una rastra de 2 pulgadas para extraerlos y retirarlos de la superficie.

### **Otros residuos**

Otros materiales que se encuentran en los apilamientos normalmente se separan y se colocan en pilas. En algunos

casos, los desechos se separan para facilitar a la postre la recuperación (por ejemplo, de metales) o la disposición. La responsabilidad del contratista con respecto a los demás residuos se debe definir claramente en los términos de referencia iniciales. El contratista deberá recibir una remuneración adicional si desempeña actividades de retiro de residuos que no se hayan contemplado inicialmente.

### Nivelación del terreno

Durante las labores de saneamiento cabe la posibilidad de que la maquinaria pesada deje surcos en la superficie del predio. Generalmente se le exige al contratista que restaure la superficie dejándola al nivel que originalmente tenía.

### Vialidades

Las vialidades públicas en las que los camiones cargados hayan dejado surcos durante las obras generalmente se nivelan al terminar las actividades en el predio. Con frecuencia se asignan cuadrillas de personal del municipio para estas labores a un costo muy bajo o sin costo alguno, como signo de colaboración. En ocasiones también se eliminan las vías de acceso que se hayan abierto para facilitar el saneamiento.

### Control de erosión

Los canales de siembra y desagüe pueden controlar la erosión de los suelos inestables. Para controlar los escurrimientos hacia aguas superficiales aledañas se usan cribas desazolvadoras o métodos similares hasta que se restablezca la vegetación.

### Documentación

Las condiciones del predio después del saneamiento se deben documentar minuciosamente mediante fotografías o video de las condiciones del suelo, los apilamientos residuales, los inmuebles, y las cercas perimetrales. Se debe conservar la documentación para ayudar a resolver cualquier problema o controversia posterior.

## RESUMEN

Muchos estados de la Unión Americana han podido sanear los acumulamientos de llantas de desecho y han establecido programas para evitar la formación de otros apilamientos. Mucho se puede aprender de los logros y fracasos de la amplia gama de estrategias que se han usado para abordar este grave problema. Este capítulo tiene la intención de captar y compartir los conocimientos que han adquirido los representantes de los estados de la Unión Americana y la industria que tienen décadas de experiencia en el abatimiento de apilamientos de llantas.

Muchos estados de la Unión Americana han demostrado que las amenazas que los apilamientos de llantas representan para la salud humana y el medio ambiente se pueden mitigar. Esto se puede lograr mediante la aplicación de las políticas normativas y los recursos disponibles, junto con una planeación y ejecución metódica de los proyectos de saneamiento. Según la experiencia que han tenido las autoridades estatales y federales de los EE.UU., los costos de la prevención y el abatimiento de los apilamientos de llantas son apenas una pequeña fracción de los costos relacionados con la respuesta a emergencias y la rehabilitación que se hace menester luego de un incendio de llantas.

En este capítulo se ha presentado un esquema general de los elementos esenciales que los estados han considerado en la planeación e instrumentación en programas de saneamiento y proyectos individuales de limpieza. Después de décadas de catastróficos incendios de llantas y otros problemas relacionados con la tira clandestina de llantas de desecho, es evidente que las prácticas descritas pueden resultar efectivas para proteger la salud humana y el medio ambiente de estos peligros.



Incendio de una pila de llantas de desecho de gran magnitud  
Foto cortesía de Todd Thalhamer, California IWMB

# CAPÍTULO 3

## Hule molido

El hule molido, también conocido como miga de hule, se obtiene al reducir de tamaño las llantas de desecho u otros productos hechos de hule. Para producir hule molido, las llantas se pueden procesar con maquinaria para cortarlas o molerlas, y luego los trozos se clasifican para determinar el uso que se les puede dar. Dependiendo del mercado al que se desee llegar, podría ser necesario procesarlas más para retirar todo el talón de metal. Después del procesamiento, el tamaño de los trozos que quedan generalmente oscila desde un mallaje 40 hasta cerca de 6 cm (1/4 pulgada). El hule molido se puede usar para una amplia gama de productos, que van desde colchones para mascotas y conos para señalización, hasta superficies para pistas de carreras y aditivos para asfalto. Todas estas aplicaciones se abordarán en este capítulo.

Dentro de la jerarquía tradicional del reciclaje, las aplicaciones de mayor valor para las llantas de desecho (los usos especiales que se les da a las llantas de desecho) son aquellas en las que se utiliza el hule o caucho molido por sus características específicas de desempeño. Con el fin de potenciar al máximo el valor de las llantas de desecho, se ha dedicado una cantidad enorme de recursos financieros, técnicos y creativos al desarrollo de tecnologías para el procesamiento y la generación de hule molido, así como al fomento de aplicaciones para usarlo. Sin embargo, los resultados han sido muy diversos. La Asociación de Fabricantes de Caucho calcula que después de más de 20 años de esfuerzos concertados, apenas el 17 por ciento de las llantas de desecho que se generaron en los Estados Unidos en el 2007 se procesaron para obtener hule molido para usarse en aplicaciones creativas (Ref. 1). Dado que estas aplicaciones tradicionalmente se han desarrollado con lentitud y no se consumen en ellas suficientes llantas, no pueden ser el vector principal de un nuevo programa de gestión de llantas de desecho. Sin embargo, siguen siendo una buena opción de reciclaje y un importante componente de la diversidad del mercado.

Los mercados de generación de energía e ingeniería civil son de gran magnitud y se pueden desarrollar más

rápidamente, por lo que merecen la atención inicial del programa para estimular el uso integral de las llantas de desecho; es por ello que esta guía se concentra en esas aplicaciones. No obstante, en forma simultánea se pueden identificar y desarrollar otros mercados importantes para el hule molido. Asimismo, con la experiencia que se ha adquirido en los Estados Unidos, existe la posibilidad de acelerar el crecimiento del mercado en México.

El desarrollo inicial de aplicaciones de ingeniería civil y generación de combustible derivado de llantas (CDL) no impedirá que los procesadores de hule molido obtengan las llantas de desecho que necesiten en un futuro. A medida que se desarrollen mercados para el hule molido, las llantas de desecho naturalmente se canalizarán hacia productos con mayor valor. Los productos de hule molido generan mayores ingresos, lo que permite a los procesadores captar llantas de desecho sin tener que cobrar cuotas de disposición tan altas. Las llantas de desecho generalmente se trasladan al centro de acopio o reciclaje que cobre el menor costo, por lo que los mercados que generen un mayor valor naturalmente desplazarán a los mercados de valor más bajo, como las aplicaciones en ingeniería civil y el CDL.

### PRINCIPALES MERCADOS PARA EL HULE MOLIDO EN LOS EE.UU.

Las experiencias que ha habido en los Estados Unidos no necesariamente reflejan cómo serán los mercados en México. No obstante, pueden servir como ejemplos de aplicaciones que son susceptibles de fabricarse y que los consumidores están dispuestos a adquirir –dos componentes fundamentales del desarrollo de mercados. Las aplicaciones para el hule molido normalmente se agrupan en los siguientes segmentos de mercado:

**Superficies deportivas/recreativas**—Carpeta artificial para campos deportivos, pasto natural (césped), y como recubrimiento amortiguador en áreas de juegos para proteger a los niños de las caídas.

**Productos moldeados y extruidos** – Diversos productos, incluyendo tapetes, defensas para auto, y otros productos originales.

**Asfalto modificado con hule y selladores** – Se agrega hule molido al aglutinante asfáltico para mejorar las características de desempeño de las vialidades, incluyendo su duración.

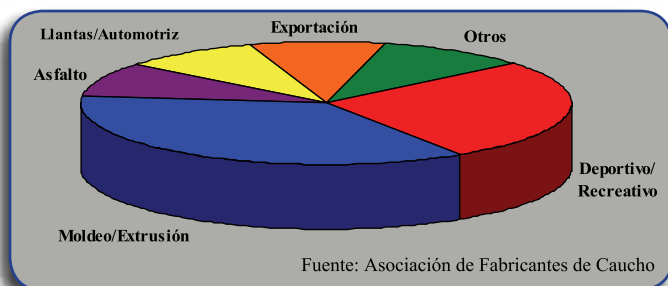


Figura 3-1. Distribución de los mercados para el hule molido en EE.UU.



**Llantas/uso automotriz** – El hule molido proveniente de llantas de desecho se usa para fabricar llantas nuevas, en los compuestos de hule para recauchutar llantas usadas, y en partes automotrices moldeadas.

**Otras aplicaciones (principalmente del hule en grano grueso)** – El hule molido se usa principalmente como cubierta protectora de color en la arquitectura de paisajes o jardinería ornamental.

**Exportación** – El hule molido proveniente de Estados Unidos se vende en mercados de Europa y Asia Oriental.

La Figura 3-1 muestra el porcentaje de hule molido usado en los segmentos principales de mercado en el 2007, según las estimaciones de la Asociación de Fabricantes de Caucho de los EE.UU. (Ref. 1).

El propósito de las siguientes secciones es identificar y describir brevemente los principales segmentos de mercado, especialmente aquellos con el mayor índice de crecimiento en los Estados Unidos y el potencial más elevado para su desarrollo inicial en otros países, por ejemplo, México.

## MERCADO DE SUPERFICIES DEPORTIVAS Y RECREATIVAS

Las superficies deportivas y recreativas actualmente representan uno de los mercados más grandes y de mayor crecimiento para el hule molido en los Estados Unidos. Este segmento de mercado comprende una amplia gama de aplicaciones y variaciones. En la siguiente sección se resumen las dos aplicaciones más importantes: el pasto sintético deportivo y los recubrimientos de seguridad para áreas de juegos.

### Pasto sintético para campos deportivos

El pasto natural es tradicionalmente uno de los elementos principales en los campos deportivos, pero a medida que se va limitando su uso, el pasto se seca, los deportistas pueden sufrir lesiones, y la apariencia de los campos se torna poco atractiva. Asimismo, el agua que se estanca en el pasto cuando llueve puede impedir el uso de los campos y provocar daños. Para lograr una buena carpeta de pasto se tiene que regar, fertilizar, y reemplazar con regularidad, lo cual redundaría en considerables costos de mantenimiento. Las superficies de pasto dañadas pueden contribuir a que los jugadores se lesionen, ya que el suelo se vuelve duro, lodoso, o con poca tracción. La identificación de los costos asociados con el mantenimiento y las lesiones ha impulsado el desarrollo de otras alternativas.

Las primeras superficies deportivas sintéticas que se desarrollaron fueron para estadios techados en los que la falta de luz solar impedía el uso de pasto natural. Uno de los precursores fue el Astrodome en Houston, Texas, que hizo que la marca registrada AstroTurf se convirtiera en el nombre genérico de una primera generación de superficies artificiales para juego. En la década de 1990 se desarrollaron sistemas más sofisticados con hule molido para subsanar algunos de los problemas

relacionados con las superficies sintéticas iniciales. Estos avanzados sistemas de recubrimiento de pasto se aplicaron inicialmente en importantes estadios de fútbol americano de equipos profesionales y de las principales universidades, pero ahora su uso está ampliamente difundido en campos deportivos de todos los niveles.

### Descripción

En la generación actual de pasto artificial deportivo se usan hojas de polietileno verde de 7.6-cm (3 pulgadas) de longitud, incrustadas en una base porosa para formar un marco estructural parecido a una alfombra. Esta carpeta sintética se extiende sobre un sofisticado sistema de desagüe que permite drenar el agua de lluvia rápidamente y está relleno de arena de sílice, hule molido, o capas de los dos elementos. La Figura 3-2 presenta un esquema del diseño del pasto FieldTurf Tarkett.

El resultado es un pasto atractivo que se drena rápidamente y puede aguantar un uso pesado. Las finas hojas de polietileno que se asemejan al pasto le agregan propiedades de retención al hule molido y éste



Figura 3-2. Corte transversal del pasto FieldTurf. Foto cortesía de FieldTurf Tarkett.



Estadio Berry, Distrito Escolar Independiente de Cy-Fair, Houston, Texas. Foto de Terry Gray, TAG

sirve de relleno amortiguador, a la vez que el sistema de pasto sintético combinado resiste el impacto físico de las actividades deportivas. El substrato –que sostiene las hojas– las hojas mismas, el hule molido, y otros parámetros del sistema, se pueden variar para lograr características específicas para los distintos deportes. Cada fabricante tiene variaciones cuyo propósito es ofrecer ventajas técnicas o económicas. La fotografía

**Cuadro 3-1. Listado parcial de las instalaciones con pasto sintético en México**

Nombre del proyecto	Ciudad	País	Año
Pyesa Tennis-TV Azteca	Monterrey	Mexico	R2003
Tec de Monterrey CEM	Guanajuato	Mexico	04/07/2008
Centro Asturiano de Mexico	Ciudad de Mexico	Mexico	09/25/2007
Centro Asturiano de Mexico-Field #5	Mexico City	Mexico	09/21/2007
Centro Asturiano de Mexico-Field #4	Mexico City	Mexico	09/21/2007
Centro Asturiano de Mexico-Field #3	Mexico	Mexico	09/21/2007
Mas Futbol Leon	Leon	Mexico	10/18/2006
Unidad Deportiva Valenciana-Field 2	Guanajuato	Mexico	06/07/2006
Unidad Deportiva Valenciana-Field 7	Guanajuato	Mexico	05/10/2006
Unidad Deportiva Valenciana-Field 1	Guanajuato	Mexico	05/10/2006
Unidad Deportiva Valenciana-Base ball	Guanajuato	Mexico	03/29/2006
Mario Castro Field-Sport 7	Queretaro	Mexico	01/24/2006
Soccer City Querataro-Field 2	Querétaro	Mexico	01/14/2006
Soccer City Celaya	Celaya	Mexico	01/05/2006
Soccer Society Aguas Calientes	Guanajuato	Mexico	12/15/2005
Roberto Pina Field	Guanajuato	Mexico	11/14/2005
Futura Soccer	Veracruz	Mexico	11/05/2005
Charrua Field	Charrua	Mexico	09/30/2005
Dinamo Irapuato Field	Irapuato	Mexico	09/12/2005
John F. Kennedy School-Tampico Field	Tampico	Mexico	09/02/2005
John F. Kennedy School-Main Field	Queretaro	Mexico	08/25/2005
Sportfield/AstroPlay Inventory	Mexico City	Mexico	N2003
Colegio Marcelina	Queretaro	Mexico	R2003
University of Toluca	Toluca	Mexico	R2003
Soluciones Industriales	Queretaro	Mexico	2007-2008
Perfect Tu Cancha	Guatemala City	Guatemala	2007-2008
Canchas Sinteticas	Tegucigalpa	Honduras	2005-2008

que se encuentra a la derecha muestra un ejemplo de un campo de futbol americano.

### Situación actual del mercado

El uso del pasto sintético deportivo se ha extendido rápidamente, contándose en Norteamérica unas 1,00 instalaciones aproximadamente en el 2008, y cientos más en Europa, según la organización Synthetic Turf Council ([www.syntheticurfCouncil.org](http://www.syntheticurfCouncil.org)). Estas instalaciones van desde enormes estadios hasta pequeñas canchas de juego municipales. Se ha instalado pasto para futbol soccer, futbol americano, hockey de campo, beisbol, otros deportes, y canchas de entrenamiento. La empresa FieldTurf Tarkett es una de las primeras que fabricó pasto sintético, y se cree que ha instalado más de la mitad de estos recubrimientos de pasto. Otras empresas ya establecidas en el ramo de los campos deportivos son General Sports, IC Improvements, Sportex, Sprint Turf, entre otras. Muchas de estas empresas cuentan con sitios

en Internet en los que identifican sus oficinas regionales, sus representantes, e instaladores autorizados.

El cuadro 3-1 presenta un listado parcial de las instalaciones en México, el cual no es completo, pero



*Canchas del Club Necaxa en la que se usa hule molido para crear pasto sintético  
Foto cortesía de FieldTurf Tarkett*

indica que hay más de 30 instalaciones en importantes estadios y terrenos de juego en México.

Las canchas del Club de Fútbol Soccer Necaxa, instaladas en el 2003 en Aguascalientes, México, se muestran a continuación como ejemplo. Algunas de estas instalaciones tienen más de 10 años, lo cual constituye una base de experiencia a nivel local. Asimismo, algunos de los sistemas han sido analizados y aprobados por la Federación Internacional de Fútbol Asociado [Fédération Internationale de Football Association o FIFA] con sede en Zurich, Suiza, el órgano que establece las normas que rigen el funcionamiento del pasto en estos campos deportivos.

### Requerimientos del hule molido

Todos los más destacados sistemas de pasto sintético usan hule molido como material principal de relleno para envolver las hojas verdes de polietileno. El tipo y el tamaño del hule molido varían dependiendo del fabricante. Algunos usan principalmente hule molido criogénico que se produce congelando el hule en trozo antes de triturarlo en un molino de martillo, una máquina que pulveriza el hule convirtiéndolo en partículas finas. El producto resultante es suave al tacto y tiende a fluir fácilmente cuando se aplica a los campos deportivos. Otros fabricantes usan "hule ambiente", que se produce con equipo de corte y compresión a temperatura ambiente. Este producto tiende a tener una forma más irregular en la superficie y consistencia más cohesiva. También se usa en ocasiones un producto llamado "hule criambiente", que se fabrica principalmente mediante un proceso criogénico, seguido por un procesamiento secundario a temperatura ambiente, para generar características de desempeño híbridas.

Los requerimientos en cuanto al tamaño de los trozos también varían según el fabricante. Las distribuciones más comunes para los campos deportivos son mallaje 14-30 y mallaje 10-14. El término "mallaje" se utiliza para describir el tamaño, y equivale al número de agujeros por pulgada que tiene el material. Las especificaciones generalmente exigen también que se retiren prácticamente toda la tela y el alambre de refuerzo que se encuentra en las llantas de desecho. La experiencia ha demostrado que para lograr un buen desempeño del pasto sintético es fundamental tener un adecuado control de calidad del hule molido.

Generalmente se usan aproximadamente 3 libras de hule molido por pie cuadrado de pasto sintético, dependiendo del fabricante, el diseño, y las características que se desean en la superficie. Por lo tanto, los 1,000 nuevos campos que se espera cubrir en el 2008 en Norteamérica, cuyo tamaño en promedio es de unos 7,500 metros cuadrados (80,000 pies cuadrados), utilizarían alrededor de 110 millones de kilogramos (240 millones de libras) de hule molido. Esta cantidad representa un crecimiento continuo en comparación con los 800 campos instalados en el 2007, según la Asociación de Fabricantes de Caucho,

además de ser uno de los mercados más grandes para el hule molido. Quienes participan en la industria consideran que el mercado tiene más potencial de crecimiento y no ha llegado aún a su demanda máxima.

### Ventajas y desventajas de la aplicación

Prácticamente todos los productos tienen ventajas y desventajas, y los nuevos productos normalmente generan dudas. Los fabricantes de pasto sintético aseguran que sus productos ofrecen las siguientes ventajas en comparación con el pasto natural tradicional:

- **Lesiones/Salud** – El pasto sintético conserva sus propiedades aunque varíen las condiciones de clima, uso y mantenimiento. Según un estudio de la Asociación Nacional de Deportistas Universitarios [National Collegiate Athletic Association o NCAA] en el que se compararon los índices de lesiones durante el año escolar 2003-2004, el índice de lesiones durante entrenamientos fue de 4.4 por ciento en pasto natural y 3.5 por ciento en pasto sintético (Ref. 2). Otros estudios indican que la frecuencia de las lesiones es similar en ambas superficies, pero la gravedad es mayor en las que suceden sobre pasto natural. Hay más lesiones neurales, de la cabeza y de los ligamentos sobre pasto natural, mientras que sobre pasto sintético hay más lesiones epidurales, traumatismos musculares, y otras relacionadas con la temperatura. (Ref. 3, 4).
- **Economía** – El costo inicial del pasto sintético se compensa con la reducción en los requerimientos de mantenimiento, como el riego, fertilización, uso de plaguicidas, cortes, reemplazo de placas de pasto, y mano de obra. En algunos casos, el presupuesto, la falta de conocimiento y la poca disponibilidad de mano de obra pueden impedir que se le de mantenimiento adecuado al pasto.
- **Disponibilidad** – Cuando el pasto tradicional se moja, no se puede evitar que sufra cuantiosos daños, lo que limita el uso de las instalaciones. Por el contrario, el pasto sintético se drena pronto, por lo que se puede usar rápidamente después de una lluvia. Además, según los informes, el pasto sintético puede tolerar hasta 3,000 horas anuales de uso, que es alrededor de cuatro veces más que lo que tolera el pasto natural, lo que permite el uso frecuente de las canchas para distintos deportes.

Estos factores han impulsado el rápido crecimiento de esta aplicación, aunque también han surgido dudas acerca del sistema de pasto sintético. A continuación se plantean algunas de las principales inquietudes, la situación actual, y las conclusiones a las que se ha llegado con base en los datos disponibles.

- **Temperatura elevada del pasto** – Los trozos de hule negro y las hojas de pasto sintético de color absorben la energía lumínica y se calientan más que la temperatura ambiente. Los pocos datos que existen indican temperaturas en la superficie de 49 o



C a 65 o C (120o a 150o F) en días soleados de verano con temperatura ambiente de alrededor de 35 o C (95 a 100o F). Hay otras superficies que también tienden a superar la temperatura ambiente, como las calles cubiertas con cemento y la arena de color claro en las playas. El Departamento de Conservación Ambiental del Estado de Nueva York realizó en el 2009 un estudio que indica que la temperatura de la superficie del pasto sintético fue mayor que la del pasto sintético o la arena, pero que las temperaturas registradas por termómetros de bulbo húmedo que reflejan de manera más precisa la tensión térmica real fueron similares y tienen un impacto mínimo para los deportistas (Ref. 5). Las reacciones de los clientes han sido diversas: a algunos no les preocupa, mientras que otros han limitado el uso de las instalaciones durante las horas de mayor temperatura o usan rociadores de agua para enfriar la superficie antes de usarla (Ref. 3).

- **Lixiviación de metales** – El caucho o hule de llanta contiene zinc, azufre, y pequeñas cantidades de otros materiales que se encuentran de forma natural en el medio ambiente en concentraciones mayores que las que puede filtrar el agua que fluye entre el hule (por encima del nivel del manto). Estos metales se encuentran en la matriz de polímero de hule vulcanizado (hule alterado químicamente para incrementar su elasticidad y reducir su sensibilidad a la temperatura), pero el agua los puede lixiviar de la superficie del hule. Varios estudios indican que estos metales no constituyen un peligro agudo ni crónico para la salud o el medio ambiente en las condiciones que normalmente se encuentran en las canchas deportivas, según los criterios científicos de evaluación establecidos (Refs. 5 a 11).
- **Emisiones químicas orgánicas** – Los estudios indican que existe una amplia gama de compuestos orgánicos que pueden emitirse desde o hacia la superficie de los trozos de hule molido. En estudios detallados que se han realizado en Europa se concluyó que estos materiales no representaban un peligro considerable para los jugadores o los espectadores en estadios al aire libre que cuentan con pasto sintético (Refs. 11 a 14). Se sugiere además que mantener un índice mínimo de recambio atmosférico dentro del diseño normal del inmueble ayuda a limitar la exposición en los estadios techados. Estos estudios se hicieron a raíz de inquietudes que surgieron en Europa en el 2002. Las federaciones deportivas examinaron los datos y decidieron que las superficies con hule molido eran adecuadas para sus deportistas. El tema ha vuelto a surgir en el noreste de los Estados Unidos y se han realizado otros análisis de los datos disponibles, en los que generalmente se ha llegado a las mismas conclusiones en materia de seguridad y medio ambiente. En la sección de Referencias que se encuentra al final de este apartado se encuentra

un listado de los estudios representativos (Refs. 15 a 23). Ninguno de ellos indica que alguna de las miles de superficies recubiertas en los Estados Unidos o Europa haya provocado problemas de salud a los deportistas o a los espectadores. En algunos se cita la necesidad de contar con más datos, especialmente de tipo práctico, que provengan de instalaciones que se hayan hecho en campos deportivos. En los EE.UU., el Estado de Nueva York emitió en mayo del 2009 un informe con pruebas de campo estructuradas que confirman que este material y las superficies fabricadas con él son aceptables (Ref. 5). California está actualmente planeando la realización de pruebas de campo estructuradas para ampliar aún más la base de datos existente (Ref. 24).

## Superficies De Seguridad Para Áreas De Juego

Alrededor de las áreas de juego comúnmente se utilizan arena, virutas de madera, y gravilla como amortiguador, pero estos materiales tienen sus limitaciones. Las virutas de madera se deterioran con el tiempo y pierden su capacidad de amortiguar, por lo que frecuentemente se tienen que agregar más virutas de relleno. Por otro lado, la capacidad de la arena y la gravilla para absorber impactos es limitada. El desarrollo de tecnologías para el procesamiento de llantas de desecho ha generado productos idóneos para tres tipos de superficies de amortiguamiento para áreas de juego que han sido aceptados en los Estados Unidos.

### Descripción

Las tres alternativas para el amortiguamiento en áreas de juego en las que se usan distintas formas del hule molido son: (1) relleno suelto, (2) vaciado en la obra, y (3) baldosas moldeadas. El relleno suelto, que se ilustra en la Figura 3-3, fue el primer material de seguridad para áreas de juego derivado de llantas de desecho. Se trata simplemente de hule molido de alrededor de 1



Figura 3-3. Instalación de relleno suelto de hule molido  
Foto cortesía de American Rubber Technologies, Jacksonville, Florida

cm (3/8 de pulgada) al que se le ha quitado prácticamente todo el alambre de refuerzo. Algunos rellenos sueltos se fabrican a partir de llantas para camioneta reforzadas con tela o de llantas para todo terreno, para garantizar que no contengan alambre. Este relleno se distribuye debajo y alrededor de los juegos infantiles. Generalmente una capa de 14 cm (6 pulgadas) de espesor brinda protección en caso de caídas desde una altura de unos 3 m (10 a 12 pies), que es alrededor del doble de protección que ofrecen los materiales tradicionales. El relleno de hule molido suelto normalmente se coloca sobre un sustrato que permite que los líquidos fluyan libremente, con un borde de madera que impide que se salga del área de juegos. Las llantas son de color negro, pero el relleno suelto también se puede teñir antes de instalarlo para mejorar la apariencia estética del área.

Para el relleno en áreas de juego vaciado en la obra que se muestra en la Figura 3-4 se usa un aglutinante de poliuretano que permite fusionar el hule molido o el polvo residual del lijado de llantas y convertirlos en un tapete protector de 5 a 10 cm (2 a 4 pulgadas) de espesor. El hule molido y el aglutinante de poliuretano comúnmente se mezclan en el sitio de la obra en una mezcladora de cemento portátil y luego se vacían y emparejan con llana. Generalmente se integra a la base de hule molido una capa teñida de hule de monómero de etileno-propileno-dieno (MEPD) para dar un patrón o color característico a la superficie. El recubrimiento vaciado en la obra normalmente se instala sobre una superficie dura como el asfalto para que tenga una base estable. Se debe diseñar y probar la instalación de manera que brinde protección contra caídas desde la altura que tienen los juegos infantiles instalados en el área.

El hule molido también se puede moldear en forma de baldosas gruesas que se acoplan entre sí y sirven de protección contra caídas. Este tipo de baldosas, que se muestran en la Figura 3-5, normalmente son cuadrados de 1/3 a 2/3 m (1 a 2 pies) por lado y 5 a 10 cm (2 a 4 pulgadas) de grosor, y comúnmente se adhieren a un sustrato duro como el asfalto. El



Figura 3-4. Instalación en la obra  
Foto cortesía de Calgary, Canada Parks and Recreation



Figura 3-5. Instalación de baldosas entrelazadas  
Foto cortesía de Calgary, Canada Parks and Recreation

propósito de estas baldosas es ofrecer una superficie durable que cumpla con las especificaciones definidas de amortiguamiento.

### Situación actual del mercado

El uso de estos tres productos de hule molido para áreas de juego está ampliamente difundido, pero no existen datos de mercado publicados para definir las cantidades específicas de hule molido que se usan anualmente en estas instalaciones. Su uso se ha extendido, pero no es un mercado de rápido crecimiento. Muchos estados han impulsado el uso de estos productos mediante el otorgamiento de subsidios para financiar su costo, pero los volúmenes que se manejan fuera de estos programas especiales son limitados. California, Florida, Kentucky e Illinois son algunos de los estados que han promovido sustancialmente esta aplicación.

El relleno suelto es el más económico de instalar. Se ha usado ampliamente en Florida y Kentucky. El gasto principal es el hule molido en sí, más la preparación de la base y el borde perimetral en el área en la que se va a instalar el relleno. El costo inicial generalmente es mayor que el de las virutas de madera, pero el hule molido no se descompone, por lo que el costo anual de reemplazo es más bajo. Todos los productos de amortiguamiento para áreas de juego que se aplican sueltos se deben volver a emparejar periódicamente para mantener el nivel de grosor idóneo debajo y alrededor de los juegos.

El costo total del relleno vaciado en la obra y las baldosas ya instaladas normalmente es de 4 a 10 veces mayor que el del relleno suelto, debido a la preparación de la base, el gasto de los aglutinantes, y la mano de obra necesaria para la instalación. El vaciado en la obra y las baldosas se han usado ampliamente en California y Florida gracias a subsidios del gobierno estatal que fomentan el desarrollo del mercado, pero su uso es limitado cuando no se cuenta con estos apoyos.

### Requerimientos del hule molido

En las superficies para áreas de juegos se usan trozos de hule molido de diversos de tamaños. La fabricación de distintos tamaños de relleno suelto está subordinada a la necesidad de separar y remover prácticamente todo el alambre de refuerzo de las llantas de desecho para evitar

que algún usuario sufra heridas o lesiones. Normalmente el relleno es de ½ a 1¼ cm (¼ a ½ de pulgada) y frecuentemente se obtiene de llantas para camioneta reforzadas con tela o llantas para vehículos agrícolas todo terreno que no contienen alambre delgado de refuerzo, a fin de reducir al mínimo la posibilidad de que haya alambre residual en el producto. El alambre grueso para talón que se encuentra alrededor del rin de la llanta se retira con equipo separador antes de procesar las llantas, o con imanes después del procesamiento. El material debe estar libre de partículas de mallaje menor a 20 para reducir al mínimo la generación de polvo y partículas pequeñas que se adhieren a la piel a la ropa igual que la suciedad. La pelusa residual de la tela de refuerzo que se usa en las llantas a veces se deja en el hule molido, ya que puede mejorar la resistencia, pero también puede reducir el punto de inflamación de la mezcla y dejarla susceptible a que los vándalos le puedan prender fuego más fácilmente.

Para las baldosas vaciadas en la obra generalmente se usa hule molido de 3 a 10 mm (3/8 a 1/8 de pulgada). En ambos casos, la tela se remueve para mejorar la eficiencia y la efectividad del aglutinante, y el alambre se tiene que eliminar para minimizar la posibilidad de que algún usuario sufra raspones o cortaduras. Comúnmente se agrega a la superficie de hule molido una capa de hule sintético, conocido como MEPD (hule de monómero de etileno propileno dieno) o caucho clase M, el cual se tiñe para agregar color y realzar la belleza de la superficie. Los colores claros pueden reducir la absorción de la luz y ayudar a bajar la temperatura de la superficie en los climas cálidos.

### **Ventajas y desventajas de la aplicación**

**Durabilidad** – El hule es flexible, resistente, y duradero, propiedades que lo convierten en un buen material de amortiguamiento para exteriores. Algunas áreas de juegos con relleno suelto tienen más de 10 años y únicamente se les ha tenido que agregar una mínima cantidad de hule molido adicional para reemplazar el material que se ha perdido. La longevidad de las superficies vaciadas en la obra y de las baldosas depende de la efectividad de la instalación, el aglutinante, el sustrato, y el uso, pero los fabricantes normalmente contemplan una duración de más de 5 años.

**Facilidad de acceso** – Un aspecto que puede ser importante es la posibilidad de que los niños que andan en silla de ruedas o muletas puedan usar los juegos. Las excelentes características de amortiguación del relleno suelto también lo convierten en un material menos estable en los puntos donde se concentran cargas, como es el caso de las sillas de ruedas, pero se ha informado que algunos productos han pasado pruebas en las que se demuestra su accesibilidad. El vaciado en la obra y las baldosas tienen excelente accesibilidad, por lo que en algunas áreas de juegos se usan en los caminos de acceso y alrededor de algunos juegos para facilitar su uso, mientras que en otras áreas se usa relleno suelto para controlar costos.

**Inflamabilidad** – El hule de llanta tiene un punto de inflamación de más de 290° centígrados (550° Fahrenheit), que es más alto que el de las virutas de madera seca, por lo que no es tan fácilmente inflamable. Se han presentado incendios en instalaciones con relleno suelto, pero no ha habido lesiones ni daños ambientales aparte del humo inicial. El Departamento de Reciclaje y Recuperación de Recursos de California (CalRecycle) documentó un examen detallado de un incendio en un área de juego sin encontrar ningún daño ambiental residual (Ref. 26).

### **Ventajas y desventajas de la aplicación para la salud pública y el medio ambiente**

**Sensibilidad al látex** – Un pequeño porcentaje de gente es sensible al látex que se encuentra en algunos tipos de hule. CalRecycle realizó pruebas de sensibilidad al látex en caucho de estireno-butadieno (SBR, por sus siglas en inglés) derivado de llantas de desecho, como parte de su análisis exhaustivo de las superficies de hule molido para áreas de juego. No se detectó ninguna sensibilidad al usar procedimientos de prueba establecidos en hule molido de SBR y MEPD, ni se encontraron casos documentados en la consulta de la literatura disponible (Ref. 22).

**Toxicidad** – En el caso de las aplicaciones en áreas de juegos y pasto sintético han surgido inquietudes sobre la toxicidad y el medio ambiente en relación con el hule molido, habiéndose llegado a las mismas conclusiones generales anteriormente mencionadas. El informe detallado de CalRecycle aborda muchas de estas inquietudes. En él (1) no se identifica ningún inconveniente que impida el uso de las excelentes características de amortiguación del hule molido en las superficies de las áreas de juego, y (2) se reconocen los beneficios de reducir las lesiones con el uso de hule molido. El informe se titula “Evaluación de los efectos sobre la salud de las llantas de desecho recicladas en productos para áreas de juego y pistas de atletismo” [“Evaluation of Health Effects of Recycled Waste Tires in Playground and Track Products” (Ref 22)] y está disponible en el sitio web de CalRecycle en [www.calrecycle.ca.gov](http://www.calrecycle.ca.gov).

**Amortiguamiento de impactos** – El principal objetivo de los recubrimientos de seguridad para áreas de juegos infantiles es reducir el impacto de las caídas, y las tres alternativas citadas pueden servir para esta función igual o mejor que los materiales naturales si se instalan bien y se les da el mantenimiento adecuado (Ref. 24). La Comisión para la Seguridad de los Productos de Consumo de los EE.UU. [U.S. Consumer Product Safety Commission] ha elaborado una guía en la que se presentan datos detallados y se plantean parámetros para las áreas de juego, incluyendo las superficies. El documento está disponible en el sitio web [www.cpsc.gov/](http://www.cpsc.gov/) como Publicación 325, titulada “Manual de seguridad para juegos infantiles públicos [“Handbook for Public Playground Safety”]



## PRODUCTOS MOLDEADOS Y EXTRUIDOS

Los productos moldeados o extruidos se pueden crear vaciando hule caliente en un molde o troquel para dar forma a un nuevo producto. Este es un mercado muy versátil que puede generar una gran variedad de productos que van desde juguetes para mascotas, defensas para auto, empaques, y mangueras para jardín, hasta complejos componentes para equipo médico y eléctrico.

Los productos moldeados y extruidos son la segunda aplicación más importante del hule molido proveniente de llantas de desecho, según datos de mercado compilados por la Asociación de Fabricantes de Caucho (Ref. 1). Estos productos representaron el 36 por ciento del uso del hule molido en los Estados Unidos en el 2007, y constituyen un mercado que continúa creciendo. Este es un mercado diverso en cuanto a los productos y la tecnología para la fabricación, y podría tener buenas posibilidades de aplicación en México. El objetivo de este resumen es identificar las principales categorías de productos y las tecnologías, y presentar referencias para consulta adicional.

### Descripción

Los productos moldeados hechos de polvo de lijado (partículas de hule que se sacan del casco de la llanta durante el recauchutado) han existido durante muchos años, pero la gama de productos y el tamaño de los mercados se han ampliado considerablemente en los últimos 5 a 10 años. Hay tres tecnologías que son las principales para fabricar productos en los que se usa el hule molido solo o mezclado con otros materiales. A continuación se describen dichas tecnologías



*Ejemplo de conos de hule moldeado para señalización  
Foto cortesía de Candy Lee*

## Productos moldeados

Muchos de los productos iniciales eran partes moldeadas relativamente pequeñas, como las rueditas para los botes de basura. Hay muchas variaciones en la tecnología de moldeo, y todas usan un proceso básico similar. Una materia prima o mezcla se somete a pretratamiento para que fluya a un molde, en donde el material se cura, enfría y saca del molde, para obtener una forma sólida que cumpla con especificaciones definidas. El pretratamiento puede incluir calentar, mezclar y agregar aditivos para crear una materia prima homogénea y semi-viscosa. Una vez que se ha introducido en el molde, la temperatura, la presión y el tiempo de reacción permiten que el material se solidifique. También hay muchas variaciones en cuanto al nivel de automatización, el equilibrio del capital, y el costo de la mano de obra en los distintos ambientes operativos. Esta tecnología básica se ha probado extensamente con muchos polímeros y materiales de caucho, incluyendo mezclas con hule molido. Todos los componentes del proceso requieren de experimentación para optimizar la eficiencia y la calidad del producto. Esta tecnología puede exigir mucha mano de obra en su forma básica, por lo que lo económico de la mano de obra en México puede favorecer la fabricación de estos productos, así como la creación de empleos.

Un ejemplo de un mercado potencialmente viable en el que se usa este proceso es la producción de conos para señalización (también conocidos como conos viales, conos de seguridad, o conos de obra). La base de los conos se produce mediante el moldeo de compresión del hule molido que se obtienen de las llantas de desecho. El cuerpo del cono se hace de material plástico recuperado. El contenido de los materiales reciclados puede variar entre 50 y 100 por ciento, dependiendo del proceso de producción, por lo que estos productos son ecológicos. Hay más información sobre el uso del hule molido en los conos viales en la página <http://www.epa.gov/epawaste/conserve/tools/cpg/products/cones.htm>.

### Sistemas combinados

Los productos combinados con hule generalmente se refieren al uso de poliuretanos, azufre, látex, u otros ingredientes para fusionar el material particulado y convertirlo en algún producto específico. Para lo anterior a veces se usan presión y temperatura que permiten incrementar la densidad y optimizar la eficiencia. Esta tecnología inicialmente se usó en productos de gran tamaño y bajo volumen, como los rellenos para cruces ferroviarios y los topes para control de tráfico vehicular. Al haber ahora mejores aglutinantes y más creatividad en los productos, ha surgido una amplia gama de productos de mayor volumen que se han producido y comercializado con éxito. Los sencillos tapetes de bienvenida en los que se usaba hule molido combinado han evolucionado hasta convertirse en tapetes con diseños atractivos para los mercados masivos, por lo que se han convertido en un importante consumidor de hule molido, además de haber ahora otros tapetes que han ganado aceptación en aplicaciones agrícolas, recreativas y de construcción. Por



ejemplo, se ha demostrado que colocar tapetes en áreas agro-ganaderas incrementa la producción de leche del ganado vacuno y mejora el peso del ganado productor de carne. Esto representa un impulso a este importante segmento de mercado ya establecido en Norteamérica.

Las baldosas para áreas de juegos que se mencionan en la sección anterior son un ejemplo de un producto combinado. En un nuevo mercado en desarrollo se usan placas delgadas de hule molido combinado a manera de amortiguador y aislante del sonido en zonas habitacionales. Este producto a veces se fabrica desprendiendo una capa delgada de un cilindro grande de hule combinado, con lo que se logra producir un rollo grande de recubrimiento de caucho de  $\frac{1}{2}$  a 1 cm ( $\frac{1}{4}$  a  $\frac{3}{8}$  de pulgada) de grosor que se puede transportar e instalar fácilmente. Este material también se puede fabricar en forma de hojas de distintos tamaños.

Se han usado muchos aglutinantes distintos, pero los poliuretanos y el azufre son los más comunes. El azufre se considera más durable e idóneo para la exposición a los rayos ultravioleta (UV) en aplicaciones para exteriores. Algunos tipos de poliuretano pueden tolerar los rayos UV, y en estos productos se puede usar colorante para proteger el aglutinante de poliuretano de la exposición a los rayos UV.

El hule molido combinado se ha usado para fabricar cientos de productos, tanto para mercados pequeños como grandes. Algunos productos y procesos son sencillos, mientras que otros necesariamente se han hecho más sofisticados para acatar algunas especificaciones o para lograr la eficiencia requerida para competir en el mercado. Es fundamental entender bien los productos actuales, los requisitos de desempeño, la tecnología de proceso, y las condiciones económicas para desarrollar estas aplicaciones satisfactoriamente. El éxito generalmente requiere de un esfuerzo constante durante cierto tiempo.

### Extrusión

Los artículos largos como mangueras, burletes, tubos, molduras, y bandas comúnmente se fabrican mediante el proceso de extrusión. También hay muchas variaciones de esta tecnología, pero normalmente en ella se utiliza un sistema de rosca sinfín para mezclar, calentar y expulsar el material a través de un troquel para producir una forma continua. Este proceso es sensible a muchos parámetros y requiere hule molido de mallaje fino (mallaje 30 a 200). Cualquier alambre o fibra residual puede acelerar el desgaste o dañar los cabezales y el equipo de extrusión. En un futuro podría haber más campos de aplicación para el uso de mezclas de hule molido y plástico en la extrusión para generar productos como madera sintética, tejas, y otros materiales estructurales.

### Requerimientos del hule molido

Las especificaciones del hule molido para este segmento de mercado dependen del proceso, el producto y las condiciones económicas. Según las características que

se desee obtener serán los requerimientos de tamaño de los trozos de hule molido que se usen en estas aplicaciones. Los trozos de mayor tamaño requieren menos aglutinante y retienen las características del hule, pero necesariamente el producto resultante tiene menos fuerza de aglutinación y una textura más burda en la superficie. Las baldosas de seguridad para áreas de juego son un ejemplo de uso de hule molido de unos 0.5 cm ( $\frac{1}{4}$  de pulgada). Las partículas más finas (mallaje 10 a 40) requieren más aglutinante, por lo que cuentan con más fuerza, y brindan una superficie más lisa que se asemeja a la de los materiales vírgenes. Los volantes y guardafangos para autos son dos ejemplos de productos que requieren partículas así de finas.

La economía también es un factor en la selección. El costo del hule molido generalmente se incrementa cuanto menor sea el tamaño de los trozos, y los aglutinantes generalmente son mucho más caros que el hule molido. En consecuencia, los productos que se fabrican con hule más fino y más aglutinante normalmente son más caros. En última instancia, producto debe ser lo suficientemente rentable como para poder competir en el mercado.

### Ventajas y desventajas de la aplicación

#### Materia prima de bajo costo

El hule molido puede ser un material de bajo costo con muchas de las propiedades intrínsecas de desempeño del hule puro. La creatividad y la tecnología para su uso han incrementado la diversidad y los volúmenes del mercado. Se prevé que esta tendencia continúe a medida que aumentan los costos del material virgen.

#### Dificultades para el desplazamiento

Hacer un nuevo producto puede implicar una inversión considerable en tecnología de proceso, equipo, optimización, pruebas del producto, distribución y mercadeo. Todo esto exige tiempo y recursos que con frecuencia se subestiman. Incorporar el hule molido a una fórmula ya existente puede plantear dificultades similares, especialmente para la optimización del proceso y las pruebas del producto.

#### Mezclas

El hule generalmente funciona como relleno en las mezclas con plástico. El hule termofraguado y el termoplástico no se aglutinan de manera natural, por lo que las características de desempeño del plástico sufren cambios considerables al agregar el hule. La resistencia al impacto normalmente aumenta, pero otras propiedades importantes como la resistencia a la tracción y el alargamiento se reducen considerablemente, disminuyendo así la resistencia del producto resultante. La capacidad de aplicación de estas mezclas depende de la identificación de productos en los que la resistencia al impacto sea más importante que otros requisitos de desempeño, o del desarrollo de tecnologías económicamente viables para la modificación de las

superficies de hule que permitan la aglutinación de los materiales. Acerca de este tema se han realizado bastantes investigaciones gracias a las cuales se ha podido reducir el deterioro de los artículos, pero los productos que se han generado rara vez logran competir con los materiales vírgenes. No obstante, el aumento en los costos de los polímeros de hidrocarburos y el hule virgen podrían constituir un incentivo adicional para que se desarrolle más esta tecnología o para que los fabricantes toleren una moderada reducción en el desempeño.

### ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMERO

El asfalto modificado con polímero es el producto de la combinación de miga de hule obtenida de llantas de desecho u otras fuentes, con asfalto. Esto se puede hacer en diversas proporciones de hule y asfalto, dependiendo del uso que pretenda dársele. La primera tecnología para el asfalto modificado con polímero (AMP) se desarrolló hace más de 30 años, se ha promovido activamente por lo menos durante los últimos 20, y ha continuado evolucionando. Las patentes de McDonald ya caducaron, y esta tecnología ahora se conoce comúnmente como el Proceso Arizona debido a que en ese estado se utiliza ampliamente. En un afán por resolver los inconvenientes detectados o mejorar el desempeño se han desarrollado variaciones. En todos los casos el hule se mezcla con el aglutinante asfáltico, luego éste se mezcla con el agregado y se esparce sobre las vialidades para formar el pavimento asfáltico. Esta técnica se conoce genéricamente como el proceso húmedo, ya que el hule se mezcla primero con el aglutinante asfáltico.

#### Descripción de las tecnologías

A continuación se presenta una breve descripción de las tres principales tecnologías para la fabricación de asfalto modificado con polímero:

##### Proceso Arizona

En el proceso Arizona se mezcla y se hace reaccionar el hule con aglutinante asfáltico en un equipo especializado en el sitio de la obra. El hule molido normalmente representa alrededor del 20 por ciento de la mezcla de aglutinante asfáltico, lo cual aumenta considerablemente la viscosidad del aglutinante. Una mayor viscosidad permite que se use una concentración más alta de aglutinante en la mezcla asfáltica, lo cual produce un pavimento más fuerte y duradero. El uso de hule, más aglutinante asfáltico, y equipo de mezclado especializado en la obra incrementan el costo por unidad de tonelada de asfalto de un 25 a un 100 por ciento más que el asfalto tradicional, dependiendo de la ubicación de la obra, la magnitud de la misma, y otros criterios específicos. En algunos casos, el aumento en la resistencia del pavimento ha permitido que los revestimientos de asfalto modificado con polímero más delgados tengan un ciclo de vida semejante al del asfalto tradicional más grueso, de manera que el costo del asfalto modificado con polímero instalado es equiparable.

### Mezclado terminal

Para el mezclado terminal se mezcla hule con el aglutinante asfáltico en un tanque de mezclado en el lugar donde se suministra el asfalto, para luego transportarlo al sitio de la obra, reduciendo así la necesidad de contar con equipo especializado en la obra. La combinación se debe seguir mezclando continuamente para impedir que el hule suspendido se sedimente antes de transportarlo. Los niveles de uso de hule se especifican para satisfacer las características de desempeño del diseño del pavimento. Esta tecnología se ha usado durante 15 años en Florida con resultados satisfactorios. Florida ha sido el único estado que ha especificado el uso de asfalto modificado con polímero para el reemplazo de planos de de fricción en la mayoría de las vialidades de tráfico pesado que son responsabilidad del estado, incluyendo las carreteras interestatales. Esta tecnología gradualmente se empieza a usar más en otros estados como California debido a su bajo costo.

### Mezclas de hule y polímero

Los copolímeros en bloque de estireno-butadieno-estireno (EBE) también se usan como aditivos en el asfalto para mejorar su desempeño. Sin embargo, quienes la promueven consideran que la combinación del copolímero en bloque de EBE y hule con el asfalto mejora aún más el desempeño que cada uno de estos materiales por separado. Esta tecnología ha tenido amplia aplicación en Texas y otros estados de la Unión Americana en los que se han usado variaciones de los compuestos, dependiendo de la zona geográfica de aplicación. El Departamento de Transporte (DT) de Florida está realizando una evaluación integral de varias tecnologías con polímeros y hule en comparación con el asfalto tradicional. La tecnología actual utiliza un bajo porcentaje de hule para desplazar parcialmente los niveles normales de adición de polímeros. Aunque esta tecnología es la más reciente, rápidamente se está desarrollando un considerable acervo de experiencias y pruebas.

La disponibilidad del hule, polímeros y tecnología para la mezcla de estos dos materiales también es un factor en el desarrollo de alternativas para el diseño de pavimentos que puedan reducir los niveles de ruido en vialidades y mejorar la seguridad de las mismas. Esto se logra mediante el uso de pavimento con carpeta abierta como superficie de fricción (OGFC, por sus siglas en inglés), usando agregado grande con granulometría uniforme. El agua de lluvia fluye a través de la capa superior del pavimento (la carpeta de fricción) y sale hacia los lados del camino, lo cual reduce la posibilidad de que los vehículos patinen y mejora la visibilidad de los conductores al reducir la cantidad de agua que salpica de las llantas de los vehículos. La estructura abierta también crea una superficie acústica que absorbe y desvía algo del sonido y reduce el ruido de las vialidades que pudiera ser molesto para los habitantes de la zona. Se están realizando actualmente experimentos para determinar si los niveles de reducción de ruido ameritan el uso a largo plazo de este pavimento como alternativa a las costosas y poco

atractivas pantallas anti-ruido que se colocan a lo largo de las carreteras en zonas pobladas. Arizona y California están usando mucho este material, y otros estados como Texas utilizan la carpeta abierta por motivos de seguridad en vialidades que históricamente han sido peligrosas. La optimización de los aglutinantes es un factor importante para que la carpeta abierta pueda mantener su integridad a largo plazo, y el hule contribuye a la reducción del ruido.

### Situación actual del mercado

El asfalto modificado con polímero es la tercera aplicación más difundida del hule molido en los Estados Unidos. Representa el 9 por ciento del mercado del hule molido o menos del 2 por ciento de la generación anual de llantas de desecho en el 2007, según la Asociación de Fabricantes de Caucho [Rubber Manufacturers Association o RMA] (Ref. 1). Más del 90 por ciento del asfalto modificado con polímero se usa actualmente en Arizona, Florida, Texas, California y Carolina del Sur. Muchos otros estados han realizado pruebas o programas piloto, pero aún usan muy poco asfalto modificado con polímero. Asimismo, las provincias canadienses de Alberta y Ontario han realizado extensos programas de prueba. Aún así, el uso total del hule molido en esta aplicación no ha aumentado significativamente en los últimos 5 o 10 años. La reducción en la pavimentación y una mayor conciencia sobre los costos a consecuencia de las limitaciones presupuestales de los departamentos de transporte han contribuido a que el crecimiento sea limitado.

### Requerimientos para el hule molido

Todos los estados de la Unión Americana han establecido sus propias especificaciones para el hule molido, con variaciones para algunas aplicaciones. En el Proceso Arizona típicamente se usa hule molido de mallaje 16-30 con un límite bajo de alambre y fibra residual. Para el mezclado terminal en Florida inicialmente se usaba hule molido de mallaje fino, como el de menos 80 (el término menos significa que es más fino que el 80, ya que el material ha pasado por una criba con mallaje 80), pero se descubrió que el mallaje de menos 40 funcionaba bien a un menor costo y con una mayor disponibilidad. Hay

mucha variación en las mezclas de polímeros con hule, y en algunas tecnologías el hule se somete a pretratamiento para mejorar su reactividad en el asfalto.

### Ventajas y desventajas de la aplicación Desempeño

Se ha documentado que las vialidades en las que se usan el proceso Arizona o el de mezclado terminal tienen mayor duración que el asfalto tradicional, incluso a veces una duración considerablemente mayor, pero su nivel de desempeño no ha sido uniforme. El bajo desempeño se le ha atribuido a una deficiente instalación, las condiciones climáticas, la preparación del sustrato, y la granulometría del agregado. En Florida se descubrió que el asfalto modificado con polímero se desempeñaba bien, pero que los polímeros funcionaban mejor que el asfalto modificado con polímero mezclado en terminal en algunas aplicaciones para tráfico pesado. Este descubrimiento suscitó que se hicieran modificaciones temporales o se diseñaran especificaciones para permitir el uso de polímeros, y con ello se iniciaron en ese estado las investigaciones anteriormente mencionadas en materia de mezclas de polímeros y hule. En las pruebas realizadas en Alberta se encontraron variaciones en el desempeño, algunas probablemente atribuibles a la curva de aprendizaje inicial.

### Costo

El costo ya instalado del asfalto modificado con polímero de grosor equivalente generalmente es de 10 a 100 por ciento mayor que el del asfalto sin modificar, como se mencionó anteriormente. Dado que los presupuestos de los departamentos de transporte son fijos, un costo más elevado obliga a que haya menos pavimentación y puede causar problemas a corto plazo, aún cuando genere beneficios a largo plazo. En caso de poderse aplicar y ser aceptable, el uso de alzamientos (capas) más delgados en el caso del asfalto modificado con polímero puede hacer que el costo se convierta en una ventaja.



Hipódromo con recubrimiento de hule molido. Foto cortesía de American Rubber Technologies, Jacksonville, Florida



Hule molido usado como recubrimiento para jardines. Foto cortesía de American Rubber Technologies, Jacksonville, Florida





*Recubrimiento de hule molido para jardines  
Foto cortesía de American Rubber Technologies, Jacksonville, Florida*

### Justificación de costos

A medida que el público cobra más conciencia acerca de las ventajas de la carpeta abierta u OGFC en cuanto a seguridad y ruido, se debe ampliar la comparación de costos para incluir otros factores como la prevención de accidentes y la protección contra el ruido. En ese caso, no se comparará con el asfalto tradicional, sino con las mezclas de OGFC alternativas, y en estas aplicaciones el asfalto modificado con polímero ha demostrado su efectividad.

### Calidad del hule molido

La calidad del hule molido es un factor de desempeño clave para el asfalto modificado con polímero. Los procesadores de hule molido deben conocer las especificaciones del producto y apegarse a ellas de manera constante, ya que de no hacerlo se corre el riesgo de estropear el pavimento y perder el apoyo de los departamentos de transporte y los contratistas encargados de la instalación.

### OTROS MERCADOS

Existen muchos mercados de menor escala para el hule molido. Algunos son variaciones de los mercados principales mencionados en este mismo documento, mientras que otros son productos muy especializados, y unos pocos ofrecen un potencial significativo de crecimiento. A continuación se presenta una breve descripción de algunos de estos productos:

#### Amortiguamiento para hipódromos

Es una variación del relleno suelto que se usa como amortiguamiento en las áreas de juegos. El hule molido desempeña una función similar en los hipódromos, ya que brinda una protección similar a los caballos y sus jinetes durante los entrenamientos y las exhibiciones. Asimismo, se informa que mejora el afianzamiento y reduce la tensión sobre las patas y articulaciones de los caballos. El material debe acatar especificaciones definidas para equilibrar el afianzamiento con la protección contra impactos. Este pequeño pero útil y estable mercado puede tener un considerable potencial de mercado en México.

### Colchonetas para animales

El hule molido burdo se usa como relleno en colchonetas de tela que son una alternativa a los productos moldeados y combinados que se mencionaron anteriormente. Se usan principalmente en la industria lechera para reducir las lesiones en las patas de los animales, brindarles mayor comodidad, y darles protección a las ubres del ganado vacuno, con lo cual se puede aumentar la producción lechera. Las investigaciones han demostrado que los colchones rellenos de hule duran más, ya que no se comprimen tan rápido y funcionan mejor en temperaturas extremas (Ref. 26). En ellos se usa menos del 3 por ciento de las existencias actuales de hule molido, y son un mercado que ha demostrado potencial de crecimiento, según la Asociación de Fabricantes de Caucho de EE.UU. (Ref. 1)

### Recubrimiento teñido para jardinería

Comúnmente se esparcen alrededor de las plantas y lechos de flores virutas de madera que ayudan a retener la humedad, controlar la maleza, y optimizar la belleza del paisaje. Sin embargo, este tipo de recubrimiento se descompone, sirve de refugio a los insectos, y requiere un reemplazo frecuente. En experimentos iniciales con virutas de llanta negra se encontró que éstos servían para controlar la maleza mucho mejor que las virutas de madera y no se movían de su lugar, pero el color negro absorbe el calor y tenía muy poco atractivo estético. En experimentos posteriores se han descubierto métodos relativamente sencillos para teñir las virutas con pintura que se adhiere bien y resiste la decoloración, con lo cual se garantiza un buen desempeño durante 5 años o más.

Los recubrimientos teñidos de hoy en día son virutas de 1 – 2.5 cm (3/8 a 1 pulgada) de tamaño que provienen de llantas de desecho a las que se les ha quitado un 99 por ciento del alambre de refuerzo. Se fabrica en colores atractivos para simular virutas de madera o para producir colores combinados o contrastantes. Se ha demostrado que sirven para controlar la maleza, son resistentes al moho, retienen la humedad, y no exigen un reemplazo frecuente. Como beneficio adicional, este recubrimiento no promueve la proliferación de insectos ni atrae a los animales.

Sobre el uso de recubrimientos teñidos para jardinería se han mencionado algunos factores como:

#### Inflamabilidad

En pruebas limitadas se ha demostrado que el recubrimiento teñido tiene una temperatura de combustión de más de 290° centígrados (550 ° Fahrenheit), por lo cual es semejante a la de las virutas de madera.

#### Temperatura

Los trozos de hule molido negro absorben la luz y pueden sobrecalentarse. El recubrimiento para jardinería teñido no absorbe tanta energía, por lo que reduce la temperatura.



## Lixiviación del zinc

El hule de llanta contiene alrededor del 1.5 por ciento de zinc como acelerador de la vulcanización en la matriz de polímero de hule. El agua puede lixiviar paulatinamente pequeñas cantidades de zinc de las virutas hacia el subsuelo. El zinc en cantidades mínimas sirve de micronutriente para muchas especies, pero en cantidades excesivas puede tener un impacto negativo sobre algunas plantas y pastos. La lixiviación es lenta y se controla colocando virutas en la superficie de los lechos vegetales, pero se podría acelerar si las virutas continuamente están cubiertas por agua o tierra. El teñido del recubrimiento limita la exposición de la superficie a la humedad, reduciendo así la posible lixiviación.

El recubrimiento de hule para jardinería inicialmente se vendía en pequeñas cantidades en invernaderos y tiendas especializadas; sin embargo, se está convirtiendo en un producto establecido con una presencia cada vez mayor en las principales bodegas de descuento en todo Estados Unidos. De continuar los índices de crecimiento actuales, el recubrimiento teñido para jardinería podría convertirse en un mercado de gran magnitud y alto valor para las virutas de llantas de desecho.

## RESUMEN

Los productos de hule molido son símbolos de la creatividad y los conocimientos que se han desarrollado para darle un uso productivo a las llantas de desecho. Aunque sería conveniente usar todas las llantas de desecho en estas aplicaciones y otras similares, se han necesitado muchos años para llegar a usar el 17 por ciento de la cantidad de llantas de desecho que se generan anualmente. Estos productos pueden ser un importante componente para el uso de las llantas de desecho en un largo plazo, a la vez que los esfuerzos iniciales que se realizan para el desarrollo de mercados se concentran en las aplicaciones energéticas y de ingeniería civil para potenciar al máximo el uso de este recurso a corto plazo.

## REFERENCIAS

1. Rubber Manufacturers Association. 2009. Scrap Tire Markets in the United States. 9th Biennial Report. Mayo.
2. Dick, R.W. 2004. Injury Surveillance System-Football 2004-04. Investigación de la NCAA.
3. Meyers, M.C. and B.S. Barnhill. 2004. , Incidence, causes and severity of high school football injuries on FieldTurf versus natural grass. *Am J Sports Medicine*, 32(7).
4. McNitt, A.S. and Petunak, D. Evaluation of Playing Surface Characteristics of Various In-filled Systems. Penn State University (<http://cropsoil.psu.edu/menitt/Infill.cfm>)
5. Lim, L and Walker, R. 2009. An Assessment of Chemical Leaching, Releases to Air and Temperature at Crumb-rubber Infilled Synthetic Turf Fields. New York State Department of Environmental Conservation and New York State Department of Health. Mayo.
6. Verschoor, A.J. 2007. Leaching of zinc from rubber infill on artificial turf (football pitches). RIVM: Bilthoven, Países Bajos.
7. Downs, L., and others. 1996. Water quality effects of using tire chips below the groundwater table. In: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maine: Orono, Maine.
8. Humphrey, D.N. and E.K. Lynn. 2000. Five Year Study of the Water Quality Effects of Tire Shreds Placed Above the Water Table. Transportation Research Board: Washington, DC.
9. Sullivan, J.P. 2006. An Assessment of Environmental Toxicity and Potential Contamination from Artificial Turf using Shredded or Crumb Rubber.
10. Kallqvist, T. 2005. Environmental risk assessment of artificial turf systems. Norwegian Institute for Water Research: Oslo.
11. Johns, D.M. and Goodlin, T. 2008. Evaluation of Potential Environmental Risks Associated with Installing Synthetic Turf Fields on Bainbridge Island. Seattle, Washington: Windward Environmental LLC.
12. Norwegian Institute of Public Health and the Radium Hospital. 2006. Artificial turf pitches- an assessment of the health risks for football players. Oslo, Noruega
13. Nilsson, N.H., A, Feilberg, and K. Pommer. 2005. Emissions and evaluation of health effects of PAHs and aromatic amines from tyres. Danish Ministry of the Environment.
14. The Swedish Chemicals Inspectorate (Kemi). 2006. Synthetic turf from a chemical perspective – a status report. KEMIKALIENIMSPEKTIONEN Sundbyberg.
15. Hoffman, K., and others. 2000. The German environmental survey 1990/92 (GerESII): Sources of personal exposure to volatile organic compounds. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 10: p. 115-125.
16. Birkholz, D.A., K.L. Benton and T.L. Guidotti. 2003. Toxicological evaluation for the hazard assessment of tire crumb for use in public playgrounds. *J Air Waste Management Assoc*, 53(7).
17. Ledoux, T. 2007. Preliminary Assessment of the Toxicity from Exposure to Crumb Rubber: its use in Playgrounds and Artificial Turf Playing Fields. New Jersey Department of Environmental Protection, Division of Science, Research and Technology: Trenton, New Jersey.
18. Johns, D.M. 2008. Initial evaluation of potential human health risks associated with playing on

synthetic turf fields on Bainbridge Island. Seattle, Washington: Windward Environmental LLC.

19. Brown, D.R. 2007. Artificial Turf – Exposures to Ground-Up Rubber Tires – Athletic Fields – Playgrounds – Gardening Mulch. N. Alderman and S. Addiss, Editors, Environment & Human Health, Inc. North Haven, Connecticut, p. 1-40.
20. New York City Department of Health and Mental Hygiene. 2008. A Review of the Potential Health and Safety Risks from synthetic Turf Fields Containing Crumb Rubber Infill. Windsor, Connecticut: TRC.
21. Rubber Manufacturers Association. 2008. Review of the Human Health and Ecological Safety of Exposure to Recycled Tire Rubber found at Playgrounds and Synthetic Turf Fields. Pittsburgh, Pennsylvania: Chem Risk, Inc.
22. California Integrated Waste Management Board. 2007. Evaluation of Health Effects of Recycled Waste Tires in Playground and Track Products. Sacramento, California.
23. New York State Department of Environmental Conservation. 2008. A Study to Assess the Environmental Impacts from the Use of Crumb Rubber as Infill Material in Synthetic Turf Fields. 17 de junio.
24. California Integrated Waste Management Board. 2008. Draft Scope of Work: Evaluation of the safety of artificial turf fields containing crumb rubber from recycled tires. Disponible en: [www.ciwmb.ca.gov/agendas/mtgdocs/2008/04/00023252.doc](http://www.ciwmb.ca.gov/agendas/mtgdocs/2008/04/00023252.doc).
25. Amme, R.C., and others. 2003. Scrap tires in full swing: a recent study demonstrates the benefits of playground surfaces covered with recycled crumb rubber. Resource Recycling.
26. California Integrated Waste Management Board. 2004. Construction Completion Report for the Yulupa Elementary School Tire Chip Fire.
27. Fulwider, W., and others. 2004. Use of Impact Testing to Predict Softness, Cow Preference, and Hardening over Time of Stall Bases. Journal of Dairy Science. 87: 3080-3088.

# CAPÍTULO 4

## Aprovechamiento energético

Las llantas de desecho son un recurso. El pilar fundamental de un programa efectivo de gestión de llantas de desecho es desarrollar diversas aplicaciones o funciones a las cuales se pueda aplicar este recurso, preferentemente (1) que se puedan desarrollar en un tiempo razonablemente corto; (2) que utilicen grandes cantidades de llantas; (3) que sean sólidas desde el punto de vista técnico y ambiental; y (4) sean económicamente factibles y sustentables. La aplicación principal de las llantas de desecho en los Estados Unidos, Europa y Japón, entre otros países, es como recurso energético complementario.

Las llantas de desecho se han usado para generar energía en Japón, Europa y Estados Unidos desde la década de 1970. En los Estados Unidos las fábricas de papel empezaron a usar combustible derivado de llanta (CDL) desde fines de esa misma década. En los últimos 10 a 15 años se ha ampliado considerablemente la plataforma de experiencia a medida que se van reconociendo las llantas como una alternativa viable para algunos procesos de combustión. Una vez que una llanta llega a un apilamiento, sus usos son limitados, pero aún sigue siendo una opción viable para el aprovechamiento energético. Entre las aplicaciones están los hornos cementeros, las calderas industriales, los servicios públicos, y las plantas de generación de energía eléctrica. En el 2007 se usaron 155 millones de llantas de desecho como combustible en 123 plantas autorizadas en los Estados Unidos, según un análisis de mercado realizado por la Asociación de Fabricantes de Caucho de EE.UU. (RMA) (Ref. 1). Este volumen representa casi 2.3 millones de toneladas métricas (2.5 millones de toneladas inglesas) o el 54 por ciento de la generación de llantas de desecho.

En las siguientes secciones se plantean las características energéticas y químicas de las llantas, así como la experiencia que se ha adquirido en las principales aplicaciones de generación de energía, con el objetivo de ayudar a los gobiernos y a las industrias a evaluar y desarrollar estos usos como parte de los programas de gestión que se encuentran en constante evolución en México y los Estados Unidos.

### CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LAS LLANTAS DE DESECHO

Las características químicas de cualquier recurso energético afectan su desempeño técnico y ambiental. Las llantas son un material proveniente de hidrocarburos derivados del petróleo y el gas natural al que se le agregan algunos materiales inorgánicos para optimizar las reacciones de vulcanización o sus propiedades de desempeño, como la flexibilidad o la resistencia a la luz UV. Las llantas tienen un contenido calorífico de 14,000

a 15,500 unidades térmicas británicas por libra (BTU/libra) (7,800 a 8,600 kilocalorías por kilogramo [kcal/kg]), dependiendo del tipo de llanta y la cantidad de alambre de refuerzo que se le haya extraído. En comparación, otro combustible sólido comúnmente desplazado por el uso de llantas como fuente energética es el carbón, que normalmente contiene de 10,000 a 13,000 BTU/libra (5,550 a 7,200 kcal/kg).

En algunas aplicaciones, como en los hornos cementeros, se pueden utilizar llantas enteras. Para otras aplicaciones las llantas tienen que ser fraccionadas en trozos más pequeños llamados CDL, a los que se les extrae el talón y el alambre de refuerzo en caso necesario. Independientemente del tamaño de las partículas, las llantas siguen siendo un combustible sólido, por lo cual los sistemas en donde se apliquen deben poder recibir y quemar combustible sólido para ser candidatos a usar CDL. La energía del CDL puede reemplazar al petróleo y al gas –cuyo costo es mayor– en casos en los que hay combustión simultánea de petróleo, gas y combustible sólido en el mismo horno.

La composición de las llantas y el carbón varía dependiendo de su tipo y origen. Sin embargo, el Cuadro 4.1 presenta el análisis representativo inmediato y elemental del CDL al que se le ha extraído cerca del 90 por ciento del alambre de refuerzo, así como del carbón bituminoso que se usa para generar vapor. En el análisis inmediato se definen las características básicas de combustión, mientras que en el análisis elemental se define la composición.

La comparación del análisis inmediato indica que las llantas ofrecen ventajas en cuanto a eficiencia en comparación con el carbón; por ejemplo, las llantas generalmente tienen menor contenido de humedad que el carbón. Dado que la energía que se requiere para calentar y vaporizar el agua generalmente no es recuperable en el proceso de conversión de energía, un contenido más bajo de humedad puede repercutir en una mayor eficiencia en la combustión. El CDL es de 1 a 3 por ciento más eficiente que los tipos de carbón citados en el Cuadro 4-1 debido a su menor contenido de humedad. El menor contenido de ceniza del CDL (sin alambre) ofrece una ventaja semejante en comparación con el carbón, y su costo de disposición puede ser menor. La proporción más alta de carbono volátil-carbono fijo en las llantas acentúa su capacidad para hacer combustión de manera rápida y completa. Las ventajas del CDL se ponen de manifiesto cuando se compara con el carbón o lignito que genera mucha ceniza y pocos BTUs. Según el

**Cuadro 4-1 Comparación de características químicas**

CARACTERÍSTICA	CARBÓN BITUMINOSO –NORESTE DE EE.UU.	CDL (90+% SIN ALAMBRE))	CARBÓN SUB- BITUMINOSO – OESTE DE EE.UU.
HUMEDAD (% TAL COMO SE RECIBE)	10.43	0.62	24.68
PODER CALORÍFICO (BTU/ LIBRA, TAL COMO SE RECIBE)	10,641	15,404	9,287
<b>ANÁLISIS INMEDIATO (% , SOBRE MUESTRA SECA)</b>			
CENIZA	16.16	4.81	6.37
CARBONO VOLÁTIL	38.14	67.06	44.43
CARBONO FIJO	45.70	28.13	49.20
TOTAL	100.00	100.00	100.00
<b>ANÁLISIS ELEMENTAL (% , SOBRE MUESTRA SECA )</b>			
CARBONO	65.49	83.79	70.73
HIDROGENO	4.56	7.13	4.85
NITRÓGENO	1.11	0.24	0.84
AZUFRE	4.52	1.84	0.41
CENIZA	16.16	4.81	6.37
OXÍGENO (por diferencia))	8.16	2.18	16.80
TOTAL	100.00	100.00	100.00
<b>ANÁLISIS ELEMENTAL EXPRESADO EN LIBRAS/MILLONES DE BTU</b>			
CARBONO	55.13	54.05	57.36
HIDROGENO	3.84	4.60	3.93
NITRÓGENO	0.93	0.16	0.68
AZUFRE	3.81	1.19	0.33
CENIZA	13.61	3.12	5.17
OXÍGENO (por diferencia)	6.87	1.42	13.62
SUBTOTAL	84.19	64.54	81.09
HUMEDAD	9.80	0.40	24.68
TOTAL	93.99	64.94	105.77

análisis inmediato, las llantas aventajan al carbón como fuente energética.

Conforme al análisis inmediato, las llantas ofrecen algunas otras ventajas y desventajas. Si se compara con muchos carbones provenientes del este de EE.UU., el contenido más bajo de azufre del CDL (especialmente en términos de libras por millón de BTUs) ofrece la ventaja potencial de reducir las emisiones de compuestos gaseosos de óxido de azufre que se conocen como SOx. Sin embargo, el contenido de azufre de muchos carbones provenientes del oeste de EE.UU. es menor, por lo que los óxidos de azufre se deben controlar en estos sistemas para evitar un aumento con el CDL.

Los sistemas de combustión usan menos combustible altamente energético para obtener la misma cantidad de energía, por lo que expresar el análisis elemental en

libras por unidad de energía, como millones de BTUs, sirve para identificar algunos otros factores ambientales importantes. La combustión de CDL genera menos carbono por millón de BTUs que cualquiera de los dos carbones mencionados en la Figura 4-1. Dado que durante la combustión el carbono se convierte al gas de efecto invernadero dióxido de carbono (CO2), en comparación con los carbones, el CDL reduce las emisiones de este gas. Asimismo, el CDL tiene un mayor contenido de hidrógeno. Cuando el hidrógeno se combina con el oxígeno durante la combustión, libera energía y forma agua (H2O) sin generar gases de efecto invernadero, por lo que la energía derivada de la combustión del hidrógeno también reduce la formación de gases de efecto invernadero en comparación con el carbón. Por lo tanto, desde el punto de vista energético el carbón, con un menor contenido de carbono y mayor



**Cuadro 4-2 Análisis elemental de metales**

ELEMENTO (ÓXIDO)	CARBÓN BITUMINOSO -NORESTE DE EE.UU. .	CDL (90%= SIN ALAMBRE)	CARBÓN SUB- BITUMINOSO – OESTE DE EE.UU.
<b>PRINCIPALES ÓXIDOS EN LA CENIZA, COMO % DEL PESO TOTAL EN SECO</b>			
Aluminio ( $Al_2O_3$ )	19.10	<0.01	18.10
Calcio (CaO)	5.18	0.38	13.50
Hierro ( $Fe_2O_3$ )	20.40	0.32	4.90
Magnesio (MgO)	0.82	<0.01	4.52
Fósforo ( $P_2O_5$ )	0.17	<0.01	0.36
Potasio ( $K_2O$ )	1.87	<0.01	1.01
Titanio ( $TiO_2$ )	0.89	<0.01	1.20
Sílice ( $SiO_2$ )	49.20	0.52	36.20
Sodio ( $Na_2O$ )	0.71	<0.01	5.55
Azufre ( $SO_3$ )	1.60		13.40
<b>ELEMENTOS TRAZA, PPM EN EL CARBÓN O EL CDL</b>			
Plata	0.02		0.02
Arsénico	4		1
Bario	43	ND	694
Berilio	1.3		0.2
Cadmio	0.02	0.0006	0.02
Cloro	1200	0.149	900
Cromo	21	0.0097	5
Cobre	10		13
Mercurio	0.05		0.04
Manganeso	62	<.01	18
Níquel	14		1
Plomo	15	0.0065	4
Rubidio	15		4
Selenio	1		1
Plata	0.02		0.02
Estroncio	41	<0.1	348
Vanadio	3		15
Zinc	97	1.52	8
Circonio	26		22

contenido de hidrógeno, produce menos gases de efecto invernadero. Asimismo, el CDL, al tener un contenido más bajo de nitrógeno, puede reducir levemente las emisiones de compuestos de óxido de nitrógeno conocidas como NOx.

El contenido de cloro en las llantas es más alto que el de algunos carbones, pero semejante al de otros. Además, el contenido de cloro se ha reducido considerablemente en muchas de las llantas nuevas, ya que el revestimiento interno de butilo clorado se ha reemplazado con otros materiales.

El análisis elemental de la ceniza que se presenta en el Cuadro 4-2 indica que las concentraciones de metales en las llantas generalmente son semejantes a las del carbón o menores, con una notable excepción. A las llantas se les agrega zinc como parte del proceso de vulcanización del caucho, en niveles de aproximadamente 1.0 a 1.5 por ciento por peso. Por lo tanto, los niveles de zinc en las llantas son mucho más altos que en el carbón. En las aplicaciones que usan llantas como recurso energético se deben por lo tanto poder controlar las emisiones de zinc para evitar un impacto ambiental negativo. El equipo que comúnmente se usa para el control de la contaminación

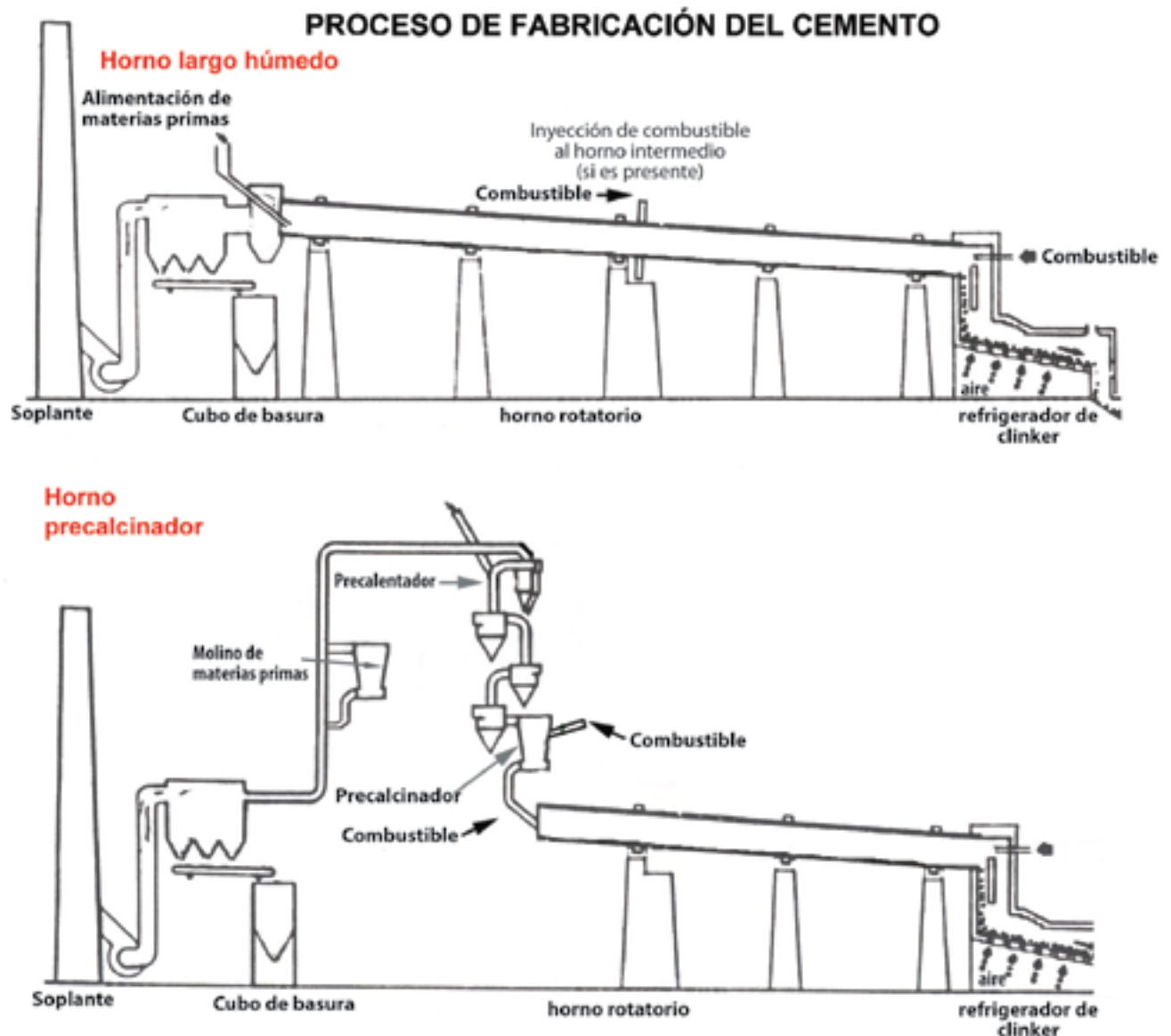


Figure 4-1. Proceso de fabricación de cemento  
Fuente: Portland Cement Association

atmosférica, como los precipitadores electrostáticos y las cámaras de filtros, se usa para controlar de manera efectiva las emisiones de óxido de zinc provenientes de la combustión de CDL.

Desde el punto de vista químico, las llantas ofrecen tanto ventajas como desventajas ambientales en comparación con el carbón. Por lo tanto, las llantas constituyen un recurso energético valioso y que no daña el medio ambiente cuando se usan en aplicaciones en las que se aprovechan sus ventajas y se controlan adecuadamente sus desventajas.

### HORNOS CEMENTEROS

Las llantas de desecho se han usado como combustible suplementario en hornos cementeros en Europa y Japón desde la década de los setentas. En la actualidad esta es una de las aplicaciones más importantes en Norteamérica. Hace 20 años, solamente una planta

cementera en los Estados Unidos (llamada entonces Calaveras Cement, en California) consumía llantas de desecho. En el 2007, 43 plantas cementeras en los Estados Unidos usaban llantas trituradas o enteras como fuente energética suplementaria, según la Asociación de Fabricantes de Caucho de EE.UU. (Ref. 1). En estas plantas se consumieron casi 607,000 toneladas métricas de CDL, lo que representa alrededor de 44 millones de llantas de desecho. En otras plantas se están llevando a cabo pruebas de desempeño con miras a utilizar posteriormente este combustible. Son dieciséis las empresas cementeras propietarias de estas plantas, incluyendo las productoras más grandes de cemento de Norteamérica, América Latina y el mundo. Esta amplia experiencia corporativa facilita la transferencia de esta tecnología a otras plantas y agiliza su evaluación e implementación a nivel interno.



Figura 4-2 Inyección a medio horno  
Fuente: North Texas Cement

### Proceso básico

La tecnología para la fabricación del cemento ha evolucionado, pero el proceso básico ha cambiado muy poco. Los pasos principales son los siguientes:

- **Preparación de la materia prima:** La materia prima se muele y se mezcla en las proporciones adecuadas, incluyendo piedra caliza ( $\text{CaCO}_3$ ), alúmina o arcilla ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  y otros compuestos), arena ( $\text{SiO}_2$ ) y hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).
- **Procesamiento térmico:** El combustible hace combustión en el extremo quemador del horno, en donde se genera gas a temperaturas mayores a  $1,650^\circ\text{C}$  ( $3,000^\circ\text{F}$ ) que se desplazan por el equipo de procesamiento. La mezcla de materia prima se introduce en el extremo alimentador. La humedad inicialmente se evapora y la mezcla finalmente se calienta a  $1,450^\circ\text{C}$  en la zona de combustión a medida que se desplaza hacia el quemador. La mezcla de materia prima se somete a una serie de reacciones que transforman las partículas sólidas en líquido y permiten que se generen aglomerados de silicato de calcio de unos 2.5 cm (1 pulgada) de diámetro, conocidos como clinker. El clinker se enfría rápidamente al salir del extremo quemador. La composición química de la mezcla de materia prima se debe controlar minuciosamente para generar clinker con las propiedades químicas y físicas requeridas.
- **Producción del cemento:** El clinker se muele y se combina con yeso y otros materiales inorgánicos para formar cemento que cumpla con las especificaciones de desempeño definidas.

### Tipos de hornos cementeros alternativos

El proceso ha evolucionado para aumentar la eficiencia térmica, reducir los costos de inversión, e incrementar la productividad. La Figura 4-1 contiene el esquema de las distintas configuraciones de los hornos. A continuación se presenta un breve resumen de la evolución del proceso y el potencial para el uso de llantas y CDL en cada proceso:

- **Horno largo húmedo:** En la parte superior de la Figura 4-1 se muestra un sistema de horno largo húmedo. La materia prima se muele y se mezcla hasta obtener una pulpa acuosa homogénea. Todo el secado y las reacciones se llevan a cabo en un horno rotativo de hasta 150 metros (500 pies) de longitud. La construcción, operación y mantenimiento de un horno largo húmedo es costosa. La evaporación de la mezcla acuosa hace que la operación requiera mucha energía. Las llantas enteras se pueden introducir en la zona de calcinación del horno a través de un proceso llamado inyección a medio horno. Se corta en el horno un agujero con deflectores internos que evitan que se escape el producto. Cuando el horno va girando se abre una escotilla por donde bajan de una a tres llantas y luego se cierra la escotilla. En la Figura 4-2 se presenta un ejemplo de esta secuencia. También se pueden introducir llantas trituradas en el extremo quemador mediante un tubo más pequeño paralelo a la tobera principal del quemador de carbón. Normalmente se usa CDL nominal de 2.5 centímetros (1 pulgada). Se debe tener cuidado al diseñar el sistema de CDL para reducir al mínimo el tamaño del tubo y el aire que entra al conducir el CDL hacia el horno. Con esto se evita la reducción del producto cerca del final del horno. Estas dos tecnologías se han aplicado extensamente y se consideran confiables y comprobadas.
- **Horno largo seco:** Los hornos largos secos son semejantes a los sistemas por vía húmeda, pero en ellos la materia prima se muele y se mezcla en seco para reducir los requerimientos energéticos asociados a la evaporación del agua de la mezcla acuosa. Esto aumenta la productividad y reduce el consumo de energía. Los métodos para usar llantas enteras y CDL son iguales que en los hornos húmedos.





Figura 4-3: Plantas Cementeras En Los Ee.Uu. Que Utilizan Llantas  
FUENTE: Portland Cement Association

- **Horno precalcinador:** En el esquema de la Figura 4-1 también se muestra un sistema de horno precalcinador. La mezcla de materia prima se precalienta en forma más eficiente mediante el contacto con gases de combustión calientes en una serie de ciclones superpuestos en forma vertical, lo que permite usar un horno más corto para reducir los gastos de inversión y operación. El CDL también se puede introducir en la torre de precalentamiento. Las llantas normalmente se introducen en el extremo alimentador del horno mediante un sistema de esclusas. Este sistema es análogo a la inyección a medio horno de los sistemas por vía húmeda y seca, ya que la introducción se realiza cerca del principio de la zona de calcinación.
- **Horno precalentador-precalcinador:** Estos hornos son parecidos a los sistemas de precalentamiento, pero en ellos se agrega una cámara de combustión estacionaria adicional en la parte inferior de la torre de precalentamiento. En esta cámara adicional se inicia la calcinación antes de llegar al horno, con lo que se reduce la longitud de éste. Este sistema cuenta con dos zonas de combustión, una en el extremo de descarga del horno y la otra en el precalcinador. Las corrientes combinadas de gas de combustión caliente pasan por la torre de precalentamiento. El CDL se puede agregar en los conductos verticales que transportan gases del horno. Las llantas enteras se pueden introducir a

través de esclusas en el extremo alimentador del horno o en el ducto vertical del precalcinador.

La tecnología que permite introducir y usar llantas enteras y CDL en prácticamente todos los tipos de hornos cementeros se ha probado durante muchos años de operación en muchas plantas. En los hornos cementeros se le ha dado un uso productivo y económico a las llantas de desecho que se acumulan en Estados Unidos, Canadá y muchos otros países. De hecho, en los hornos cementeros ya se usan llantas provenientes del saneamiento de los apilamientos en las zonas fronterizas de México. Los hornos cementeros en los Estados Unidos generalmente cobran menos por aceptar las llantas que las otras plantas de procesamiento o los rellenos sanitarios.

### Logística

Los hornos se encuentran geográficamente dispersos en todo Estados Unidos y México, concentrándose cerca de centros de población en los que se generan grandes cantidades de llantas de desecho. La Figura 4-3 muestra la distribución de plantas cementeras en los Estados Unidos que utilizan llantas. Asimismo, en la Figura 4-4 se muestran las plantas de fabricación de cemento ubicadas en México.

Los hornos cementeros se encuentran en zonas fronterizas de crecimiento y otros importantes centros industriales en los que se generan llantas de desecho. La cercanía de los hornos con las zonas de generación incrementa la viabilidad al reducirse el costo del transporte. Los costos de transporte de las llantas enteras y los productos





Figura 4-4: Plantas Cementeras En México

procesados son factores fundamentales para poder usar en forma constructiva los materiales provenientes de las llantas de desecho, como se plantea en el Capítulo 6.

### Intensidad energética

Aunque los fabricantes de cemento han tomado medidas importantes para reducir el consumo de energía, el combustible generalmente es el principal costo a considerar en la manufactura. Los hornos por naturaleza exigen mucha energía y cada uno de ellos puede utilizar de 500,000 hasta 1.5 millones de llantas anualmente. Según las estadísticas de la Asociación de Fabricantes de Caucho de EE.UU. anteriormente citadas, en cada horno en el que se utilizaron llantas en los Estados Unidos en el 2007 se consumió un promedio de 1 millón de llantas. Las llantas generalmente desplazan del 10 al 25 por ciento de la cantidad total de combustible que se usa en un horno. La cantidad generalmente está limitada por la materia prima o la composición química del producto, las condiciones de combustión del proceso (principalmente la disponibilidad de aire o la acumulación de azufre), o el suministro de llantas. En una industria competitiva, el ahorro en el costo energético del CDL en comparación con los combustibles fósiles puede representar una ventaja económica considerable.

### Sistemas dosificadores de CDL/llantas enteras

Los hornos cementeros son sistemas de gran magnitud que representan sumideros de energía en donde se usan materiales que crean inercia operativa. Los operadores procuran mantener condiciones de operación regulares y evitar variaciones que puedan perjudicar la estabilidad

de los hornos. Dado que las llantas se integran al producto denominado clinker, el hierro y otros compuestos inorgánicos presentes en las llantas se convierten en parte del diseño de la mezcla básica de materia prima y se deben mantener a un nivel constante para evitar un efecto negativo en el producto. De hecho, el acero de las llantas con frecuencia desplaza al hierro que de otra forma tendría que comprarse para la mezcla, lo cual constituye otro ahorro, aunque debe suministrarse al proceso de manera continua.

Se han desarrollado sistemas dosificadores para las llantas enteras y trituradas para garantizar que el suministro al horno sea continuo y uniforme. Los sistemas de alimentación de llantas enteras pueden ser tan sencillos como una operación manual en la que se usa un cable o un transportador de gancho para elevar las llantas hacia el piso del horno, y hay personas que pesan e insertan las llantas en una esclusa sencilla por la cual se introducen a los hornos de precalentamiento o precalcinado. Estos sistemas requieren una inversión de capital limitada, pero exigen más mano de obra. Pueden resultar útiles en operaciones de prueba para definir el desempeño técnico y ambiental. En la Figura 4-5 a continuación se presenta un ejemplo de un sencillo sistema de dosificación para introducir llantas a un horno.

Muchas empresas en los Estados Unidos han intentado restringir los costos de mano de obra invirtiendo capital para reemplazar el trabajo humano. En estos sistemas se utilizan cajas de volteo para lanzar las llantas a "singularizadores" que separan, transportan,



Figura 4-5: Sistemas De Dosificación De Llantas Para Hornos  
Fotos cortesía de Terry Gray, TAG

pesan e insertan las llantas en los hornos con mínima supervisión humana. Algunos fabricantes de este tipo de equipo han establecido normas de confiabilidad para garantizar una operación estable, pero el costo de estos sistemas ya instalados puede ascender hasta \$1 o \$2 millones de dólares por horno. En la Figura 4-6 se muestra un ejemplo de un sistema automatizado de alimentación de llantas enteras.

Para la inyección a medio horno se necesita un portal y la introducción automatizada de las llantas, a fin de reducir los peligros para el personal, como se muestra en la Figura 4-6.

En los sistemas de alimentación de CDL en los que se arrojan trozos de llanta a los hornos precalentadores-precalcinadores generalmente se utilizan sistemas menos sofisticados, que pueden ser tan sencillos como una tolva de dosificación montada en rodillos con transportadores para la transferencia, equipo de pesaje, y una esclusa. Existen inconvenientes en esta operación, pero el equipo en sí puede ser bastante sencillo. Los sistemas para disparar CDL al quemador de los hornos largos húmedos o secos pueden ser de bajo costo si se usa una sencilla tolva de dosificación, un transportador, una tubería de inyección de CDL, y un ventilador. Sin embargo, algunas de los factores a considerar son la necesidad de (1) minimizar el uso de ventiladores adicionales para controlar el impacto de la eficiencia térmica; (2) garantizar la penetración profunda del CDL en el área de calcinación del horno; y (3) evitar desperfectos en las toberas asegurando el flujo continuo de aire a través de las mismas.

Cuando se estudien los sistemas de dosificación es conveniente obtener una lista de los clientes anteriores, hablar con ellos acerca del desempeño, y ver los sistemas en funcionamiento, de ser posible. El uso de las llantas enteras o el CDL puede ser confiable si se realiza una buena elección y se instala y mantiene en buen estado el equipo.

## Desempeño ambiental del uso de CDL en hornos

El uso de llantas como CDL viene a ser simplemente la quema de llantas en un ambiente controlado, y puede ser una opción viable si se dan las condiciones correctas, como lo demuestra el monitoreo minucioso de las operaciones existentes. Las normas para el control de la contaminación atmosférica varían de estado a estado en la Unión Americana; sin embargo, el análisis de los datos sobre emisiones demuestra que en las plantas se siguen acatando los límites permisibles. El monitoreo del cumplimiento y el desempeño es parte integral de cualquier programa estatal para el control de la contaminación. Los siguientes factores fomentan el uso de las llantas como recurso energético suplementario en los hornos cementeros, pero la aplicación también debe ser aceptable desde el punto de vista ecológico y no debe generar riesgos innecesarios para la salud o el medio ambiente. Varios de los factores que afectan el desempeño ambiental ameritan consideración:

- **Rigurosas condiciones de combustión** — La combinación única de alta temperatura, tiempo prolongado de residencia y flujo de aire turbulento, promueve la combustión completa de los compuestos orgánicos en los sistemas de hornos cementeros. Aunque las llantas no son residuos peligrosos, las condiciones de combustión en los hornos cementeros exceden los estrictos requisitos establecidos para la combustión de residuos peligrosos en los Estados Unidos. Las condiciones para la combustión de llantas generalmente rebasan los 1,450oC (2,000oF) con tiempos de residencia del aire de más de 2 segundos.
- **Control del SOx** — La piedra caliza comúnmente se usa para absorber el SOx en los sistemas de control de la contaminación atmosférica. En consecuencia, el SOx de los gases de combustión lo captura la piedra caliza en la mezcla prima a medida que los gases pasan por el sistema de hornos, generándose así un mecanismo efectivo para el control del SOx.



CAJA DE VOLTEO



SINGULARIZADOR



TRANSPORTADORES



INTRODUCCIÓN POR ESCLUSA DE AIRE

Figura 4-6: Elementos Del Sistema De Alimentación Automatizado  
Fotos cortesía de CEMEX Corp

- **Utilización de la ceniza** — La ceniza proveniente de la combustión de las llantas se convierte en un componente integral del producto de cemento, eliminando así la necesidad de disponer de la ceniza generada en la combustión de CDL

Estos factores sustentan el uso de las llantas de desecho como combustible suplementario en los hornos. Sin embargo, es importante considerar el desempeño histórico al evaluar la idoneidad de esta aplicación desde el punto de vista ambiental. Existen datos sobre medio ambiente que se han generado a partir de distintas configuraciones en los hornos y diversas opciones de desplazamiento del combustible (por ejemplo: que las llantas de desecho desplacen al carbón como combustible).

Los resultados de las siguientes pruebas de emisión son ejemplos representativos. Los resultados de desempeño del horno de Ashgrove Cement en Durkee, Oregon se presentan en el Cuadro 4-3. Las emisiones de partículas, SOx, cloruros, y todos los metales pesados se redujeron o permanecieron constantes. Los hidrocarburos totales aumentaron alrededor del 10 por ciento, pero los

hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP) se disminuyeron alrededor de un 10 por ciento. Esta planta está autorizada para usar llantas de desecho en Oregon, uno de los estados más respetuosos del medio ambiente en la Unión Americana.

En varias plantas cementeras del suroeste de los Estados Unidos se han realizado exhaustivas pruebas. Los resultados de las emisiones de la planta Colton de la empresa California Portland Cement se resumen en el Cuadro 4-4. Algunos de los contaminantes criterio disminuyeron con el uso de las llantas, mientras que otros aumentaron. Por ejemplo, las partículas totales aumentaron menos del 10 por ciento, mientras que los hidrocarburos no metanos se redujeron alrededor de un 18 por ciento. Las sustancias cancerígenas reconocidas como el benceno y el tolueno disminuyeron. Las dioxinas y los furanos totales (materiales PCDD/PCDF) aumentaron en una cantidad mínima. La mayoría de los bifenilos policlorados (BPCs) y los hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP) se redujeron con el uso de las llantas, mientras que los ácidos clorhídricos y fluorhídricos aumentaron. Las emisiones de cromo hexavalente, bario,



cadmio, plomo, y níquel se redujeron, mientras que las de zinc y mercurio aumentaron. Los resultados de las pruebas de emisiones muestran cambios leves con un impacto neto relativamente equilibrado.

La empresa California Portland contrató a un consultor para realizar una evaluación comparativa de riesgos sanitarios. El consultor usó las últimas versiones del modelo de dispersión de Fuentes Industriales (Industrial Source Complex o ISC) y el modelo de efectos sanitarios del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU. [U.S. Army Corps of Engineers o ACE] especificado por la EPA de California, para poner estos impactos relativos en una perspectiva técnicamente estructurada. Conforme a esta evaluación, el riesgo carcinogénico individual se redujo en un 47 por ciento con el uso del CDL, mientras que los efectos sanitarios no carcinogénicos resultantes de la exposición breve (índice de peligro agudo) disminuyeron un 94 por ciento y los efectos sanitarios no carcinogénicos derivados de la exposición continua (impacto crónico a la salud) disminuyeron un 72 por ciento. La exposición a cualquier tipo de toxinas es un aspecto serio y potencialmente peligroso de la sociedad de hoy en día; sin embargo, las reducciones en el riesgo de exposición demostradas en los hornos de la empresa California Portland Cement manifiestan la efectividad de esta tecnología como método para el aprovechamiento de las llantas de desecho, e indican también que presentan ventajas en comparación con el uso de otros tipos de combustible.

En los hornos cementeros se han utilizado en conjunto más llantas de desecho que en cualquier otra aplicación en los Estados Unidos, además de ser esta una de las principales aplicaciones en Europa y Japón. Asimismo, los hornos cementeros son un elemento importante de la gestión de las llantas de desecho en la mayoría de los estados de la Unión Americana. Algunas empresas cementeras en México han cooperado con las dependencias gubernamentales para usar de manera productiva las llantas retiradas de

los apilamientos fronterizos bajo condiciones económicas que resulten atractivas tanto para el gobierno como para la industria. Los factores primordiales que controlan el desarrollo de esta aplicación son un suministro constante de llantas y una economía razonable. Los hornos cementeros constituyen una importante oportunidad para el aprovechamiento constructivo de las llantas de desecho. Sería conveniente que los gobiernos estatales o locales que no estén utilizando completamente sus llantas de desecho evalúen objetivamente los méritos ambientales y económicos del uso de las llantas como recurso energético en los hornos cementeros.

## INDUSTRIA DE LA PULPA Y EL PAPEL

En la industria de la pulpa y el papel se utilizan corteza de árbol y desechos de madera en calderas secundarias para generar el vapor y la energía necesarios para las operaciones de procesamiento. La madera se quema en rejillas móviles que también transportan la ceniza residual de las calderas. Se puede arrojar a la rejilla carbón, petróleo o gas para optimizar la combustión y mantener las temperaturas de operación cuando el contenido de humedad de los desechos de madera es alto debido a la lluvia.

En esta aplicación se usa CDL que se obtiene procesando llantas de desecho hasta obtener virutas homogéneas y suspensibles de menos de 5 por 5 centímetros (2 por 2 pulgadas) de tamaño. El alambre de talón generalmente se retira con magnetismo para evitar la contaminación de las rejillas y los sistemas de control de ceniza. La foto de la derecha muestra partículas de CDL de 5 cm a las que se les ha extraído el alambre de talón.

El CDL también se puede introducir por separado o como parte integral de la mezcla de madera, usando sistemas de dosificación relativamente sencillos y económicos.

El CDL se puede colocar en la banda transportadora de madera que va hacia la caldera, como se muestra en la fotografía a la derecha. El alto contenido de carbono



Partículas de CDL sin alambre del talón  
Foto cortesía de Terry Gray, TAG



Sistema de medición para introducir CDL a la mezcla de madera antes del procesamiento Foto cortesía de Terry Gray, TAG



**Cuadro 4-3 Datos sobre desempeño ambiental introducción de cdL en los conductos verticales del horno precalentador de la empresa ashgrove cement**

CRITERIO	UNIDAD	BASE	9% a 10% CDL	LIMITE PERMITIDO
PARTÍCULAS	lbs/hr	5.27	4.83	18
SOx	lbs/hr	<1.5	<1.2	6.3
CLORUROS	lbs/hr	0.268	0.197	NA
HIDROCARBUROS TOTALES	lbs/hr	3	3.3	NA
AROMÁTICOS POLINUCLEARES (APN)	lbs/hr	0.0058	0.0053	NA
<b>METALES PESADOS</b>				
Arsénico	microgramos	0.2	0.2	NA
Cadmio	microgramos	3	2	NA
Cromo	microgramos	30	ND	NA
Níquel	microgramos	30	ND	NA
Zinc	microgramos	35	35	NA
Cobre	microgramos	37	13	NA
Plomo	microgramos	ND	ND	NA
Hierro	microgramos	400	200	NA
Bario	microgramos	ND	ND	NA
Vanadio	microgramos	ND	ND	NA

La planta International Paper en Bucksport, Maine ha sido uno de los principales usuarios de CDL desde 1990. Su caldera puede consumir poco más de 3 toneladas métricas de CDL por hora (14.5 por ciento por aporte de calor) para producir casi 225,000 kilogramos (500,000 libras) de vapor por hora.

volátil del CDL mejora la combustión de la madera en la rejilla y la eficiencia de la misma.

El impacto ambiental asociado con el uso de CDL en esta aplicación depende de las características del combustible fósil desplazado y el equipo de control ambiental del sistema. Los dos factores de los que comúnmente depende la aceptación de este sistema como opción ecológica son las emisiones de óxidos de azufre (SOx) partículas (óxido de zinc). Las emisiones de SOx podrían disminuir si el CDL desplaza al carbón o petróleo, que tienen mayor contenido de azufre. Por otro lado, el SOx se puede controlar con los depuradores con los que cuentan ahora algunos sistemas de filtros de aire, especialmente si éstos funcionan con un pH neutral o base. Las emisiones de partículas se pueden controlar con precipitadores electrostáticos (PE) o cámaras de filtros. En general, muchas de las aplicaciones aceptables desde el punto de vista ecológico se presentan cuando el CDL desplaza al carbón en sistemas con cámaras de filtros o PEs.

Según los datos recabados por la Asociación de Fabricantes de Caucho de los EE.UU. en el 2007, unas 32 empresas papeleras usaron aproximadamente 10.7 millones de toneladas de CDL o el equivalente a unos 70 millones de llantas de desecho, de conformidad con la normatividad vigente. En otras fábricas papeleras también se están llevando a cabo pruebas para este fin (Ref. 1). El uso ha fluctuado, pero el alto costo de los combustibles fósiles ha redundado en el surgimiento del CDL en las fábricas de papel ahora que algunas de ellas han terminado de realizar sus pruebas ambientales. Asimismo, quienes ya las usaban



*Banda transportadora para introducir madera y CDL al sistema de caldera  
Foto cortesía de Terry Gray, TAG*

**Cuadro 4-4 Datos sobre desempeño ambiental horno de la empresa california portland cement (expresados en libras/hora)**

CRITERIO	EXPONENTE	BASE	12%CDL
PARTÍCULAS		7.35	8.01
NOx (ppm)		208.80	104..2
CO (ppm)		104.20	159.30
<b>COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES</b>			
Acetaldehído		0.34	0.05
Benceno		2.65	2.29
Formaldehido		0.88	0.11
Tolueno		3.98	3.17
Diclorometano	E-3	1.79	0.87
Oxileno	E-3	1.89	2.14
Trimetilbenceno	E-3	1.56	3.99
<b>METALES</b>			
Antimonio	E-4	2.32	<2.28
Arsénico	E-4	4.05	0.85
Bario	E-3	1.20	0.48
Cadmio	E-4	2.27	1.77
Cromo (Total)	E-4	3.44	3.94
Cromo (Hexavalente)	E-4	2.33	1.13
Cobre	E-3	1.11	0.72
Plomo	E-3	1.19	0.59
Manganeso	E-3	1.96	2.06
Mercurio	E-3	4.54	8.33
Níquel	E-4	5.81	3.00
Selenio	E-4	ND<1.97	ND<6.54
Plata	E-5	ND<3.94	<4.55
Talio	E-5	<2.52	<2.47
Zinc	E-3	4.71	9.41
HIDROCARBUROS NO METANOS		18.16	14.81
PCDD/PCDF	E-6	1.58	1.93
TOX EQUIV 2378 TCDD	E-8	1.05	1.68
BPCs	E-6	3.16	2.89
HAPs	E-2	4.31	3.44
HCl		<0.017	0.43

han elevado al máximo el consumo, especialmente en plantas ubicadas en el suroeste de los Estados Unidos.

El Cuadro 4-5 presenta datos ambientales asociados con las pruebas de desempeño realizadas en la planta de Bucksport. Se realizó una prueba de referencia usando la mezcla normal de gas, corteza de árbol, carbón y lodos. Luego se sustituyó el carbón con CDL en niveles que representaban un 6.3 por ciento, 10.3 por ciento, y 14.5 por ciento de aporte de calor. En el nivel máximo del

CDL, las emisiones de NOx, SOx, e hidrocarburos totales permanecieron prácticamente sin cambio, mientras que las partículas aumentaron en un 6 por ciento. Entre los metales, el berilio y el cromo disminuyeron, el plomo siguió por debajo de los niveles de detección, y el cadmio aumentó. El zinc aumentó considerablemente en cuanto a porcentaje, pero las cantidades totales permanecieron en un nivel ecológico aceptable. Las emisiones generales de partículas se sostuvieron dentro de los límites aceptables.

**Cuadro 4-5 Comparación de emisiones en la empresa international paper de bucksport, maine  
(datos expresados en libras /mbtu)**

CRITERIO	BASE	14.5% CDL (POR CALOR)	CAMBIO PORCENTUAL
NOx	0.274	0.273	0
SOx	0.508	0.51	0
PARTÍCULAS	0.053	0.056	6
HIDROCARBUROS TOTALES	1.17 E-3	1.18 E-3	1
BERILIO	1.06 E-6	0.73 E-6	-31
CADMIO	0.60 E-6	0.78 E-6	30
CROMO	12.1 E-6	6.36 E-6	-47
PLOMO	<10 E-6	<10 E-6	0
ZINC	0.26 E-3	2.56 E-3	885

Los datos de desempeño también confirman que el CDL es una opción aceptable desde el punto de vista ecológico en fábricas papeleras y calderas industriales de 20 estados de la Unión Americana. Varios de estos estados (incluyendo Oregon, Washington, California y Florida) han sido reconocidos por sus altas normas ambientales y rigurosa aplicación de la normatividad. Sin embargo, estas aplicaciones se deben someter a una revisión minuciosa para identificar aquellas plantas que puedan usar CDL dentro de los límites ecológicos aceptables. Solamente un pequeño porcentaje de plantas papeleras e industriales en los Estados Unidos cuentan con la combinación necesaria de diseño de sistemas, permisos y uso de combustible que favorece el uso adecuado del CDL.

### CALDERAS DE CENTRALES TERMOELÉCTRICAS

En el 2007, 38 plantas industriales y generadoras de energía eléctrica consumieron el equivalente a 35 millones (495,000 toneladas métricas) de llantas, según la Asociación de Fabricantes de Caucho de EE.UU. (Ref. 1). Este segmento de la industria continúa desarrollándose y se prevé que haya más crecimiento en el futuro.

El CDL se puede usar de manera eficiente únicamente en tipos específicos de calderas de centrales termoeléctricas (principalmente unidades ciclónicas, de lecho fluidizado, y de rejilla alimentadora) que ofrecen un tiempo de retención adecuado para la combustión completa de CDL nominal de 2.5 centímetros (1 pulgada) que a veces se conoce como CDL de "menos 5 centímetros" ("menos 2 pulgadas"), es decir, más pequeño que 5 centímetros. Este material CDL es generalmente el más pequeño que se puede producir a un costo que pueda competir con el carbón y otros combustibles fósiles. Estas unidades de los organismos operadores de servicios públicos consumen grandes cantidades de combustible, por lo que porcentajes aún pequeños de CDL (2 al 4 por ciento) pueden representar hasta 5 millones de llantas por año en una sola planta.

Este mercado parece tener menos potencial en México debido al uso tan difundido del aceite residual para la generación de energía. La mayoría de las unidades de combustión que utilizan petróleo no necesitan ni tienen

las cámaras de control de ceniza y combustión que se requieren para poder usar combustibles sólidos como el CDL. En consecuencia, el planteamiento detallado de esta aplicación no parece ser útil para México, con la posible excepción de las calderas de lecho fluidizado.

Las calderas de lecho fluidizado circulante constituyen uno de los sistemas más nuevos que se han diseñado para minimizar el impacto ambiental del uso de combustibles fósiles sólidos. La alta turbulencia y la distribución uniforme del calor permiten que los lechos fluidizados funcionen a temperaturas más bajas para reducir al mínimo la formación de NOx. También se puede usar en ellos la inyección de amoníaco para reducir aún más el NOx. La piedra caliza es lo que comúnmente se usa como medio circulante para los lechos, con lo cual se logra un control eficiente del SOx mediante la mezcla integral con los gases de la combustión. Para eliminar las partículas se usan sofisticadas cámaras de filtros o precipitadores electrostáticos. Estos sistemas son candidatos viables desde una perspectiva ecológica para usar CDL nominal de 2.5 centímetros (1 pulgada).

La empresa Stockton Cogeneration en Stockton, California, realizó exhaustivas pruebas con apoyo financiero del Consejo para la Gestión Integrada de Residuos en California, para identificar las emisiones características asociadas con el uso de hasta un 20 por ciento de CDL (por calor). Los resultados de dichos análisis se comparan con los límites indicados en el permiso actual de la planta que aparecen en el Cuadro 4-6. Todas las emisiones estuvieron dentro de los límites permisibles, y los niveles de de partículas e hidrocarburos fueron un 25 por ciento más bajos que los límites establecidos.

### Unidades que utilizan exclusivamente llantas para la combustión

Las llantas se han usado como combustible principal en calderas termoeléctricas especiales en California, Connecticut, e Illinois, en las que se utilizan de 5 a 10 millones de llantas anualmente. Aunque en estos sistemas se utilizan grandes cantidades de llantas que deben estar

**Cuadro 4-6 Emisiones de una caldera de lecho fluidizado circulante en stockton cogen (stockton, california) (expresadas en libras/hora)**

CRITERIO	20% CDL (POR CALOR)	LIMITE MENOR PERMISIBLE
NOx	25.06	39.00
SOx	33.40	59.20
PARTÍCULAS	2.19	10.00
CO	20.90	22.90
HIDROCARBUROS TOTALES	<0.38	1.88

disponibles en una zona geográfica limitada, siguen siendo cantidades pequeñas de acuerdo a los estándares de generación energética. En consecuencia, los costos de inversión por megavatio son mayores que los de una planta de energía nuclear. Dos de estas plantas han fracasado económicamente, sufriendo importantes pérdidas de capital. La planta de Connecticut todavía sigue en funcionamiento, pero cuenta con un suministro de llantas abundante, ya que se encuentra en la zona de mayor densidad demográfica en los Estados Unidos y en la que la electricidad se cobra a un precio relativamente alto. Es improbable que estos sistemas especiales sean económicamente viables en México, así como no son viables en la mayor parte de los Estados Unidos.

### ENERGÍA COMBINADA / RECUPERACIÓN DE MATERIALES PIRÓLISIS/GASIFICACIÓN

La pirólisis es, por definición, la descomposición térmica de los compuestos orgánicos en un ambiente con poco oxígeno. Quienes promueven este proceso le han dado a la pirólisis los nombres de destilación térmica, destilación destructiva, y muchos otros, para evitar que se le relacione con los fracasos que históricamente ha tenido la pirólisis. La pirólisis de las llantas de desecho normalmente genera gas, aceite, y residuo carbonoso. La cantidad y la calidad de cada producto dependen de muchas variables del proceso, incluyendo la temperatura, la presión y el tiempo de residencia. Del 20 al 35 por ciento del contenido energético de la llanta generalmente se convierte en gas combustible que se usa para alimentar el proceso de pirólisis o se consume en la llama antes de ser liberado. Del 35 al 50 por ciento de lo que se genera en el proceso se transforma en un producto de aceite cuya calidad varía desde combustóleo comercializable hasta combustible mezclado de menor valor. El residuo carbonoso sólido (conocido como char) constituye del 25 al 40 por ciento de la producción y contiene una mezcla de los siguientes materiales:

- Diversos tipos de negro de carbono que se usa en varias secciones de la llanta para la resistencia, el desgaste, u otras propiedades importantes de desempeño.
- Dióxido de titanio de los costados de la llanta y los rótulos.

- Zinc disperso uniformemente dentro de las llantas como acelerador de la vulcanización.
- Acero del talón y alambre de refuerzo en las llantas radiales.
- Otros compuestos inorgánicos traza presentes en las llantas.

### Experiencia histórica

La pirólisis no es un proceso nuevo. Fue desarrollado en Europa hace más de 60 años para transformar el carbón en gas para las lámparas del alumbrado público. En los últimos 25 años se han aplicado a las llantas de desecho muchos procesos, equipos y variaciones operativas. En una publicación del Departamento de Energía de EE.UU. titulada "Las llantas de desecho: Evaluación de recursos y tecnologías de pirólisis de llantas y otras tecnologías alternas seleccionadas" ["Scrap Tires: A Resource and Technology Evaluation of Tire Pyrolysis and Other Selected Alternate Technologies"] se identifican 31 proyectos de pirólisis en el 1983 en los que se usaron como reactores lechos fluidizados, cámaras de rejillas móviles, hornos rotativos, hornos de retorta, baños de sales fundidas y aceite caliente, unidades de arco de plasma, y cámaras de microondas. Se han estudiado ampliamente diversas condiciones de operación para optimizar la producción y la calidad de las líneas de productos. A pesar de esta exhaustiva iniciativa de desarrollo, no existen sistemas de pirólisis no comerciales que funcionen de manera continua actualmente en Norteamérica.

Se han invertido considerables recursos técnicos y económicos (más de \$350 millones de dólares) en proyectos desarrollados por importantes empresas de todo el mundo para apoyar la pirólisis. Asimismo, otras empresas más pequeñas y empresarios independientes han desarrollado muchos proyectos piloto o "de

La empresa Stockton Cogeneration en Stockton, California, realizó exhaustivas pruebas con apoyo financiero del Consejo para la Gestión Integrada de Residuos en California, para identificar las emisiones características asociadas con el uso de hasta un 20 por ciento de CDL (por calor). Todas las emisiones estuvieron dentro de los límites permisibles, y los niveles de de partículas e hidrocarburos fueron un 25 por ciento más bajos que los límites establecidos.



demostración". Un destacado proyecto desarrollado por Foster-Wheeler en Inglaterra (denominado Tyrolysis) fracasó desde el punto de vista técnico y económico después de haberse invertido en él más de \$30 millones de dólares.

Los principales motivos del fracaso de los proyectos de pirólisis son los siguientes:

- **Problemas operativos:** El complejo equipo de temperatura alimentado con un abrasivo como las llantas de desecho generalmente requiere de mucho mantenimiento. El tiempo muerto y los gastos de mantenimiento con frecuencia se subestiman al proyectar el costo total del proyecto.
- **Seguridad:** Las operaciones en un ambiente de alta temperatura y poco oxígeno generan la posibilidad de que haya incendios o explosiones si el aire entra accidentalmente al sistema. Estos accidentes han destruido o dañado muchas plantas de pirólisis, incluyendo una en Texas que fue destruida totalmente.
- **Disponibilidad y procesamiento de la materia base:** La cantidad de llantas que se requiere para que el proyecto sea económicamente factible puede ser mayor a la cantidad de la que se dispone en la zona geográfica donde se cobran las cuotas de disposición previstas. Asimismo, con frecuencia se subestiman los gastos de inversión y operación relacionados con la trituración o preparación de la materia base.
- **Calidad del producto:** Es difícil optimizar la calidad y el rendimiento de tres líneas de producto relacionadas entre sí (gas, aceite y residuo carbonoso [char]), dado que las condiciones que favorecen a una con frecuencia tienen un impacto negativo sobre las otras. Debido a que es una mezcla de negro de carbono y otros elementos constitutivos, el char históricamente se presta solamente para aplicaciones de poco valor con volúmenes de mercado limitados, aún cuando se procese más para controlar la homogeneidad en el tamaño y el contenido de hierro.
- **Impacto ambiental:** Las llantas contienen alrededor del 1.8 por ciento de azufre y del 1.2 al 1.5 por ciento de zinc por peso. Estos materiales inorgánicos no se destruyen ni se descomponen por vía térmica, por lo que permanecen en uno o más de los productos de la pirólisis, como lo indica el balance de masa elemental de las condiciones operativas específicas. Además, cabe la posibilidad de que los hidrocarburos parcialmente descompuestos no se eliminen completamente de la corriente de gases de escape por medio de la condensación o la combustión, por lo que los proyectos de pirólisis deben incluir sistemas de control de la contaminación atmosférica para evitar las descargas al medio ambiente. Quienes promueven la pirólisis indican que este proceso no genera emisiones porque todos los materiales se

capturan como productos. Sin embargo, el producto gaseoso generalmente se usa para alimentar el proceso o se quema porque no se puede transferir a las redes normales de conducción de gases. En cualquiera de estos casos, la combustión genera emisiones que requieren controles para acatar las normas sobre aire limpio de los Estados Unidos. Asimismo, cabe la posibilidad de que se tenga que disponer del char como residuos peligroso si no es comercializable. Estas realidades prácticas se deben reflejar en las proyecciones de inversiones y gastos operativos.

- **Economía:** La factibilidad económica de la pirólisis depende de muchos factores operativos. Entre estos factores se cuentan la confiabilidad del sistema, los costos de inversión y mano de obra, el proceso, la preparación de la materia base, los requisitos de control ambiental, y los ingresos que genere el producto. Las operaciones anteriores no se han podido sostener económicamente con cuotas de disposición razonables porque no han podido desarrollarse mercados de alto valor (alrededor de 3.5 pesos o \$0.33 dólares por kilogramo [\$0.15 dólares por libra]) para char que se genera. El atractivo de la recuperación de materiales y la viabilidad económica de este proceso dependen totalmente que se pueda vender el negro de carbono que contiene la corriente de residuos carbonosos a un precio relativamente alto. A menos que se logre este objetivo, la pirólisis simplemente se convierte en un proceso que exige mucho capital para convertir un combustible sólido en un combustible líquido de baja calidad.

### Prácticas actuales

Muchas empresas en Norteamérica están promoviendo los sistemas de pirólisis. Sin embargo, ninguna de estas tecnologías se ha usado a escala comercial durante un tiempo suficiente como para demostrar cabalmente la economía operativa a largo plazo y las posibilidades de comercialización del char. Sería aún más difícil lograr la viabilidad económica con las bajas cuotas de disposición que es probable encontrar en México.

En una variación de la pirólisis se refina la corriente de aceite para obtener productos químicos especializados de alto valor. El gas que produce el reactor se enfría en un intercambiador de calor, con lo que se condensa una amplia gama de los compuestos químicos parcialmente descompuestos para formar "aceite" adecuado para usarse principalmente como combustible mezclado de poco valor. El alto costo de inversión y el sofisticado control de los diversos condensadores o el equipo de fraccionamiento que se requieren para producir y depurar los productos líquidos es económicamente cuestionable para estos volúmenes relativamente bajos. Para ser económicamente viables, las operaciones de refinado

tienen que ser de alto volumen. El aceite generado en un sistema de pirólisis de gran magnitud en el que se usen 2 millones de llantas al año representaría menos del 1 por ciento del rendimiento de la refinería que se requiere para operar a capacidad mínima.

### Variación de la gasificación

En una variación de la pirólisis se permite que haya aire presente para facilitar la combustión parcial, lo cual convierte el gas, el aceite y el residuo carbonoso en un gas de poco valor calórico que contiene principalmente monóxido de carbono con algo de hidrógeno e hidrocarburos de bajo peso molecular. Luego este gas se quema para generar vapor o energía mediante diversos métodos alternativos, muchos de los cuales no son económicamente prácticos en la escala de operación proyectada si hay partículas y contaminantes químicos presentes en el gas. Aunque en esta variación se supera el problema de las posibilidades de comercialización del char convirtiendo el carbono a monóxido de carbono, no se resuelven los problemas de las emisiones atmosféricas derivadas de la combustión del gas. Este proceso es simplemente una combustión en dos etapas y deben contemplarse en él las emisiones atmosféricas y los balances de material, al igual que en las aplicaciones de combustión. Hasta noviembre del 2009 no existían en Norteamérica sistemas de gasificación de llantas de nivel comercial que funcionaran de manera autosustentable.

### Resumen y recomendaciones

Históricamente no se ha podido demostrar la viabilidad económica de las plantas de pirólisis y gasificación de llantas debido a fallas técnicas o a la incapacidad para obtener compromisos contractuales para todos los productos del residuo carbonoso o char. En los últimos 20 años muchas plantas de pirólisis han fracasado, dejando generalmente al gobierno la carga del saneamiento de las llantas acumuladas, así como la eliminación del aceite residual y la contaminación provocada por el residuo carbonoso. Un método adecuado para proteger los intereses de la ciudadanía pudiera ser exigir garantías financieras que cubran los costos de la disposición alternativa en el caso de cantidades máximas almacenadas de llantas y char.

Los inversionistas deben realizar su tarea antes de adquirir compromisos crediticios o patrimoniales importantes para el uso de esta tecnología. Antes de que esta tecnología se pueda considerar como una alternativa comprobada para la disposición de las llantas de desecho se deben responder algunas preguntas fundamentales sobre la calidad del producto, los mercados, la seguridad, los gastos de mantenimiento, y la economía.

### RESUMEN

Las llantas de desecho pueden ser un recurso energético alternativo compatible con el medio ambiente cuando se usan en aplicaciones adecuadas. El aprovechamiento energético es un elemento importante de los buenos

programas de gestión de llantas de desecho en los Estados Unidos, ya que permite que este recurso se utilice productivamente. El resultado neto ha sido un considerable ahorro en los combustibles fósiles no renovables. Al evaluar objetivamente el desempeño de las llantas como recurso energético, muchas jurisdicciones han concluido que es más conveniente para el medio ambiente que se reconozca el valor de este recurso, en lugar de desperdiciarlo esperando soluciones ideales. En los buenos programas de gestión de llantas de desecho se reconoce la importancia de las distintas aplicaciones.

En un mundo ideal, la mezcla de hule polimerizado de las llantas se reutilizaría una y otra vez. Sin embargo, en las aplicaciones que existen hoy en día para el hule reciclado se consume menos del 17 por ciento de las llantas de desecho que se generan anualmente en los Estados Unidos. Estos mercados crecen lentamente a pesar de los intensos esfuerzos para desarrollar mercados, e incluso las proyecciones más optimistas señalan un uso de menos del 25 por ciento en 5 años.

Se deben adoptar y desarrollar otras aplicaciones importantes para usar de manera constructiva el recurso de las llantas de desecho, de lo contrario, se desperdiciará en los rellenos sanitarios o se convertirá en un pasivo público que generará peligros para la salud pública y el medio ambiente. Dado que muy poca gente conscientemente querría desperdiciar un valioso recurso, otras aplicaciones que sean compatibles con el medio ambiente deben convertirse en el fundamento de las iniciativas para el desarrollo de mercados. El evitar el consumo innecesario de los limitados recursos naturales mediante el uso de las llantas de desecho como recurso energético alternativo es un objetivo digno, siempre y cuando se pueda lograr sin generar un impacto contraproducente para el medio ambiente.

### REFERENCIAS

1. Scrap Tire Markets in the United States, Rubber Manufacturers Association, 2008
2. "Energy Use in the Cement Industry in North America, Emissions, Waste Generation and Pollution Control, 1990-2001," 2003, p11. ([http://www.cec.org/files/pdf/ECONOMY/Session1-2-Jacott-Reed-Winfield\\_en.pdf](http://www.cec.org/files/pdf/ECONOMY/Session1-2-Jacott-Reed-Winfield_en.pdf))
3. "Air Emission Data Summary for Portland Cement Pyroprocessing Operations Firing Tire-Derived Fuels." 2008. <http://www.epa.gov/osw/conserve/materials/tires/pubs/tdf-report08.pdf> (PDF)

# CAPÍTULO 5

## *Agregado derivado de llantas y llantas enteras para aplicaciones de ingeniería civil*

El agregado derivado de llantas (ADL) es un producto de ingeniería que se elabora cortando las llantas de desecho en piezas de 25 a 300 milímetros (mm). En el 2004 en los Estados Unidos se usaron 60 millones de llantas como ADL (Ref. 37). El ADL presenta muchas soluciones a las dificultades geotécnicas, ya que es liviano (50 libras por pie cúbico [pcf]); 0.8 macrogramos por metro cúbico [Mg/m<sup>3</sup>; la M mayúscula se usa para distinguir el acrónimo de la unidad más común que es microgramos por metro cúbico]), produce baja presión lateral en las paredes (apenas la mitad que la tierra), es un buen aislante térmico (ocho veces mejor que la tierra), tiene una alta permeabilidad (más de 1 centímetro por segundo [cm/s]), dependiendo del tamaño del ADL, además de que tiene buena resistencia al corte y absorbe las vibraciones. Si se usa en las aplicaciones adecuadas, el ADL puede reducir considerablemente los costos de construcción. Además, cada metro cúbico de relleno de ADL contiene el equivalente a 100 llantas para automóvil.

El ADL se ha usado en una amplia gama de funciones en los Estados Unidos. Por ejemplo, como relleno liviano para terraplenes en carreteras de 13 estados. En el Estado de Maine, el ADL se usa comúnmente para mejorar la estabilidad de los terraplenes construidos sobre arcilla marina débil, lo que redundaría en un consumo promedio anual de alrededor de 1 millón de llantas para automóvil. (Refs. 8, 19, 27, 28, 41, 46, 49). El ADL y las mezclas de ADL con tierra también se han usado para reemplazar el relleno convencional en la construcción de terraplenes (Refs. 15, 16, 43). El bajo peso unitario y la baja presión de tierra resultante, en combinación con su alta permeabilidad, hacen que el ADL sea un relleno atractivo para usarse en muros de contención, estribos de los puentes, y muros de tablestaca (Refs. 19, 28, 45, 46). También se ha usado en forma de capas comprimibles detrás de los puentes con estribo integral y marco rígido (Refs. 27, 38). De esta forma, los estados de Maine, Louisiana, Pennsylvania, y California han usado el ADL en muros de contención. En lugares con clima frío, el ADL se ha usado para limitar la profundidad de la penetración de escarcha y para facilitar el desagüe de los deshielos de primavera (Refs. 20, 32). Además, la permeabilidad del ADL ha dado paso a que se use como capa de drenaje en los rellenos sanitarios (Ref. 30), los campos de drenado de las fosas sépticas, y las estructuras de drenaje en las orillas de las carreteras (Ref. 32). Las investigaciones recientes han demostrado que una capa de ADL debajo del balasto ferroviario de piedra reduce las vibraciones que pueden afectar a los domicilios y comercios cercanos (Ref. 51). Esta nueva tecnología se usó recientemente en una

línea de tren ligero en San José, California. Finalmente, la Universidad de California en Davis investigó una prometedora idea para usar el ADL como relleno que ayude a reducir la carga sísmica sobre los estribos de los puentes. (Ref. 29).

La economía del uso del ADL en aplicaciones de ingeniería civil depende del costo local de producción, como se indica en el Capítulo 6, así como de los costos de materiales de construcción alternativos que compiten entre sí. El ADL generalmente resulta económico para obras en las que se requiere el uso de material de relleno ligero para la construcción de terraplenes. Asimismo, es rentable en aplicaciones de drenaje en áreas donde hay un suministro limitado de agregado para desagüe convencional. Sin embargo, el ADL no es un sustituto económico del relleno de tierra convencional.

Existen pautas y especificaciones de construcción para ayudar a los ingenieros a aprovechar las propiedades técnicas especiales del ADL, siendo la más importante de ellas la Norma Internacional de ASTM D6270-98 (Ref. 3), Prácticas Estándar para aplicaciones de las llantas de desecho en ingeniería civil (<http://www.astm.org/Standards/D6270.htm>). En este documento se enumeran las propiedades geotécnicas típicas del ADL, los métodos de prueba vigentes, y los lineamientos para la construcción. Varios estudios también han demostrado que el ADL tienen un impacto insignificante sobre las aguas subterráneas (ver por ejemplo las Refs. 4, 5, 9, 10, 15, 16, 21, 22, 40). En el estudio de Humphrey y Swett (Ref. 26) se presenta un análisis estadístico del efecto del ADL sobre las aguas subterráneas.

En las siguientes secciones se presenta el uso del ADL como agregado para drenaje y relleno ligero. El nivel de sofisticación en las diversas aplicaciones varía. Algunas aplicaciones son para obras de ingeniería civil de gran escala que deben ser diseñadas por ingenieros profesionales calificados. Otras de las aplicaciones son de menor escala y pueden ser implementadas por funcionarios municipales como los directores de obras públicas. En el Apéndice A se presentan las especificaciones recomendadas para el material. El ADL con un tamaño máximo de unos 75 mm (3 pulgadas) se conoce como ADL Tipo A, mientras que el ADL con un tamaño máximo de unos 300 mm (12 pulgadas) se conoce como ADL Tipo B. El ADL Tipo A es idóneo para diversas aplicaciones de drenaje en capas de hasta 1 m (3.3 pies) de espesor. El ADL Tipo B se usa para



aplicaciones de relleno ligero en capas de hasta 3 m (10 pies) de espesor. En 1995 y 1996 tres proyectos con ADL sufrieron reacciones de calentamiento interno, lo cual suscitó el desarrollo de lineamientos de ingeniería cuyo propósito es limitar el calentamiento interno de los rellenos de ADL. En el Apéndice B se incluyen dichos lineamientos, así como el planteamiento de las posibles causas. La experiencia en los proyectos de gran escala ha demostrado que estos lineamientos son efectivos (Ref. 18). Las propiedades técnicas del ADL se abordan en el Apéndice C. En este capítulo también se aborda el uso de las llantas enteras para aplicaciones de ingeniería civil.

### EL ADL COMO AGREGADO PARA DRENAJE

El ADL se puede usar como sustituto del agregado convencional para drenaje en una amplia gama de aplicaciones. Este material presenta ventajas cuando el agregado convencional es más caro o no está disponible. Algunas de las posibles aplicaciones de este material para drenaje son las siguientes:

- Capas de drenaje en los sistemas de captación y extracción de lixiviados en rellenos sanitarios.
- Agregado permeable para capas y zanjas de captación de gases de rellenos sanitarios.
- Agregado de drenaje libre para las estructuras de drenaje a las orillas de las vialidades.
- Relleno permeable para muros exteriores por debajo del nivel del suelo.
- Campos de drenaje para sistemas de fosas sépticas.

El ADL de tamaño máximo de 75 mm (3 pulgadas) es adecuado para la mayoría de estas aplicaciones.

La propiedad técnica más importante en las aplicaciones de drenaje es la permeabilidad, también conocida como conductividad hidráulica, que es una medida de la capacidad del material para transmitir un fluido. La permeabilidad se relaciona con la relación de vacíos, que es una medida del espacio vacío entre las partículas del agregado. El fluido circula por el espacio vacío. En el caso de estas dos propiedades, la relación de vacíos, y a su vez la permeabilidad, disminuyen a medida que aumenta el esfuerzo vertical. Estas propiedades se describen en detalle en el Apéndice C; sin embargo los resultados clave se abordan en esta sección. Como se indica en la Figura 5-1, la relación de vacíos del ADL compactado se encuentra entre 0.8 y 0.9. Sin embargo, la relación de vacíos es menos de 0.1 cuando el esfuerzo está por encima de 400 kiloPascuales (kPa) (9,000 libras por pie cuadrado [psf]). Esta proporción del esfuerzo corresponde a alrededor de 23 m (75 pies) de relleno de tierra superpuesto. Con relaciones de vacíos tan bajas, incluso una pequeña cantidad de azolvamiento podría provocar una reducción considerable en la permeabilidad. Por lo tanto, sería razonable establecer 0.2 como límite inferior para la relación de vacíos de muchas aplicaciones, lo cual correspondería a la relación de vacíos de la arena limpia y bien graduada. La restricción de la

relación de vacíos limitaría el uso del ADL en aplicaciones de drenaje a esfuerzos verticales de menos de unos 240 kPa (5,000 psf). Se podrían encontrar niveles de esfuerzo así de altos en algunas aplicaciones en las que se usa el ADL como capa de drenaje en sistemas de captación y extracción de lixiviados de rellenos sanitarios. Sin embargo, los esfuerzos en otras aplicaciones en rellenos sanitarios y vialidades probablemente sean menores que el valor límite.

La permeabilidad del ADL disminuye a medida que aumenta la relación de vacíos, como se indica en la Figura 5-2. La permeabilidad será mayor a 1 cm/s en las relaciones de vacíos típicas de las aplicaciones en carreteras (mayor a 0.4). Con una relación de vacíos de 0.2, la permeabilidad es de unos 0.25 cm/s, lo cual es adecuado para la mayoría de las aplicaciones de drenaje. En comparación, la permeabilidad de la arena limpia y bien graduada es normalmente de  $1 \times 10^{-2}$  cm/s (Ref. 14), por lo que el ADL es más permeable que muchos de los materiales granulados disponibles hoy en día.

En los siguientes apartados se plantea el uso del ADL en aplicaciones de drenaje específicas.

### Sistemas de captación y extracción de lixiviados en rellenos sanitarios

Los nuevos rellenos sanitarios para desechos municipales (RSDM) generalmente se diseñan con un revestimiento de compuestos para limitar la migración de lixiviados al exterior, y con un sistema de captación y extracción de lixiviados (SCEL) que se diseña para mantener menos de 300 mm de lixiviados por encima del revestimiento (consulte el Subtítulo D de las normas para rellenos sanitarios del Título 40 del Código de Reglamentos Federales [CFR] Parte 258.40(a)). Aproximadamente la mitad de los estados de la Unión Americana exigen que el agregado que se use para un SCEL tenga una permeabilidad mayor a  $1 \times 10^{-2}$  cm/s o  $1 \times 10^{-3}$  cm/s (Ref. 31). Asimismo, el SCEL debe estar diseñado para funcionar sin azolvamientos durante todo el ciclo de vida del relleno sanitario y el periodo de mantenimiento posterior a la clausura (ver, por ejemplo, el Título 27 del Código de Reglamentos de California). Además, el agregado debe ser estable en los taludes laterales. Finalmente, el agregado no debe dañar el compuesto subyacente durante la construcción y la operación del relleno. El ADL que se use como componente en un SCEL debe tener un tamaño máximo de 75 mm (3 pulgadas) y cumplir con los requisitos del ADL Tipo A que se señalan en el Apéndice A. Para identificar los principios y requerimientos específicos para el diseño de SCEL se deben consultar libros de texto como el titulado "Aspectos geotécnicos del diseño y la construcción de rellenos sanitarios" ["Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction"] de X. Qian, R.M. Koerner, y D.H. Gray, Prentice Hall, 2002, así como la normatividad gubernamental vigente. En la siguiente sección se abordan únicamente aquellos aspectos que sean específicos al uso de ADL.



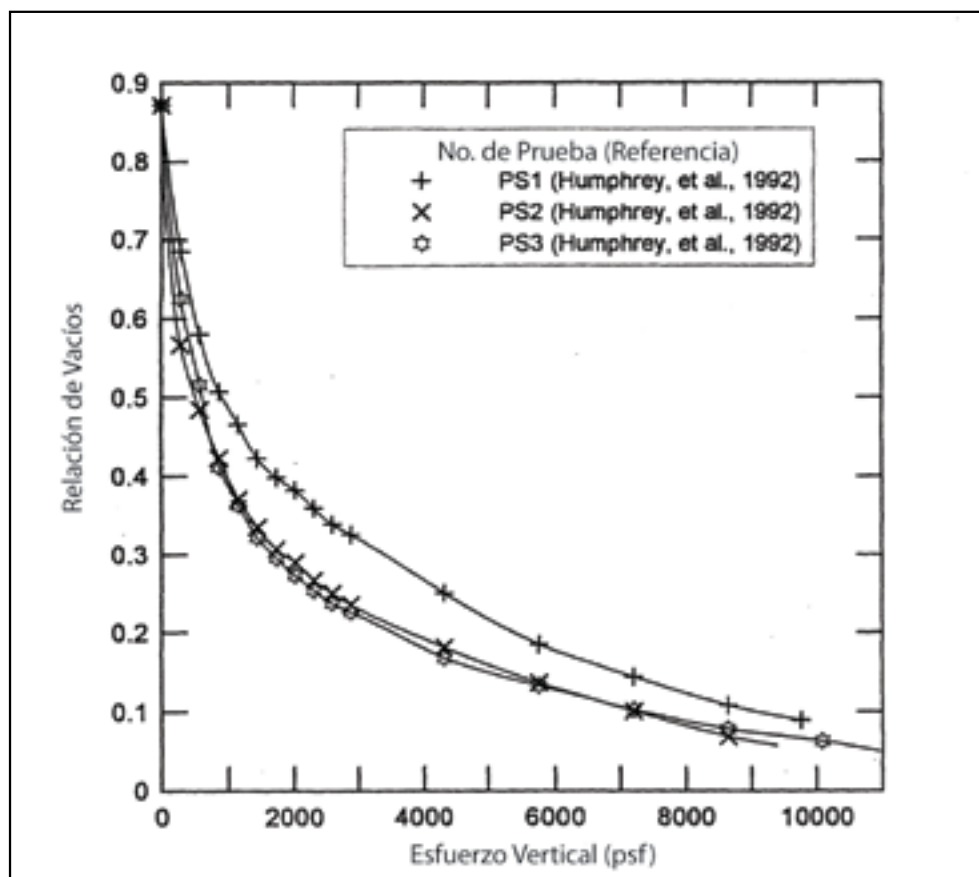


Figura 5-1. Relación de vacíos vs. esfuerzo vertical en el ADL Tipo A.

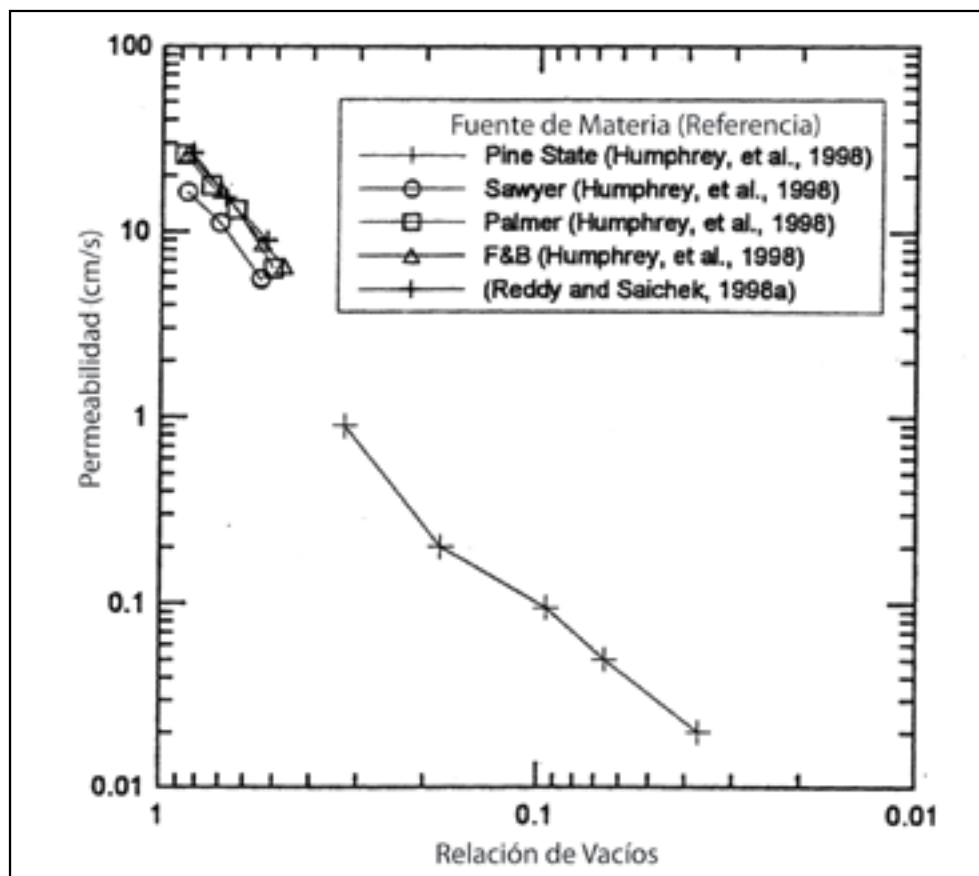


Figura 5-2. Permeabilidad vs. Relación de vacíos en el ADL Tipo A.

La permeabilidad del ADL es adecuada para muchas de las aplicaciones en SCEL, y generalmente es mayor a  $1 \times 10^{-2}$  cm/s. Sin embargo, la capa de ADL se comprime por el peso de los residuos que quedan encima y con ello disminuye su relación de vacíos. En niveles altos de esfuerzo, la relación de vacíos puede bajar a menos de 0.1, como se muestra en el Cuadro 5-1. Con una relación de vacíos tan baja el ADL quedaría susceptible a azolvamientos, por lo tanto, se recomienda una relación de vacíos mínima de 0.2. Esta relación limitaría el esfuerzo vertical causado por el material del nivel superior a unos 240 kPa (5,000 psf). Una unidad de residuos sólidos municipales (RSM) que incluya una cantidad razonable de cubierta de tierra diariamente, normalmente tendría un peso de 0.8 a 1.1 Mg/m<sup>3</sup> (50 to 70 pcf) (Ref. 36). Este peso limitaría el grosor de los residuos suprayacentes a unos 20 o 30 m (70 a 100 pies).

Al seleccionar el grosor de la capa de ADL se debe considerar la compresibilidad del ADL. En general, se debe construir la capa de manera que se compense la compresión debida al peso del residuo sólido de encima, para que el grosor de la capa cumpla con los requerimientos de diseño después de la compresión. El Cuadro 5-1 se presenta como guía para determinar el sobredimensionamiento necesario.

Cuadro adaptado de GeoSyntec (1998b); fuente de datos: Manion y Humphrey (1992), y Humphrey y otros (1993)

Además, el alambre de acero del talón que sobresale de los bordes cortados del ADL puede perforar la geomembrana subyacente. Los alambres del talón

**Cuadro 5-1. Compresibilidad del ADL Tipo A.**

Esfuerzo vertical kPa (psf)	Compresión vertical (%)
69 (1440)	19-33
138 (2880)	25-37
207 (4320)	29-42
276 (5760)	33-44
345 (7200)	36-46
414 (8640)	39-48
483 (10,080)	40-50

Cuadro adaptado de GeoSyntec (1998b); fuente de datos: Manion y Humphrey (1992), y Humphrey y otros (1993)

son el bulto rígido que se encuentra en la parte donde la llanta hace contacto con el rin. La posibilidad de que los alambres del talón puedan perforar la geomembrana se investigó en una prueba de campo realizada por el Departamento de Reciclaje y Recuperación de Recursos de California (CalRecycle; Refs. 11, 12), en la que se construyeron secciones para la prueba colocando ADL directamente en la geomembrana, separado de la la geomembrana con geotextil con pesos de hasta 1,620 gramos por metro cuadrado (g/m<sup>2</sup>) (48 onzas por yarda

cúbica [oz/yd<sup>2</sup>]), y separado de la geomembrana con geocompuesto para drenaje. Se le dio seguimiento a la instalación con 100 pasadas de un bulldozer Caterpillar D-7G con un peso operativo de aproximadamente 20,400 kg (45,000 libras). En todos los casos, el alambre de acero del talón perforó la geomembrana de abajo, aún cuando estaba protegida con geotextil o geocompuesto. En la Figura 5-3 se muestra un ejemplo de la perforación. Sin embargo, una sección con 300 mm (12 pulgadas) de grava como separador entre el ADL y la geomembrana no mostró señales de perforación (Refs. 11, 12). Por lo tanto, el ADL para los sistemas de revestimiento que contienen una geomembrana debe estar separado de la geomembrana por un mínimo de 300 mm (12 pulgadas) de agregado convencional para drenaje. Por otro lado, en las regiones donde la mano de obra es barata, se les puede quitar a las llantas el alambre de talón antes triturarlas, además de seguir las restricciones indicadas en el siguiente párrafo.

La prueba de campo realizada por CalRecycle (Refs. 11, 12) demostró que el alambre más delgado de la banda de rodamiento y los costados de las llantas no perfora la geomembrana. Sin embargo, el alambre de la banda de rodamiento puede dejar leves hendiduras, raspaduras y abolladuras si entra en contacto directo con la geomembrana. Aunque no se ha confirmado con pruebas, se cree que estos leves daños pueden reducir la resistencia a la tracción de la geomembrana (Refs. 1, 12). El ADL se puede colocar en contacto directo con la geomembrana si ya se extrajo completamente el alambre del talón en las áreas planas donde la resistencia a la tracción de la geomembrana no es tan importante. La geomembrana se debe proteger con geotextil (270 g/m<sup>2</sup> (8 oz/yd<sup>2</sup>) o más pesado) en los taludes laterales donde la resistencia a la tracción de la geomembrana es importante.

Un diseño típico en el que se incorpore ADL como componente del SCEL tendría 300 mm (12 pulgadas) de agregado convencional para drenaje, con una capa superior de 300 a 450 mm (12 a 18 pulgadas) de ADL Tipo A. El grosor de la capa de ADL comprimida generalmente sería de 300 mm (12 pulgadas) o mayor.



**Figura 5-3. Ejemplo de alambre de talón que perfora la geomembrana (Ref. 12).**

El ADL normalmente se esparciría en un solo vaciado (capa) con un bulldozer de baja presión, para luego compactarlo con cuatro pasadas del bulldozer. Se debe usar un geotextil como separador para minimizar la infiltración de partículas finas del ADL que se coloque directamente sobre una capa de suelo compactada de baja permeabilidad. Una capa de 1 hectárea de drenaje de ADL que tenga un grosor de 450 mm (18 pulgadas) requeriría el equivalente a 300,000 llantas para automóvil.

## Sistemas de captación de gas de rellenos sanitarios

Los sistemas de captación de gas de rellenos sanitarios (GRS) se usan para recoger los gases de los rellenos sanitarios y enviarlos directamente a la atmósfera o a una central donde se puedan quemar. El GRS se recoge usando uno o más de los siguientes métodos: planchas horizontales de agregado permeable colocadas debajo de la cubierta intermedia o final; zanjas horizontales de agregado permeable ubicadas dentro del relleno sanitario; o pozos verticales rellenos de agregado permeable. Se puede usar en combinación con el agregado permeable un tubo perforado para incrementar la capacidad de extracción. Los sistemas de captación de GRS pueden ser pasivos, de manera que el agregado permeable simplemente marque el camino para transferir el GRS a la atmósfera; o pueden ser activos, usando una aspiradora para extraer el GRS del relleno sanitario. La alta permeabilidad del ADL le permite sustituir al agregado convencional en muchas aplicaciones de captación de GRS. Los principios generales del diseño de un sistema para la captación de GRS se presentan en textos como el de Qian u otros (Ref. 36) y en las normas gubernamentales correspondientes.

## Plancha de ADL para captación de gas

Son varios los factores que se deben considerar cuando se usa el ADL en forma de una plancha de extracción de gas debajo de un sistema de recubrimiento final. En la mayoría de las aplicaciones, la plancha queda cubierta de menos de 1 m (3.3 pies) de material de tierra, por lo que el esfuerzo vertical de la plancha generalmente será de menos de 20 kPa (400 psf). La Figura 5-1 indica que la relación de vacíos con este esfuerzo probablemente sería mayor a 0.6. La Figura 5-2 indica que la permeabilidad probablemente sería mayor a 1 cm/s. Estas cifras son semejantes a las del agregado convencional que se usa para esta aplicación. También debe considerarse la compresión del ADL por debajo de la cubierta superior. Aunque con esfuerzos bajos la compresión será poca, se recomienda que el grosor de la capa instalada se aumente en un 10 por ciento para compensar la compresión por el peso de la capa superior. Se debe usar un geotextil para separar la capa de ADL para captación de gas de la cubierta de tierra superpuesta. Para esta aplicación es adecuado usar ADL Tipo A. En el Apéndice A se indican las especificaciones de materiales para el ADL Tipo A.

La capa ADL se debe esparcir sobre una base de tierra debidamente nivelada y compactada. El ADL se puede

esparcir en un solo vaciado, además de que se debe compactar con seis pasadas de un compactador de rodillos lisos con un peso operativo mínimo de 9.8 toneladas métricas (10 toneladas inglesas).

La compresibilidad de la capa de ADL para captación de gases presenta inconvenientes en cuanto a la colocación del sistema de cubierta suprayacente. En una prueba de campo realizada para CalRecycle (Refs. 11, 13) se descubrió que la construcción de una base de revestimiento de arcilla compactada (RAC) consistente en 300 mm (12 pulgadas) de tierra compactada y con una capa superior de 300 mm de AD producía un RAC que sufría de resquebrajamiento excesivo. Al incrementar la base de tierra compactada a 450 mm (18 pulgadas) se formó una superficie adecuada para la construcción de RAC con una conductividad hidráulica de  $1 \times 10^{-6}$  cm/s o menos (Ref. 13). Por lo tanto, para formar una base de tierra para la construcción del RAC suprayacente se debe esparcir un mínimo de 450 mm (18 pulgadas) de tierra compactada sobre la capa de ADL para captación de gases. Se debe instalar un geotextil como separador entre la capa de ADL para captación de gases y la capa base de tierra de la parte superior.

En algunos diseños de rellenos sanitarios se indica el uso de una geomembrana como barrera para el sistema de cubierta del relleno sanitario. La geomembrana no se puede colocar directamente sobre la capa de ADL para captación de gases debido al riesgo de que la perfora el alambre de acero para talón que queda expuesto en el borde cortado de las virutas de llanta. Asimismo, la compresibilidad del ADL dificultaría que se construyeran juntas entre las hojas de geomembrana contiguas y se mantuviera la integridad de las juntas en operaciones de construcción posteriores. Por estos motivos, se debe esparcir una capa de tierra compactada de 300-mm (1-pie) de espesor sobre el ADL antes de colocar la geomembrana. Además, se debe instalar un geotextil como separador entre la capa de ADL para captación de gases y la capa base de tierra de la parte superior.

## Zanjas de ADL para captación de gases

El ADL se puede usar en lugar del agregado convencional en muchas aplicaciones de zanjas para captación de GRS. Las zanjas de captación de gases pueden tener distintas configuraciones, incluyendo zanjas a intervalos periódicos dentro del relleno; zanjas excavadas por las capas intermedias de cubierta de tierra; y cárcamos de extracción de gases colocados en el fondo del relleno sanitario. Para estas configuraciones, generalmente un tubo perforado queda rodeado de un agregado permeable. El agregado debe ser suficientemente permeable como para transmitir el GRS al tubo de extracción y a la vez proteger el tubo. Es posible que una zanja de captación de GRS solamente pueda funcionar durante un tiempo limitado, y generalmente no se usa ninguna capa de geotextil para separación. Cuando se prevé que la zanja funcione con una capa de residuos de grosor mayor a 30 m (100 pies), se debe considerar la

idoneidad de la relación de vacíos con compresión y la permeabilidad. Las dimensiones de la zanja de captación de GRS y el tubo perforado se deben establecer con base en el índice de generación de gas que se prevea y los principios de ingeniería correspondientes, como los señalados por Qian y otros (Ref. 36). Existen muchas aplicaciones en los Estados Unidos en las que se ha usado con éxito el ADL como relleno para zanjas de captación de GRS.

### Pozos de ADL para extracción de gases

El paso inicial en la construcción de un pozo vertical para la extracción de gases es normalmente taladrar un agujero en el relleno sanitario usando una broca de cuchara de 0.6 a 0.9 m (2 a 3 pies) de diámetro. Se coloca un tubo perforado de cloruro de polivinilo (PVC) cédula 80 con un diámetro de entre 100 y 150 mm (4 a 6 pulgadas) en el centro del agujero y el espacio anular se rellena con piedra lavada de 25 a 50 mm (1 a 2 pulgadas) de diámetros (Ref. 36). Cabe la posibilidad de sustituir la piedra lavada con ADL Tipo A.

Para esta aplicación habrá una compactación mínima del ADL. Por lo tanto, se espera que el peso unitario in situ al momento de la colocación oscile entre los valores del ADL sin compactar y los del ADL compactado. El peso unitario sin compactar del ADL Tipo A generalmente varía entre 0.4 y 0.5 Mg/m<sup>3</sup> (25 a 31 pcf). Sin embargo, se han reportado pesos unitarios sin compactar hasta de 0.34 Mg/m<sup>3</sup> (21 pcf) en el caso de trozos con una cantidad excesiva de taloneras de acero expuestas. El peso unitario compactado del ADL Tipo A es normalmente de unos 0.64 Mg/m<sup>3</sup> (40 pcf) (Refs. 2, 24, 33). Para la aplicación que se propone se prevé que el peso unitario in situ al momento de la colocación oscile entre 0.4 y 0.64 Mg/m<sup>3</sup> (25 y 40 pcf). El peso del ADL lo sostendrá principalmente el costado de la perforación, por lo que se prevé muy poca compresión del ADL a consecuencia del peso propio y el peso del material suprayacente. Sin embargo, se prevé que el ADL se comprima con el tiempo en la misma proporción que los residuos colindantes. Suponiendo que los residuos se compriman un 20 por ciento durante la vida útil del pozo de captación, se prevé que el peso unitario final del ADL oscile entre 0.5 y 0.8 Mg/m<sup>3</sup> (31 y 50 pcf). Esta cantidad de compactación corresponde a relaciones de vacíos de entre 0.50 y 1.4. La relación de vacíos de la piedra lavada típicamente sería de alrededor de 0.43. Por lo tanto, la relación de vacíos del ADL instalado sería mayor que para piedra lavada de 25 a 50 mm (1 a 2 pulgadas) de diámetro.

La permeabilidad del ADL con una relación de vacíos de 0.50 sería mayor a 9 cm/s, según la Figura 5-2. No se dispone de datos sobre permeabilidad del ADL con una relación de vacíos de 1.4, pero se prevé que la permeabilidad sea alta. En general, los datos sobre relación de vacíos y permeabilidad indican que el desempeño del ADL Tipo A y de la piedra lavada de 25 a 50 mm (1 a 2 pulgadas) de diámetro serían similares en

los pozos verticales de captación de gases. Actualmente no se conoce ningún proyecto en los Estados Unidos en el que se haya usado ADL como agregado permeable en perforaciones verticales.

En el Relleno Sanitario Central del Condado de Yolo (Yolo County Central Landfill o YCCL) en California se usó un procedimiento de instalación alternativo para el ADL de relleno para los pozos verticales de captación de gases. Los pozos de este relleno sanitario se instalaron a medida que se iban colocando los residuos. El procedimiento general de construcción fue usar malla de alambre para formar un cilindro de 1.2 m (4 pies) de diámetro en donde se colocó ADL, instalando la tubería perforada en el centro del ADL. El nivel de ADL siempre se mantuvo por encima de los residuos durante la construcción. A este ADL se le denominó de "trozo burdo", siendo su tamaño máximo de 300 mm (12 pulgadas). Estos pozos han seguido funcionando bien durante muchos años.

### Aplicaciones de drenaje para vialidades de gran densidad vehicular

El exceso de agua en la base de las vialidades pavimentadas puede reducir considerablemente su vida útil. El ADL se puede utilizar en dos formas para ayudar a remover el agua del corte transversal de la superficie. La primera es una capa permeable de drenaje por debajo de la base de agregado convencional. El ADL debe estar cubierto de una capa de 1 a 1.5 m (3.28 a 5 pies) de agregado convencional para reducir al mínimo la influencia de la compresibilidad del ADL sobre el desempeño del pavimento suprayacente en vialidades con mucho tráfico vehicular. Por lo tanto, el ADL para esta aplicación se debe colocar en una parte relativamente profunda del corte transversal del pavimento.

La segunda aplicación en la que se usa ADL es como reemplazo del drenaje convencional en desagües laterales de las carreteras. Estos desagües se localizan hacia la orilla de la vialidad, por lo que la restricción sobre el grosor de la capa superior no se aplica en este caso. La base de agregado convencional debe drenar hacia el desagüe lateral. El uso de desagües para los bordes es particularmente adecuado en cortes transversales donde no es posible tener drenaje por gravedad hacia alguna zanja, y en lugares en los que los mantos freáticos son altos, así como en lugares urbanos donde sea impráctico construir zanjas perimetrales.

Las capas de drenaje por debajo de las calles pavimentadas deben constar de 300 mm (12 pulgadas) de ADL Tipo A (tamaño máximo de 75 mm [3 pulgadas]). Se debe colocar en un solo vaciado que se compacta con seis pasadas con un compactador de vibración de rodillos lisos, una aplanadora de rodillo estático, una apisonadora, o un bulldozer de oruga de ancho convencional. El peso operativo mínimo debe ser de 9.8 toneladas métricas (10 toneladas inglesa) para cada tipo de equipo. Para reducir al mínimo la infiltración de la tierra de los alrededores, el ADL se debe encapsular con geotextil permeable que cumpla con los requisitos de la Asociación Americana



de Oficiales de Transporte en Carreteras (American Association of State Highway Transportation Officials o AASHTO) M288, Clase 2. Existe información adicional sobre los requisitos de AASHTO en la compilación titulada "Especificaciones estándar para los materiales de transporte y los métodos de muestreo y análisis ["Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing"] 30ª Edición, y en las Normas provisionales de AASHTO [AASHTO Provisional Standards], Edición 2010", disponibles en [https://bookstore.transportation.org/item\\_details.aspx?ID=1597](https://bookstore.transportation.org/item_details.aspx?ID=1597).

El ADL para desagües laterales debe ser Tipo A con un tamaño máximo de 75 mm (3 pulgadas). Se debe colocar en vaciados de 300 mm (12 pulgadas), y cada vaciado se debe compactar con seis pasadas de un rodillo manual con un peso operativo mínimo de 1 tonelada métrica (1 tonelada inglesa). Para reducir al mínimo la infiltración de tierra de los alrededores, el ADL se debe encapsular con geotextil permeable que cumpla con los requisitos de AASHTO M288, Clase 2. El talud al fondo de la zanja debe quedar 1 por ciento o más hacia la salida del drenaje. La capacidad del drenaje de una zanja con este talud y un área de corte transversal de 1 metro cuadrado (m<sup>2</sup>) será mayor a 1 metro cúbico por segundo (m<sup>3</sup>/seg). Si esta capacidad es inadecuada, se puede incorporar un tubo a la base del desagüe lateral.

### Aplicaciones de drenaje para vialidades locales

Los principios generales del uso de ADL para aplicaciones de drenaje en vialidades locales son similares a los de vialidades de gran densidad vehicular. Sin embargo, las vialidades locales tienen menor volumen de tráfico y en algunos casos no están pavimentadas. En el caso de las calles pavimentadas con bajo volumen vehicular, se deben colocar 0.75 m (2.5 pies) de base de agregado sobre las capas de ADL. Asimismo, el ADL para las vialidades pavimentadas se debe separar de la tierra que los rodea mediante un geotextil que cumpla con los requisitos de AASHTO M288, Clase 2. En el caso de vialidades sin pavimentar con bajo volumen vehicular, se deben esparcir 0.6 m (2 pies) de base de agregado sobre las capas de drenaje del ADL; el uso de una capa de separación con geotextil es opcional.

El uso de ADL como agregado permeable para los desagües laterales de las vialidades locales es igual que para las de alto volumen, salvo que el uso de una capa de separación es opcional en el caso de las vialidades sin pavimentar.

### Aplicaciones de drenaje para obras municipales de pequeñas dimensiones

Para las obras municipales de pequeña escala se necesita agregado permeable en varias aplicaciones. En algunos casos, se puede sustituir el agregado convencional para drenaje por ADL Tipo A. Esta sustitución resulta ventajosa cuando el agregado convencional es más caro o no está

disponible. Algunas de las posibles aplicaciones son las siguientes:

- Relleno para muros de menos de 1 m (3.3 pies) de altura.
- Relleno alrededor de los muros de cimentación de los edificios.
- Zanjas llenas de ADL en lugar de alcantarillas de poco diámetro para conducir pequeñas cantidades de escurrimientos hacia lugares de descarga más adecuados.

El ADL para estas aplicaciones se puede colocar a mano o con el equipo de construcción del que se disponga. El ADL se debe colocar en vaciados de 300 mm (1 pie) y compactarse con una apisonadora manual. El uso de un separador geotextil entre el ADL y el suelo adyacente es opcional, pero serviría para prolongar la vida útil de la obra al limitar la migración de tierra hacia el interior, lo cual a su vez reduciría la permeabilidad del ADL. El ADL debe cubrirse con un mínimo de 300 mm (12 pulgadas) de tierra en áreas que vayan a quedar cubiertas por vegetación, 450 a 600 mm (18 a 24 pulgadas) de agregado base en zonas sin pavimentar que estén sujetas a mucho tráfico vehicular, y de 600 a 750 mm (24 a 30 pulgadas) de agregado base para zonas con bajo tráfico vehicular.

El ADL no se debe usar como relleno entre edificaciones, ya que su compresibilidad podría causar daños estructurales al inmueble que quede en la parte superior. El ADL con alambre de acero del talón o de la banda de rodamiento expuesto nunca se debe dejar en la superficie, debido al riesgo de que alguna persona o algún animal sufran cortaduras o lesiones.

### Aplicaciones de drenaje en campos de desagüe de sistemas sépticos

Dada la naturaleza permeable del ADL, éste se ha convertido en una opción atractiva para reemplazar el relleno tradicional de piedra en los campos de desagüe de los sistemas sépticos. Varios estados de la Unión Americana han empezado a permitir que se use para la construcción de nuevos campos de desagüe. Se ha observado que con él se reduce el gasto y la mano de obra necesarios en comparación con los sistemas tradicionales, y el ADL puede retener más agua que la piedra. El transporte del material también es más eficiente y fácil, debido a que es más ligero. El ADL puede ser una buena opción en zonas con un abundante suministro de llantas de desecho, y en lugares donde no se disponga de piedra o sea muy caro transportarla.

### EL ADL COMO RELLENO LIGERO

Por su bajo peso unitario y costo relativamente bajo, el ADL resulta atractivo como relleno para terraplenes contruidos sobre suelos débiles, para la estabilización de taludes, y como relleno para muros de contención. El uso adecuado del ADL como relleno ligero puede redundar en mayor protección contra las fallas de estabilidad de

los taludes, una reducción del asentamiento a largo plazo, y menores costos de construcción. Dado que cada metro cúbico de ADL contiene el equivalente a 100 llantas para automóvil, incluso en obras relativamente pequeñas se pueden consumir grandes cantidades de llantas. Por ejemplo, para los rellenos de los accesos de un paso elevado en Portland, Maine se usaron 1.2 millones de llantas para automóvil (equivalente en llantas para automóvil o PTE, por sus siglas en inglés). En la siguiente sección se presentan las consideraciones de diseño para el uso del ADL como relleno ligero, para posteriormente abordar las aplicaciones específicas del ADL para este fin. Como se mencionó anteriormente, el calentamiento interno del ADL tiene el potencial de causar alguna reacción; sin embargo, ese potencial disminuye considerablemente si se siguen las especificaciones de ingeniería indicadas en el Apéndice B. Toda obra en la que se utilice ADL como relleno ligero debe ser diseñada por un ingeniero que cuente con amplios conocimientos sobre propiedades de suelos, técnicas para el análisis de estabilidad, y métodos de cálculo del asentamiento.

### Consideraciones de diseño para el uso del ADL como relleno ligero

Existen varias consideraciones especiales para el diseño de obras en las que se utilice el ADL como relleno ligero, incluyendo el cálculo del peso unitario final del ADL in situ, el cálculo del sobredimensionamiento de la capa de ADL necesaria para compensar la compresión por el peso de los materiales suprayacentes, el cálculo del grosor que debe tener la cubierta de tierra, y los lineamientos a seguir para limitar el calentamiento interno. Estas consideraciones se abordan en las siguientes secciones. Además, en el Apéndice C se presenta el planteamiento detallado de las propiedades técnicas del ADL. Muchas de estas propiedades serán necesarias para el diseño geotécnico de rellenos ligeros de ADL. En el Apéndice D se presenta el procedimiento para calcular el precio unitario final del ADL in situ y el sobredimensionamiento.

#### Espesor de la cubierta de tierra suprayacente

Se debe colocar suficiente cubierta de tierra sobre la capa de ADL comprimible para preservar la durabilidad del pavimento superior, como indican las investigaciones de Nickels (Ref. 34) y Humprey y Nickels (Ref. 25). El espesor de la cubierta se define como el espesor combinado de la base y la tierra, medido desde el fondo del pavimento de concreto asfáltico hasta la parte superior de la capa de ADL. Los modelos computarizados muestran que la deformación por tracción en la base del pavimento de concreto asfáltico con una cubierta de tierra de 760 mm (30 pulgadas) sobre la capa de ADL es igual que la sección de control bajo la cual se encuentran agregado convencional y tierra. Los modelos también predicen que la deformación por tensión sería similar incluso con 457 mm (18 pulgadas) de cubierta de tierra.

Para la cubierta de tierra se recomiendan espesores de entre 0.5 y 1.2 m (20 y 47 pulgadas), dependiendo de la carga vehicular. El nivel más bajo de este rango podría ser aceptable para aplicaciones con poco tráfico vehicular, como estacionamientos y caminos rurales. Sin embargo, la deflexión de la superficie con los vehículos pesados inmediatamente después de colocar la cubierta de tierra sí se notaría, aunque se reduciría si hay tráfico adicional.

### Lineamientos para limitar el calentamiento

Tres rellenos de ADL gruesos (de más de 7.9 m [26 pies] de espesor) han sufrido reacciones de calentamiento espontáneo. Dos de estos proyectos se localizaban en el Estado de Washington, y otro en Colorado. Estos proyectos se construyeron en 1995, y la grave reacción de sobrecalentamiento que hubo en ellos se dio en un lapso de 6 meses después de haber sido terminados (Ref. 17). Lo que se aprendió de estos proyectos se condensó en lineamientos de diseño desarrollados por el Comité Ad Hoc de Ingeniería Civil (Ref. 1), una alianza de colaboración entre el gobierno y la industria que atiende el problema del reuso de llantas de desecho para ingeniería civil. La filosofía general para el desarrollo de lineamientos consistió en minimizar la presencia de factores que pudieran contribuir al calentamiento espontáneo. Posteriormente los lineamientos fueron publicados por ASTM International (en ese entonces llamada la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales, Ref. 3) y distribuidos por la Administración Federal de Carreteras. Estos lineamientos se presentan en el Apéndice B.

### Terraplenes de carreteras construidos sobre suelo débil

La finalidad de utilizar ADL como relleno ligero para terraplenes construidos sobre suelos débiles y comprimibles es incrementar la estabilidad global y reducir el nivel de hundimiento a largo plazo. No existe un diseño universal para esta aplicación; sin embargo, la mayoría de los diseños cuentan con las siguientes características

- El acceso de aire y agua está limitado por una cubierta de tierra de baja permeabilidad en los costados y la parte superior de la zona de ADL. La cubierta de tierra de baja permeabilidad debe ser tierra inorgánica de la cual por lo menos un 30 por ciento pueda pasar por una criba No. 200 (0.075 mm). El espesor de la capa de tierra de baja permeabilidad normalmente oscila entre 0.6 y 2 m (2 y 6 pies).
- Geotextil apegado a los requisitos de AASTHO M288, Clase 2, que se usará para separar el ADL del suelo adyacente.
- El ADL se aplica en vaciados de 300 mm (12 pulgadas), y cada vaciado se compacta con seis pasadas de equipo de compactación con un peso operativo mínimo de 9.8 toneladas métricas (10 toneladas inglesas). El equipo de compactación puede ser un compactador de vibración de rodillos

lisos, una apisonadora, o un bulldozer de oruga de ancho convencional.

- En los proyectos se usa ADL Tipo B (consulte las especificaciones en el Apéndice B).
- Los proyectos se apegan cabalmente a los lineamientos para limitar el calentamiento (Apéndice B).

En la Figura 5-6 se presenta una vista transversal típica de una obra de relleno ligero para terraplenes. El uso de ADL para esta aplicación se ilustra además con los dos casos presentados en el Apéndice E.

### Construcción de relleno en la Cuenca de la Ciudad de México

Muchas de las zonas pobladas de México están asentadas sobre arcilla lacustre volcánica, incluyendo la Ciudad de México (Ref. 52). La arcilla tiene una estructura muy porosa debido a su alto contenido de microfósiles y diátomos (Ref. 7). Las características técnicas de este suelo incluyen un alto límite de líquidos, contenido de agua mayor al límite de líquidos, una alta relación de vacíos (hasta  $e = 14$ ), expansión al mojarse, sensibilidad al moldeo, baja resistencia al corte, alta compresibilidad, y un alto nivel de compresión secundaria (Refs. 7, 52). Por ejemplo, el espesor de la arcilla lacustre volcánica cerca del Palacio de Bellas Artes en México es de 180 m (600 pies) (Ref. 48).

Una técnica para superar las dificultades que presenta este suelo altamente comprimible sería usar ADL como relleno ligero para construir terraplenes y relleno de bajo peso unitario para los muros. Se recomienda estudiar detalladamente las oportunidades de usar el ADL en zonas del país con un subsuelo de arcilla lacustre volcánica.

### Estabilización de taludes

Los derrumbes o deslizamientos pueden tener un impacto importante sobre las vialidades y otras infraestructuras. En casos en los que la cabeza del talud se cruza con un camino, sería posible usar el ADL como relleno ligero para ayudar a estabilizarlo. El principio de diseño consiste en excavar la tierra de la parte superior del talud y reemplazarla con ADL ligero para reducir la fuerza de deslizamiento. En algunos casos, el uso del ADL como relleno ligero se combina con otras técnicas, como construir un bordo de tierra o piedra al pie del talud para incrementar la fuerza de resistencia, cambiar la geometría del talud para mejorar su estabilidad, o agregar drenaje para retirar el exceso de agua de la base de la masa del talud. El uso de ADL para la estabilización de taludes se ilustrará con un caso real.

Este caso sucedió en la Ruta Carretera 42, cerca de Roseburg, Oregon, en los EE.UU. (Ref. 47). Como parte de un proyecto para mejorar la alineación de

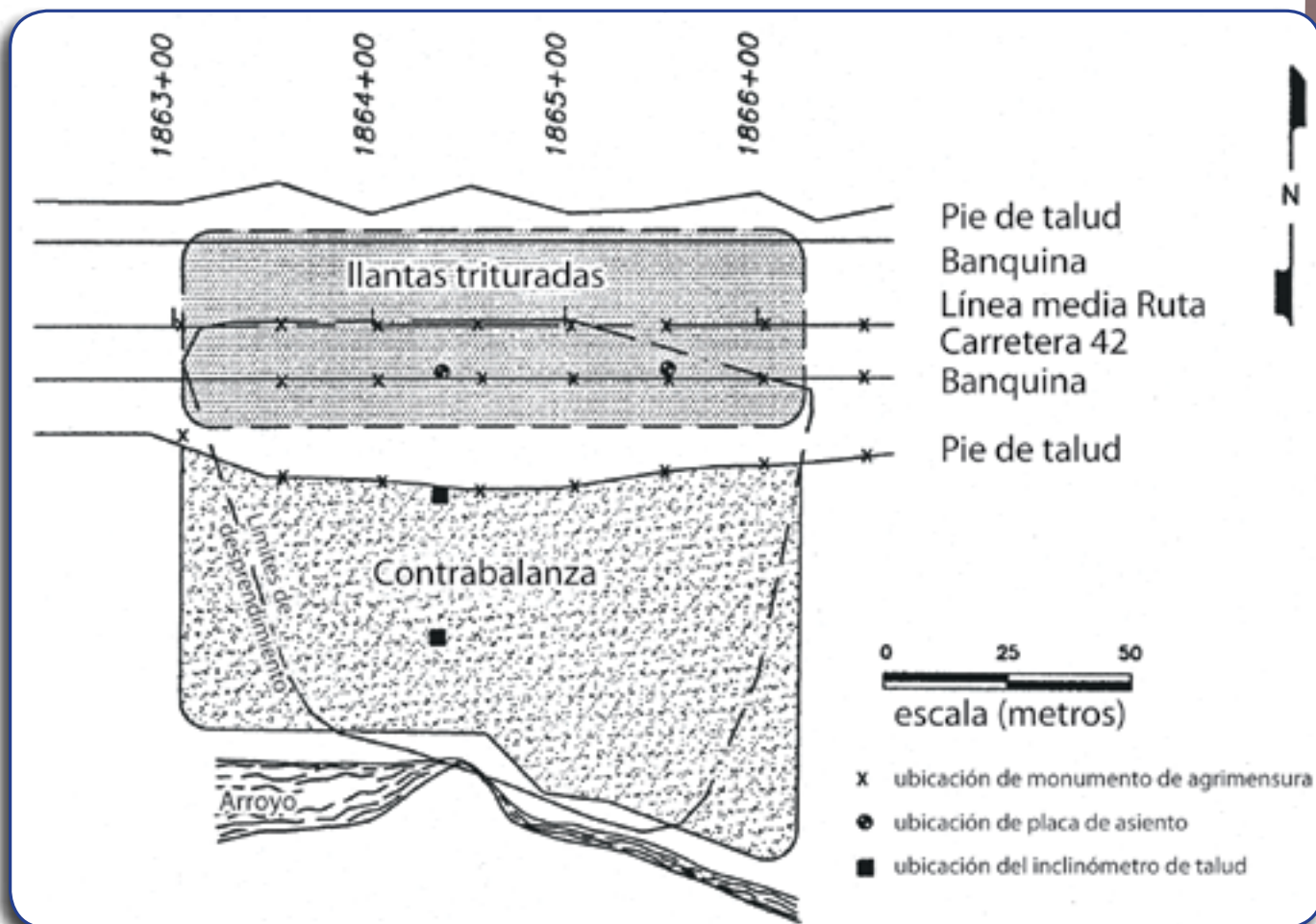


Figura 5-4. Planta y alzado de la prueba de campo de llantas trituradas en Oregon (Ref. 47)



la carretera, se alzó y amplió un terraplén, con lo cual se reactivó un antiguo deslizamiento. La cabeza del talud se estabilizó usando ADL como relleno ligero para reducir la fuerza de deslizamiento, colocando un relleno de contrapeso al pie del talud para incrementar la fuerza de resistencia, y agregando una plancha de drenaje para retirar el exceso de agua. La obra se muestra en el plano de la Figura 5-4 y en el corte transversal de la Figura 5-5. El movimiento de tierras se llevó a cabo en 1990 y la pavimentación final se terminó en 1991.

Las especificaciones para este proyecto indicaban que el 80 por ciento del ADL debía tener un tamaño mayor a 200 mm (8 pulgadas) y un 50 por ciento un tamaño mayor a 100 mm (4 pulgadas); el tamaño máximo que se midió en todas las direcciones fue de 610 mm (24 pulgadas). La especificación sobre los fragmentos de metal indicaba lo siguiente: "Todos los fragmentos de metal deben estar firmemente sujetos y 98 por ciento incrustados en las secciones de la llanta de la cual se corten. No se deberán colocar partículas de metal en el relleno sin no están contenidas dentro de un segmento de hule. Se prevé que los extremos de las bandas de metal y los talones queden expuestos únicamente en las caras cortadas de algunos trozos de llanta". Upton y Machan (Ref. 47) indican que el relleno de ADL contenía piezas más grandes que lo especificado, así como exceso de fragmentos de metal.

El ADL se aplicó en vaciados de 1 m (3 pies) y se compactó con tres pasadas de un bulldozer Caterpillar D-8. También se intentó usar un bulldozer Caterpillar D-6, pero éste pareció ser menos efectivo que el D-8. Los taludes laterales se rebajaron con una excavadora. El ADL se separó de la tierra de los alrededores con un geotextil. El espesor máximo del relleno de ADL fue de unos 4.3 m (14 pies). Durante la construcción, en algún momento un frente vertical de ADL de 2.4 m (8 pies) de altura quedó expuesto y permaneció

estable. Después de la compactación, pero antes de la colocación de la cubierta superior de tierra, se calculó que el peso unitario del ADL era de 0.72 Mg/m<sup>3</sup> (45 pcf). La cubierta superior consistió en 0.91 m (36 pulgadas) de tierra, 0.58 m (23 pulgadas) de base de agregado, para un total de 1.50 m (59 pulgadas). El pavimento que se colocó por encima tenía un espesor de 200 mm (8 pulgadas). Después de la compresión por el peso del material suprayacente, se calculó que el peso unitario era de 0.85 Mg/m<sup>3</sup> (53 pcf).

### Relleno para muros

Existen varias ventajas del uso de ADL como relleno detrás de los muros, incluyendo la reducción en el esfuerzo horizontal, la reducción en el esfuerzo vertical en los suelos de cimentación comprimibles, y un mejor drenaje. Los lineamientos de diseño para el uso de ADL como relleno de muros se derivan en gran parte de una prueba a gran escala realizada en la Universidad de Maine, según se describe en los siguientes párrafos (Refs. 44, 45).

### Diseño de las instalaciones

La instalación sometida a la prueba tiene 4.88 m (16 pies) de altura y 4.47 por 4.57 m (14.7 por 15 pies) en planta. Consta de cuatro paredes y un cimiento de concreto reforzado. Las dos paredes laterales son de concreto reforzado. La pared del fondo es removible, lo cual permitió que se retirara el relleno después de realizar la prueba. La pared del frente consta de tres paneles. Se midieron las fuerzas y las presiones en el panel central para reducir la influencia de la fricción entre el relleno y las paredes laterales. El panel central se montó en seis celdas de carga: dos orientadas verticalmente en la base del panel para medir la fuerza de corte; y cuatro orientados en forma horizontal, dos en la parte inferior del panel y dos en la parte superior, para medir la fuerza horizontal. El panel central también contenía cuatro celdas de presión formadas en el perfil de concreto. La rotación de los tres

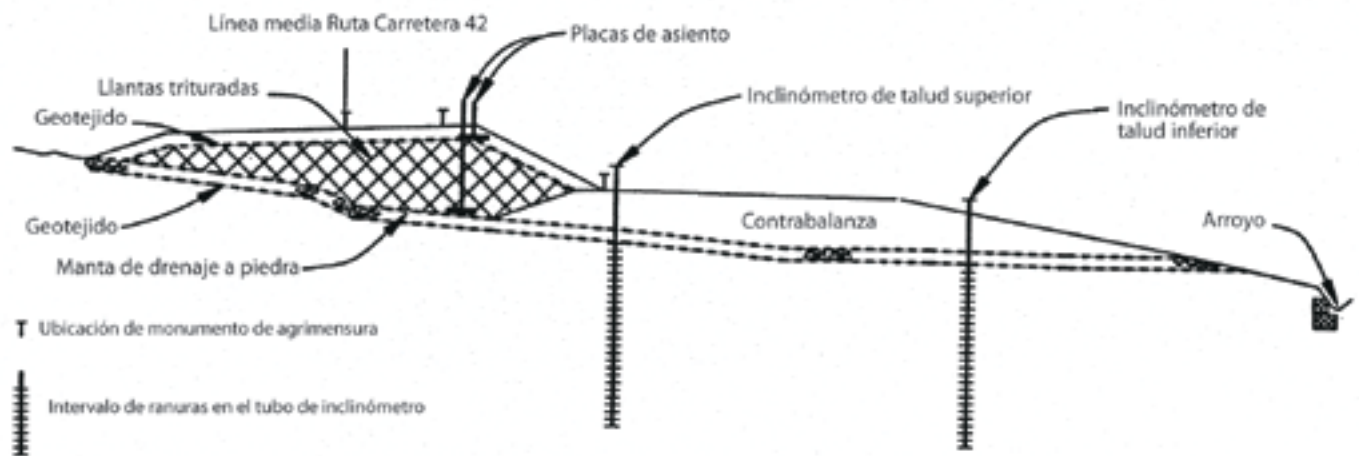


Figura 5-5. Corte transversal de la prueba de campo de llantas trituradas en Oregon (Ref. 47)



paneles hacia el exterior sobre sus bases se controló usando gatos mecánicos. Se usaron bloques de concreto para aplicar sobrecargas de hasta 35.9 kPa (750 psf). En las Figuras 5-6 y 5-7 se muestra el diseño de la instalación.

### Propiedades del ADL

Se analizó ADL de tres proveedores distintos. El ADL de Pine State y Palmer era largo y plano, con muchas bandas de acero expuestas, mientras que el ADL de F&B era equidimensional, con pocas bandas de acero expuestas. El ADL se niveló uniformemente, y consistía principalmente en partículas como la grava. La gradación del ADL mostró que el de F&B era el más pequeño, siendo su tamaño máximo de 38 mm (1.5 pulgadas), mientras que el tamaño máximo del ADL de Pine State y Palmer era de 76 mm (3 pulgadas). El ADL se aplicó en vaciados de 200 mm (8 pulgadas) y se compactó con cuatro pasadas de una apisonadora manual con un peso estático de 1,180 kg (2,600 libras). Se midió la densidad de campo compactando un vaciado de trozos de llanta en una caja de 3.05 m (10 pies) de longitud por 1.02 m (3.3 pies) de anchura. La densidad de campo promedio según las cinco pruebas fue de 0.71 Mg/m<sup>3</sup> (44.3 pcf) en el caso de F&B, 0.69 Mg/m<sup>3</sup> (43.1 pcf) en el de Palmer, y 0.71 Mg/m<sup>3</sup> (44.3 pcf) para Pine State.

### Tensión horizontal en reposo

La distribución de la tensión horizontal se calculó usando las medidas de las celdas de carga, sumando las fuerzas de momento de la base del panel y suponiendo que la distribución era trapezoidal. La distribución de la tensión horizontal del ADL de todos los proveedores fue similar. En la Figura 5-8 se muestra un trazo típico con ADL Palmer. Esta figura muestra también los incrementos de tensión horizontal a medida que aumenta la sobrecarga. En los niveles bajos de sobrecarga, la tensión horizontal aumenta con la profundidad, pero se mantiene casi constante con la profundidad en los niveles más altos de sobrecarga.

Se compararon las distribuciones de la tensión horizontal de los trozos de llanta triturada y el relleno granulado de menos de 35.9 kPa (750 psf) de sobrecarga. Como parte del estudio se analizó en la obra un relleno granulado; sin embargo, éste era gravilla fina bien nivelada. Se colocó cerca del contenido óptimo de agua y por lo tanto, mostró una considerable cohesión aparente, la cual se puso de manifiesto al quedar en pie el relleno granulado sobre una fachada vertical de 4.57 m (15 pies) de altura cuando se retiró la pared del fondo. La cohesión aparente hizo que los valores de la tensión horizontal no fueran valores realistas. Por lo tanto, las distribuciones con sobrecarga de

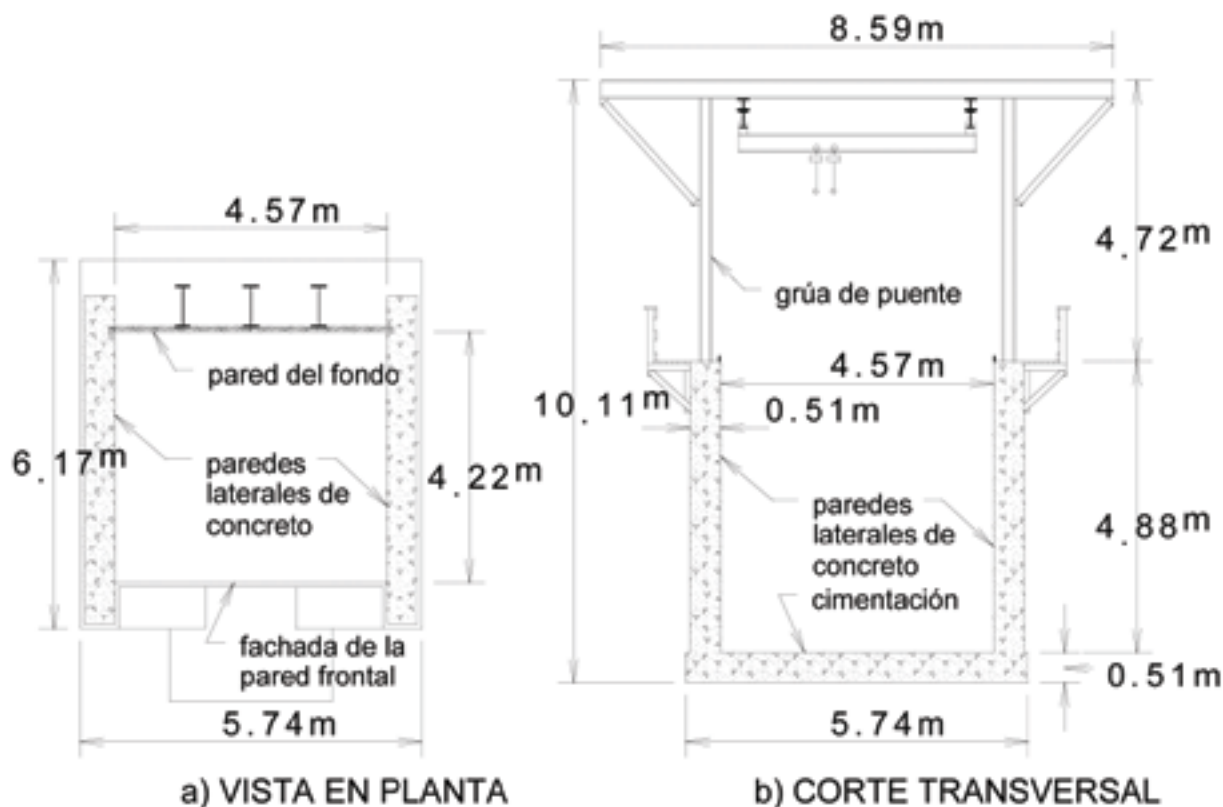


Figura 5-6. Planta y corte transversal de un muro de contención de tamaño natural

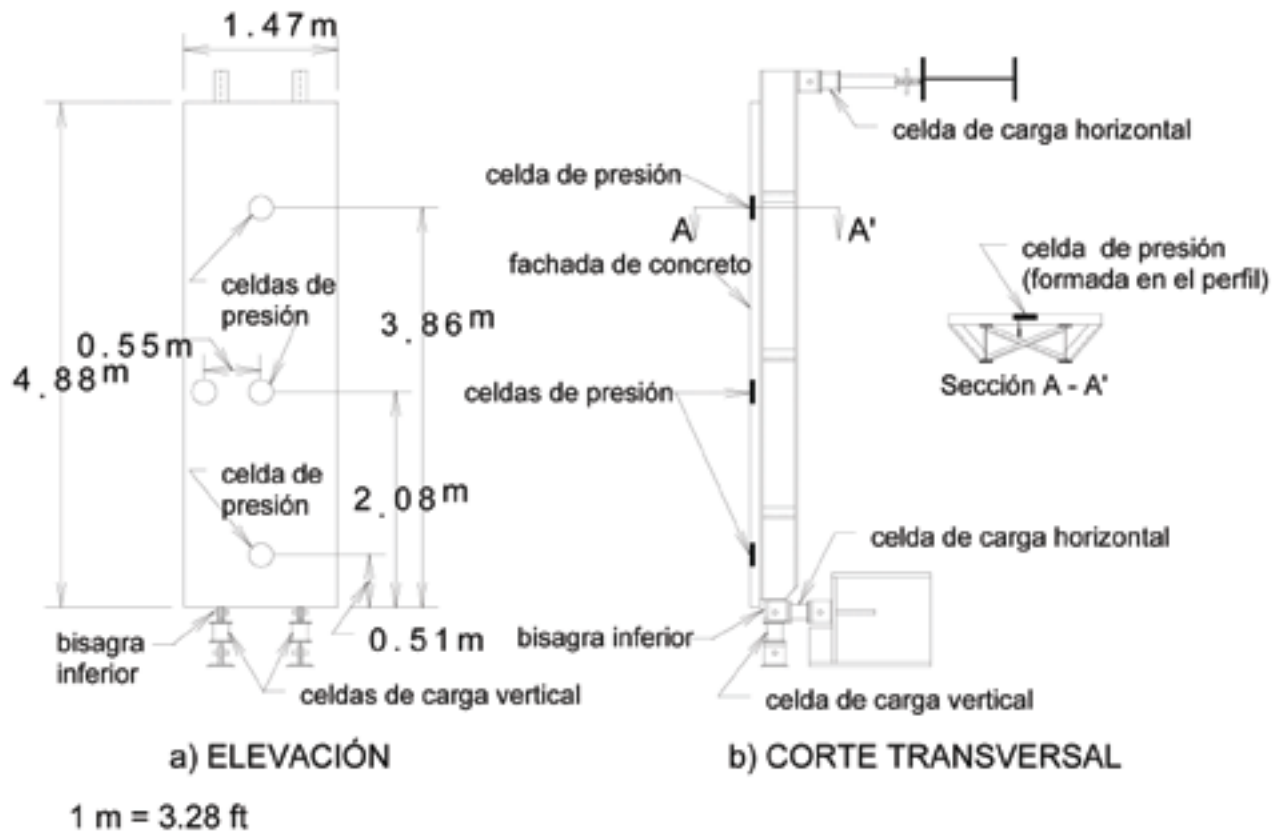


Figura 5-7. Alzado y corte transversal del panel central de la pared frontal

35.9 kPa (750 psf) de cada uno de los proveedores se compararon con la distribución de la tensión horizontal prevista para un relleno granulado típico con una densidad compactada de 2.02 Mg/m<sup>3</sup> (126 psf) y un coeficiente de presión lateral de tierra en reposo ( $K_o$ ) de 0.38, como se muestra en la Figura

5-9. El resultado de la tensión horizontal de los trozos de llanta es aproximadamente 45 menos que la del relleno granulado. Esta diferencia es consecuencia, al menos en parte, de la densidad de los trozos de llanta, que es entre una tercera parte y una mitad de la del relleno granulado convencional.

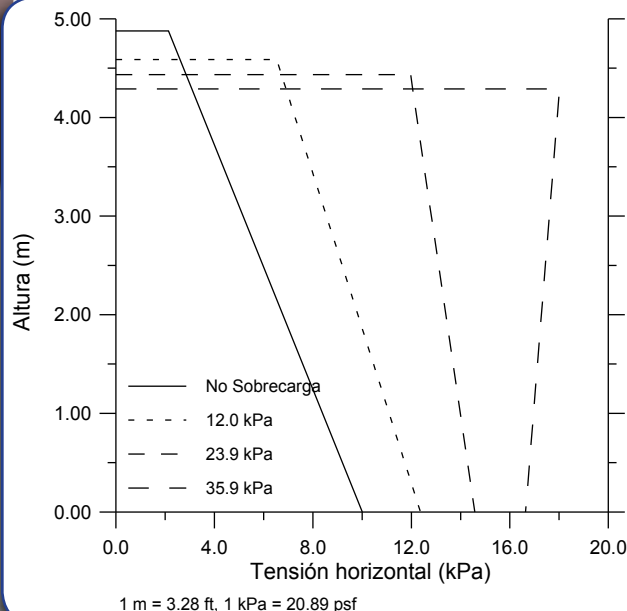


Figura 5-8. Distribución de la tensión en reposo de relleno Palmer con cuatro sobrecargas.

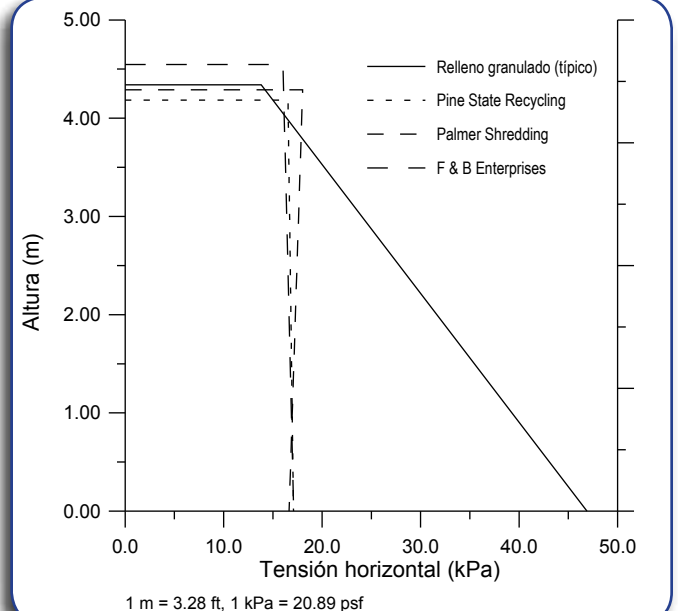


Figura 5-9. Distribución de la tensión en reposo con sobrecarga de 35.9 kPa comparada con el relleno granulado

**Cuadro 5-2. Coeficiente de presión lateral de tierra en reposo,  $K_0$**

Proveedor	Profundidad (m)	Sobrecarga			
		0	12.0 kPa	23.9 kPa	35.9 kPa
F&B Enterprises	0	0.99a	0.51	0.44	0.45
	2	0.39	0.33	0.32	0.32
	4	0.31	0.28	0.26	0.25
Palmer Shredding	0	0.94a	0.58	0.51	0.51
	2	0.37	0.33	0.27	0.33
	4	0.29	0.27	0.17	0.24
Pine State Recycling	0	0.93a	0.55	0.46	0.47
	2	0.37	0.32	0.32	0.32
	4	0.28	0.26	0.26	0.25
Promedio	0	0.95a	0.55	0.47b	0.47b
	2	0.38	0.33	0.31b	0.31b
	4	0.29	0.27	0.24b	0.24b

<sup>a</sup>Valor encontrado a una profundidad de 0.5 m (1.6 pies)

<sup>b</sup>Promedio de sobrecargas de 23.9 kPa (500 psf) y 35.9 kPa (750 psf)

Se calculó el coeficiente de la presión lateral de tierra en reposo del ADL. En el caso de no haber sobrecarga,  $K_0$  se calculó justo debajo de la superficie del relleno, ya que la tensión vertical en la superficie es de cero, por lo cual  $K_0$  no se define. Los valores de  $K_0$  se resumen en el Cuadro 5-2, el cual muestra que el coeficiente de presión lateral de tierra en reposo disminuye con la profundidad en las cuatro condiciones de carga. Si no hay sobrecarga, los valores de  $K_0$  también disminuyen a 23.9 kPa (500 psf). Luego  $K_0$  permaneció más o menos constante, entre 23.9 y 35.9 kPa (500 a 700 psf). Las diferencias de  $K_0$  de los distintos proveedores con una misma sobrecarga y profundidad son leves. La comparación de  $K_0$  en el ADL que se aparece en el Cuadro 5-2 con un  $K_0$  típico de 0.35 a 0.50 (Ref. 14) para suelos granulados consolidados normalmente muestra que para el ADL,  $K_0$  es más bajo en profundidades de 2.0 m (6.6 pies) y 4.0 m (13.1 pies). Esta comparación también sugiere que las presiones más bajas en reposo producidas por el ADL son consecuencia tanto de su  $K_0$  más bajo, como de su menor densidad.

### Presión activa de tierra

Después de terminar de tomar las mediciones de las condiciones en reposo, el muro se giró hacia afuera para alcanzar presiones activas de tierra. En el caso de todos los proveedores, las distribuciones de la tensión horizontal con la misma rotación del muro fueron similares. La Figura 5-10 muestra las distribuciones de la tensión horizontal inmediatamente después de cada rotación del muro en el caso del ADL Palmer, con una sobrecarga aplicada de 35.9 kPa (750 psf). Antes de la rotación, la tensión horizontal disminuye levemente con la profundidad; luego, cuando el muro se gira después de estar en reposo a 0.01H (H es el factor de rotación como función de la altura del muro), la tensión horizontal se reduce considerablemente en la parte superior. A una rotación de 0.01H, la magnitud

de la fuerza horizontal resultante fue 50 por ciento menor que antes de la rotación. En el caso de F&B y Pine State se midieron reducciones similares en la tensión horizontal. La tensión horizontal del ADL con una rotación de 0.01H se comparó con la del relleno granulado típico con una densidad compactada ( $\rho$ ) de 2.02 Mg/m<sup>3</sup> (126 pcf) y un coeficiente de presión lateral de tierra en reposo ( $K_a$ ) de 0.24, como se indica en la Figura 5-11. La fuerza horizontal resultante del ADL fue aproximadamente 35 por ciento menor que la del relleno granulado.

Se calculó el coeficiente de presión de tierra ( $K$ ) de cada proveedor de ADL con una rotación de 0.01H y con las rotaciones mayores para Palmer y Pine State, a profundidades de 2.0 m y 4.0 m. Los resultados aparecen en el Cuadro 5-3. Se observa que con una rotación de 0.01H,  $K$  es similar en los tres proveedores en todas las profundidades, con valores que oscilan entre 0.22 y 0.25 kPa. Con rotaciones mayores,  $K$  varía entre 0.16 y 0.18 kPa, con una rotación de 0.03H para Palmer y de 0.08 a 0.12 kPa con una rotación de 0.04H para Pine State. Estos valores sugieren que  $K$  disminuye con el movimiento hacia afuera. La Figura 5-12 muestra que el efecto de la rotación del muro sobre  $K$  es mayor cuanto menos profundidad haya. Además, la reducción en  $K$  es leve en rotaciones mayores a 0.01H, lo cual sugiere que los valores de  $K$  reportados se acercaban a los valores mínimos que coinciden con la definición de condiciones activas. Un enfoque razonable para el diseño sería usar  $K$  para una rotación de 0.01H. Por lo tanto, una  $K$  de diseño de 0.25 kPa sería razonable y un tanto conservadora en comparación con los valores del Cuadro 5 para condiciones similares a las de esta prueba.

Se desarrolló un enfoque de diseño simplificado con base en la presión de fluidos equivalente. Los parámetros

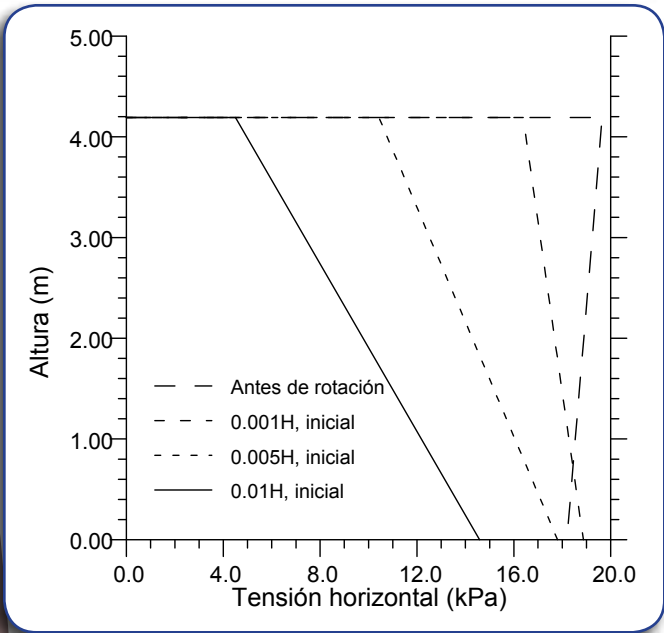


Figura 5-10. Distribución de la tensión en trozos Palmer con una rotación del muro de cero a 0.01H

del diseño semi-empírico se desarrollaron siguiendo los métodos para suelos presentados por Terzaghi y otros (Ref. 42). El parámetro fundamental es un valor semi-empírico,  $kh$ , con unidades de peso por volumen unitario. El método se puede concebir como el reemplazo del relleno con un fluido de densidad  $kh$ . El valor de  $kh$  se puede entonces usar para calcular la tensión horizontal, usando:

$$\sigma_h = gkh d \quad (\text{Eq. 1})$$

en donde  $g$  es la gravedad, 9.81 metros/segundo<sup>2</sup> (m/s<sup>2</sup>), y  $d$  es la profundidad del relleno, como se indica en la Figura 5-13<sup>a</sup>. En los casos en los que se aplica una sobrecarga y la superficie del relleno es horizontal, la tensión horizontal en cualquier profundidad aumenta en la siguiente cantidad:

$$p_q = Cq \quad (\text{Eq. 2})$$

en donde  $C$  es un coeficiente que depende del tipo de relleno, y  $q$  es la sobrecarga en unidades de carga

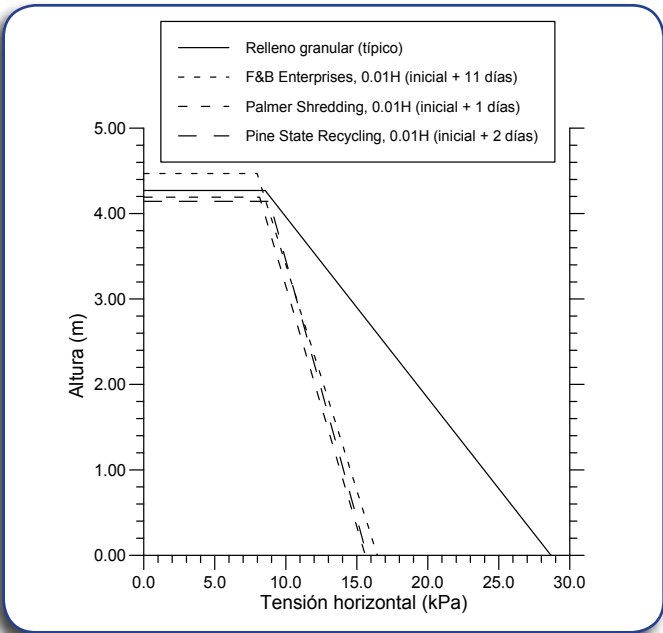


Figura 5-11. Tensión con una sobrecarga de 35.9 kPa y una rotación de 0.01H, comparada con el relleno granulado

por área unitaria. La combinación de la tensión causada por el relleno y la sobrecarga produce una distribución



Ejemplo de muro de retención hecho de llantas enteras. Foto cortesía de la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tecate

Cuadro 5-3. Coeficiente de presión de tierra,  $K$  para rotación

Proveedor	Profundidad (m)	Rotación		
		0.01H	0.03H	0.04H
F&B Enterprises	0	0.23	--	--
	2	0.23	--	--
	4	0.23	--	--
Palmer Shredding	0	0.23	0.18	--
	2	0.22	0.17	--
	4	0.22	0.16	--
Pine State Recycling	0	0.25	--	0.08
	2	0.23	--	0.11
	4	0.22	--	0.12



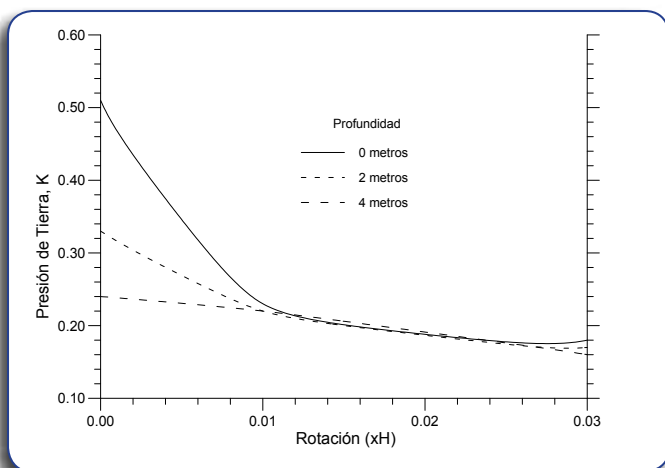


Figura 5-12. Efecto de la rotación sobre el coeficiente de presión de tierra con sobrecarga de 35.9 kPa (750 psf).



Muro de llantas enteras para evitar la erosión del suelo.  
Foto cortesía de la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tecate

#### Cuadro 5-4. Parámetros para el diseño semi-empírico con una rotación de 0.01H

Proveedor	$k_h$ (mg/m <sup>3</sup> )	C
F&B Enterprises	0.19	0.22
Palmer Shredding	0.18	0.23
Pine State Recycling	0.17	0.25

trapezoidal, como se muestra en la Figura 5-13b. Los valores de  $k_h$  y C se encontraron dividiendo las distribuciones del trapecoide determinadas por las celdas de carga en dos partes, como se indica en la Figura 5-13c. La contribución de la tensión horizontal de los trozos de llanta se consideró como la parte triangular de la distribución, indicada como  $\sigma_{\text{trozos de llanta}}$ . El resto de la tensión horizontal se asignó a la  $\sigma_{\text{sobrecarga}}$ . El Cuadro 5-4 muestra los resultados para una rotación de 0.01H. En vista de lo anterior, sería razonable usar un  $k_h = 0.18 \text{ Mg/m}^3$  (11 pcf) y  $C = 0.23$

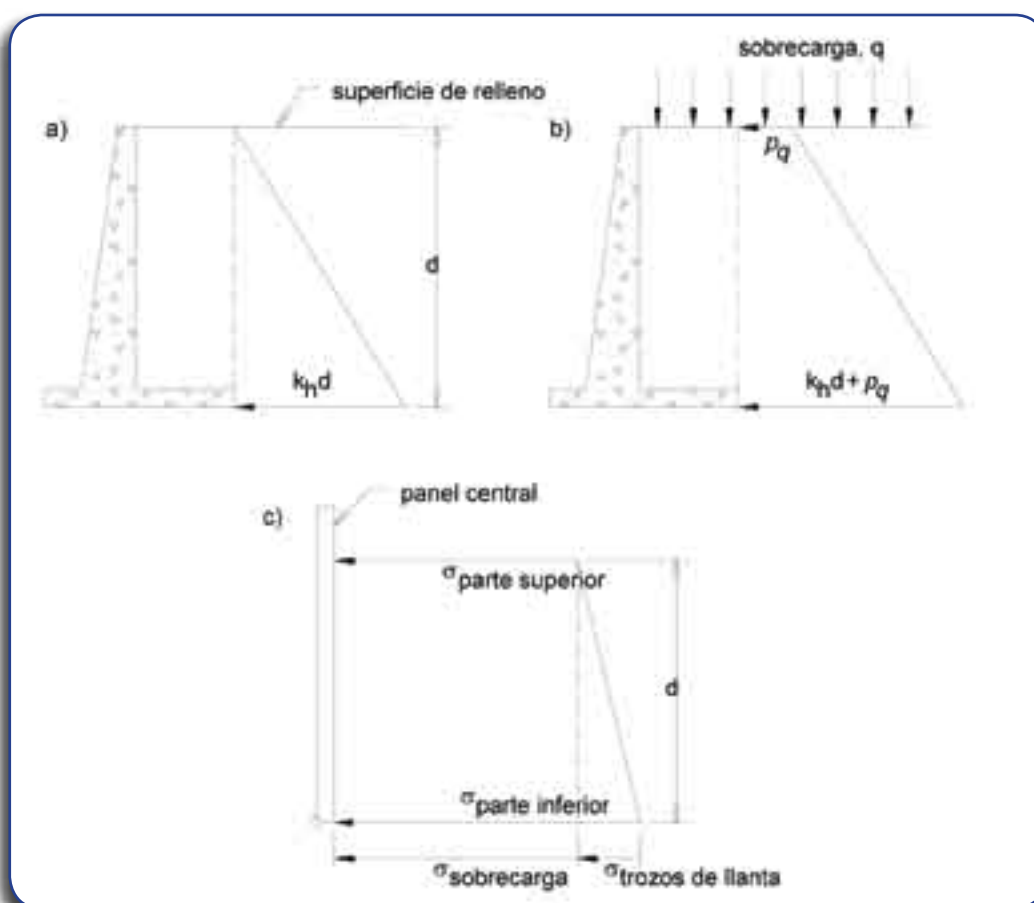


Figura 5-13. Procedimiento de diseño semi-empírico: (a) sin sobrecarga, (b) con sobrecarga, (c) separación del efecto de la sobrecarga y los trozos de llanta



*Ejemplo de la erosión que puede presentarse con las condiciones en el norte de México. Foto Cortesía de la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tecate*

para un diseño con condiciones similares a las de este estudio. Para fines de comparación, cabe mencionar que el kh del relleno granulado es de alrededor de 0.5 Mg/m<sup>3</sup> (31 pcf) (Ref. 42).

### El uso de llantas de desecho como método para el control de erosión en México

En un estudio realizado por el El Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey se analizó la eficiencia de las llantas de desecho usadas en taludes con condiciones de vegetación muy deficientes, en donde la erosión representaba un problema. Al medir el sedimento erosionado de los taludes con y sin llantas de desecho, se encontró una reducción de un 82 por ciento en la erosión de los taludes en los que se usó el sistema propuesto de llantas de desecho entrelazadas cubriendo el talud. También se descubrió que las llantas ayudan a retener la humedad y fomentan el desarrollo de vegetación en el talud, reduciendo aún más la erosión. Se observó el crecimiento de pasto silvestre en el 85 por ciento de la zona del análisis cubierta por llantas, en comparación con un porcentaje de crecimiento de apenas el 10 por ciento en otras zonas. El instituto concluyó que no había pruebas de que el uso de las llantas provocara un incremento en los mosquitos, que hubo una reducción general de los costos de mantenimiento y cierre en las zonas a consecuencia de la erosión, y que a la fecha del estudio (2006) todo el sistema podría implementarse con unos \$11.6 pesos (\$0.90 en dólares estadounidenses) por cada llanta per tire. Para más información al respecto comuníquese con el Dr. Martin H. Bremer, Profesor Investigador en Sistemas Geoambientales en mbremer@itesm.mx.

## LLANTAS ENTERAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MUROS

Las llantas enteras se pueden usar para construir muros bajos de contención (Refs. 6, 35, 39, 50), a lo largo de los taludes como método para el control de la erosión, o para contención de humedales. En la Figura 5-14 (Ref. 6) se muestra uno de los sistemas de construcción propuestos por el Departamento de Transporte de California, aunque existen muchos otros métodos de construcción hoy en día. Las llantas se llenan con tierra compactada, y en cada capa se unen con broches de metal hechos de varilla de refuerzo. Las capas colindantes se conectan entre sí introduciendo postes delineadores de metal reciclado a la tierra compactada. La erosión es un problema importante en gran parte del norte de México, ya que el clima árido no promueve el crecimiento de la vegetación y los elevados perfiles crean condiciones óptimas para la erosión. La erosión en zonas densamente pobladas puede ser peligrosa y su control puede resultar costoso. Asimismo, puede provocar el cierre de vialidades y elevados costos de mantenimiento, así como afectar las viviendas construidas sobre pendientes erosionadas o cerca de ellas. Se ha demostrado que el uso de llantas de desecho resulta efectivo para controlar la erosión y puede constituir una solución de bajo costo que fomenta el reuso de las llantas de desecho en la zona que las genera.

## REFERENCIAS

1. Ad Hoc Civil Engineering Committee. 1997. "Design Guidelines to Minimize Internal Heating of Tire Shred Fills." Scrap Tire Management Council, Washington, DC. 4 pp.
2. Ahmed, I. 1993. "Laboratory Study on Properties of Rubber Soils," Report No. FHWA/IN/JHRP-93/4, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
3. ASTM International. 1998. "Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications." ASTM D6270-98, ASTM International. W. Conshohocken, Pennsylvania.
4. Bosscher, P.J., Edil, T.B., and Eldin, N.N. 1993. "Construction and Performance of a Shredded Waste Tire Test Embankment." Transportation Research Record 1345, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 44-52.
5. Brophy, M. and Graney, J. 2004. "Groundwater Effects from Highway Tire Shred Use." Environmental Forensics, Vol. 5, No. 2, Junio de 2004, pp. 79-84.
6. Caltrans. 1988. "The Use of Discarded Tires in Highway Maintenance." Translab Design Information Brochure No. TI/REC/1/88, California Department of Transportation, Sacramento, California.
7. Day, R.W. 2006. Foundation Engineering Handbook, McGraw-Hill, New York. p. 7.30.
8. Dickson, T.H., Dwyer, D.F., and Humphrey, D.N. 2001. "Prototype Tire Shred Embankment Construction by

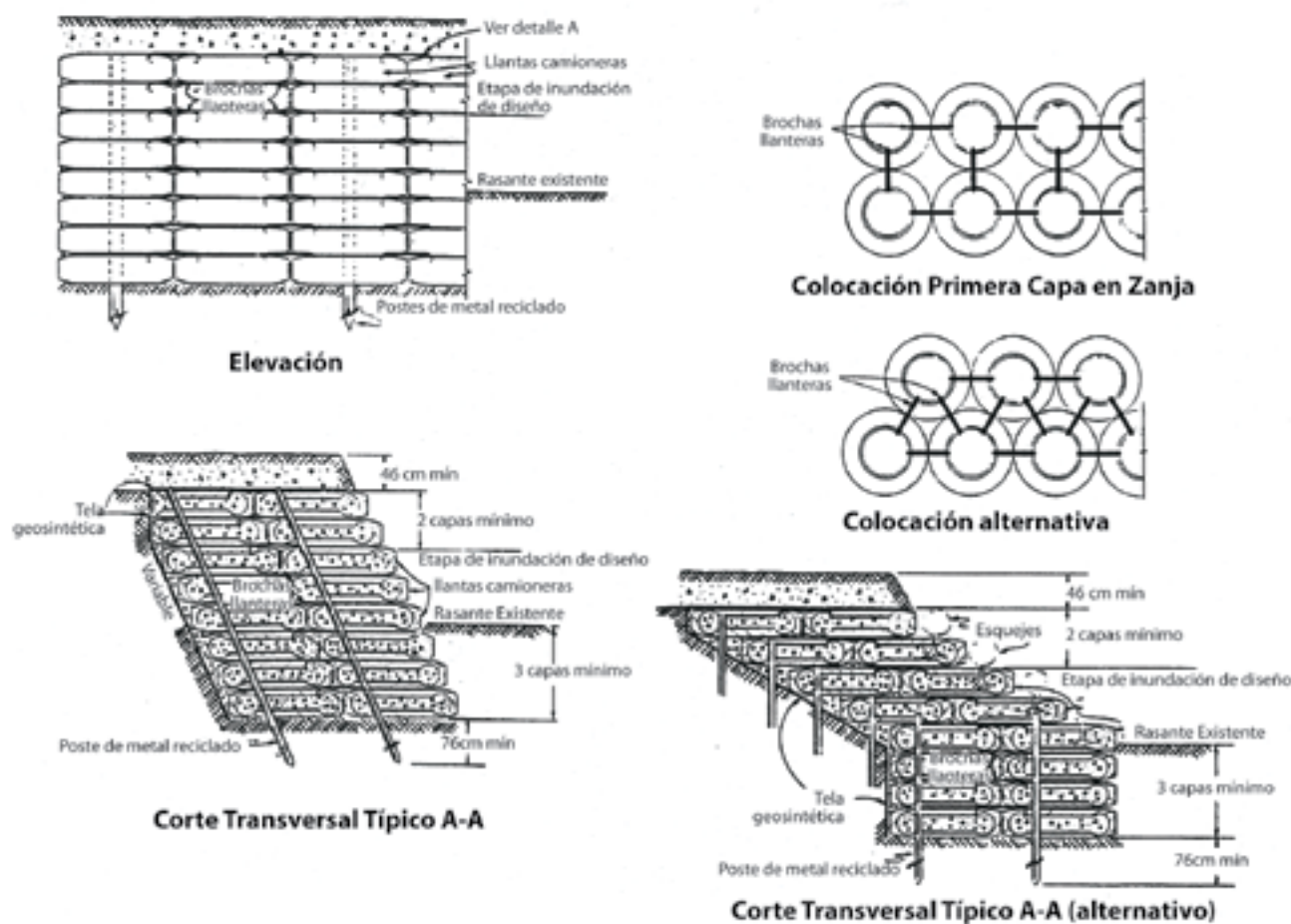


Figura 5-14. Sistema de muros de retención contruidos con llantas enteras (Ref. 6)

- the New York State Department of Transportation." Transportation Research Record No. 1755, Transportation Research Board, Washington, D.C. pp. 160-167.
9. Eldin, N.N. and Senouci, A.B. 1992. "Use of Scrap Tires in Road Construction." Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 118, No. 3. Septiembre. pp. 561-576.
  10. Exponent. 2003. "Tire Shred Leachate Study: Chemical Composition and Aquatic Toxicity for Above- and Below-Water-Table Applications." Exponent, Oakland, California. 26 pp. + Apéndices
  11. GeoSyntec. 1998a. "Guidance Manual - Tire Shreds as Cover Foundation, Leachate Drainage, and Operations Layer Material at Municipal Solid Waste Landfills." Elaborado para California Integrated Waste Management Board.
  12. GeoSyntec. 1998b. "Tire Shreds as Leachate Drainage Material aMunicipal Solid Waste Landfills." Elaborado para California Integrated Waste Management Board.
  13. GeoSyntec. 1998c. "Guidance Manual - Shredded Tires as Gas Collection Material at Municipal Solid Waste Landfills." Elaborado para California Integrated Waste Management Board.
  14. Holtz, R.D., and Kovacs, W.D. 1981. An Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 733 pp.
  15. Hoppe, E.J. 1998. "Field Study of Shredded-Tire Embankment." Transportation Research Record No. 1619. Transportation Research Board, Washington, D.C. pp. 47-54.
  16. Hoppe, E.J. and Mullen, W.G. 2004. "Field Study of a Shredded-Tire Embankment in Virginia - Final Report." Report No. VTRC 04-R20. Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, Virginia. 52 pp.
  17. Humphrey, D.N. 1996. "Investigation of Exothermic Reaction in Tire Shred Fill Located on SR 100 in Ilwaco, Washington." Elaborado para Federal Highways Administration, Washington, D.C. 60 pp.
  18. Humphrey, D.N. 2004. "Effectiveness of Design Guidelines for use of Tire Derived Aggregate as Lightweight Embankment Fill." Recycled Materials in Geotechnics. ASCE, pp. 61-74.



19. Humphrey, D.N. . 2008. "Tire Derived Aggregate as Lightweight Fill for Embankments and Retaining Walls." Proceedings of the International Workshop on Scrap Tire Derived Geomaterials – Opportunities and Challenges, IW-TDGM 2007. Taylor and Francis/Balkema, Netherlands. pp. 59-81.
20. Humphrey, D.N., and Eaton, R.A. 1995. "Field Performance of Tire Chips as Subgrade Insulation for Rural Roads." Proceedings of the Sixth International Conference on Low-Volume Roads, Transportation Research Board, Washington, D.C. Vol. 2, pp. 77-86.
21. Humphrey, D.N., and Katz, L.E. 1995. "Water Quality Testing for Dingley Road Tire Chip Test Project." A report for the Town of Richmond, Maine, by Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maine, Orono, Maine. 35 pp.
22. Humphrey, D.N., and Katz, L.E. 2000. "Five-Year Field Study of the Effect of Tire shreds Placed above the Water Table on Groundwater Quality." Transportation Research Record No. 1714, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 18-24.
23. Humphrey, D.N., and Katz, L.E. 2001. "Field Study of the Water Quality Effects of Tire Shreds Placed Below the Water Table." Proceedings of the International Conference on Beneficial Use of Recycled Materials in Transportation Applications, 13 de noviembre, Arlington, VA, pp. 699-708.
24. Humphrey, D.N. and Manion, W.P. 1992. "Properties of Tire Chips for Lightweight Fill." Proceedings of Grouting, Soil Improvement, and Geosynthetics, New Orleans, Louisiana, Vol. 2, pp. 1344-1355.
25. Humphrey, D.N., and Nickels, W.L., Jr. 1997. "Effect of Tire Chips as Lightweight Fill on Pavement Performance." Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3, pp. 1617-1620.
26. Humphrey, D.N., and Swett, M. 2006. Literature Review of the Water Quality Effects of Tire Derived Aggregate and Rubber Modified Asphalt Pavement, elaborado para U.S. Environmental Protection Agency Recourse Conservation Challenge, por el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Maine, Orono, Maine, 60 pp.
27. Humphrey, D.N., Whetten, N., Weaver, J., Recker, K., and Cosgrove, T.A. 1998. "Tire TDA as Lightweight Fill for Embankments and Retaining Walls." Proceedings of the Conference on Recycled Materials in Geotechnical Applications, C. Vipulanandan and D. Elton, eds., ASCE, pp. 51-65.
28. Humphrey, D.N., Whetten, N., Weaver, J., and Recker, K. 2000. "Tire TDA as Lightweight Fill for Construction on Weak Marine Clay." Proceedings of the International Symposium on Coastal Geotechnical Engineering in Practice, Balkema, Rotterdam, pp. 611-616.
29. Jeremic, B., Putnam, J., Kallol, S. Humphrey, D., and Patenaude, S. 2004. "Calibration of Elastic-Plastic Material Model for Tire Shreds." Geotechnical Engineering for Transportation Projects: Proceedings of Geo-Trans 2004, ASCE, pp. 760-767.
30. Jesionek, K.S., Humphrey, D.N., and Dunn, R.J. 1998. "Overview of Shredded Tire Applications in Landfills." Proceedings of the Tire Industry Conference, Clemson University, 4-6 de marzo. 12 p.
31. Koerner, J.R., Soong T.-Y., and Koerner, R.M. 1998. "A Survey of Solid Waste Landfill Liner and Cover Systems: Part 1—USA States." GRI Report #21, GSI, Folsom, PA, 211 pp.
32. Lawrence, B.K., Chen, L.H., and Humphrey, D.N. 1998. "Use of Tire Chip/Soil Mixtures to Limit Frost Heave and Pavement Damage of Paved Roads." Estudio elaborado para New England Transportation Consortium, por el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Maine, Orono, Maine, 316 pp.
33. Manion, W.P., and Humphrey, D.N. 1992. "Use of Tire Chips as Lightweight and Conventional Embankment Fill, Phase I - Laboratory." Technical Paper 91-1, Technical Services Division, Maine Department of Transportation, Augusta, Maine.
34. Nickels, W.L., Jr. 1995. "The Effect of Tire Chips as Subgrade Fill on Paved Roads." M.S. Thesis, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Maine, Orono, Maine, 215 pp.
35. Nguyen, M.X. and Williams, J.A. 1989. "Implementation Package for Using Discarded Tires in Highway Maintenance." Report No. CA/TL-89/10, Office of Transportation Laboratory, California Department of Transportation, Sacramento, California.
36. Qian, X., Koerner, R.M., and Gray, D.H. 2002. Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey. 717 pp.
37. Recycling Research Institute. 2005. "Scrap Tire and Rubber Users Directory." 14th Edition, Recycling Research Institute, Leesburg, Virginia. 150 pp.
38. Reid, R.A., and Soupir, S.P. 1998. "Mitigation of Void Development Under Bridge Approach Slabs Using Rubber Tire Chips." Proceedings of the Conference on Recycled Materials in Geotechnical Applications. ASCE, pp. 37-50.
39. Richmond, R.L., and Jackura, K.A. 1984. "Field Performance of Experimental Tire Anchor Timber Wall." Report No. FHWA/CA/TL-84/16, Office of Transportation Laboratory, California Dept. of Transportation, Sacramento, California.



40. Sheehan, P.J., Warmerdam, J.M., Ogle, S., Humphrey, D.N., and Patenaude, S.M. 2006. "Evaluating the Toxicity of Leachate from Tire Shred Fill in Roads and the Risk to Aquatic Ecosystems." *Journal of Environmental Toxicology and Chemistry*. Vol. 25, No. 2, pp. 400-411.
41. Tanchaisawat, T., Bergado, D.T., and Voottipruex, P. 2008. "Numerical Simulation and Sensitivity Analyses of Full-Scale Test Embankment with Reinforced Lightweight Geomaterials on Soft Bangkok Clay." *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 26, No. 6. pp. 498-511.
42. Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., New York.
43. Tandon, V., Velazco, D.A., Nazarian, S., and Picornell, M. 2007. "Performance Monitoring of Embankments Containing Tire Chips: Case Study." *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 21, No. 3. pp. 207-214.
44. Tweedie, J.J., Humphrey, D.N., and Sandford, T.C. 1998a. "Full Scale Field Trials of Tire TDA as Lightweight Retaining Wall Backfill, At-Rest Conditions." *Transportation Research Record No. 1619*. TRB, Washington, D.C. pp. 64-71.
45. Tweedie, J.J., Humphrey, D.N., and Sandford, T.C. 1998b. "Tire TDA as Retaining Wall Backfill, Active Conditions." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE, Vol. 124, No. 11. pp. 1061-1070.
46. Tweedie, J.J., Humphrey, D.N., Wight, M.H., Shaw, D.E., and Stetson, J.H. 2004. "Old Town – Mud Point Inlet Bridge, Rehabilitation of a Timber Structure with Tire TDA." *Geotechnical Engineering for Transportation Projects: Proceedings of Geo-Trans 2004*. ASCE. pp. 740-749.
47. Upton, R.J., and Machan, G. 1993. "Use of Shredded Tires for Lightweight Fill." *Transportation Research Record No. 1422*. TRB, Washington, D.C. pp. 36-45.
48. White, E.E. 1962. "Unperpinning." Chapter 9 In: *Foundation Engineering*, G.A. Leonards, Ed., McGraw-Hill, New York. pp. 826 to 893.
49. Whetten, N., Weaver, J. Humphrey, D., and Sandford, T. 1997. "Rubber Meets the Road in Maine." *Civil Engineering*, Vol. 67, No. 9. Septiembre. pp. 60-63.
50. Williams, J. and Weaver, D. 1987. "Guidelines for Using Recycled Tire Carcasses." Report No. FHWA/CA/TL-87/07. Office of Transportation Laboratory, California Department of Transportation, Sacramento, California.
51. Wolfe, S.L., Humphrey, D.N., and Wetzel, E.A. 2004. "Development of Tire Shred Underlayment to Reduce Groundborne Vibration from LRT Track." *Geotechnical Engineering for Transportation Projects: Proceedings of Geo-Trans 2004*. ASCE. pp. 750-759.
52. Woods, K.B., Miles, R.D., and Lovell, C.W., Jr. 1962. "Origin, Formation, and Distribution of Soils in North America." Chapter 1 In: *Foundation Engineering*, G.A. Leonards, Ed., McGraw-Hill, New York, pp. 1-65.



# CAPÍTULO 6

## Aspectos económicos del transporte y procesamiento

Los capítulos anteriores se centraron en las principales aplicaciones o usos especializados para las llantas de desecho, ya que los mercados son los que definen los métodos de recolección y procesamiento que se requieren. La recolección puede ser a nivel local en el caso de mercados pequeños y cercanos, o regional si se trata de mercados de mayor escala con plantas de procesamiento centralizadas. Las llantas de desecho se pueden usar enteras o procesadas en piezas de diversos tamaños, desde trozos grandes para obras de ingeniería civil hasta hule finamente triturado, aunque el procesamiento de cada tamaño implica distintos requerimientos. Los sistemas de recolección y procesamiento naturalmente evolucionan junto con los mercados, pero la probabilidad de tener éxito con recursos limitados será mucho mayor si se definen desde el inicio las necesidades del mercado. En la siguiente sección se presenta un breve planteamiento de la recolección básica, el transporte y el procesamiento (incluyendo métodos, equipo, procesos y aspectos económicos) con el propósito de facilitar la evaluación de alternativas. Dicho planteamiento se basa en la experiencia histórica que ha habido en los Estados Unidos, pero los factores económicos se han convertido en factores económicos comparables en México para hacerlos más apegados al mercado que se proyecta y a la estructura económica de este país, a fin de incrementar su utilidad. Asimismo, cabe mencionar que la presente sección se basa en costos vigentes en el 2008.

### RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE

La recolección y el transporte de las llantas de desecho son componentes fundamentales para el uso efectivo de las llantas como recurso, aunque con frecuencia se subestima el impacto que tiene una recolección eficiente en la viabilidad económica de las alternativas de gestión. El transporte evolucionará con el programa de gestión. De no existir regulaciones y que rijan la disposición de las llantas o de no aplicarse éstas, los altos costos del transporte fomentarán la tira clandestina en los lugares más cercanos, especialmente en el caso de los vehículos recolectores pequeños, como las camionetas pick up. Los vehículos pequeños generalmente constituyen el mayor riesgo en lo que respecta a la tira clandestina de llantas en los Estados Unidos. Sin embargo, una vez que exista una normatividad y ésta se aplique, la presión de la competencia nos forzará a hacer uso de métodos de recolección y vehículos eficientes, redundando también en el fracaso de los transportistas ineficientes.

### Métodos

Las llantas de desecho normalmente se generan en lugares donde se instalan repuestos, como en las tiendas de llantas, las agencias de automóviles y los talleres de reparación. Las llantas son una corriente de desechos que se segrega de manera natural, a menos que se mezclen intencionalmente con otro tipo de desechos. En los Estados Unidos, generalmente las personas o empresas que se especializan en la recolección de llantas las recogen por separado, sin que se contaminen con otros materiales; a las llantas se les quita la cubierta o carcasa para revenderla y el resto se envía para su disposición a centros de procesamiento o rellenos sanitarios, siempre que existan normas, sanciones y mecanismos de aplicación de la normatividad. De lo contrario, las llantas restantes con frecuencia se tiran o se amontonan, ya que estas dos son las opciones para disposición menos costosas.

La recolección de llantas se puede hacer con una frecuencia programada o según sea necesario. La recolección generalmente la cubren camiones que recorren rutas trazadas y con una frecuencia establecida. El chofer, un auxiliar o el personal de la tienda que genera el desecho son quienes cargan las llantas, las cuales se cuentan durante el proceso de carga para generar una factura. En el caso de tiendas con un índice de generación pequeño o variable, la recolección se puede solicitar como se vaya necesitando, en lugar de hacerla de manera programada. El costo de este tipo de recolección generalmente se basa en el número de llantas, la distancia recorrida, y otros factores.

Generalmente en las tiendas que manejan grandes volúmenes y cuentan con espacio se colocan cajas de remolque que los empleados cargan y cierran con candado para evitar el vandalismo, la tira clandestina y los incendios intencionales. Cuando el remolque se llena, la tienda le avisa al recolector y éste entrega una caja vacía al mismo tiempo que recoge la anterior. A la tienda generalmente se le cobra una cuota fija basada en la distancia, la frecuencia de recolección, la cantidad de carcassas clasificables y otros factores que pueden afectar los costos. En ocasiones se usan contenedores y botes, pero la capacidad limitada y la ineficiencia en el transporte de este tipo de recipientes hace que sean alternativas costosas. En todos los casos, al transportista le paga la tienda o el gobierno por llevar las llantas a un sitio para disposición, según los requerimientos del programa de gestión de llantas de desecho vigente en el área.



*Camión con caja cerrada para transporte  
Foto cortesía de Tire Recycling and Disposal, Inc.*

## Equipo

Para transportar llantas se ha usado una gran variedad de vehículos, desde carretillas hasta tractocamiones diesel. A continuación se describen los tipos de vehículos utilizados más comúnmente.

### Camionetas pick up

Las camionetas pick-up son un vehículo común en el que se pueden transportar muchos materiales, incluyendo llantas de desecho. La capacidad de carga de las camionetas de tamaño normal oscila entre 450 y 900 kg (1,000 a 2,000 libras), dependiendo del modelo y la condición del vehículo. Si se intercalan o apilan bien, en la caja puede caber el equivalente a unas 50 llantas para automóvil (10 llantas para camión mediano). Esta cantidad de llantas pesa aproximadamente 1,000 libras, que es la capacidad normal de carga una camioneta de media tonelada (a veces llamada Clase 150) en buenas condiciones. Si la camioneta tiene suficiente capacidad de carga, se le puede adaptar una jaula de metal para poder transportar un mayor volumen. Algunas camionetas de 0.7 toneladas métricas y 0.9 toneladas métricas (denominadas Clase 250 y Clase 350) pueden cargar 900 kg (2,000 libras) o más. Para optimizar la capacidad se puede usar un remolque tipo jaula, ya que la mayoría de las camionetas pick up pueden jalar más peso aún del que pueden cargar en la caja. La capacidad de remolque generalmente varía entre 2,250 y 4,550 kg (5,000 a 10,000 libras), lo cual representa de 250 a 500 llantas para automóvil. Dado que a la mayoría de los remolques no les caben tantas llantas, el volumen de la caja generalmente es el que determina la capacidad de remolque.

### Camiones con caja cerrada

Los camiones con caja cerrada comúnmente se usan para la recolección de llantas de desecho a nivel local. En ellos caben hasta 400 llantas para automóvil si se intercalan bien apretadas. En las fotografías a la derecha se muestran ejemplos de un camión cerrado y una buena técnica de intercalado.

El chofer generalmente recorre una ruta designada y se detiene a cargar llantas en los establecimientos de los

clientes regulares o de quienes soliciten el servicio a un coordinador. Con menos frecuencia se han usado como alternativas para el transporte vagonetas de carga o jaulas abiertas sobre camiones de plataforma.

### Tractocamiones

Los tractocamiones con remolque tradicionalmente se usan para la recolección y el transporte de grandes volúmenes. La capacidad para transportar llantas completas está limitada por el volumen, el cual depende del tamaño de la caja de remolque, el tipo de llantas, los métodos de carga y la contaminación. La capacidad varía de 500 a 750 llantas en los camiones con doble remolque de 27 pies de longitud, hasta más de 1,500 llantas intercaladas en cajas de remolque de 52 pies de longitud. El procesamiento reduce el volumen de las llantas en un factor de 2-5, de manera que los cargamentos de llantas procesadas normalmente están limitados por el peso máximo reglamentario, no por el volumen. Los límites normales de carga útil en los Estados Unidos son de 22 a 26 toneladas cortas (equivalentes a unas 2,200 a 2,600 llantas para automóvil), calculando el límite total de peso menos el peso del tractor y la caja vacía. Con los tractocamiones de doble remolque se incrementa la capacidad para transportar llantas en trayectos largos cuando la normatividad así lo permite.

## Aspectos económicos de la recolección y el transporte

La recolección y el transporte se pueden hacer en cualquier vehículo disponible, pero la experiencia y la naturaleza competitiva de este negocio han llevado a los operadores a evaluar cuál es el equipo óptimo para distintos propósitos específicos. Para ilustrar las diferencias se calcularon los costos de inversión y de operación relacionados con la recolección y el transporte de llantas en un trayecto de 30,000 millas por año con cada tipo de equipo. Dado que los costos varían considerablemente conforme al tiempo y el lugar, esta información únicamente sirve para fines comparativos o como base para realizar cálculos considerando las condiciones económicas locales. En el ejemplo se supone la compra de equipo usado en buen estado, así como el



*Técnica correcta de intercalado para el transporte de llantas  
Foto cortesía de Tire Recycling and Disposal, Inc.*



costo de mano de obra, mantenimiento y combustible en algunas áreas de los Estados Unidos. En el cálculo de los costos fijos se consideró el costo de los seguros, la depreciación y un rendimiento anual del 20 por ciento en la inversión, pero no se incluyó el interés sobre líneas de crédito. En el Apéndice H se incluyen como referencia los aspectos económicos iniciales basados en valores estadounidenses para zonas fronterizas. Asimismo, en el Apéndice H se incluye la versión en español de estos aspectos económicos ajustados para reflejar la situación económica en México.

Se calcularon los costos de inversión y operativos de una camioneta pick up, una camioneta pick up con remolque tipo jaula, un camión cerrado, y un tractocamión diesel con remolque de 48 pies de longitud. Con el fin de simplificar los cálculos, se supuso que el vehículo promedia 48.28 km/hora (30 mph) y se consideró tiempo para cargar llantas en el camino. Los costos se calcularon como costo/km y luego se redujeron a costo/km/llanta a fin de reflejar de manera más precisa las condiciones económicas por volumen. En el Apéndice F al final de este capítulo se presentan los datos correspondientes.

La Figura 6-1 presenta un resumen de los costos de inversión y operativos (\$/milla) de cada una de estas alternativas. Como es de esperarse, ambos costos se incrementan según el tamaño del vehículo. Sin embargo, el costo/milla/llanta es un mejor indicador de la eficiencia de transporte que el costo/milla. Para fines comparativos, en la Figura 6-2 se presenta el costo/llanta para trayectos de 25, 100 y 500 millas, con base también en los datos que se muestran en el Apéndice F. El costo/llanta de las camionetas pick up es ya en sí elevado, incluso en trayectos cortos, pero resulta prohibitivo en el caso de recorridos más largos. Un remolque tipo jaula incrementa la capacidad y la eficiencia, pero su rango de servicio es generalmente de 100 a 150 millas. Los camiones cerrados son un poco más eficientes, pero normalmente se usan para trayectos de menos de 200 millas. Los tractocamiones son la opción más eficiente cuando se trata de distancias largas. Los remolques más largos (52 pies) o los dobles remolques de 27 pies de longitud son más eficientes si las vialidades y la normatividad los permiten.

En estos cálculos también se supone que el vehículo se llena durante el viaje, de lo contrario, el costo/llanta se incrementaría, por lo que en esos casos podría resultar mejor usar un vehículo más pequeño. En algunos casos podría ser más eficiente establecer un punto de acopio en una localidad o una zona donde se puedan acumular las llantas para luego transportarlas en vehículos más grandes hacia centros de procesamiento o mercados regionales.

## PROCESAMIENTO

En los vehículos las llantas tienen que resistir impactos y altas velocidades, incluso a temperaturas bajo cero y de calor desértico. La flexibilidad del hule, combinada con la fuerza y la abrasividad del acero de refuerzo, hacen que

procesar llantas para otras aplicaciones sea un verdadero reto. En la siguiente sección se presenta el procesamiento básico de las llantas y sus aspectos económicos, a manera de marco de referencia genérico para la realización de evaluaciones individuales.

El procesamiento de las llantas de desecho comprende una amplia gama de métodos y equipo. Esta exposición se centra en los grandes mercados en los que se utilizan llantas enteras y trituradas, desde agregado derivado de llantas Tipo B (ADL) (Consulte la sección sobre el agregado derivado de llantas Tipo B en el Capítulo 4) hasta CDL de 2.5 cm (1 pulgada) nominales (se presenta en la sección sobre Aprovechamiento Energético) y el equipo que comúnmente se usa para generar estos productos. También se mencionan otros equipos que se pueden agregar para reducir aún más el tamaño del producto para las aplicaciones del hule molido. Los costos de inversión y operativos relacionados con este equipo adicional son considerables.

## Aspectos fundamentales

Muchas de las empresas que procesan llantas de desecho en EE.UU., especialmente los productores de hule molido, han fracasado en un lapso de 1 a 5 años después de iniciar el negocio. En retrospectiva, muchos de estos fracasos podrían haberse evitado si se hubieran considerado los siguientes aspectos antes de decidir sobre las inversiones:

**Mercados para el producto** – El ritmo que lleva el desarrollo del mercado para los productos derivados de llantas de desecho históricamente ha limitado el crecimiento del procesamiento de llantas. El tiempo que tiene que transcurrir y los costos relacionados con el desarrollo de mercados generalmente se subestiman, a pesar de que tienen un impacto importantísimo en la viabilidad económica de los proyectos. El tiempo que se requiere para desarrollar mercados puede ser de años, no semanas, y se tienen que lograr la identificación y aceptación de los clientes, la aprobación reglamentaria, la realización de pruebas al producto, la introducción al mercado y la distribución. Acumular inventario mientras se desarrolla un mercado resulta doblemente costoso, ya que esto reduce los ingresos que se pueden obtener de la venta del producto, a la vez que incrementa el requerimiento de capital. La combinación de estos factores puede redundar en el fracaso de una operación que de otra forma hubiera estado bien concebida, ya que tarde o temprano los recursos financieros o las instancias normativas limitarán el inventario de productos y llantas en el sitio de procesamiento.

## Especificaciones del producto

El tiempo que se invierte en definir las especificaciones y requerimientos para el procesamiento del producto antes de tomar decisiones sobre la inversión generalmente ahorrará dinero en la implementación y reducirá al mínimo los cambios posteriores, que resultan costosos. Un equipo que tal vez sea adecuado para una aplicación

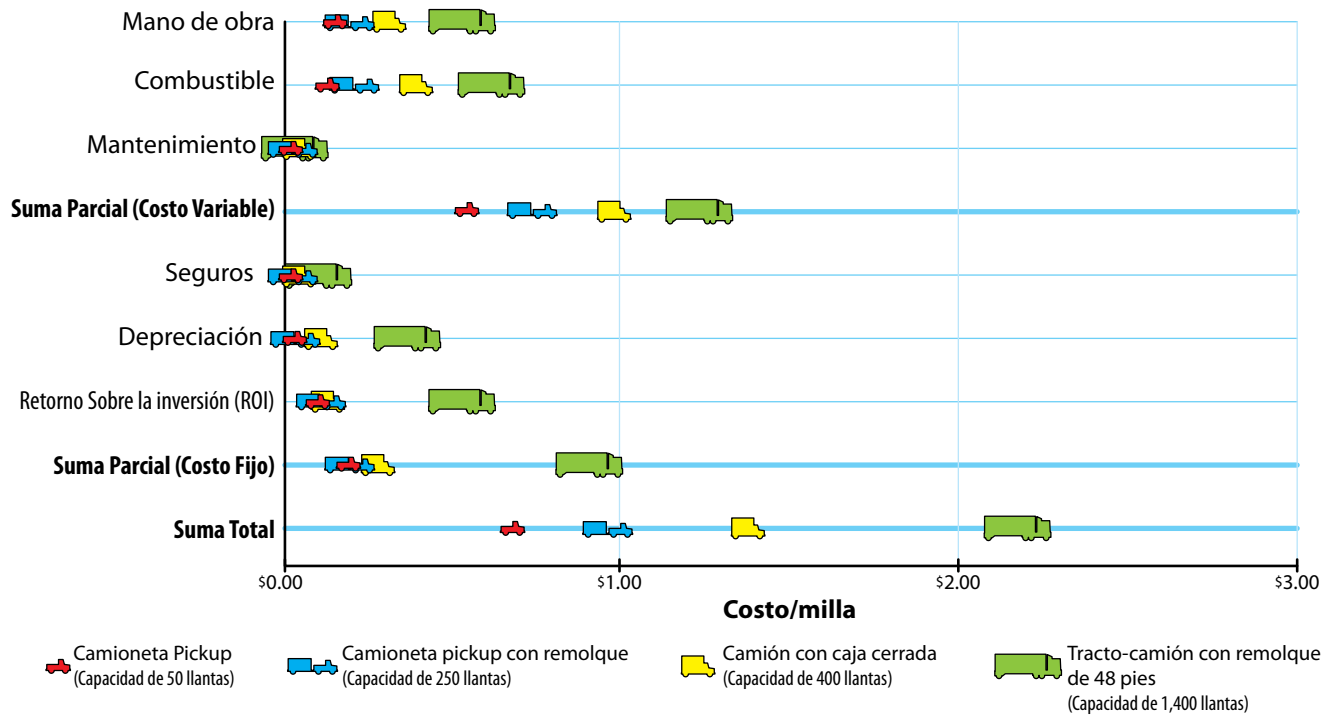


Figura 6-1 Comparación de costos de inversión y costos operativos (Costo-Milla)  
(Ver datos específicos en el Apéndice F)

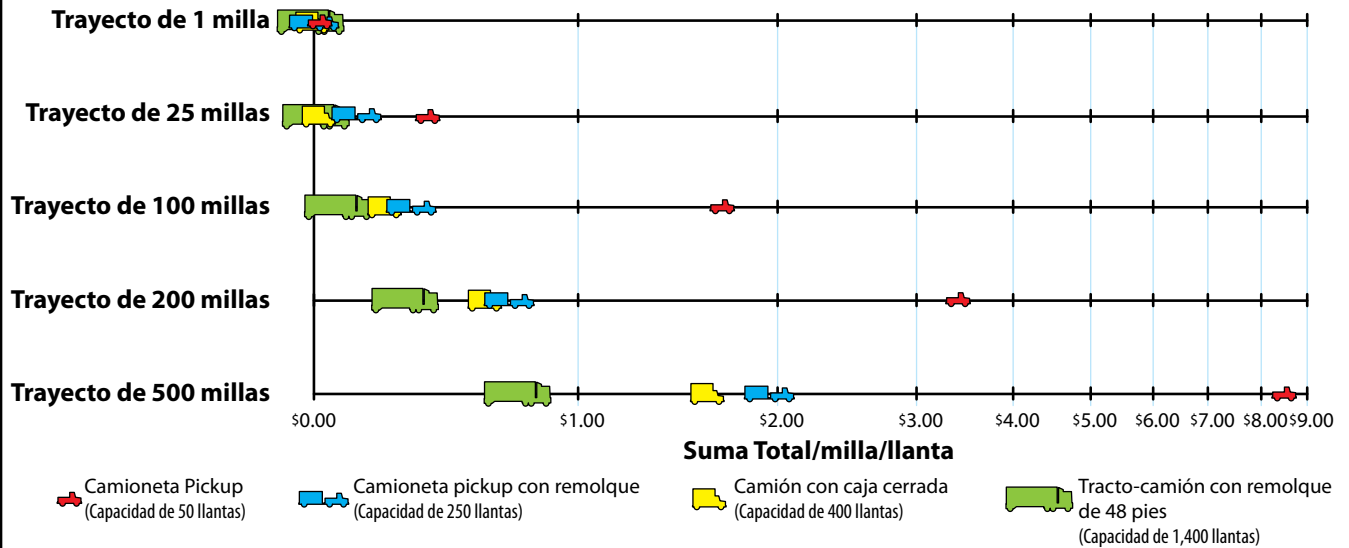


Figura 6-2. Eficiencia en el transporte (Costo/Milla/Llanta)  
(Ver datos específicos en el Apéndice F)

podría no ser idóneo para otra desde el punto de vista técnico o económico. Considerar las etapas evolutivas de los mercados y los productos puede mejorar la probabilidad de que el equipo que se adquiriera inicialmente tenga suficiente flexibilidad para hacer frente a las necesidades futuras. La evaluación precisa de los volúmenes del producto, las especificaciones y los tiempos, probablemente sea el paso más trascendental y comúnmente ignorado al establecer una operación de procesamiento.

### Precio del producto

El precio aparente establecido para el producto de las llantas de desecho podría ser más bajo en realidad, debido a los siguientes motivos:

- (1) El precio que se cotice, por motivos de la competencia, podría incluir considerables costos de transporte. Por lo tanto, los gastos de transporte reducirán los ingresos netos que habrá de percibir el centro de reciclaje. A \$2.00/milla y con 40,000 libras/camión, los costos de un viaje en un solo sentido serían de alrededor de \$0.01/libra por cada 200 millas recorridas y se duplicarían si el camión regresa vacío. Los costos de transporte desde el centro de reciclaje a mercados lejanos pueden ser elevados, con lo que se reduce o elimina la utilidad que podría obtenerse de la venta.
- (2) El precio actual podría verse afectado por los esfuerzos de la competencia de desplazar a los proveedores de los mercados existentes. Un nuevo proveedor normalmente tiene que ofrecer alguna ventaja económica para que se le considere, con lo cual provoca un desplazamiento de precios en todos los mercados y hace que se reduzcan los márgenes de ganancia.

Los apoyos a fondo perdido y subsidios gubernamentales pueden ser de utilidad para desarrollar aplicaciones e impulsar a los procesadores, pero el gobierno debe desarrollar un plan sólido a fin de evitar un impacto negativo. Por ejemplo, los subsidios gubernamentales para la adquisición de equipo de procesamiento pueden resultar contraproducentes al crear una competencia desleal entre los procesadores ya establecidos que han tenido que adquirir su propio equipo y los nuevos procesadores que reciben equipo gratis mediante subsidios. El productor ya establecido podría fracasar a consecuencia de la desventaja económica, mientras que el nuevo productor también podría fracasar debido a la falta de experiencia operativa. Los subsidios de mercado también pueden resultar contraproducentes, ya que crean una economía falsa. Muchos mercados subsidiados no pueden sobrevivir cuando tarde o temprano se les tiene que suspender el subsidio.

Oferta de materia prima - Los requerimientos en cuanto a proceso y equipo dependen del tipo y la cantidad de llantas de desecho que tengan que procesarse. Las llantas para automóvil son considerablemente más fáciles de procesar que las llantas para camión con banda de acero.

Esto es particularmente cierto con la introducción de las nuevas cubiertas de larga duración que contienen mayores porcentajes de alambre de refuerzo. Sin embargo, las llantas para automóvil contienen más tejido reforzado que puede afectar negativamente la producción de hule molido y los pigmentos de las letras blancas generan manchas en el hule molido. Con las nuevas llantas "Super Single" para camiones medianos se substituyen dos llantas regulares con una sola llanta grande, pero estas llantas pueden ser más difíciles de triturar debido a su mayor anchura. Si se requiere algún tipo específico de carcasa, ¿está disponible actualmente y lo estará en el futuro? En muchas de las zonas menos pobladas, la disponibilidad de las llantas es un factor dominante.

Equipo de procesamiento/Diseño del sistema - La mayoría de los sistemas para el procesamiento de llantas de desecho tienen un concepto sencillo y representan un equilibrio de los factores económicos, la productividad y la calidad del producto que se requieren. Los convenios económicos pueden fracasar si no se produce en forma constante un producto comercializable. Al desarrollar sistemas de procesamiento de llantas normalmente los diversos componentes se organizan en serie, optimizando el diseño de cada componente para la tarea específica que le corresponde. Sin embargo, generalmente no se considera el impacto del funcionamiento de la serie en la confiabilidad del sistema en su totalidad. Cuando existen múltiples componentes interconectados en serie de manera integral, la confiabilidad total del sistema generalmente es el producto de la confiabilidad de cada uno de los componentes. Por ejemplo, la confiabilidad total de un proceso en el que se usen 5 componentes interconectados con un factor operativo individual de 90 por ciento cada uno será igual a  $0.9 \times 0.9 \times 0.9 \times 0.9 \times 0.9$  ó 59 por ciento. Cuando se diseña un sistema con esta perspectiva, la productividad global se puede incrementar separando secciones en las que haya acopio temporal que permita continuar con una producción parcial cuando alguna de las secciones no esté funcionando.

Hacer hincapié de igual forma en el desempeño de todos los componentes también puede llevar a mejorar la productividad, incluso en sistemas comparativamente sencillos. Frecuentemente la atención se centra en el equipo de gran escala, mientras que el equipo más simple, como las bandas transportadoras y los puntos de transferencia es en lo que se piensa al último. Sin embargo, un punto de transferencia mal diseñado que se atasque con frecuencia puede tener un impacto mayor en la productividad del sistema que el mantenimiento de las trituradoras.

Estos son sólo algunos de los aspectos principales que se deben considerar antes de desarrollar un proceso o seleccionar equipo. Muchos de los procesadores anteriores en los EE.UU. fracasaron debido a la ausencia





*Trituradora con cuchilla de gancho. Foto cortesía de Granutech Saturn Systems Corporation, Dallass, TX*

de mercados, la mala selección de equipo, la intensa competencia en los precios, la baja calidad de los productos, y las deficiencias en sus prácticas operativas. En las operaciones posteriores que sí han tenido éxito generalmente se han evaluado los mercados, el equipo y los aspectos económicos antes de realizar la inversión, y se ha aprendido el valor del buen mantenimiento y el control de la calidad del producto. Desgraciadamente algunos procesadores siguen perjudicando los mercados suministrando productos de baja calidad hasta que tanto el procesador como los mercados fracasan. Generalmente es menos costoso definir los parámetros fundamentales antes de construir un sistema, que modificarlo o reconstruirlo completamente después.



*Trituradora con cuchilla desmontable. Foto cortesía de Columbus McKinnon Corporation, Sarasota, Florida*

## Métodos y equipo

Existe una amplia selección de equipo comercialmente disponible para el procesamiento de llantas, pero generalmente el equipo corresponde a una de las tres principales categorías funcionales que a continuación se describen:

### Reducción de tamaño

El primer paso en el procesamiento de llantas es la trituración para reducir el tamaño. La mayoría de las trituradoras tienen rotores que consisten en una serie de discos de corte alternados y espaciadores colocados en un eje. Se montan dos rotores dentro de una cámara de corte, con el disco de uno de los rotores de frente al espaciador del otro rotor; a éstos se les llama rotores contrapuestos, ya que la parte superior de ambos gira hacia el centro, jalando las llantas hacia cuchillas con tolerancia estrecha para cortarlas en tiras. Algunas trituradoras usan un solo eje rotatorio para jalar y despedazar las llantas pasándolas por cuchillas estacionarias. Algunas de las variables críticas y los parámetros operativos de las trituradoras son:

**Tipo de cuchilla** - Las trituradoras generalmente utilizan: (1) discos integrales con una serie de ganchos de metal prolongados en el extremo exterior, en las denominadas trituradoras de cuchilla rotativa en forma de gancho ("hook-shear") o (2) discos con bloques de metal



*Figura 6-3. Trituradora de llantas con cuchillas espaciadas 6 pulgadas. Foto cortesía de Barclay Roto-Shred Inc, Stockton, California*

acoplables para corte atornillados al perímetro exterior, en las llamadas trituradoras "de cuchilla desmontable". Ambas funcionan a baja velocidad y alta torsión para desgarrar las llantas entre las cuchillas. En esta sección se muestran ejemplos de una trituradora de cuchilla rotativa y una de cuchillas desmontables.

**Anchura de la cuchilla** - La anchura de la cuchilla generalmente es de unos 5 cm (2 pulgadas). Las cuchillas se pueden apilar una contra otra para crear una anchura de 10 cm (4 pulgadas), incrementando así el rendimiento y el tamaño de las tiras para productos como el ADL Tipo B. Algunas de las principales trituradoras usan diseños exclusivos con un espaciado de hasta 15 cm (6 pulgadas) entre las cuchillas, como la que se muestra en la Figura 6-3. En algunos casos, la anchura de las cuchillas varía según la máquina, de forma que las cuchillas más grandes se pueden afilar e insertar en una



ranura más estrecha, prolongando así su vida útil. Dado que las cuchillas de las máquinas rotativas se sacan del eje para darles mantenimiento, se pueden instalar cuchillas con configuraciones y espaciados distintos en el mantenimiento de rutina. Los ensambles del rotor en las trituradoras de cuchillas desmontables quedan fijos durante el ensamblaje inicial y no se pueden cambiar sin reemplazar los rotores, pero para prolongar la vida útil de las cuchillas comúnmente se usan cuchillas de tamaños distintos en una misma trituradora o en varias (si se usa más de una).

**Tolerancia/Requerimientos de mantenimiento de las cuchillas** - La tolerancia entre las cuchillas generalmente es de 3 a 5 milipulgadas (unidad de media igual a una milésima de pulgada o 0.0254 milímetros) inicialmente, para desgarrar el alambre de refuerzo de las llantas. A medida que las cuchillas se desgastan, la tolerancia aumenta y el alambre de refuerzo se saca por el espacio en lugar de cortarlo. El producto resultante contiene trozos cada vez más largos de alambre que sobresalen de las virutas de hule, los cuales pueden hacer que el producto no sea comercializable en algunos mercados. Asimismo, al no lograr un corte limpio se genera tensión lateral que puede provocar estrías o fallas en el eje o los rodamientos, requiriéndose entonces reparaciones costosas. No mantener afiladas las cuchillas representa un ahorro a corto plazo, pero a largo plazo incrementa el costo de mantenimiento de la máquina.

**Vida útil de la cuchilla** - La vida útil de la cuchilla depende de muchas variables, especialmente el tamaño del producto y la contaminación. Triturar los trozos a tamaño pequeño hace que aumente el desgaste, ya que para ello se requieren más reciclaje (más pasadas por la trituradora) y más cortes. La contaminación con otros materiales puede ser abrasiva y los materiales de mayor tamaño pueden dañar gravemente las trituradoras. Las cuchillas generalmente duran de 3 a 5 veces más en las trituradoras desmontables debido a las propiedades del metal, pero cuando es necesario hacer un reemplazo, éste tarda de 2 a 4 veces más. Los dos tipos se pueden usar para sacar tiras más grandes, pero las cuchillas desmontables generalmente se usan en tiras de 2.5 cm (1 pulgada) nominales, como las del CDL.

### Consideraciones sobre el eje

Los ejes se someten a un alto nivel de tensión cuando se jalan las llantas hacia los rotores contrapuestos. El diseño, el tamaño y el tratamiento térmico determinan la capacidad de la trituradora para procesar llantas para automóvil y para camiones en forma confiable durante lapsos prolongados. Los ejes subdimensionados de las máquinas más pequeñas y económicas pueden desviarse durante la operación, reduciendo así la vida útil de las cuchillas y causando fallas en el eje debido a la fatiga del mismo. Un tratamiento térmico inadecuado durante la fabricación también puede provocar fallas de tensión prematuras. Los ejes de 10 cm (4 pulgadas) o menos solamente sirven para las llantas para automóvil y generalmente indican que la trituradora cuenta con una

estructura mínima y una vida limitada. Generalmente una trituradora barata a largo plazo no resulta una buena compra.

**Puntos de desgaste** - Las trituradoras experimentan desgaste en todos los puntos en los que hay contacto con las llantas, las tiras, o el alambre de refuerzo liberado. Las buenas unidades cuentan con placas de desgaste fácilmente reemplazables o superficies gruesas en las áreas expuestas, y medidas para proteger los ejes de la exposición al alambre liberado.



Vista interna de una Liberadora CM. Foto cortesía de Columbus McKinnon Corp

### Liberación

Después de la trituración generalmente se usan máquinas de alta velocidad para liberar el alambre y el tejido de refuerzo y producir partículas de 2.5 cm (1 pulgada) y menores. Estas máquinas cuentan con un rotor central grande con cuchillas escalonadas atornilladas al rotor. A continuación se muestra una vista interna de una máquina Liberadora Columbus McKinnon (CM). Algunas de las máquinas de alto volumen de los principales fabricantes cuya eficacia se ha demostrado son la "Liberator" de Columbus McKinnon, la "Heavy Rasper" de Eldon, y la "Grizzly" de Granutech-Saturn. Las granuladoras tradicionales de más de 3 hebras también se pueden usar para instalaciones de menor volumen o para reducir aún más el tamaño de los trozos. Las cuchillas del rotor arrastran las tiras hacia el espacio entre el rotor y /o la criba de barras que se encuentra alrededor de la cubierta. Una vez liberado, el acero se captura con una banda transversal y poleas magnéticas, y la granalla se retira usando mesas vibradoras y/o aspiración.

Estas unidades funcionan con una mayor tolerancia, ya que el objetivo es desgarrar el alambre y el hule, no lograr un corte limpio. Las cribas colocadas alrededor del perímetro determinan el tamaño del producto al permitir que las partículas pequeñas pasen, mientras que las más grandes siguen en el procesamiento. El rango de tamaño de los trozos de producto es amplio, por lo que se necesita más cribado para reducirlo. Estas máquinas requieren bastante mantenimiento, llegando incluso a necesitarlo diariamente en los centros donde se manejan grandes volúmenes. Estas unidades también son vulnerables a la acumulación de calor, lo que provoca incendios en las máquinas que pueden esparcirse a otras áreas a través de las bandas transportadoras. La inyección de agua, la aspiración de granalla de llantas de desecho, y los sistemas de control de incendios son algunas de las medidas que se usan para controlar la probabilidad y las consecuencias del fuego en estas máquinas.

### Clasificación

La clasificación normalmente se realiza para separar los tamaños definidos de las virutas o las partículas de hule molido. Un tromel es un separador de criba tubular que normalmente se usa para obtener tiras grandes, como las del ADL Tipo B, en el que los trozos más grandes se regresan a la trituradora para reducir aún más su tamaño. Para la producción de trozos más pequeños, como las virutas de 5 cm (2 pulgadas) y 2.5 cm (1 pulgada), se usan cribas de disco y de cono. Las cribas vibradoras separan el hule molido mediante una malla para lograr las especificaciones necesarias para los productos. Todas estas son tecnologías reconocidas y se encuentran disponibles en el mercado.

### Aspectos económicos del procesamiento

Para construir una planta de producción de llantas de desecho como es debido se requiere una considerable inversión de capital. De no realizarse la inversión inicialmente, tendrá que hacerse para cuando la planta ya esté en funcionamiento, de lo contrario, fracasará. El propósito de esta exposición es presentar en forma genérica los aspectos económicos del procesamiento y el impacto del tamaño del producto y el volumen anual en la economía. Para ilustrar el impacto del volumen se estudiaron los costos variables y fijos del procesamiento de 250,000; 500,000 y 1,000,000 llantas/año. Se estudió la producción de virutas grandes para ADL Tipo B (ver la sección sobre Agregado Derivado de Llantas), virutas de 5 cm (2 pulgadas) nominales y de 2.5 cm (1 pulgada) nominales, a fin de ilustrar el impacto del tamaño de los trozos. La base para calcular los costos de inversión y operativos de estos escenarios se presenta en el Apéndice B, junto con la exposición de los requerimientos normales para la planta, como el terreno, la pavimentación, el edificio, la valla, y otros. Los costos aproximados de inversión y operación de cada uno de los tamaños de producto se indican a continuación; todos ellos se basaron en la experiencia que ha habido en los EE.UU. y luego

se convirtieron a condiciones equivalentes en México. Sin embargo, las condiciones económicas pueden variar ampliamente y deben ajustarse para que coincidan con las condiciones locales antes de hacer cualquier plan de negocios o de inversión.

La economía del procesamiento de llantas de desecho es extremadamente susceptible al volumen. El impacto de las diferencias en el volumen se puede ilustrar comparando los costos de inversión y operativos de tres índices de procesamiento en una planta que produce un ADL Tipo B. Debido a la capacidad del equipo no pedercedero, se pueden producir los tres volúmenes en 1 turno por día, 5 días a la semana. Cada planta es única en cuanto a su productividad, sistema, equipo, distribución, costo de mano de obra, tarifas de servicios públicos, mezcla de producto, etc., y cada operación tendrá una economía distinta. Por lo tanto, las siguientes proyecciones únicamente tienen la intención de servir como base para la comparación de volúmenes.

Todas las plantas de procesamiento de llantas tienen los mismos componentes básicos, independientemente de su capacidad de producción. Las plantas más grandes pueden tener más componentes en serie o paralelo para incrementar su capacidad total. Históricamente, las plantas de menor escala en las que se decide tener equipo más pequeño no han tenido éxito. La selección del equipo depende de la constitución y la fuerza de las llantas, de manera que un equipo pequeño podría no ser duradero, incluso si se maneja un volumen bajo.

En el Apéndice H se presentan las proyecciones aproximadas de los costos variables de cada uno de estos índices de procesamiento. Los principales elementos en el cálculo del costo son la mano de obra, la energía, el mantenimiento, y la disposición del alambre (en caso necesario). Los costos de mano de obra proyectados incluyen los impuestos y prestaciones correspondientes y pueden variar ampliamente según en lugar. Cabe mencionar que una parte fundamental para lograr el éxito en la operación es contar en la planta con supervisores calificados que puedan identificar e implementar procedimientos operativos y de mantenimiento, y es fundamental que haya una capacitación adecuada para desempeñar este papel. El procesamiento de las llantas de desecho requiere una labor manual y puestos de monitoreo, independientemente del volumen que se procese, de manera que el trabajo es susceptible al volumen.

Los costos de la energía también están sujetos a una amplia variación, dependiendo de la forma en que se cobren los servicios públicos, y los motores generalmente no funcionan a toda su capacidad. Algunos organismos operadores de servicios públicos establecen tarifas basadas en la demanda máxima durante un lapso de tiempo limitado. Estas tarifas de demanda máxima pueden redundar en que los costos mensuales sean similares para plantas de bajo o alto volumen si no se toman medidas para controlar la demanda máxima. Un

arranque suave y escalonado en los motores grandes puede reducir considerablemente el consumo máximo de energía. Realizar las operaciones fuera de las horas pico también puede reducir costos.

Los costos de mantenimiento dependen de la maquinaria específica y las condiciones de operación. Sin embargo, el ciclo de vida útil de las cuchillas generalmente es más corto que lo que prevén los fabricantes. Sin embargo, posponer el reemplazo de las cuchillas normalmente provoca que se acelere el deterioro de otros componentes, incluyendo los ejes, los rodamientos y la caja de corte. El equipo requiere mantenimiento mayor en forma periódica, pero este costo muchas veces no se toma en cuenta durante la operación inicial, aunque no se puede ignorar cuando las máquinas sufren descomposturas que exigen una reconstrucción substancial. Por lo tanto, los costos de mantenimiento proyectados serán de 2 a 3 veces más altos que lo calculado por el fabricante si se quieren reflejar las realidades de la operación, como la contaminación y el mantenimiento periódico mayor. El alambre del talón no se recupera ni recicla en estas proyecciones, pero los costos de disposición pueden ser considerables si no se pueden usar las virutas que contienen alambre del talón.

Tal como se ilustra en el Apéndice H, el costo variable total por llanta se reduce de \$0.47/llanta a \$0.21/llanta en función del aumento de volumen. La susceptibilidad al volumen es consecuencia de tener costos de mano de obra relativamente fijos con una plantilla mínima de personal, aún cuando algunos otros costos mayores son directamente proporcionales al rendimiento.

Los operadores en ocasiones centran su atención en los costos variables y no reconocen el impacto de los costos fijos. Sin embargo, los costos fijos son económicamente significativos y muestran una variación considerablemente mayor con el volumen, ya que los gastos administrativos y de capital no son directamente proporcionales al volumen. En el Apéndice H también se presentan costos fijos comparativos, incluyendo los costos administrativos, de capital y de los componentes generales.

La contratación de personal administrativo varía según los requerimientos para la recolección de llantas y el mercadeo del producto. El ahorro en los gastos administrativos puede resultar contraproducente si no se dedican suficiente tiempo y recursos a realizar funciones fundamentales de mercadeo o gestión. Los servicios profesionales, como los de tipo jurídico, contable y la asistencia técnica, generalmente no se toman en cuenta, lo cual conlleva un costo final mayor relacionado con el uso ineficiente del tiempo y los recursos de la gerencia. La depreciación del equipo es un costo real en el procesamiento de llantas. Aún con mantenimiento adecuado, el equipo simplemente llega a un punto en el que es menos costoso reemplazarlo que continuar reparándolo y teniendo tiempo muerto. El costo de los seguros y el impuesto predial puede ser considerable.

En consecuencia, los costos fijos por llanta son extremadamente susceptibles al volumen, reduciéndose de \$0.84/llanta a \$0.26/llanta a medida que se incrementa el volumen. Los costos fijos muestran una variación aún mayor si se incluyen los intereses que deben pagarse por las líneas de crédito.

Los costos totales fijos y variables del procesamiento pueden reducirse de \$2.31/llanta a \$0.71/llanta si se incrementa el volumen (incluyendo un rendimiento anual del 25 por ciento sobre la inversión). Los ingresos combinados de las cuotas de recuperación por concepto de descargas y la venta del producto deben ser iguales o mayores a los costos totales del procesamiento para que la planta siga siendo económicamente viable en el largo plazo. A consecuencia de esta susceptibilidad al volumen, una producción de baja escala probablemente no sea rentable. Un fabricante regional con un volumen comparativamente más alto sería una alternativa económicamente viable, especialmente en centros de población grandes.

Se calcularon costos similares para plantas que producen virutas de 5 cm (2 pulgadas) y 2.5 cm (1 pulgada), a fin de ilustrar el impacto del tamaño de las partículas. Dichos costos se presentan en el Apéndice H. El costo total de las virutas de 5 cm (2 pulgadas) se reduce de \$3.18/llanta a \$1.00/llanta a mayor volumen, lo cual es considerablemente mayor que en el caso del ADL Tipo B con un volumen comparable. El rango del costo de las virutas de 2.5 cm (1 pulgada) nominales es de \$3.46/llanta a \$1.15/llanta, siendo mayor que el de las virutas de 5 cm (2 pulgadas).

En el Cuadro 6-1 se resume el impacto del volumen y el tamaño. Con una producción de ADL Tipo B con 1 millón de llantas/año como valor de referencia, se calculó la proporción de otros costos totales como porcentaje a partir de esta base. Los datos indican claramente que antes de invertir es necesario realizar una evaluación minuciosa de los volúmenes operativos y los productos proyectados.

### SENSIBILIDAD ECONÓMICA

No se presenta un análisis detallado de los aspectos económicos del hule molido, ya que es improbable que haya un desarrollo de mercados adecuados en México

**Cuadro 6-1. Impactos del volumen y el tamaño en el costo total**

PRODUCTO	VOLUMEN (llantas/año)		
	250,000	500,000	1,000,000
ADL Tipo B	+225%	+70%	Baseline
Viruta de 5 cm (2 pulgadas) nominales	+348%	+138%	+40%
Viruta de 2.5 cm (1 pulgada) nominales	+387%	+166%	+62%



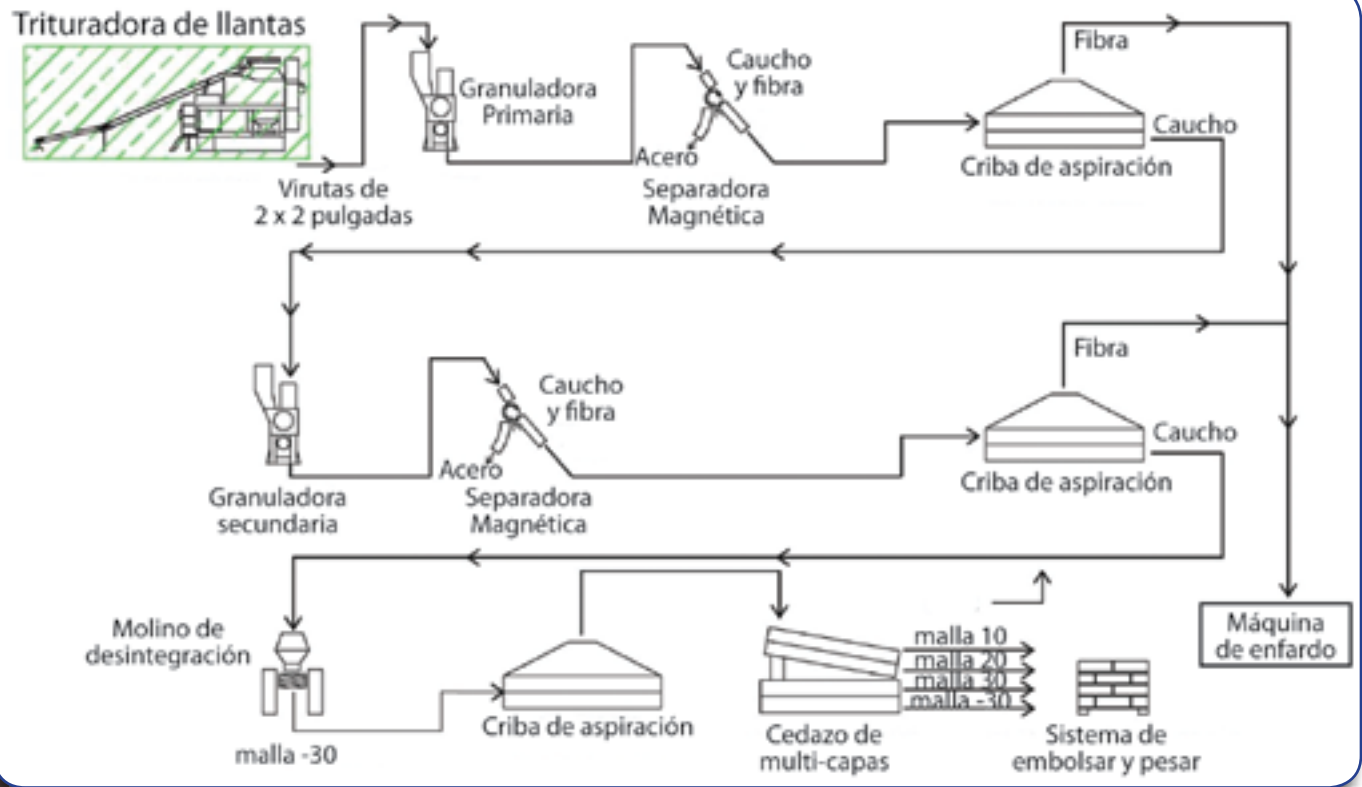


Figura 6-4. Representación esquemática  
Fuente: Columbus McKinnon Corp

en el corto plazo, y las plantas productoras de hule molido son aún más susceptibles al volumen debido a que los costos de inversión y operativos son mayores. Sin embargo, en la Figura 6-4 se presenta un esquema de una planta de hule molido.

Una planta de hule molido en modalidad “llave en mano” capaz de producir 5,000 libras de hule molido diariamente se cotizó recientemente a más de \$4 millones de dólares, más el terreno, el inmueble, las estructuras de concreto, el suministro eléctrico, etc. El costo total rebasaría los \$5 millones de dólares, es decir, más de \$1,000 dólares por libra diariamente. Es improbable que una inversión de esta magnitud sea sustentable con un bajo volumen, ya que los mercados se desarrollan lentamente. Para tener una mejor oportunidad de lograr el éxito en este tipo de producción se tendría que agregar una máquina como la Liberator, la Rasper o la Grizzly (con el equipo clasificador correspondiente) a una planta de trituración de llantas centralizada. Esto podría generar un producto en tamaños variados, desde mantillo hasta relleno para pasto sintético en diversas cantidades. Las proporciones se podrían alterar cambiando las cribas en el granulador para producir material más fino y/o agregando un molino rompedor a fin de reducir aún más el tamaño de las partículas para lograr un hule molido más fino. Este material se podría usar para desarrollar mercados si no se pueden adquirir materiales similares menos costosos a los productores que existen en los Estados Unidos o Europa. Este equipo genera cantidades considerables de alambre de refuerzo liberado y fibra que deben separarse del hule.

El alambre se puede reutilizar como materia prima en las fundidoras de acero, pero podría ser necesario mezclarlo con otra materia prima o someterlo a procesamiento adicional para reducir la contaminación con hule o incrementar su densidad. La fibra tiene un uso limitado como combustible en hornos cementeros.

## RESUMEN

Existen muchos elementos que son fundamentales para lograr el éxito en la implementación de un programa de gestión de llantas de desecho. El transporte, el procesamiento de las llantas, y el potencial del mercado son tres factores clave que deben considerarse antes de la implementación. Es conveniente considerar la distancia por recorrer, el volumen y la frecuencia de recolección de las llantas, las técnicas de carga, y otros aspectos, para hacer un uso óptimo del equipo y finalmente lograr tener un programa de transporte y recolección de llantas económicamente sólido. Conocer a profundidad los mercados, las especificaciones, los precios y la disponibilidad de materia prima para el procesamiento de las llantas de desecho puede evitar decepciones similares a las que se han llevado anteriormente algunos procesadores en EE.UU. El éxito o el fracaso de los programas nuevos o ya establecidos también se puede ver afectado por variables como el mantenimiento, el personal, y las funciones administrativas. Las experiencias que ha habido con los programas ya establecidos o que han tratado de lanzarse en los EE.UU. pueden servir como valiosas enseñanzas a los programas que pretenden emprenderse en México.



# CAPÍTULO 7

## Conclusión

Las llantas de desecho constituyen un problema tanto para México como para Estados Unidos, ya que muchos de los acumulamientos de llantas se concentran en la región fronteriza México-EE.UU. Además de los numerosos problemas ambientales y de salud pública que las llantas de desecho pueden desencadenar en las comunidades, representan un mercado de materiales reciclados notablemente subutilizado.

En esta guía para la gestión de los recursos provenientes de llantas de desecho se han presentado diversas opciones viables para que la región fronteriza México-EE.UU. aproveche el mercado de las llantas de desecho. Muchos estados de la Unión Americana han logrado el saneamiento de los apilamientos de llantas de desecho, han instituido programas para frenar la formación de otros apilamientos, y han mitigado los riesgos que los acumulamientos de llantas representan para la salud humana y el entorno ambiental. En esta guía se plasma el aprendizaje realizado en el proceso que se ha seguido para alcanzar esas metas.

En la guía se destacan los importantes elementos que han de considerarse para establecer e implementar programas de eliminación y reuso de las llantas de desecho. Los siguientes puntos clave serán de utilidad para lograr el éxito en la implementación de un programa de gestión de llantas de desecho:

- Promover e identificar mercados para las llantas de desecho dentro de la comunidad o en zonas aledañas.
- Identificar un mercado específico antes de escoger una aplicación en particular para las llantas de desecho, como producir hule en miga o en trozo.

- El uso del combustible derivado de llanta es una de las formas en que se pueden aprovechar bien las llantas de desecho, siempre y cuando se controlen adecuadamente las emisiones en la planta donde habrán de usarse las llantas como combustible.
- En algunos casos, el uso de las llantas de desecho en aplicaciones para ingeniería civil puede ser una alternativa viable para el combustible derivado de llantas, como se señala en el Capítulo 5.
- El análisis económico que se describe en el Capítulo 6 es fundamental para que el programa de gestión de llantas de desecho tenga éxito. El transporte, el procesamiento de las llantas y el potencial del mercado son tres factores económicos primordiales que se deben considerar antes de la implementación.
- Es importante contar con la participación de un especialista con experiencia en la gestión de llantas de desecho antes de tomar la decisión de invertir dinero en pirólisis, gasificación o inducción térmica. Aunque estos métodos están evolucionando y podrían en un futuro ser económicamente viables, hasta el momento no se ha comprobado su viabilidad económica.

En la guía se podrá encontrar información adicional, aprendizajes, y estudios de caso basados en programas ya establecidos. Asimismo, se presentan referencias a otros materiales de lectura disponibles que pudieran aportar información útil para los gobiernos locales o las empresas privadas que estén en condiciones de explorar el mercado de las llantas de desecho.



Pila de llantas de desecho cerca de Ciudad Juárez



# GLOSARIO

**Abatimiento:** Eliminación de los apilamientos u otros sitios donde se acumulan llantas de desecho enteras o trituradas.

**Abombamiento:** Protuberancia o área levantada, generalmente en los costados de la llanta.

**Abrasión:** Desgaste por rozamiento o fricción. El desgaste progresivo de la superficie de rodamiento de las llantas.

**Acelerador:** Sustancia que se agrega en pequeñas cantidades a los compuestos de caucho sin curar antes del proceso de vulcanización, a fin de reducir el tiempo necesario para la vulcanización.

**Acelerante:** Sustancia utilizada para estimular el proceso de combustión.

**Acumulación de calor:** Generación de calor debido a la histéresis cuando el hule se deforma rápida o continuamente.

**Acumulación de presión:** Incremento en la presión de la llanta debido al aumento de la temperatura en el aire que contiene.

**Acumulación especulativa:** El apilamiento de llantas de desecho sin contar con un negocio o un plan empresarial, pero con la expectativa de que se va a encontrar un mercado.

**ADL Tipo A:** Agregado derivado de llanta en el que el tamaño de los trozos es de un máximo de 75 mm (3 pulgadas).

**ADL Tipo B:** Agregado derivado de llanta en el que el tamaño de los trozos varía de 75 a 300 mm (12 pulgadas).

**Afeitado de la banda de rodamiento:** Acción de afeitar la banda de rodamiento de una llanta con una navaja (generalmente a la mitad de la profundidad original) para reducir la movilidad y las roturas en las aplicaciones relacionadas con las carreras de autos.

**Agente vulcanizador:** Cualquier material que pueda producir en el hule el cambio de propiedades físicas conocido como vulcanización, como el azufre, los peróxidos, los polisulfuros, etc.

**Aglomerado asfáltico caliente modificado con hule molido:** Ver el término Concreto asfáltico modificado con hule molido.

**Aglutinante asfáltico:** La parte de la mezcla de concreto asfáltico que consta de cemento asfáltico.

**Aglutinante:** Componente que, mezclado con agua u otro líquido, se endurece para adherirse a las partículas de agregado y convertirlas en una masa heterogénea.

**Agregado de granulometría abierta:** Agregado cuya distribución del tamaño de partículas permite que cuando se compacte, los vacíos entre las partículas de agregado,

expresados como un porcentaje del espacio total que ocupa el material, sean relativamente grandes.

**Agregado de granulometría densa:** Agregado cuya distribución en el tamaño de las partículas permite que cuando se compacte, los huecos entre las partículas de agregado, expresados como porcentaje del espacio total que ocupa el material, sean relativamente pequeños.

**Agregado fino:** Agregado que pasa por la criba de 3/8 de pulgada y casi en su totalidad pasa por la criba del número 4.

**Agregado grueso:** Agregado que no pasa por la criba del número 4.

**Agregado:** Roca o piedra de tamaño uniforme o de una variedad de tamaños, proveniente ya sea de depósitos naturales o de materiales preparados artificialmente. En algunos casos, en lugar de la roca o piedra, se pueden usar otros materiales, como trozos de llantas de desecho.

**Agrietamiento causado por el clima:** Grietas delgadas en la superficie de los costados de la llanta, causadas por la oxidación y otros efectos atmosféricos.

**Agrietamiento:** Cuarteamiento minúsculo en la superficie del caucho, causado por el envejecimiento y la oxidación.

**Agrietamiento:** Quiebre marcado o fisura en la superficie de las partículas de caucho que se genera por la exposición a la luz, el calor, el ozono, o la continua flexión o estiramiento.

**Alambre de talón:** Alambre de acero de alta resistencia envuelto en hule, que forma el talón de la llanta que le proporciona un contacto firme con el rin.

**Alambre del cinturón:** Cordón latonado de alambre de acero de alta resistencia que se usa en los cinturones de acero.

**Alambre:** Fibras de acero latonado de alta resistencia a la tensión, recubiertos de un compuesto especial que promueve la adhesión, utilizados como refuerzo para las llantas. Se usa comúnmente en los cinturones de refuerzo de las llantas radial y en los talones de las llantas.

**Alineación de las ruedas:** Ajuste de las ruedas y los ejes para que las llantas queden debidamente orientadas en relación con el chasis y entre sí, a fin de asegurar que el vehículos y las llantas avancen en línea recta.

**Alineación:** Ajuste de los componentes de la dirección y la suspensión para facilitar la operación más eficiente de todas las ruedas, el control del vehículo, y prevenir el desgaste de las llantas.

**Anaeróbico:** Capacidad de los microorganismos de vivir sin oxígeno.

**Análisis de la pila de llantas de desecho:** Inspección de las llantas en una pila de desechos de una cuenta comercial, con el fin de identificar las causas de las fallas en las llantas.

**Antiderrapante:** La capacidad de la superficie de una vialidad y de la banda de rodamiento para prevenir la pérdida de tracción de la llanta.

**Antioxidante:** Sustancia química que se usa para retrasar específicamente el deterioro causado por el oxígeno.

**Antiozonante:** Compuesto químico que se usa específicamente para retrasar el deterioro causado por el ozono.

**Antiponchaduras (Run-Flat):** Daño a las llantas causado por hacerlas rodar con poca presión o sin presión de aire, lo cual a veces se detecta por la presencia de cuarteaduras o manchas. El término se refiere también a un tipo de llanta para automóvil que puede funcionar sin presión de inflado en caso de pérdida o fuga de aire.

**Anzuelos:** Fibras de alambre de la banda o del talón que quedan expuestas en las llantas de desecho procesadas o en los trozos individuales de alambre de la banda o el talón (también conocidos como Espolones).

**Apilado en forma de barril:** Una forma de almacenar las llantas, en las que éstas se apilan una sobre otra.

**Apilamiento:** Pila de acopio de materiales que por lo general es grande y se va acumulando gradualmente. El material a veces se acumula para su posible uso posterior.

**Aplicación de ingeniería civil:** Uso de llantas de desecho en lugar de materiales naturales (ej. roca, arena, tierra, gravilla) en la construcción.

**Asfalto ahulado:** Ver el término Concreto asfáltico modificado con hule molido.

**Asfalto de mezcla (en) caliente:** Composición que consiste principalmente en agregado graduado y cemento asfáltico ampliamente utilizado en la pavimentación.

**Asfalto modificado con hule:** Término general que se utiliza para identificar la incorporación de llantas de desecho a los materiales para pavimentación asfáltica (también conocido como Concreto asfáltico modificado con hule molido).

**Asfalto:** Material de color café oscuro o negro, parecido al cemento, cuyos componentes predominantes son bitúmenes naturales o que se obtienen del procesamiento del petróleo.

**Aspiración:** Succión de la pelusa de llantas u otros materiales ligeros para incorporarlos a la maquinaria de procesamiento.

**Balanceo:** Distribución del peso alrededor de la llanta o el sistema de ruedas. La distribución uniforme del peso produce una llanta balanceada.

**Bamboleo:** Irregularidad en el desempeño de las ruedas que se caracteriza por un movimiento de lado a lado.

**Banda de rodamiento pre-curada:** Banda de rodamiento que se vulcaniza con la configuración de la banda ya moldeada antes de colocarla en la carcasa pulida.

**Banda de rodamiento:** La parte de la llanta que tiene contacto con la superficie de las vialidades.

**Bitumen:** Clase de sustancias naturales o fabricadas de color negro u oscuro, parecidas al cemento, que se componen principalmente de hidrocarburos de alto peso molecular. Algunos de los ejemplos típicos son el asfalto, el alquitrán, la brea y las asfaltitas.

**Bituminoso:** Materiales que contienen o han sido tratados con bitumen.

**BTU:** Unidad Térmica Británica. Se define como la cantidad de energía que se requiere para calentar una libra de agua a una temperatura de un grado Fahrenheit.

**Cadena de polímeros:** La cadena de elementos que forman la base de la estructura de un polímero

**Calcinamiento:** Calentamiento de una sustancia a una temperatura alta, aunque por debajo de su punto de fusión, a fin de provocar su descomposición térmica.

**Cambio:** La remoción de las llantas de un auto o camioneta y su sustitución con un tipo o tamaño de llanta diferente.

**Capa de base:** Subcapa de material en la superficie de asfalto que constituye el cimiento de las capas superiores de pavimento. Generalmente consiste en un tipo específico de agregado para construcción que se coloca como superficie intermedia debajo del subrasante y arriba de la sub-base en un camino de asfalto, o directamente encima del terreno intacto.

**Capas estructurales:** Capas del cuerpo y el cinturón que contribuyen a reforzar la carcasa.

**Capas intercaladas de membranas absorbentes de tensiones (Stress Absorbing Membrane Interlayers, SAMI):** Capa de asfalto ahulado que se aplica sobre una superficie ya instalada antes de aplicar una superficie de concreto asfáltico. Se utiliza para retardar el agrietamiento reflectante.

**Capas:** Franjas de cuerdas recubiertas de hule.

**Cara de la llanta:** Término comúnmente utilizado para describir la superficie de rodamiento de una llanta todo terreno.

**Carcasa:** Estructura básica de la llanta, sin incluir la banda de rodamiento (también llamada Casco).

**Carga de alimentación:** Materia prima que se suministra a una máquina o planta de procesamiento para la fabricación industrial de un producto.



**Cascajo de llanta:** Trozos de llantas de desecho que tienen una forma geométrica básica y generalmente miden menos de 6 por 8 pulgadas (152.4 mm por 203 mm) (también conocido como Viruta de llanta).

**Casco:** Cuerpo principal de la llanta, sin incluir la banda de rodamiento o el hule de los costados.

**Catalizador:** Sustancia química que, en pequeñas cantidades, acelera la reacción de un material resinoso, pero que no es necesariamente parte del producto final.

**Caucho butílico:** Elastómero sintético (hule o caucho) para uso general, que se produce mediante la copolimerización del isobutileno con una pequeña cantidad de isopreno. El caucho butílico tiene baja permeabilidad a los gases. Su impermeabilidad al aire es 70% mayor que la del caucho natural; por este motivo, es mejor para su uso en cámaras de llantas y recubrimientos para llantas sin cámara.

**Caucho de la India:** Nombre que se le daba generalmente al caucho natural, ya que provenía de la India.

**Celsius:** Escala de temperatura en la cual el punto de congelamiento es cero (0) grados y el punto de ebullición es 100 grados (anteriormente llamada escala centígrada).

**Cemento asfáltico:** Asfalto fundente o no fundente preparado especialmente con calidad y consistencia para su uso directo en la fabricación de pavimentos bituminosos.

**Cemento vulcanizador:** Cemento de caucho que se usa para unir el caucho nuevo a la llanta vieja.

**Char:** Residuo sólido que queda después de la pirólisis de la llanta y la remoción del acero, las fibras, y otro material de soporte.

**Cinturón de acero:** Cuerdas de acero recubierto de hule que corren en forma diagonal por debajo de la banda de rodamiento de las llantas radiales de acero y se extienden a lo ancho de la llanta, aproximadamente de la misma anchura que la banda de rodamiento. La rigidez de los cinturones ayuda a que la llanta tenga un buen manejo, un desgaste más parejo de la banda de rodamiento, y más resistencia a la penetración.

**Cinturón:** Ensamblaje de tela o alambre con recubrimiento de hule, que se usa para reforzar la superficie de rodamiento de la llanta. En las llantas radiales también protege el diámetro externo contra la presión de inflado y la fuerza centrífuga.

**Clasificación de velocidad:** Las capacidades máximas de velocidad de las llantas nuevas para automóvil y camioneta de uso ligero se indican con un símbolo de velocidad.

**Clasificador:** Equipo diseñado para separar tiras de llanta de tamaño mayor al especificado.

**Cola de caballo:** Trozo burdo de llanta triturada de dos a cuatro pulgadas (50.7 mm a 101.6 mm) de ancho, y con una longitud mayor a seis pulgadas.

**Combustible derivado de llanta (CDL) (Tire-Derived Fuel, TDF):** Llantas de desecho enteras o producto triturado uniformemente que se obtiene de las llantas enteras para usarse como combustible.

**Combustible suplementario:** Material combustible que desplaza a una porción de la fuente de combustible tradicional.

**Combustión espontánea:** Término utilizado con frecuencia para explicar la causa de los incendios internos de llantas de desecho procesadas. Esto constituye un uso inadecuado del término (Ver el término Encendido espontáneo).

**Combustión:** Reacción química de un material mediante oxidación rápida con evolución de calor y la luz.

**Comité sobre Caucho D11 de ASTM (ASTM D11 Rubber Committee):** Comité formado por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials, ASTM). Se encarga de formular métodos de análisis, definiciones, especificaciones, prácticas, y clasificaciones relacionados con el caucho y sus productos, y con los sistemas y servicios asociados a la tecnología para el procesamiento del caucho.

**Compuesto:** Mezcla de sustancias químicas especialmente adaptadas a las necesidades específicas de los componentes de la llanta.

**Concreto asfáltico modificado con hule molido (Crumb Rubber Modified Asphalt Concrete, CRMAC):** Término general usado para identificar al grupo de procesos mediante los cuales se incorporan modificadores de hule molido a los materiales del pavimento asfáltico.

**Concreto asfáltico modificado con hule molido (Rubber Modified Asphalt Concrete, RUMAC):** Producto de pavimentación hecho con hule. El hule actúa como agregado y se mezcla con el cemento asfáltico y el agregado en cantidades que van hasta el tres por ciento. Este proceso también se conoce como Proceso en seco.

**Concreto asfáltico:** Mezcla compuesta de agregado y aglutinante de cemento asfáltico.

**Concreto:** Material compuesto que consiste esencialmente de un medio aglutinante en el que se incrustan partículas o fragmentos de agregado; en el concreto hidráulico, el aglutinante se forma con una mezcla de cemento hidráulico y agua.

**Conflagración:** Incendio grande e incontrolable.

**Contención:** Operación mediante la cual se previene la propagación de un incendio.

**Control:** Operación general de confinamiento y supresión de un incendio. Un incendio está bajo control cuando logra detenerse el avance del fuego.

**Convocatoria:** Invitación o anuncio que envía una organización patrocinadora a los proveedores para que presenten una oferta (propuesta) para suministrar un producto o servicio específico a la organización.

**Copolímero:** Polímero formado por dos o más tipos de monómeros.

**Corte tipo almeja:** Ver el término Corte tipo bagel

**Corte tipo bagel:** Corte de la llanta por la mitad a lo largo de su circunferencia.

**Corteza de la banda de rodamiento:** Ver el término Raspadura.

**Costado (también llamado cara):** La pared lateral de una llanta que se encuentra entre el hombro de la banda de rodamiento y el talón del rin.

**Criba:** Dispositivo para separar materiales por tamaño (también conocido como Tamiz).

**CRREL (Cold Regions Research and Engineering Laboratory):** Laboratorio de Investigación e Ingeniería de las Regiones Frías. Laboratorio de análisis del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU. CRREL ha estado trabajando en una mezcla de concreto asfáltico modificado con hule en trozo, diseñada para mejorar las características de desenlazamiento del hielo de varios materiales de pavimentación asfáltica.

**Cuartheadura radial:** Cuartheadura perpendicular al talón, por lo general en el área del costado de la llanta o cerca de ella.

**Cuartheaduras por fatiga:** Cuartheaduras en la superficie de una vialidad a consecuencia de la compresión generada por el peso de los vehículos.

**Cuerdas:** Hebras de alambre o de tela que forman las capas y los cinturones de una llanta.

**Cuerpo:** Estructura de la llanta que no incluye la banda de rodamiento (también conocida como casco o carcasa).

**Cuota de disposición:** Ver el término Cuota por vaciado de residuos.

**Cuota por vaciado de residuos:** Cantidad que se cobra por disponer de llantas de desecho u otros residuos en un centro de acopio o relleno sanitario (también conocida como Cuota de disposición).

**Curado del molde:** Proceso de recauchutado en el que se utilizan compuestos sin curar en la banda de rodamiento; en este proceso la vulcanización se lleva a cabo en moldes.

**Curado químico:** Vulcanización a temperatura ambiente o mayor, activada por agentes químicos, sin la aplicación de calor de una fuente externa.

**Curado:** Proceso que consiste en calentar o aplicar otro tratamiento a un compuesto de hule o plástico para convertirlo de un material termoplástico o fluido, a un estado sólido, relativamente resistente al calor, para

fabricar productos comerciales. Cuando se emplea calor, el proceso también se llama vulcanizado.

**Curar:** Vulcanizar; también se refiere a las condiciones de temperatura y presión que se usan para vulcanizar el hule (caucho).

**Debida diligencia:** En general, el grado de atención, basado en la información recabada y el análisis realizado, que una persona razonable ejercería para evaluar los riesgos antes de celebrar un convenio o transacción de negocios con la otra parte.

**Debilitamiento del pavimento:** La manifestación física de defectos o deterioro en el pavimento.

**Deformación:** Distorsión de la llanta en comparación con su forma normal.

**Densidad:** Término que denota el peso por unidad de volumen de una sustancia. La densidad de toda sustancia se puede obtener dividiendo el peso de la sustancia entre su volumen.

**Desalambrado:** Ausencia de alambre expuesto en el perímetro de las virutas de llanta. El alambre del cinturón suele permanecer incrustado en la viruta.

**Descascarado:** Ver el término Fragmentación.

**Descuadrado:** Condición en la que las ruedas traseras del vehículo no siguen la misma trayectoria que las ruedas delanteras.

**Desempeño del pavimento:** La capacidad del pavimento de cumplir con su propósito, como se refleja en el cambio mensurable de las condiciones durante un lapso de tiempo.

**Despolimerización:** Proceso de reducir la longitud de la cadena de los polímeros rompiendo sus enlaces químicos.

**Desportillado:** Ver el término Fragmentación.

**Destalonado:** Proceso que consiste en extraer el fuerte alambre de refuerzo del talón que se encuentra alrededor del rin de la llanta. Extraer el alambre de talón antes de triturar la llanta permite que el producto final sea más limpio y haya menos desgaste en las partes de la trituradora que están en movimiento.

**Desvulcanización:** Proceso en el cual hay una regeneración sustancial del compuesto de caucho a su estado plástico original, lo cual permite que el producto sea procesado, compuesto, o vulcanizado sin afectar el azufre combinado. No se ha logrado aún la verdadera desvulcanización del caucho con la regeneración del caucho original y la remoción del azufre combinado. El término es sinónimo de la recuperación de los desechos de caucho vulcanizado. Consiste principalmente en la despolimerización, acompañada de algo de oxidación.

**Dimensionamiento de trozos:** Término que generalmente se refiere al proceso de que los trozos de llanta cortada pasen por los orificios de una criba graduada, en comparación con los que no logran pasar por la criba. Algunos ejemplos son los siguientes:

**1" x 1":** Llanta de desecho reducida de tamaño en la que todas sus medidas son de un máximo de una pulgada..

**2" x 2":** Llanta de desecho reducida de tamaño, con medidas máximas de 2" x 2" x 2".

**2" menos:** Llanta de desecho reducida en la que el tamaño máximo de los trozos no es mayor a una pulgada, pero el 95 por ciento de los trozos es de menos de X pulgadas en cualquiera de sus lados (ej. menos 1"; menos 2"; menos 3"; etc).

**Diseño (o dibujo) de la banda de rodamiento:** Patrón antiderrapante en la parte de la llanta que corresponde a la banda de rodamiento.

**Dolina:** Fenómeno que ocurre en los apilamientos de llantas de desecho cuando el material que está por debajo de la superficie se consume en un incendio interno y la superficie se hunde.

**Efecto Velcro:** El alambre entrelazado que sobresale de las virutas de llanta.

**Elasticidad:** La propiedad de un material de volver a su tamaño y forma originales después de eliminar la tensión que provocó su deformación.

**Elastómero:** Material polimérico que, a temperatura ambiente, es capaz de recuperar sustancialmente su forma y tamaño después de eliminar la fuerza que lo deforma. Este término generalmente se refiere a los polímeros sintéticos y no al caucho, ya que éste generalmente se refiere al material natural.

**Elongación:** Característica del caucho que consiste en medir el punto hasta el cual se puede estirar sin romperse.

**Embalaje:** Método para reducir el volumen mediante el cual se comprimen las llantas en pacas.

**Encendido espontáneo:** Calor generado por una sustancia química o por la acción de las bacterias en un material combustible.

**Enterrar:** Estrategia contra incendios que consiste en cubrir una pila de llantas con tierra, arena, gravilla, cemento en polvo, u otro material.

**Entrecruzamiento:** Cuando se realizan enlaces químicos entre las cadenas moleculares, se dice que el material está entrecruzado. Una vez entrecruzado, el material no se puede volver a procesar.

**Entrelazado:** En relación al intercalado de las llantas.

**Envejecimiento:** Deterioro de las propiedades físicas y químicas a causa de la oxidación durante un lapso de tiempo.

**Equivalente en llantas de pasajero (Passenger Tire Equivalent, PTE):** El peso de las llantas descartadas o de las partes de llantas descartadas equivalente al peso promedio de una llanta de automóvil desechada. El peso promedio de una llanta de automóvil descartada es igual a 20 libras. Por ejemplo, una llanta para camión que pese 80 libras sería de 4 PTEs.

**Especificaciones:** Requisitos escritos para los procesos, materiales y equipos.

**Espolones:** Puntas irregulares del alambre de talón que sobresalen de las llantas trituradas.

**Estrías:** La parte del dibujo de la banda de rodamiento formada por surcos que corren a lo largo de la circunferencia de la llanta.

**Excipiente:** Material compuesto sólido que se puede agregar, por lo general en forma muy fina, en proporciones relativamente grandes, a un polímero.

**Exotérmica:** Reacción química en la cual se libera calor.

**Extensor:** (1) Material inerte que se agrega a un compuesto para incrementar su volumen y bajar su costo (2) Material orgánico que se usa para aumentar o reemplazar parte del contenido de polímero de un compuesto.

**Extrusión:** Proceso de mezclar, calentar, y forzar la entrada de un material a un troquel para producir una forma continua.

**Extrusora:** Máquina con tornillo de rosca para moldear en forma continua el hule (caucho) forzando su entrada a un troquel.

**Exudación:** Flujo autógeno del agua de mezclado del concreto o mortero recién instalado, causado por el asentamiento de las partículas sólidas en la masa.

**FHWA (Federal Highway Administration):** Administración Federal de Carreteras, dependencia del Departamento de Transporte de los EE.UU.

**Fianza:** Tipo de contrato que representa una garantía financiera para asegurar el cumplimiento de una obligación. También puede ser una garantía para cubrir la pérdida financiera causada por una acción o incumplimiento de una tercera persona. Se pagan sumas fijas anualmente hasta la fecha de madurez de la fianza, después de lo cual se debe pagar el valor principal.

**Filtro de mangas:** Sistema de recolección de polvo que consta de un soplador, un filtro para polvo, un sistema de limpieza de filtros, y un receptáculo o sistema de remoción de polvo. Está diseñado para procesar cargamentos de llantas con mucho polvo. Es distinto a los filtros de aire, que utilizan filtros desechables para eliminar el polvo.

**Finos de caucho:** Pequeñas partículas de caucho molido que son subproducto del procesamiento de las llantas de desecho para convertirlas en gránulos.

**Finos:** Pequeñas partículas de agregado graduado que se usan en la composición del concreto asfáltico.

**Fisuración:** Efecto en la superficie de los artículos de caucho o plástico que se caracteriza por tener muchas grietas minúsculas.

**Flujo anual:** Cantidad de llantas de desecho que se generan en un año natural.

**Fragilización:** Cuando un compuesto de hule o caucho se vuelve quebradizo por la exposición a altas o bajas temperaturas, o a consecuencia del envejecimiento.

**Fragmentación:** Pérdida de piezas pequeñas o considerables de la banda de rodamiento debido al corte o a la acción de las superficies ásperas en vialidades. Se asocia normalmente con el uso incorrecto de llantas para carretera en terrenos sin pavimentar. También se conoce como Desportillado o Descascarado.

**Garantía financiera:** Fianza de desempeño, carta de crédito, depósito en efectivo, u otro instrumento financiero aceptado de común acuerdo para garantizar el desempeño.

**Gasificación:** Proceso que ocurre cuando las llantas se someten a un ambiente con alta temperatura y poco oxígeno.

**Geocompuesto:** La filosofía básica de los materiales geocompuestos consiste en combinar las mejores características de los distintos materiales de tal manera que se aborden las aplicaciones específicas de manera óptima y a un costo mínimo. Por lo tanto, se eleva al máximo la relación costo-beneficio. Por lo general, dichos geocompuestos son materiales sintéticos, aunque no siempre es así.

**Geomembrana:** Tipo de material geosintético impermeable ampliamente utilizado como forro o revestimiento. Entre las propiedades físicas de las geomembranas se encuentran el grosor, la densidad, la transmisión de vapor de agua, la transmisión de vapores de solventes, y el índice de fluidez.

**Geosintéticos:** Gama de productos en general poliméricos utilizados para resolver problemas de ingeniería civil. Generalmente se considera que el término abarca ocho categorías principales de productos: geotextiles, geomallas, georedes, geomembranas, revestimientos geosintéticos de arcilla, geoespuma, geoceldas (confinamiento celular) y geocompuestos.

**Geotextiles:** Telas permeables que, cuando se utilizan en combinación con el suelo, tienen la capacidad de separar, filtrar, reforzar, proteger o drenar. Por lo general están hechas de polipropileno o poliéster.

**Granuladora:** Máquina que cizalla el hule proveniente de llantas de desecho con placas giratorias, para producir partículas molidas, generalmente de  $\frac{3}{4}$  pulgada hasta mallaje 200 (también conocidas como Hule granulado).

**Gránulos "sal y pimienta":** Hule granulado que se obtiene de las llantas de cara blanca.

**Gravilla / Grava:** Agregado grueso que se obtiene de la desintegración y abrasión natural de las rocas o mediante el procesamiento de conglomerado con enlaces débiles.

**Gravilla triturada:** El producto de la trituración artificial de la gravilla, en el que prácticamente en todos los

fragmentos, por lo menos una de sus caras proviene de la fractura.

**Hebra:** Alambre que sobresale del perímetro de la viruta o tira de llanta (también conocido como Anzuelo).

**Hidrocarburo:** Compuesto químico orgánico que contiene únicamente los elementos carbono e hidrógeno.

#### **Hidroplaneo (Acuaplaneo) de las llantas neumáticas:**

Fenómeno que se produce cuando la superficie de contacto de una llanta se separa de la carretera debido a la presencia de un líquido, por lo general agua.

**Histéresis:** Calor generado por la deformación rápida de una pieza de caucho vulcanizado. Es la diferencia entre la energía de la tensión de deformación y la energía de la recuperación de materiales.

**Hombro:** La parte de la llanta entre la banda de rodamiento y el costado.

**Huella:** Impacto que deja la superficie de rodamiento de la llanta que entra en contacto con el suelo.

**Hule (caucho) ambiente:** Caucho procesado sin congelamiento.

**Hule (caucho) asfáltico:** Mezcla de cemento asfáltico, hule de llanta triturada y aditivos, en la cual el componente de hule (caucho) constituye por lo menos el 15 por ciento por peso de la mezcla total, y que reacciona en la mezcla de cemento asfáltico caliente provocando la expansión de las partículas de hule.

**Hule (caucho) crudo:** Elastómero vulcanizado sin procesar; normalmente se refiere al producto natural.

**Hule (caucho) crudo:** Hule o caucho natural, sin procesar.

**Hule (caucho) granulado:** Caucho particulado compuesto principalmente de partículas no esféricas que abarcan una amplia gama de dimensiones máximas, desde menos de 425um (mallaje 40) hasta 12 mm (0.47 pulgadas). La característica principal de este tipo de partículas de caucho es la fracción del material que entra en el rango de dimensión máxima de más de 2 mm (0.08 pulgadas) hasta 12 mm (0.47 pulgadas). Término definido por el Comité sobre Caucho D11 de ASTM. Ver el término Hule particulado.

**Hule (caucho) molido:** Hule (caucho) particulado compuesto principalmente de partículas no esféricas que abarcan una amplia gama de dimensiones máximas, desde muy por debajo de 425um (mallaje 40) hasta 2.032 mm (0.08 pulgadas). Ver el término Hule (caucho) particulado. El tamaño de mallaje más pequeño reportado en el caso del hule molido es de 450. Término utilizado por el Comité sobre Caucho D11 de ASTM.

**Hule (caucho) natural:** Material procesado que se obtiene de la savia (látex) del *Hevea Brasiliensis* (árbol del hule).

**Hule (caucho) particulado:** Hule crudo, sin curar, compuesto o vulcanizado, que se ha transformado mediante un proceso mecánico de reducción de tamaño hasta convertirlo en partículas, con o sin recubrimiento o



agente de partición para evitar la aglomeración durante la producción, el transporte, o el almacenamiento (Ver también los términos Raspadura de hule, Hule granulado, y Hule molido). Término usado por el Comité sobre Caucho D11 de ASTM.

**Hule (caucho):** Un elastómero, por lo general el hule natural, aunque el término se usa libremente para referirse a cualquier elastómero, vulcanizado y si vulcanizar. Por definición, el hule es un material que puede recuperarse rápidamente y por la fuerza de deformaciones considerables, y que puede ser modificado a un estado en el cual es esencialmente insoluble en un solvente a punto de ebullición.

**Hule criambiante:** Mezcla de hule ambiente y criogénico. Dado que el hule ambiente es menos denso que el criogénico, el primero tiende a subir, lo que provoca una amortiguación desigual.

**Hule cultivado:** Hule natural crudo que se obtiene de los árboles de hule cultivados y no de los árboles silvestres.

**Hule de la banda de rodamiento:** Hule compuesto, natural o sintético, que se coloca en un casco pulido y se vulcaniza para generar una nueva superficie de desgaste.

**Hule en polvo:** Hule particulado compuesto principalmente de partículas no esféricas que tienen un tamaño máximo igual o menor a 425um (mallaje 40). (Ver también el término Hule particulado). Término que utiliza el Comité sobre Caucho D11 de ASTM.

**Hule molido:** (1) Hule (caucho) de látex natural coagulado y seco. (2) Partículas finas de hule vulcanizado provenientes de la reducción mecánica o criogénica de las llantas de desecho u otros productos de caucho.

**Hule pulverizado:** Ver el término Hule (caucho) molido.

**Hule silvestre:** Hule que se recoge de los árboles que se encuentran en zonas silvestres, a diferencia de los árboles que se cultivan en viveros.

**Hule sintético:** Hule que se obtiene al polimerizar los monómeros de origen petroquímico.

**Hule triturado:** Trozos de llanta de desecho generados por el procesamiento mecánico.

**Hule vulcanizado:** El producto de la vulcanización que surge de la reacción química del hule con el azufre y los aceleradores (u otros materiales aceptables) en condiciones idóneas para obtener una modificación de sus propiedades físicas a una amplia gama de temperaturas.

**Incendiarismo:** El acto delictivo de quemar un inmueble o propiedad.

**Incendio bidimensional:** Incendio que ocurre en una superficie plana, como el de un líquido inflamable o de llantas de desecho procesadas.

**Incendio tridimensional:** Incendio que ocurre en un material que tiene tres superficies. En el caso de los incendios de llantas de desecho, el fuego se presentaría

en la superficie superior, en la sección interior, y en el fondo de la llanta.

**Incipiente:** La etapa inicial de un incendio, cuando el calor que se está generando no se ha extendido a los materiales cercanos.

**Inclusión compresible:** Se utiliza en aplicaciones en las que se requiere un material resistente pero ligero para reducir la tensión en los elementos estructurales.

**Indicadores de desgaste de la banda de rodamiento:** Barras angostas de hule moldeado de una altura de 2/32 de pulgada, a lo ancho de las ranuras de la banda de rodamiento. Cuando el desgaste de la banda de rodamiento llega a estas barras se debe reemplazar la llanta. El límite legal de desgaste de la banda de rodamiento ese de 3/32 de pulgada.

**Inflado:** Cantidad de presión de aire en una llanta.

**Intercalado:** Método para apilar las llantas con el cual se ahorra espacio.

**Inundación:** Estrategia para combatir incendios que consiste en lanzar abundantes cantidades de agua a una pila de llantas que se están incendiando.

**Jalón:** La tendencia de un vehículo a virar hacia un lado.

**Kilojoules:** Unidad métrica para medir la liberación de energía. Un kilojoule/kilogramo equivale a 2.33 BTU/libra.

**Kilopascales (Kpa):** Unidad métrica para medir la presión del aire.

**Ko:** Coeficiente de la presión que ejerce el suelo en el plano horizontal. Esta presión es conocida como presión lateral de la tierra. Ko se aplica comúnmente para determinar la fricción en los lados en el diseño de estructuras de ingeniería como muros de contención y túneles, por ejemplo.

**Látex de hule:** Ver el término Látex.

**Látex:** Líquido parecido a la leche que se extrae del árbol del caucho. Cuando el látex se coagula se obtiene el caucho crudo.

**Lechada:** Mezcla poco espesa de una sustancia insoluble como cemento, arcilla, o carbón, con un líquido como agua o aceite.

**Lesión:** Cualquier daño causado por un objeto penetrante, una abrasión severa, o un impacto.

**Libras por pulgada cuadrada (Pounds Per Square Inch, PSI):** Medida de presión.

**Lixiviado:** Líquido que contiene material soluble; se forma cuando el agua de lluvia u otro líquido pasa hacia abajo a través del suelo o de otros materiales. Se refiere especialmente a una solución que contiene contaminantes recogidos a través de la lixiviación.

**Llanta:** Cubierta de hule neumático sólida y continua que envuelve la rueda de un vehículo.

**Llanta alterada:** Llanta de desecho que ha sido modificada para que ya no pueda retener aire o agua, ni se pueda usar en un vehículo.

**Llanta con cámara:** Llanta neumática que requiere de una cámara interior para retener el aire.

**Llanta convertida:** Llanta de desecho que ha sido procesada para convertirla en un bien de consumo distinto.

**Llanta de desecho:** Llanta que ya no se puede usar para su propósito original debido al desgaste o daño de la misma.

**Llanta de estructura diagonal:** Llanta construida con dos o más carcassas que se cruzan entre sí en la corona a un ángulo de 30 a 45 grados del centro de la banda de rodamiento.

**Llanta de reemplazo:** Cualquier llanta nueva que no forme parte del juego original de llantas que se vende con el vehículo.

**Llanta descartada:** Una llanta que ya no se puede usar para su propósito original, pero que debido al tipo de disposición que se le ha dado, ya no se puede usar para ningún otro fin.

**Llanta desgastada:** Cualquier llanta que se ha retirado de un vehículo debido al desgaste o daño. Las llantas desgastadas se pueden recauchutar, reparar, o desechar.

**Llanta desmontada:** Llanta que se ha sacado del rin del vehículo. Incluye llantas usadas, llantas cuyas carcassas son candidatas a reparación o recauchutado, y llantas de desecho.

**Llanta en trozo:** Llantas de desecho que se cortan en piezas relativamente grandes de dimensiones no especificadas.

**Llanta entera:** Llanta de desecho que ha sido removida de un rin, pero que no ha sido aún procesada.

**Llanta Mucker:** Tipo de llanta para flotación especialmente diseñada para su uso en terreno blando (también conocida como llanta Mudder o llanta para lodo y nieve).

**Llanta neumática:** Llanta que necesita contener aire comprimido para soportar la carga. Se diferencia de una llanta sólida en que la llanta en sí es la que carga el peso.

**Llanta nueva:** Una llanta que nunca ha sido montada en un rin.

**Llanta original:** Las llantas que suministra el fabricante con los vehículos nuevos.

**Llanta para automóvil:** Llanta con menos un rin de diámetro menor a 18 pulgadas (457.2 mm), para uso únicamente en automóviles.

**Llanta para camión maderero:** Tipo especial de llanta diseñada para la industria maderera.

**Llanta para camión:** Llantas para rin de diámetro de 20 pulgadas (507.9) o mayor.

**Llanta para camioneta de carga ligera:** Llantas con rin de diámetro de 16 a 19.5 pulgadas (406.4 mm a 495.3), que se fabrican especialmente para camionetas de carga ligera.

**Llanta procesada:** Llanta de desecho que ha sido alterada, convertida, o reducida de tamaño. Algunos de los métodos de procesamiento son el corte, la reducción criogénica, o la trituración.

**Llanta radial con cinturón de acero:** Llanta radial hecha con cinturones de acero en lugar de cinturones textiles.

**Llanta radial:** Llanta construida de manera que las cuerdas de las capas se extienden de talón a talón en un ángulo de 90 grados hacia el centro de la banda de rodamiento.

**Llanta recauchutada:** Carcasa a la que se le ha colocado hule nuevo en la banda de rodamiento, y en ocasiones en los hombros y costados, para alargar la vida útil de la llanta.

**Llanta refabricada:** Llanta desgastada que ha sido debidamente inspeccionada y/o reparada y a la que se le ha aplicado hule nuevo de talón a talón para ampliar su vida útil (también se le conoce como llanta moldeada).

**Llanta reparada:** Llanta que se ha dañado debido a cortes, perforaciones o rupturas, y que ha sido reacondicionada para restaurar su fuerza y alargar su vida útil.

**Llanta reutilizada:** Llanta de automóvil retirada del rin de un vehículo y colocada en el rin de otro vehículo sin hacerle ninguna reparación ni otra forma de alteración.

**Llanta seccionada:** Llanta que se ha cortado por lo menos en dos partes.

**Llanta sin cámara:** Llanta neumática que no requiere de una cámara interior para retener el aire.

**Llanta todo terreno:** Ver el término OTR

**Llanta triturada:** Llanta de desecho reducida de tamaño. La reducción de tamaño se logra mediante un dispositivo mecánico de procesamiento conocido como "trituradora".

**Llanta usada:** Llanta removida del rin de un vehículo que legalmente no se puede describir como nuevo, pero cuya estructura está intacta y que tiene una profundidad mayor al límite legal en su banda de rodamiento. Este tipo de llanta se puede volver a montar en el rin de otro vehículo sin hacerle ninguna reparación.

**Llanta verde:** Llanta que no ha sido vulcanizada ni curada.

**Llantas "Super-Single":** Llantas que se encuentran comúnmente en equipo todo terreno y camiones de volteo. Son llantas altas, con una proporción de aspecto numéricamente elevada, en comparación con las llantas sencillas o "singles" para carretera, que tienden a tener la misma altura en general que las llantas sencillas estándar.

**Llantas comerciales:** Llantas para camiones y usos industriales.

**Llantas compactadas:** Ver el término Embalaje.

**Llantas curadas:** Llantas industriales sólidas, vulcanizadas directamente en el rin de acero sobre el que están montadas. También se les llama Llantas moldeadas.

**Llantas intercaladas:** Ver el término Intercalado.

**Llantas para uso ligero:** Llantas que pesan menos de 40 libras y se usan en automóviles y camionetas de carga ligera.

**Llantas para uso pesado:** Llantas que pesan más de 40 libras, utilizadas en las camionetas, autobuses, y vehículos todo terreno, para aplicaciones de trabajo pesado.

**Llantero:** Término utilizado para nombrar a los vendedores independientes de llantas al menudeo.

**Lodo residual:** Cualesquiera de los depósitos o mezclas similares al lodo. Depósito, sedimento o masa pesada o viscosa que se genera en varias operaciones industriales.

**Malaxadora:** Dispositivo que permite mezclar el agregado caliente y los componentes bituminosos para formar concreto bituminoso homogéneo listo para descargarse a un sistema de instalación.

**Mallaje:** Unidad de tamaño que se usa para describir el número de orificios por pulgada en una criba. Por ejemplo, una criba de mallaje 50 tiene 50 orificios en cada pulgada lineal.

**Mantenimiento de las llantas:** La práctica de asegurar un buen nivel de inflado, rotación, balanceo y alineación de las llantas.

**Mantenimiento preventivo:** Mantenimiento que se realiza antes de presentarse alguna falla. Su propósito es alargar la vida del producto, prevenir los altos costos de reparación, y reducir las descomposturas del equipo.

**Mapa fiscal:** Mapa oficial que muestra las líneas divisorias de las propiedades y el tamaño de los terrenos para fines de recaudación de impuestos.

**Marca privada:** Línea especializada de llantas o cámaras fabricadas para un comprador en particular conforme a sus especificaciones, el cual a su vez vende los productos con el nombre de su empresa.

**Material secundario:** Fragmentos de productos terminados o sobras de un proceso de manufactura en el que se convierte un material primario a un bien de consumo con valor económico.

**Material virgen:** Material sin tratar, como el petróleo crudo o el árido de cantera, que no se ha usado aún en ningún proceso de manufactura.

**Materiales para reparación:** Materiales específicamente diseñados (parches, goma, cemento) que se usan durante el proceso de reparación de una llanta o cámara.

**Matriz de polímero ahulado:** Una "pantalla" entrelazada compuesta de macromoléculas de hule entrecruzadas y ligadas.

**Matriz:** Equipo de recauchutado en el que la nueva banda de rodamiento se adhiere a la carcasa usada y se forma el nuevo diseño o grabado de la banda de rodamiento.

**Medida de talón a talón:** Medida de la llanta de un talón a otro por encima de la corona, tomada después del raspado, para garantizar que se seleccione el tamaño de matriz correcto para curar el recauchutado.

**Medidor de profundidad de la banda de rodamiento:** Instrumento que se utiliza para medir la profundidad de las ranuras de la banda de rodamiento de una llanta.

**Medios alternativos de protección:** Uso de otra forma de protección contra incendios, además de lo que exigen los códigos o reglamentos.

**Membrana absorbente de tensiones (Stress Absorbing Membrane, SAM):** Capa de asfalto ahulado que se aplica sobre el pavimento existente para retardar las cuarteaduras por fatiga.

**Mezcla de pavimento asfáltico reciclado:** Mezcla de pavimento asfáltico recuperado (RAP) que incluye, en caso necesario, cemento asfáltico, asfalto emulsificado, asfalto diluido, agente de reciclaje, agregado mineral, y excipiente mineral.

**Mezcla para mantenimiento:** Mezcla de material bituminoso y agregado mineral que se aplica a temperatura ambiente para reparar baches, huecos y áreas maltratadas en el pavimento existente.

**Mezclar llantas:** Uso de distintos tipos de llanta (radiales, convencionales de capas, de capas con cinturón) en un mismo vehículo.

**Micra:** Unidad de longitud igual a 0.0001 centímetros o 10,000 unidades angstrom. Este término por lo general ha sido reemplazado con el término micrómetro.

**Microfresado:** Proceso mecánico con el que se reduce aún más el hule (caucho) a partículas muy finas. En este proceso se combinan hule molido y agua para formar un compuesto acuoso que se introduce entre discos giratorios abrasivos.

**Microsurcos:** Pequeños cortes hechos a propósito en la superficie de la banda de rodamiento para mejorar la tracción.

**Milímetro:** Unidad métrica de medida. 1 milímetro (mm) es equivalente a 0.039 pulgadas. 25.4 mm son equivalentes a 1 pulgada.

**Minorista de llantas:** Término utilizado para describir a los comercios que venden llantas al menudeo.

**Modificador de hule molido:** Término general usado por la Administración Federal de Carreteras de EE.UU. para identificar el grupo de procesos y conceptos mediante los cuales se incorpora hule (caucho) de las llantas de desecho a los materiales del pavimento asfáltico.

**Molde:** Cavidad caliente en donde se vulcanizan las llantas. Incluye una cámara de vapor, matrices, y dispositivos de ajuste.

**Moldeo por inyección:** Operación de moldeo en la que un compuesto de caucho se calienta en el barril de la extrusora y se inyecta a un molde hueco estando todavía en estado fluido.

**Molino de martillo:** Máquina que procesa mecánicamente hule de llantas de desecho congelado criogénicamente usando martillos giratorios.

**Molino primario:** Máquina diseñada para reducir el tamaño de las llantas de desecho al pasar el material de desecho por tambores de acero corrugado con ranuras angulares.

**Monómero:** Cualquier molécula que pueda unirse (enlazarse) químicamente como parte de la unidad de un polímero.

**Negro de humo:** Material usado en las llantas que brinda fuerza a los compuestos de caucho. Este material consiste principalmente en carbón elemental en forma de partículas coloidales casi esféricas y agregados. El negro de humo se obtiene mediante la combustión parcial o la descomposición térmica de los hidrocarburos.

**Nominal:** Término comúnmente utilizado para referirse al producto (viruta) de tamaño promedio que constituye el 50 por ciento o más de la producción de una operación de procesamiento de llantas de desecho. Cabe mencionar que cualquier operación de procesamiento de llantas de desecho también generará productos (virutas) de tamaño mayor y menor al rango "nominal" de la máquina.

**Número de marca:** Número grabado por el cliente en uno o ambos costados de la llanta para fines de identificación.

**Número del DOT:** Número de identificación que el fabricante moldea en el costado de las llantas para carretera, en cumplimiento de las normas federales de seguridad para vehículos automotores establecidas por el Departamento de Transporte de los EE.UU. (USDOT).

**OTR (Off the Road) Llanta todo terreno:** Llanta diseñada principalmente para usarse en vialidades sin pavimentar o en lugares donde no hay vialidades. En su fabricación se considera más importante la resistencia que la rapidez.

**Oxidación:** Reacción del oxígeno en un producto de hule (caucho), que generalmente viene acompañada de cambios en la apariencia y funcionamiento de la superficie, o de cambios por lo general negativos, en las propiedades físicas del producto.

**Ozono:** Forma alotrópica del oxígeno. Un gas con olor característico, que es un poderoso agente oxidante. Se encuentra presente en la atmósfera en bajos niveles y provoca el agrietamiento de ciertos tipos de compuestos elastoméricos.

**Pandeo:** Arruga o deformación de los costados cuando la llanta está mal inflada o sometida a mucha carga o tensión; la deformación de los cinturones es consecuencia de un recauchutado deficiente.

**Partición del hule:** Proceso mediante el cual se le quita la banda de rodamiento a la llanta para su posterior procesamiento.

**Pata de ardilla:** Trozos irregulares expuestos de alambre del cinturón o de la corona (también conocidos como Anzuelos).

**Pavimento asfáltico recuperado (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP):** Pavimento asfáltico o mezcla de pavimento retirado de su ubicación original para usarlo en mezclas de pavimento asfáltico reciclado.

**Peligro del camino:** Cualquier condición u obstáculo en las vialidades o carreteras, que pueda dañar una llanta.

**Pelusa:** La parte fibrosa de la llanta que no es de caucho ni de metal y que queda después de procesar las llantas de desecho (ej. algodón, rayón, poliéster, fibra de vidrio, o nylon).

**Perforación:** Agujero profundo y estrecho que se abre en la tierra para extraer un líquido, construir un inmueble, o recolectar muestras para análisis.

**Piedra triturada:** Producto resultante de la trituración de rocas, piedras, o adoquín, en el que prácticamente todas las caras provienen de la operación de triturado.

**Pila de llantas de desecho:** Acumulación de llantas de desecho enteras o procesadas.

**Pirólisis:** Proceso de descomposición térmica libre de oxígeno. La pirólisis de las llantas de desecho genera gas, char, aceite y acero.

**Planeación previa a incidentes:** Método para prever la respuesta a un incendio y planear las tácticas y estrategias a seguir con base en la información que se recabe antes de que ocurra un incendio.

**Planta de amasado:** Planta de manufactura de mezclas de pavimento bituminoso en la que se dosifican los componentes agregados a la mezcla conforme al peso del lote, y se agrega material bituminoso según el peso o volumen.

**Planta de mezcla continua:** Planta de manufactura en la que se producen mezclas bituminosas para pavimento y se dosifica el agregado y los componentes bituminosos de la mezcla mediante un sistema de dosificación volumétrica sin intervalos definidos por lotes.

**Plástico termofraguado:** Material macromolecular sólido que es incapaz de sufrir una deformación inelástica continua cuando se eleva la temperatura sin experimentar una descomposición química.

**Polibutadieno:** Hule sintético fabricado al combinar muchas moléculas de butadieno con polímeros de cadena larga. Este tipo de hule se distingue por sus características de resistencia al desgaste de la banda de rodamiento, resiliencia y flexibilidad a bajas temperaturas.



**Polimerización:** Reacción química en la cual las moléculas de un monómero se unen para formar moléculas grandes cuya masa molecular es un múltiplo de la sustancia original. Cuando se trata de dos o más monómeros distintos, al proceso se le llama copolimerización.

**Polímero:** Material macromolecular formado por la combinación química de monómeros que tienen una composición química igual o distinta.

**Polvo de lijado:** Ver el término Raspadura de llanta.

**Potencial de recauchutado:** La capacidad de una carcasa de llanta para ser recauchutada y tener un desempeño aceptable.

**Precipitación electrostática:** Proceso de eliminar las pequeñas partículas de humo, polvo, aceite, etc. del aire, pasándolo primero por un filtro con carga eléctrica que le da una carga a las partículas, y luego por dos placas cargadas, donde las partículas se atraen a una superficie.

**Pre-secado:** Secado de una llanta en un cuarto con calefacción para eliminar la humedad antes del recauchutado.

**Presión de aire:** Fuerza que ejerce el aire dentro de la llanta, expresada en libras por pulgada cuadrada, kilopascales, o bares.

**Procesamiento de llantas de desecho:** Cualquier método para reducir de tamaño las llantas de desecho enteras a fin de facilitar su reciclaje, aprovechamiento energético o disposición.

**Proceso criogénico:** Proceso de producción del hule molido mediante el cual se congela el hule de las llantas de desecho usando nitrógeno o métodos de refrigeración comercial para resquebrajarlo. En el proceso criogénico el hule resquebrajado se tritura en un molino de martillo hasta lograr el tamaño de trozo deseado.

**Proceso de pre-curado:** Proceso en el que se utilizan bandas de rodamiento prefabricadas y se vulcanizan uniéndolas con una capa delgada de goma (hule natural) a una carcasa previamente preparada.

**Proceso en seco:** Producto para pavimentación hecho con hule molido como componente agregado. El hule se mezcla con el agregado antes de incorporarlo al cemento asfáltico en cantidades que van hasta el tres por ciento. Este proceso también se conoce como Concreto asfáltico modificado con hule (Rubber Modified Asphalt Concrete, RUMAC).

**Proceso genérico por la vía seca:** Procedimiento no patentado para incorporar el hule molido al asfalto caliente de densidad convencional o de granulometría discontinua, usando el proceso por la vía seca.

**Proceso húmedo:** Cualquier método en el que se combine hule molido con cemento asfáltico antes de incorporar el aglutinante a un proyecto de pavimentación asfáltica.

**Producto recuperado:** Producto de la degradación del hule mediante procesos mecánicos, térmicos, y/o químicos, que genera un material despolimerizado.

**Productos de hule reciclado:** Productos que contienen hule reciclado.

**Profundidad de la banda de rodamiento:** La medida de la superficie de la banda de rodamiento hasta el fondo de las ranuras.

**PTE:** Ver el término Equivalente en llantas de pasajero.

**Pulido (también llamado raspado):** Proceso de retirar la banda de rodamiento desgastada/usada de una llanta para recauchutarla. Escofina rotativa potente que produce una superficie rugosa, limpia y uniforme a la que el nuevo caucho se adhiere fácilmente. Pulidora de eje flexible para preparar un área pequeña para reparación. También se pueden pulir las llantas durante la fabricación, esmerilándolas para exponer el hule blanco de la llanta terminada y crear una cara blanca o letras blancas realzadas en la llanta.

**Pulidora:** Equipo que se utiliza para quitar la banda de rodamiento usada de la llanta que se va a recauchutar. Escofina rotativa potente que produce una superficie rugosa, limpia y uniforme a la que el nuevo caucho se adhiere fácilmente. Para preparar un área pequeña para reparación se usa una pulidora de eje flexible.

**Punto de inflamación:** La temperatura más baja a la cual el vapor de un líquido combustible se puede encender momentáneamente en el aire.

**Purgado de llantas:** Práctica (poco recomendable, según los fabricantes de llantas) de dejar salir aire caliente de las llantas que soportan un peso después de que han estado en funcionamiento, con el fin de reducir el inflado.

**Quema libre:** Estrategia contra incendios que consiste en dejar que una pila de llantas arda libremente.

**Radial para toda estación:** Llanta para carretera diseñada para resistir las condiciones del clima en todas las temporadas del año, la cual cumple con la definición de llanta para lodo y nieve establecida por la Asociación de Fabricantes de Caucho de los EE.UU.

**Rajadura:** Ruptura de los cables del costado de la llanta que sigue la forma de la circunferencia.

**Ranuras:** Canales entre las costillas de la banda de rodamiento de la llanta.

**Raspado:** Remoción del material dañado antes de hacer una reparación.

**Raspadura de hule:** Término utilizado por el Comité sobre Caucho D11 de ASTM. Hule particulado que se genera como subproducto de la operación de pulido en la etapa del recauchutado que consiste en preparar la carcasa. Se caracteriza por contar con partículas de diversos tamaños, de forma predominantemente alargada o de aguja (ver también el término Hule particulado). La singular forma de las partículas de este material únicamente se aprecia

en los productos terminados que contienen partículas de tamaño mayor a un mallaje 30.

**Raspadura de la banda de rodamiento:** Ver el término Raspadura.

**Raspadura de llanta:** Ver el término Raspadura.

**Raspadura:** Caucho vulcanizado que generalmente se obtiene de las llantas desgastadas/usadas al extraer la banda de rodamiento para recauchutarla. Este material normalmente se utiliza en productos de hule moldeado. También se conoce como Polvo de lijado.

**Reaprovechamiento del hule:** Proceso de degradación de la estructura del hule mediante el uso de procesos mecánicos, térmicos o químicos.

**Rebaba:** Exceso de hule (caucho) que se queda atrapado entre los bordes de los segmentos del molde durante el proceso de curado.

**Recapado:** Término incorrecto para referirse al recauchutado. Por lo general se refiere al proceso de recubrimiento, mediante el cual se aplica hule únicamente a la superficie de la banda de rodamiento.

**Recargo:** Cuota o pago extra. Una carga adicional o excesiva.

**Recauchutado completo:** Proceso de pulir las llantas de desecho de la siguiente manera: en la parte superior de la banda de rodamiento, por encima del hombro a las paredes laterales superiores, y la sustitución de la banda de rodamiento y/o el caucho de los costados. Este método de vulcanización le da a los hombros un acabado similar al de una llanta nueva.

**Recauchutado de banda:** Durante este proceso de recauchutado se raspa únicamente la parte superior o banda de rodamiento, y se aplica el hule a la banda dejando los hombros sin acabado. Este tipo de recauchutado por lo general se solicita cuando las llantas se van a usar en carretera, dado que no requieren un hombro especial y la apariencia de la llanta no es de importancia.

**Recauchutado de talón a talón:** Proceso de recauchutado que incluye la restauración de la cara de la llanta desde el hombro hasta el talón.

**Recauchutado total:** Proceso de recauchutado que incluye el reemplazo del área del hombro y de la superficie de rodamiento de la llanta.

**Reciclar o Reciclaje:** Cualquier proceso mediante el cual las llantas desechadas se transforman en productos nuevos, incluyendo llantas recauchutadas, combustible, o hule molido.

**Recolector de carcasas:** Persona o negocio independiente que se dedica a recoger llantas de desecho de las llanteras o plantas de desmontaje automotriz para transportarlas a otro lugar (ver también el término Recolector de llantas).

**Recolector de llantas:** Persona o empresa independiente que se dedica a recoger llantas de desecho de los minoristas para transportarlas a otro lugar. También conocido como Recolector de carcasas.

**Recolector:** Ver el término Recolector de carcasas o Recolector de llantas

**Recompensa:** Cantidad que se paga por recoger y recuperar llantas de desecho apiladas o tiradas clandestinamente.

**Reconstrucción:** Aplicación de recauchutado o hule para reparación.

**Recubrimiento:** Material utilizado en la cara de las bandas de rodamiento, las unidades de reparación y los parches, hecho de hule (caucho), cuya finalidad es garantizar la limpieza, adherencia y facilidad de transporte y almacenamiento.

**Recuperación de energía:** Proceso mediante el cual se utiliza una parte o la totalidad de la llanta como combustible para recuperar su valor en BTUs. Ver el término Combustible derivado de llanta (CDL).

**Reducción de tamaño:** Se refiere a cortar, triturar, u otras formas de reducir el tamaño, por lo general de una llanta de desecho completa.

**Reducción en la fuente:** Cualesquiera de una serie de prácticas encaminadas a reducir la cantidad de llantas de desecho que se generan anualmente. Estas prácticas incluyen, aunque no se limitan a: usar llantas de mayor duración; mantener un nivel de inflado adecuado; rotar, balancear y mantener la alineación de las llantas; repararlas y recauchutarlas.

**Refuerzo:** Cualquier material, por lo general hule y tela, vulcanizado al interior de una llanta para agregar fuerza al cuerpo en caso de alguna ruptura.

**Reintegración:** Grado hasta el cual un producto de hule regresa a sus dimensiones normales después de haberse distorsionado.

**Reparación con refuerzo:** Reparaciones que se hacen a la carcasa cuando el daño se ha extendido a más del 25, pero menos del 75 por ciento del cuerpo de la llanta, para las cuales se requiere material para rellenar los orificios y unidades de refuerzo.

**Reparación de sección:** Reparaciones a la carcasa cuando se han extendido los daños a la banda de rodamiento o al costado de la llanta. La cuerda dañada se extrae y se reemplaza con una unidad de reparación (parche).

**Reventón:** Ruptura instantánea del cuerpo de la llanta que causa la pérdida completa de la presión de aire.

**Revestimiento interior:** Capa o capas de hule (caucho) laminadas que se pegan al interior de una llanta sin cámara para contener el medio de inflación.

**Rin:** Aro de metal que sostiene la cámara y la rueda. Los talones de la llanta son los que la sujetan al rin.

**RMA (Rubber Manufacturers Association):** Asociación de Fabricantes de Caucho de EE.UU. La asociación profesional que representa a los fabricantes de llantas y productos de hule en los EE.UU.

**Rompimiento:** Ruptura o abertura en la estructura de la llanta.

**Rotación de las llantas:** El reposicionamiento periódico de las llantas de un vehículo para alargar la vida útil de la banda de rodamiento.

**RUMAC:** Ver el término Concreto asfáltico modificado con hule.

**Sellado superficial con gravilla y hule asfáltico:** Capa delgada de asfalto modificado con hule molido que se usa para adherir una capa de agregado a la superficie de rodamiento.

**Sellado superficial con gravilla:** Capa delgada de asfalto rociado, con o sin caucho, y posterior colocación de un agregado, para prolongar la vida útil de la superficie del pavimento.

**Separación del talón:** Pérdida de adhesión entre los componentes en el área del talón de la llanta.

**Servicio a flotillas:** Prestación profesional del servicio de mantenimiento de llantas a los operadores de camiones u otros usuarios. Por lo general incluye la inspección periódica de todas las ruedas giratorias en el local de servicio de la empresa propietaria de la flotilla.

**Singularizador:** Transportador que recibe artículos orientados al azar y los coloca en fila. El transportador cuenta con rodillos sesgados para impulsar los artículos en forma longitudinal y lateral contra una pared.

**Sistema dual (Doble llanta):** Término que se utiliza para describir un conjunto de dos llantas y rines en cada extremo de un eje.

**Sitio no regulado:** Apilamiento o lugar en donde se guardan llantas de desecho, que no cumple con la normatividad correspondiente, o un tiradero en donde las llantas se acumulan sin intención de reutilizarlas, reciclarlas, o procesarlas.

**Sitio regulado:** Apilamiento de llantas o centro de acopio en donde el propietario/operador almacena o procesa llantas de desecho en estricto apego a la normatividad vigente.

**Sobrecargar:** La costumbre de poner sobre una llanta más peso del que puede cargar, debido a una baja presión de inflado. Es una costumbre peligrosa, por lo que no se recomienda.

**Sobredimensionar:** Montar llantas más grandes que las especificadas para un vehículo para poder cargar más peso, incrementar la flotación, o generar otros cambios en el desempeño de la llanta.

**Sobreinflado:** Inflado de una llanta a una presión mayor a la recomendada para la carga que soporta. El sobreinflado provoca consecuencias negativas, como

poca maniobrabilidad, desgaste irregular y daños por impactos al sistema de suspensión.

**Subcurado:** Situación en la cual no se logra la vulcanización completa.

**Sub-inflado:** Situación en la cual la llanta se infla a una presión menor a la recomendada, lo que provoca una respuesta lenta, un incremento considerable en el desgaste de la banda de rodamiento, una reducción en el rendimiento del combustible, y fallas en la carcasa.

**Substrato:** Material de soporte sobre el cual se forma o construye algo.

**Sumidero:** Área baja a donde desagua un líquido, por ejemplo una fosa o embalse.

**Tácticas:** Método para alcanzar los objetivos que se plantea en una estrategia, haciendo uso de personal y equipo para lograr resultados óptimos.

**Talón (también llamado ceja):** Parte interior de la llanta que se ajusta al rin. El talón se construye de alambres de acero de gran resistencia que se envuelven con las capas de la llanta.

**Tamiz:** Dispositivo para separar gránulos de distintos tamaños.

**TDF:** Ver el término Combustible derivado de llanta.

**Telas (también llamadas lonas):** Cuerdas textiles usadas en la fabricación de llantas.

**Temperatura ambiente:** Temperatura del medio que rodea un objeto, como la temperatura del aire en el lugar donde la llanta está en funcionamiento o procesamiento (triturado); por regla general es la misma temperatura de la habitación o del área exterior en donde se está procesando la llanta.

**Temperatura de globo de bulbo húmedo:** Temperatura compuesta que se utiliza para calcular el efecto de la temperatura, la humedad, la velocidad del viento (factor viento) y la radiación solar en el ser humano. Se usa para determinar los niveles de exposición adecuados a temperaturas altas.

**Tensión horizontal:** Tensión normal en un plano vertical.

**Termoestable:** La capacidad de mantener un mismo estado físico bajo una amplia gama de temperaturas.

**Termofraguante:** Propiedad de una sustancia que sufre un cambio químico al calentarse, por medio de la cual se forma un producto no termoplástico endurecido.

**Termoplástico:** Material con la capacidad (propiedad) de suavizarse en repetidas ocasiones mediante el incremento de temperatura, y de endurecerse mediante una reducción en la temperatura.

**Tiempo de residencia:** Lapso de tiempo promedio que una sustancia permanece en un sistema en particular, como las llantas de desecho en los hornos cementeros.

**Tiradero:** Un lugar donde residuos o materiales de desecho son depositados, vertidos, dejados, apilados, acumulados, o amontonados. Un tiradero también puede referir a un tipo de basurero o vertedero, clandestino o regulado, y generalmente no es un relleno sanitario.

**Tire and Rim Association Inc.:** Asociación industrial estadounidense de fabricantes de llantas, rines y ruedas, que establece las normas que rigen estos productos.

**Transformación:** Proceso de incineración, pirólisis, gasificación, o conversión química y/o biológica de una llanta de desecho.

**Transportista:** Persona o empresa cuya actividad es el transporte de bienes o materiales, en especial por carretera.

**Tratamiento a la superficie:** Aplicación de material bituminoso, seguido de una capa de agregado mineral, sobre una vialidad.

**Triángulo azul:** La protuberancia de una reparación en la llanta no debe ser de más de 3/8 de pulgada (1cm) de altura. Estas protuberancias en ocasiones se identifican con una etiqueta en forma de triángulo azul colocada junto a la parte donde se hizo la reparación.

**Trituradora granuladora:** Trituradora diseñada para reducir las llantas de desecho a trozos. El tamaño y forma del trozo dependerá de la acción que realice la trituradora al procesar la llanta (Ej. corte con navaja, cizalladura con cuchilla rotativa, o rasgado).

**Trituradora:** Máquina que se utiliza para reducir las llantas enteras y convertirlas en trozos.

**Trómel (también llamado tambor):** Dispositivo mecánico para clasificar por tamaños las llantas de desecho reducidas.

**Trozo burdo:** Pieza de llanta triturada de tamaño mayor a 2" x 2" x 2", pero menor a 30" x 2" x 4".

**Trozo de rotación simple:** Llanta triturada que se ha procesado con una trituradora granuladora y cuyos trozos no se han clasificado.

**Trozo:** Una pieza cortada o cizallada de llanta de desecho que por lo regular es relativamente pequeña y puede o no ser uniforme.

**Uniformidad:** Medida de la capacidad de la llanta para rodar suavemente y sin vibración.

**Usuario final:** (1) La última entidad que utiliza una llanta, en cualesquiera de sus formas, para hacer un producto o proporcionar un servicio con valor económico para otros usos. (2) La planta en la que se utiliza el contenido de calor u otras formas de energía provenientes de la combustión de llantas de desecho para recuperar energía.

**Vacío de aire:** Espacio lleno de aire dentro de la pasta de cemento, mortero, o concreto.

**Vacío:** Espacio entre los trozos de agregado de llanta, expresado como un porcentaje del espacio total que ocupan las tiras de llanta.

**Vagón de carga lateral:** Tipo de vagón de ferrocarril que se usa para transportar materiales. El vagón se inclina hacia un lado para vaciarlo y retirar completamente los materiales.

**Vagón de descarga lateral:** Tipo de vagón utilizado para transportar materiales.

**Válvula:** Dispositivo usado para poner, retener, revisar o liberar aire en una cámara de llanta o en una llanta sin cámara ya montada.

**Velocidad de curado:** El tiempo relativo que se requiere para llegar a un estado predeterminado de vulcanización en condiciones específicas.

**Venteo:** Operación mediante la cual las llantas convencionales se perforan antes de recauchutarlas para protegerlas del aire encerrado, que provoca la separación de la carcasa.

**Vida útil de la banda de rodamiento:** El lapso que la banda de rodamiento permanece en servicio antes de desgastarse, medido en millas u horas de operación.

**Viruta de llanta:** Llanta de desecho clasificada que tiene una forma geométrica básica, por lo general de un tamaño de dos pulgadas o menos, a la que se le ha extraído la mayor parte del alambre (también conocida como Cascajo de llanta).

**Vulcanización:** Proceso irreversible mediante el cual la estructura del hule se cambia (se entrecruza con el azufre) para hacerlo menos plástico (menos pegajoso o parecido a la plastilina) y más elástico (también se le conoce como Curado).



# APÉNDICE A

## *Especificaciones para el material ADL*

### GENERALIDADES DEL ADL

El material debe estar hecho de llantas de desecho, que habrán de triturarse a los tamaños especificados a continuación mediante un proceso de cizallamiento. No se permite usar ADL producido en molino de martillo. El ADL debe estar libre de todo tipo de contaminantes, como aceite, grasa, gasolina, combustible diesel, etc. que puedan lixiviarse hacia las aguas subterráneas o generar el riesgo de un incendio. Por ningún motivo el ADL debe contener restos de llantas que hayan estado en un incendio, debido a que el calor del fuego puede hacer que se liberen productos líquidos de petróleo de la llanta y esto puede representar un riesgo de incendio cuando se coloquen los trozos en un relleno. El ADL debe estar libre de fragmentos de madera, virutas, o cualquier otro material orgánico fibroso. El ADL debe tener menos del 1 por ciento (por peso) de fragmentos de metal que no estén al menos parcialmente cubiertos por hule. Los fragmentos de metal que estén parcialmente cubiertos por hule no deben sobresalir más de 25 mm (1 pulgada) del borde cortado del ADL en el 75 por ciento de las piezas (por peso), ni más de 50 mm (2 pulgadas) en el 90 por ciento de las piezas (por peso). La gradación se debe medir de conformidad con la norma C136-05 (también denominada AASHTO T-27), "Método estándar para el análisis del cribado de agregado fino y grueso," salvo que el tamaño mínimo de muestra debe ser de 6 a 12 kg (15 a 25 libras) en el caso del ADL Tipo A y 16 a 23 kg (35 a 50 libras) en el caso del ADL Tipo B.

50 por ciento (por peso) debe pasar por la criba de malla de 76 mm (3 pulgadas); un máximo de 25 por ciento (por peso) debe pasar por la criba de malla de 38 mm (1.5 pulgadas), y un máximo de 1 por ciento (por peso) debe pasar por la criba No. 4 (4.75 mm; 0.187 pulgadas).

### ADL TIPO A

El ADL Tipo A debe tener una dimensión máxima, medida en cualquier dirección, de 203 mm (8 pulgadas). Asimismo, en el ADL Tipo A, el 100 por ciento debe poder pasar por la criba de malla de 102 mm (4 pulgadas) cuadradas; un mínimo de 95 por ciento (por peso) debe pasar por la criba de malla de 75 mm (3 pulgadas) cuadradas; un máximo de 50 por ciento (por peso) debe pasar por la criba de malla de 38 mm (1.5 pulgadas) cuadradas, y un máximo de 5 por ciento (por peso) debe pasar por la criba No. 4.

### ADL TIPO B

Un mínimo del 90 por ciento (por peso) debe tener una dimensión máxima, medida en cualquier dirección, de 300 mm (12 pulgadas), y el 100 por ciento debe tener una dimensión máxima, medida en cualquier dirección, de 450 mm (18 pulgadas). Por lo menos uno de los costados se debe separar de la banda de rodamiento de la llanta. Un mínimo de 75 por ciento (por peso) debe poder pasar por la criba de malla de 203 mm (8 pulgadas); un máximo de

# APÉNDICE B

## *Lineamientos de diseño para minimizar el calentamiento interno de los rellenos de llantas trituradas*

(JULIO DE 1997; MODIFICADO EN 2003)

### ANTECEDENTES

Desde 1988 se han construido más de 70 rellenos de llantas trituradas con un espesor de menos de 1 m, además de otros diez de menos de 4 m de espesor. En 1995, tres rellenos de llantas trituradas con un espesor de más de 8 m sufrieron una reacción catastrófica de calentamiento interno. Estas experiencias negativas han sido en menoscabo del uso de rellenos de llantas trituradas en obras carreteras.

Las posibles causas de la reacción son la oxidación de las taloneras expuestas y la oxidación del hule. Los microbios también han sido factor en ambas reacciones. Aunque los detalles de la reacción aún se están estudiando, se cree que los factores que generan las condiciones propicias para la oxidación del acero y/o el hule expuestos son los siguientes: libre acceso al aire, libre acceso al agua; retención de calor causada por el alto valor aislante de los trozos de llanta, en combinación con un gran espesor del relleno; grandes cantidades de taloneras expuestas; tamaño más pequeño de los trozos de llanta, y cantidades excesivas de partículas de hule granulado, así como la presencia de nutrientes orgánicos e inorgánicos que pudieran exacerbar la acción microbiana.

Los lineamientos de diseño que se presentan en las siguientes secciones fueron desarrollados para minimizar la posibilidad del calentamiento de los trozos de llanta al reducir las condiciones que propician esta reacción. A medida que se va aprendiendo más sobre las causas de la reacción, podría ser posible relajar algunos de estos lineamientos. En el desarrollo de los lineamientos se consideraron el efecto aislante que provoca el incremento del espesor del relleno, y el desempeño favorable de los proyectos en los que se han usado rellenos de llantas trituradas de menos de 4 m de espesor. Por lo tanto, los lineamientos de diseño son menos estrictos para los proyectos que contemplan capas más delgadas de llanta triturada. Los lineamientos se dividen en dos clases: Rellenos Tipo I con capas de llanta triturada de menos de 1 m de espesor, y Rellenos Clase II con capas de llanta triturada de 1 a 3 m de espesor. Aunque no ha habido proyectos con relleno de llantas trituradas de menos de 4 m de espesor que hayan tenido

alguna reacción de calentamiento catastrófica, para mayor seguridad, no se recomienda usar capas de llanta triturada de más de 3 m de espesor. Además de los lineamientos aquí indicados, el diseñador debe elegir el tamaño más grande de llanta triturada, así como el mayor grosor de la tierra suprayacente para abordar las inquietudes sobre la estructura del pavimento, etc., a fin de cumplir con los requisitos impuestos por los responsables de ingeniería de la obra. Los lineamientos son para el diseño de depósitos exclusivos de llantas trituradas. El diseño de los rellenos que consistan en una mezcla o en capas alternadas de llanta triturada y tierra mineral libre de materia orgánica, debe considerarse caso por caso.

### LINEAMIENTOS GENERALES PARA TODOS LOS RELLENOS DE LLANTAS TRITURADAS

Todas las llantas se deben triturar de manera que el trozo más grande sea: (1) no mayor a 0.6 mm en cualquier dirección que se mida, o (2) no mayor a un cuarto de la circunferencia de la llanta, lo que sea menos. Por lo menos uno de los costados se debe separar de la banda de rodamiento.

Las llantas trituradas deben estar libres de todo tipo de contaminantes, como aceite, grasa, gasolina, combustible diesel, etc. que puedan lixiviar hacia las aguas subterráneas o generar el riesgo de un incendio. Por ningún motivo las llantas trituradas deben contener restos de llantas que hayan estado en un incendio, debido a que el calor del fuego puede hacer que se liberen productos líquidos de petróleo de la llanta y esto puede representar un riesgo de incendio cuando se coloquen los trozos en un relleno.

### RELLENOS CLASE I

#### Lineamientos para el material

En el caso de los trozos de llanta, un máximo de 50 por ciento (por peso) debe pasar por la criba de malla de 38 mm, y un máximo de 5 por ciento (por peso) debe pasar por la criba de 4.75 mm.

#### Lineamientos de diseño

No se requieren lineamientos de diseño para minimizar el calentamiento de los rellenos Clase I.

## RELLENOS CLASE II

### Lineamientos para el material

Un mínimo de 25 por ciento (por peso) de los trozos de llanta deben poder pasar por la criba de 38 mm, y un máximo de 1 por ciento (por peso) debe pasar por la criba de 4.75 mm. Los trozos de llanta deben estar libres de fragmentos de madera, virutas, o cualquier otro material orgánico fibroso. Las llantas trituradas deben tener menos del 1 por ciento (por peso) de fragmentos de metal que no estén al menos parcialmente cubiertos por hule. Los fragmentos de metal que estén parcialmente cubiertos por hule no deben sobresalir más de 25 mm (1 pulgada) del borde cortado de la llanta en el 75 por ciento de las piezas, ni más de 50 mm en el 100 por ciento de las piezas.

**Lineamientos de diseño.** El relleno de llantas trituradas se debe construir minimizando la infiltración de agua y aire. Además, no debe haber contacto directo entre los trozos de llanta y el suelo que contenga materia orgánica, como la tierra de la capa superficial. Una forma de lograr esto sería cubrir la parte superior y los costados del relleno con una capa de tierra mineral compacta de 0.5 de espesor con un mínimo de 30 por ciento de partículas finas. El suelo mineral debe estar libre de materia orgánica y se debe separar de los trozos de llanta con un geotextil.

La parte superior de la capa de suelo mineral se debe dejar en declive para que pueda drenar el agua del relleno de llantas trituradas. Se podría colocar sobre la capa de suelo mineral el relleno que sea necesario para cumplir con el diseño general del proyecto. Si el proyecto incluye pavimentación, se recomienda que el pavimento se extienda hacia el acotamiento del terraplén o que se tomen otras medidas para minimizar la infiltración en el borde del pavimento.

Se debe evitar el uso de funciones de drenaje en el fondo de relleno que pudieran dar acceso libre al aire. Esto incluye en forma enunciativa, más no limitativa, capas de drenaje de granulometría abierta hacia el exterior en un lado del relleno, y agujeros para drenaje en las paredes. En algunas condiciones podría usarse un suelo granulado bien nivelado como capa de drenaje. Se debe reducir al mínimo el grosor de la capa de drenaje en el punto en el que descarga al exterior en un lado del relleno. En el caso de rellenos de llantas trituradas colocados contra algún muro, se recomienda que los agujeros para drenaje en el muro se cubran con suelo granulado bien nivelado. El suelo granulado se debe separar de la llanta triturada con geotextil.

### LINEAMIENTOS GENERALES PARA TODOS LOS RELLENOS DE LLANTAS TRITURADAS (Julio de 1997; modificado en 2003)

Todas las llantas deben triturarse de manera que el trozo más grande sea: (1) no mayor a 0.6 m en cualquier dirección que se mida, o (2) no más de un cuarto de la circunferencia de la llanta, lo que sea menor. Por lo menos uno de los costados se debe separar del rodamiento de la banda

Los trozos de llanta deben estar libre de todo tipo de contaminantes, como aceite, grasa, gasolina, combustible diesel, que pudieran representar un riesgo de incendio.

Por ningún motivo la llanta triturada debe contener restos de llantas que hayan estado en un incendio.

#### RELLENOS CLASE I

Máximo de 50 por ciento (por peso) pasa por la criba de 38 mm

Máximo de 5 por ciento (por peso) pasa la criba de 4.75 mm

#### RELLENOS CLASE II (1-3 m de espesor)

Máximo de 25 por ciento (por peso) pasa por la criba de 38 mm

Máximo de 50 por ciento (por peso) pasa por la criba de 50 mm

Máximo de 1 por ciento (por peso) pasa por la criba de 4.75 mm.

Los trozos de llanta deben estar libres de fragmentos de madera, virutas, o cualquier otro material orgánico fibroso.

Las llantas trituradas deben tener menos del 1 por ciento (por peso) de fragmentos de metal que no estén al menos parcialmente cubiertos por hule.

Los fragmentos de metal que estén parcialmente cubiertos por hule no deben sobresalir más de 25 mm del borde cortado de las llantas trituradas en el 75 por ciento de las piezas (por peso), ni más de 50 mm en el 90 por ciento de las piezas (por peso)

Se debe minimizar la infiltración de agua y aire hacia el relleno de llantas trituradas

No debe haber contacto directo entre las llantas trituradas y el suelo que contenga materia orgánica, como la tierra de la capa superficial

Las llantas trituradas se deben separar del suelo que las rodea con un geotextil

Se debe evitar el uso de drenaje en el fondo del relleno que pudiera facilitar el acceso del aire

# APÉNDICE C

## Propiedades técnicas del ADL

En este apéndice se presentan algunas propiedades técnicas del agregado derivado de llantas (ADL), incluyendo la gradación, el peso unitario compactado, la compresibilidad, el asentamiento con el tiempo, y la resistencia al corte.

### GRADACIÓN

Cuando la zona de ADL es mayor a 1 m (3.3 pies) de espesor es conveniente que los trozos sean grandes ya que éstos son menos susceptibles al calentamiento espontáneo (como se mencionó en el Apéndice B). Sin embargo, cuando el ADL contiene una cantidad considerable de trozos de más de 300 mm (12 pulgadas), éstos tienden a ser difíciles de esparcir en un espesor uniforme. Por lo tanto, la especificación típica exige que por menos un 90 por ciento (por peso) del ADL tenga una dimensión máxima, medida en cualquier dirección, de menos de 300 mm (12 pulgadas), y que el 100 por ciento del ADL tenga una dimensión máxima de menos de 450 mm (18 pulgadas). Además, por lo menos el 75 por ciento (por peso) debe poder pasar por una criba de 200 mm (8 pulgadas) y por lo menos uno de los costados debe separarse de la banda de rodamiento de la llanta.

A fin de minimizar la cantidad de trozos pequeños, que pueden ser susceptibles al calentamiento espontáneo, las especificaciones requieren que no más del 50 por ciento (por peso) pase por una criba de 75 mm (3 pulgadas), 25 por ciento (por peso) pase por una criba de 38 mm (1.5 pulgadas), y no más del 1 por ciento (por peso) pase por una criba No. 4 (4.75 mm). Los trozos de este tamaño comúnmente se denominan ADL Tipo B. Cuando se recojan muestras para el análisis de gradación, se deben tomar directamente del transportador de descarga de la máquina procesadora. Este procedimiento garantizar que la fracción de menos No. 4 sea representativa, lo cual no sucede cuando se recogen las muestras sacando los trozos de un apilamiento con pala. El ADL que cumple con los requisitos de tamaño indicados generalmente tiene una gradación uniforme. En la Figura C-1 se muestran los resultados típicos.

### PESO UNITARIO COMPACTADO

El peso unitario compactado del ADL se han investigado en laboratorio en el caso de trozos de hasta 75 mm (3 pulgadas). Estas pruebas generalmente se hicieron con moldes de compactación de 254 mm (10 pulgadas) o 305 mm (12 pulgadas) de diámetro interno y compactación

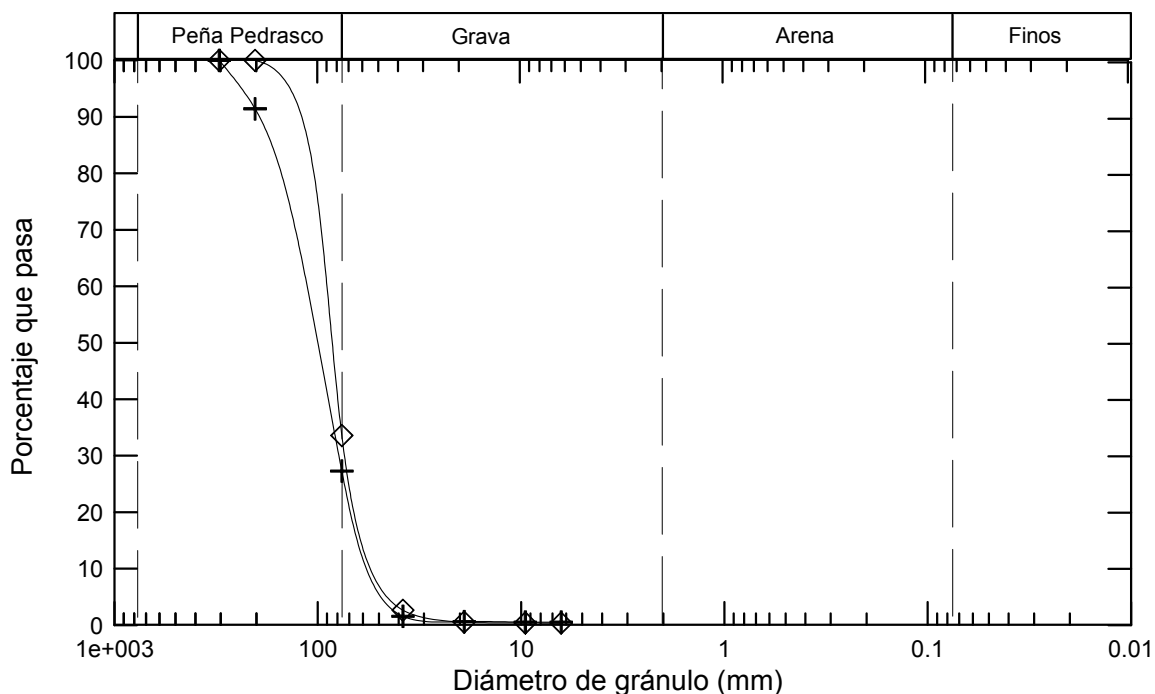


Figura C-1. Gradación del ADL Tipo B usado como relleno ligero en el Intercambio Vial del Aeropuerto de Portland.



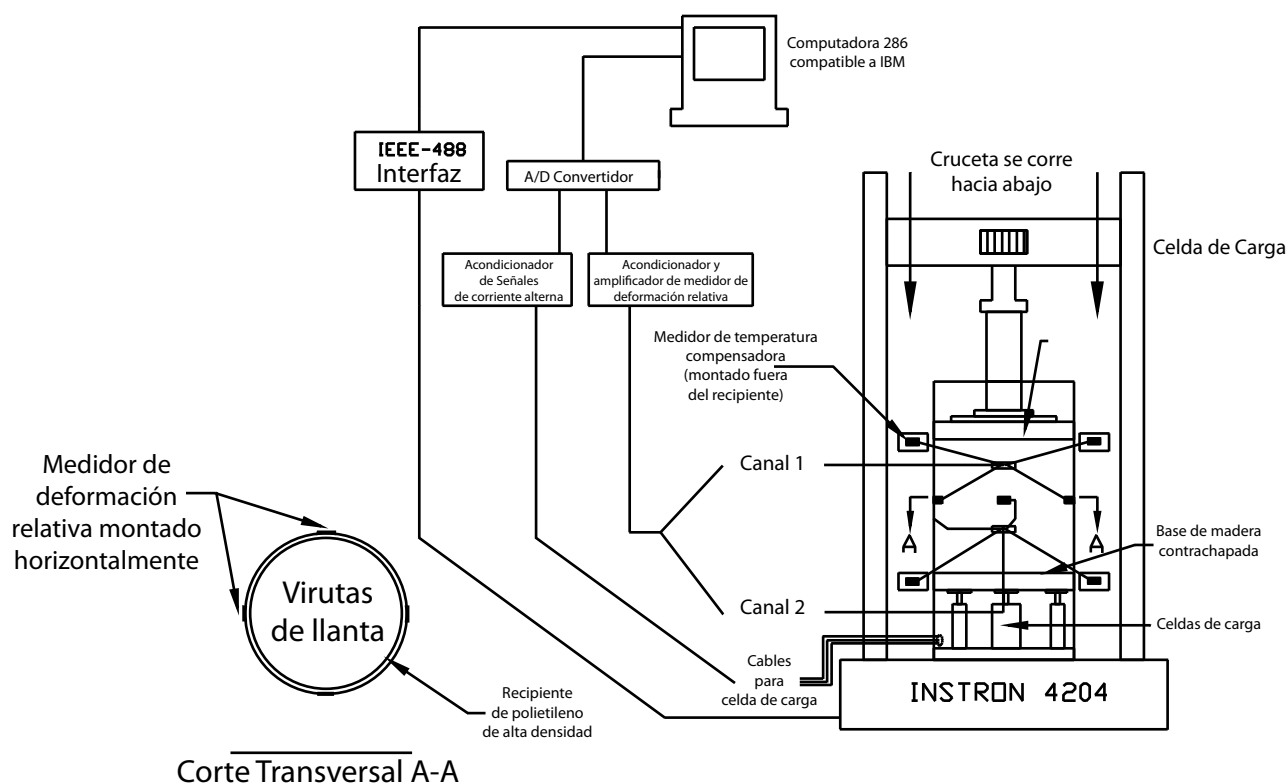


Figura C-2. Aparato medidor de compresibilidad usado por Nickels (Ref. 12).

por impacto. Los pesos unitarios compactados secos oscilaron entre 0.61 a 0.69 Mg/m<sup>3</sup> (38 a 43 psf) (Ref.1).

Se investigó el efecto de la energía de compactación y el contenido de agua para la compactación. Aumentar la energía de compactación de 60 por ciento en el ensayo Proctor estándar a un 100 por ciento en el Proctor modificado incrementó el peso unitario compactado únicamente en 0.02 Mg/m<sup>3</sup> (1.2 psf), lo cual demuestra que la energía de compactación tiene solamente un efecto leve en el peso unitario resultante. Los pesos unitarios fueron más o menos los mismos en las muestras secadas a aire y en las muestras con superficie saturada seca (alrededor del 4 por ciento de contenido de agua), lo que indica que el contenido de agua tienen un efecto insignificante en el peso unitario (Refs. 7, 11). Este descubrimiento es importante porque indica que no hay necesidad de controlar el contenido de humedad del ADL durante su colocación en la obra.

Es impráctico medir en laboratorio el peso unitario compactado del ADL de tamaño máximo de 300 mm (12 pulgadas). Sin embargo, los resultados de un terraplén de carretera construido con ADL grande sugieren que el peso unitario del ADL de tamaño máximo de 300 mm (12 pulgadas) es menor al del ADL de tamaño máximo de 75 mm (3 pulgadas) (Ref. 10).

## COMPRESIBILIDAD

La compresibilidad del ADL con un tamaño máximo de 75 mm (3 pulgadas) se ha medido en laboratorio. Un aparato utilizado por Nickels (Ref. 12) tenía un diámetro interno de 356 mm (14 pulgadas) y podía medir muestras de ese espesor. Una de las dificultades para medir la compresibilidad del ADL la constituye la fricción entre el ADL y la pared interna del recipiente de prueba. El aparato empleado por Nickels (Ref. 12) utiliza celdas de carga para medir la carga soportada por la muestra tanto en la parte superior como en la parte inferior, como lo indica la Figura C-2. Aunque Nickels usó grasa para lubricar el interior del recipiente, hasta el 20 por ciento de la carga aplicada a la parte superior de la muestra se transfirió a las paredes del recipiente por fricción. La Figura C-3 muestra la compresibilidad de un ADL con tamaño máximo de 75 mm (3 pulgadas). Los pesos unitarios iniciales oscilaron entre 0.51 y 0.64 Mg/m<sup>3</sup> (32.1 y 40.1 psf). Hay una tendencia general a que la compresibilidad se reduzca a medida que se incrementa el peso unitario inicial. Los resultados de las pruebas MD1 y MD4 se aplican más al uso de ADL como relleno ligero, ya que su peso unitario inicial es típico de las condiciones que se encuentran en las obras. Manion y Humphrey (Ref. 11) y Humphrey y Manion (Ref. 7), indican la compresibilidad de las tensiones de hasta 480 kiloPascas (kPa) (70 libras por pulgada cuadrada [psi]). No se dispone de datos de laboratorio sobre la compresibilidad del ADL con tamaño

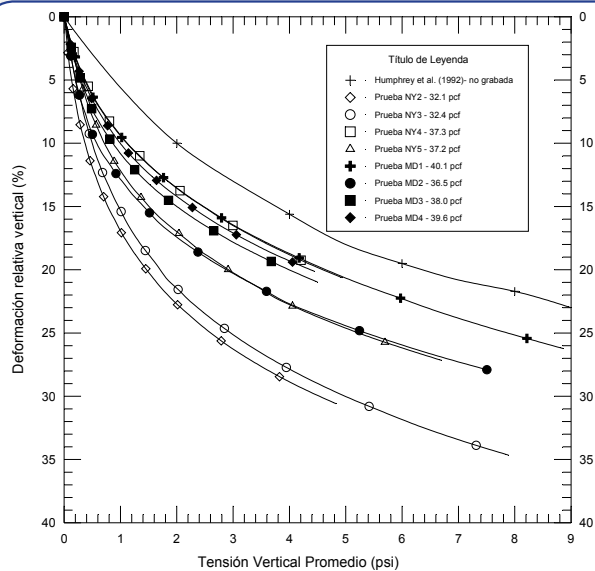


Figura C-3. Compresibilidad del ADL con tamaño máximo de 75 mm (3 pulgadas) (Ref. 12).

máximo de más de 75 mm (3 pulgadas); sin embargo, las mediciones en campo indican que el ADL con tamaño máximo de 300 mm (12 pulgadas) es menos comprimible que el ADL más pequeño.

## ASENTAMIENTO CON EL TIEMPO

El ADL muestra un poco de asentamiento con el tiempo. Tweedie y otros (Ref. 13) midieron el asentamiento con el tiempo de rellenos de ADL de gran espesor. Se probaron tres tipos de ADL con tamaños máximos que oscilaban entre 38 y 75 mm (1.5 a 3 pulgadas). El relleno tenía 4.3 m (14 pies) de espesor y una sobrecarga de 36 kPa (750 psf), lo que equivale a unos 1.8 m (6 pies) de tierra. En la Figura C-4 se muestra la deformación vertical en

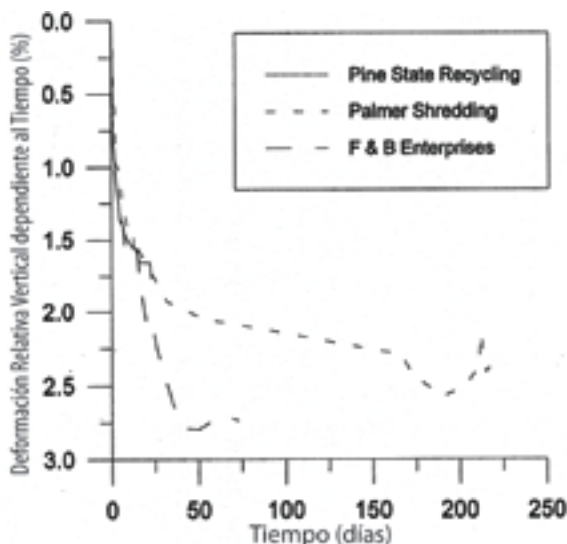


Figura C-4. Asentamiento con el tiempo del ADL sujeto a una sobrecarga de 750 psf (36 kPa) (Tweedie y otros, 1997).

comparación con el tiempo transcurrido. Se observa que el asentamiento con el tiempo ocurrió alrededor de 2 meses después de aplicar la sobrecarga. Durante los primeros 2 meses ocurrió alrededor del 2 por ciento de la deformación vertical, lo cual es equivalente a más de 75 mm (3 pulgadas) de asentamiento para este relleno de 4.3 m (14 pies) de espesor. Las mediciones concuerdan en general con las pruebas de laboratorio de compresibilidad con el tiempo realizadas por Humphrey y otros (Ref. 7). Cuando se usa el ADL como relleno detrás del estribo de un puente sostenido por un pilote u otras estructuras que experimentan poco asentamiento, es importante dar tiempo suficiente para que la mayor parte del asentamiento del ADL con el tiempo ocurra antes de hacer la nivelación y pavimentación final. El asentamiento con el tiempo es menos problema cuando los extremos del relleno de ADL se pueden rebajar del espesor completo a cero en una distancia razonable.

## RESISTENCIA AL CORTE

La resistencia al corte del ADL se ha medido usando corte directo y un aparato de corte triaxial. El ADL que normalmente se usa en aplicaciones de ingeniería civil requiere que las muestras sean de tamaño varias veces más grande que los que se usan para suelos comunes. Este método generalmente se ha usado para el ADL de 25 mm (1 pulgadas) o menos, debido a la limitada disponibilidad del aparato de corte triaxial grande. Además, el aparato de corte triaxial no es conveniente si sobresalen taloneras del borde cortado del ADL, ya que los alambres perforan la membrana que se usa para rodear la muestra.

La resistencia al corte del ADL se ha medido usando corte triaxial (Refs. 2, 3, 4, 8); y corte directo (Refs. 5, 6, 7, 8, 9). En la Figura C-5 se muestran los envolventes de falla determinados en las pruebas de corte directo y triaxial del ADL con un tamaño máximo de entre 9.5 y 900 mm (0.37 a 35 pulgadas). Los datos de Gebhard y otros (Ref. 6) sobre ADL de mayor tamaño entran en este mismo rango. Los datos disponibles sugieren que el tamaño del ADL no afecta la resistencia al corte. Además, los resultados de las pruebas de corte triaxial y directo son similares. En general, los envolventes de falla parecen ser cóncavos hacia abajo. Por lo tanto, los envolventes de falla lineal de ajuste óptimo se aplican únicamente en un rango limitado de tensiones. En el Cuadro C-1 se muestran los ángulos de fricción y las ordenadas de cohesión de los envolventes de falla lineal de los datos que aparecen en la Figura C-5. El ADL requiere suficiente deformación para movilizar su resistencia (Ref. 8). Por lo tanto, se debe adoptar un enfoque conservador al elegir los parámetros para terraplenes de ADL cimentados sobre arcilla delicada.

## Referencias

1. ASTM International. 1998. "Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications." ASTM D6270-98, ASTM International. W. Conshohocken, Pennsylvania.

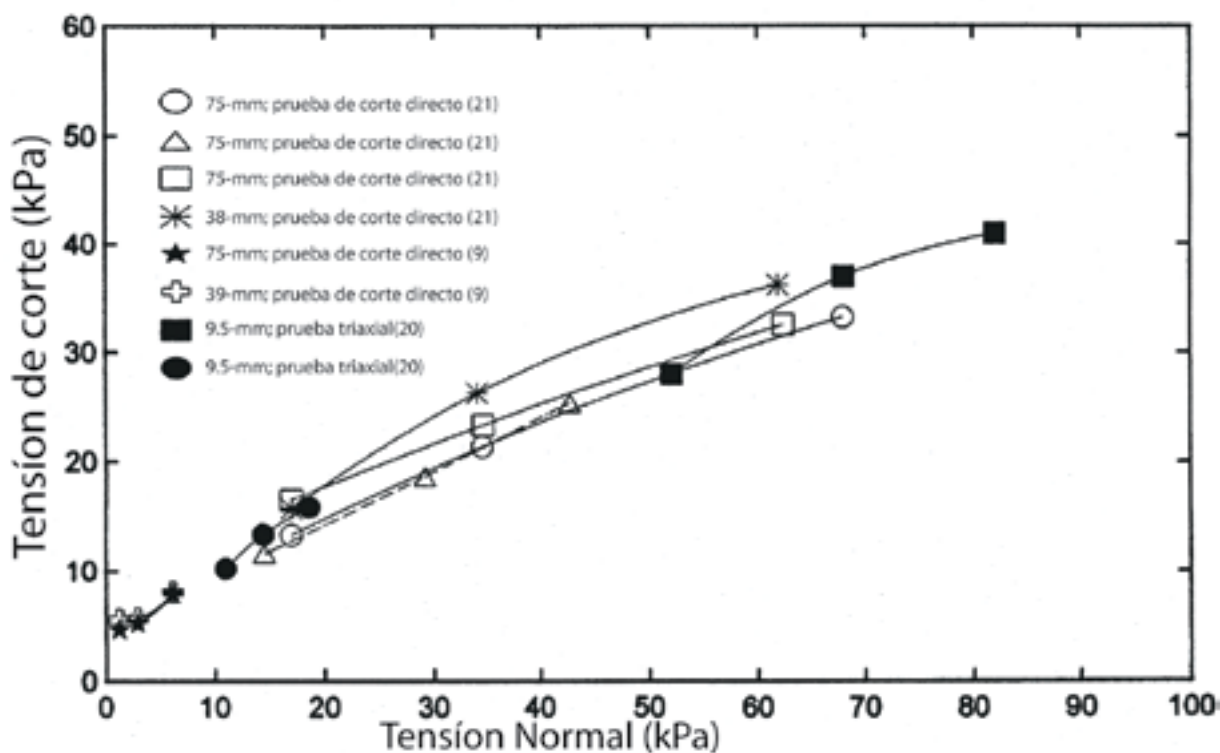


Figura C-5. Envolvente de falla del ADL con tamaños máximos que oscilan entre 0.37 y 3 pulgadas (9.5 a 75 mm).

**Cuadro C-1. Parámetros de resistencia del ADL.**

Proveedor	Tamaño máximo del trozo		Método de prueba	Rango aplicable de tensión normal		$\Phi$ grad.	Ordenada de cohesión	
	pulgadas	mm		psf	kPa		psf	kPa
F&B	0.5	38	C.D.	360 to 1300	17 to 62	25	180	8.6
Palmer	3	75	C.D.	360 to 1300	17 to 62	19	240	11.5
Pine State	3	75	C.D.,	360 to 1400	17 to 68	21	160	7.7
Pine State	3	75	C.D.	310 to 900	15 to 43	26	90	4.3
Dodger	35	900	C.D.	120 to 580	5.6 to 28	37	0	0
Desconocido	0.37	9.5	Triaxial	1100 to 1700	52 to 82	24	120	6.0
Desconocido	0.37	9.5	Triaxial	230 to 400	11 to 19	36	50	2.4

Note: C.D. = Corte Directo

2. Ahmed, I. 1993. "Laboratory Study on Properties of Rubber Soils," Report No. FHWA/IN/JHRP-93/4, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
3. Benda, C.C. 1995. "Engineering Properties of Scrap Tires Used in Geotechnical Applications," Report 95-1, Materials and Research Division, Vermont Agency of Transportation, Montpelier, Vermont.
4. Bressette, T. 1984. "Used Tire Material as an Alternative Permeable Aggregate," Report No. FHWA/CA/TL-84/07, Office of Transportation Laboratory, California Department of Transportation, Sacramento, California.
5. Cosgrove, T.A. 1995. "Interface Strength between Tire Chips and Geomembrane for Use as a Drainage Layer in a Landfill Cover." Proceedings of Geosynthetics'95, Industrial Fabrics Association, St. Paul, Minnesota Vol. 3, pp. 1157-1168.
6. Gebhardt, M.A., Kjartanson, B.H., and Lohnes, R.A. 1998. "Shear Strength of Large Size Shredded Scrap Tires as Applied to the Design and Construction of Ravine Crossings." Proceedings of the 4th International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development, Danvers, Massachusetts.
7. Humphrey, D.N. and Manion, W.P. 1992. "Properties of Tire Chips for Lightweight Fill." Proceedings of Grouting, Soil Improvement, and Geosynthetics, New Orleans, Louisiana, Vol. 2, pp. 1344-1355.
8. Humphrey, D.N., and Sandford, T.C. 1993. "Tire Chips as Lightweight Subgrade Fill and Retaining Wall Backfill." Proceedings of the Symposium on Recovery and Effective Reuse of Discarded Materials and By-Products for Construction of Highway Facilities, Federal Highway Administration, Washington, D.C., pp. 5-87 to 5-99.
9. Humphrey, D.N., Sandford, T.C., Cribbs, M.M., and Manion, W.P. 1993. "Shear Strength and Compressibility of Tire Chips for Use as Retaining Wall Backfill." Transportation Research Record No. 1422, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 29-35.
10. Humphrey, D.N., Whetten, N., Weaver, J., Recker, K., and Cosgrove, T.A. 1998. "Tire TDA as Lightweight Fill for Embankments and Retaining Walls." Proceedings of the Conference on Recycled Materials in Geotechnical Applications, C. Vipulanandan and D. Elton, eds., ASCE, pp. 51-65.
11. Manion, W.P., and Humphrey, D.N. 1992. "Use of Tire Chips as Lightweight and Conventional Embankment Fill, Phase I - Laboratory." Technical Paper 91-1, Technical Services Division, Maine Department of Transportation, Augusta, Maine.
12. Nickels, W.L., Jr. 1995. "The Effect of Tire Chips as Subgrade Fill on Paved Roads." M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Maine, Orono, Maine, 215 pp.
13. Tweedie, J.J., Humphrey, D.N. and Sandford, T.C. 1997. "Tire Chips as Lightweight Backfill for Retaining Walls - Phase II," A Study for the New England Transportation Consortium, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maine, Orono, Maine, 291pp.



# APÉNDICE D

## Cálculo del peso unitario final in situ y el sobredimensionamiento

### Peso unitario final in situ

El peso unitario final in situ del agregado derivado de llantas (ADL) se debe calcular durante el diseño. Este peso unitario es un dato necesario para realizar el análisis de estabilidad de taludes y el de estabilidad de muros de contención. En el cálculo del peso unitario in situ se debe considerar la compresión inmediata del ADL bajo su propio peso y el peso de la tierra suprayacente y el pavimento. El procedimiento de cálculo, que es sencillo, se describe a continuación:

Paso 1. A partir de las pruebas de compactación en laboratorio o de los valores típicos, se determina el peso unitario seco compactado y sin comprimir del ADL ( $\gamma_{di}$ ) (para el ADL Tipo A con un tamaño máximo de 75 mm [3 pulgadas]). Use 0.64 mg/m<sup>3</sup> [40 psf]).

Paso 2. Se calcula el contenido de agua del ADL ( $w$ ) in situ y se usa este valor para determinar el peso unitario total (húmedo) compactado y sin comprimir del ADL:  $\gamma_{ti} = \gamma_{di} (1+w)$ . A menos que se cuente con información más precisa, use  $w = 3$  o 4 por ciento.

Paso 3. Se determina el esfuerzo vertical en el centro de la capa de ADL ( $\sigma_{v-centro}$ ). Para calcular el esfuerzo vertical, se plantea como hipótesis el peso unitario comprimido del ADL ( $\gamma_{tc}$ ) (se sugiere 0.80 Mg/m<sup>3</sup> [50 psf]) para la primera prueba).

$$\sigma_{v-centro} = t_{tierra}(\gamma_{t-tierra}) + (t_{ADL}/2)(\gamma_{tc})$$

donde:  $t_{tierra}$  = espesor de la capa de tierra suprayacente

$\gamma_{t-tierra}$  = peso unitario total (húmedo) de la tierra suprayacente

$t_{ADL}$  = espesor comprimido de la capa de ADL

(Nota: En la ecuación, el espesor de la capa de ADL se divide en dos porque se está calculando el esfuerzo en el centro de la capa.)

Paso 4. Se determina el porcentaje de compresión ( $\epsilon_v$ ) usando  $\sigma_{v-centro}$  y la compresibilidad medida en laboratorio del ADL; para un ADL con tamaño máximo de 75 mm (3 pulgadas), use los resultados de la prueba MD1 o MD4 en D-1.

Paso 5. Se determina el peso unitario húmedo comprimido del ADL:  $\gamma_{tc} = \gamma_{ti} / (1 - \epsilon_v)$ . De ser necesario, regrese al paso 3 con un mejor cálculo del peso unitario húmedo comprimido.

Este procedimiento se usó para prever el peso unitario comprimido de un relleno de ADL de 4.3 m (14 pies) de espesor cubierto con 1.8 m (6 pies) de tierra que se

construyó en Topsham, Maine. En el tercio superior del relleno se usó ADL con un tamaño máximo de 75 mm (3pgg), mientras que en la parte inferior se usó ADL con un tamaño máximo de 150 mm (6 pulgadas). El peso unitario húmedo comprimido previsto fue de 0.91 Mg/m<sup>3</sup> (57 psf). El peso unitario real in situ calculado a partir del volumen final de la zona de ADL y el peso del ADL entregado en la obra también fue de 0.91 Mg/m<sup>3</sup> (57 pcf). Lo anterior refrenda la confiabilidad las pruebas de compresibilidad en laboratorio y el procedimiento para calcular el peso unitario húmedo comprimido del ADL con tamaño máximo entre 75 y 100 mm (3 y 6 pulgadas). Sin embargo, cuando se aplicó el procedimiento a un ADL con tamaño máximo de 300 mm (12 pulgadas), el peso unitario fue mayor que el determinado en campo. Para un terraplén de carretera construido en Portland, Maine, con ADL de tamaño máximo de 300 mm (12 pulgadas), el peso unitario húmedo comprimido previsto era de 0.93 Mg/m<sup>3</sup> (58 pcf) en comparación con un peso unitario real de 0.79 Mg/m<sup>3</sup> (49 pcf). Los motivos para esta diferencia parecen ser un menor peso unitario inicial sin comprimir y la menor compresibilidad del ADL de mayor dimensión. Se recomienda que el peso unitario que se calcule usando el procedimiento anteriormente indicado se reduzca en un 15 por ciento para el ADL de tamaño máximo de 300 mm (12 pulgadas).

### Cálculo del sobredimensionamiento

El ADL experimenta una compresión inmediata al aplicársele una carga, como el peso de una cubierta de tierra por encima. La cota superior de las capas de ADL se debe sobredimensionar para compensar por esta compresión. El sobredimensionamiento se determina usando el procedimiento indicado a continuación, con la ayuda de un diagrama de diseño (Figura D-2). El diagrama de diseño se desarrolló usando una combinación de pruebas de compresibilidad en laboratorio y datos sobre compresión tomados en los proyectos de campo. La Figura D-2 se aplica a ADL Tipo B (tamaño máximo de 300 mm [12 pulgadas]) que se ha colocado y compactado en capas de 300 mm (12 pulgadas) de espesor. Para usar este procedimiento con ADL Tipo A más pequeño (tamaño máximo de 3 pulgadas), el sobredimensionamiento calculado se incrementa un 30 por ciento.

El sobredimensionamiento para una sola capa de ADL se deriva directamente de la Figura D-2. Primero se calcula el

esfuerzo vertical que habrá de aplicarse a la parte superior de la capa de ADL como la suma de los pesos unitarios multiplicada por el espesor de las capas suprayacentes. Luego se incorpora la Figura D-2 con el esfuerzo vertical calculado y el espesor final comprimido de la capa de ADL para encontrar el sobredimensionamiento. Considere el siguiente ejemplo:

0.229 m de pavimento a 2.56 Mg/m<sup>3</sup>

0.610 m de base de agregado a 2.00 Mg/m<sup>3</sup>

0.610 m de cubierta de tierra de baja permeabilidad a 1.92 Mg/m<sup>3</sup>

3.05-m (10 pies) de espesor de una capa de ADL

El esfuerzo vertical aplicado a la parte superior de la capa de ADL sería:

$$(0.229 \text{ m} \times 2.56 \text{ Mg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2) + (0.610 \text{ m} \times 2.00 \text{ Mg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2) + (0.610 \text{ m} \times 1.92 \text{ Mg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2) = 29.1 \text{ kPa} \times 20.884 \text{ psf/kPa} = 610 \text{ psf}$$

Incorpore la Figura D-2 con 610 psf (29.1 kPa) y al usar la línea para una capa de ADL con espesor de 10 pies (3.05 m) el resultado es un sobredimensionamiento de 0.68 pies (0.21 m). Redondee con una aproximación de 0.1 m. Por lo tanto, se necesita un sobredimensionamiento de 0.2 m.

El sobredimensionamiento de la capa inferior de ADL de un corte transversal de dos capas también se determina directamente a partir de la Figura D-2. El procedimiento es el mismo que se describió

anteriormente para una sola capa de ADL. Considere el siguiente ejemplo:

0.229 m de pavimento a 2.56 Mg/m<sup>3</sup>

0.610 m de base de agregado a 2.00 Mg/m<sup>3</sup>

0.610 m de cubierta de tierra de baja permeabilidad a 1.92 Mg/m<sup>3</sup>

3.05-m (10 pies) de espesor de una capa de ADL a 0.80 Mg/m<sup>3</sup>

0.915 m de una capa de separación de tierra a 1.92 Mg/m<sup>3</sup>

3.05-m (10 pies) de espesor de una capa de ADL más baja

El esfuerzo vertical que se aplica a la parte superior de la capa de ADL sería:

$$(0.229 \text{ m} \times 2.56 \text{ Mg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2) + (0.610 \text{ m} \times 2.00 \text{ Mg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2) + (0.610 \text{ m} \times 1.92 \text{ Mg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2) + (3.05 \text{ m} \times 0.80 \text{ Mg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2) + (0.915 \text{ m} \times 1.92 \text{ Mg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2) = 70.4 \text{ kPa} \times 20.884 \text{ psf/kPa} = 1,470 \text{ psf}$$

Incorpore la Figura D-2 con 1470 psf (70.4 kPa) y al usar la línea para una capa de ADL con espesor de 10 pies (3.05) el resultado es un sobredimensionamiento de 1.13 pies (0.34 m). Redondee con una aproximación de 0.1 m. Por lo tanto, se necesita usar un sobredimensionamiento de 0.3 m en la capa más baja de ADL.

El sobredimensionamiento en la cota superior de la capa más elevada de ADL en un corte transversal de dos capas debe incluir tanto la compresión de la capa más elevada de ADL cuando se coloca el pavimento, la base y la cubierta de tierra, como la compresión de la capa

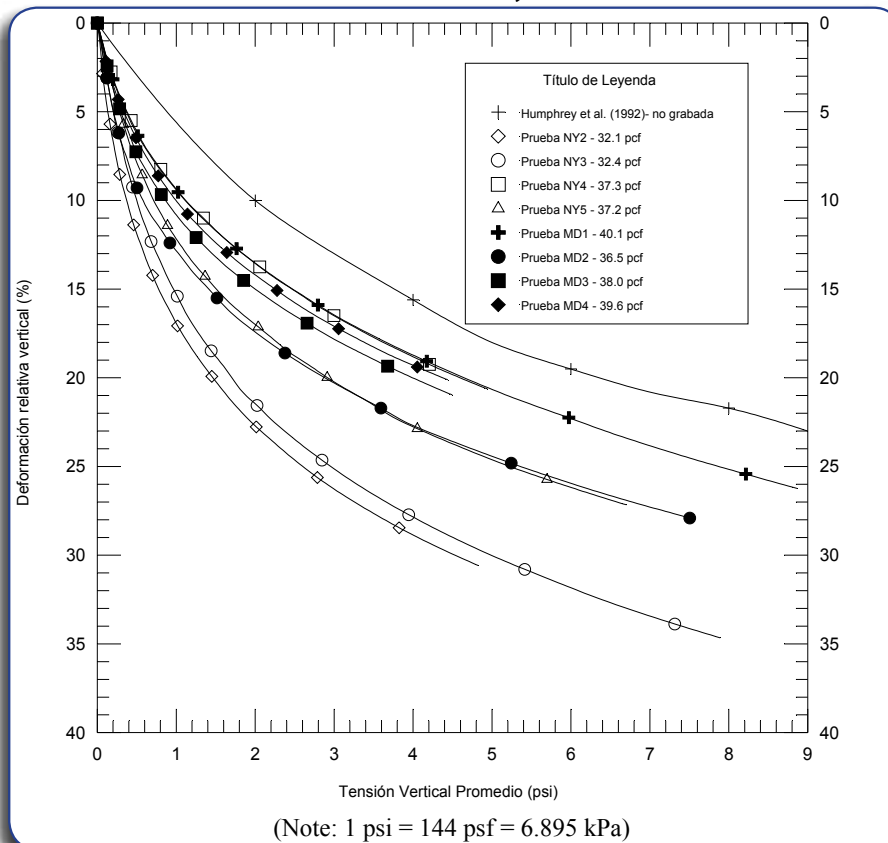


FIGURA D-1. Compresibilidad del ADL Tipo A con niveles de esfuerzo bajo (Ref. 1)

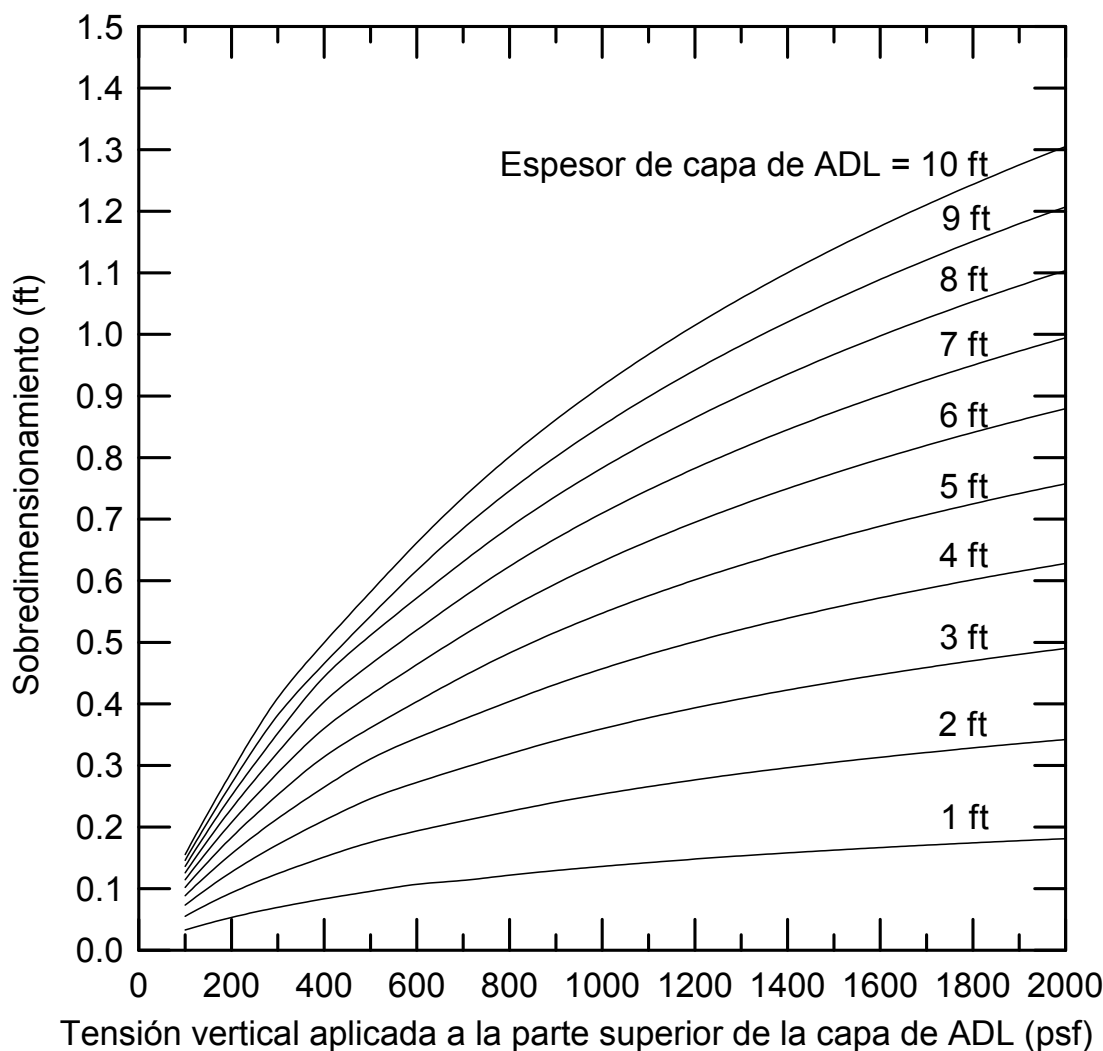


FIGURA D-2. Diagrama de diseño del sobredimensionamiento para ADL Tipo B

inferior de ADL que habría bajo el peso de estas capas. Dicho de otra forma, la capa inferior de ADL no se ha comprimido aún a su espesor definitivo. Esta compresión definitiva únicamente ocurrirá cuando el terraplén llegue a su nivelación final. Por lo tanto, la pregunta es: "¿Cuánta compresión de la capa más baja de ADL habrá debido a la colocación del pavimento, la base y la cubierta de tierra?" Considere el mismo ejemplo de las dos capas que se usó anteriormente.

0.229 m de pavimento a  $2.56 \text{ Mg/m}^3$

0.610 m de base de agregado a  $2.00 \text{ Mg/m}^3$

0.610 m de cubierta de tierra de baja permeabilidad a  $1.92 \text{ Mg/m}^3$

3.05 m (10 pies) de espesor de una capa de ADL a  $0.80 \text{ Mg/m}^3$

0.915 m de una capa de separación de tierra a  $1.92 \text{ Mg/m}^3$

3.05-m (10 pies) de espesor de una capa de ADL más baja

Paso 1. El esfuerzo vertical final aplicado a la parte superior de la capa más elevada de ADL sería:  $(0.229 \text{ m} \times 2.56 \text{ Mg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2) + (0.610 \text{ m} \times 2.00 \text{ Mg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2) + (0.610 \text{ m} \times 1.92 \text{ Mg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2) = 29.1 \text{ kPa} \times 20.884 \text{ psf/kPa} = 610 \text{ psf}$ . Incorpore la Figura D-2 con 610 psf (29.1 kPa) y al usar la línea para una capa de ADL de espesor de 10 pies (3.05 m) el resultado es una compresión de 0.68 pies (0.21 m).

Paso 2. Una vez que esté colocada la capa más elevada de ADL (pero no la cubierta superior de tierra), el esfuerzo vertical que se aplique a la parte superior de la capa más baja de ADL sería:  $(3.05 \text{ m} \times 0.80 \text{ Mg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2) + (0.915 \text{ m} \times 1.92 \text{ Mg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2) = 41.1 \text{ kPa} \times 20.884 \text{ psf/kPa} = 860 \text{ psf}$ . Para determinar la compresión de la capa más baja de ADL que ha ocurrido hasta este punto, incorpore la Figura D-2 con 860 psf (41.1 kPa) y al usar la línea para una capa de ADL de espesor de 10 pies (3.05 m) el resultado es una compresión de 0.84 pies (0.26 m).

Paso 3. Una vez que el terraplén llegue a su nivelación definitiva, el esfuerzo vertical que se aplique a la parte superior de la capa más baja de ADL sería de  $70.4 \text{ kPa} = 1470 \text{ psf}$ , como se calculó anteriormente. Incorpore la Figura D-2 con 1470 psf (70.4 kPa) y al usar la línea para una capa de ADL de espesor de 10 pies (3.28

m) el resultado sería un sobredimensionamiento de 1.13 pies (0.34 m). (Nota: el redondeo a 0.3 m daría el sobredimensionamiento de la capa más baja de ADL).

Paso 4. Reste el resultado del Paso 2 del resultado del Paso 3 para obtener la compresión de la capa más baja de ADL que ocurrirá cuando se coloque el pavimento, la base y la cubierta de tierra:  $0.34 \text{ m} - 0.26 \text{ m} = 0.08 \text{ m}$ .

Paso 5. Sume los resultados de los Pasos 1 y 4 para obtener la cantidad de sobredimensionamiento de la cota superior de la capa más elevada de ADL.  $0.21 \text{ m} + 0.08 \text{ m} = 0.29 \text{ m}$  (0.95 pies). Redondee con una aproximación de 0.1 m. Por lo tanto, la cota de la parte superior de la capa más elevada de ADL debe tener un sobredimensionamiento de 0.3 m.

Resultado final: La cota superior de la capa más baja de ADL se debe sobredimensionar 0.3 m, y la capa más elevada de ADL 0.3 m.

## Referencias

1. Nickels, W.L., Jr. 1995. "The Effect of Tire Chips as Subgrade Fill on Paved Roads." M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Maine, Orono, Maine, 215 pp.



# APÉNDICE E

## Estudio de caso – Uso del adl como relleno ligero para un terraplén

### Estudio de caso – Intercambio Vial del Aeropuerto de Portland

Se usó agregado derivado de llanta (ADL) como relleno ligero para la construcción de dos terraplenes para carretera de 9.8 m (32 pies) de altura en Portland, Maine (Ref. 5). Estos terraplenes eran los rellenos de los accesos de un nuevo puente sobre la Autopista de Peaje Maine Turnpike. El puente es parte de un nuevo intercambio vial que proporciona un mejor acceso al Aeropuerto de Portland y a la Calle congress. Este sitio tenía como sustrato una capa de alrededor de 12.2 m (40 pies) de arcilla marina frágil. Los resultados de las pruebas indicaron que la arcilla era una arcilla inorgánica sobreconsolidada, moderadamente delicada, y de baja plasticidad. La resistencia al corte sin drenar varió de aproximadamente 72 kiloPascales (kPa) (1,500 libras por pie cuadrado [psf]) cerca de la parte superior, a 19 kPa (400 psf) cerca del centro de la capa.

Los diseñadores del proyecto (el despacho de HNTB, Inc. y Haley & Aldrich, Inc. en Maine, y la Universidad de Maine) descubrieron que los terraplenes construidos de tierra convencional eran demasiado pesados, lo cual daba un factor inaceptable de protección contra la inestabilidad de los taludes. Se consideraron varias formas de fortalecer los suelos de cimentación, pero los métodos era demasiado costosos. Finalmente se eligió construir los terraplenes usando relleno ligero por ser la alternativa de menor costo. Se consideraron varios tipos de relleno ligero, incluyendo el ADL, tabloncillos de aislante de poliestireno

expandido, y esquisto expandido. Se eligió el ADL porque era \$300,000 más económico que las demás alternativas. Además, con el proyecto se podrían aprovechar 1.2 millones de llantas de desecho. También se usaron mechas drenantes para acelerar la consolidación de los suelos de cimentación.

### Distribución y construcción de la obra

Se siguieron varios pasos para cumplir con los lineamientos para limitar el calentamiento de los rellenos gruesos de ADL (Refs. 1, 2). Estos lineamientos exigían que la capa única de ADL no tuviera un espesor mayor a 3 m (10 pies). Por lo tanto, la capa de ADL se dividió en dos capas, cada una de 3 m (10 pies) de espesor, separadas por 0.9 m (3 pies) de tierra, como se muestra en la Figura E-1. Se colocó en el exterior y en la parte superior del relleno tierra con baja permeabilidad con un mínimo de un 30 por ciento más fina que la criba No. 200, para limitar la infiltración de aire y agua. La última precaución que se tomó para limitar el calentamiento fue el uso de ADL Tipo B grande con muy pocos finos. Menos del 50 por ciento por peso del ADL pasaba por la criba de 75 mm (3 pulgadas), el 25 por ciento pasaba por la criba de 38 mm (1½ pulgadas), y menos del 1 por ciento pasaba por la criba No. 4. El ADL tenía un tamaño máximo de 300 mm (12 pulgadas) medido en cualquier dirección, para garantizar que se pudiera colocar fácilmente con equipo de construcción convencional. El terraplén se cubrió con 0.61 m (2 pies)

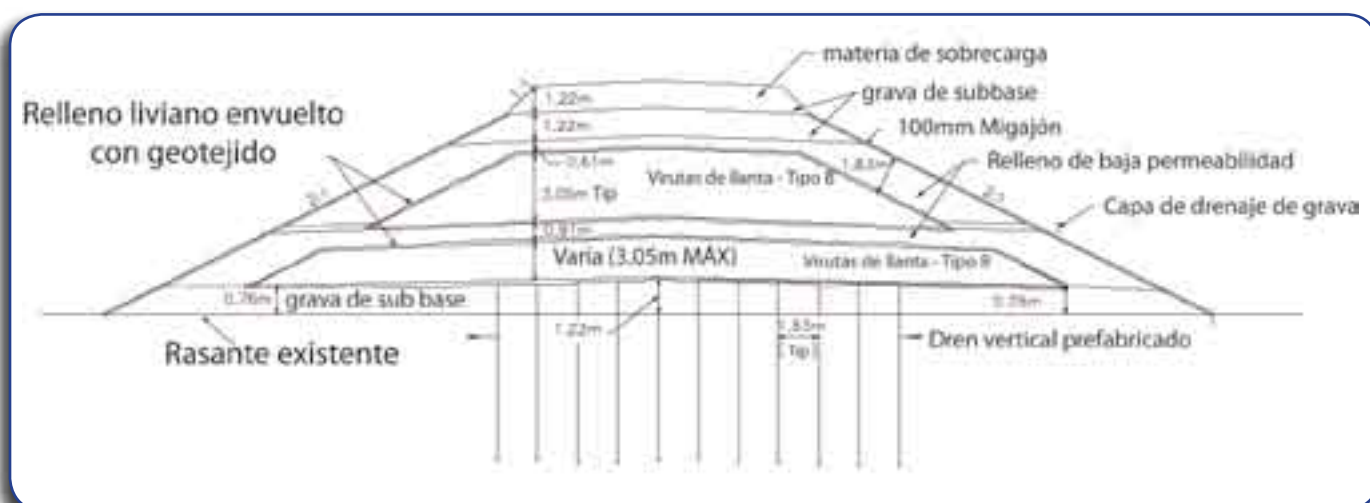


FIGURA E-1. Corte transversal del terraplén construido de arcilla marina suave en el Intercambio Vial del Aeropuerto de Portland (Ref. 5).



*Figura E-2. Oruga Caterpillar D-4 esparciendo el ADL como relleno ligero del terraplén en el Intercambio Vial del Aeropuerto de Portland*

de tierra de baja permeabilidad, 1.22 m (4 pies) de suelo granulado, más 1.22 m (4 pies) de sobrecarga temporal. El propósito de la sobrecarga era incrementar el índice de consolidación del suelo de cimentación de arcilla; su uso no estaba relacionado con el relleno de ADL.

El ADL se colocó usando técnicas de construcción convencionales. Primero, se colocó geotextil en la base preparada para que fungiera como separador entre el ADL y el suelo de los alrededores. Luego, el ADL se esparció en coladas de 300 m (12 pulgadas) usando una niveladora Caterpillar D-4, como se muestra en la Figura E-2. Cada colada se compactó con seis pasadas de un compactador de vibración de rodillos con un peso operativo mínimo de 9.8 toneladas métricas (10 toneladas inglesas). Después de haber colocado el ADL, el contratista puso un separador de geotextil en los costados y la parte superior de la zona de ADL. La cubierta de tierra se colocó a medida que se iba colocando el ADL.

### Asentamiento de la obra y Peso Unitario in situ

Se instalaron placas de asentamiento en la parte superior y en el fondo de cada capa de ADL para monitorear el asentamiento. En el Cuadro E-2 se presenta el resumen de la compresión de cada capa de ADL al terminar de colocar el relleno, así como

también la compresión prevista con base en pruebas de compresión en laboratorio de un ADL de tamaño máximo de 75 mm (3 pulgadas). Se observa que la compresión prevista es considerablemente mayor que el valor de la medición real. Por lo tanto, la compresibilidad del ADL con un tamaño máximo de 300 mm (12 pulgadas) parece ser menor que la del ADL con tamaño máximo de 75 mm (3 pulgadas). Esta compresión fue uno de los factores que llevó a prever un mayor peso unitario final in situ. Se previó que el peso unitario final in situ fuera de 0.93 Mg/m<sup>3</sup> (58 pcf), en comparación con un valor real de 0.79 Mg/m<sup>3</sup> (49 pcf), lo cual representa una diferencia del 18 por ciento. Esta diferencia no se puede atribuir a la diferencia en la compresibilidad. Por lo tanto, es probable que el peso unitario inicial (sin comprimir) del ADL más grande sea menos que el del ADL con tamaño máximo de 75 mm (3 pulgadas).

### Mediciones de temperatura

Había mucho interés en monitorear las temperaturas del relleno de ADL debido a que anteriormente hubo problemas con el calentamiento de rellenos gruesos de ADL (Ref. 4). Las temperaturas más altas se tomaron al momento de colocar el relleno, cuando el ADL negro se calentó por la exposición directa a la luz solar. Las temperaturas iniciales oscilaron entre 24 y 38°C (75 y 100°F). Después de cubrir con las primeras coladas de relleno, las temperaturas empezaron con el tiempo a disminuir. Cuando se dejó de monitorear en abril de 1998 las temperaturas aún seguían bajando. En la Figura E-3 se presentan las mediciones típicas de temperatura. A partir de estos resultados se puede observar que no hubo señales de calentamiento espontáneo.

### Estudio de caso – Relleno para el Acceso del Empalme Norte

El elemento clave del Proyecto del Libramiento Topsham Brunswick fue el Puente Merrymeeting de 300 m (984 pies) de longitud sobre el Río Androscoggin River. El perfil del subsuelo en el lugar donde se ubica el empalme norte consistía en una capa de 3 a 6 m (10 a 20 pies) de arena marina limosa sobre 14 a 15 m (45 a 50 pies) de arcilla marina limosa. Debajo de la arcilla hay tillita glaciar y luego roca base. La ribera del río tenía un factor de protección contra la falla profunda del talud cercano a 1.

**Cuadro E-1. Compresibilidad medida de la capa de ADL para el proyecto del Intercambio Vial del Aeropuerto de Portland.**

Asentamiento Placa No.	Ubicación	Capa inferior de ADL		Capa superior de ADL	
		Medición	Previsto	Medición	Previsto
SW1	25+00,C/L	12.6%	22%	8.3%	14%
SW4	26+00, C/L	13.4%	21%	11.2%	14%
SE1	30+00, C/L	19.1%	22%	10.9%	14%
SE4	31+00, C/L	17.3%	23%	9.3%	14%
Promedio Placas C/L		15.6%	22%	9.9%	14%

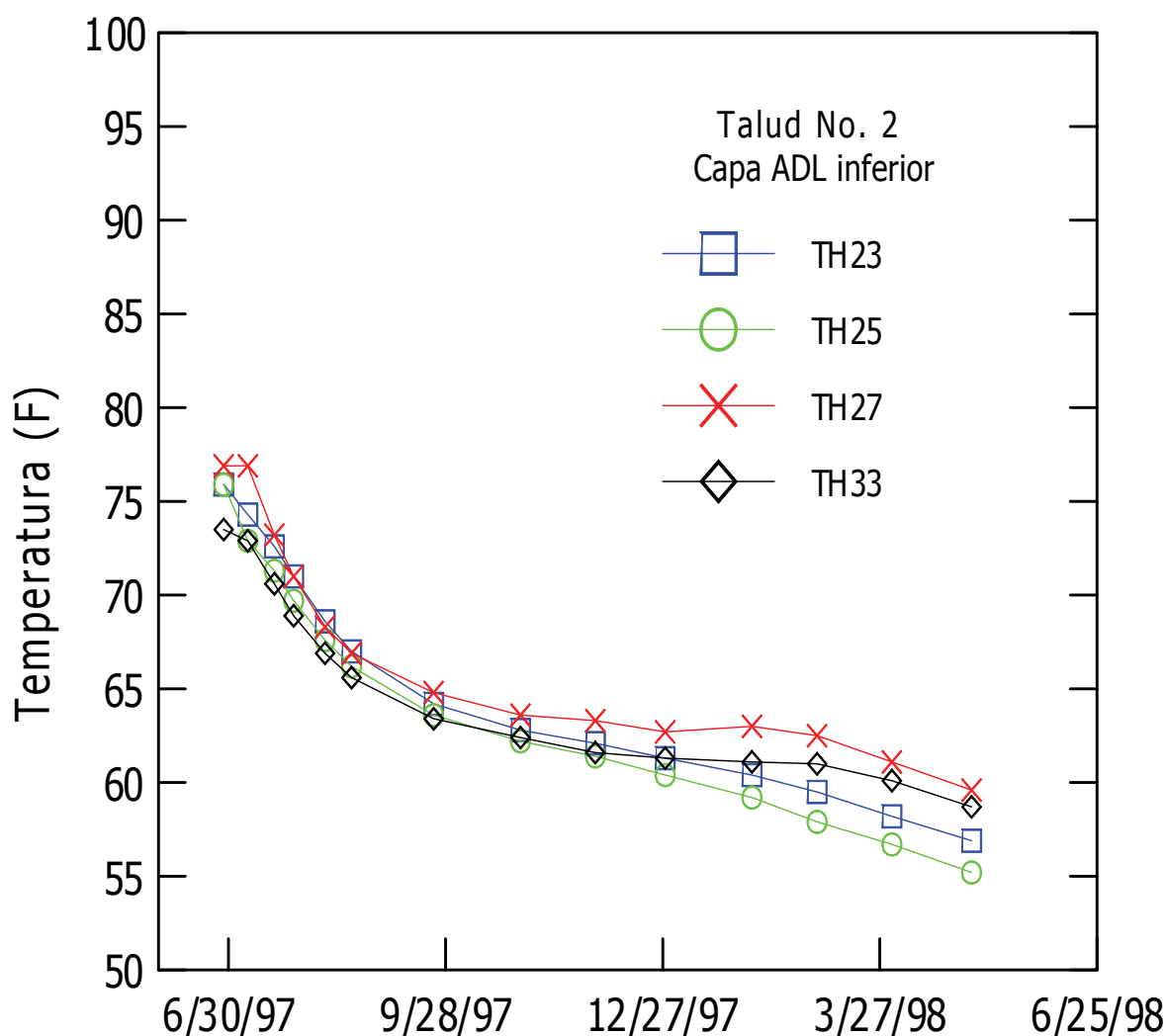


Figura E-3. Temperaturas en la capa inferior del relleno ligero para terraplén en el Intercambio Vial del Aeropuerto de Portland

Además, el diseño indicaba un relleno del acceso que va hacia el estribo del puente que hubiera reducido aún más el factor de protección. Por lo tanto, era necesario tanto mejorar el factor de protección como facilitar la construcción del relleno para el acceso. La mejor solución fue excavar parte de la ribera del río y reemplazarla con una capa de ADL de 4.3 m (14 pies) de espesor. El ADL tenía además la ventaja de reducir las presiones laterales contra el muro de estribo. Se consideraron otros tipos de relleno ligero, incluyendo la geoespuma y el agregado de lutita expandido. Sin embargo, se comprobó que el ADL era la solución de más bajo costo. Para esta obra se usaron alrededor de 400,000 llantas de desecho (Ref. 9).

### Distribución y construcción de la obra

La arena marina de la superficie se excavó a una cota de 5.2 m (17 pies) y luego se construyó un muro de estribo sostenido por un pilote H. SE colocó una zona de ADL de 4.3 m (14 pies) de espesor de la estación 53+50.6 m (175+50 pies) al frente del muro de estribo en la estación 53+72.0 m (176+20 pies). El relleno se va rebajando de un espesor de 4.3 m (14 pies) en la estación 53+50.6 m

(175+50 pies) a un espesor de cero en la estación 53+35.4 m (175+00 pies) para que la transición entre la capa de ADL y el relleno convencional sea gradual. Se calculó que la capa de ADL se comprimiría 460 mm (18 pulgadas), de manera que el espesor final comprimido sería de 4.3 m (14 pies). La capa de ADL se forró con un geotextil tejido (Niolon Mirafi 500X) para evitar la infiltración de la tierra de los alrededores. El ADL se esparció con cargadores frontales y bulldozers, y luego se compactó con seis pasadas de un compactador de rodillos lisos (Bomag BW201AD) con un peso estático de 9,432 kg (10.4 toneladas). El espesor de la colada compactada se limitó a 305 mm (12 pulgadas). Se determinó que se necesitaban colocar aproximadamente 15 pulgadas (381 mm) de ADL inicialmente para obtener un espesor compactado de 305 mm (12 pulgadas). La colocación del ADL empezó el 25 de septiembre de 1996 y terminó el 3 de octubre de 1996. En la Figura E-4 se muestra un corte longitudinal del estribo y el terraplén ya terminados.

Esta obra fue diseñada y construida antes de que se desarrollaran los lineamientos para limitar el

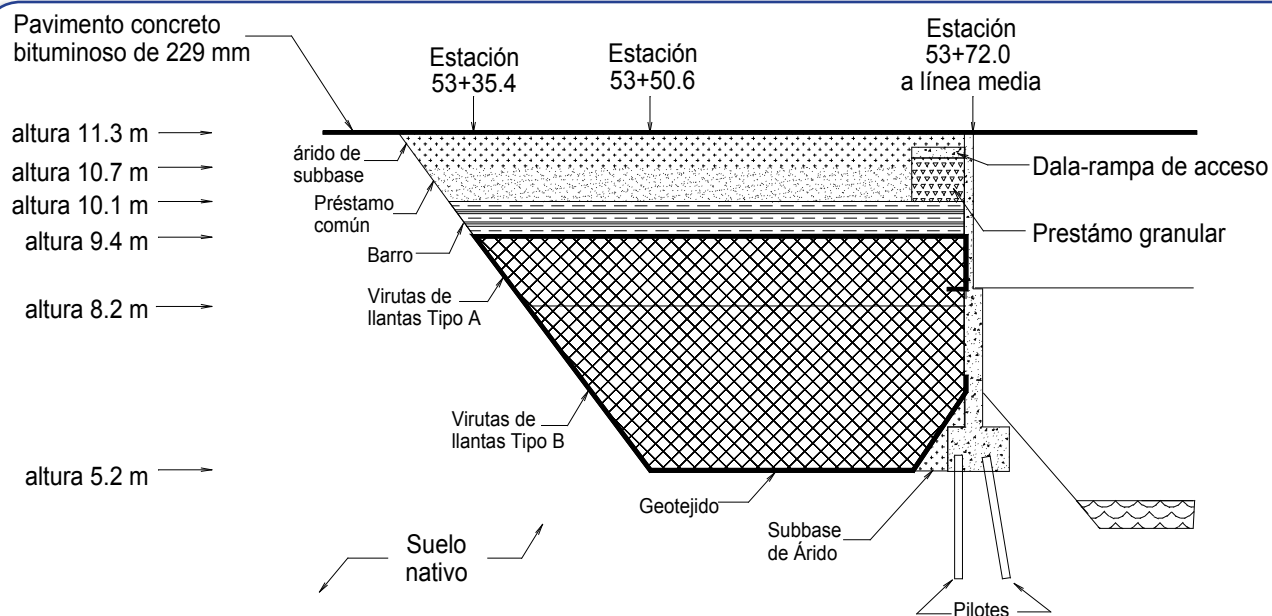


Figura E-4. Corte longitudinal del relleno de ADL del Empalme Norte

calentamiento espontáneo de los rellenos de ADL. Sin embargo, el diseño del proyecto incluía medidas para limitar el calentamiento espontáneo. La primera era el uso de ADL Tipo B más grande en la parte baja del relleno, de una cota de 5.2 m (17 pies) a una cota de 8.2 m (27 feet). Se especificó que el ADL Tipo B tenía que tener una dimensión medida en cualquier dirección de 305 mm (12 pulgadas); un mínimo de 75 por ciento (por peso) debía pasar por la criba cuadrada de 203 mm (8 pulgadas), un máximo de 25 por ciento (por peso) debía pasar por la criba cuadrada de 38 mm (1½ pulgadas), y un máximo de 5 por ciento (por peso) debía pasar por la criba No. 4 (4.75 mm). No se incluyó en esta obra ningún requisito sobre el porcentaje que debía pasar la criba de 75 mm (3 pulgadas). Las pruebas de gradación mostraron que el ADL generalmente tenía una dimensión máxima menor a 150 mm (6 pulgadas). El ADL Tipo A, con un tamaño máximo de 75 mm (3 pulgadas) se colocó de una cota de 8.2 m (27 pies) hasta la parte superior del relleno de ADL. Hubiera sido preferible usar el ADL Tipo B más grande para todo el espesor; sin embargo, ya se había apilado una cantidad considerable de ADL Tipo A cerca de la obra antes de decidir que se usara ADL más grande, por lo que se consideró que sería aceptable usar el ADL Tipo A más pequeño en la parte superior del relleno. Además, también hubiera sido preferible limitar el espesor total de la capa de ADL a 3 m (10 pies), como se recomienda en los lineamientos para limitar el calentamiento espontáneo.

Otra de las medidas que se siguieron para reducir la posibilidad de calentamiento espontáneo fue cubrir el ADL con una capa de tierra arcillosa compactada de la que un mínimo de 30 por ciento pasaba por la criba No.

200 (0.075 mm). El propósito de la capa de arcilla era minimizar el flujo de agua y aire por el ADL. La capa de arcilla mide aproximadamente 0.61 m (2 pies) de espesor y está construida en el centro para facilitar el drenaje hacia los taludes laterales. Sobre la capa de arcilla se colocó una capa de relleno común de 0.61 m (2 pies) de espesor. Encima del relleno común hay una subbase de agregado de 0.76 m (2.5 pies).

El ADL sufre un poco de asentamiento con el tiempo. Para esta obra, un relleno grueso de ADL quedó junto a un estribo de puente sostenido por un pilote, por lo que había inquietud de que pudiera haber un asentamiento diferencial en la junta con el estribo. Sin embargo, Tweedie y otros (Ref. 6) demostraron que la mayor parte del asentamiento ocurre en los primeros 60 días. Para considerar el asentamiento antes de la pavimentación, el contratista tuvo que colocar una subbase de agregado de 0.3 m (1 pie) como sobrecarga por un mínimo de 60 días. De hecho, el programa general de construcción le permitió al contratista dejar la sobrecarga desde octubre de 1996 hasta octubre de 1997. La sobrecarga se retiró en octubre de 1997 y la vía se cubrió con 229 mm (9 pulgadas) de pavimento bituminoso. La carretera se abrió al tráfico vehicular el 11 de noviembre de 1997. Se puede encontrar más información sobre esta obra en Cosgrove y Humphrey (Ref. 3).

## Instrumentación

Se instalaron cuatro tipos de instrumentos: celdas de presión formadas en el frente del muro de estribo; y medidores de asentamiento de alambre vibratorio, placas de asentamiento, y sensores de temperatura en el relleno de ADL. Se instalaron celdas de presión con alambre



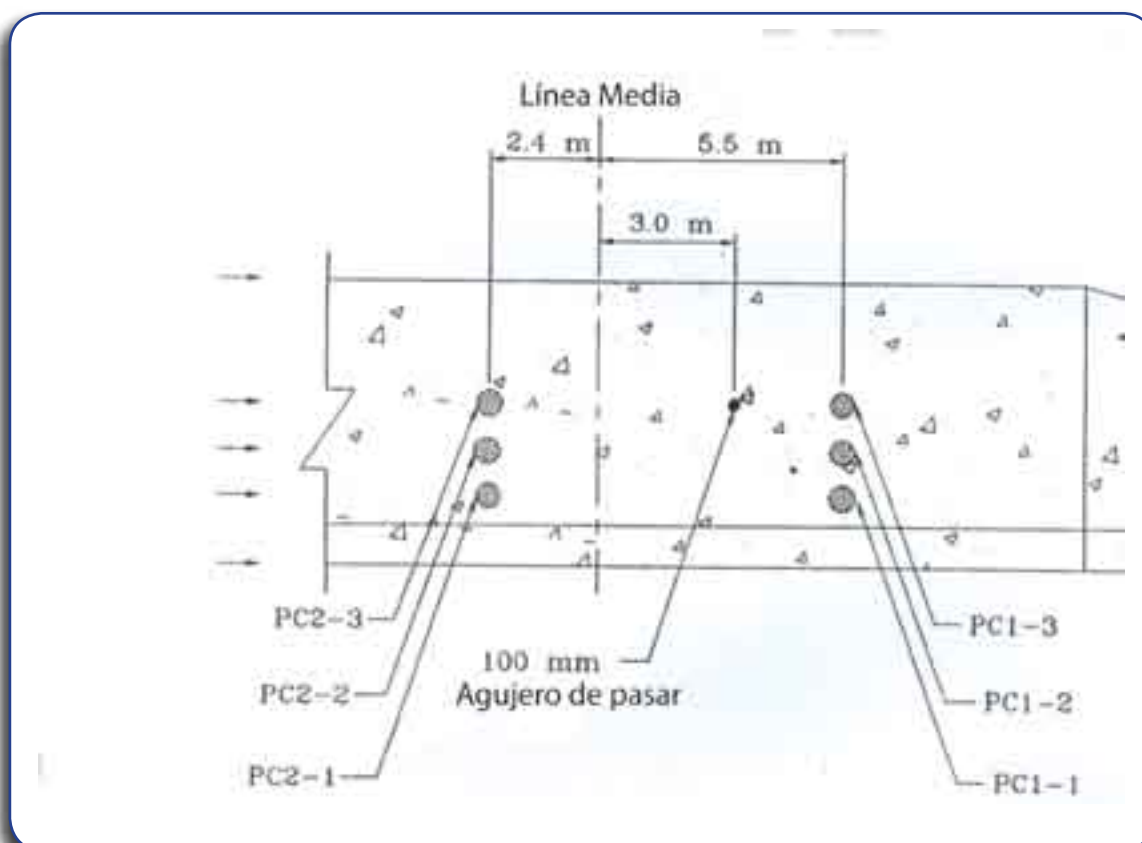


Figura E-5. Ubicación de las celdas de presión en el Empalme Norte (Ref. 3)

vibratorio para monitorear la presión lateral de la tierra contra el muro de estribo. Se instalaron tres celdas de presión Roctest modelo TPC (PC1-1, PC1-2, y PC1-3) en el frente del muro de estribo, 4 m (13 pies) a la derecha de la línea central, y tres celdas de presión Roctest modelo EPC (PC2-1, PC2-2, y PC2-3) se instalaron a 4 m (13 pies) a la izquierda de la línea central, como se muestra en la Figura E-5. Se colocó ADL contra todas las celdas.

## Mediciones de presión horizontal y asentamiento

En el Cuadro E-3 se presenta un resumen de la presión lateral al terminar de instalar el ADL (3 de octubre de 1996), la colocación de la cubierta de tierra, y la colocación de la sobrecarga (9 de octubre de 1996). También se muestran las presiones laterales al 31 de octubre de 1996. Se observa que las presiones aumentan con la profundidad al terminar de colocar el ADL. Sin embargo, al terminar la cubierta de tierra y la colocación de la sobrecarga, las presiones registradas en las celdas PC1-1, PC1-2, y PC1-3 se mantuvieron casi constantes con la profundidad y oscilaron entre 17.05 y 19.61 kPa (356 y 410 psf). Estas conclusiones coinciden con las condiciones en reposo que se midieron en un proyecto anterior (Tweedie y otros, 1997; 1998a). Las celdas PC2-1, PC2-2, y PC2-3 mostraron un comportamiento distinto. Al terminar de colocar el ADL el 9 de octubre de 1996, la celda PC2-2 mostró una presión de 30.22 kPa (631 psf), mientras que la celda PC2-1, ubicada apenas 1.07 m (3.5 pies) más abajo, tenía 20.04 kPa (418 psf) y la celda PC2-3, ubicada 1.07

m (3.5 pies) más arriba de la PC2-2, tenía 12.31 kPa (257 psf). Estas fueron las celdas EPC menos rígidas. En un proyecto anterior con ADL se observó una dispersión importante con las celdas EPC (Refs. 6, 7, 8). Se considera que la causa de esta dispersión es, en parte, que el ADL grande crea una distribución del esfuerzo que no es uniforme sobre el frente de la celda de presión. La presión promedio registrada por las tres celdas PC2 fue de 20.85 kPa (435 psf), que es levemente más alta que la de las celdas PC1. Del 9 de octubre de 1996 al 31 de octubre de 1996, la presión lateral aumentó entre 1 y 2 kPa (20 y 40 psf). Desde esa fecha las presiones han sido más o menos constantes.

El relleno de ADL se comprimió alrededor de 370 mm (14.6 pulgadas) durante la colocación de la capa de tierra suprayacente. En los siguientes 60 días, el relleno se asentó otros 135 mm (5.3 pulgadas). Del 15 de diciembre de 1996 al 31 de diciembre de 1997, el relleno tuvo un asentamiento con el tiempo de otros 15 mm (0.6 pulgadas). Para fines de 1997 el índice de asentamiento había bajado a un nivel casi insignificante. La compresión total del relleno de ADL fue de 520 mm (20.4 pulgadas), lo que es 13 por ciento mayor a los 460 mm (18 pulgadas) que se esperaban con base en las pruebas de compresión en laboratorio. La diferencia es el resultado, por lo menos en parte, del asentamiento con el tiempo que no se calcula en las pruebas de laboratorio de poca duración. La densidad final del ADL comprimido fue de alrededor de 0.9 Mg/m<sup>3</sup> (57 pcf) mayor que la del proyecto del

**Cuadro E-2. Resumen de las presiones laterales en el Muro de Estribo**

Fecha	PC1-1	PC2-1	PC1-2	PC2-2	PC1-3	PC2-3
	Cota de la celda = 6.70 m		Cota de la celda = 7.77m		Cota de la celda = 8.84 m	
10/3/96 <sup>2</sup>	7.84 <sup>1</sup>	7.41	6.04	7.27	2.62	1.41
10/9/96 <sup>3</sup>	17.04	20.04	19.61	30.22	17.05	10.91
10/31/96	18.27	21.05	20.98	32.84	20.24	12.31

<sup>1</sup>Presión horizontal en kPa.<sup>2</sup>Fecha en que se terminó de colocar el ADL.<sup>3</sup>Fecha en que se terminaron de colocar la cubierta de tierra y la sobrecarga.

Aeropuerto de Portland, probablemente debido al menor tamaño del ADL que se usó en esta obra.

## Temperatura de la capa de ADL

Hubo una pequeña cantidad de calentamiento espontáneo del ADL. Cinco de los 12 termistores del ADL Tipo A registraron una temperatura de entre 30 y 40°C (86 y 104°F). Por el contrario, solamente dos de los 18 termistores en el ADL Tipo B más grande tuvieron temperatura pico en este rango, y estos dos sensores pudieron tener la influencia del ADL Tipo A que estaba por encima y es más caliente. Esta diferencia sugiere que el ADL más grande es menos susceptible al calentamiento. De cualquier forma, las temperaturas pico fueron demasiado bajas como para representar algún peligro. Desde principios de 1997, la tendencia general ha sido a que la temperatura disminuya. Sin embargo, la temperatura del ADL parece verse levemente influenciadas por los cambios estacionales de temperatura.

## Referencias

1. Ad Hoc Civil Engineering Committee. 1997. "Design Guidelines to Minimize Internal Heating of Tire Shred Fills." Scrap Tire Management Council, Washington, DC. 4 pp.
2. ASTM International. 1998. "Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications." ASTM D6270-98, ASTM International. W. Conshohocken, Pennsylvania.
3. Cosgrove, T.A., and Humphrey, D.N. 1999. "Field Performance of Two Tire Shred Fills in Topsham, Maine." A report for the Maine Department of Transportation by Department. of Civil and Environmental Engineering, University of Maine, Orono, Maine.
4. Humphrey, D.N. 1996. "Investigation of Exothermic Reaction in Tire Shred Fill Located on SR 100 in Ilwaco, Washington." Prepared for the Federal Highways Administration, Washington, D.C. 60 pp.
5. Humphrey, D.N., Whetten, N., Weaver, J., Recker, K., and Cosgrove, T.A. 1998. "Tire TDA as Lightweight Fill for Embankments and Retaining Walls." Proceedings of the Conference on Recycled Materials in Geotechnical Applications, C. Vipulanandan and D. Elton, eds., ASCE, pp. 51-65.
6. Tweedie, J.J., Humphrey, D.N. and Sandford, T.C. 1997. "Tire Chips as Lightweight Backfill for Retaining Walls - Phase II," A Study for the New England Transportation Consortium, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maine, Orono, Maine, 291 pp.
7. Tweedie, J.J., Humphrey, D.N., and Sandford, T.C. 1998a. "Full Scale Field Trials of Tire TDA as Lightweight Retaining Wall Backfill, At-Rest Conditions." Transportation Research Record No. 1619. TRB, Washington, D.C. pp. 64-71.
8. Tweedie, J.J., Humphrey, D.N., and Sandford, T.C. 1998b. "Tire TDA as Retaining Wall Backfill, Active Conditions." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, Vol. 124, No. 11. pp. 1061-1070.
9. Whetten, N., Weaver, J. Humphrey, D., and Sandford, T. 1997. "Rubber Meets the Road in Maine." Civil Engineering, Vol. 67, No. 9. Septiembre. pp. 60-63.

# APÉNDICE F

## Ejemplo comparativo de los costos del transporte

	Tipo de Vehículo			
	Camioneta Pickup		Camioneta Pickup con remolque	
	Base	Costo/milla	Base	Costo/milla
Mano de obra (\$/hr)	\$10/hora, 30 millas/hora	\$0.33	\$10/hora, 30 millas/hora	\$0.33
Combustible (\$/milla)	\$4.00/galón, 15 millas/galón	\$0.27	\$4.00/galón, 15 millas/galón	\$0.33
Mantenimiento (\$/milla)	\$1000/año, 30,000 millas/año	\$0.03	\$2000/año, 30,000 miles/año	\$0.07
Subtotal-Costos variables		\$0.63		\$0.73
Seguros	\$1000/año, 30,000 millas/año	\$0.03	\$1000/año, 30,000 miles/año	\$0.03
Depreciación	\$2500/año, 30,000 millas/año	\$0.08	\$2500/año, 30,000 miles/año	\$0.08
Rendimiento de la inv.	\$15,000x20%= \$3,000/año	\$0.10	\$18000x20%= \$3600/año	\$0.12
Subtotal-Costos fijos		\$0.22		\$0.24
Costos totales		\$0.85		\$0.97
Llantas/cargamento		50		250
Costo/milla/llanta	por 1 milla	\$0.02	por 1 milla	\$0.004
	por 25 millas	\$0.43	por 25 millas	\$0.10
	por 100 millas	\$1.70	por 100 millas	\$0.39
	por 200 millas	\$3.40	por 200 millas	\$0.78
	por 500 millas	\$8.50	por 500 millas	\$1.94
	Camión cerrado		Tractor con caja de remolque de 48 pies	
	Base	Costo/milla	Base	Costo/milla
Mano de obra (\$/hr)	\$12/hora, 30 millas/hora	\$0.40	\$15/hora, 30 millas/hora	\$0.50
Combustible (\$/milla)	\$4.00/galón, 8 millas/galón	\$0.50	\$4.00/galón, 6 millas/galón	\$0.67
Mantenimiento (\$/milla)	\$2500/año, 30,000 millas/año	\$0.08	\$3500/año, 30,000 millas/año	\$0.12
Subtotal-Costos variables		\$0.98		\$1.28
Seguros	\$2000/año, 30,000 millas/año	\$0.07	\$3000/año, 30,000 millas/año	\$0.07
Depreciación	\$3500/año, 30,000 millas/año	\$0.12	\$10000/año, 30,000 millas/año	\$0.33
Rendimiento de la inv.	\$25000x20%= \$5000/año	\$0.17	\$80000x20%= \$16000/año	\$0.53
Subtotal-Costos fijos		\$0.35		\$0.93
Costos totales		\$1.33		\$2.22
Llantas/cargamento		400		1,400
Costo/milla/llanta	por 1 milla	\$0.003	por 1 milla	\$0.002
	por 25 millas	\$0.08	por 25 millas	\$0.04
	por 100 millas	\$0.33	por 100 millas	\$0.16
	por 200 millas	\$0.67	por 200 millas	\$0.32
	por 500 millas	\$1.67	por 500 millas	\$0.79

# APÉNDICE G

## *Parámetros económicos para las plantas de procesamiento de llantas de desecho*

### **BASIS**

La modalidad operativa proyectada es de una sola planta con capacidad para recibir y procesar de 250,000 a 1,000,000 equivalentes en llantas para automóvil (PTEs)/año en tamaños de producto triturado que varíen desde agregado derivado de llantas Clase B (ADL) hasta virutas de 2.5 cm (1 pulgada) nominales.

### **PARÁMETROS PARA LA PLANTA**

#### **Tamaño del predio:**

Aproximadamente 5 acres de terreno plano y seco, en un lugar central con acceso a carretera y suelo estable, más terreno adicional para el acopio del producto si se requiere un inventario de más de un mes.

#### **Uso del predio:**

3 acres para las operaciones in situ, el movimiento del equipo y almacenamiento de llantas limitado

2 acres para oficinas, remolques de mantenimiento y almacenamiento limitado del producto, así como almacenamiento de agua en caso pertinente

#### **Mejoras comunes al predio:**

Valla perimetral con portón para controlar el acceso y reducir el robo, vandalismo e incendios intencionales

Iluminación en la zona de operaciones, y posiblemente en la zona de almacenamiento (dependiendo del entorno), para optimizar la flexibilidad, seguridad y vigilancia de las operaciones

Estabilización del suelo en las zonas de almacenamiento y trabajo: (1) para reducir la contaminación de las llantas y el mantenimiento correspondiente del equipo y (2) para reducir la contaminación del producto y darle mayor valor y posibilidades de comercialización

Concreto sobre 1 acre aproximadamente en la zona de operaciones centralizada para prevenir que el agua se desplace de las llantas durante el manejo y procesamiento, creando humedad y condiciones indeseables. Un bordo de contención (3 a 4 pies de altura) alrededor del perímetro de la zona de almacenamiento para controlar la dispersión de aceite pirolítico y/o agua en caso de incendio

Acceso a agua y/o a un estanque de almacenamiento de agua (con recubrimiento si es necesario) para combatir incendios

Energía eléctrica disponible para el equipo de procesamiento, incluyendo un transformador si la fuente de energía disponible no cuenta con reductor

Oficinas y equipo relacionado para el funcionamiento de las mismas

Área de taller y herramientas necesarias para el mantenimiento del equipo

Las operaciones básicas se pueden realizar afuera, pero el clima podría afectar la eficiencia. Sería conveniente contar con una cubierta portátil para el mantenimiento de la trituradora

#### **Requerimientos adicionales para el acopio del producto:**

Dependiendo de los productos y los mercados, los mercados estacionales podrían requerir contar con un inventario de hasta el 80 por ciento de la producción anual en una forma ambientalmente segura para reducir al mínimo la probabilidad de incendios y elevar al máximo la capacidad de controlarlos en caso de presentarse. Para contar con dicho inventario se necesitarían además:

5 acres para 10 pilas de 50 X 150 X 10 pies (con espacio de 50 pies alrededor de cada una) para almacenar 800,000 PTEs de ADL

Alrededor de 760 metros (2,500 pies lineales) de valla para rodear esta zona



## EQUIPO PARA ADL TIPO B

Procesamiento: Si el único producto es ADL Tipo B, una de las máquinas menos costosas en cuanto a precio de venta y mantenimiento es la trituradora primaria horizontal Barclay de 12.5 cm (4.9 pulgadas), montada en un ángulo de 45 grados con sistema de clasificación y reciclado. Las alternativas incluyen trituradoras de llantas con espacio entre cuchillas de 10 cm (4 pulgadas), pero su costo de inversión y operativo generalmente es mayor. Los principales componentes y los costos actuales aproximados en dólares estadounidenses son los siguientes:

Trituradora con transportador alimentador extendido	\$230,000
Clasificador	\$ 45,000
Transportador para reciclaje (proveedor local)	\$ 36,000
Transportador para descarga (proveedor local)	\$ 50,000
Transporte (calculado desde California)	\$ 5,000
<b>Subtotal del equipo</b>	<b>\$366,000</b>
Instalación (aproximada)	\$ 75,000
Refacciones	\$ 40,000
Gastos varios y contingencias	\$100,000
<b>Total del equipo de procesamiento</b>	<b>\$581,000</b>

## Equipo adicional – Necesario para el movimiento de llantas y tiras de llanta

Cargador frontal (usado)	\$ 60,000
Cargador Bobcat complementario	\$ 20,000
Suministro eléctrico/controles (estimación)	\$ 25,000
Camión de volteo/remolque para movimiento de tiras in situ	\$ 20,000
<b>Total del equipo adicional</b>	<b>\$125,000</b>

## PARA TIRAS DE 5 CM (2 PULGADAS) NOMINALES (TAMAÑO MÁXIMO DE 7.5-10 CM)

**Procesamiento** - El uso normal consiste en una sola trituradora de llantas de alta capacidad con sistema de clasificación y reciclaje para volúmenes de hasta 1 millón de llantas por año. Los principales componentes y los costos actuales aproximados en dólares estadounidenses son los siguientes:

Trituradora	\$350,000 - \$500,000
Transportador alimentador/sistema mecánico	\$ 25,000 - \$150,000
Clasificador	\$ 45,000 - \$230,000
Transportador para reciclaje (proveedor local)	\$ 36,000
Transportador para descarga (proveedor local)	\$ 50,000
Transporte (estimado)	\$ 12,000 - \$ 20,000
<b>Subtotal del equipo</b>	<b>\$518,000 - \$986,000</b>
Instalación (aproximada)	\$100,000
Refacciones	\$ 60,000
Gastos varios y contingencias	\$125,000
<b>Total del equipo de procesamiento</b>	<b>\$803,000 - \$1,271,000</b>

## Equipo adicional: Necesario para el movimiento de llantas y tiras de llanta

Cargador frontal (usado)	\$ 60,000
Cargador Bobcat complementario	\$ 20,000
Suministro eléctrico/controles (estimación)	\$ 25,000
Camión de volteo/remolque para movimiento de tiras in situ	\$ 20,000
<b>Total del equipo adicional</b>	<b>\$125,000</b>

## PARA TIRAS DE 2.5 CM (1 PULGADA) NOMINALES

**Procesamiento** - El costo de inversión del procesamiento será el mismo que para las tiras de 2 pulgadas, pero se podría requerir un mecanismo magnético para retirar las virutas que contengan alambre del talón para algunas aplicaciones. Si no hay una alternativa de comercialización o disposición razonable para este material (30 a 40 por ciento), entonces se puede instalar equipo adicional para liberar el alambre para su venta (como se mencionó anteriormente) y aprovechar el hule en diversos tamaños, incluso hule molido. Los principales componentes y los costos actuales aproximados en dólares estadounidenses son los siguientes:

Total del equipo para tiras de 5 cm (2 pulgadas)	\$803,000 - \$1,271,000
Magnetos/transportadores adicionales	\$ 60,000 - \$ 110,000
<b>Total del equipo de procesamiento</b>	<b>\$863,000 - \$1,381,000</b>
Costo adicional del equipo de liberación/recuperación/ clasificación para producir alambre comercializable y algunos productos de hule molido	\$500,000 - \$1,200,000

## COMPONENTES DEL COSTO OPERATIVO

Plantilla de personal propia para una operación con 1 turno de 5 días (algunos puestos se pueden combinar en las operaciones de bajo volumen)

- 1 Gerente
- 1 Oficinista/encargado de contabilidad
- 1 Encargado de recepción de envíos/monitoreo
- 1 Supervisor/Gerente de mantenimiento
- 1 Cargador/Operador
- 1-2 Obrero/mantenimiento

Servicios profesionales (como contabilidad, mercadotecnia, jurídicos)

Procesamiento/Mantenimiento

Para ADL Clase B

Mantenimiento del equipo de procesamiento	\$ 6.00/ton
Mantenimiento del cargador/Bobcat	\$ 2.00/ton
Energía para el equipo	

Para 1.0 millón de llantas/año

$(150 \text{ hp} \times 70 \% \text{ carga} \times .746 \text{ kw conversión} = 78 \text{ kw/hora} \times 2080 \text{ horas/año} = 162,240 \text{ kw/año})$

Para 0.5 millones de llantas/año, calculando un factor de carga de 50 % o 115,000 kw/año

Para 0.25 millones de llantas/año, calculando un factor de carga de 40 % o 92,000 kw/año

Para tiras de 5 cm (2 pulgadas) nominales

Mantenimiento del equipo de procesamiento	\$15.00/ton
Mantenimiento del cargador/Bobcat	\$ 2.00/ton
Energía para el equipo	

Para 1.0 millón de llantas/año

$(250 \text{ hp} \times 70 \% \text{ carga} \times .746 \text{ kw conversión} = 131 \text{ kw/hora} \times 2080 \text{ horas/año} = 272,480 \text{ kw/año})$

Para 0.5 millones de llantas/año, calculando un factor de carga de 50 % o 195,000 kw/año

Para 0.25 millones de llantas/año, calculando un factor de carga de 40 % o 156,000 kw/año

Para tiras de 2.5 (1 pulgada) nominales

Mantenimiento del equipo de procesamiento	\$25.00/ton
Mantenimiento del cargador/Bobcat	\$ 2.00/ton
Energía para el equipo	

Para 1.0 millón de llantas/año

$(250 \text{ hp} \times 85 \% \text{ carga} \times .746 \text{ kw conversión} = 159 \text{ kw/hora} \times 2080 \text{ horas/año} = 330,000 \text{ kw/año})$

Para 0.5 millones de llantas/año, calculando un factor de carga de 70 % o 272,000 kw/año

Para 0.25 millones de llantas/año, calculando un factor de carga de 55 % o 213,000 kw/año

## **OTROS COMPONENTES DE LOS COSTOS FIJOS**

Seguros

Financiamiento

Impuestos gubernamentales

# APÉNDICE H

## Comparación de la susceptibilidad al volumen de las plantas de procesamiento de llantas

### PRODUCTO AGREGADO DERIVADO DE LLANTA (ADL)

#### COSTOS VARIABLES

COMPONENTE DEL COSTO	ÍNDICE DE PROCESAMIENTO (Llantas/Año)								
	250,000			500,000			1,000,000		
	Cantidad	Costo/año*	Costo/llanta*	Cantidad	Costo/año*	Costo/llanta*	Cantidad	Costo/año*	Costo/llanta*
Mano de obra									
Supervisor	1	\$40,000	\$0.16	1	\$40,000	\$0.08	1	\$40,000	\$0.04
Manual	2	\$48,000	\$0.19	2	\$48,000	\$0.10	3	\$72,000	\$0.07
Subtotal	3	\$88,000	\$0.35	3	\$88,000	\$0.18	4	\$112,000	\$0.11
Energía (mw/año) a \$100/mw	92	\$9,200	\$0.04	115	\$11,500	\$0.02	162	\$16,200	\$0.02
Mantenimiento									
Trituradora (\$/ton.)	6	\$15,000	\$0.06	6	\$30,000	\$0.06	6	\$60,000	\$0.06
Otros (\$/ton.)	2	\$5,000	\$0.02	2	\$10,000	\$0.02	2	\$20,000	\$0.02
Subtotal	8	\$20,000	\$0.08	8	\$40,000	\$0.08	8	\$80,000	\$0.08
Disposición del alambre (toneladas)	0	-	-	0	-	-	0	-	-
TOTAL DE COSTOS VARIABLES		\$117,200	\$0.47		\$139,500	\$0.28		\$208,200	\$0.21

Depreciación (real con equipo para procesamiento de llantas – normalmente de 5 a 8 años)

\* Costos en dólares estadounidenses

#### COSTOS FIJOS

COMPONENTE DEL COSTO	ÍNDICE DE PROCESAMIENTO (Llantas/Año)								
	250,000			500,000			1,000,000		
	Cantidad	Costo/año*	Costo/llanta*	Cantidad	Costo/año*	Costo/llanta*	Cantidad	Costo/año*	Costo/llanta*
Administración									
Gerente	1	\$50,000	\$0.20	1	\$50,000	\$0.10	1	\$50,000	\$0.05
Ventas/Servicio	Gerente	-	-	Gerente	-	-	1	\$40,000	\$0.04
Secretarial	1	\$20,000	\$0.08	1	\$20,000	\$0.04	1	\$20,000	\$0.02
Gastos de oficina		\$18,000	\$0.07		\$18,000	\$0.04		\$18,000	\$0.02
Servicios profesionales		\$5,000	\$0.02		\$10,000	\$0.02		\$10,000	\$0.01
Subtotal		\$93,000	\$0.37		\$98,000.00	\$0.20		\$138,000.00	\$0.14
Gastos capitalizables									
Amortización (12.5%/año)		\$97,813	\$0.39		\$97,813	\$0.20		\$97,813	\$0.10
Gastos generales									
Seguros (1% de \$1M)		\$10,000	\$0.04		\$10,000	\$0.02		\$10,000	\$0.01
Predial (1% of \$1M)		\$10,000	\$0.04		\$10,000	\$0.02		\$10,000	\$0.01
Subtotal		\$20,000	\$0.08		\$20,000	\$0.04		\$20,000	\$0.02
TOTAL COSTOS FIJOS		\$210,813	\$0.84		\$215,813	\$0.43		\$255,813	\$0.26
COSTO TOTAL		\$328,013	\$1.31		\$355,313	\$0.71		\$464,013	\$0.46
UTILIDAD (25% Rendimiento de la inversión sobre \$1M)		\$250,000	\$1.00		\$250,000	\$0.50		\$250,000	\$0.25
PRECIO TOTAL		\$578,013	\$2.31		\$605,313	\$1.21		\$714,013	\$0.71

\* Costos en dólares estadounidenses



# COMPARACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL VOLUMEN DE LAS PLANTAS DE PROCESAMIENTO DE LLANTAS

## TIRAS DE 5 CM (2 PULGADAS) NOMINALES

### COSTOS VARIABLES

COMPONENTE DEL COSTO	ÍNDICE DE PROCESAMIENTO (Llantas/Año)								
	250,000			500,000			1,000,000		
	Cantidad	Costo/año*	Costo/llanta*	Cantidad	Costo/año*	Costo/llanta*	Cantidad	Costo/año*	Costo/llanta*
Mano de obra									
Supervisor	1	\$40,000	\$0.16	1	\$40,000	\$0.08	1	\$40,000	\$0.04
Manual	2	\$48,000	\$0.19	2	\$48,000	\$0.10	3	\$72,000	\$0.07
Subtotal	3	\$88,000	\$0.35	3	\$88,000	\$0.18	4	\$112,000	\$0.11
Energía (mw/año) a \$100/mw	156	\$15,600	\$0.06	195	\$19,500	\$0.04	272	\$27,200	\$0.03
Maintenance									
Trituradora (\$/ton.)	15	\$37,500	\$0.15	15	\$75,000	\$0.15	15	\$150,000	\$0.15
Otros (\$/ton.)	2	\$5,000	\$0.02	2	\$10,000	\$0.02	2	\$20,000	\$0.02
Subtotal	17	\$42,500	\$0.17	17	\$85,000	\$0.17	17	\$170,000	\$0.17
Disposición del alambre (toneladas)	0	-	-	0	-	-	0	-	-
TOTAL DE COSTOS VARIABLES		\$146,100	\$0.58		\$192,500	\$0.39		\$309,200	\$0.31

\* Costos en dólares estadounidenses

### COSTOS FIJOS

COMPONENTE DEL COSTO	ÍNDICE DE PROCESAMIENTO (Llantas/Año)								
	250,000			500,000			1,000,000		
	Cantidad	Costo/año*	Costo/llanta*	Cantidad	Costo/año*	Costo/llanta*	Cantidad	Costo/año*	Costo/llanta*
Administración									
Gerente	1	\$50,000	\$0.20	1	\$50,000	\$0.10	1	\$50,000	\$0.05
Ventas/Servicio	Gerente	-	-	Gerente	-	-	1	\$40,000	\$0.04
Secretarial	1	\$20,000	\$0.08	1	\$20,000	\$0.04	1	\$20,000	\$0.02
Gastos de oficina		\$18,000	\$0.07		\$18,000	\$0.04		\$18,000	\$0.02
Servicios profesionales		\$5,000	\$0.02		\$10,000	\$0.02		\$10,000	\$0.01
Subtotal		\$93,000	\$0.37		\$98,000	\$0.20		\$138,000	\$0.14
Gastos capitalizables									
Amortización (12.5%/año)		\$150,000	\$0.60		\$150,000	\$0.30		\$150,000	\$0.15
Gastos generales									
Seguros (1% de \$1.5M)		\$15,000	\$0.06		\$15,000	\$0.03		\$15,000	\$0.02
Predial (1% de \$1.5M)		\$15,000	\$0.06		\$ 15,000	\$0.03		\$15,000	\$0.02
Subtotal		\$30,000	\$0.12		\$30,000	\$0.06		\$30,000	\$0.03
TOTAL COSTOS FIJOS		\$273,000	\$1.09		\$278,000	\$0.56		\$318,000	\$0.32
COSTO TOTAL		\$288,000	\$1.15		\$293,000	\$0.59		\$333,000	\$0.33
UTILIDAD (25% Rendimiento de la inversión sobre \$1.5 M)		\$375,000	\$1.50		\$375,000	\$0.75		\$375,000	\$0.38
PRECIO TOTAL REQUERIDO		\$663,000	\$2.65		\$668,000	\$1.34		\$708,000	\$0.71

\* Costos en dólares estadounidenses

COMPARACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL VOLUMEN DE LAS PLANTAS DE PROCESAMIENTO DE LLANTAS  
TIRAS DE 2.5 CM (1 PULGADA) NOMINALES  
COSTOS VARIABLES

COMPONENTE DEL COSTO	ÍNDICE DE PROCESAMIENTO (Llantas/Año)								
	250,000			500,000			1,000,000		
	Cantidad	Costo/año*	Costo/llanta*	Cantidad	Costo/año*	Costo/llanta*	Cantidad	Costo/año*	Costo/llanta*
Mano de obra									
Supervisor	1	\$40,000	\$0.16	1	\$40,000	\$0.08	1	\$40,000	\$0.04
Manual	2	\$48,000	\$0.19	2	\$48,000	\$0.10	3	\$72,000	\$0.07
Subtotal	3	\$88,000	\$0.35	3	\$88,000	\$0.18	4	\$112,000	\$0.11
Energía (mw/año) a \$100/mw	213	\$21,300	\$0.09	272	\$27,200	\$0.05	330	\$33,000	\$0.03
Mantenimiento									
Trituradora (\$/ton.)	25	\$62,500	\$ 0.25	25	\$125,000	\$0.25	25	\$250,000	\$0.25
Otros (\$/ton.)	2	\$5,000	\$0.02	2	\$10,000	\$0.02	2	\$20,000	\$0.02
Subtotal	27	\$67,500	\$0.27	27	\$135,000	\$0.27	27	\$270,000	\$0.27
Disposición del alambre (toneladas)	50	\$1,500	\$0.01	100	\$3,000	\$0.01	200	\$6,000	\$0.01
TOTAL DE COSTOS VARIABLES		\$178,300	\$0.71		\$253,200	\$0.51		\$421,000	\$0.42

\* Costos en dólares estadounidenses

COSTOS FIJOS

COMPONENTE DEL COSTO	ÍNDICE DE PROCESAMIENTO (Llantas/Año)								
	250,000			500,000			1,000,000		
	Cantidad	Costo/año*	Costo/llanta*	Cantidad	Costo/año*	Costo/llanta*	Cantidad	Costo/año*	Costo/llanta*
Administración									
Gerente	1	\$50,000	\$0.20	1	\$50,000	\$0.10	1	\$50,000	\$0.05
Ventas/Servicio	Gerente	-	-	Gerente		-	1	\$40,000	\$0.04
Secretarial	1	\$20,000	\$0.08	1	\$20,000	\$0.04	1	\$20,000	\$0.02
Gastos de oficina		\$18,000	\$0.07		\$18,000	\$0.04		\$18,000	\$0.02
Servicios profesionales		\$5,000	\$0.02		\$10,000	\$0.02		\$10,000	\$0.01
Subtotal		\$93,000	\$0.37		\$98,000	\$0.20		\$138,000	\$0.14
Gastos capitalizables									
Amortización (12.5%/año)		\$162,500	\$0.65		\$162,500	\$0.33		\$162,500	\$0.16
Gastos generales									
Seguros (1% de \$1.6M)		\$16,000	\$0.06		\$16,000	\$0.03		\$16,000	\$0.02
Predial (1% de \$1.6M)		\$16,000	\$0.06		\$16,000	\$0.03		\$16,000	\$0.02
Subtotal		\$ 32,000	\$0.13		\$32,000	\$0.06		\$32,000	\$0.03
TOTAL COSTOS FIJOS		\$287,500	\$1.15		\$292,500	\$0.59		\$332,500	\$0.33
COSTO TOTAL		\$303,500	\$1.21		\$308,500	\$0.62		\$348,500	\$0.35
UTILIDAD (25% Rendimiento de la inversión sobre \$1.6 M)		\$400,000	\$1.60		\$400,000	\$0.80		\$400,000	\$0.40
PRECIO TOTAL		\$703,500	\$2.81		\$708,500	\$1.42		\$748,500	\$0.75

\* Costos en dólares estadounidenses



