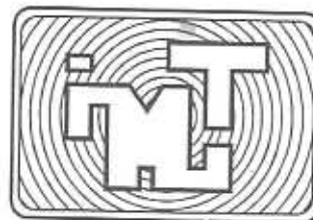
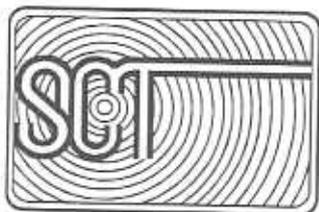


ISSN 0188-7297



---

# **TREN DE MAQUINARIA PARA EL RENOVADO DE CARPETA ASFALTICA. DISEÑO CONCEPTUAL**

**Instituto Mexicano del Transporte**

**Secretaría de Comunicaciones y Transportes**

**Publicación Técnica No. 85  
Sanfandila, Qro. 1996**

---

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE  
SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

**TREN DE MAQUINARIA PARA EL  
RENOVADO DE CARPETA ASFALTICA.  
DISEÑO CONCEPTUAL.**

Publicación Técnica No. 85  
Sanfandila, Qro. 1996

---

En la elaboración de este trabajo intervinieron Francisco L. Rodríguez Bonilla, José Antonio Romero Navarrete, Alejandro Lozano Guzmán y Andrés Hernández Guzmán por el Instituto Mexicano del Transporte, y Juliusz Lewinski y José Máximo Muñoz Hernández por el Centro de Investigación y Asistencia Técnica del Estado de Querétaro, A.C.

## Contenido

---

Resumen.	vi
Abstract.	vii
1. Introducción.	1
2. Análisis bibliográfico.	3
2.1. Máquinas recicladoras en frío.	3
2.2. Máquinas recicladoras en caliente.	8
3. Propuestas de arreglos generales.	23
3.1. Propuesta 1. Fresadora comercial que empuja a otros módulos.	24
3.2. Propuesta 2. Fresadora comercial que jala a otros módulos.	26
3.3. Propuesta 3. Máquina autopropulsada que empuja a otros módulos.	29
3.4. Propuesta 4. Máquina autopropulsada que jala a otros módulos.	33
3.5. Propuesta 5. Fresadora comercial que jala a un módulo.	36
3.6. Propuesta 6. Fresadora comercial que jala a un módulo.	39
3.7. Propuesta 7. Máquina autopropulsada que jala a un módulo.	39
3.8. Propuesta 8. Arreglo final.	43

<b>4. Cálculos generales del arreglo preferido.</b>	<b>51</b>
4.1. Cinemática del Tren de Maquinaria en la carretera	51
4.2. Potencia de fresado.	57
4.3. Potencia requerida para el desplazamiento.	61
4.4. Localización del centro de gravedad en un plano, cargas en los ejes y cálculos de tracción.	63
<b>5. Selección de elementos.</b>	<b>65</b>
5.1. Tambor fresador.	65
5.2. Transportador de cangilones.	69
5.3. Criba.	72
5.4. Transportador de banda.	73
5.5. Tambor Calentador-Mezclador.	74
5.6. Filtros de bolsas.	81
5.7. Motor de combustión interna.	84
5.8. Dimensiones de los depósitos.	85
5.9. Ejes y llantas.	89
5.10. Pavimentador de asfalto.	90
<b>6. Conclusiones</b>	<b>93</b>
<b>7. Referencias</b>	<b>95</b>
<b>Anexo A</b>	<b>97</b>
<b>Anexo B</b>	<b>99</b>

Anexo C	103
Anexo D	105

## Resumen

---

En este trabajo se presenta el diseño conceptual de un Tren de Maquinaria (conjunto de máquinas) para rehabilitar la superficie de rodamiento de carreteras. El proceso a desarrollar, consiste en el fresado de la superficie dañada, recuperar el material y reciclarlo. El reciclado del material involucra el proceso del asfalto recuperado, en sitio y en caliente, de tal manera que se puede alimentar a una pavimentadora, para tender la nueva superficie de rodamiento.

En el reporte se presentan varias de las alternativas de diseño que fueron analizadas, y de la que se seleccionó, se discute su factibilidad económica, con base en el empleo de maquinaria comercialmente disponible.

## Abstract

---

This work deals with the conceptual design of a machinery train (set of machines) to rehabilitate road surfaces. The designed process consists of milling the damage surface, reclaiming the asphalt material and recycling it. The recycling process involves the hot mixture, in situ, of the reclaimed material with the new one. Once this process is completed, the reprocessed material is sent to a paver machine to lay down the new road surface.

On this report, various design alternatives are considered and discussed and the chosen one is further analysed to sustain its economic feasibility based on commercially available machines.

## **1. Introducción**

---

Uno de los requisitos primordiales para cumplir positivamente las perspectivas económicas de México, es el mantener y mejorar los aproximadamente 40,000 km de carreteras de la red troncal y la ampliación y mejoramiento de la red alimentadora y rural [1].

Para esto, es necesaria la introducción de nuevos métodos que ayuden al mantenimiento y reconstrucción de la red carretera del país. Así el presente estudio analiza y propone el diseño de un Tren de Maquinaria que realice el reciclado en caliente en el lugar de los pavimentos asfálticos, con el propósito de tener una infraestructura carretera acorde a las perspectivas de desarrollo.

La propuesta se fundamenta en una amplia investigación de métodos y equipos para reciclar material recuperado (plantas estacionarias, reciclado en el lugar en caliente y en frío) que existen a nivel mundial, consultando folletos, patentes, artículos, libros y entrevistas con distribuidores de maquinaria. Esto permitió conocer con detalle tanto los métodos como los equipos de las diversas empresas que fabrican estos productos; las características de las carreteras existentes en el país (tipos de carreteras, materiales utilizados en su construcción, dimensiones tanto de su estructura como de facilidad de tránsito); así como las normas que regulan su diseño, construcción y mantenimiento.

Como resultado de dicha investigación se concluyó que existen equipos para reciclar material recuperado que tienen ventajas con respecto a otros en cuanto al consumo de combustible por tonelada y la cantidad de material recuperado que pueden reciclar bajo el mismo contenido de humedad. Estos equipos montados sobre un Tren de Maquinaria que pueda reciclar material recuperado en caliente en el lugar, permiten aplicar inmediatamente la mezcla caliente sobre la carretera. El poder realizar el reciclado de material recuperado en caliente en el lugar, elimina los gastos asociados con el transporte del material recuperado y el material nuevo, comparado con una planta estacionaria. Asimismo, al disponer de una mezcla caliente en el lugar se facilita el manejo de este material mediante los equipos de nivelado y compactado. Como resultado final se obtiene un pavimento asfáltico rehabilitado de muy buena calidad y en forma económica.

De acuerdo a los principios de ingeniería, es factible el diseño de un Tren de Maquinaria para reciclar material recuperado en caliente en el lugar con ventajas competitivas. Estas se refieren a utilizar la cantidad adecuada de material recuperado, de acuerdo a la curva granulométrica recomendada para reciclar pavimento asfáltico. El resto del material se acumula para su posible uso posterior. La mezcla caliente se tiende inmediatamente sobre la carretera, evitando la pérdida de temperatura y mejorando la calidad del pavimento.

En este trabajo se presentan, en el capítulo 2, los resultados del análisis bibliográfico, tanto para máquinas recicladoras en frío como en caliente. En el capítulo 3, se discuten las diferentes opciones de combinación de máquinas y procesos para el reciclado del pavimento asfáltico. Cada opción representa una etapa del proceso de análisis realizado, en el que la propuesta inicial fue la número 1; una vez que se analizaron sus ventajas y desventajas, se realizaron modificaciones, con lo que se conformó un nuevo arreglo, es decir la opción número 2. Este procedimiento se repitió sucesivamente hasta obtener la propuesta más satisfactoria, la número 8. En el capítulo 4 se presentan detalles del cálculo de componentes del arreglo de máquinas seleccionado.

Una de las ventajas del diseño propuesto para el Tren de Maquinaria, es que se hizo con base en equipos disponibles en el mercado nacional. La selección de componentes comerciales para el Tren de Maquinaria propuesto se presenta en el capítulo 5.

## **2. Análisis bibliográfico**

---

A continuación se analizan los diferentes tipos de máquinas que se utilizan para reciclar en frío o en caliente, según la búsqueda bibliográfica realizada. Esta incluyó la revisión de patentes registradas en Estados Unidos y la revisión de bancos de información *Claims*, *Cassis* y *Micropatent*, así como de libros, artículos, folletos y catálogos relacionados con el tema.

### **2.1. Máquinas recicladoras en frío.**

El método de reciclado en frío en el lugar (*Cold In-Place Recycling*) es uno de los métodos más recientes para el renovado de carpetas asfálticas. Este método controla automáticamente la remoción del pavimento a una profundidad adecuada, repara la superficie con bordos y otras imperfecciones. La textura resultante del pavimento se puede usar inmediatamente o se puede revestir con un mínimo de material.

A continuación se analizan arreglos de máquinas que realizan el reciclado de asfalto en frío.

#### **2.1.1. Patentes**

##### **2.1.1.1. Método de renovado de la superficie de carpetas asfálticas [2].**

El método comprende la remoción de la superficie de la carretera con un escarificador autopropulsado, independiente de la máquina descrita por esta patente. El invento consta de una máquina autopropulsada (ver Figura 2.1) que recibe el material escarificado sobre un contenedor (1) donde se le rocía agua (20) para obtener un 30 a 40% de humedad. El transportador (2) lleva el material hasta la criba (4) y mediante un registrador de peso (3) se cuantifica la cantidad de material recuperado para determinar la cantidad de la emulsión que se va a aplicar.

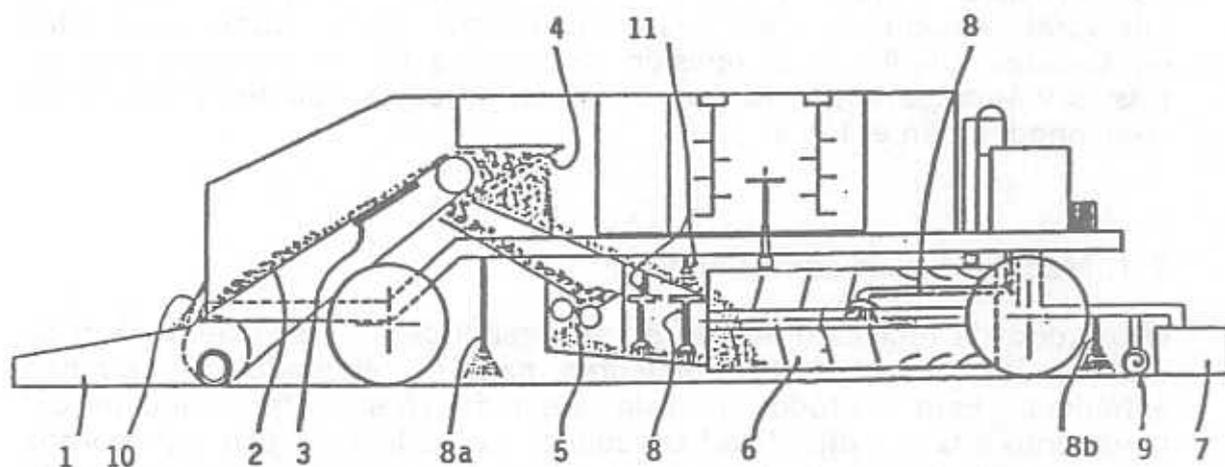


Figura 2.1. Método de renovado de la superficie de carpeta asfáltica [2].

La criba (4) separa el material escarificado en dos porciones. La fracción menor de 35 mm pasa la criba y se transporta hacia el mezclador (6). La fracción gruesa pasa por el triturador (5) para reducir su tamaño. Al material triturado antes de llegar a la mezcladora (6) se le aplica un rejuvenecedor con los rociadores (8). Las dos porciones se mezclan con la emulsión en la mezcladora (6). La mezcla nueva se distribuye con el elemento (9) y se nivela con el nivelador (7). La compactación del material se realiza con un compactador convencional.

La cantidad de emulsión aplicada es aproximadamente 1 a 3% del peso total del material escarificado y se aplica con una concentración de 60%. Los elementos (8), (8a) y (8b) realizan esta aplicación.

Otro rejuvenecedor que se aplica es el *Diocetylphthalate* (u otra sustancia que tenga una superficie activa equivalente, solubilización y efecto dispersante hacia el material bituminoso) mediante el aspersionador (11).

### 2.1.1.2. Sistema para recuperar y distribuir pavimento en el lugar [3].

La Figura 2.2 muestra una vista esquemática del equipo empleado en este sistema, donde un aparato pavimentador (1), una máquina fresadora (2), un carro cribador (3) y un camión suministrador de emulsión (4) son los principales elementos. La fresadora autopropulsada proporciona la potencia necesaria para jalar el pavimentador, empujar el módulo de cribado y parcialmente al camión cuando sea necesario.

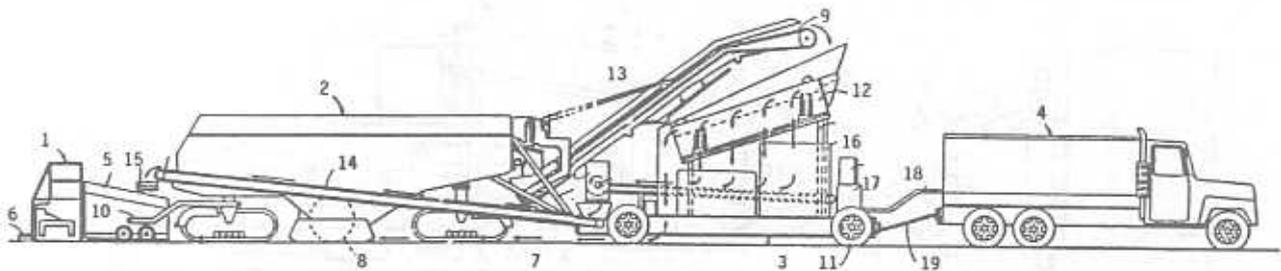


Figura 2.2. Vista esquemática del equipo empleado para recuperar y distribuir pavimento en el lugar [3].

El fresador (8) está localizado en la posición central de la máquina. El transportador (9) recibe el material fresado y lo transporta hacia la criba (12). La criba separa el material en dos porciones. La porción que pasa la criba es transportada al mezclador (13), el cual mezcla el material con un aglutinante. El material que no pasa a través de la criba (12) cae directamente hacia abajo sobre la superficie del pavimento (7), entre las ruedas traseras (11) del carro (3). La mezcla fría que sale del mezclador se transporta hacia atrás de la máquina por medio de los transportadores (14) y (15).

El pavimentador (1) tiene una tolva (5) en su porción delantera para recibir el material que formará la nueva carpeta. La mezcla fría se nivela con el elemento (6). Los brazos (10) sirven de unión entre el pavimentador y la fresadora autopropulsada. El aglutinante se pasa del camión (4) al contenedor (16), mediante una bomba (17) y un conducto (18). El elemento (19) une al módulo de cribado y al camión de la emulsión (4).

### 2.1.1.3. Aparato y método para producir asfalto mezclado en frío [4].

En la Figura 2.3 se muestra un invento que es accionado por una fresadora convencional. La fresadora comercial corta y levanta una capa de la superficie de la carretera y la transporta por medio de la banda (1) hacia la criba inclinada (2). El material recuperado que pasa la malla (2) se dirige hacia el transportador (6) y la mezcladora (7). Sin embargo, la porción gruesa que no pasó la malla (2) se descarga sobre un triturador (3) que deposita el material triturado sobre un transportador de retorno (4) y a la vez otro pequeño transportador transversal (5) descarga el material sobre la banda principal (21).

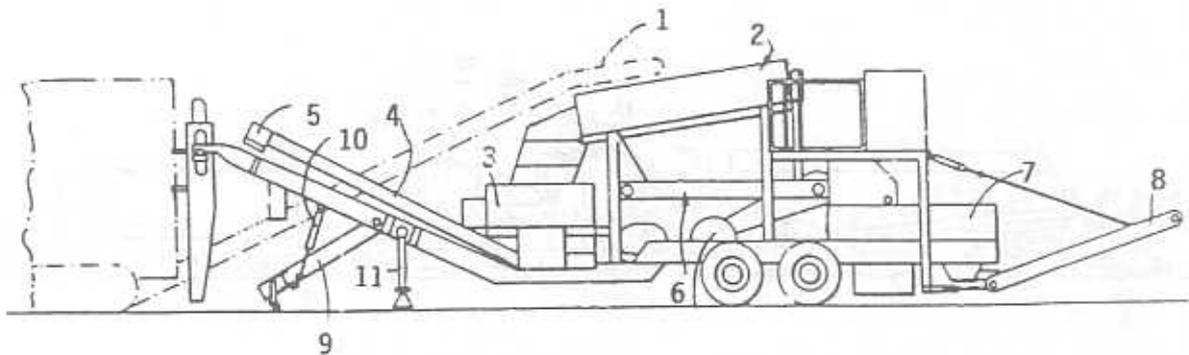


Figura 2.3. Equipo para producir asfalto mezclado en frío [4].

En el elemento (7) se mezclan el material recuperado y las emulsiones. La mezcla fría se deposita sobre una banda (8) que la descarga sobre la carretera en forma hilerada. Posteriormente un pavimentador comercial realiza la distribución y nivelado de la mezcla.

Los elementos (9, 10 y 11) son los encargados de mantener la horizontalidad de la máquina propuesta.

### 2.1.1.4. Máquina para reciclar pavimento asfáltico [5].

La máquina ROADTEC RX-110 es fabricada por Astec Company. La máquina autopropulsada (ver Figura 2.4) empuja al camión de la emulsión (9). El fresador (1) localizado en la parte media de la longitud de la máquina, corta una capa de pavimento deteriorado y lanza el material hacia la parte trasera del mismo. El giro del fresador es hacia adelante, favoreciendo la tracción. Una cubierta (3) fuerza al material a caer sobre un elevador de cangilones (2).

Este descarga el material sobre la criba (4), la cual separa el material en dos porciones. La porción gruesa pasa al triturador (5) para disminuir su tamaño. El material triturado se descarga sobre la carretera fresada y al frente del fresador, permitiendo aprovechar el efecto de trituración del fresador al momento de levantar el material nuevamente de la superficie. La porción que pasa la malla (4) cae sobre el transportador (5), ubicado en forma horizontal y lateral a la máquina. Un registrador de peso (6) regula la cantidad de emulsiones que se debe agregar en la mezcladora (7). La emulsión se aplica con el rociador (8).

La mezcla fría se descarga en forma hilerada sobre la carretera y posteriormente un pavimentador comercial levanta, distribuye y nivela la mezcla.

La transmisión hidrostática se usa para el sistema de tracción, transporte de material, cribado y mezclado. El fresador (1) usa transmisión mecánica desde el motor a través de bandas "V".

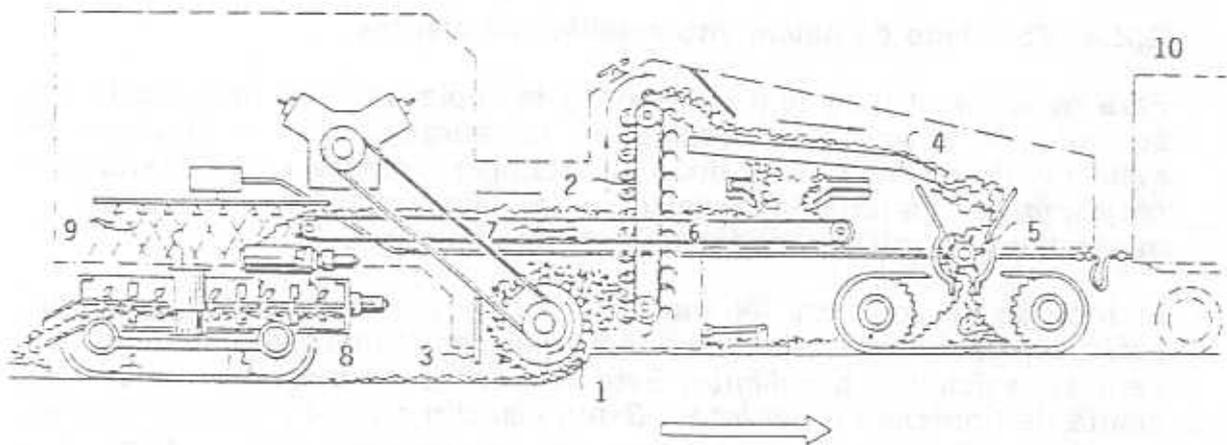


Figura 2.4. Máquina ROADTEC RX-110 de Astec Company para reciclar pavimento asfáltico.

Como resultado parcial de la revisión de las patentes descritas anteriormente se tiene un panorama general de los arreglos de máquinas que pueden reciclar pavimento asfáltico en frío, así como los diferentes sistemas que realizan las operaciones de corte, cribado, triturado y mezclado.

En los arreglos anteriores se nota que hay partes comunes de los trenes de reciclado, como es el fresador, sistema de cribado, mezclador y un sistema de transportadores entre estos sistemas.

En algunos arreglos el triturador es opcional, ya que existen máquinas que dejan sobre la superficie de la carretera y al frente del fresador el material que no pasa las cribas.

En un Tren de Maquinaria por lo general sólo un módulo es autopropulsado (donde se localiza el fresador) y éste empuja o jala el resto de los componentes en el trabajo.

Algunas máquinas después de mezclar el material, lo dejan inmediatamente detrás del tren; posteriormente un pavimentador convencional distribuye, nivela y compacta la mezcla fría.

## **2.2. Máquinas recicladoras en caliente.**

### **2.2.1. Reciclado de pavimento asfáltico en plantas.**

Para remover el pavimento dañado y reemplazarlo por material bueno se requiere aplicar una técnica de restauración. En el proceso de reciclado de pavimento asfáltico en una planta central estacionaria (*Hot recycling*) al material a reciclar se le adiciona calor, resultando un material con la misma calidad que el material nuevo.

El método de calentar el material nuevo y transferir al pavimento asfáltico recuperado calor por conducción, es el método más aceptable para el reciclado en caliente. Este proceso se puede realizar en una planta de horneado o por lotes (*Batch plant*) o en una planta de tambor mezclador (*Drum mixer plant*), pero las técnicas son significativamente diferentes, dependiendo del equipo usado.

#### **2.1.2.1. Planta por lotes (*Batch plant*) [6].**

En este método el material nuevo se transporta desde un depósito por medio de una banda hasta un calentador. El material caliente que sale de este calentador se transporta hasta una tolva mezcladora. Por otro lado, el material recuperado se alimenta desde un depósito hasta la tolva mezcladora por medio de un transportador de banda (ver Figura 2.5).

En la tolva mezcladora existe un mezclador (*pugmill*) el cual se encarga de formular una mezcla homogénea del material nuevo y el material recuperado.

Durante la mezcla, el material recuperado absorbe calor por conducción del material nuevo, ya que este último ha sido calentado. Con este método se puede mezclar material recuperado y material nuevo con una relación de 40:60, aunque el límite práctico es de 20:80. Los factores que limitan la relación de material recuperado con el material nuevo son: la temperatura a la cual debe calentarse el material nuevo, porcentaje de humedad del material recuperado (abajo del 2%), temperatura de la mezcla deseada, rango de producción deseado y capacidad de la mezcladora.

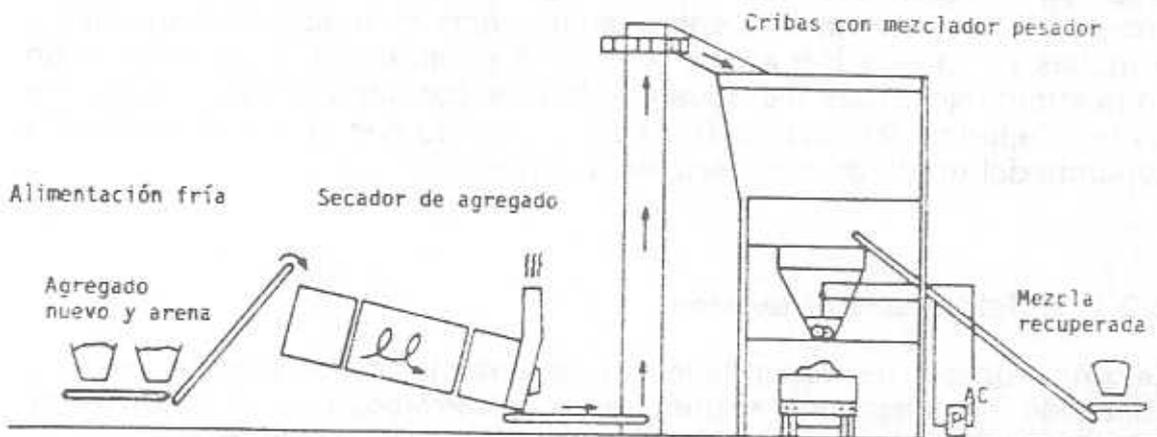


Figura 2.5. Planta de reciclado de asfalto por lotes.

#### 2.1.2.2. Planta de tambor mezclador (*Drum mixer plant*).

El método del tambor mezclador ha tenido varias mejoras desde el tambor convencional para producir asfalto nuevo hasta la capacidad de poder reciclar pavimento asfáltico. Mayores detalles acerca de los tipos de tambores calentadores-mezcladores existentes se presentan en el capítulo 5.

Usualmente, un material nuevo húmedo permite el uso de un alto porcentaje de material recuperado libre de humo, es decir, la humedad del material nuevo reduce la temperatura del gas de escape. Mezclas con 70% de material recuperado se pueden producir libres de humo, pero el material nuevo debe estar muy húmedo y el material recuperado extremadamente seco. Las mezclas que contienen un 40% de material recuperado han producido humo cuando el material nuevo estaba seco y el material recuperado muy húmedo. Con este método la máxima relación de material recuperado y material nuevo es aproximadamente 50:50 y cumplen con todas las normas ambientales; sin embargo, la relación práctica es de 30:70.

### **2.2.2. Reciclado de asfalto en caliente en el lugar.**

Los profesionales del pavimento consideran que realizar el reciclamiento en el lugar es lo último en perfección, debido sobre todo a la eficiencia y calidad en la operación de reciclamiento del material viejo.

El reciclado en caliente en el lugar (*Hot in place recycling*) prevee una estrategia de mantenimiento a muy bajo costo. Este sistema es aplicable a carreteras que son estructuralmente adecuadas y que poseen una base estable.

Los siguientes métodos de rehabilitación son propuestos por la empresa Wirtgen [7], los cuales implican el uso de sistemas que provocan un calentamiento sobre la superficie de la carretera utilizando planchas con rayos infrarrojos y además comprenden la escarificación de la superficie. Estos métodos pueden ser considerados para restaurar las propiedades del pavimento asfáltico, en los que el uso de cada uno depende del grado de deterioro de la carretera.

#### **2.2.2.1. Reformación (*Reshape*).**

Es un proceso de reperfilado en el cual la superficie se calienta utilizando planchas que emiten rayos infrarrojos, con el objetivo de reblandecer la capa de pavimento asfáltico, sin dañar demasiado la granulometría original de los materiales. Posteriormente la superficie se remueve utilizando escarificadores rotatorios. El material removido es mezclado, después distribuido por medio de un sinfín y por último la mezcla se nivela utilizando una regla. En este método no se agrega material de corrección ni agentes rejuvenecedores.

Las roderas y otras deformaciones se remueven escarificando el pavimento a una profundidad de 4 a 6 cm (ver Figura 2.6). Además, la pendiente puede modificarse hasta cierto límite para mejorar el drenaje.

#### **2.2.2.2. Repavimentación (*Repave*).**

Cuando se utiliza el método de repavimentación, se restaura el perfil de la superficie existente de forma similar al método de reformado, y al mismo tiempo se aplica una capa nueva de mezcla adicional; ambas capas se compactan al mismo tiempo (ver Figura 2.7).

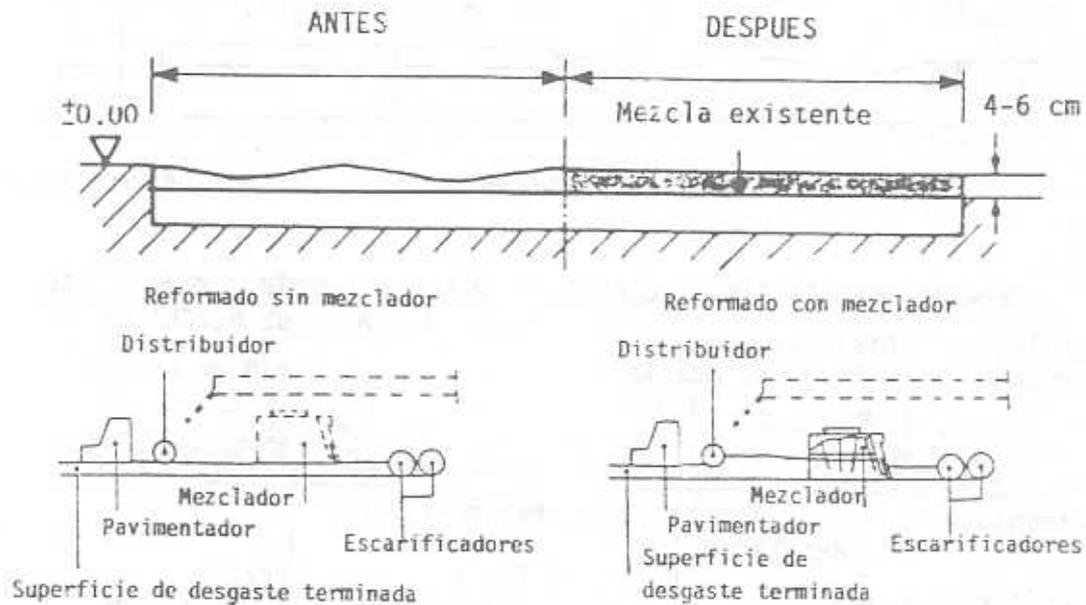


Figura 2.6. Proceso de reciclado por reformado (*reshape*).

Después que las planchas calentadoras cumplen su función, dos escarificadores rotatorios se encargan de remover el pavimento. Posteriormente el material a recuperar se mezcla utilizando un mezclador (*pugmill*). Una vez que la mezcla ha sido homogeneizada, ésta se distribuye lateralmente para finalizar la primera etapa de este proceso con la acción de una regla niveladora (ver Figura 2.7).

La segunda etapa de este proceso inicia inmediatamente detrás de la regla niveladora donde cae la nueva mezcla, la cual es distribuida transversalmente por un segundo sinfín. Por último, el nuevo material de aporte se nivela utilizando una regla pavimentadora, para formar la capa adicional. El pavimento existente se remueve a una profundidad de 4 cm, y se agrega una capa adicional con un espesor de 2 cm.

El método de repavimentación se utiliza para restaurar huellas de patinaje, baches, y para reforzar el pavimento asfáltico.

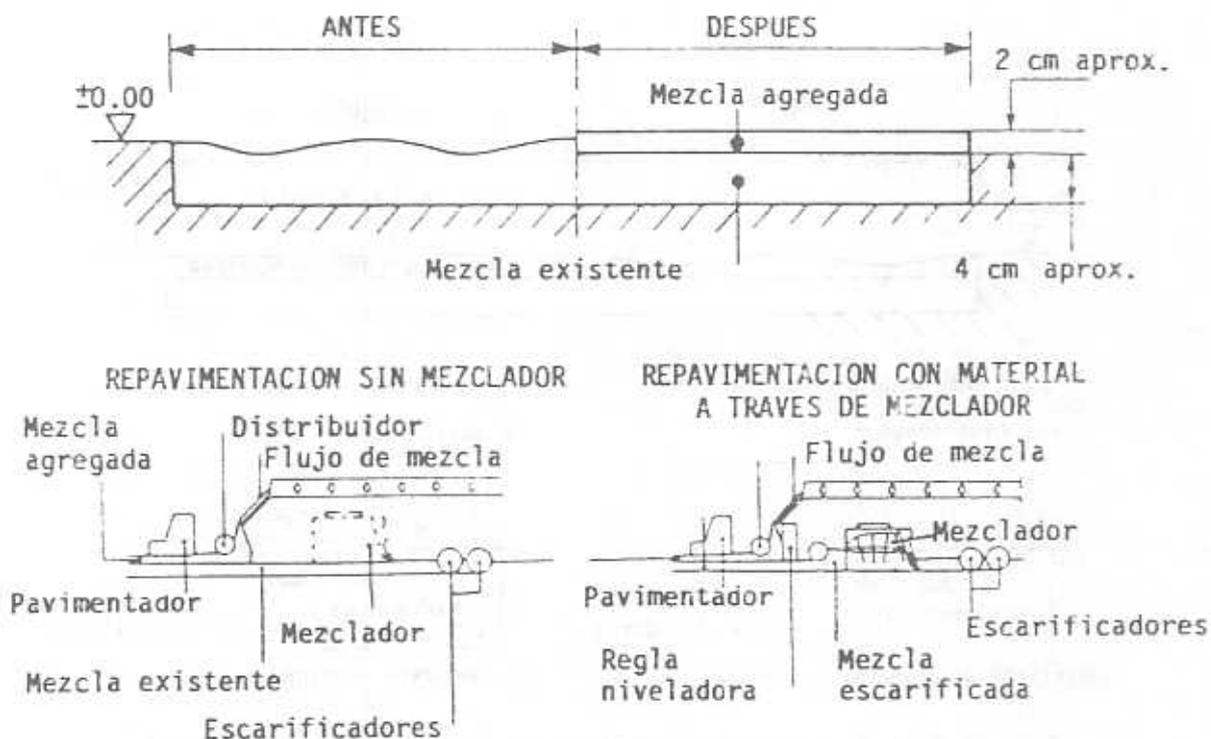


Figura 2.7. Esquema del método de repavimentación.

### 2.2.2.3. Remezcla (*Remix*).

Con el proceso de **remezcla** se modifican las características del pavimento asfáltico por la adición de mezcla caliente nueva y un agente rejuvenecedor bituminoso, con el objetivo de restaurar las propiedades de la cinta asfáltica que se desea reciclar (ver Figura 2.8).

La remezcla es una técnica que contempla la eliminación de degradaciones mediante el reciclado del pavimento. La capa existente se procesa y mejora de tal manera que satisface los requisitos que deben cumplir las cintas asfálticas nuevas. Este proceso es apropiado para el saneamiento de carreteras asfálticas, desde carreteras secundarias hasta autopistas.

Después de que se reblandece la superficie de la carretera por el calentamiento que producen las planchas, los escarificadores se encargan de remover la cinta asfáltica. En el momento que los escarificadores cumplen con su función, se aplica el rejuvenecedor necesario para recuperar las propiedades de la mezcla. Atrás de los escarificadores, se encuentra el mezclador, el cual se encarga de realizar una mezcla homogénea que incluye material recuperado, rejuvenecedor y material nuevo, es decir, el material de corrección se aplica en esta zona. Debido a la cantidad de material nuevo que se agrega, el espesor de la cinta asfáltica aumenta hasta 2 cm como se puede apreciar en la Figura 2.8.

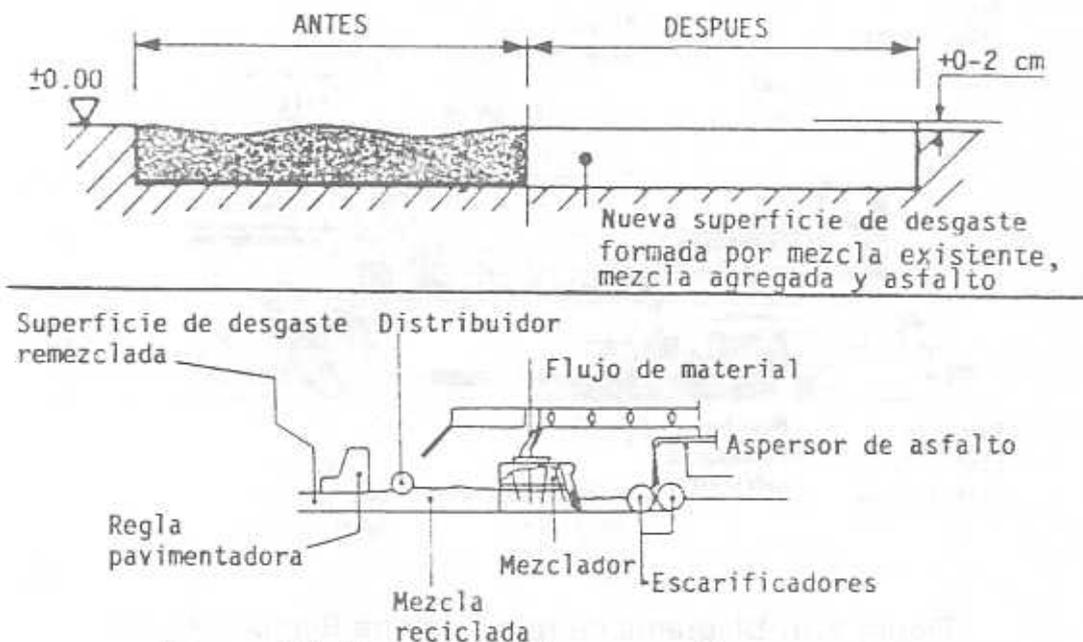


Figura 2.8. Esquema del proceso de remezcla.

Un ejemplo de este tipo de máquinas es la Remixer 4500, (ver Figura 2.9). en la cual la capa asfáltica degradada se calienta. Al calentar el pavimento a una temperatura comprendida entre 120 y 150 °C la masa asfáltica se reblandece. El calor necesario se genera por un grupo de planchas que aplican rayos infrarrojos y se puede dosificar en función de la temperatura exterior, de la profundidad de trabajo y de la naturaleza de la capa nueva. Una vez calentada la superficie asfáltica, los escarificadores rotatorios descompactan la capa, aplicándose en este mismo sitio la aspersion de rejuvenecedor cuando el material a reciclar lo requiera. Posteriormente se efectúa la mezcla del material de corrección con el material establecido, utilizando un mezclador. Un tornillo sinfín distribuye transversalmente la mezcla mejorada y, por último, se coloca utilizando una regla de extendido variable. De esta manera la nueva superficie queda lista para ser compactada.

El material nuevo se deposita en la tolva de recepción, la cual se localiza en la parte frontal de la máquina. La transferencia del material de corrección se efectúa mediante una banda transportadora desde la tolva de recepción hasta el mezclador. Para regular la cantidad de material nuevo que se aplica para corregir la mezcla, se utiliza una tolva de dosificación.

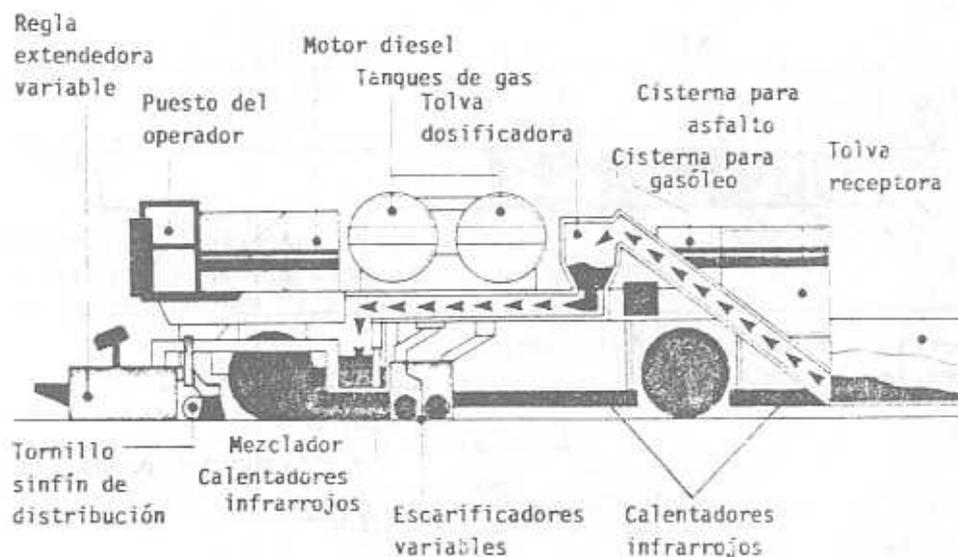


Figura 2.9. Diagrama de una máquina Remixer 4500.

#### 2.2.2.4. Remezcla plus (*remix plus*).

Este método es similar al método "remix", excepto que se agrega una capa delgada adicional de mezcla nueva (ver Figura 2.10). Con ello se obtiene una capa asfáltica superficial de material nuevo. Una vez reblandecida la superficie deteriorada de la carretera debido al paso de planchas calentadoras, un par de escarificadores remueven la superficie asfáltica. En el momento en que se remueve la superficie de la carretera, se aplica cierta cantidad de rejuvenecedor por aspersion con el objetivo de recuperar las propiedades originales del pavimento asfáltico a reciclar. Posteriormente se realiza la mezcla de rejuvenecedor y pavimento asfáltico recuperado para que enseguida sea distribuido transversalmente por medio de un sinfín. Después una regla niveladora empareja el material que ha sido removido.

El material nuevo es suministrado posterior a la regla niveladora y distribuido lateralmente por otro sinfín. Al final del proceso un pavimentador da el emparejado final.

En el método *remix plus* el material nuevo se aplica como una capa superficial mientras que en el método *remix* el material nuevo se mezcla con el material recuperado y rejuvenecedor.

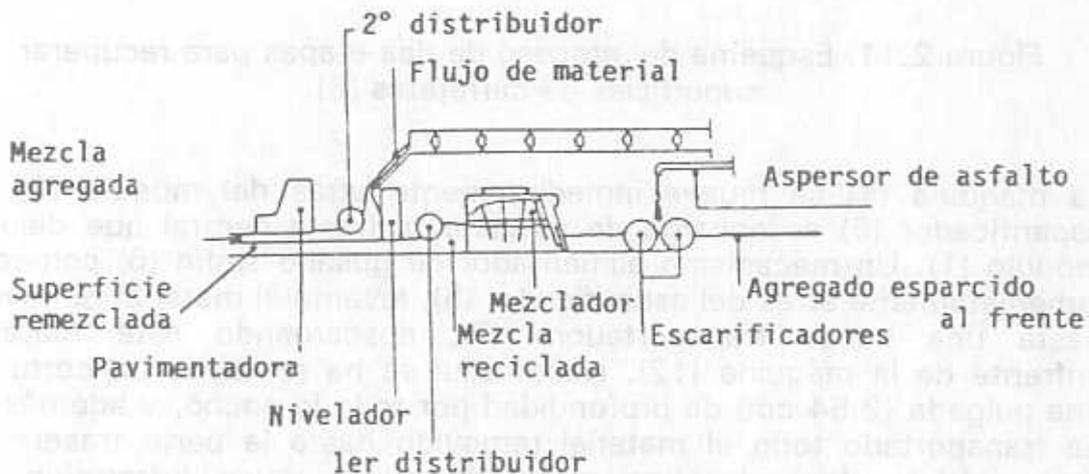
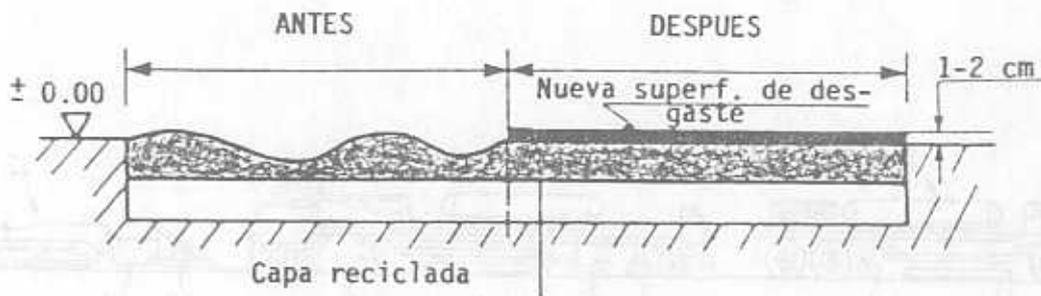


Figura 2.10 Diagrama que muestra el proceso "remezcla plus".

## 2.2.2. Patentes.

### 2.2.2.1. Proceso de dos etapas para recuperar superficies de carreteras [8].

En este caso el tren para reciclar está formado por tres equipos autopropulsados: (1), (4) y (10), ver Figura 2.11.

El módulo (1) tiene un equipo de calentamiento, el cual está formado por un depósito de propano y planchas con calentadores de rayos infrarrojos (2). La máquina se mueve sobre la superficie de la carretera, reciclando el pavimento asfáltico a una velocidad de 20 a 25 pies por minuto (6.09 a 7.62 m/min.) y calienta la superficie a 148.8 °C (300 °F) a una profundidad de alrededor de una pulgada (2.54 cm). Un par de escarificadores alineados axialmente (3) remueven la cinta asfáltica lateralmente, quedando una cinta asfáltica intermedia sin remover. El material que se remueve de las partes laterales se coloca sobre la franja central que está sin remover.

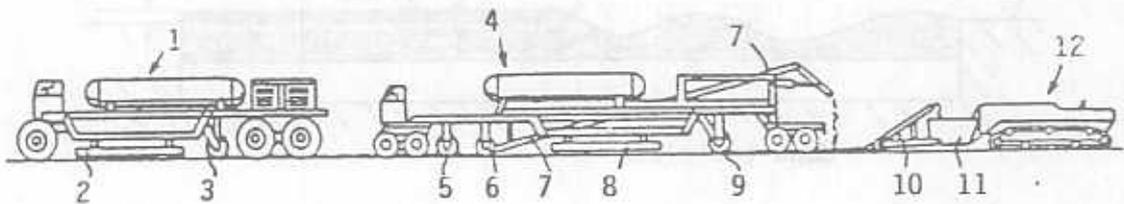


Figura 2.11. Esquema del proceso de dos etapas para recuperar superficies de carreteras [8].

La máquina (4) se mueve inmediatamente atrás del módulo (1). El escarificador (5) se encarga de remover la franja central que dejó el módulo (1). Un mecanismo alimentador de gusano sinfín (6) colocado inmediatamente atrás del escarificador (5), levanta el material removido hasta una banda transportadora (7), descargando este material enfrente de la máquina (12). Hasta aquí se ha realizado un corte de una pulgada (2.54 cm) de profundidad por todo lo ancho, y además se ha transportado todo el material removido hasta la parte trasera de este módulo. Las planchas calentadoras de rayos infrarrojos (8) calientan nuevamente la superficie a una temperatura de 148.8 °C (300 °F) y a una profundidad de una pulgada (2.54 cm), para que el escarificador (9) remueva a todo lo ancho la capa de pavimento y deje este material en forma hilerada para reunirse con el material que cae del transportador de banda (7).

La máquina pavimentadora (12) se desplaza en la parte posterior del módulo (4). Una rampa elevadora (10) está unida a la parte delantera de la pavimentadora para levantar el material removido hasta la tolva (11).

Dependiendo del deterioro del pavimento asfáltico, se puede adicionar material nuevo o algún agente rejuvenecedor de una forma convencional antes de descargarse en la máquina pavimentadora.

#### 2.2.2.2. Máquina para renovar superficie asfáltica [9].

El tren para reciclar (1) tiene un arreglo como el de un vehículo convencional, el cual está formado por una plataforma de camión (2), un motor diesel (4) en la parte delantera y una cabina del operador (3). Los elementos que se utilizan en el proceso de reciclado de pavimento asfáltico están sujetos al chasis (2), ver Figura 2.12.

Una serie de tubos múltiples de escape (6) están conectados al escape del motor diesel (4) y los gases calientes de escape que salen del motor son dirigidos desde los tubos múltiples hasta la superficie del pavimento asfáltico. Inmediatamente atrás de los tubos múltiples (6) se encuentra un quemador (8), el cual es alimentado por un tanque de gas propano para producir la flama. Después del quemador (8) está un sistema de tubos múltiples (7) que liberan calor, el cual tiene faldones flexibles (9). Los tubos flexibles (7) se ajustan verticalmente, de tal manera que los faldones tienen contacto con la superficie del pavimento asfáltico para confinar el calor sobre el área cubierta. La unidad (13) tiene una caldera (11), la cual utiliza un quemador (12) que funciona con gas propano almacenado en el tanque (14). El agua que utiliza la caldera para la producción de vapor está almacenada en el depósito (15). La cantidad de vapor alimentado a los tubos múltiples se controla de tal forma que el pavimento asfáltico se calentará en un rango de temperaturas de 148.8 a 260 °C (300 a 500 °F) a una profundidad de 2 a 3 pulgadas (5.08 a 7.62 cm).

En la parte posterior de los tubos múltiples (7), existe un par de barras rompedoras recíprocantes (17); estas barras son ajustables verticalmente para penetrar la superficie a una profundidad considerada, dependiendo de las condiciones de la carretera. Después de las barras rompedoras (17) se proveen un par de cilindros mezcladores (18), los cuales tienen dientes en su periferia en forma piramidal.

Los cilindros mezcladores giran en la dirección de avance del tren (1), por lo que se invierten las capas de pavimento asfáltico removido, es decir, la capa que ya ha sido calentada queda en la parte inferior y la que estaba en la parte inferior pasa a ocupar la superficie.

Después de los cilindros mezcladores hay un segundo sistema de tubos múltiples (10) que suministran vapor, en forma idéntica a los tubos múltiples (7) descritos anteriormente, los cuales también reciben vapor de la caldera (11). El propósito de estos tubos es agregar calor a la capa que ha sido invertida y compensar el calor perdido durante el proceso de remoción. Posteriormente pasan las barras niveladoras recíprocantes lateralmente (19) las cuales producen una superficie lisa cuando el tren se mueve hacia adelante.

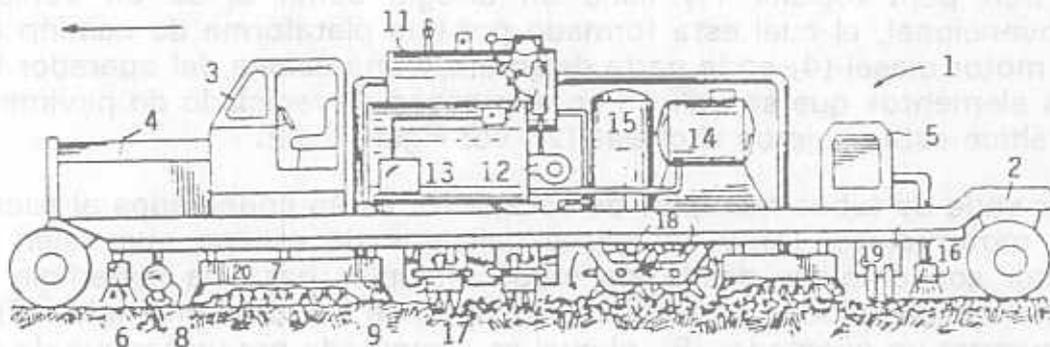


Figura 2.12 Esquema de una máquina para renovar superficie asfáltica [9].

En la parte trasera de todo el tren existe otro motor de combustión interna (5), el cual se utiliza para accionar todos los componentes; por otro lado los gases de escape que se liberan de este motor se dirigen a otro distribuidor múltiple (16) para adicionar calor a la superficie nivelada.

### 2.2.2.3. Máquina para fresar y reencarpetar la carretera [10].

La máquina para fresado y recubrimiento de la carretera comprende un soporte (1), un par de ruedas frontales direccionales (2), un par de ruedas traseras (3) y un motor (4), ver Figura 2.13.

El rodillo fresador (5) provisto con ruedas reguladoras (6) se utiliza para remover la superficie de la carretera. Un mecanismo calentador (7) con un sistema de regulación vertical se encuentra en frente del rodillo fresador (5), además otro mecanismo de calentamiento (9) se localiza atrás del rodillo fresador; a ambos calentadores se les suministra gas desde el contenedor (8). El mecanismo de calentamiento (9) se utiliza para un calentamiento adicional del material fresado, el cual es concentrado en la línea media de avance por medio de un transportador sinfín de doble hélice (10).

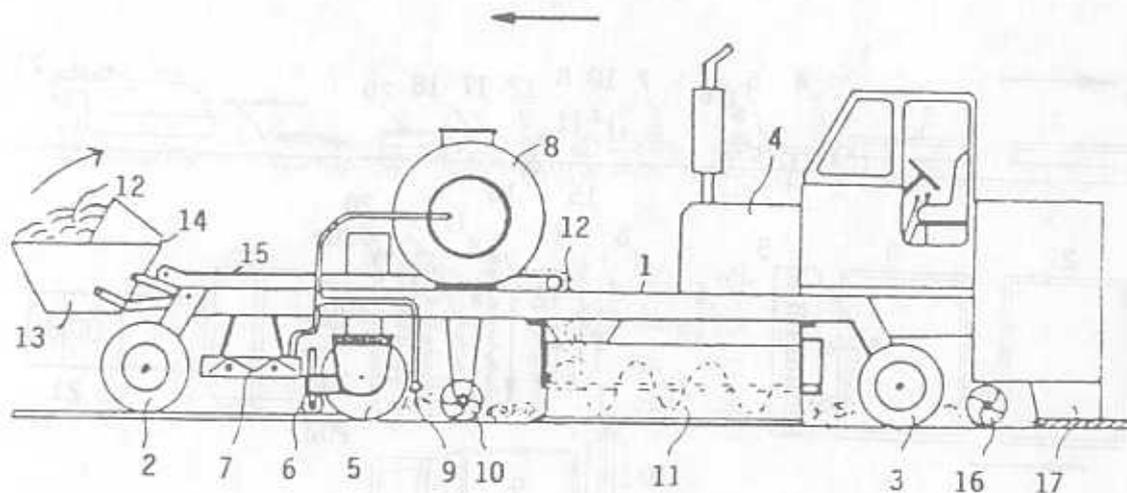


Figura 2.13. Esquema de una máquina para fresar y reencarpetar la carretera [10].

El material fresado pasa al mezclador (11) junto con la cantidad necesaria del agregado nuevo para la preparación de la mezcla deseada. El agregado nuevo (12) se descarga desde un camión a un depósito (13), el cual se inclina hidráulicamente, por lo que el agregado (12) pasa a través de una abertura de descarga ajustable (14) sobre el transportador de banda (15) para caer enfrente del mezclador (11). Después de que se realiza la mezcla, ésta se distribuye uniformemente sobre la superficie de la carretera fresada por un gusano nivelador (16) y por último se nivela con el elemento (17).

#### 2.2.2.4. Máquina para reciclar pavimento asfáltico [11].

La máquina repavimentadora de carreteras (1) incluye un par de planchas calentadoras (2) y (3) localizadas en frente de la máquina, las cuales se utilizan para suministrar calor a la superficie de la carretera (ver Figura 2.14).

Estas planchas utilizan gas propano como combustible y aire a una proporción adecuada. Esta mezcla de combustible se suministra a elementos que tienen unidades para generar radiación uniforme sobre el área cubierta por los elementos de calentamiento. El calor penetra a una profundidad de entre una y tres pulgadas (2.54 y 7.62 cm). Siguiendo inmediatamente la operación de calentamiento de la superficie de la carretera, si se desea o si la condición de la carretera lo requiere, se puede aplicar una cantidad de asfalto líquido utilizando boquillas aspersoras (4).

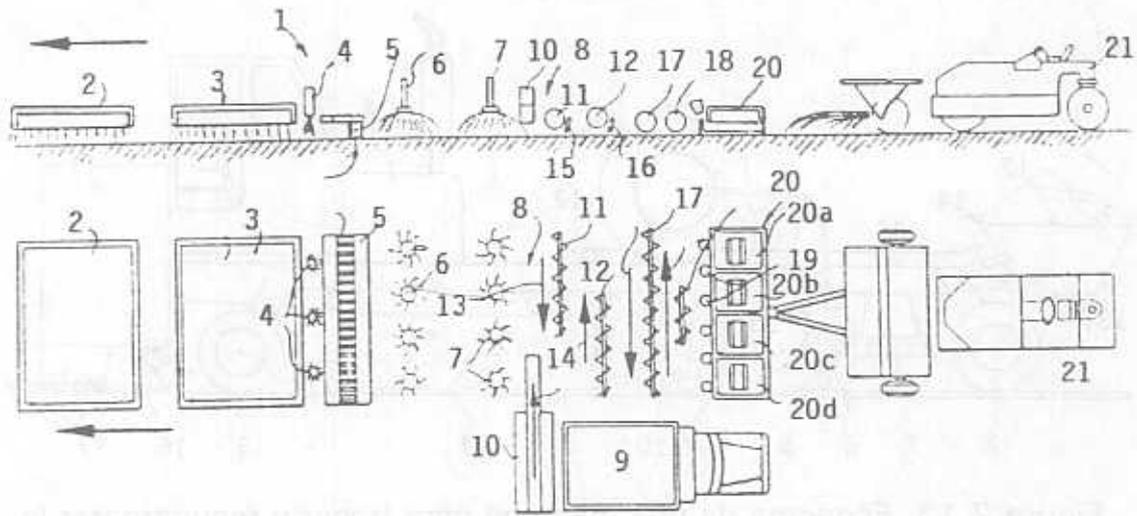


Figura 2.14. Arreglo utilizado para reciclar pavimento asfáltico [11].

La excavación de la superficie de la carretera se realiza utilizando un escarificador (5) a una profundidad de entre 1 1/2 y 3 pulgadas (3.81 y 7.62 cm). El escarificador puede usar dientes de tungsteno para una máxima resistencia al desgaste. Después de la remoción de la superficie, se aplica una segunda cantidad de asfalto líquido caliente. Este asfalto restaura las propiedades de adhesión del agregado asfáltico, el cual se recombina para formar la mezcla caliente recuperada. El asfalto líquido se aplica a la superficie removida por medio de un difusor rotatorio (6). Los difusores reciben asfalto líquido del mismo contenedor que alimenta a las boquillas (4).

Una cantidad de rejuvenecedor líquido también se aplica por medio de difusores rotatorios (7). Este rejuvenecedor restaura la flexibilidad del pavimento asfáltico. La combinación del material removido junto con el líquido asfáltico y el líquido rejuvenecedor da una mezcla caliente, la cual tiene substancialmente las características de una mezcla caliente nueva.

Si se requiere suministrar una cantidad de material nuevo, éste se puede depositar en la estación de trabajo (8), utilizando un camión (9), el cual se mueve al lado del Tren de Maquinaria que descarga lateralmente por medio del elemento (10).

Después de la estación de trabajo (8), el material se mezcla y nivela por un par de sinfines mezcladores (11) y (12), los cuales trasladan la mezcla en la dirección de la flecha (13) y (14) respectivamente. Asociados a cada sinfín mezclador existen reglas niveladoras (15) y (16) respectivamente. Con el fin de que la mezcla quede lo más homogénea posible se incluye otro juego de mezcladores sinfín (17) y (18). Además si se requiere calor adicional, se puede aplicar utilizando unidades de calentamiento independientes (19), las cuales permiten que el material sea compactado fácilmente por medio de una niveladora vibratoria (20). Finalmente la mezcla caliente se compacta con el elemento (21).

Como resultado parcial de la revisión de los métodos y patentes descritas sobre reciclado de asfalto en caliente en el lugar, se tiene un panorama general de los arreglos de estos tipos de máquinas. Los sistemas comunes que tienen estas máquinas son: planchas calentadoras, escarificadores, mezcladores, distribuidores (gusano sinfín) y niveladores.

Se pueden distinguir las siguientes características:

1. En algunos arreglos, el suministro de material nuevo y de rejuvenecedor es opcional dependiendo del método de reciclado y de las condiciones estructurales que presenta la cinta asfáltica.
2. Los trenes de reciclado en caliente tienen una longitud considerable, debido a la gran superficie de calentamiento que se requiere al utilizar planchas de rayos infrarrojos.
3. No se tiene la posibilidad de controlar la granulometría de la mezcla existente para su reciclado en caliente, debido a que la mezcla de los materiales se realiza sobre la superficie de la carretera y no se separan las porciones no útiles.
4. El calor que producen las planchas calentadoras incide directamente sobre el pavimento asfáltico existente, provocando la oxidación del asfalto y dando como resultado un rápido envejecimiento del mismo.

Se justifica buscar una solución al problema de reciclado de pavimento asfáltico en caliente en el lugar, de tal manera que la mezcla que se desea obtener sea de mejor calidad que la obtenida por los métodos ya descritos, que cumpla con las normas de control ambiental y que sea atractivo para las personas involucradas en el proceso de reciclado de pavimentos asfálticos.

Para mejorar la calidad de la mezcla caliente se necesita diseñar una máquina recicladora de asfalto en caliente en el lugar que tenga un mejor control de la granulometría del material recuperado y que permita una mezcla del material nuevo, material recuperado y asfalto de una forma más uniforme. Además que la mezcla caliente se descargue sobre la carretera inmediatamente después de ser producida. Estos planteamientos se pueden lograr mediante el uso de equipos adecuados para esta aplicación, lo que se resume en los dos requerimientos siguientes:

- Disponer de un sistema de cribas para seleccionar los tamaños de material recuperado recomendados por las normas.
- Lograr que el calentamiento del material nuevo se realice en forma gradual, sin llegar a la oxidación del mismo, así como también la mezcla del material nuevo, material recuperado y asfalto líquido se realice en forma homogénea. Esto se puede realizar con el uso de los modernos tambores calentadores-mezcladores utilizados en las plantas de reciclado en caliente.

- 1.- Capacidad de 100 ton/h.
- 2.- Ancho de corte de 2.8 a 3.4 m.
- 3.- Profundidad de corte de 10 a 13 cm.
- 4.- Sólo debe ocupar un carril de la carretera durante el funcionamiento.

### **3.1. Propuesta 1**

#### **Fresadora comercial que empuja a otros módulos.**

El arreglo mostrado en la Figura 3.1 puede reciclar en frío o en caliente. Cuando se desea reciclar en caliente se corta la capa superficial de la carretera con una fresadora convencional (1), donde el elemento de corte comúnmente gira hacia arriba y deposita el material sobre un transportador de banda (2), ubicado en la parte central de la máquina. Este transportador descarga el material fresado sobre un segundo módulo mecánico compuesto de un sistema de cribado (3), trituración (4) y dosificación (no mostrado). La criba separa el material en dos porciones: a) el sobretamaño es conducido hacia el triturador (4) que disminuye el tamaño del material y lo descarga sobre la carretera para su posterior alza con el fresador de la máquina (1); b) una parte del material que pasa la criba es usado para reciclar, y el sobrante se deja hilerado lateralmente a la carretera. El material a reciclar se transporta por medio de la banda (6) hacia el tambor calentador-mezclador (5) en el tercer módulo.

Por otro lado, la alimentación del material nuevo se realiza en la parte frontal del Tren de Maquinaria. En el depósito receptor (7) se recibe el material nuevo y se dosifica la cantidad de material a utilizar en la mezcla. Este material se transporta por medio de un elevador de cangilones (8) hacia el tambor calentador-mezclador.

La mezcla caliente (50% de material nuevo, 50% de material recuperado y asfalto líquido) se transporta desde el tambor calentador-mezclador hasta la parte posterior de la fresadora. La mezcla caliente se deja hilerada sobre la carretera. Finalmente un pavimentador convencional distribuye y nivela la mezcla sobre la carretera fresada.

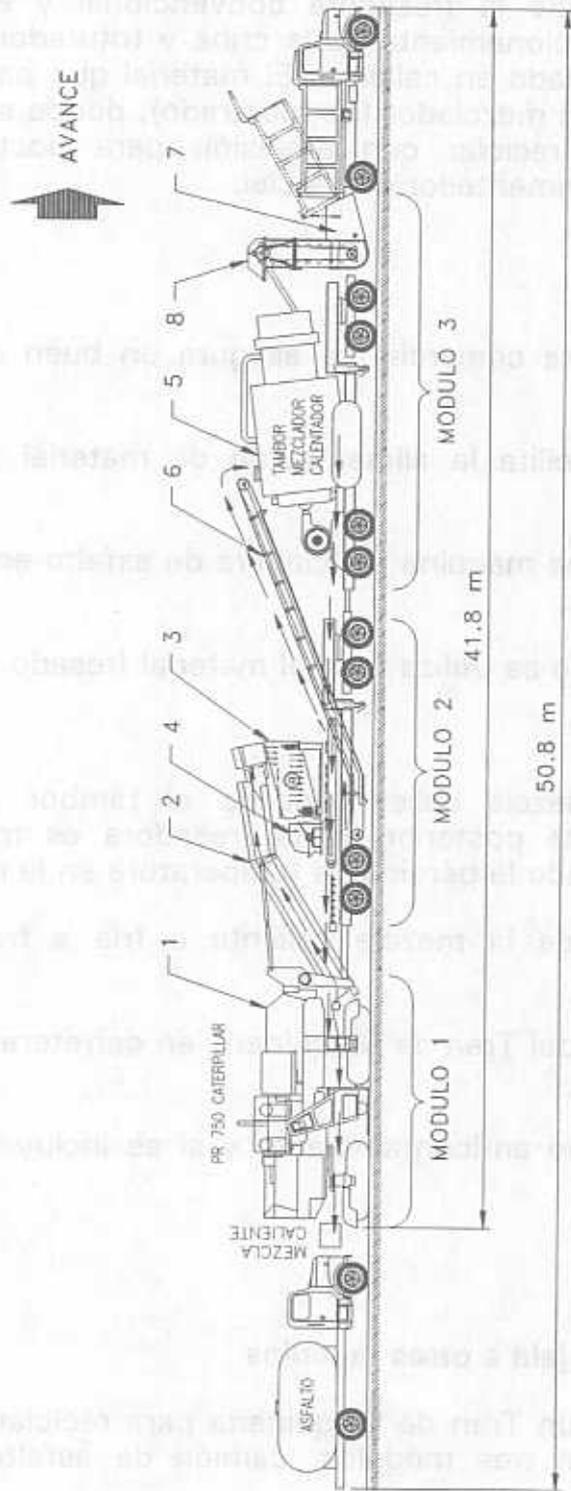


Figura 3.1. Primer arreglo propuesto para el Tren de Maquinaria.

Sin embargo, para reciclar en frío en el lugar se elimina el tercer módulo (tambor calentador-mezclador y el sistema de alimentación de material nuevo), quedando la fresadora convencional y el segundo módulo mecánico. El funcionamiento de la criba y triturador es similar al expuesto para el reciclado en caliente. El material que pasa la criba (3) se transporta hacia un mezclador (no mostrado), donde se realiza la mezcla del material a reciclar con emulsión para posteriormente descargarse sobre un pavimentador comercial.

#### Ventajas:

- Al utilizar una fresadora comercial se asegura un buen sistema de corte.
- En este arreglo se facilita la alimentación de material nuevo con camiones de volteo.
- Puede trabajar como una máquina recicladora de asfalto en caliente o en frío.
- Cuando se recicla en frío se utiliza todo el material fresado.

#### Desventajas:

- El recorrido de la mezcla caliente desde el tambor calentador-mezclador hasta la parte posterior de la fresadora es muy grande (aprox. 25 m), ocasionando la pérdida de temperatura en la mezcla.
- Se dificulta el paso de la mezcla caliente o fría a través de la fresadora.
- Se dificulta el tránsito del Tren de Maquinaria en carreteras con radio de curvatura pequeños.
- No se incluye el equipo anticontaminante y si se incluye el tren es mucho más largo.

### 3.2. Propuesta 2

#### Fresadora comercial que jala a otros módulos

La Figura 3.2, muestra un Tren de Maquinaria para reciclar asfalto en caliente en el lugar con tres módulos, camión de asfalto líquido y fresadora convencional.

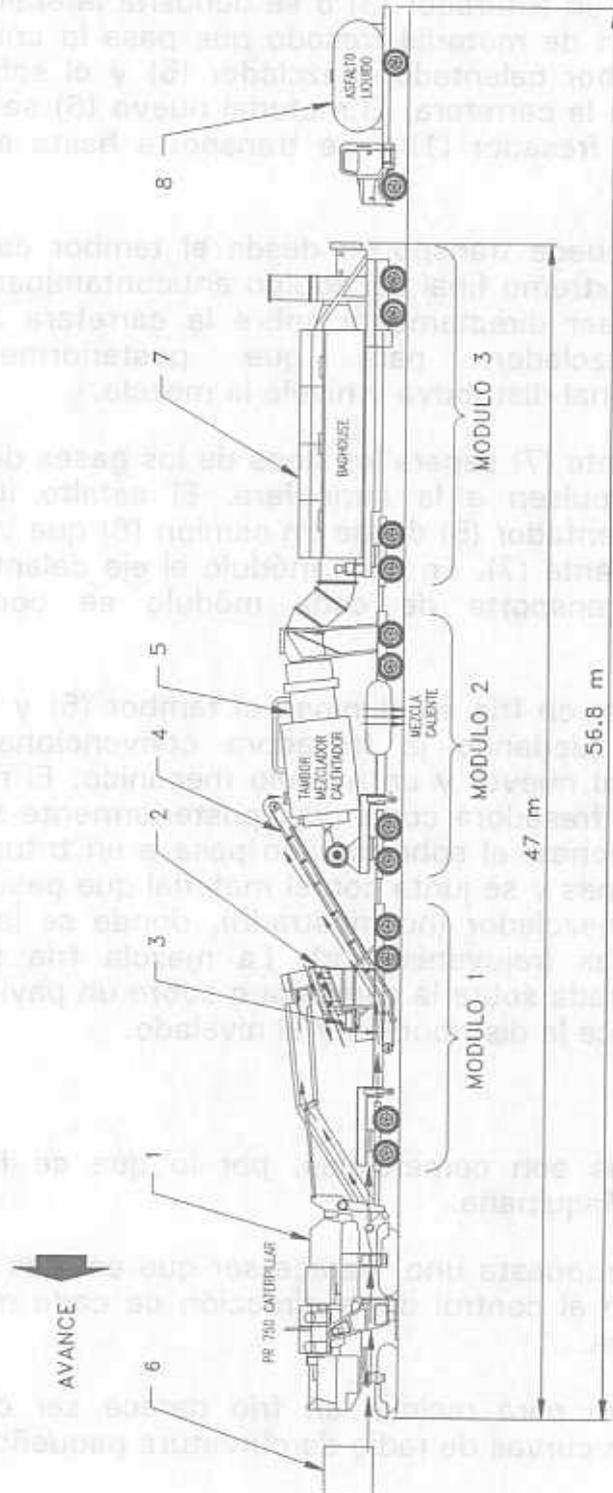


Figura 3.2. Segundo arreglo propuesto para el Tren de Maquinaria.

El proceso y elementos para el reciclado es el siguiente: una fresadora (1) corta y transporta el material a reciclar al primer módulo, compuesto de una criba (2), triturador (3) y transportadores (4). La criba (2) recibe el material a reciclar y lo separa en dos porciones. El sobretamaño se dirige a un triturador (3) o se deposita lateralmente en la carretera. Una porción de material fresado que pasa la criba (2) se transporta hacia el tambor calentador-mezclador (5) y el sobrante se deposita lateralmente en la carretera. El material nuevo (6) se alimenta por la parte frontal del fresador (1) y se transporta hasta el tambor calentador-mezclador (5).

La mezcla caliente se puede transportar desde el tambor calentador-mezclador (5) hasta el extremo final del equipo anticontaminante (7), o bien, se puede dejar caer directamente sobre la carretera abajo del tambor calentador-mezclador, para que posteriormente un pavimentador convencional distribuya y nivele la mezcla.

El equipo anticontaminante (7) separa los finos de los gases del tambor (5) y evita que se expulsen a la atmósfera. El asfalto líquido se suministra al tambor calentador (5) desde un camión (8) que viaja atrás del equipo anticontaminante (7). En cada módulo el eje delantero es el direccional. Para el transporte de cada módulo se conecta un tractocamión.

Cuando se desea reciclar en frío se eliminan el tambor (5) y el equipo anticontaminante (7), quedando la fresadora convencional (sin la alimentación del material nuevo) y un módulo mecánico. El material a reciclar se corta con la fresadora comercial, posteriormente se separa el material en dos porciones: el sobretamaño pasa a un triturador que disminuye sus dimensiones y se junta con el material que pasó la criba, transportándose a un mezclador (no mostrado), donde se les aplican las emulsiones asfálticas (rejuvenecedor). La mezcla fría se puede descargar en forma hilerada sobre la carretera o sobre un pavimentador comercial para que realice la distribución y el nivelado.

Ventajas:

- Todas las plataformas son comerciales, por lo que se facilita su integración al Tren de Maquinaria.
- Comparando con la propuesta uno, parece ser que es más fácil jalar que empujar, en cuanto al control de la dirección de cada módulo en las curvas de la carretera.
- La máquina resultante para reciclar en frío parece ser compacta, facilitando el tránsito en curvas de radio de curvatura pequeño.

Desventajas:

- No se tiene espacio disponible para depositar, dosificar y transportar el material nuevo en la parte frontal de la fresadora comercial.
- La mezcla caliente puede enfriarse y disminuir su manejo durante el tendido (baja calidad) por la gran distancia de recorrido.
- La longitud total del Tren de Maquinaria es grande (56.87 m) y en las curvas de radio de curvatura pequeño no es transitable fácilmente.

### 3.3. Propuesta 3

#### **Máquina autopropulsada que empuja a otros módulos.**

De los arreglos 1 y 2 se dedujo que se podría formar una máquina con una fresadora y el módulo mecánico (criba, transportadores y triturador) para que el Tren de Maquinaria esté formado por tres módulos (máquina autopropulsada, tambor y equipo anticontaminante). Este acomodo de los elementos de trabajo tales como el fresador, criba, triturador y transportadores forman una unidad compacta por el uso de un elevador de cangilones que disminuye la longitud total del Tren de Maquinaria.

En este arreglo (ver Figura 3.3) el módulo uno es una máquina autopropulsada que empuja a los módulos dos y tres cuando se desea reciclar en caliente. La versatilidad del Tren de Maquinaria parece ser que facilita el funcionamiento para reciclar en frío o en caliente. Cuando se desea reciclar en caliente se utilizan los módulos que contienen el tambor calentador-mezclador y el equipo anticontaminante. Sin embargo, cuando se desea reciclar en frío se eliminan estos equipos y sólo queda la máquina autopropulsada con los elementos disponibles para reciclar en frío.

El módulo uno incluye todos los elementos que se necesitan para el reciclado en frío como son: el tambor fresador (1), elevador de cangilones (2), criba (3), triturador (4), transportador de banda (6) y mezclador (7). La máquina autopropulsada tiene su motor, depósito de combustible y aceite (no mostrados). El tambor fresador (1) gira hacia abajo y corta la capa superficial de la carretera, depositando el material cortado sobre los cangilones (2), los cuales transportan el material hasta la criba (3).

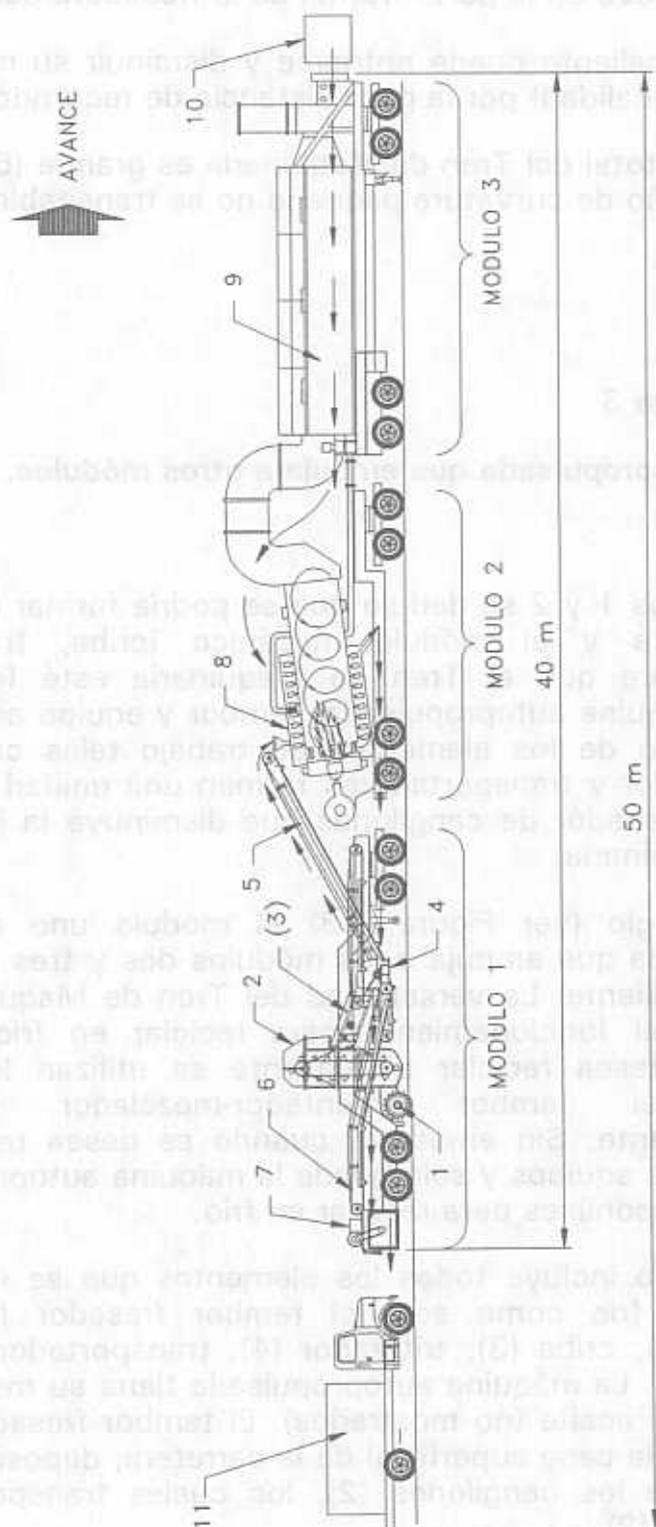


Figura 3.3. Tercer arreglo propuesto para el Tren de Maquinaria.

El sobretamaño pasa a un triturador (4) que puede ser utilizado o no. El material triturado cae sobre la carretera al frente del fresador (1) para que nuevamente sea levantado por este elemento. El material que pasa la criba se descarga sobre un transportador (6) que lo lleva hasta el mezclador (7), en donde se le aplica una emulsión. La nueva mezcla fría se puede dejar hilerada sobre la carretera fresada o sobre un pavimentador comercial.

Cuando se desea reciclar en caliente en el lugar, los elementos tales como: el tambor fresador (1), elevador de cangilones (2), criba (3) y triturador (4) funcionan en forma similar al reciclado en frío.

La porción de material recuperado que pasa la criba se descarga sobre un recipiente donde se dosifica la cantidad de material necesario para completar la mezcla, es decir 50% de material recuperado y otro 50% se agrega de material nuevo. Como se puede notar no todo el material recuperado se usa y el sobrante se deja hilerado lateralmente a la carretera. El transportador de banda (5) lleva el material recuperado hacia el tambor calentador-mezclador (8).

Por otro lado, la alimentación del material nuevo(10) es por la parte frontal del equipo anticontaminante, donde se dosifica la cantidad de material nuevo a utilizarse en el tambor calentador-mezclador. La mezcla caliente que sale del tambor (8) se lleva por medio de transportadores de banda hasta la parte trasera de la máquina autopropulsada y se descarga sobre la carretera en forma hilerada. Posteriormente un pavimentador comercial realiza el tendido y nivelado de la nueva mezcla. El depósito de asfalto líquido (11) es jalado por el módulo uno y se encuentra ubicado en la parte trasera del mismo, ya que por la parte frontal del equipo anticontaminante no puede instalarse debido a la alimentación del material nuevo.

Los gases y finos que se expulsan del tambor calentador-mezclador se conducen hacia el equipo anticontaminante (9), donde se separan los finos de los gases. Estos finos se pueden recolectar y dejar en forma hilerada lateralmente a la carretera.

#### Ventajas:

- Con la fusión de la fresadora y el módulo mecánico (criba, triturador y transportadores) se forma una unidad más compacta y se disminuye la longitud total del tren, respecto a las propuestas 1 y 2.

- Este Tren de Maquinaria puede reciclar en frío o en caliente en el lugar. Cuando se recicla en frío resulta una máquina autopropulsada compacta.
- Por el sentido de rotación del tambor fresador, éste ayuda a la tracción total de la máquina.
- El tambor fresador también funciona como un triturador ya que el material de sobretamaño cae sobre la superficie de la carretera antes de ser fresada.

#### Desventajas:

- A pesar de la fusión entre fresadora y módulo mecánico, el Tren aún resulta demasiado largo (50 m) cuando se utiliza para reciclar en caliente en el lugar.
- El camión del asfalto líquido estorba para que la mezcla caliente se descargue directamente sobre un pavimentador comercial.
- La mezcla caliente recorre una gran distancia para descargarse en la parte posterior del Tren de Maquinaria en forma hilerada, disminuyendo la temperatura de la mezcla y como consecuencia su calidad.
- También el recorrido del material nuevo es grande.
- Empujando varios módulos en una curva se dificulta la forma de transmitir la fuerza de empuje.
- La posición del tambor fresador con respecto al eje delantero direccional, dificulta su control durante el corte de un solo carril.
- La plataforma del módulo de fresado no es de tipo convencional.

### **3.4. Propuesta 4**

#### **Máquina autopropulsada que jala a otros módulos.**

En esta propuesta la máquina autopropulsada jala al módulo del tambor calentador-mezclador, al equipo anticontaminante y al camión de asfalto líquido durante el reciclado en caliente en el lugar (ver Figura 3.4).

Cuando se desea reciclar en caliente en la máquina autopropulsada, el tambor fresador (1) gira hacia arriba, cortando y depositando el material sobre el transportador de cangilones (2), que a la vez lo transporta hasta la parte superior de las cribas (3). Estas separan el material en tres porciones. Una porción es el sobretamaño que no pasa la primera criba y es conducido hacia el triturador; dependiendo de la necesidad, este material se regresará a la parte delantera del fresador (1) o se hilerará lateralmente a la carretera sin pasar por el triturador (4), que puede ser opcional, ya que el material se vuelve a levantar con el tambor fresador que lo tritura adicionalmente. La segunda fracción que pasa la primera criba, se almacena en una tolva, donde se dosifica la cantidad de material recuperado necesario para completar la mezcla (50% de material recuperado) y el sobrante se deposita lateralmente a la carretera. Los finos que pasan la segunda criba se recolectan e hileran lateralmente por un cepillo barredor (no mostrado). El material nuevo (8) se recibe y dosifica en la parte delantera de la máquina autopropulsada y debe transportarse desde este lugar hasta el tambor calentador-mezclador (6).

La mezcla caliente (5) se transporta desde el tambor calentador-mezclador hasta la parte trasera del equipo de anticontaminación para depositarse en forma hilerada sobre la superficie de la carretera o depositarse en forma hilerada inmediatamente después de salir del tambor calentador mezclador (6). Los gases de escape que salen del tambor calentador se colectan en el módulo de anticontaminación (7) y quedan atrapadas todas las partículas contaminantes. El vehículo (9) que contiene el asfalto líquido es jalado por el Tren de Maquinaria. Cuando se desea reciclar en frío en el lugar, se elimina el módulo del tambor calentador-mezclador y el equipo anticontaminante, quedando una máquina muy corta y maniobrable en la carretera.

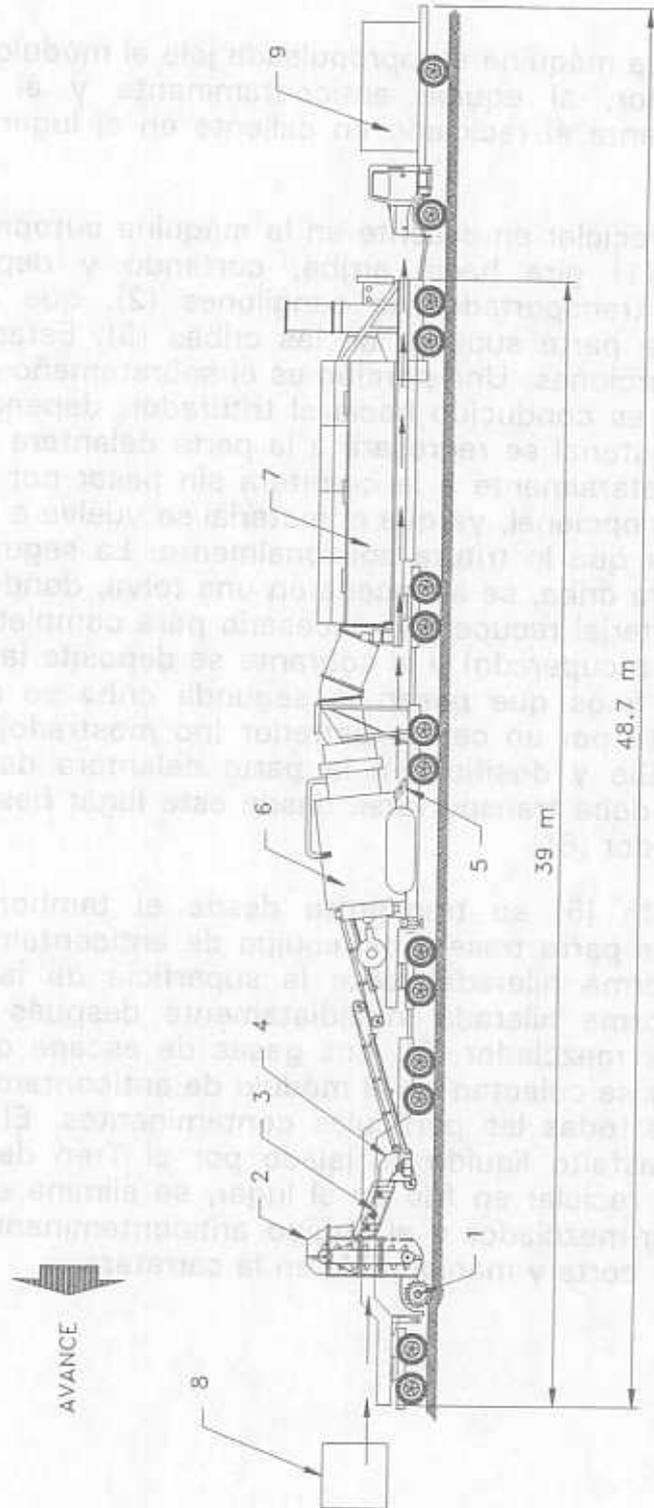


Figura 3.4. Cuarto arreglo propuesto para el Tren de Maquinaria.

Ventajas:

- Las plataformas de los módulos de calentamiento y anticontaminante son convencionales.
- Parece ser que es más fácil jalar el módulo del tambor calentador-mezclador y el equipo anticontaminante en las curvas de radio de curvatura pequeño.
- Con un filtro de este tipo (*baghouse*) se cumple con las normas ambientales.
- El depósito de asfalto es suficiente para trabajar continuamente 6 horas.

Desventajas:

- El Tren de Maquinaria continúa siendo demasiado largo (48.7 m).
- Se requieren transportadores muy largos para mover el material nuevo y la mezcla caliente cuando se recicla en caliente.
- El depósito de asfalto líquido está retirado del tambor calentador.
- La plataforma del módulo de fresado no es de tipo convencional.

Si se analizan las cuatro primeras propuestas sobre el Tren de Maquinaria, se puede observar que en la mayoría de ellas existe la inconveniencia del largo total del tren y por consecuencia la poca maniobrabilidad, la desventaja del gran recorrido del material nuevo, así como también de la mezcla caliente. Además, algunos elementos tales como los transportadores dejan de emplearse cuando se cambia de un método a otro.

El problema tiene dos posibles soluciones. La primera resultaría de considerar que para altas capacidades de reciclado en caliente sería más conveniente utilizar una fresadora convencional para el corte de las carpetas asfálticas dañadas y transportar este material con camiones de volteo hacia plantas estacionarias donde se dispone de mayor espacio para los elementos de cribado, trituración y dosificación del material recuperado; así como también para el tambor calentador-mezclador y el equipo anticontaminante. Estos equipos pueden tener su propia plataforma para desplazarse y formar la planta estacionaria donde se considere más adecuado.

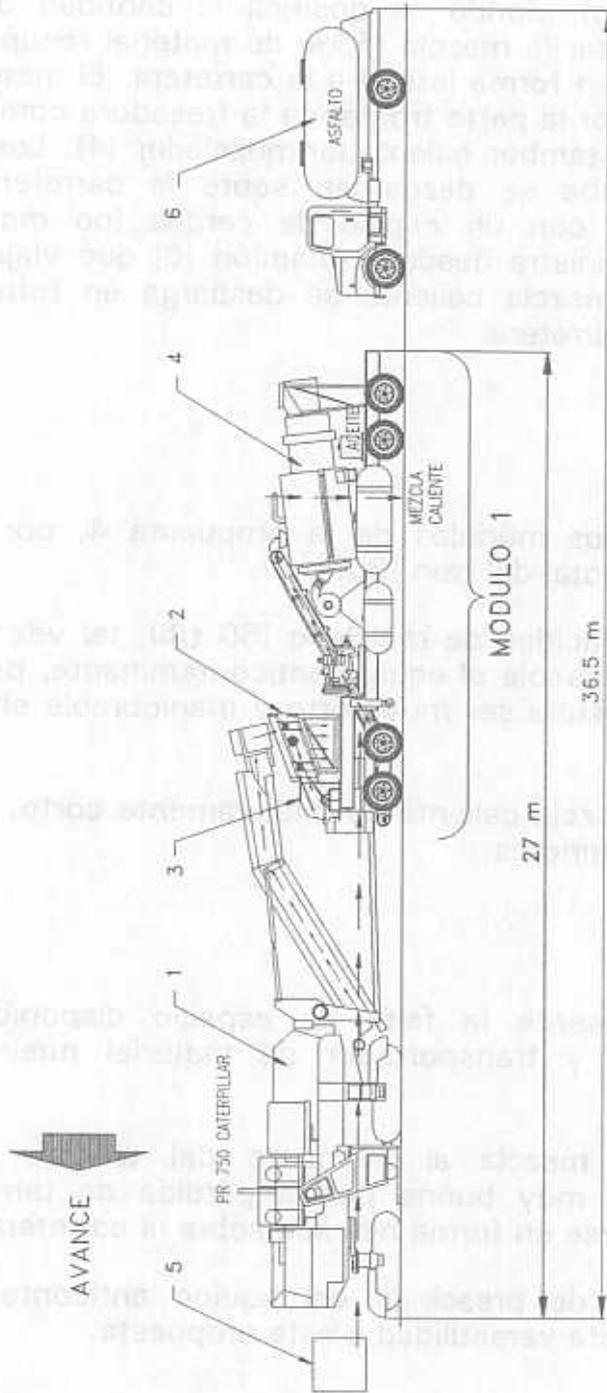


Figura 3.5. Quinto arreglo propuesto para el Tren de Maquinaria.

La fresadora comercial (1) corta y descarga el material recuperado sobre la criba (2), que separa el material en tres porciones. El sobretamaño pasa a un triturador (3) para disminuir su tamaño. Este material triturado junto con el que pasa la criba se almacenan en un depósito (no mostrado), donde se dosifica la cantidad de material necesario para completar la mezcla (50% de material recuperado) y el sobrante se descarga en forma lateral a la carretera. El material nuevo (5) debe alimentarse por la parte frontal de la fresadora comercial (1) y transportarse hasta el tambor calentador-mezclador (4). Los finos que pasan la segunda criba se descargan sobre la carretera para su posterior hileramiento con un cepillo de cerdas (no mostrado). El asfalto líquido se suministra desde un camión (6) que viaje por atrás del módulo uno. La mezcla caliente se descarga en forma hilerada sobre el centro de la carretera.

#### Ventajas:

- Se pueden juntar dos módulos de la propuesta 4, por lo que se disminuye la longitud total del tren (36.5 m).
- Debido a la baja capacidad de reciclado (50 t/h), tal vez en algunos lugares no sea indispensable el equipo anticontaminante, por lo que el Tren de Maquinaria resulta ser muy corto y maniobrable en curvas de radio de giro pequeño.
- El recorrido de la mezcla caliente es relativamente corto, comparado con las propuestas anteriores.

#### Desventajas:

- Sigue estando presente la falta de espacio disponible para el depósito, dosificador y transportador de material nuevo sobre la fresadora comercial.
- La calidad de la mezcla al momento del tendido y nivelado posiblemente no sea muy buena por la pérdida de temperatura al momento de depositarse en forma hilerada sobre la carretera.
- La posible ventaja de prescindir del equipo anticontaminante en algunos lugares, le resta versatilidad a esta propuesta.

### **3.6. Propuesta 6**

#### **Fresadora comercial que jala a un módulo**

Este arreglo es muy parecido a la propuesta cinco (ver Figura 3.6). La diferencia radica en que se sustituye el transportador de banda (1) por un elevador de cangilones que va montado a la estructura del primer módulo. Con esto se logra disminuir la longitud total del tren.

#### **Ventajas:**

- Se reduce la longitud total del Tren de Maquinaria (31.3 m).

#### **Desventajas:**

- Para facilitar el transporte de la máquina se debe desplazar el elevador de cangilones en forma transversal y girar hacia atrás, permitiendo la conexión y giro libre del tractocamión.
- Se dificulta el control de la dirección del primer módulo.
- No se cuenta con equipo anticontaminante.

### **3.7. Propuesta 7**

#### **Máquina autopropulsada que jala a un módulo**

En esta propuesta se vuelve a considerar el uso de una fresadora no comercial montada en una máquina autopropulsada integrada por equipo para la recepción de material nuevo, fresado, cribado y transporte. El segundo módulo consta del tambor calentador-mezclador y el equipo anticontaminante (ver Figura 3.7).

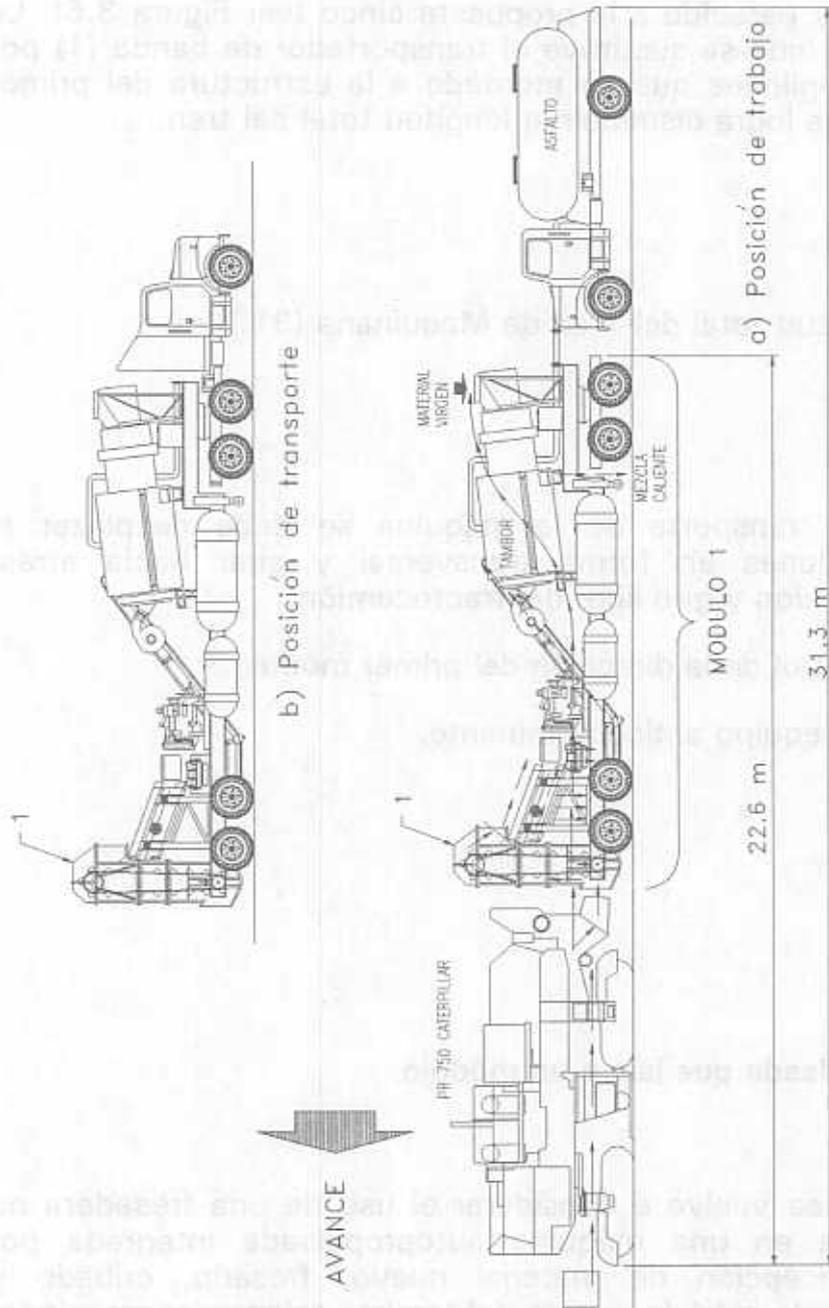


Figura 3.6. Sexto arreglo propuesto para el Tren de Maquinaria.

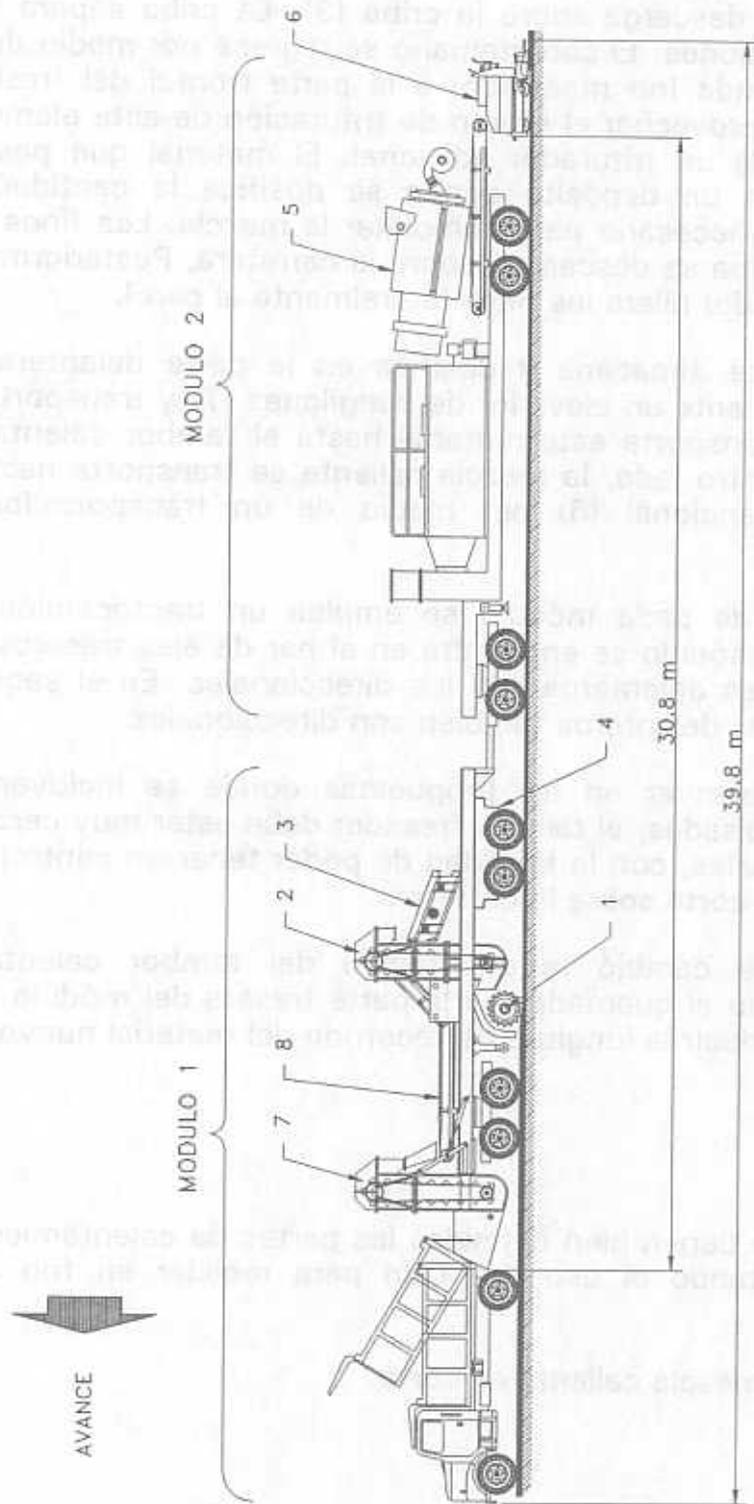


Figura 3.7. Séptimo arreglo propuesto para el Tren de Maquinaria.

La fresadora (1) corta el material de la carretera que se va a reciclar. El material recuperado se transporta por medio de un elevador de cangilones (2) y se descarga sobre la criba (3). La criba separa este material en tres porciones. El sobretamaño se regresa por medio de un transportador de banda (no mostrado) a la parte frontal del fresador con el objetivo de aprovechar el efecto de trituración de este elemento y se evite el uso de un triturador adicional. El material que pasa la primera criba cae a un depósito donde se dosifica la cantidad de material recuperado necesario para completar la mezcla. Los finos que pasan la segunda criba se descargan sobre la carretera. Posteriormente un cepillo (no mostrado) hilera los finos lateralmente al carril.

El material nuevo se almacena y dosifica en la parte delantera del primer módulo. Mediante un elevador de cangilones (7) y transportador de banda (8), se transporta este material hasta el tambor calentador-mezclador (5). Por otro lado, la mezcla caliente se transporta hasta el pavimentador convencional (6) por medio de un transportador de banda.

Para el transporte de cada módulo se emplea un tractocamión. La tracción del primer módulo se encuentra en el par de ejes traseros (4), mientras que los ejes delanteros son los direccionales. En el segundo módulo el par de ejes delanteros también son direccionales.

Como se puede observar en las propuestas donde se incluyen las máquinas autopropulsadas, el tambor fresador debe estar muy cerca de las ruedas direccionales, con la finalidad de poder tener un control más preciso del lugar de corte sobre la carretera.

En este arreglo se cambió la orientación del tambor calentador-mezclador, quedando el quemador en la parte trasera del módulo. Con esto se pretende reducir la longitud de recorrido del material nuevo.

#### Ventajas:

- En este arreglo se tienen bien definidas las partes de calentamiento y la mecánica, facilitando el uso del Tren para reciclar en frío o en caliente.
- El recorrido de la mezcla caliente es corto.

Desventajas:

- El segundo módulo es largo.
- El material nuevo debe pasar longitudinalmente a través de los dos módulos.
- El material recuperado también debe recorrer una distancia grande.

### 3.8. Propuesta 8

Arreglo final.

Esta propuesta surgió como resultado de la experiencia adquirida en el análisis de las propuestas anteriores y se trató de proponer un arreglo que no presentara las desventajas de los otros arreglos. El esquema funcional de este arreglo se presenta en la Figura 3.8.

Este arreglo está compuesto básicamente de dos módulos (ver Figura 3.9 a y b). El primero está integrado por un depósito receptor de material nuevo (1), dosificador (2), transportadores (4 y 6) y el equipo anticontaminante (7). El segundo se compone de la fresadora (16), cribas (18), dosificador de material recuperado (19), transportadores (11, 17, 23, 27 y 28), depósitos de asfalto líquido (14 y 14'), diesel (no mostrado), agua (31) y gas (30), motor diesel (13) y el tambor calentador-mezclador (24). Esta combinación de elementos de trabajo parece ser adecuada en cuanto a la longitud resultante de cada módulo y la distribución del peso.

La colocación del fresador (16) con respecto a las ruedas direccionales (15) es muy buena, porque el operador de la máquina puede controlar la posición de este elemento más fácilmente y asegurar el corte de un carril, sin afectar la circulación vehicular en el otro lado.

Los ejes traseros (9 y 26) son tractivos y los ejes delanteros (8 y 15) son direccionales en cada módulo. Es decir, se tiene instalado un motor (13), transmisiones y ejes traseros tractivos para la operación de trabajo del Tren de Maquinaria. Los ejes delanteros cuentan con una conexión rápida comúnmente utilizada en los tractocamiones y mediante cilindros hidráulicos (no mostrados) se accionan estos ejes durante los virajes.

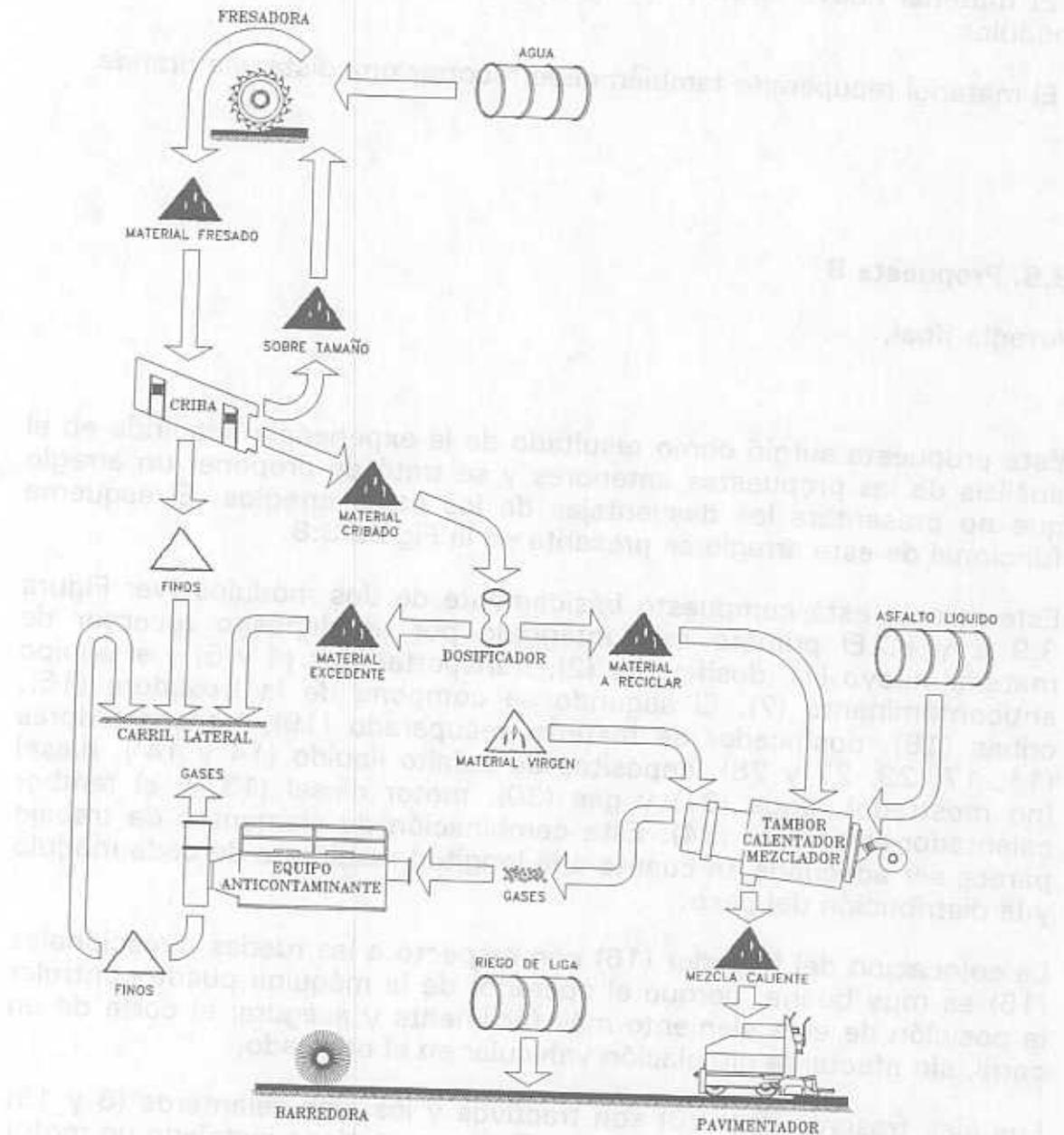


Figura 3.8. Proceso de reciclado de asfalto en el lugar. Propuesta 8.

Cada módulo tiene su propia dirección y tracción con la finalidad de poder corregir la desviación de la trayectoria de los ejes traseros en las curvas de la carretera. Es decir, mientras el eje trasero del primer módulo se desvía una cierta distancia del carril de trabajo, con el eje direccional del segundo módulo se corrige esta desviación para asegurar que siempre se esté cortando un carril y no se tenga el efecto de desviación en cadena (cuando el módulo uno jala al segundo).

El elemento que evita la separación y acercamiento de los dos módulos es la barra rígida (12). Esta barra en sus extremos tiene los grados de libertad necesarios para permitir el movimiento libre de los módulos en las curvas y pendientes de la carretera. El funcionamiento de los dos módulos es muy similar a un tractor de doble tracción pero articulado, donde se tiene en cada rueda un motor hidráulico y de esta manera se puede corregir la diferencia de velocidad presentada en las ruedas por las curvas en el camino.

En la Figura 3.9a se muestra la posición de trabajo. La alimentación del material nuevo se realiza por la parte frontal del primer módulo. Los camiones con caja de volteo (33) pueden descargar el material nuevo en forma continua, mientras son empujados por el primer módulo, hasta que se descarguen completamente. Sin embargo, los camiones pueden llenar el depósito de material nuevo y avanzar hacia adelante. Esta forma de suministrar el material nuevo parece ser práctica porque el primer módulo no tiene que empujar al camión constantemente. La dosificación del material nuevo se efectúa por medio de un tornillo sinfín (2), regulando las revoluciones por minuto del eje y la dimensión de la sección transversal en la salida. Este material se transporta desde la parte frontal del primer módulo hasta el tambor calentador-mezclador ubicado en la parte trasera del segundo módulo por medio de transportadores comerciales: un elevador de cangilones de descarga continua (3) que transporta el material y lo descarga sobre un transportador de banda con paletas (4). El transportador de banda (6) tiene la posibilidad de girar para asegurar la descarga del material sobre el siguiente transportador de banda (11), de acuerdo a las irregularidades que se presenten en la carretera (pendientes y curvas). La base del transportador (6) es móvil y el otro extremo se puede accionar con cilindros hidráulicos (no mostrados), uno para subir o bajar y otro para movimientos laterales. El transportador de banda (11) descarga el material nuevo en el tambor calentador-mezclador (24).

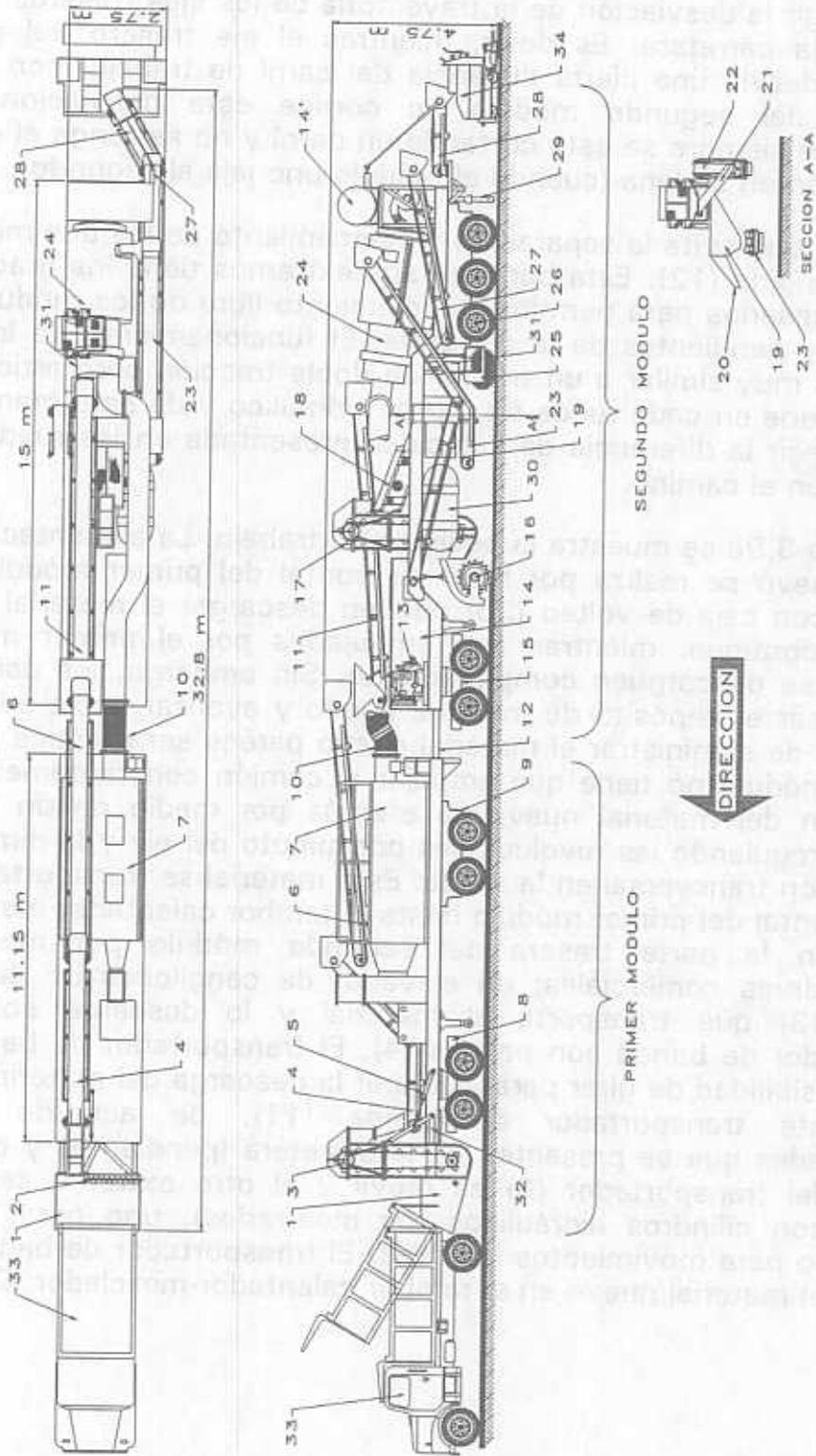


Figura 3.9a. Octavo arreglo propuesto para el Tren de Maquinaria. Posición de trabajo.



El material recuperado se corta y levanta con un tambor fresador comercial (16). Los picos que cortan el pavimento están colocados en el cilindro en forma helicoidal para que el material cortado se transporte hacia el centro. Mediante un sistema convencional (no mostrado) se puede transportar el material recuperado del fresador al elevador de cangilones (17). Un sistema convencional de rociado de agua para enfriar los picos del fresador y disminuir los finos se incluiría en este arreglo (no mostrado).

El elevador de cangilones (17) transporta este material hasta la criba (18), la cual separa el material en tres porciones. Una porción es el sobretamaño que no pasa la primera criba y se conduce por deflectores (21) hacia el transportador de banda (22), (ver sección A-A de la Figura 3.9a). La porción que pasa la primera criba se almacena en un depósito (19), donde se dosifica la cantidad de material recuperado para completar la mezcla (50% de material recuperado). El sistema dosificador del material recuperado es similar al empleado en las plantas estacionarias; mediante un contador de revoluciones (velocidad angular), un registrador de altura (altura de la sección transversal) y una compuerta, ver Figura 3.10. Cuando la cantidad de material que se usa es menor a la obtenida en la criba, el nivel del depósito aumenta hasta que se empieza a tirar en forma hilerada por el deflector (20). Finalmente el material recuperado se transporta hasta el tambor calentador-mezclador (24) por medio de un transportador de banda con paletas (23).

En el método del tambor calentador-mezclador la máxima cantidad de material que se puede reciclar es de 50% de material recuperado y 50% de material nuevo. Otras cantidades mayores de material recuperado ya no se experimentan porque se produce mucha contaminación y no se cumple con las normas ambientales. El tambor seleccionado es de la empresa ASTEC, el cual ofrece mejores ventajas que otros en cuanto al consumo de combustible por tonelada y la cantidad de material recuperado que puede reciclar, comparando las muestras bajo el mismo contenido de humedad. Al tambor se le llama de doble barril porque son dos cilindros. En el cilindro de mayor diámetro se mezcla el material recuperado, el material caliente y el asfalto líquido, los cuales no tocan la flama directamente. En el cilindro de menor diámetro se calienta el material nuevo. El diseño del tambor permite una unidad más compacta en cuanto a la longitud total.

El material nuevo entra al tambor calentador-mezclador (24) de contra flujo a la flama del quemador, donde se va calentando gradualmente y transportando hacia el quemador, hasta que llega a la temperatura promedio máxima de 315.5 °C. En ese lugar existen unas celdas

donde pasa al lugar en que se encuentra el material recuperado, el cual se calienta por conducción del material nuevo (se mezclan). En esta zona se le aplica el asfalto líquido. Los tres elementos (material nuevo, material recuperado y asfalto líquido) se mezclan y transportan hacia la salida. La temperatura de la mezcla desciende gradualmente desde 315.5 °C hasta 148.8 °C en la salida.

Por otro lado, la temperatura máxima promedio de los gases va desde 748.8 °C hasta 115.5 °C en la salida del tambor.

Los gases que se producen durante el calentamiento del material nuevo contienen muchos finos, los cuales si se expulsaran directamente a la atmósfera serían contaminantes. Para evitar la contaminación con finos, éstos se transportan desde el tambor calentador-mezclador hasta el equipo anticontaminante (7). Los tubos que conducen los gases y finos en cada módulo se unen mediante un tubo flexible (10) que permite absorber los movimientos en las curvas y pendientes de la carretera, y puede ser de aluminio o de clorobutilo, que se usa en las cubiertas de bandas Gates, y es resistente a altas temperaturas de hasta 204°C.

El equipo anticontaminante (7) consta de varias bolsas verticales que evitan el paso de las partículas contaminantes (quedan adheridas a la pared), dejando pasar solamente los gases. Estas partículas se recolectan y se pueden dejar hileradas lateralmente a la carretera.

La mezcla caliente sale del tambor de doble barril a la temperatura de 148.8 °C, cuya longitud de recorrido es muy corta. El transportador lateral (27) lleva este material caliente hasta el transportador final (28) con base giratoria, la cual permite descargar la mezcla caliente en el lugar deseado sobre el pavimentador comercial (34), no importando si se encuentra en una curva o pendiente.

La limpieza de la superficie fresada se realiza mediante un cepillo con cerdas en espiral (25), hilerando los finos lateralmente a la carretera. Inmediatamente atrás del cepillo se aplica el riego de ligu o unidor (29) y posteriormente el pavimentador comercial (34) aplica la nueva carpeta.

El transporte del Tren de Maquinaria (ver Figura 3.9b) se realiza en forma simple. El eje delantero (8 y 15) de cada módulo se sustituye por un tractocamión (35), el cual utiliza el mismo tipo de conexión. Los ejes delanteros sin carga son tirados por el módulo de menor longitud. El tractocamión proporciona dirección y tracción al módulo durante el transporte. En el primer módulo el depósito de material nuevo (1) y el elevador de cangilones (3), mediante un cilindro hidráulico (5), giran con respecto al punto de articulación (32) para permitir la entrada y movimiento libre del tractocamión en la posición de transporte.

**Ventajas:**

- El Tren de Maquinaria puede trabajar en curvas de radio de giro mayor o igual a 38.1 m (carreteras tipo C).
- La distribución de los elementos de trabajo es funcional y no presenta las desventajas de las propuestas anteriores.
- La distancia que debe recorrer la mezcla caliente es corta. Esta ventaja permite obtener una buena calidad de la mezcla por la baja pérdida de temperatura.
- Cuenta con sistema de dosificación de material recuperado (ver Figura 3.10).

**Desventajas:**

- El material nuevo se transporta desde la parte frontal del Tren de Maquinaria hasta la trasera, donde se encuentra el tambor calentador-mezclador.
- Se necesitan dos operadores para su operación.
- El material fresado no utilizado se deposita sobre el carril lateral.

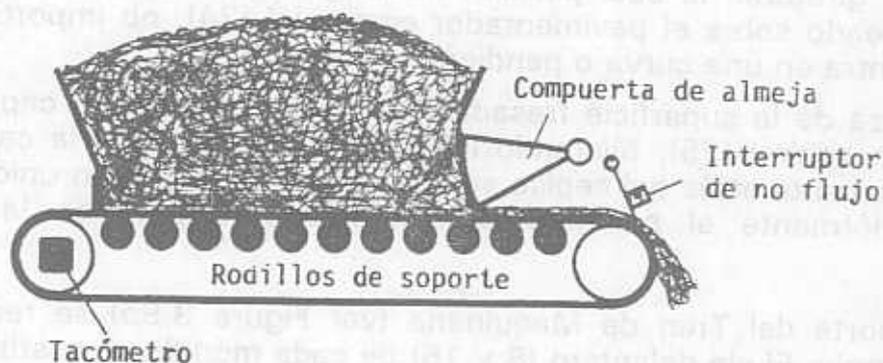


Figura 3.10. Sistema de dosificación del material recuperado.

## 4. Cálculos generales del arreglo preferido

### 4.1. Cinemática del Tren de Maquinaria en la carretera.

Para asegurar el adecuado funcionamiento del Tren de Maquinaria en las curvas de las carreteras, se realizó un estudio cinemático de la desviación de su trayectoria (*off tracking*), cuando trabaja en diferentes radios de curvatura de la carretera.

En la Figura 4.1, se muestra el fenómeno de desviación de la trayectoria, que varía directamente con la longitud entre llantas de una unidad e inversamente con el radio y grado de curvatura a través del cual el vehículo viaja. Además del número y localización de puntos de articulación, tipo de curva (simple o compuesta), velocidad y habilidad al dar la vuelta del vehículo, presión de inflado y condición de los neumáticos.

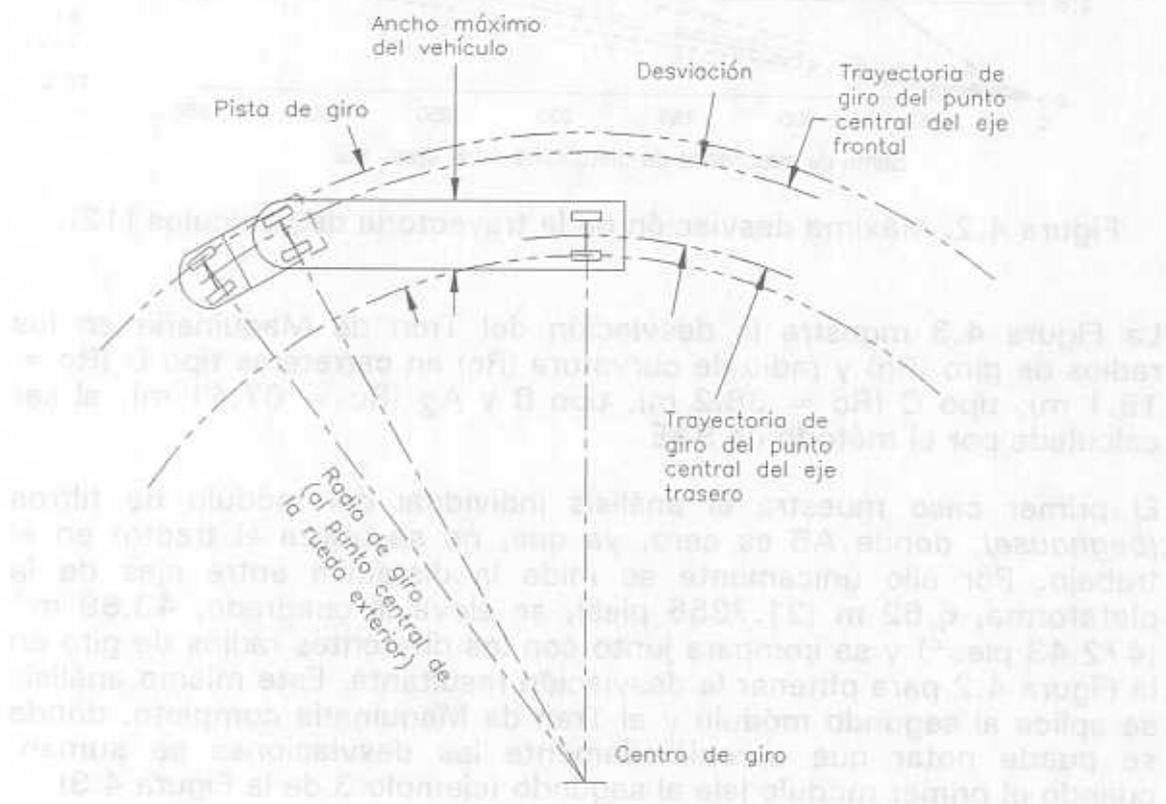


Figura 4.1. Desviación de trayectoria de vehículos en curvas.

Según SAE J695 FEB84 [12], la desviación de trayectoria en vehículos simples o compuestos, se obtiene al medir la distancia entre ejes o al punto medio del grupo de ejes y la distancia al punto de enganche (en vehículos de más de una unidad). Posteriormente estas cantidades se elevan individualmente al cuadrado y se suman algebraicamente, con este resultado y el radio de giro en cuestión, se obtiene la desviación de la trayectoria del vehículo, ver Figura 4.2.

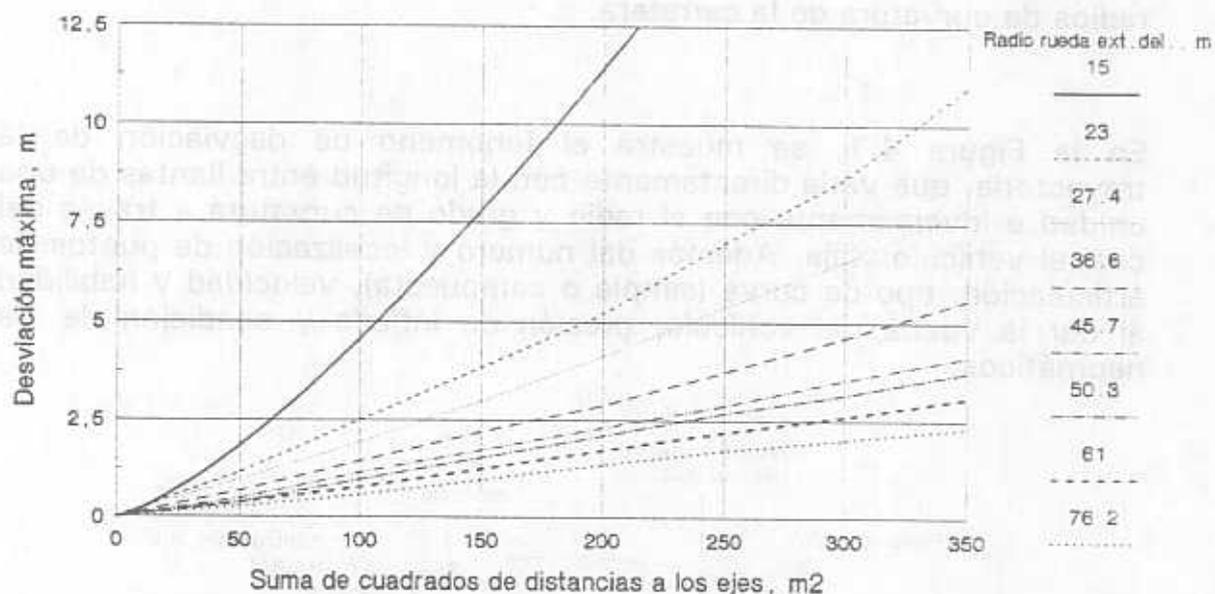


Figura 4.2. Máxima desviación de la trayectoria de vehículos [12].

La Figura 4.3 muestra la desviación del Tren de Maquinaria en los radios de giro ( $R_g$ ) y radio de curvatura ( $R_c$ ) en carreteras tipo D ( $R_c = 19.1$  m), tipo C ( $R_c = 38.2$  m), tipo B y A<sub>2</sub> ( $R_c = 67.41$  m), al ser calculada por el método de SAE.

El primer caso muestra el análisis individual del módulo de filtros (*baghouse*), donde AB es cero, ya que, no se utiliza el tractor en el trabajo. Por ello únicamente se mide la distancia entre ejes de la plataforma, 6.62 m (21.7355 pies), se eleva al cuadrado, 43.89 m<sup>2</sup> (472.43 pies<sup>2</sup>) y se compara junto con los diferentes radios de giro en la Figura 4.2 para obtener la desviación resultante. Este mismo análisis se aplica al segundo módulo y al Tren de Maquinaria completo, donde se puede notar que aproximadamente las desviaciones se suman, cuando el primer módulo jala al segundo (ejemplo 3 de la Figura 4.3).

NUMERO	ESQUEMA	MEDIDA	VALOR m (pies)	SUMA DE m <sup>2</sup> (pies <sup>2</sup> )	MAXIMA DESVIACION DE LA TRAYECTORIA SI EL RADIO DE GIRO (Rg) Y EL RADIO DE LA CARRETERA (Rc) SON POR TIPO DE CARRETERA:		
					D	C	B-A2
1		AB BC	0 6.625 (21.7355)	0 43.89 (472.43)	Rc 19.1	Rc 38.2	Rc 67.41
2		AB BC	0 11.59 (38.02)	0 134.33 (1446.145)	Rg 21.68 1.06	Rg 41.048 0.45	Rg 69.9 0.30
3		AB BC CP PD DE	0 6.625 (21.7355) 2.631 (8.631) 2.328 (7.6377) 11.59 (38.02)	0 43.89 (472.43) 6.922 (-74.494) 5.42 (58.33) 134.33 (1446.145) 176.72 (1902.4)	Rg 22.55 3.20	Rg 41.12 1.52	Rg 70.2 0.838
					Rg 22.55 4.26	Rg 41.12 2.1	Rg 70.2 1.21

Figura 4.3. Cálculos de la desviación del Tren de Maquinaria para cada módulo y para el Tren completo en carreteras con tres radios de curvatura diferentes.

Por ello cada módulo tiene su propia dirección y tracción para corregir la desviación del primer módulo con la dirección del segundo módulo (ejemplo 1 y 2 de la Figura 4.3).

También se realizó una simulación utilizando una maqueta y radios de curvatura a una escala de 1:20, para comprobar los resultados obtenidos según SAE.

La Figura 4.4 muestra el tránsito del Tren de Maquinaria en carreteras tipo C, cuya desviación es de 0.48 m en el módulo de filtros y de 1.4 m en el segundo módulo, semejante a los resultados de SAE de la Figura 4.3. De la misma forma, en la Figura 4.5, se presenta el funcionamiento del Tren en carreteras tipo B y A<sub>2</sub>; donde se comprueba nuevamente que la desviación resultante de la simulación corresponde con el método analítico de SAE.

Por lo anterior, se concluye que el equipo puede trabajar sin problemas de maniobrabilidad en radios de curvatura de carretera mayores de 38.2 m. Esto significa que el Tren puede trabajar adecuadamente en carreteras hasta del tipo C.

Figura 4.4. Comportamiento del Tren de Maquinaria en carreteras tipo C.

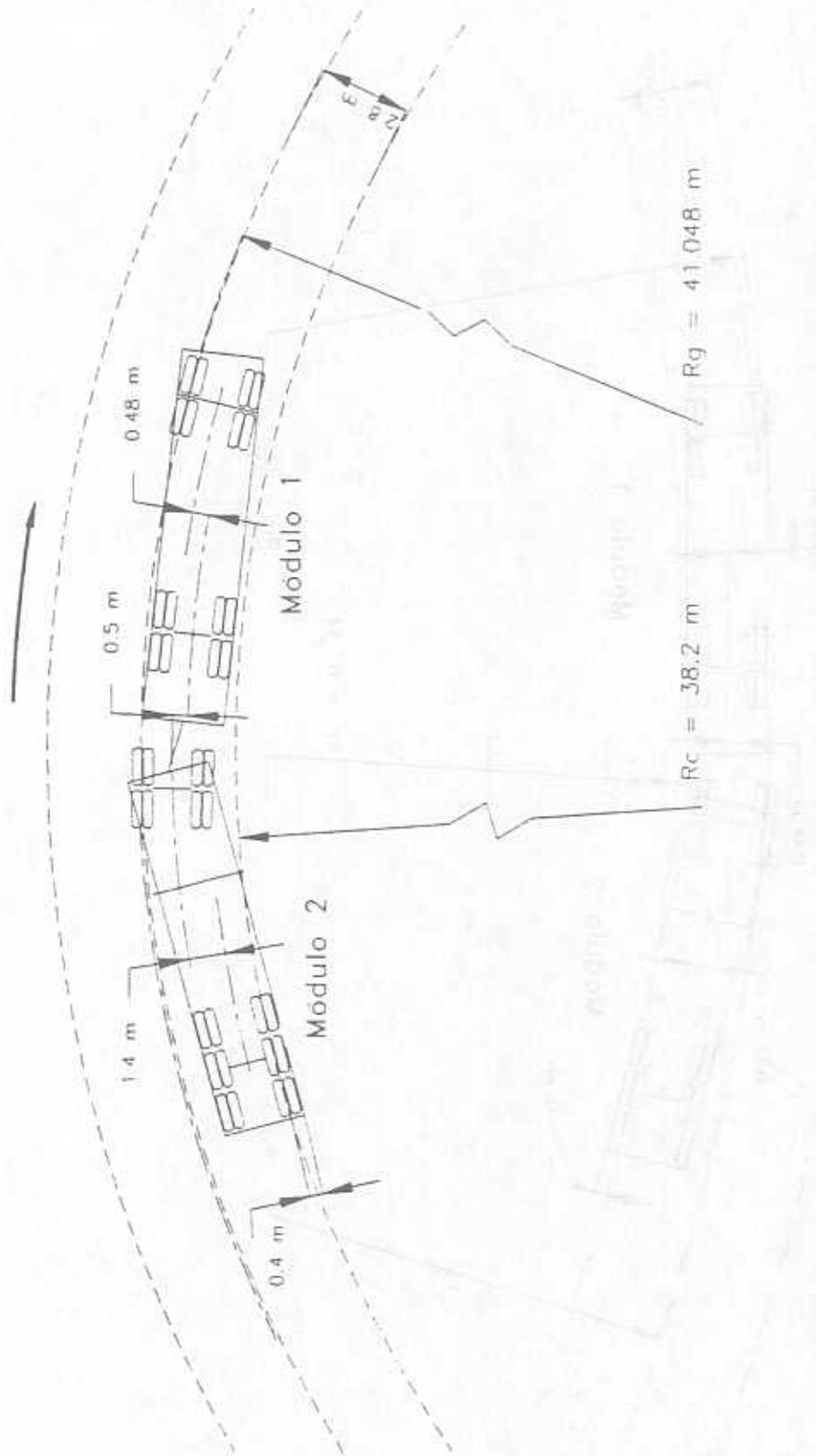


Figura 4.4. Comportamiento del Tren de Maquinaria en carreteras tipo C.

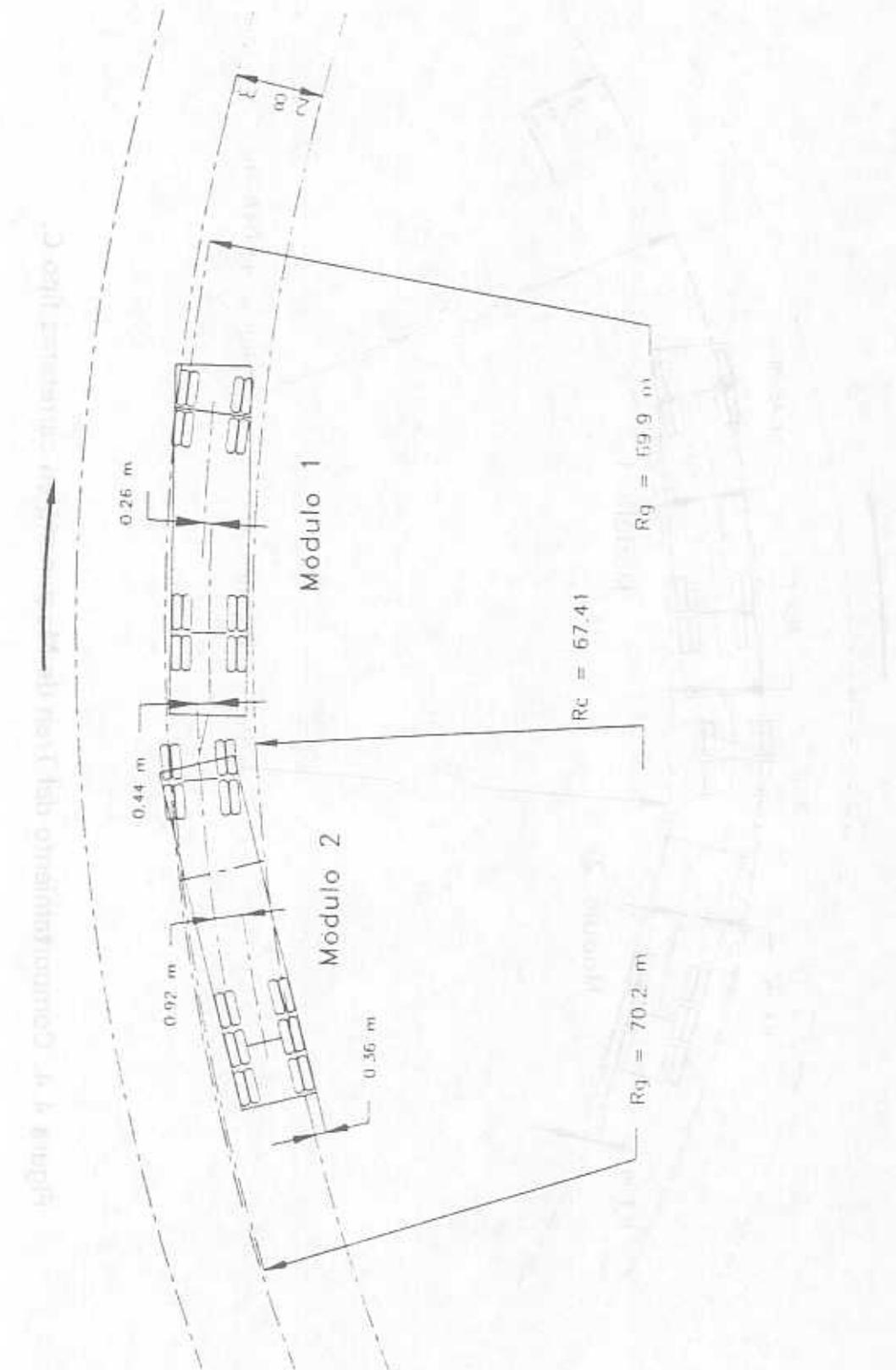


Figura 4.5. Comportamiento del Tren de Maquinaria en carreteras tipo B y A2.

#### 4.2. Potencia de fresado ( $P_f$ ).

Es difícil estimar la potencia que se consume durante el fresado del asfalto, ya que influyen muchas variables como son: ancho de corte, profundidad de corte, velocidad de avance, velocidad de rotación del tambor, diámetro del tambor, etc. La relación que existe entre estas variables se desconoce, por lo que se aproximará la potencia de fresado realizando una comparación de las máquinas fresadoras existentes en el mercado.

En la referencia [14], se presentan dos ecuaciones que intentan relacionar la potencia de fresado con el ancho de corte y con la superficie máxima de corte respectivamente.

$$P_{fA} = 97.228(A)^{1.28}$$

$$P_{fS} = 465.365(S)^{0.785}$$

donde:

$P_{f(A, S)}$  = potencia requerida durante el fresado  
(calculada a partir de A o S), kW.

A = ancho de corte, m.

S = superficie máxima de corte,  $m^2$ .

Estas ecuaciones se obtuvieron bajo las siguientes consideraciones:

- Son el resultado de una regresión lineal de los datos obtenidos de un análisis comparativo de fresadoras existentes. La primera relaciona potencia de fresado con el ancho de corte, y la segunda la misma potencia con la superficie máxima de corte.
- Se supone que la potencia de corte corresponde al 80% de la potencia bruta del motor.

- Se toman los valores máximos de ancho de corte, profundidad de corte y velocidad de corte.

Calculando la potencia para los requerimientos planteados, utilizando las ecuaciones anteriores, se tiene que:

$$P_{fA} = 97.228(A)^{1.28} = 97.228(2.8)^{1.28}$$

$$P_{fA} = 363.2 \text{ kW} = 486.69 \text{ H.P.}$$

$$P_{fS} = 465.365(S)^{0.785} = 465.365[(2.8)(0.07)]^{0.785}$$

$$P_{fS} = 129.48 \text{ kW} = 173.5 \text{ H.P.}$$

La superficie máxima de corte S, se calculó considerando como máximo ancho de corte 2.8 m y máxima profundidad de fresado 0.07 m.

El valor de **486.69 H.P.** es muy alto y el de **173.5 H.P.** es un valor bajo. Esta diferencia en los valores calculados de potencia de fresado se tiene debido a que se consideraron datos de 30 fresadoras de un total de 33, para realizar las correlaciones presentadas. Estas fresadoras presentaban valores muy variados en sus parámetros. Por ejemplo, la potencia de fresado iba de 26 hasta 559 kW, mientras que el ancho de corte iba de 0.04 hasta 0.355 m, y el propósito de las ecuaciones usadas era lograr una primera estimación. A los datos presentados en la referencia [14] se agregaron los de 17 fresadoras para tener un total de 50 y se realizó un análisis comparativo, del cual se presenta la Tabla 5.1, capítulo 5. En ella se observa que para una misma profundidad de fresado, la potencia del motor es proporcional al ancho de corte.

Para obtener un valor más representativo de la potencia de corte, se han agrupado los modelos de fresadoras que cortan a una profundidad cercana a 0.10 m. Estos datos, que se presentan en la Tabla 4.1, se utilizaron para graficar el área de corte contra la potencia de la máquina, lo que da una curva como la mostrada en la Figura 4.6, en la cual se observa que los puntos obtenidos están localizados aproximadamente sobre una parábola.

Para obtener la ecuación que representa la distribución de los puntos graficados se utilizó el método de la parábola de mínimos cuadrados, el cual se presenta en el Anexo A, y que da el siguiente resultado:

$$P_f = 247.3379 \text{ kW} = 331 \text{ H.P.}$$

Considerando que el 80% de la potencia nominal del motor se utiliza durante el fresado se tiene que:

$$P_f = (0.80)(247.3379) = 198 \text{ kW} = 265 \text{ H.P.}$$

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad de corte (Vc)	200	m/min
Avance (f)	0.2	mm/rev
Profundidad de corte (ap)	2.0	mm
Diámetro de la herramienta (D)	100	mm
Velocidad de avance (Vf)	20	m/min
Velocidad de corte (Vc)	200	m/min
Velocidad de avance (Vf)	20	m/min
Velocidad de corte (Vc)	200	m/min
Velocidad de avance (Vf)	20	m/min

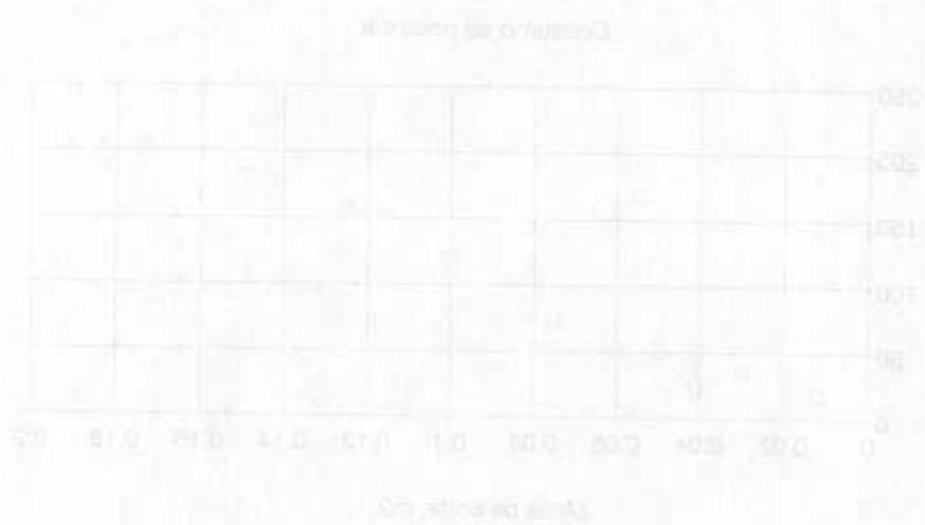


Figura A.6. Aline de corte contra potencia de algunas máquinas herramienta que conforma una parábola de mínimos cuadrados de 0.1 m.

Tabla 4.1. Características de algunas máquinas fresadoras comerciales.

Ancho de corte m	Profundidad de corte m	Area de corte m <sup>2</sup>	Potencia nominal kW	Marca	Modelo
0.3	0.065	0.0195	26	Vielhaben Gebr	RAB 300
0.5	0.085	0.0425	46	Vielhaben Gebr	RAB 500S
0.5	0.1	0.05	61	Vielhaben Gebr	RAB 500Sp
0.75	0.1	0.075	73.5	Vielhaben Gebr	RAB 750Sp
1	0.1	0.1	118	Vielhaben Gebr	RAB 1000Sp
1.25	0.1	0.125	158	Vielhaben Gebr	RAB 1200Sp
1.9	0.1	0.19	243	Bitelli	Giaguaro SF90
1.702	0.102	0.173604	201	Caterpillar	PR 275
0.3	0.04	0.012	17.7	Wirtgen	300 VC
0.5	0.06	0.03	36	Wirtgen	500 VC (36)
0.5	0.1	0.05	51	Wirtgen	500 VC (51)
0.4064	0.1016	0.0412902	22.5	Allitec	CD 16-16

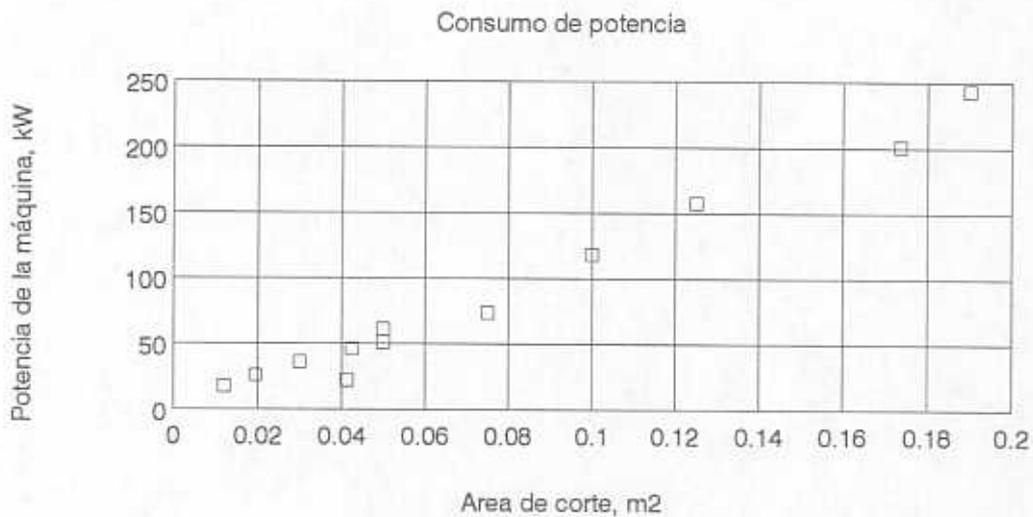


Figura 4.6. Area de corte contra potencia de algunas máquinas fresadoras que cortan a una profundidad aproximada de 0.1 m.

#### 4.3. Potencia necesaria para el desplazamiento ( $P_D$ )

En esta etapa se calcularon las fuerzas que se oponen al movimiento del Tren de Maquinaria durante el proceso de trabajo. Estas fuerzas son básicamente de dos tipos: la fuerza de fresado y la de rodadura.

El tambor fresador gira hacia arriba por lo que la fuerza de fresado se opone al avance.

La fuerza de fresado se calcula usando la siguiente fórmula:

$$F_f = P_f / (r)(w)$$

donde:

$F_f$  = fuerza de fresado, kN.

$P_f$  = potencia de fresado, kW.(1)

$r$  = radio del tambor fresador, m.(2)

$w$  = velocidad angular, rad/s.(3)

$$F_f = 198 / (0.5)(12.25) = 32.33 \text{ kN}$$

Para determinar la fuerza de rodadura, previamente se determinó el peso de cada módulo (ver Tabla 4.3), y se consideró que la máquina estaría subiendo por una pendiente del 16% como condición crítica (según la norma de la S.C.T., la máxima pendiente es del 13%).

(1)  $P_f = 198$  kW; referirse al subtema 4.2.

(2)  $r = 0.5$  m; su determinación se detalla en el subtema 5.1.

(3)  $w = 12.25$  rad/s = 117 r.p.m.; este valor es el promedio de seis datos de velocidad angular de máquinas fresadoras comerciales disponibles, ver Tabla 5.1.

Para efecto de cálculo se considera el peso total de todo el Tren de Maquinaria, el cual se divide en dos componentes: sentido de la pendiente y perpendicular a la pendiente.

$$F_r = W_x + W_y(m)$$

donde:

$F_r$  = fuerza para vencer la rodadura.

$W_x$  = componente del peso en dirección de la pendiente.

$W_y$  = componente del peso perpendicular a la pendiente.

$m$  = coeficiente de rodadura = 0.015 [13].

$$W_x = W_T \text{ sen}(9^\circ) = 65\,765 \text{ kgf}(0.15) = 10\,390 \text{ kgf}$$

$$W_y = W_T \text{ cos}(9^\circ) = 65\,765 \text{ kgf} (0.9876) = 64\,939 \text{ kgf}$$

Por lo tanto se tiene que:

$$F_r = 10\,390 + 64\,939(0.015) = 11\,364.1 \text{ kgf.}$$

$$F_r = 11\,364.1 \text{ kgf} = 111.4808 \text{ kN}$$

Para subir una pendiente se tiene que vencer tanto  $F_f$  como  $F_r$ , por lo que:

$$F_d = F_f + F_r = 32.33 + 111.4808 = 143.8 \text{ kN}$$

La potencia para vencer  $F_d$  considerando una velocidad de 3 m/min es:

$$P_d = F_d V_d = 143.8 \text{ kN} (0.05 \text{ m/seg}) = 7.2 \text{ kW}$$

$$P_d = 7.2 \text{ kW} = 9.65 \text{ H.P.}$$

Tabla 4.2. Estimación del peso para cada módulo.

ELEMENTO	PESO (N)
<b>1.- Camión de volteo cargado</b>	<b>241326</b>
- Camión de volteo	49050
- 6 m <sup>3</sup> de material	192276
<b>2.- Módulo de filtros (<i>baghouse</i>)</b>	<b>107076.15</b>
Plataforma (Canal 0.381 m x 74.4 kg/m)	13881.15
- 4 ejes (6.87 kN c/u)	27468
- 1 elevador de cangilones	2943
- 1 transportador de banda	3924
- Filtro de bolsas ( <i>baghouse</i> )	29430
- Estructura y elementos no considerados	29430
<b>3.- Módulo de reciclado</b>	<b>394852.5</b>
- Motor de combustión interna	10791
- 5 ejes (6.87 kN c/u)	34335
- Tambor fresador	68670
- Depósitos llenos	122134.5
- 5 transportadores de banda	11772
- 1 elevador de cangilones	2943
- Plataforma (Canal 0.381 m x 74.4 kg/m)	22563
- Tambor calentador	78480
- Criba	4905
- Cepillo barredor	4905
- Estructura y elementos no considerados	33354

#### 4.4. Localización del centro de gravedad en un plano, cargas en los ejes y cálculos de tracción.

La determinación del centro de gravedad es importante para calcular el peso que soportan las ruedas de tracción. Estos cálculos se realizaron únicamente para el módulo de reciclado, ya que éste es el que requiere mayor fuerza de tracción. (Para el proceso de cálculo, ver Anexo B).

Del proceso de cálculo desarrollado se tiene que la fuerza de tracción desarrollada es:

$$H = 155.7979 \text{ kN}$$

La fuerza que debe vencer el Tren de Maquinaria en la condición más crítica es de  $F_D = 143.8 \text{ kN}$  (ver subtema 4.3). Por lo tanto,  $H$  es mayor que  $F_D$ , por lo que la fuerza de tracción desarrollada en el segundo módulo es suficiente para el desplazamiento del Tren. Aunque por funcionamiento, cada módulo tiene sus ejes traseros tractivos para que el Tren de Maquinaria funcione como un tractor de doble tracción, pero articulado.

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Camión de volteo cargado</li> <li>- Camión de volteo</li> <li>- 6 m<sup>3</sup> de material</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estructuras y mantenimiento</li> <li>- Estructuras y mantenimiento</li> <li>- Estructuras y mantenimiento</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Módulo de volteo</li> <li>- Motor de combustión interna</li> <li>- 2 ejes de 80 kN cada uno</li> <li>- Tanque (reservorio)</li> <li>- Diferencial</li> <li>- 6 transportadores de banda</li> <li>- Elevador de caudales</li> <li>- Plataforma</li> <li>- Camión 0.882 m x 7.4 m (m)</li> <li>- Tanque carburador</li> <li>- Caja</li> <li>- Eje de eje</li> <li>- Estructuras y mantenimiento</li> <li>- Estructuras y mantenimiento</li> </ul>

4.4. Localización del centro de gravedad en un plano, ejes y cálculo de tracción

La determinación del centro de gravedad es importante para calcular el peso que soportan las ruedas de tracción. Este cálculo se realiza únicamente para el módulo de volteo ya que este es el que realiza mayor fuerza de tracción. Para el proceso de cálculo ver Anexo B.

## 5. Selección de elementos

### 5.1. Tambor fresador.

Una exhaustiva revisión bibliográfica, permitió conocer las características técnicas de los tambores que utilizan las diferentes máquinas fresadoras existentes en el mercado, ver Tabla 5.1. Para ello se consultaron Patentes y Catálogos técnicos.

Como conclusión de esta revisión, se puede decir que las máquinas convencionales con capacidad para fresar anchos cercanos a 2.8 m, tienen tambores de diámetro de entre 0.7 a 1.2 m, ver Figura 5.1. Además, debido a que el transportador de cangilones utilizado para elevar el material recuperado tiene una altura mínima de alimentación (81.7 cm), se requiere cierto diámetro de tambor para levantar el material desde el suelo, ver Figura 5.2.

Según Fabela [14], el diámetro de un tambor fresador se obtiene de la siguiente forma:

$$D = 1.932(P)^{0.5731}$$

donde:

D = Diámetro del tambor (m).

P = Profundidad máx. de corte (m).

Entonces:

$$D = 1.932(0.07 \text{ m})^{0.5731}$$

$$D = 0.42 \text{ m}$$

Esta ecuación se originó al relacionar datos de profundidad de corte y diámetro del tambor fresador de 29 modelos de perfiladoras autopropulsadas. A este conjunto se agregaron siete modelos más, según aparece en la Tabla 5.1., pero aún así, el valor que se obtiene con la ecuación resultante no variará mucho, debido a que la mayoría de los tambores tiene un diámetro alrededor de 0.5 m y la ecuación tiene sólo la intención de mostrar esta tendencia.

Tabla 5.1. Análisis comparativo de máquinas fresadoras.

MARCA	MODELO	MASA (kg)	POTENCIA MOTOR (kW)	VEL. GIRO MOTOR (r.p.m.)	ANCHO DE CORTE (m)	PROFUNDIDAD DE CORTE (m)	DIAMETRO TAMBOR (m)	VEL. GIRO TAMBOR (r.p.m.)	VELOCIDAD DE AVANCE (m/min)	NÚMERO DE DIENTES	VELOCIDAD TANG. DTS. (m/s)
CMI ROTO-MILL	PR-500B	36959	392	2100	2.18	0.3048	1.118		0-24	160	
	PR-800	53752	600	2100	3.81	0.3048	1.118		0-24	263	
	PR-1200		895		4.87						
	PR-550	37671	484	2100	2.175	0.305	1.118		0-24	160	
	PR-800-7	37671	596	2100	2.175	0.305	1.118		0-24	160	
	PR-1050	53752	600	2100	3.81	0.305	1.118		0-24	263	
	PR-1200FL	72711	895	2100	3.81	0.381	1.372		0-26	264	
	PR-1200RL	64705	895	2100	3.81	0.381	1.372		0-24	264	
	PR-225	15876	156.6	2800	1.4		0.559		0-18.3	91	
	PR-375	29483	280	2100	2.82		0.711		0-21.34	178	
	PR-575	30781	380	2100	2.82		0.711		0-21.34	178	
	PR-750(2.5)	29484	560	2100	2.54	0.232	0.711		0-21.34	161	
PR-750(3.8)	36660	560	2100	3.81	0.232	0.711		0-21.34	247		
PR-500FL	36970	391	2100	2.175	0.254	1.118		0-24	150		
300VC	2045	17.7	2300	0.3	0.04	0.3		0-21	28/15		
500VC (36)	4100	36	2300	0.5	0.06	0.38		0-27	44/15		
500VC (51)	6080	51	2500	0.5	0.1	0.46		0-10	49/15		
1000VC	13930	104		1		0.504		0-13	80/15		
2000VC/P	26000	300		2.1	0.15	0.855		0-22	180/15		
2100VC	39430	408.6	2100	2.8	0.3	1.016			166/15		
500DC	10470	72	2300	0.5	0.28	0.9		0-24	46/15		
SF1900VC	23400	246			0.15						
2200VC	43446	560		2.2	0.254						
2000VC	29431	298		2.1	0.15						
2600VC	44000	560		2.6	0.254						
4200C VARIOS	46000	746		4.26	0.15						
BITELLI	TOLPA SF 60	6800	68	2500	0.6	0.15	0.55	121.5	0-30	53	3.5
	VOLPE SF100 T4	13500	131	2500	1	0.25	0.75	122	0-30	92	4.8
	LINCE SF150	19300	240	2000	1.5	0.2	0.75	119.7	0-45	117	4.7
	PUMA SF200	37800	515	2000	2	0.3	1.05	100	0-22	155	5.5
	PANTERA SF210	32000	340	2100	2.12	0.2	0.75	123	0-47	150	4.83
	VOLPE SF210	10000	124	2500	1	0.15	0.55		0-30	82	
	GIAGUARO SF90	18200	243	1800	1.9	0.1	0.75	119.7	0-42	137	4.7
	PR-75	5900	52	2500	0.368	0.152	0.66		0-15.24	63	
	PR-275	17250	201	2200	1.702	1.102	0.559		0-48.77	116	
	PR-450	25740	336	2100	1.905	0.254	1.016		0-53.6	144	
PR-750B	46640	559	2100	4.3	0.284	1.016		0-53.6	216		
RAB 300	2400	26	2500	0.3	0.085	0.36		0-28	29/15		
RAB 500S	5300	46	2300	0.5	0.085	0.5		0-28	37/17.5		
RAB 500 SP	7800	61	2800	0.5	0.1	0.5		0-15	37/17.5		
RAB 750SP	8850	73.5	2500	0.75	0.1	0.5		0-15	37/17.5		
RAB 1000SP	15950	118	2500	1	0.1	0.5		0-15	71/17.5		
RAB 1200SP	16800	158	2300	1.25	0.1	0.5		0-15	85/17.5		
SP780	24230	240	2100	1.981	0.178	0.93		0-36.6	135		
MW-250C	13620	104	2500	0.762	0.152	0.7112		0-36.6	70		
MW-6250	27921	298		2	0.1924						
MT-7000E	34958	448		2	0.3048						
SCARAPLANET	B328	89.5	2000	0.914		0.66					
HODOCK	AP78 ASPHALT	7258	250		2.06	0.1778					
DYNAPAC	PL-2000	31130	298	2100	1.981	0.152			0-16	166	

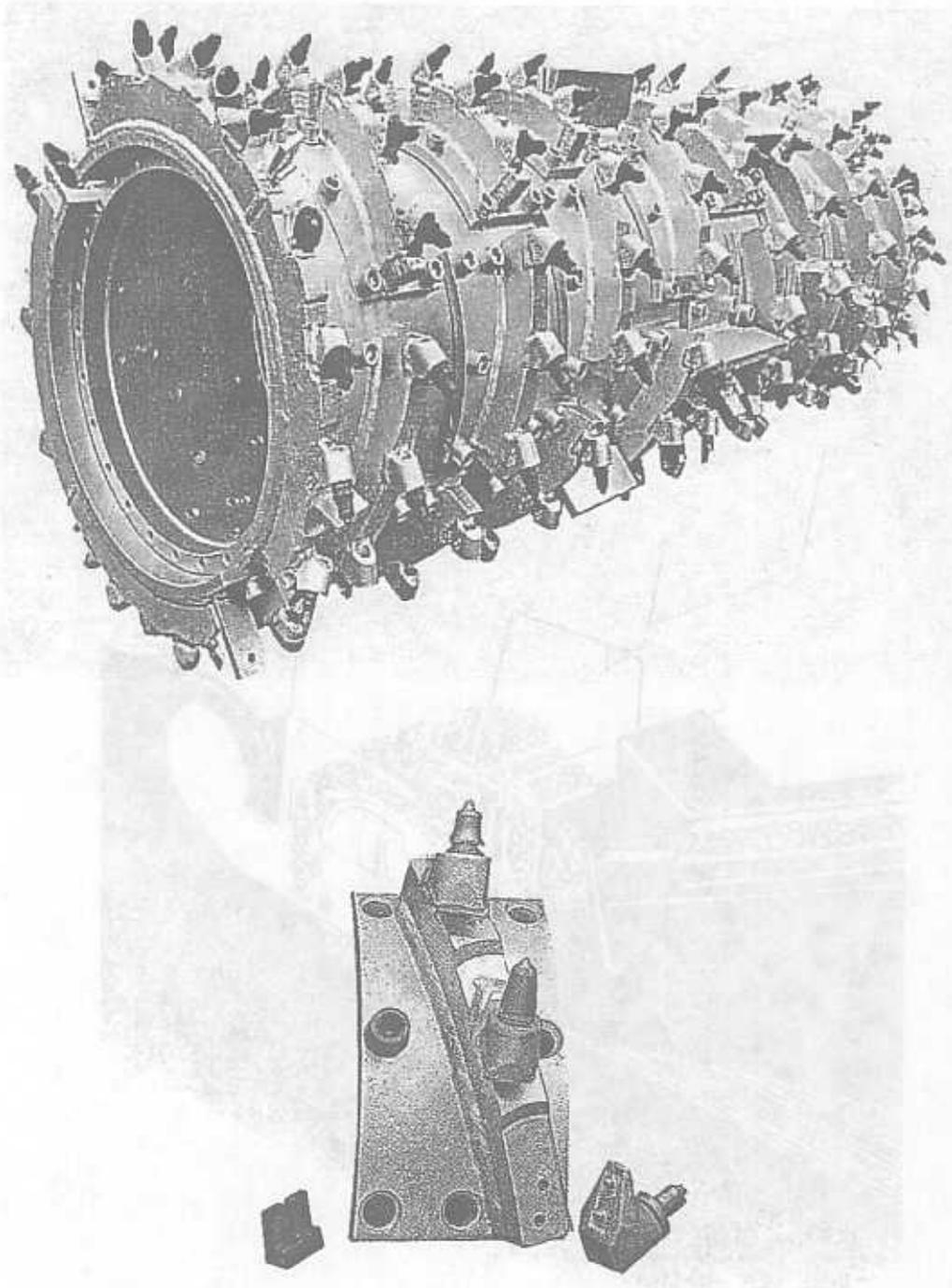


Figura 5.1. Tambor fresador.

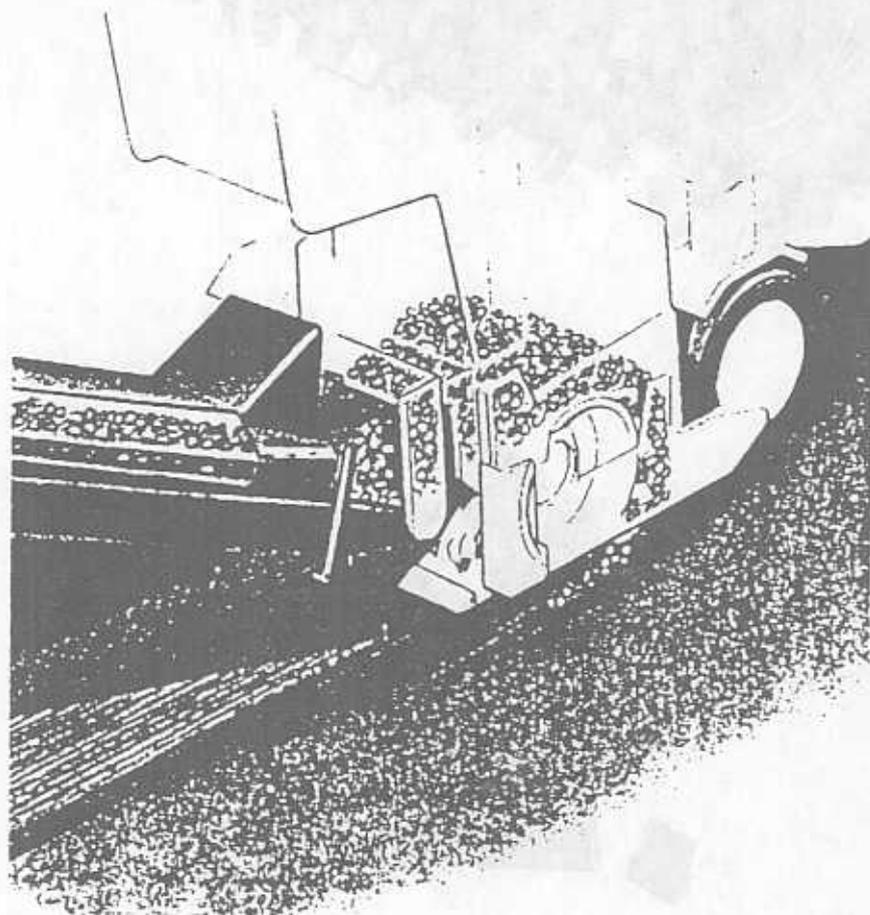


Figura 5.2. Elevación del material fresado.

Por lo anterior, y debido a las condiciones de diseño, se decidió seleccionar un tambor fresador que corresponde al que utiliza la fresadora Wirtgen, modelo 2100VC, con 1.016 m de diámetro, ancho de 2.8 m y 166 dientes. El sentido de rotación del tambor es hacia arriba como en las fresadoras comerciales.

## 5.2. Transportador de cangilones.

### 5.2.1. Elevación de material fresado.

La selección del transportador de cangilones utilizado para elevar el material fresado a la criba, se realizó según el manual MARTIN No 60, sección H [15].

#### Parámetros conocidos.

- Capacidad: 55.1 ton cortas/h (50 ton/h).
- Densidad de pavimento asfáltico recuperado: 1.6 ton/m<sup>3</sup> (100 lbs/pie<sup>3</sup>).
- Capacidad volum. 31.2 m<sup>3</sup>/h (1102 pie<sup>3</sup>/h).
- Distancia entre centros: 3.05 (10 pies).
- Material a transportar: pavimento asfáltico recuperado.

Aspectos tales como capacidad, pérdida de altura en la descarga (R y V en [15]), altura de alimentación (J en [15]), tipo de cangilón, tipo de descarga y en general la influencia de las dimensiones de la carcasa del transportador en el Tren de Maquinaria, se tomaron en cuenta en la selección.

Por lo anterior y como resultado de un análisis detallado se decidió utilizar un transportador de banda con descarga continua **B105-791**, cuyo uso se recomienda para terrones de tamaños medios y grandes, moderada o excesivamente abrasivos. Con las siguientes características básicas:

- Capacidad: 60.7 ton cortas/h (1215 pie<sup>3</sup>/h).
- Velocidad del cangilón: 61 m/min (200 pie/minuto).
- Potencia necesaria: 2.23 kW (3 H.P.)
- Máximo tamaño del material a transportar: 1.9 a 6.35 cm (3/4 a 2 1/2").
- Peso total: 2943 N (660 lbs).
- Material de banda: 100% polyester de diseño especial.
- Ancho de banda: 27.94 cm (11").
- Tipo de cangilones: especiales para descarga continua.
- Medidas de cangilones: 25.4x12.7x19.685 cm (10x5x7 3/4").
- Material de cangilones: acero.
- Capacidad de cangilones: 0.00255 m<sup>3</sup> (0.090 pies<sup>3</sup>).

### 5.2.2. Elevación de material nuevo.

La selección del transportador de cangilones utilizado para elevar el material nuevo de su depósito, se realizó según el manual MARTIN No 60, sección H [15].

Parámetros conocidos.

- Capacidad: 27.55 ton cortas/h (525 ton/h).

- Densidad de pavimento asfáltico recuperado:  
1.6 ton/m<sup>3</sup> (100 lbs/pie<sup>3</sup>).
- Capacidad volum. 15.6 m<sup>3</sup>/h (551 pie<sup>3</sup>/h).
- Material a transportar: pavimento asfáltico recuperado.

Los transportadores de cangilones C85-104 y C85-105 no cumplen con la capacidad requerida, aunque tienen la misma dimensión en la pérdida de la descarga (R y V en [15]) y altura de alimentación (J en [15]) que las del transportador B105-791. Los transportadores C85-107, C85-108 y B85-143 cumplen con la capacidad requerida, pero tienen las dimensiones J, R y V más grandes que las del transportador B105-791.

El transportador que cumple con la capacidad de 551 pie<sup>3</sup>/h y las dimensiones J, R y V iguales a las del transportador **B105-791** es el **B185-142**.

Tabla 5.2. Capacidad de algunos transportadores de cangilones [15].

ELEVADOR No.	CAPACIDAD m <sup>3</sup> /h	CARACTERISTICAS
C85-104	15.43	De cadena y descarga centrífuga
C85-105	15.43	De cadena y descarga centrífuga
C85-107	17.41	De cadena y descarga centrífuga
C85-108	17.41	De cadena y descarga centrífuga
B185-142	15.8	De banda y descarga centrífuga
B85-143	18.06	De banda y descarga centrífuga

### 5.3. Criba.

En el Anexo C se presenta el método de cálculo para determinar el área de cribado, cuyo valor es:

$$\text{Area} = 0.418 \text{ m}^2 \text{ (4.5 pies}^2\text{)}$$

Por otro lado, se analizó el área de cribado de algunas máquinas comerciales, con diferentes capacidades de pavimento asfáltico recuperado, ver Tabla 5.3, así como las cribas vibratorias existentes en el mercado que se adaptaran a las necesidades del proyecto. Todo esto trajo como consecuencia el seleccionar una criba de la marca Nordberg, modelo N2HD, para trabajo pesado y área de cribado de 3' x 6', ver Tabla C.3.

Tabla 5.3. Comparación del área de cribado de algunas máquinas recicladoras de asfalto.

MARCA	MODELO	CRIBA m <sup>2</sup> (ft <sup>2</sup> )	CAPACIDAD (TPH)
United Machinery	540	1.62 (17.5)	150 - 250
United Machinery	600	1.39 (15)	50 - 125
United Machinery	640	4.64 (50)	350 - 600
United Machinery	660 y 665	7.8 (84)	500 - 800
Roadtec	Rx - 110	5.57 (60)	450 - 500

#### 5.4. Transportador de banda.

##### 5.4.1. Selección de rodillos.

Los rodillos a utilizar son: modelo **STC-20°-18** y **SR-18**.

La potencia total necesaria para mover un transportador es de: **1.19 kW (1.6 H.P.)**

##### 5.4.2. Selección de la banda transportadora.

La banda transportadora se seleccionó de acuerdo a la referencia [18].

La banda elegida es:

**HN-1 x 18 x 3 capas de 90 PPI x 3/32".**

La banda para transportar el material nuevo, material recuperado y la mezcla caliente es la misma, sólo cambia el tipo de cubierta en la banda para transportar la mezcla caliente.

##### 5.4.3. Selección de las poleas.

Las poleas seleccionadas tienen las siguientes características:

**Ancho de polea:  $F = 508 \text{ mm (20")}$**

**Diámetro de la polea:  $D = 355.6 \text{ mm (14")}$**

**Diámetro de la flecha:  $Dt = 49.2 \text{ mm (1 15/16")}$**

### 5.5. Tambor calentador-mezclador.

En la selección del tambor calentador-mezclador, se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva para conocer en primera instancia la evolución y características técnicas de estos elementos en el mercado, así como las empresas que los producen, tales como: CMI-Corporation, Gencor Industries, Cedarapids, Astec y otras. Para ello se consultaron Patentes, Artículos, Catálogos técnicos y se realizaron algunas entrevistas con representantes en México de estas compañías.

A continuación se mencionan algunos tópicos generales, que ilustran el desarrollo tecnológico de los tambores calentadores.

Los tambores calentadores mezcladores se introdujeron a principios de los años 70 como alternativa para eliminar el equipo de propulsión de aire y hacer el tambor más versátil. Los primeros tambores fueron solamente para calentar material nuevo y mezclarlo con asfalto en flujo paralelo (los gases y los agregados se mueven en la misma dirección), ver Figura 5.3a. En ellos el material nuevo entra al lado de la flama, secándose gradualmente a una temperatura de los gases de hasta 760 °C (1400 °F). Este modelo tiene una relación de longitud grande con respecto a su capacidad, que le permite obtener una mezcla de buena calidad, con una temperatura de salida de 148.8 °C (300 °F).

Posteriormente a mitad de los años 80 apareció un tambor de flujo paralelo, que mezcla material nuevo, material recuperado y asfalto líquido, ver Figura 5.3b. En este tipo el material nuevo entra a la altura de la flama. En la parte media del tambor se le aplica material recuperado e inmediatamente asfalto. El calentamiento del material a reciclar se realiza por conducción, al contacto con el material nuevo, que alcanza hasta 260 °C (500 °F). Esto propicia una curva térmica irregular, que para porcentajes altos de material recuperado, se puede tener que la mezcla no sea homogénea; además que el casco del tambor se sobrecalienta cuando el material nuevo alcanza 315.5 °C (600 °F).

Para evitar estos problemas se desarrolló un tambor calentador de contra flujo (los gases y el material agregado se mueven en direcciones opuestas), que permite tener un calentamiento más uniforme del material nuevo (315.5 °C) a través del tambor para posteriormente ser depositado sobre un mezclador independiente, junto con el material recuperado y el líquido asfáltico, ver Figura 5.3c. Como se puede observar la mezcla se realiza uniformemente a una temperatura constante de 148.8 °C (300 °F). Aunque el sobrecalentamiento del casco del tambor sigue presente en la zona de la flama.

Otro desarrollo fue un tambor calentador-mezclador de contra flujo, cuya principal característica constructiva es el disponer de un quemador empotrado, ver Figura 5.3d. El quemador está instalado aproximadamente a 14' dentro del tambor, y el material recuperado se aplica en la parte posterior del quemador, donde éste se mezcla con el material nuevo caliente ( $371.11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y el líquido asfáltico. Este tambor tiene la desventaja de tener su casco sometido a altas temperaturas, corto tiempo de mezcla entre materiales y es de mantenimiento difícil.

Para evitar el sobrecalentamiento del casco del tambor se instaló un inyector de aire adyacente al quemador, ver Figura 5.3e. Donde el material nuevo alcanza hasta  $313.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $600\text{ }^{\circ}\text{F}$ ); sin embargo los otros problemas siguen presentes.

El tambor contra flujo de doble barril, diseñado por Astec Industries [20] y patentado en 1991 (Pat. Americana No. 5, 052, 810), ofrece los mayores avances en cuanto a:

- Evita la oxidación del material recuperado y asfalto líquido porque nunca tocan la flama directamente. El secado y calentamiento del material nuevo se realiza en forma gradual.
- La mezcla del material nuevo, material recuperado y asfalto líquido se realiza en la parte exterior del tambor calentador. Por ello su longitud es menor al compararlo con el resto de los tambores, ver Figura 5.3f [20].
- El rango de producción (TPH) es mayor que otros tambores para el mismo porcentaje de humedad (ver Figura 5.4a).
- El consumo de combustible por tonelada (GPT) para el mismo porcentaje de humedad es menor que otros tipos de tambores (ver Figura 5.4b).
- Area de mezcla grande comparada con la de otros tambores [20].
- El material nuevo se seca y calienta hasta  $315.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $600\text{ }^{\circ}\text{F}$ ).
- Trabaja con proporciones hasta de 50% de material recuperado.
- Temperatura de salida de la mezcla de  $148.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $300\text{ }^{\circ}\text{F}$ ).
- Temperatura máxima de los gases de  $760\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $1400\text{ }^{\circ}\text{F}$ ).

- El 90% de la energía requerida para calentar y secar el material recuperado, la proporciona por conducción el material nuevo y el 10% por conducción del calor de la carcaza del tambor en la sección de mezcla.
- El humo y olor de la zona de mezcla, se incineran al ser jalados por orificios a la zona de la flama, resultando cero de opacidad.
- El sobrecalentamiento que existía en la zona de la flama de otros tambores, se disminuye, ya que la mezcla absorbe el calor de esta zona.

Como conclusión del análisis anterior, se decide utilizar un tambor calentador-mezclador de doble barril con capacidad de 50 TPH.

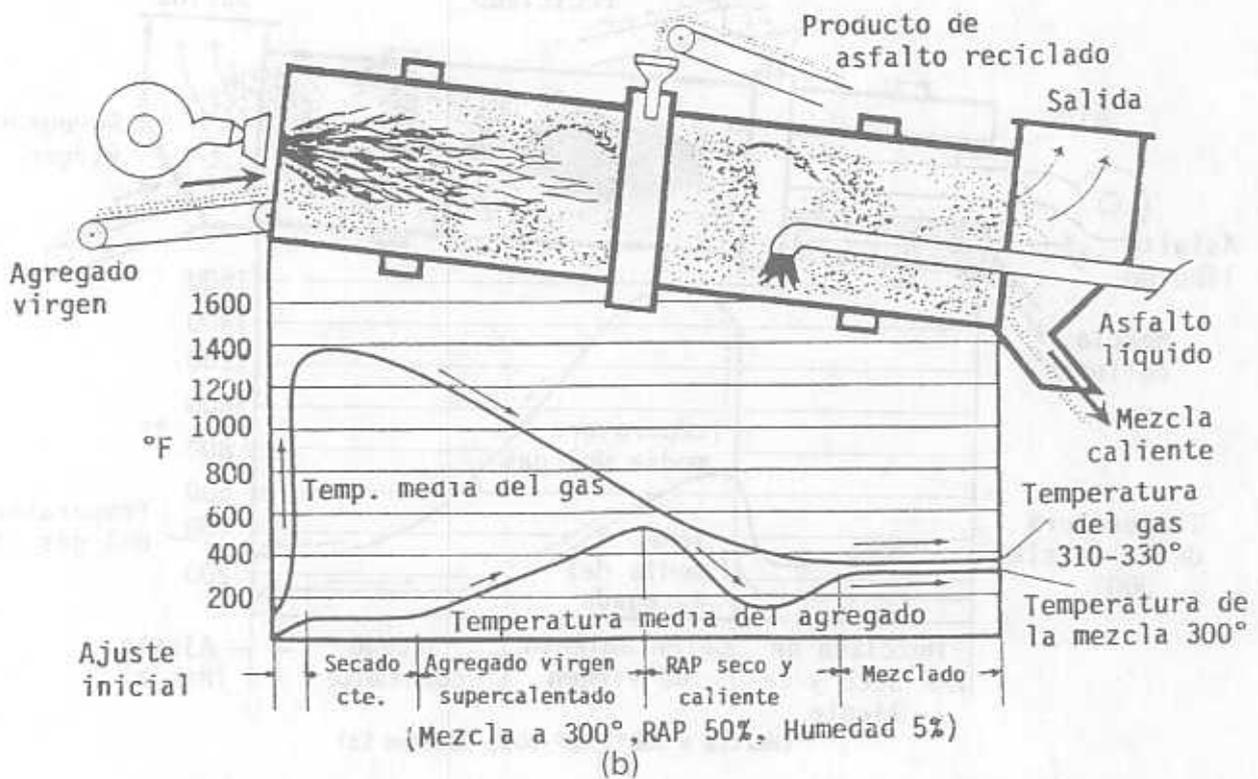
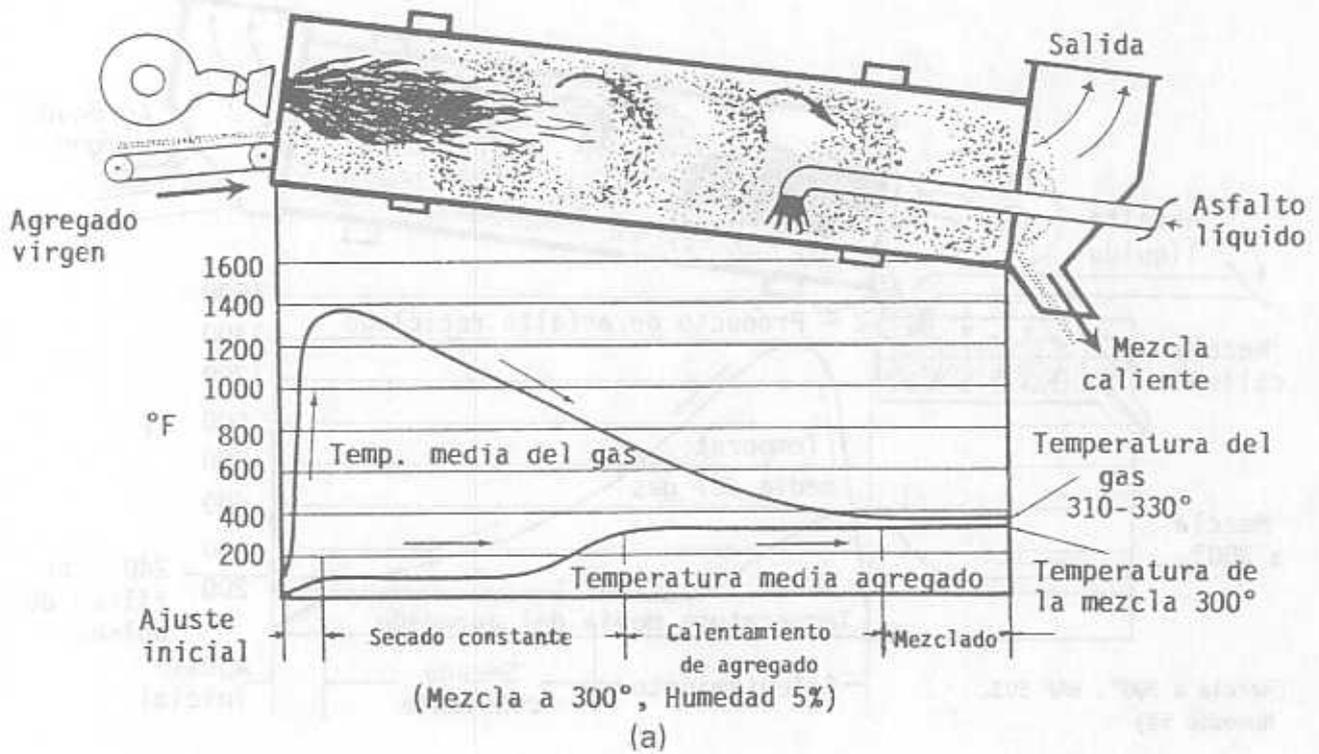


Figura 5.3. Evolución del tambor calentador-mezclador.

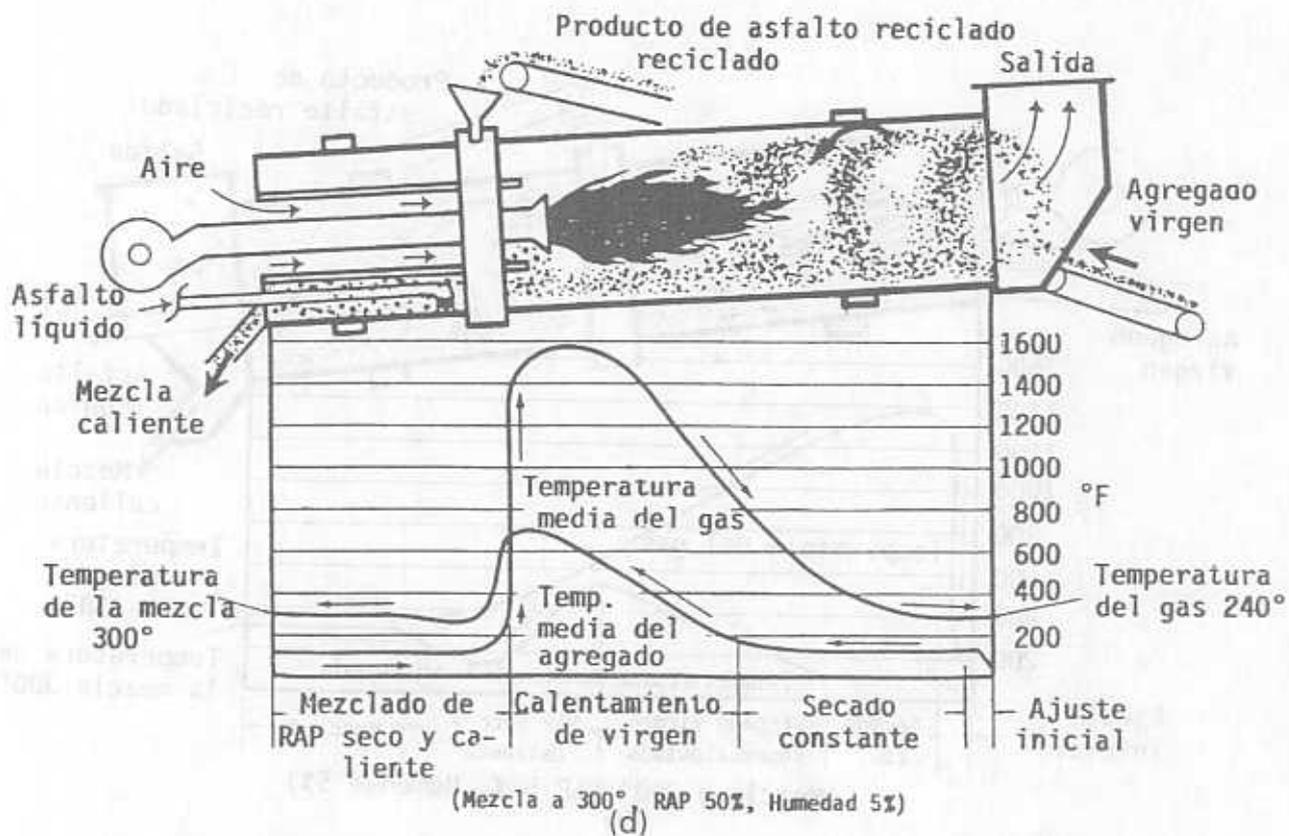
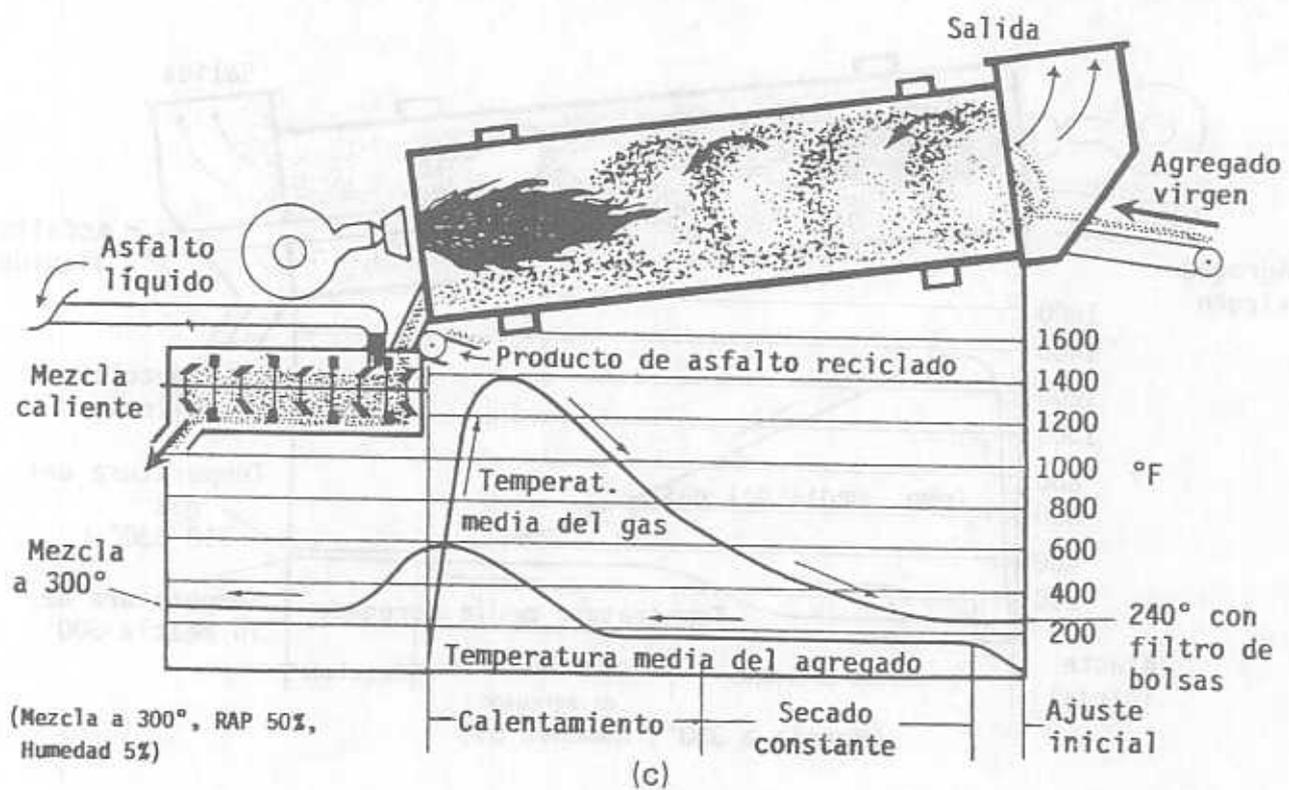


Figura 5.3. Evolución del tambor calentador-mezclador (cont.).

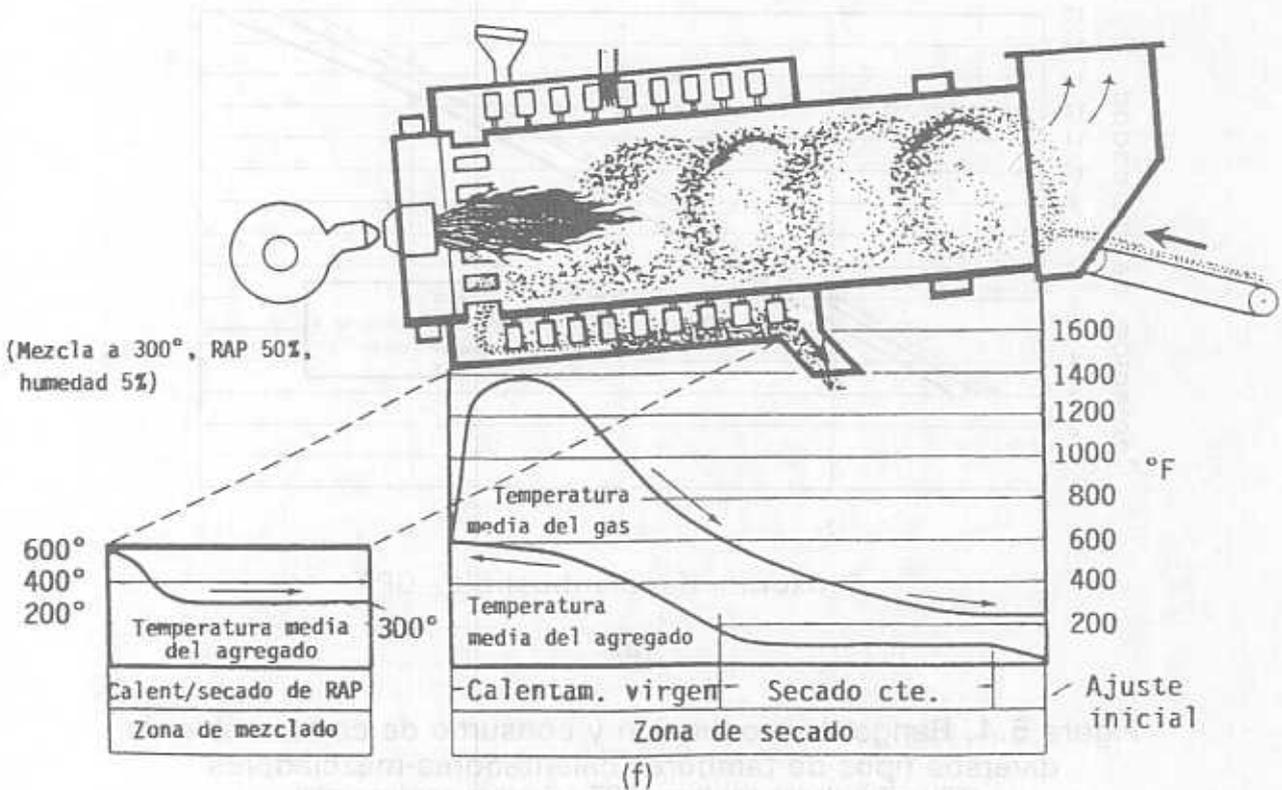
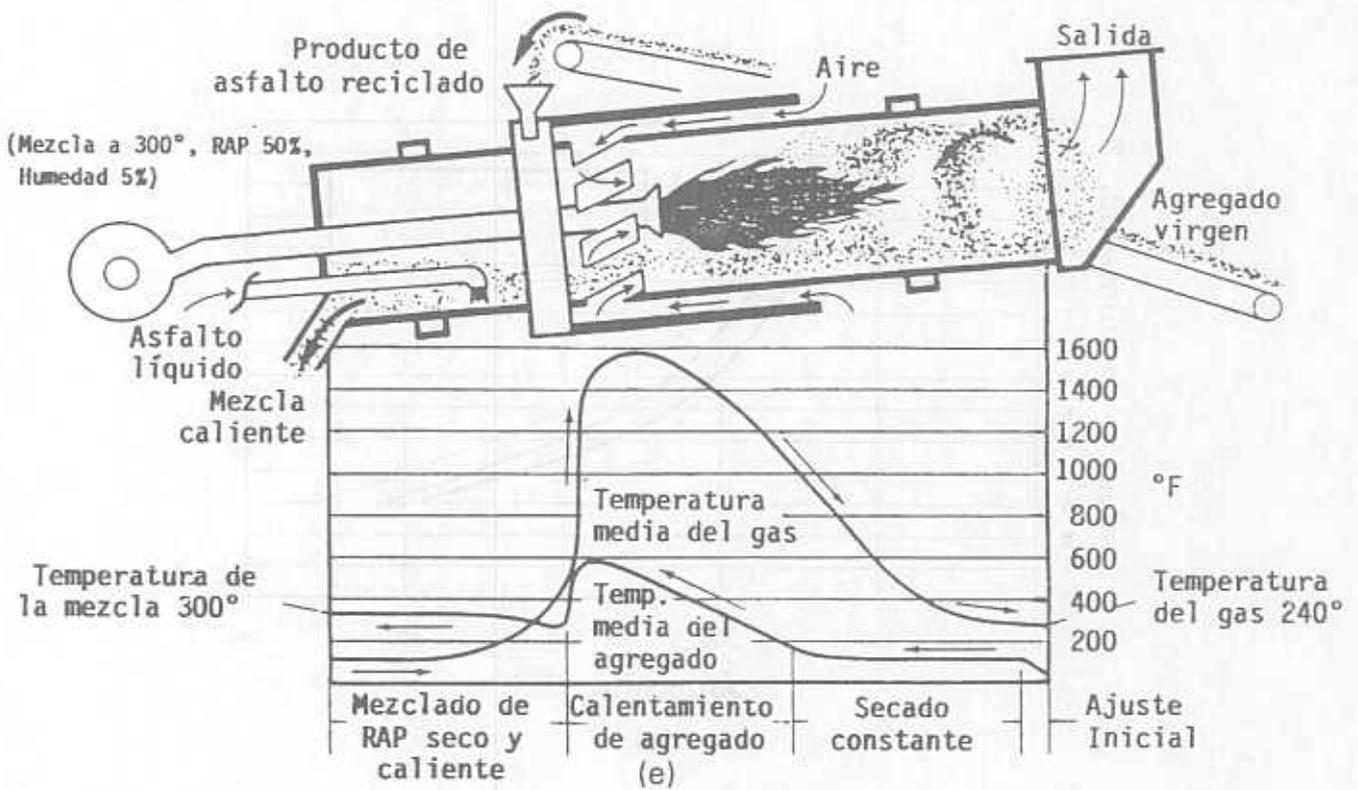
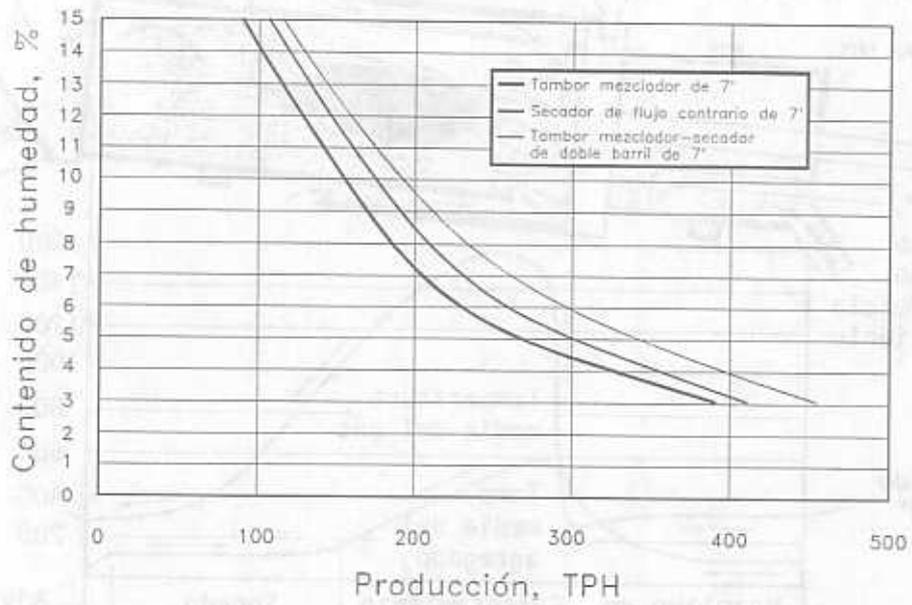
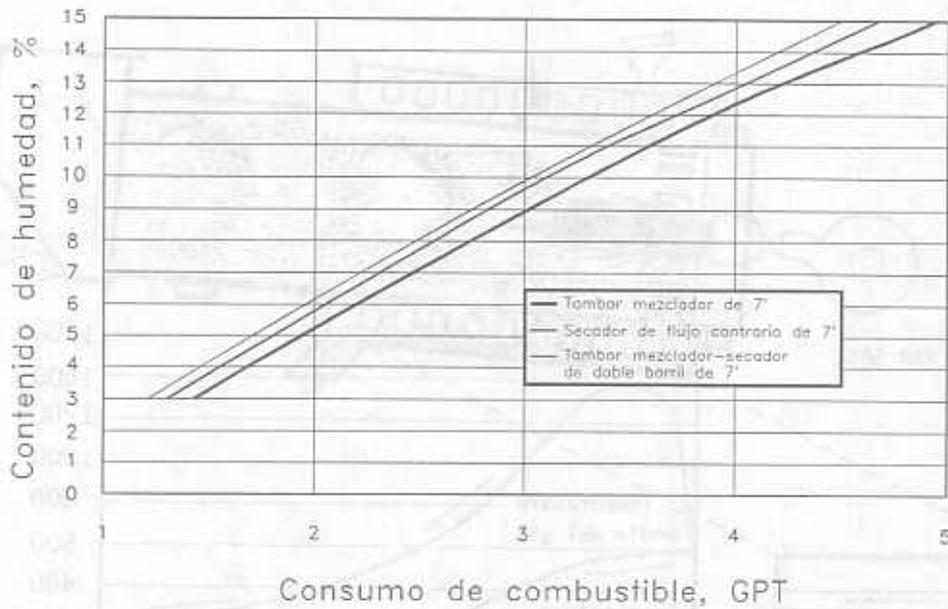


Figura 5.3. Evolución del tambor calentador-mezclador (cont.).



(a)



(b)

Figura 5.4. Rango de producción y consumo de combustible de diversos tipos de tambores calentadores-mezcladores (TPH = Toneladas por hora; GPT = Galones por tonelada).

## 5.6. Filtros de bolsas.

Quizás el problema más complejo al usar el tambor calentador-mezclador para el reciclado de asfalto es la contaminación ambiental que produce. El humo y las partículas contaminantes que se producen durante el proceso de reciclado de asfalto, se pueden capturar utilizando filtros de bolsas.

El humo se origina por altas temperaturas o por la separación del vapor con el hidrocarburo, de aquí la importancia que el material a reciclar no tenga contacto directo con la flama. Precisamente el tambor calentador seleccionado calienta por conducción al material que se va a reciclar, para disminuir el efecto de la contaminación.

Un filtro de bolsas también es conocido como colector de polvos; éste se encuentra localizado entre el tambor calentador y el extractor, en donde los gases de escape del tambor calentador se extraen a través del filtro de bolsas, introduciendo una corriente de aire a través del filtro, Figura 5.5.

Los gases contaminados que salen del tambor calentador pasan del exterior al interior de las bolsas a través de una tela filtradora en donde los finos quedan atrapados, Figura 5.6, a y b. Las partículas adheridas en el exterior de las bolsas obstruyen el flujo de los gases por lo que es necesario retirar estas partículas, Figura 5.7.

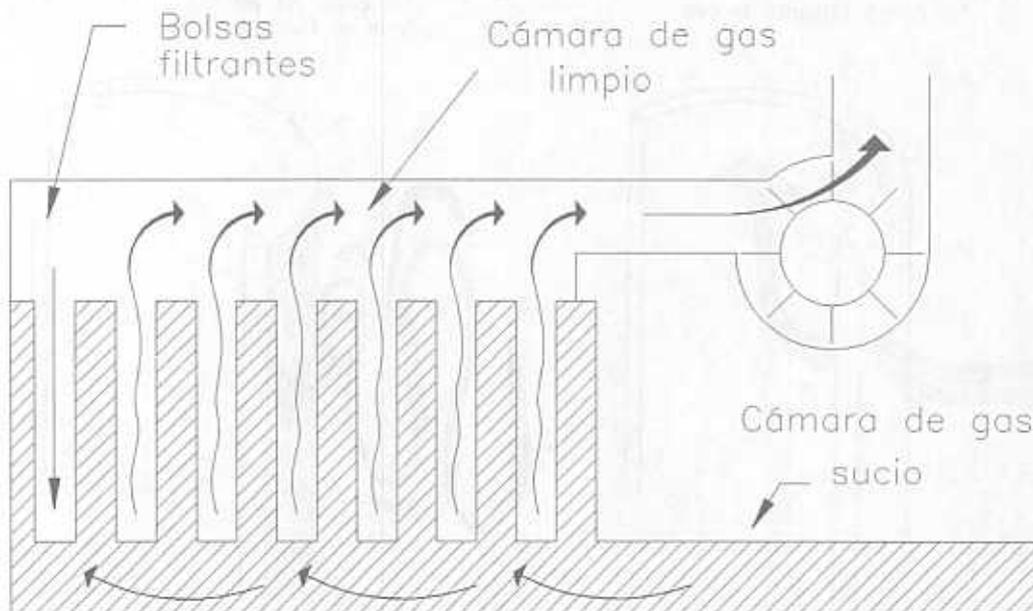


Figura 5.5. Filtro de bolsas (*baghouse*).

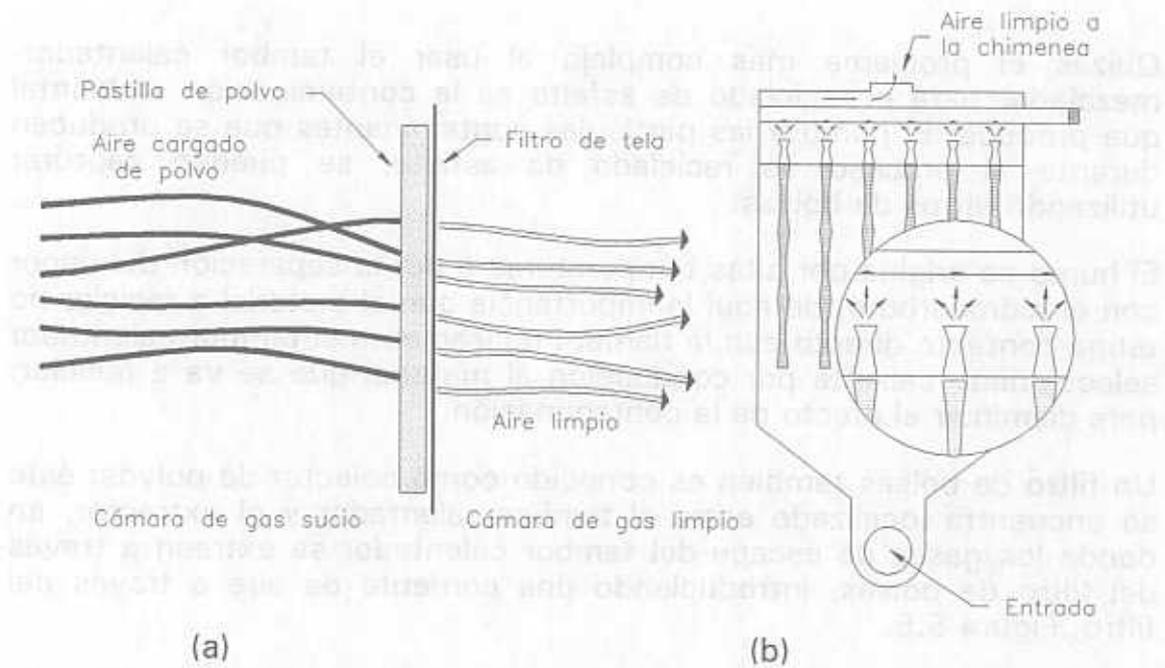


Figura 5.6. Filtrado del aire en un filtro de bolsas.

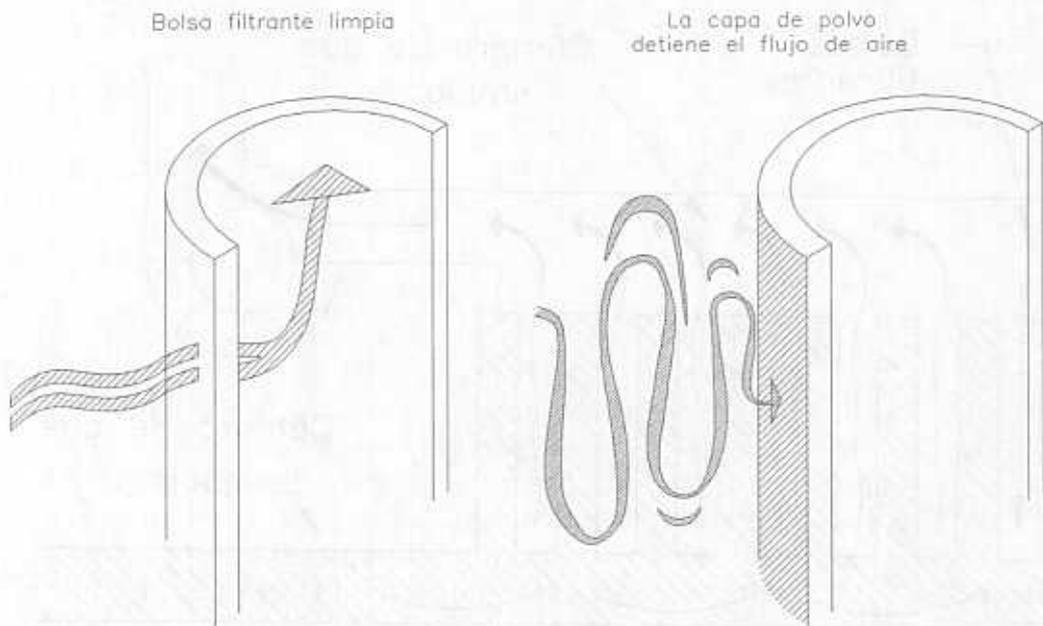


Figura 5.7. Restricción del flujo de aire en un filtro de bolsas.

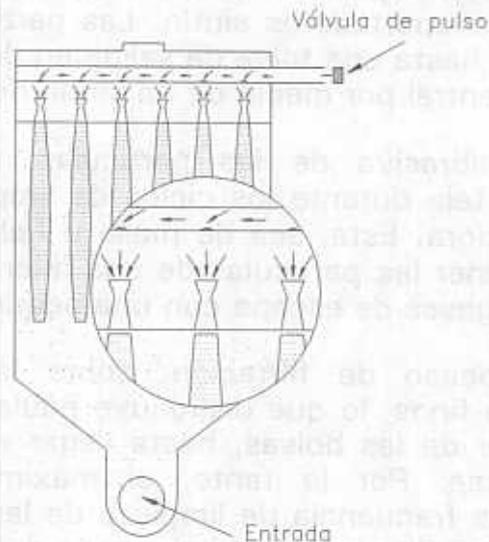


Figura 5.8. Limpieza de los filtros de bolsas.

El filtro de bolsas que se seleccionó está formado por dos módulos de filtrado los cuales se comunican por medio de un ducto central. Cada módulo tiene una válvula localizada en la parte superior de éste, la cual dirige una presión positiva a través de los canales del filtro durante la etapa de limpieza.

El ciclo de limpieza está controlado por la válvula rotatoria (*Roto-Step Cleaner*) la cual gira en sentido contrario a las manecillas del reloj, parando en frente de cada canal. La válvula cierra la vía para que los gases no pasen del exterior al interior de la bolsa y abre otra vía a la presión del medio ambiente a través de las bolsas. La presión positiva flexiona las bolsas, desalojando el polvo que ha sido colectado sobre las bolsas, Figura 5.8.

La válvula limpiadora se controla por una caída de presión transmitida desde el baghouse al sistema de control. La caída de presión deseada se regula en el sistema de control. Si la presión excede la presión de referencia, el ciclo de limpieza se iniciará; cuando la caída de presión esté por debajo de la presión seleccionada, se interrumpirá el ciclo de limpieza. La válvula se posiciona frente a una sección de las bolsas en un instante y las limpia, posteriormente se mueve al siguiente canal para continuar con el proceso. Así continúa limpiando cada canal hasta recorrer  $360^{\circ}$  completando de esta manera el ciclo. En el filtro de bolsas con dos módulos, como es el caso, únicamente una válvula limpiadora funciona mientras que la otra permanece estática.

Los finos que son separados de las bolsas caen a una tolva, la cual contiene dos transportadores sinfín. Las partículas se transportan por los dos sinfines hasta una tolva de salida en donde se concentran hacia una descarga central por medio de un sinfín de hélice opuesta.

La propiedad abrasiva de las partículas, así como las repetidas flexiones de la tela durante los ciclos de limpieza, afectan la vida útil de la tela filtradora. Esta, sea de malla o fieltro, debe ser lo bastante densa para retener las partículas de una micra de diámetro y, aún así, dejar pasar los gases de escape con una pequeña resistencia.

Durante el proceso de filtración, sobre las bolsas se tiene una acumulación de finos, lo que disminuye paulatinamente el paso de los gases al interior de las bolsas, hasta llegar al punto en que los finos deben removerse. Por lo tanto, el máximo espesor de finos se determina por la frecuencia de limpieza de las bolsas. Sin embargo, la efectividad de los filtros también depende del espesor del aglomerado. El ciclo de limpieza puede variar dependiendo de la carga de finos suspendidos en los gases de escape y de las formas características de las partículas. Si la temperatura del filtro de bolsas se encuentra por debajo del punto de rocío de los gases de escape, el vapor o el ácido puede condensarse en las bolsas pegándose de tal forma que puede tapar los orificios de las bolsas, produciendo una acumulación excesiva de finos. Las partículas pegadas generalmente no se pueden remover en la acción de limpieza, por lo que el equipo se debe detener para limpiar las bolsas.

### **5.7. Motor de combustión interna.**

Durante el trabajo, la unidad central de potencia para todo el Tren de Maquinaria será un motor de combustión interna. Las fuentes de movimiento en el Tren se muestran en la Figura 5.9.

De los cálculos realizados en el capítulo 4 y de la selección de elementos en el capítulo 5, se determinaron los consumos de potencia para los elementos, los cuales se presentan en la Tabla 5.4. El total de potencia consumida en el Tren de Maquinaria es de 228 kW (305 H.P.). Para esta demanda de potencia, el motor que mejor se adaptó fue el motor Detroit Diesel 8V-92 turbo cargado modelo 8083-7300. En el Anexo D, Figura D.1, se presentan las curvas características de este motor, en donde se aprecia que la potencia máxima es de 440 H.P. a 2100 rpm. Sin embargo, se tiene menor consumo de combustible a 1800 rpm, resultando una potencia de 400 H.P.

## 5.8. Dimensiones de los depósitos.

### 5.8.1. Depósito de combustible del tambor calentador.

Se calcula la cantidad de combustible que se suministra al tambor calentador.

En la Tabla 5.5 [20], se considera que el material a calentar tiene una humedad promedio del 12% y un consumo correspondiente de 3.6 galones de combustible/tonelada.

La capacidad del Tren de Maquinaria es de 50 TPH, por lo que se requieren 180 galones de combustible/hora. Considerando que la jornada de trabajo efectiva es de 6 horas, se requieren 1080 galones de combustible, lo cual equivale a  $4.0828 \text{ m}^3$ . El depósito se debe llenar dos veces por jornada.

Tabla 5.4. Consumo de potencia por el Tren de Maquinaria.

ELEMENTO	POTENCIA REQUERIDA, kW (HP)
Tambor fresador	198 (265)
Vencer la rodadura en una pendiente del 16%.	7 (10)
Criba	0.746 (1)
5 Transportadores de banda	6 (8)
2 Elevadores de cangilones	4.5 (6)
Cepillo barredor	7.5 (10)
Transportador sinfin	3.7 (5)
<b>TOTAL</b>	<b>228 (305)</b>

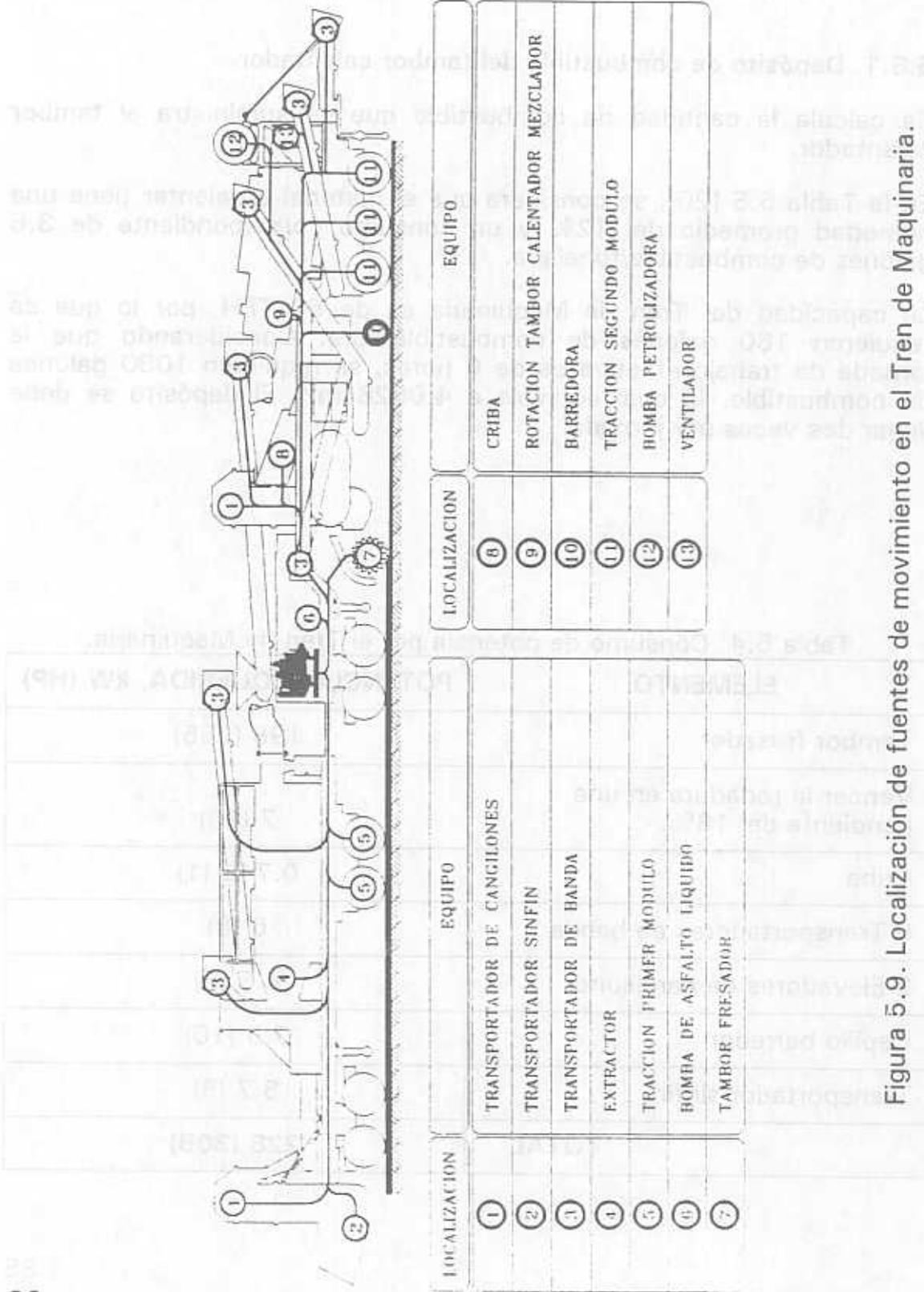


Figura 5.9. Localización de fuentes de movimiento en el Tren de Maquinaria.

Tabla 5.5. Porcentaje de humedad que el tambor calentador-mezclador de doble barril remueve y el combustible que consume [20].

Longitud m (pies)	Capacidad (TPH)	CONSUMO DE COMBUSTIBLE (LITROS/HORA)													
		PORCENTAJE DE HUMEDAD REMOVIDA Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE (LITROS/TÓN)													
		3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%	11%	12%	13%	14%	15%	
1.83 (6)	28	1245.2	1014.3	855.41	738.07	643.45	571.53	514.76	461.77	423.92	389.85	355.79	333.08	306.58	
2.1 (7)	38.5	1699.4	1385.3	1165.7	1003.0	878.12	775.92	696.44	632.09	575.32	526.11	484.48	450.41	41.635	
2.4 (8)	50	2229.3	1813.0	1525.3	1313.3	1150.6	1021.9	915.97	828.91	753.21	688.87	635.88	590.46	545.04	
2.7 (9)	63.5	2823.6	2301.2	1934.1	1665.4	1457.2	1294.4	1158.2	1044.6	953.82	876.12	806.20	745.64	692.65	
3 (10)	78.5	3497.3	2850.1	2399.6	2062.8	1805.4	1601.0	1434.5	1298.2	1180.9	1082.5	999.24	923.54	859.19	

### 5.8.2. Depósito de combustible para el motor.

De la hoja de especificaciones del motor Detroit Diesel Modelo 8083-7300 se obtuvo que el consumo de combustible es de 87.8 litros/hora; para una jornada de 6 horas de trabajo se requiere un volumen de 526.8 litros lo que equivale a 0.5268 m<sup>3</sup>.

### 5.8.3. Depósito de agua.

El agua que contiene este depósito se utiliza para controlar la cantidad de polvos que se generan durante el fresado. Al momento de esparcir el agua sobre el fresador, los polvos se depositan sobre el suelo y también se aprovecha esta aspersión para enfriar los dientes del tambor fresador. El depósito de agua se estima de acuerdo al volumen de agua que manejan las fresadoras comerciales, ver Tabla 5.6.

Analizando esta tabla se puede observar que los depósitos de agua para fresadoras comerciales (con parámetros técnicos parecidos del fresador que se está conceptualizando), están entre 3500 y 5500 l. Partiendo de esta comparación se estima que un depósito de agua de 4000 litros (4 m<sup>3</sup>) es suficiente.

Tabla 5.6. Comparación de volúmenes de agua y de aceite hidráulico en algunas fresadoras comerciales.

Marca y modelo	Ancho de corte, m	Tanque de agua, litros	Aceite hidr., litros
Caterpillar PR750B	3.048	4542	174.1
CMI-PR 800	3.8	5678	132.5
Vielhaben RAB2600 hd	3.8	4000	700
Wirtgen 2100 VC	2.8	3492	
Roadtec Rx-60	2.184	5300	299

#### 5.8.4. Depósito del aceite hidráulico.

De la Tabla 5.6 también se observa que los depósitos para el aceite hidráulico varían desde 132 hasta 700 litros. Para efecto de esta conceptualización se considera un depósito de **300 litros**, por lo que se propone que sea un recipiente que tenga un volumen de **0.3 m<sup>3</sup>**.

#### 5.8.5. Depósito de asfalto líquido.

Tomando como dato, que la cantidad de asfalto líquido que se utiliza para un proceso de reciclado es el 3% del peso total, se tiene que para una capacidad de 50 TPH se necesitan 1.5 toneladas de asfalto líquido/hora. Para una jornada de 6 horas se requieren 9 toneladas de asfalto líquido/jornada. Considerando que la densidad del asfalto líquido es de 1 ton/m<sup>3</sup> [21], se requieren 9 m<sup>3</sup>. El volumen del recipiente es de **4.97 m<sup>3</sup>**, por lo que debe suministrarse dos veces por jornada.

### 5.8.6. Depósito de asfalto de ligazón.

La cantidad de asfalto de ligazón que se recomienda es de  $0.15 \text{ gal/yd}^2$  [22], lo que equivale a  $0.679 \text{ litros/m}^2$ ; para una jornada de 6 horas se requieren  $1901.2 \text{ litros}$  que equivale a  $1.9 \text{ m}^3$ .

Las dimensiones de este depósito son:

$$\text{Diámetro} = 1.1 \text{ m.}$$

$$\text{Longitud} = 2.4 \text{ m.}$$

Resultando un volumen de  $2.28 \text{ m}^3$ . Este depósito se cargará de asfalto de ligazón una vez por jornada.

### 5.9. Ejes y llantas.

De la estimación del peso del Tren de Maquinaria que se realizó en el capítulo 4 se determinó que los ejes del módulo de filtros tendrán una capacidad de  $111.25 \text{ kN}$  ( $25000 \text{ lb}_f$ ) cada uno, mientras que los ejes del módulo de reciclado serán de  $151.3 \text{ kN}$  ( $34000 \text{ lb}_f$ ).

El neumático seleccionado es de tamaño 11.00 - 22. A partir de datos de límites de carga en neumáticos y de carga y presión de inflado, se obtuvo que el límite de carga por llanta para una velocidad de 60 MPH es de  $29 \text{ kN}$  ( $6530 \text{ lb}_f$ ) a  $6.9 \text{ kPa}$  ( $100 \text{ lb}_f/\text{plg}^2$ ) de presión de inflado. La carga máxima por eje es de  $4 \times 29 \text{ kN} = 116 \text{ kN}$ .

Si se dispone de tres ejes en la parte trasera del módulo dos, entonces la capacidad es de  $348 \text{ kN}$ ; sin embargo, la carga que deben soportar es de  $222.6 \text{ kN}$ . En la parte delantera del módulo dos se tienen dos ejes con la capacidad de soportar  $232.15 \text{ kN}$  y la carga que deben soportar es de  $172.3 \text{ kN}$ .

En el módulo uno de la propuesta preferida se puede notar que un eje trasero y un delantero son suficientes para soportar la carga estimada; sin embargo, debido a que se desconoce el peso exacto del equipo de anticontaminación se prefirieron dos ejes en cada extremo.

### 5.10. Pavimentador de asfalto.

El pavimentador de asfalto que mejor se aproxima a la necesidad presentada es el pavimentador marca Caterpillar Modelo AP-200.

Las características del pavimentador se mencionan a continuación.

Equipado con motor Diesel Deutz de 35 H.P. de 2 cilindros, 4 tiempos y  $1638.7 \text{ cm}^3$  ( $100 \text{ plg}^3$ ) de desplazamiento.

Sistema de mando, dos motores hidrostáticos de mando directo, independientemente impulsan las cadenas autolimpiadoras fabricadas totalmente de acero.

Longitud de las cadenas:

- Longitud en contacto con el suelo: 760 mm

- Ancho: 381 mm

- Borde exterior a borde exterior: 2440 mm

Tolva hidráulica, con alimentación por gravedad. Dos puertas hidráulicas de la tolva funcionan independientemente una de otra para regular con eficiencia el flujo de materiales.

Dimensiones de la tolva:

- Longitud: 1190 mm

- Ancho: 1540 mm

- Capacidad: 5.4 t.

Dimensiones de la regla emparejadora:

Longitud:	2743 mm
Ancho:	305 mm
Grueso:	6 mm
Brazo de regla emparejadora:	1370 mm
Ancho de pavimentación:	2750 a 3660 mm
Profundidad de pavimentación:	0 a 203 mm

Longitud:	2700 mm
Ancho:	305 mm
Grosor:	8 mm
Radio de curvatura:	457 mm
Área de pavimentación:	2700 x 305 mm
Profundidad de pavimentación:	0 a 203 mm

## 6. Conclusiones

1. La facilidad de tránsito del Tren de Maquinaria en radios de curvatura mayores de 38.2 m (desde carreteras tipo C), permite trabajar con una amplia gama de carreteras en el país, sin interrumpir el tráfico vehicular en carriles adyacentes al de trabajo.
2. El Tren de Maquinaria propuesto está integrado por equipos que evitan la contaminación del aire.
3. Al comparar el costo total de los elementos del Tren de Maquinaria propuesto **US\$ 802,794.00 (N\$ 2,689,362.00)**(1), con los precios de otros equipos, se tienen las siguientes observaciones:

a) Para implementar un Tren para reciclar en caliente en el lugar como la Pyropaver 300E, integrada por planchas de calentamiento con ancho de trabajo de 3.6 m, se requiere de la inversión de 2,150,000.00 Dólares Canadienses (N\$ 7,202,500.00).

b) Utilizar una planta estacionaria GENCOR para reciclar asfalto en caliente, con capacidad de 90 TPH cuesta US\$ 779,486.00 (N\$ 2,611,278.10) y una fresadora Caterpillar modelo PR-750B con ancho de trabajo de 3.058 m cuesta US\$ 589,446.00 (N\$ 1,974,644.10). El costo total de los equipos es de US\$ 1,368,932.00 (N\$ 4,585,922.20). Esta planta estacionaria está integrada por un tambor calentador-mezclador de flujo paralelo (Ultradrum) que tiene desventajas en cuanto a la calidad de la mezcla caliente, comparado con el tipo de tambor considerado en el Tren de Maquinaria propuesto.

c) Un Tren de Maquinaria en frío en el lugar GETZ RECYCLE modelo 540, con capacidad de 150 a 250 TPH cuesta US\$ 299,750.00 (N\$ 1,004,162.50) y una fresadora Caterpillar modelo PR-750B con ancho de trabajo de 3.058 m cuesta US\$ 589,446.00 (N\$ 1,974,644.10). El costo total es de US\$ 819,196.00 (N\$ 2,744,306.60).

(1) Precios de diciembre de 1993. Tipo de cambio: 3.35 N\$/US\$.

Se puede notar que los equipos para reciclar en frío son más baratos que para reciclar en caliente en el lugar, debido a que las máquinas para reciclar en frío son más simples.

Comparando el precio de la planta estacionaria para reciclar asfalto con el Tren de Maquinaria propuesto en cuanto al precio y la capacidad en ton/h, se puede observar que éste es más costoso en 5.5%, comparado con la primera. Sin embargo, en la planta estacionaria falta considerar los costos asociados con el transporte del material recuperado y la mezcla caliente (material recuperado, asfalto líquido y material nuevo). Además con el Tren de Maquinaria propuesto se puede tender la mezcla caliente inmediatamente sobre la carretera y por lo tanto es más fácilmente manejable por los equipos de nivelado y compactado. Como resultado se obtiene una pavimento asfáltico de buena calidad.

8. Al comparar el costo total de los equipos del Tren de Maquinaria propuesto (US\$ 602,784.00) con los equipos estacionarios se tienen las siguientes características:

El costo de implementar un Tren para reciclar en caliente en el lugar como la Pyroplan 300E integrada por planchas de calentamiento con ancho de trabajo de 6.6 m, su costo de inversión es de \$ 170,000.00. Dadas las características (7,502.660.00)

El costo de una planta estacionaria GEMCO para reciclar asfalto en caliente con capacidad de 80 TPH cuesta US\$ 739,488.00 (US\$ 5,817.78 /01 y una fresadora GOMPAK modelo PF 700E con ancho de trabajo de 3.08 m cuesta US\$ 884,440.00 (US\$ 1,374.64 /01). El costo total de los equipos es de US\$ 1,368,928.00 (US\$ 1,368,928.00). Esta planta estacionaria está integrada por un tambor calentador-reservorio de tipo caliente (Ultraform) que tiene desventajas en cuanto a la calidad de la mezcla caliente comparada con el tipo de tambor construido en el Tren de Maquinaria propuesto.

El Tren de Maquinaria en frío en el lugar GETE RECYCLE modelo 540 con capacidad de 130 a 250 TPH cuesta US\$ 588,700.00 (US\$ 1,004,182.50) y una fresadora Caterpillar modelo PF-750B con ancho de trabajo de 3.08 m cuesta US\$ 584,440.00 (US\$ 1,374,644.00). El costo total es de US\$ 1,173,140.00 (US\$ 2,744,306.50).

## **7. Referencias**

---

1. Ladislao Ulises y Rosa Lozada. 1993. Revista Mundo Ejecutivo, Junio, Número 170. pp 10.
2. Crabbi, Bruno. 1990. Method of renewing a road surface of bituminous mix, with cold application of the recycled covering material. Patente Americana No. 4,974,993.
3. Murray, Stewart. 1991. System for reclaiming and relaying pavement in place. Patente Americana No. 5,000,615.
4. Swisher, George W. 1990. Apparatus and method for producing cold mix asphalt. Patente Americana No. 4,928, 890.
5. Jakob, Herbert E. 1990. Asphalt pavement recycling apparatus. Patente Americana No. 4,946,307.
6. Asphalt Recycling and Reclaiming Association. 1986. Proven guidelines for hot-mix recycling.
7. Wirtgen. 1993. Material and process procedure principles for the hot recycling process. pp 91.
8. Willey, Patrick C. 1990. Two stage process for rejuvenating asphalt-paved road surfaces. Patente Americana No. 4,929,120.
9. Butch, Adam F. 1988. Asphalt surface renewal method and apparatus. Patente Americana No. 4,793,730.
10. Wirtgen, Reinhard. 1982. Method and apparatus for abrading and recoating road pavement. Patente Americana No. 4,317,642.
11. Cutler, Earl F. 1978. Asphalt pavement recycling apparatus. Patente Americana No.4,124,325.
12. SAE HANDBOOK. 1988. On-Highway Vehicles and Off-Highway Machinery. Vol 4, pp. 36.67-36.85.
13. Lewinski, Juliusz W. 1983. Mecánica de tractores. Centro de Investigación y Enseñanza en Ingeniería Agrícola y Alimentaria de la Universidad de Guanajuato. págs. 10-16.
14. Fabela Gallegos, Manuel de Jesús. 1992. Corte en frío de pavimentos con rotores fresadores. Reporte No. 1. Instituto Mexicano del Transporte.

15. Manual Martin de México. Catalog. 60. pp H116- H135.
16. Bustos, Eduardo. 1987. Estudio y proyecto de reciclado de pavimentos asfálticos, métodos constructivos y descripción de obras en ejecución. Conferencia dictada el 2 de diciembre de 1987 en 8vo. Simposio de la Comisión permanente del asfalto. Buenos Aires, Argentina.
17. DN. 1982. Diseño de máquinas industriales (Selección de rodillos para transportadores de banda).
18. GATES. 1983. Manual de banda transportadora y elevadora. Selección y aplicación.
19. DODGE. 1984. Dodge Engineering Catalog.
20. Brock, J. D.1993. Dryer Drum Mixer. Technical Paper T-119.ASTEC INDUSTRIES
21. BARBER-GREENE. 1976. Bituminous Construction Handbook. Aurora, Illinois U.S.A. pp 231.
22. Day, D. A. 1978. Maquinaria para construcción. Ed. Limusa, México.
23. Rockwell International Corporation. Automotive Operations. Troy, Michigan. U.S.A.
24. General Tire. 1986. Trail tires. U.S.A.

## Anexo A. Método de mínimos cuadrados para obtener la potencia de fresado.

$$Y = a_0 + a_1x + a_2x^2$$

$$\Sigma Y = a_0N + a_1\Sigma x + a_2\Sigma x^2 \quad (1)$$

$$\Sigma XY = a_0\Sigma x + a_1\Sigma x^2 + a_2\Sigma x^3 \quad (2)$$

$$\Sigma X^2Y = a_0\Sigma x^2 + a_1\Sigma x^3 + a_2\Sigma x^4 \quad (3)$$

Sustituyendo los valores de la Tabla 4.2 en las ecuaciones (1), (2) y (3):

$$1053.7 = a_012 + a_10.908894 + a_20.10742373 \quad (4)$$

$$128.4103 = a_00.908894 + a_10.10742373 + a_20.015899 \quad (5)$$

$$19.33858 = a_00.10742373 + a_10.015899 + a_20.002607 \quad (6)$$

Al resolver el sistema de ecuaciones:

$$a_0 = 1.996462486$$

$$a_1 = 952.5336$$

$$a_2 = 1526.5748$$

$$Y = 1.996462486 + 952.5336x + 1526.5748x^2.$$

Al sustituir los datos de:

Profundidad de trabajo:	0.07 m
Ancho de trabajo:	2.8 m
Area de corte (x):	0.196 m <sup>2</sup>

se llega al resultado siguiente:

$$Y = 247.3379 \text{ kW} = 331 \text{ H.P.}$$

Considerando que el 80% de la potencia nominal del motor se utiliza durante el fresado se tiene que:

$$P_f = (0.80)(247.3379) = 198 \text{ kW} = 265 \text{ H.P.}$$

## Anexo B. Cálculos de localización del centro de gravedad en un plano, cargas en los ejes y cálculos de tracción.

Se considera que el momento que produce el peso total del módulo de reciclado con respecto a un punto (lugar por donde se localizan las fuerzas  $F_4$  y  $F_5$ ), debe ser igual a la suma de momentos de los pesos de los componentes individuales con respecto al mismo punto, ver Figura B1 (las unidades de longitud son centímetros y las de fuerza newtons).

$$-W_T d = 16.6F_1 + 8.3F_2 + 5.1F_2 + 2.6F_3 - 5.1F_6 - 8.3F_7 - 11.6F_8 - 23.4(F_9 + F_{10} + F_{11}) - 26.1(F_{12} + F_{13}) - 29.1F_{14} - 34.8(F_{15} + F_{16}) - 44(F_{17} + F_{18}) - 47F_{19} - 49.2F_{20}$$

Donde:

$W_T$  = peso total del módulo de reciclado, N.

$d$  = distancia desde el eje central trasero a la línea de acción del centro de gravedad, cm.

$F_1$  a  $F_{20}$  = peso de cada uno de los componentes, N.

Sustituyendo los pesos correspondientes a cada elemento, se tiene que:

$$-W_T d = -8,063574.75 \text{ N-cm}$$

Despejando  $d$ , y considerando que  $W_T = 394852.5 \text{ N}$  (ver Tabla 4.3):

$$d = 8,063574.75 / 394852.5$$

$$d = 20.42 \text{ cm.}$$

Esta distancia indica la línea de acción del centro de gravedad medida desde el eje central trasero del módulo de reciclado, como se indica en la Figura 4.8. La distancia de 20.42 cm. corresponde a un dibujo a escala  $1 = 25$ , por lo que en la realidad corresponde a 5.105 m.

Para determinar el peso que soportan los ejes (ver Figura B.2) se hace:

$$\Sigma F_y = 0;$$

$$F_A + F_B = 394852.5$$

$$\Sigma M_A = 0$$

$$394852.5 (5.105) - F_B (11.7) = 0$$

$$F_B = 172283.9 \text{ N}$$

$$F_A = 222568.5 \text{ N}$$

Por otra parte,

$$H = Q\mu$$

Donde:

H = fuerza de tracción desarrollada, kgf,

Q = peso que soportan los ejes tractivos, kgf,

$\mu$  = coeficiente de adherencia = 0.7 [13],

porque el módulo de reciclado tiene tracción trasera,

$$H = (222568.5)(0.7)$$

$$H = 155.8 \text{ kN}$$

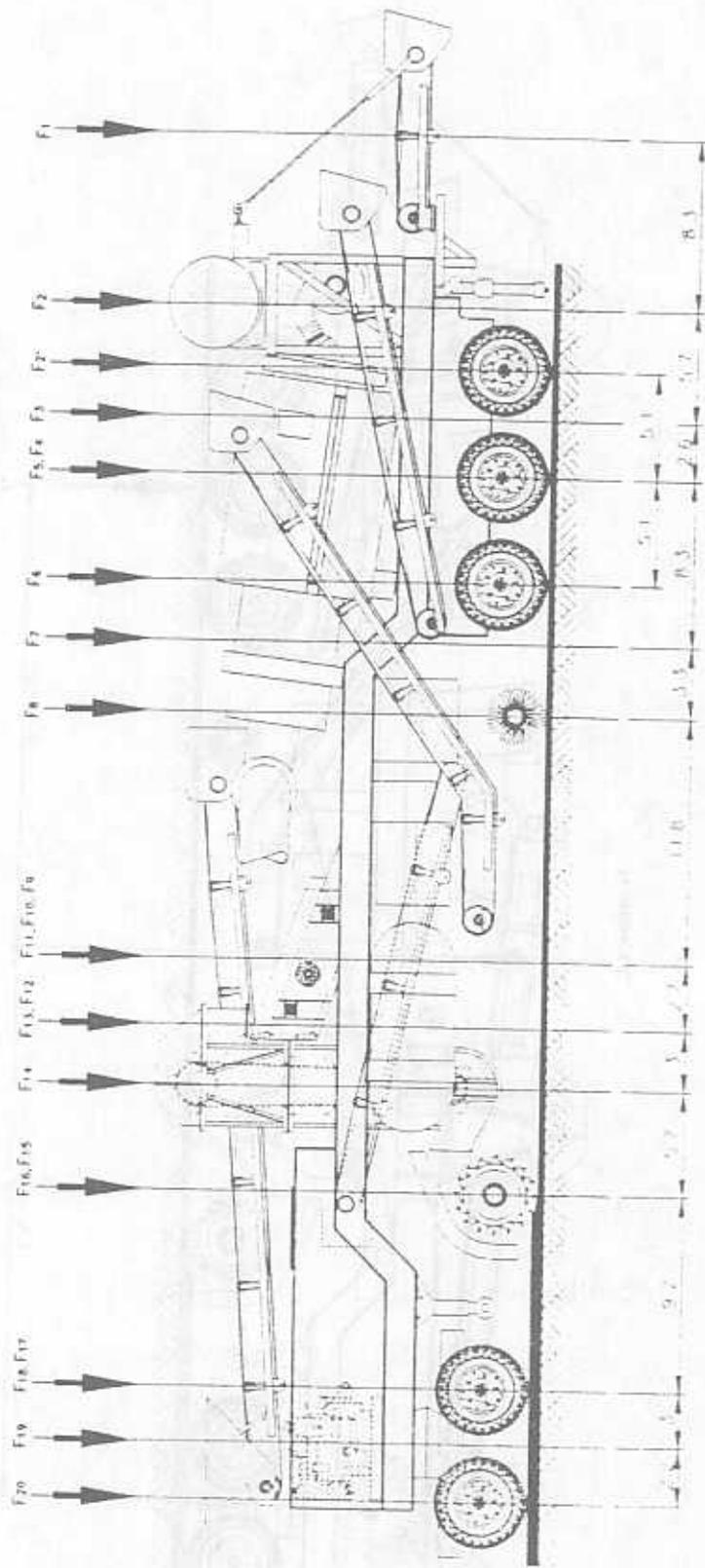


Figura B.1. Localización del centro de gravedad en un plano del Tren de Maquinaria.

güñta B.1. rrección del cunto de curren en m-brun por 1100 de pndmduy.

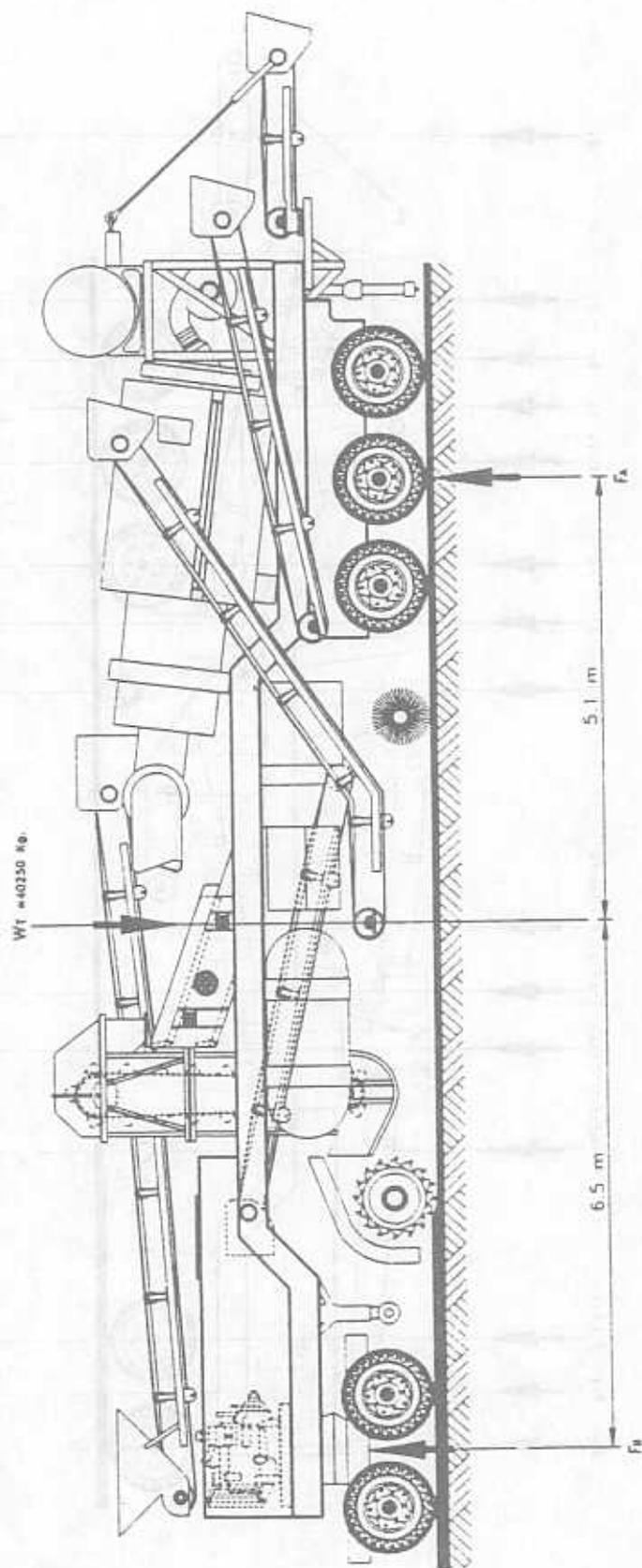


Figura B.2. Determinación de las reacciones en el Tren de Maquinaria.

## Anexo C. Método de cálculo del área de cribado.

La siguiente ecuación determina el área de cribado:

$$\text{Area de cribado} = \frac{u}{AxBxCxDxExFxGxHxJ}$$

donde:

- u = cantidad de material alimentado a la criba que es menor que una abertura especificada, en ton cortas/h
- A = ton cortas/h de material que pasa a través de un pie cuadrado de área de cribado.
- B = porcentaje de material de sobre tamaño alimentado a la malla.
- C = porcentaje de material medio alimentado a la malla.
- D = factor de localización de la malla.
- E = factor de humedad en el cribado.
- F = factor de peso del material.
- G = factor de abertura de áreas.
- H = factor de forma de abertura de la malla.
- J = factor de eficiencia.

La Tabla C.1. muestra una distribución granulométrica del pavimento asfáltico después de ser fresado.

Tabla C.1. Distribución granulométrica del pavimento asfáltico fresado [16].

No. malla	1	3/4	1/2	3/8	4	8	40	100	200
% pasa	100	99	88	77	60	51	33	10	8
TPH que pasa	50	49.5	44	38.5	30	25.5	16.5	5	4

Al relacionarse estos valores con su correspondiente coeficiente en tablas típicas de selección de cribas, se producen los siguientes valores:

- u = 55.1 ton. cortas/h
- A = 3.56, para una malla de 1", con una abertura de 64%.
- B = 1.21, para 5% de sobre tamaño o menos.
- C = 2.47, para un 54% de material de tamaño medio en la malla 1/2.
- D = 1.0, para una primera malla.
- E = 1.0, para una abertura de 1/32.
- F = 1.0, para  $\rho = 100 \text{ lbs/pie}^3$ .
- G = 1.0, el área de cribado es igual al área del factor A.
- H = 1.0, para abertura cuadrada.
- J = 1.15, para una eficiencia de 90%.

Area = 4.5 pies<sup>2</sup>

Vel. malla	1	1/2	3/8	1/4	3/16	1/8	3/32	1/16	3/64	1/32
Tasa que	80	49.5	34	24	18.5	14	11	8.5	7	5.5
Tasa	100	99	88	77	66	55	44	33	22	11

Al relacionar estas veloz con su correspondiente contenido en las tablas que se adjuntan se obtiene los siguientes valores:

**Anexo D. Características principales del motor de combustión interna seleccionado para el Tren de Maquinaria.**

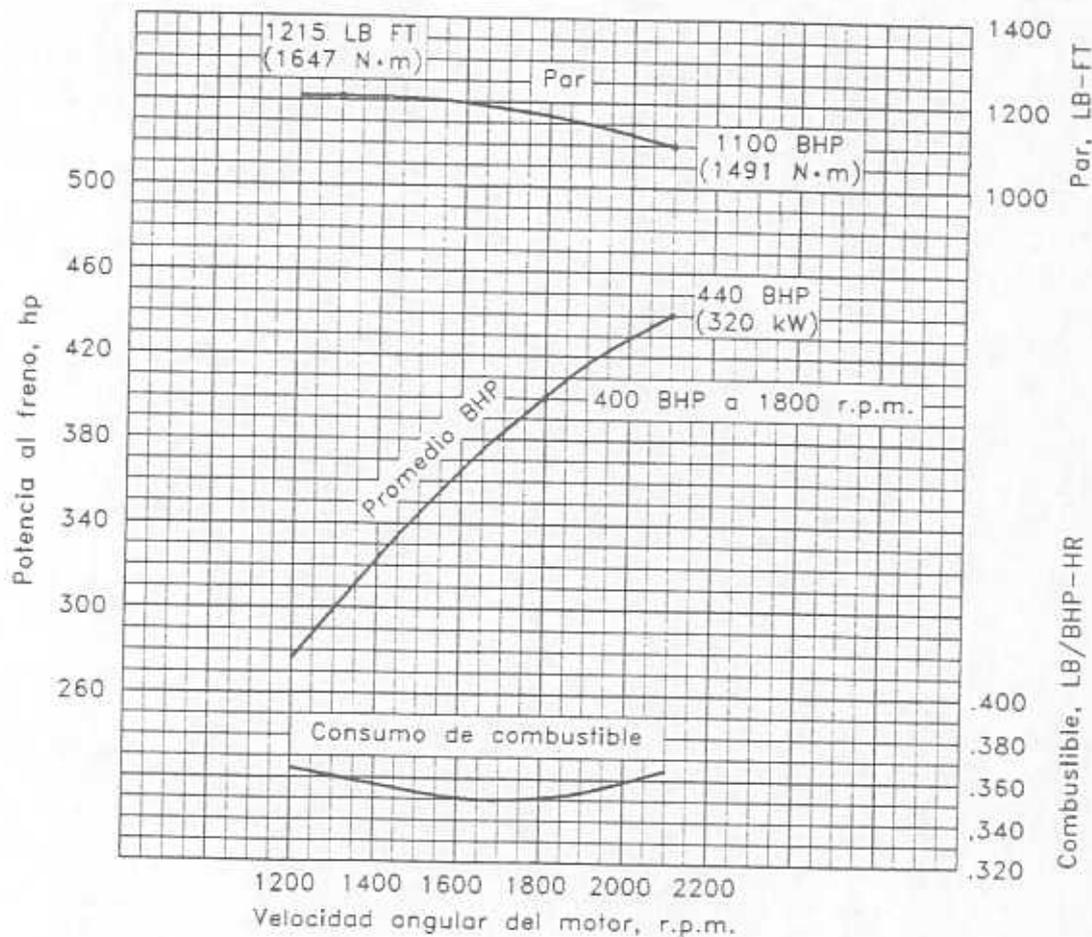


Figura D.1. Curvas características del motor Detroit Diesel 8V-92 turbo cargado Modelo 8083-7300.

**CIUDAD DE MEXICO**

Av. Popocatepetl 506 B  
Col. Xoco  
03330 México, D.F.  
Tels. 688 76 29  
688 76 03  
Fax. 688 76 08

**SAN FANDILA**

Km 4 de la Carretera  
Los Cues-Galindo  
76700 San Fandila, Qro.  
Tels. (42) 16 97 77  
16 96 46  
16 95 97  
Fax (42) 16 96 71