

PROCESO DE REMOCION DE CARPETAS ASFALTICAS

Instituto Mexicano del Transporte
Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Publicación Técnica No. 121 Sanfandila, Qro. 1999

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

Proceso de Remoción de Carpetas Asfálticas

Publicación Técnica No. 121 Querétaro, Qro. 1999

Presentación

Este trabajo ha sido realizado por el M. I. Manuel de Jesús Fabela Gallegos, investigador de la Coordinación de Equipamiento para el Transporte del Instituto Mexicano del Transporte. En el desarrollo del contenido colaboró también el Dr. Jacek Jaworski, de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Guanajuato y el Dr. Alejandro Lozano Guzmán. Se agradece el apoyo del Dr. Miguel Martínez Madrid y el Fís. Francisco Carrión Viramontes para el desarrollo de este trabajo.

Resumen

En este trabajo se presentan los fundamentos mecánicos para el análisis del proceso de remoción de pavimentos asfálticos. En especial, se estudian las cargas a las que está sujeta la herramienta de trabajo durante el proceso de corte. El análisis considera el corte con la herramienta en trayectoria trocoidal (fresado). Como casos particulares se analizan en detalle el corte con la herramienta en trayectoria lineal (escarificación) y el corte con la herramienta en trayectoria circular. Se proponen configuraciones sencillas para llevar a cabo el estudio experimental del proceso de remoción de material y la metodología para determinar la influencia que tienen distintos parámetros del proceso sobre la fuerza, el par y la potencia de corte. Se presentan resultados experimentales de pruebas características obtenidos de la aplicación de tales configuraciones. El material presentado en este trabajo permite la aplicación de estos fundamentos para el estudio de otros materiales de naturaleza similar a la del pavimento.

Abstract

In this work, an overall analysis for the asphalt pavement removing process is presented. A general case of cutting process with the cutting tool following a trocoidal path (milling) is analyzed. Two particular cases are reviewed, one with a cutting tool in a linear path (scarifying) and other with a cutting tool in a circular path. Simple device configurations to study these pavement removing processes and ways of identifying the influence of several cutting processes parameters over the cutting force, torque and power, are proposed. Experimental results obtained from application of these configurations in featuring tests are also presented. Guidelines outlined in this work, can be applied to study other pavement like materials.

Resumen Ejecutivo

En este trabajo se presentan los fundamentos mecánicos para el análisis del proceso de remoción de pavimentos asfálticos. La remoción de la capa superior del pavimento se realiza principalmente por dos métodos: escarificación, definido cinemáticamente por una trayectoria rectilínea, y fresado, definido como una combinación de dos movimientos que generan una trayectoria cicloidal o trocoidal.

En especial, se estudian las cargas a las que está sujeta la herramienta de trabajo durante el proceso de corte y se considera, como caso general, el análisis del proceso de corte con la herramienta en trayectoria trocoidal, identificando los parámetros que influyen directamente en el desempeño de la operación, destacando aspectos de índole geométrico, cinemático y dinámico. Como casos particulares se analizan en detalle el corte con la herramienta en trayectoria lineal y el corte con la herramienta en trayectoria circular, derivados del caso general.

Con objeto de promover y facilitar la investigación experimental del proceso de remoción de la carpeta de rodamiento, se proponen configuraciones sencillas para llevar a cabo tal investigación y la metodología para determinar principalmente la influencia que tienen distintos parámetros del proceso sobre la fuerza, el par y la potencia, requeridos durante la remoción del concreto asfáltico. Los dispositivos experimentales propuestos, consisten de dos bancos de laboratorio, uno que simula el corte lineal y otro el corte circular, además de un elemento transductor que forma parte del sistema de transmisión que se acopla en una máquina fresadora de pavimentos, donde se aplica el corte trocoidal. Se presentan también resultados experimentales obtenidos de la aplicación de estos dispositivos en pruebas características.

Aunque el estudio está enfocado principalmente al proceso de remoción de pavimentos de composición asfáltica, el material presentado en este trabajo permite la aplicación de estos fundamentos para el estudio de otros materiales de naturaleza similar a la del pavimento.

Indice

	Página
Resumen	٧
Abstract	VII
Resumen Ejecutivo	IX
Introducción	1
1. Antecedentes sobre la Remoción de Carpetas Asfálticas	5
2. Aspectos Cinemáticos del Corte Rotatorio	11
2.1. Caso general	11
2.2. Corte lineal como caso particular del corte rotatorio	13
2.3. Corte circular como caso particular del corte rotatorio	14
2.4. Particularidades del caso general	15
3. Dinámica del Corte Rotatorio	19
3.1. Mecanismo fresador simple	19
3.2. Mecanismo de péndulo	20
3.3. Mecanismo escarificador	22
3.4. Mecanismo de tambor fresador	23

	Página
4. Dispositivos para el Estudio Experimental	
del Proceso de Remoción	27
4.1. Corte lineal	27
4.2. Corte circular	30
4.3. Corte trocoidal	33
5. Resultados Experimentales de Pruebas Características	37
5.1. Comentarios previos	37
5.2. Corte lineal	37
5.3. Corte circular	41
5.4. Corte trocoidal	45
Comentarios Generales	49
Referencias	51

Introducción

Dentro de las operaciones de mantenimiento y reparación de carreteras, el corte del pavimento es una de las más difíciles y laboriosas con un mayor consumo de energía. El corte de carpetas normalmente se realiza a través de dos métodos, caracterizados por el tipo de herramienta de corte y el movimiento que ésta describe, siendo comúnmente conocidos como corte por escarificación y corte por fresado.

En el corte por escarificación, el proceso se realiza con un movimiento de avance rectilíneo de la herramienta paralelo a la superficie del material a cortar, generando un área de corte con una profundidad proporcionalmente mayor que el ancho. En el corte por fresado, la herramienta de corte describe una trayectoria producida por un movimiento de giro alrededor de un eje que se mueve transversalmente en línea recta. Una condición práctica para este último método es que tanto la velocidad de giro de la herramienta como la velocidad de avance del eje son constantes, siendo, además, la velocidad tangencial en la punta de la herramienta en esta combinación de movimientos, significativamente mayor que la velocidad de desplazamiento del eje, lo que resulta en una superficie con una profundidad global uniforme, que se genera por los pasos de corte consecutivos de profundidad variable, debido a la trayectoria trocoidal del elemento cortante.

La escarificación es el proceso de corte cinemática y geométricamente más simple. Sin embargo, la superficie generada por este proceso posee una calidad inferior a la producida por el fresado, por lo que se hacen necesarias actividades adicionales para uniformizar y proporcionar una superficie adecuada, necesaria para los pasos subsecuentes en la preparación de la nueva superficie de rodamiento. Es por ello que el fresado de pavimentos, como técnica de remoción de la carpeta asfáltica, ha ido en aumento paulatino, sustituyendo este tipo de actividades en los programas de mantenimiento y reconstrucción de carreteras.

A diferencia de la remoción de la capa superficial por escarificación, el fresado hace uso de máquinas especializadas denominadas fresadoras o perfiladoras de pavimentos, las cuales proporcionan un mejor control en la generación de la superficie, como planicidad, pendiente, rugosidad, control de espesores y niveles, gracias al mecanismo de corte, conformado por un conjunto de "dientes" (herramientas de corte) fijados comúnmente en hélices sobre la superficie de un cilindro, al que se le suministran los movimientos simultáneos de avance y de rotación.

El proceso de remoción del pavimento por fresado es una operación compleja, en el que interviene un vasto conjunto de parámetros de índole geométrico, cinemático y dinámico. Dentro de los parámetros geométricos, se encuentran aquellos relacionados con la posición y forma de los elementos actuantes, tales como el diámetro del cilindro fresador, la profundidad y el ancho de corte, la posición y la forma del elemento cortante, el ángulo de ataque, etc.; los cinemáticos incluyen la velocidad de avance y la velocidad de rotación del cilindro fresador, mientras que los dinámicos contemplan la resistencia al corte y las características mecánicas del medio cortado.

Las carpetas de rodamiento de las carreteras son fabricadas en su mayoría de concreto asfáltico. El concreto asfáltico se compone de una serie de partículas sólidas y un aglutinante, asfalto en este caso, que le brindan características especiales que lo hacen adecuado para este fin. Las partículas sólidas, generalmente pétreas, son de diversos tamaños, cuya proporción se especifica en los reglamentos y normas de construcción de carreteras y que, desde un punto de vista macroscópico, esta composición ofrece un medio homogéneo, si se considera que el tamaño de los agregados pétreos es inferior al tamaño del elemento que interactúa con el pavimento. En este sentido, el estudio del proceso de corte de pavimentos presenta serios inconvenientes, considerando que el material de la carpeta de rodamiento es un material heterogéneo, tanto por la diversidad en el tamaño de las distintas partículas, comparadas con las dimensiones de la herramienta cortante, así como del comportamiento mecánico del asfalto.

En los estudios para el diseño de carpetas de rodamiento, es importante conocer los mecanismos de deformación del concreto asfáltico, su estabilidad y su rigidez estructural, simulándose el comportamiento por medio de modelos reológicos que consideran los estados de carga transitorios y la velocidad de deformación, la influencia de la viscosidad y las condiciones ambientales sobre la resistencia mecánica y su capacidad para transmitir esfuerzos a las capas inferiores. Sin embargo, puesto que en las actividades de remoción de la carpeta asfáltica, ésta se lleva hasta la fractura en un tiempo significativamente pequeño, éste no es suficiente para que el material removido por la herramienta cortante presente un comportamiento propiamente viscoelástico, a velocidades prácticas de operación de maquinaria que pueden ser de unos cuantos metros por minuto (ejemplo la escarificación), a más de 250 m/min (ejemplo el fresado).

Por ello, en este trabajo se han identificado algunos parámetros de los tres grupos mencionados anteriormente, cuya participación en los requerimientos de fuerza y potencia de corte en el proceso, es considerada de mayor relevancia, presentando algunos dispositivos que pueden ser útiles en su determinación experimental, desde un punto de vista de los requerimientos del mecanismo de

corte, entre los cuales está la profundidad de corte, el tipo y forma del elemento cortante, el ángulo de ataque (geométricos); las velocidades de avance y de rotación (cinemáticos), los cuales pueden aplicarse a distintos tipos de concreto asfáltico, caracterizados por la resistencia del concreto u otras propiedades como el contenido de asfalto en la mezcla, así como la influencia de la temperatura, como parámetro ambiental, sobre la resistencia que ofrece el material a ser cortado.

La determinación experimental de estos parámetros se demuestra con la aplicación de cada dispositivo propuesto en pruebas características de corte, cuyos datos resultantes ilustran la influencia que tienen los parámetros considerados en los requerimientos del proceso, permitiendo proyectar la aplicación y los fundamentos considerados en este estudio, sobre otros materiales de naturaleza similar a la del pavimento.

1. Antecedentes sobre la Remoción de Carpetas Asfálticas

La remoción de la carpeta asfáltica se realiza con objeto de corregir una serie de defectos superficiales, además de promover un refuerzo estructural a la capa de rodamiento. En el pasado, las opciones de reparación de una carretera estaban limitadas a realizar (ARRA, 1986): a) una completa reconstrucción, un método sumamente caro; b) a la aplicación de sobre-carpetas, consistiendo básicamente en aplicar una nueva capa de concreto asfáltico sobre la antigua superficie dañada para cubrir el defecto, incrementando la altura de la superficie de rodamiento con respecto al trazo original y generando frecuentemente serios problemas geométricos, habiendo comúnmente un reflejo de la falla sobre la nueva superficie, y c) reparaciones por "bacheo", probablemente el método más común, pero el menos satisfactorio, debido a que no garantiza una liga adecuada entre el material depositado y el material original.

La remoción de la carpeta o de la parte comprometida con la falla, proporciona un mejor control sobre los niveles de la superficie de rodamiento; además de promover otras ventajas aplicables a la rehabilitación de puentes y pasos a desnivel, controlando la carga muerta y manteniendo en niveles originales señalamientos y barreras de seguridad.

Este tipo de consideraciones, conjuntamente con algunos aspectos del reciclado (ARRA, 1992), propiciaron un nuevo enfoque sobre el manejo de los materiales de los pavimentos, así como de maneras más adecuadas de remoción de pavimentos dañados, que repercuten en las expectativas del diseño y del empleo de maquinaria especializada en las actividades de construcción, mantenimiento y rehabilitación de carreteras (Wood et al, 1988; International Construction, 1990), entre las que sobresalen la aplicación de nuevos materiales y aditivos a los tradicionalmente empleados, mejoras en las técnicas de remoción, diseño de máquinas especializadas en estas actividades y de máquinas que, en un solo paso, ejecutan varias tareas en el menor tiempo posible, como es el caso de los trenes de maquinaria (International Construction, 1987; Lewinski et al, 1994).

La remoción de la carpeta por el método de escarificación, se apoya en el empleo de maquinaria como la usada para movimientos de tierra, incluyendo tractores con escarificadores (bulldozers), excavadoras y niveladoras con equipo escarificador, las cuales rasgan y fracturan la superficie de manera irregular, por

lo que se hacen necesarias actividades adicionales para proporcionar uniformidad geométrica a la superficie.

El fresado, como técnica de corrección de daños superficiales de la carpeta de rodamiento, se ha aplicado poco en México, pero está adquiriendo cada vez más popularidad entre las empresas constructoras, habiendo una tendencia a incrementar su uso, sobre todo en proyectos de carreteras con más de dos carriles o en aquellas por las que transitan amplios volúmenes de tráfico, especialmente las concesionadas (autopistas con cuota de peaje), contribuyendo a la satisfacción de la necesidad de mantener en buen estado la superficie de rodamiento. Entre las ventajas que presenta, están las de realizar un corte homogéneo y uniformemente rugoso, con un control preciso sobre el nivel final de la superficie, en oposición al obtenido con la escarificación, lo cual evita labores extras para mejorar el acabado de la superficie generada, redundando en la economía de las actividades.

Sabiendo que el asfalto es un material viscoso, cuyas propiedades mecánicas tienen una marcada influencia de la temperatura (McLeod, 1987), la remoción del concreto asfáltico de las carreteras se facilita, en términos mecánicos, calentando previamente la superficie. Sin embargo, aunque la energía requerida para la disgregación de los componentes del material de la carpeta disminuye sustancialmente, la requerida para aumentar su temperatura como condición previa al corte, se incrementa significativamente, además de involucrar otros aspectos relacionados con la salud ambiental y la seguridad de los operadores de la maquinaria, de la necesidad de empleo de módulos de calentamiento y del manejo y la disponibilidad de la energía para llevar a cabo este propósito, por lo que la aplicación de calor para facilitar el fresado del pavimento, ha caído en desuso. En oposición a este corte en caliente de la carpeta, el corte en frío, sin aplicación artificial de calor, requiere de módulos de corte más simples y compactos, lo que permite atacar directamente el área del daño superficial, sin perturbar las zonas o estructuras adyacentes a la zona deteriorada.

Como operación de corte, el fresado consume una importante cantidad de energía, comparado con las máquinas empleadas en las actividades de mantenimiento y rehabilitación de carreteras, pero menos que cualquier otro método de reconstrucción de carreteras (ARRA, 1986). Las máquinas especializadas en esta actividad son poseedoras de gran potencia; la información técnica y comercial de estas máquinas las describe como capaces de realizar el corte a una velocidad, profundidad y ancho que difícilmente se alcanzan en la práctica (Fabela, 1992). Por ejemplo, la información técnica de una fresadora de aproximadamente 335 kW, indica que esta máquina es capaz de remover una sección de 1.9 m de ancho, con un espesor de hasta 25 cm, a una velocidad de 12 m/min, observándose en campo el desempeño a 10 cm de

profundidad con una velocidad menor de avance, en algunos casos de tan sólo 1 m/min. Sin embargo, el corte de pavimentos no es un proceso bien conocido, sobre todo por los amplios y diversos parámetros inmersos en el proceso, cinemática y dinámicamente.

Por otro lado, no hay suficiente información técnica disponible que describa el proceso de corte de pavimentos. El enfoque frecuente de los estudios sobre pavimentos se dirige a los análisis de deformación y de transmisión de esfuerzos hacia las distintas capas que lo componen, con objeto de obtener un mejor diseño (Perl et al, 1983; Khedr, 1986; Drescher et al, 1993). Otros tantos son relacionados con el uso, el funcionamiento, el manejo y la descripción general de las tecnologías de mantenimiento de carreteras con el uso de estas máquinas (Construction Equipment, 1989; Better Roads, 1991; International Construction, 1997).

La literatura disponible acerca del proceso de corte es escasa, generalmente producto de investigaciones experimentales, debido a la complejidad del proceso en sí para obtener un modelo completo, que describa tanto las características operativas de los mecanismos de corte, como el efecto de las propiedades mecánicas de los materiales. Dentro de las investigaciones sobre este tema destacan las siguientes:

Estudios sobre la productividad de las máquinas fresadoras durante el proceso de remoción de la carpeta asfáltica, indican que ésta depende de la velocidad de avance, la cual está limitada por la gradación del agregado, la fuerza de adhesión del asfalto entre los agregados, además de la profundidad de corte (Construction Equipment, 1987). Se menciona que en el proceso de fresado del pavimento, el diente (herramienta cortante) esencialmente rompe la unión producida por el asfalto entre los agregados pétreos, sin que necesariamente se fracture el agregado. Por esta razón, se establece que un pavimento con alto contenido de agregados finos, es generalmente más difícil de fresar que aquél con un mayor contenido de agregados gruesos, lo que limita la velocidad de avance e influye directamente sobre el desgaste de las herramientas de corte. Así, una mayor profundidad de corte demanda una mayor potencia, decrementa la velocidad de avance y produce un mayor desgaste de la herramienta.

Con base en una investigación experimental de la dependencia entre la resistencia elemental al corte del concreto asfáltico (fuerza por unidad de profundidad) y la temperatura de éste (Nisnevik et al, 1971), se determinó que el mejor rango de temperatura para el proceso de corte es de 50 a 60°C. Esta investigación concluye que elevar la temperatura superior a los 60°C ya no es razonable, porque el gasto de energía requerida para calentar la carpeta de rodamiento no corresponde con una disminución significativa de la resistencia al

corte; así mismo, indica que se presentan cambios significativos en el valor de la cohesión de la masa asfáltica para el rango de 10 a 50°C, disminuyendo conforme la temperatura de la masa aumenta.

Un estudio sobre las condiciones de modelación del proceso de trabajo de las máquinas fresadoras de concreto asfáltico (Bibikow, 1971), indican que el proceso de corte está determinado por parámetros geométricos, cinemáticos y de fuerzas (dinámicos). Dentro de los geométricos, considera las dimensiones del rotor, su diámetro y su ancho; la profundidad de corte, la superficie de desgaste de la pared trasera, la variación del radio de achatamiento y el ángulo de ataque del elemento cortante; los cinemáticos incluyen la velocidad tangencial del elemento de corte, determinada por la velocidad de rotación del rotor fresador, además de la velocidad de avance. Entre los parámetros dinámicos, se tiene la resistencia al corte y las características mecánicas del medio cortado, principalmente el rango de resistencia y el módulo de elasticidad. En el estudio se concluye que el desgaste y el radio de corte del elemento cortante varían durante el proceso (en función del tiempo), siendo condiciones suplementarias de la semejanza geométrica que deben considerarse durante el modelado del proceso de corte, además de tomar en cuenta el efecto de escala, caracterizado por el rango de resistencia en función de la superficie de desgaste, en el modelado de los procesos de trabajo de las máquinas para construcción y carreteras. Se sugiere que es adecuado que las características de los parámetros no constantes, como el desgaste y el radio de achatamiento, ambos en función del tiempo, y el rango de resistencia, como función del desgaste del elemento, se obtengan por la vía experimental.

A semejanza con algunos aspectos de corte de otros materiales, el corte rotatorio de suelos empleando cultivadores agrícolas, es una operación que está determinada por los siguientes parámetros: a) dirección de rotación, b) profundidad de corte y c) razón de velocidades en la periferia del rotor y la velocidad de avance del equipo. Estos parámetros tienen marcada influencia sobre la operación de corte del suelo, los cuales determinan la potencia y la calidad de la operación, como la estructura y la condición final del suelo (Hendrick y Gil, 1971a, 1971b, 1971c, 1974 y 1978). La diferencia básica entre estos procesos, es la geometría de las herramientas de corte y las características físicas y mecánicas de los materiales cortados, en este caso, suelo y concreto asfáltico.

En un estudio sobre cómo aumentar la efectividad e infalibilidad de las máquinas de disco fresador, durante el corte en frío de ranuras lineales en las carpetas asfálticas (Kuliepow, 1984), se determinó experimentalmente que las variaciones de la resistencia al corte con un disco ranurador, dependen de la heterogeneidad del medio trabajado. Con base en esta consideración, se

propuso un modelo físico, en el que la masa asfáltica puede ser tomada como compuesta por dos fases, una referente a las partículas duras y otra describiendo el medio aglutinante.

En otra investigación experimental llevada a cabo en laboratorio, que hace referencia al estudio del proceso de corte calentando la carpeta asfáltica, se simuló el corte de un escarificador y de una fresa con un solo elemento cortante (Balowniew y Baratatchwili, 1989). Este estudio resalta que el proceso de fresado de carpetas asfálticas, difiere cuantitativa y cualitativamente del proceso de corte de la carpeta asfáltica caliente con elementos cortantes tipo escarificador, determinando que la resistencia elemental al corte aumenta cuando se incrementa la velocidad tangencial del extremo del elemento cortante, no habiendo cambios significativos para velocidades tangenciales mayores a 80 m/min (1.33 m/s).

Estas investigaciones identifican, de forma particular, los parámetros que afectan el proceso de corte por fresado. Sin embargo, son estudios con distintas y variadas restricciones y condiciones, que no permiten plantear una comparación directa entre una y otra investigación, presentando datos aislados con los cuales no es posible obtener conclusiones concretas sobre los valores de estos parámetros.

El enfoque desarrollado en este documento, es el de relacionar, en función de los parámetros ya mencionados, el corte por escarificación con el corte por fresado, a través de la descomposición y combinación de los movimientos elementales que los definen, estableciendo un marco de comparación general en términos de la fuerza, la potencia y la energía empleada en el proceso de corte. Así, partiendo de que el fresado se genera a partir de un movimiento de rotación y un movimiento de avance lineal de la herramienta cortante, se presentan configuraciones sencillas que proporcionan estos movimientos de manera independiente, tratando de entender separadamente la influencia de cada una de las variables que describen el proceso general.

2. Aspectos Cinemáticos del Corte Rotatorio

2.1. Caso General

El proceso de corte rotatorio, requiere de un movimiento de rotación de la herramienta de corte alrededor de un eje, adicional al desplazamiento transversal de este eje (Figura 1). La combinación de ambos movimientos, produce que la herramienta realice un corte de profundidad variable, dentro de una trayectoria trocoidal, que se acerca mucho a una trayectoria circular si la velocidad lineal de desplazamiento del eje, v_a , es muy pequeña, comparada con la velocidad tangencial de la herramienta, v_c , producida por su rotación (Figura 2).

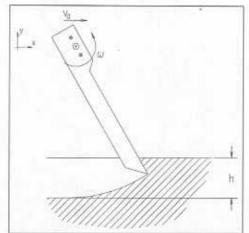


Figura 1. Proceso de corte rotatorio.

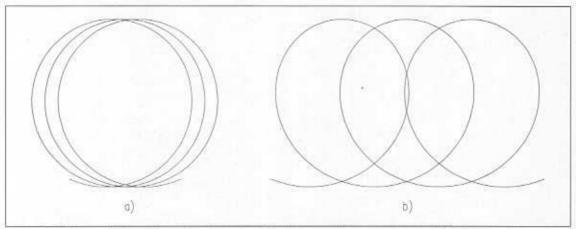


Figura 2. Efecto de la relación de velocidades en la trayectoria del elemento cortante: a) $v_a/v_c = 0.025$, b) $v_a/v_c = 0.125$.

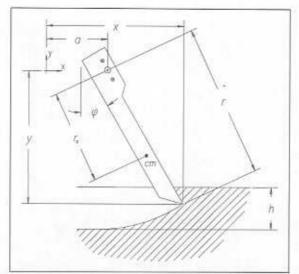


Figura 3. Variables cinemáticas del proceso..

Para el sentido de giro indicado en la Figura 3, las expresiones de las componentes que describen la trayectoria del extremo de la herramienta de corte, en un plano xy, son:

$$x = a + r \operatorname{sen} \varphi \tag{1}$$

$$y = -r\cos\phi \tag{2}$$

siendo las componentes de la velocidad, por tanto,

$$\dot{x} = \dot{a} + r\dot{\phi}\cos\phi \tag{3}$$

$$\dot{y} = r\dot{\varphi} \operatorname{sen} \varphi \tag{4}$$

y las de la aceleración:

$$\ddot{x} = \ddot{a} + r\ddot{\varphi}\cos\varphi - r\dot{\varphi}^2 \sin\varphi \tag{5}$$

$$\ddot{y} = r\ddot{\varphi} \operatorname{sen} \varphi + r\dot{\varphi}^{2} \cos \varphi \tag{6}$$

Las componentes del desplazamiento, de la velocidad y de la aceleración para el centro de masa (cm) de la herramienta, son semejantes a las anteriores, obteniéndose al sustituir r por r_c .

En las operaciones de corte de materiales por fresado, es común que tanto la velocidad de avance como la de rotación, se mantengan constantes, con lo que se genera una superficie rugosa uniforme, a una profundidad global de corte relativamente constante. Sin embargo, la profundidad a la que la herramienta produce el corte siguiendo su trayectoria, es variable, definida a partir de la combinación de los movimientos de traslación y rotación. La profundidad global del proceso se establece inicialmente, desplazando el mecanismo de fresado hacia abajo una distancia h y, de acuerdo a la calidad requerida de la operación, se definen las velocidades de avance y de rotación.

2.2. Corte lineal como caso particular del corte rotatorio

Las expresiones (1) a (6) definen la posición, velocidad y aceleración de una herramienta de corte genérica, sujeta a los movimientos independientes de avance rectilineo y de giro, describiendo, como caso general, esta combinación de movimientos. Así, suprimiendo el movimiento de rotación, es decir, sin aplicar un desplazamiento angular a la herramienta (Figura 4), las expresiones se reducen a su forma más simple:

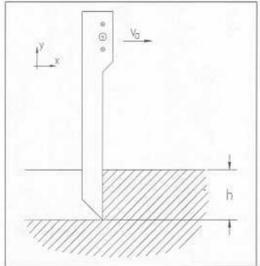


Figura 4. Proceso de corte por escarificación.

$$x = a$$
 (1a)

$$\dot{x} = \dot{a} \tag{3a}$$

$$\ddot{x} = \ddot{a}$$
 (5a)

con y, \dot{y} e $\ddot{y}=0$, tomando como referencia, en la dirección vertical, aquella cuando la herramienta está posicionada en la profundidad de trabajo h, además de que la aceleración $\ddot{a}=0$, si la velocidad de desplazamiento $\dot{a}=v_a$ es constante.

2.3. Corte circular como caso particular del corte rotatorio

Similarmente, en el caso en que no exista un movimiento de avance $(a,\dot{a},\ddot{a}=0)$, retomando nuevamente las expresiones (1) a (6), la herramienta describe una trayectoria circular, en la que sus componentes cinemáticas son:

$$x = r \operatorname{sen} \varphi$$
 (1b)

$$y = -r\cos\varphi \tag{2b}$$

$$\dot{x} = r\dot{\varphi}\cos\varphi \tag{3b}$$

$$\dot{y} = r\dot{\varphi} \operatorname{sen}\varphi \tag{4b}$$

$$\ddot{x} = r\ddot{\varphi}\cos\varphi - r\dot{\varphi}^2 \sin\varphi \tag{5b}$$

$$\ddot{y} = r\ddot{\varphi} \operatorname{sen}\varphi + r\dot{\varphi}^2 \operatorname{cos}\varphi \tag{6b}$$

En el caso de que la velocidad angular ϕ sea constante y diferente de cero, los términos en los que aparece la aceleración ϕ se anulan, simplificando las expresiones (5b) y (6b). La velocidad resultante v, se obtiene combinando sus componentes en ambas direcciones, x e y, de acuerdo a las expresiones (3b) y (4b), siendo entonces,

$$v = r\dot{\phi}$$
 (7)

La magnitud de esta velocidad puede también obtenerse a partir de consideraciones energéticas, como se presenta en el capítulo siguiente, sobre todo en el caso de que la velocidad angular no sea constante.

2.4. Particularidades del caso general

Retomando el caso general, si se suponen constantes las velocidades de avance y de rotación, se establece lo siguiente: Para una vuelta de la herramienta de giro alrededor del eje de rotación, se consume un intervalo de tiempo t_a , es decir, se realiza un desplazamiento angular de 2π rad y, puesto que la velocidad angular, denotada por ω , es constante, entonces:

$$\omega = \frac{2\pi}{t_a} \tag{8}$$

Además, para el mismo intervalo de tiempo t_a , el eje se desplaza una longitud d, entonces, siendo la velocidad de avance v_a y bajo la misma premisa se establece,

$$v_a = \frac{d}{t_a} \tag{9}$$

Si las dos expresiones anteriores se igualan para t_a , sabiendo, además, que la velocidad en la punta de la herramienta es prácticamente $v_c = r\omega$, resulta entonces:

$$d = 2\pi r \left(\frac{v_a}{v_c}\right) \tag{10}$$

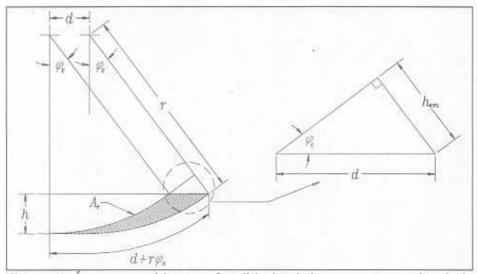


Figura 5. Área removida y profundidad máxima en una vuelta de la herramienta de corte.

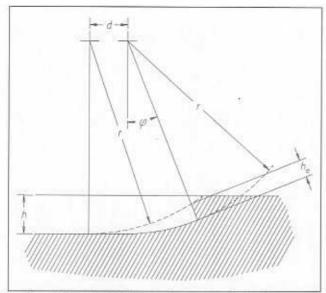


Figura 6. Profundidad individual de corte de la herramienta en su trayectoria.

Si la herramienta de corte parte de una posición dada por un valor angular de φ_c y recorre una vuelta completa, el área removida A_r del material, en el plano del movimiento, es el que se ilustra en la Figura 5. La profundidad máxima que la herramienta penetra con esta trayectoria es:

$$h_{cm} = d \operatorname{sen} \varphi_c \tag{11}$$

y sustituyendo expresiones anteriores,

$$h_{cm} = 2\pi r \left(\frac{v_u}{v_c}\right) \operatorname{sen} \varphi_c \tag{12}$$

donde el ángulo de corte φ_c , descrito entre las posiciones de la herramienta al iniciar el contacto con el material de corte y su salida a una altura descrita por la profundidad global de corte h, se obtiene de:

$$\cos \varphi_c = \frac{(r-h)}{r} \tag{13}$$

Esta profundidad, como puede verse, está en función de la relación entre las velocidades de operación, de la profundidad global de corte y del radio de la circunferencia sobre la cual se lleva a cabo el movimiento de rotación. La expresión de $h_{\rm em}$, puede también ser usada para calcular la profundidad de corte

del elemento, h_e (Figura 6), para cualquier ángulo ϕ menor al ángulo de corte ϕ_c , sustituyendo el argumento por la magnitud del ángulo en la expresión (12) en el que dicha profundidad se desea calcular.

Suponiendo que la profundidad global de corte es uniforme, ésto es, que el fondo se genera como una superficie plana horizontal (paralela a la dirección de avance), la profundidad promedio que la herramienta corta es:

$$h_{ep} = \frac{hd}{l} \tag{14}$$

siendo el numerador, el área removida entre dos trayectorias consecutivas de la herramienta (Figura 6), mientras que el denominador I, es la longitud en la que la herramienta permanece en contacto con el material de corte durante una de sus trayectorias, aproximado como:

$$l = d + r\varphi_c \tag{15}$$

donde el primer término se refiere al arco descrito por el giro y el segundo al desplazamiento lineal del eje de giro. Sustituyendo d, deducido líneas arriba, entonces la expresión para esta profundidad de corte promedio, en una vuelta, es:

$$h_{cp} = \frac{2\pi h \left(\frac{v_a}{v_c}\right)}{2\pi \left(\frac{v_a}{v_c}\right) + \varphi_c} \tag{16}$$

En el caso de rotores fresadores, compuesto por varias herramientas cortantes con un arreglo especial sobre la superficie de un cilindro, si existen n elementos cortantes uniformemente distribuidos sobre la circunferencia del rotor, en un mismo plano perpendicular al eje de giro, es decir, con sus trayectorias en el mismo plano vertical y, considerando además, que no existen traslapes entre las trayectorias de elementos adyacentes (anchos individuales de corte), la ecuación de h_{em} se transforma en:

$$h'_{em} = \frac{2\pi r}{n} \left(\frac{v_a}{v_c} \right) \operatorname{sen} \varphi_c \tag{17}$$

Lo anterior, puede aplicarse a cada una de las secciones que compongan un tambor fresador, salvo sus extremos, en los cuales normalmente hay una mayor concentración de elementos cortantes, debido a la acción de refrentado que realizan durante el corte; en otras palabras, los elementos encargados de generar las paredes laterales de la zona de corte.

3. Dinámica del Corte Rotatorio

3. 1. Mecanismo fresador simple

Conocidos los aspectos cinemáticos del proceso de corte como una combinación de dos movimientos, rotación y traslación, en este apartado, se complementa la relación entre el movimiento del dispositivo de corte con el sistema de fuerzas resultante que origina dicho movimiento. Considerando un solo elemento cortante, soportado por un elemento rígido de longitud igual al radio de giro, que se desplaza con un movimiento angular y otro de avance rectilíneo, en un plano vertical (suponiendo simetría del dispositivo en este plano) perpendicular al movimiento de giro (Figura 1), el elemento cortante del dispositivo, queda sujeto a las cargas como se indica en la Figura 7.

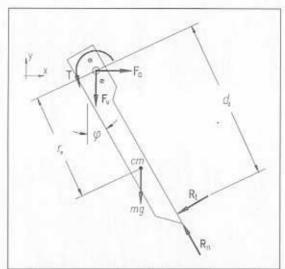


Figura 7. Cargas sobre la herramienta de corte.

Tomando en cuenta las ecuaciones cinemáticas de la sección anterior, para el centro de masa (cm) de la herramienta, complementadas con las cargas indicadas en la figura mencionada, se obtienen las siguientes expresiones para las fuerzas F_a y F_ν y el par T, quienes denotan la fuerza de corte, la carga vertical necesaria para mantener el contacto y el par de corte, respectivamente.

$$\mathbf{F}_{a} = \mathbf{R}_{c} \cos \varphi + \mathbf{R}_{a} \sin \varphi + m \left(\ddot{a} + r_{c} \ddot{\varphi} \cos \varphi - r_{c} \dot{\varphi}^{2} \sin \varphi \right) \tag{18}$$

$$\mathbf{F}_{v} = \mathbf{R}_{n} \cos \varphi - \mathbf{R}_{t} \sin \varphi - mg - m(r_{c} \ddot{\varphi} \sin \varphi + r_{c} \dot{\varphi}^{2} \cos \varphi)$$
 (19)

$$\mathbf{T} = \left(I_z + mr_c^2\right)\ddot{\varphi} + mgr_c \operatorname{sen}\varphi + \mathbf{R}_t d_t + m\ddot{a}r_c \cos\varphi \tag{20}$$

En el caso de que la velocidad de avance y la velocidad angular sean constantes y diferentes de cero, es decir, son nulas las aceleraciones lineal y angular, las expresiones anteriores se reducen a una forma más sencilla, las cuales se enuncian a continuación.

$$\mathbf{F}_{n} = \mathbf{R}_{t} \cos \varphi + \left(\mathbf{R}_{n} - m r_{c} \dot{\varphi}^{2} \right) \operatorname{sen} \varphi \tag{18a}$$

$$\mathbf{F}_{v} = \left(\mathbf{R}_{n} - m r_{c} \dot{\mathbf{\phi}}^{2}\right) \cos \varphi - \mathbf{R}_{r} \sin \varphi - m g \tag{19a}$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{R}_i d_i + mgr_c \operatorname{sen} \varphi \tag{20a}$$

Estas expresiones son válidas mientras la herramienta esté en contacto con el medio; es decir, para la profundidad h, o dicho de otra manera, para un intervalo de $\varphi = [0, \cos^{-1}(1-h/r)]$ (Figura 3).

3.2. Mecanismo de péndulo

Suponiendo ahora que $v_a = 0$, la trayectoria que describe la herramienta de corte es completamente circular, semejante a la que describe un péndulo. Con atención a la Figura 8, siendo el desplazamiento angular φ referido al eje vertical, en el que el elemento parte del reposo cuando $\varphi = \varphi_i$ (aunque no es condición necesaria), es decir, cuando el centro de masa tiene una altura h_i con respecto a la máxima profundidad de penetración, aplicando el principio de conservación de la energía, el balance en el sistema es,

$$E_i = E_f + E_c = E_t \tag{21}$$

en donde E_c , es la energía requerida para vencer la resistencia del material a sufrir el corte de una ranura circular y, E_f , la energía remanente del proceso, estimable a partir de la altura h_f , cuando el centro de masa alcanza una nueva posición de reposo en $\varphi = \varphi_f$. La expresión genérica para el cálculo de la energía del sistema, en este caso, es:

$$E = T + V \tag{22}$$

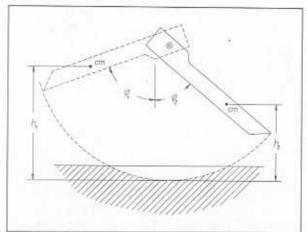


Figura 8. Herramienta de corte como mecanismo pendular.

donde T se refiere a la energía cinética y V a la energía potencial, para un mismo instante en el proceso. Conjuntando estas expresiones, la energía requerida para el corte por el péndulo es:

$$E_c = \Delta T + \Delta V \tag{23}$$

En la expresión anterior, \(\Delta\) significa el cambio o la diferencia entre dos estados o posiciones distintas. Si la herramienta parte de una posición de reposo, alcanzando otra posición de reposo (donde la magnitud de la velocidad es cero), entonces, para esas posiciones, el cambio que experimenta la energía cinética es nulo.

Aplicando ahora el principio de trabajo y energía, es decir, evaluando la energía del sistema y el trabajo que desempeñan las fuerzas que se originan, se puede obtener el par y la fuerza actuantes durante el corte del material bajo el péndulo, suponiendo un par T y una fuerza F_c constantes para pequeñas longitudes de corte, actuando en la dirección del movimiento, conocidos el desplazamiento angular y el arco descrito por la punta de la herramienta mientras haya contacto sobre el material, esto es,

$$\mathbf{T} = \frac{\Delta T + \Delta V}{\Delta \Phi} \tag{24}$$

$$\mathbf{F}_{c} = \frac{\Delta T + \Delta V}{l_{p} \Delta \varphi} \tag{25}$$

donde $\Delta \phi$ se refiere al ángulo descrito por las posiciones de entrada y salida de la herramienta sobre el material de corte. Análogamente, si se puede conocer la velocidad de corte, ν_c , en la punta de la herramienta, entonces la potencia de corte, P_c , puede estimarse como:

$$P_c = \mathbf{F}_c \cdot \mathbf{v}_c \tag{26}$$

Puede observarse, que las expresiones (24) y (25) incluyen en el numerador la energía de corte E_c , por lo que finalmente el par, la fuerza y la potencia, pueden obtenerse a partir de esta energía. Si, además, se parte del reposo a una altura conocida y se determina también la altura final en la que se alcanza nuevamente otro estado de reposo, entonces,

$$E_c = mg(h_i - h_f) \tag{27}$$

supuesta conocida la masa m del péndulo.

3.3. Mecanismo Escarificador

En un contexto general, la escarificación es el proceso de corte cinemática y geométricamente más simple: a la herramienta de corte se le suministra un movimiento único, enfrentando directamente el material a cortar. Este movimiento es rectilíneo, manteniendo una penetración a profundidad constante, considerando una superficie de referencia plana y paralela a la trayectoria de corte.

De acuerdo al esquema mostrado anteriormente en la Figura 4, la trayectoria de la herramienta queda definida a lo largo de la coordenada en la dirección de avance, siendo su velocidad la enunciada en la expresión (3a). Si esta velocidad se mantiene constante, el problema de calcular las fuerzas sobre la herramienta de corte, se reduce a un caso estático simple, salvo las variaciones de resistencia del material, debido a su propia heterogeneidad.

Sobre la herramienta cortante se presenta una fuerza, cuya componente principal, contraria a la dirección de avance, es la resistencia que presenta el material a ser cortado, es decir, W_x . El diagrama de cuerpo libre de una herramienta genérica en corte por escarificación, se presenta en la Figura 9. Partiendo de la trayectoria rectilínea que la herramienta de corte mantiene, la única fuerza que desarrolla trabajo es aquella en la dirección del avance, aunque se presenten otras cargas de contacto en otras direcciones. Sin considerar

cualquier otra fuerza asociada con el desplazamiento del material cortado, si la velocidad de avance y la profundidad de corte se mantienen constantes, la potencia de corte P_e es función de la fuerza W_x requerida para vencer la resistencia al corte y la velocidad de avance v_a , esto es:

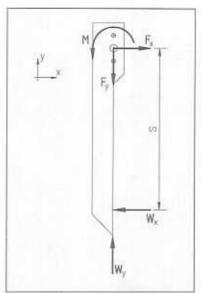


Figura 9. Diagrama de cuerpo libre de la herramienta escarificadora.

$$P_c = \mathbf{W}_x \cdot \mathbf{v}_a \tag{28}$$

Conforme a lo anterior, sobre la fuerza de resistencia y la potencia de corte interviene, principalmente, la componente de la fuerza en la dirección del movimiento.

3.4. Mecanismo de tambor fresador

La determinación de las cargas y momentos a los que está sujeto un tambor de fresado, se simplifica por la disposición y forma del mecanismo. Con atención a la Figura 10, en la que se observa un tambor de fresado con dientes uniformemente distribuidos alrededor de su superficie, con un plano de simetría vertical a la mitad del ancho del tambor y con el centro de masa ubicado sobre el eje de giro, entonces la representación de las fuerzas, de acuerdo a la segunda ley de Newton, es:

$$\mathbf{F}_{a} = m\ddot{a} + \mathbf{R}_{1r} \cos \beta_{1} + \mathbf{R}_{1n} \sin \beta_{1} + \mathbf{R}_{2r} \cos \beta_{2} + \mathbf{R}_{2n} \sin \beta_{2}$$
 (29)

$$\mathbf{F}_{v} = \mathbf{R}_{1n} \cos \beta_{1} - \mathbf{R}_{1t} \sin \beta_{1} + \mathbf{R}_{2n} \cos \beta_{2} - \mathbf{R}_{2t} \sin \beta_{2} - mg \tag{30}$$

$$T = R_{1i}d_1 + R_{2i}d_2 + I\phi$$
 (31)

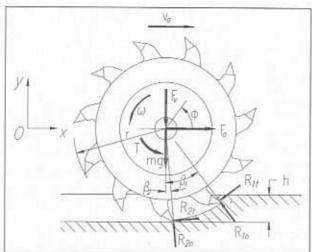


Figura 10. Cargas sobre un tambor fresador. Plano transversal.

en donde β_1 y β_2 se refieren a los ángulos que forman con la vertical los dientes en contacto con el material, mientras que d_1 y d_2 son las distancias del centro del tambor a las fuerzas que actúan en dichos dientes, supuestas tangentes a la trayectoria.

Aunque en las expresiones anteriores sólo se han supuesto dos dientes en contacto con el medio de corte, es decir, sólo actúan fuerzas de resistencia en dos de ellos, la expresión se puede generalizar para el caso de una distribución más densa de los elementos cortantes (menor separación angular) o para el caso de que haya una mayor profundidad global de corte.

Aquí, puede introducirse una nueva definición, que considere únicamente las componentes tangenciales de las fuerzas que actúan en los dientes en contacto con el material, F, la suma de las componentes tangenciales de estas fuerzas, es decir,

$$\mathbf{F}_{t} = \sum \mathbf{R}_{it} \tag{29a}$$

en donde el subíndice , se refiere al número de dientes que realizan el corte simultáneo. Esta expresión no interfiere con el cálculo del par T.

En el caso de velocidades de avance y rotación constantes, entonces el proceso se puede considerar bajo un análisis básicamente estático, anulando los términos en que aparecen \ddot{a} y $\ddot{\phi}$ de las expresiones anteriores. Otra consideración importante, es la suposición de que el par T sea continuo y uniforme, lo que significa que durante el proceso hay al menos un diente en contacto con el medio cortado, siendo éste homogéneo.

Potencia de fresado

Puesto que el fresado queda definido por la combinación de dos movimientos independientes, rotación y traslación, se puede suponer que la potencia total *P* del proceso, puede representarse como una suma de una potencia de avance,

$$P_a = \mathbf{F}_a \ \nu_a \tag{30}$$

y una potencia de giro,

$$P_c = T\omega \tag{31}$$

respectivamente, siendo entonces,

$$P = \mathbf{F}_a \, \mathbf{v}_a + \mathbf{T} \mathbf{\omega} \tag{32}$$

Como el proceso de fresado se realiza en la práctica de manera uniforme, con velocidades de avance y de rotación constantes y, además, con una porción de contacto relativamente pequeña en la herramienta de corte, una estimación aproximada de la participación de cada uno de los términos en esta expresión, puede hacerse suponiendo que la componente horizontal de la fuerza que se presenta en el proceso, actúa con el máximo brazo de palanca, es decir, en la punta del elemento cortante, a una distancia igual al radio del tambor fresador (Figura 11), de donde se deduce:

$$v_c = r\omega \tag{33}$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{R}_{tx} r \tag{34}$$

por lo que las potencias de avance y de giro se pueden expresar como:

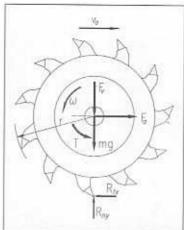


Figura 11. Fuerza R_{ix} actuando con el máximo brazo de palanca.

$$P_a = \mathbf{R}_{tx} \, \mathbf{v}_a \tag{30a}$$

$$P_c = \mathbf{R}_{tx} \, \mathbf{v}_c \tag{31a}$$

Como normalmente en este proceso $v_c >> v_a$, con esta suposición puede concluirse que, en una aproximación somera, en la misma proporción como sean las velocidades v_a y v_c , será la participación de las potencias de avance y de giro en el proceso, respectivamente.

La porción en contacto con el medio cortado, para un elemento cortante comercial, es aproximadamente 1 cm, y el diámetro del tambor puede estar entre 0.5 m y poco más de 1 m, con una profundidad de corte típica de 0.1 m. Estos datos, se proporcionan con objeto de reforzar la suposición anterior.

4. Dispositivos para el Estudio Experimental del Proceso de Remoción

4.1. Corte lineal

Aunque por sus características geométricas y cinemáticas este tipo de corte es simple, el proceso práctico encierra un grado de complejidad derivado del número de parámetros determinantes de la calidad resultante de la operación. La forma y dimensiones de la herramienta, el ángulo de ataque y las superficies de contacto, las condiciones de desgaste, la velocidad de avance, las propiedades mecánicas del material de la herramienta y las del medio cortado, son algunos de los aspectos inmersos en el corte lineal o escarificación.

Los mínimos requerimientos para generar este corte, son contar con una herramienta cortante, un movimiento de avance y un medio por cortar. La relevancia del efecto del ángulo de ataque, de la profundidad de corte, de la temperatura de la mezcla asfáltica y del tipo de material cortado sobre la resistencia que opone la masa asfáltica a ser cortada, son parámetros considerados bajo este enfoque.

Banco para Pruebas de Corte por Escarificación

Bajo la modalidad de conocer las fuerzas a que está sujeta la herramienta cortante por la vía experimental, se considera el uso de un banco de laboratorio para la determinación de la resistencia al corte, con un "diente" de corte típico de concreto asfáltico (Figura 12), trabajando en trayectoria rectilínea, a partir del cual se pueda determinar de manera sencilla, la influencia de parámetros como los ya mencionados, sobre la resistencia al corte del concreto asfáltico.

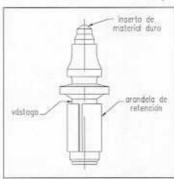


Figura 12. Herramienta cortante tipo fresadora.

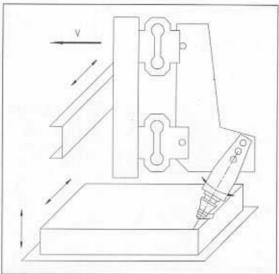


Figura 13. Esquema del banco de pruebas para el estudio del corte de pavimentos por escarificación.

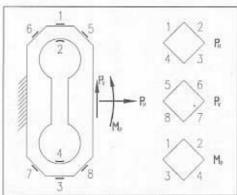


Figura 14. Anillos octaédricos transductores de fuerza empleados en el banco de pruebas.

Para determinar los valores de la resistencia bajo estas condiciones, se presenta un banco de laboratorio (Figura 13), que permite modificar los parámetros del proceso al ser empleado en pruebas sobre probetas rectangulares de concreto asfáltico. El banco consiste de un marco fijo y un marco móvil guiado por el marco fijo, al cual se le aplica un movimiento translacional a velocidad constante por medio de un tornillo de potencia. Entre la estructura principal del marco móvil y el brazo que soporta la herramienta de corte, se coloca el dispositivo medidor, constituido por un par de anillos octaédricos, instrumentados con galgas extensométricas (Figura 14), de manera que puedan registrar las componentes de la fuerza que actúa en el extremo de la herramienta de corte, perpendicular y paralela a la dirección de avance. La

^{*} Banco propiedad del Instituto de Maquinaria Pesada de la Universidad Técnica de Varsovia (IMRC PW).

disposición de los anillos transductores colocados entre el brazo y el marco móvil, permiten obtener las fuerzas de la siguiente manera (Figura 15): En el anillo inferior, se transmite una carga horizontal ${\bf Q}$ y una vertical ${\bf P}$, a través de la articulación A_2 del brazo que soporta el diente, mientras que en el anillo superior, se presenta únicamente una carga horizontal ${\bf R}$, gracias al apoyo simple del brazo sobre el anillo en el punto A_1 . Las probetas de concreto asfáltico se colocan sobre una base de altura ajustable.

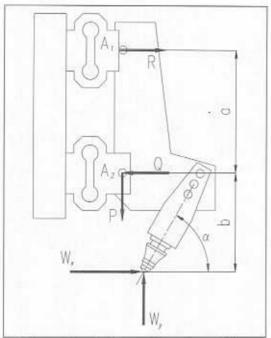


Figura 15. Arreglo de los anillos octaédricos para la determinación de la fuerza de corte.

El cálculo de las componentes \mathbf{W}_x y \mathbf{W}_y de la fuerza en la herramienta cortante, se realiza de la siguiente manera:

$$W_x = Q - R (35)$$

$$\mathbf{W}_{\nu} = \mathbf{P} \tag{36}$$

Las características de este banco permiten combinar diversos parámetros, como la velocidad de avance (en un rango de bajas velocidades), el ángulo de ataque, la profundidad de corte, permitiendo también realizar un desplazamiento transversal de la herramienta de corte para diferentes eventos. Otro parámetro considerado en el estudio con este banco e independiente de éste, es la temperatura de la masa asfáltica.

4.2. Corte circular

Este tipo de corte, cuando sólo existe movimiento de rotación que describe una trayectoria circular sobre un eje fijo, puede reproducirse en un péndulo, de manera que una herramienta cortante pueda generar una muesca circular parcial de profundidad variable, sobre una muestra de concreto asfáltico (Fabela, et al, 1998).

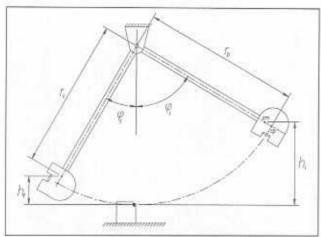


Figura 16. Péndulo de impacto.

Como se hace en los péndulos empleados en la determinación de la tenacidad de los materiales a partir del principio de conservación de la energía, se puede obtener la energía requerida para cortar el espécimen bajo prueba (Figura 16): la cuchilla del péndulo se eleva hasta que el centro de masa, cm, alcanza una altura h_i , que al caer libremente golpea la probeta en un punto predefinido, normalmente sobre la trayectoria del centro de percusión, cp, ubicado a una distancia r_p del eje de giro, consumiendo una parte de la energía en el paso a través del material y elevándose posteriormente a una altura h_i , menor que h_i , debido a la energía cinética que le queda. La energía empleada en el corte es la diferencia de la energía potencial inicial y final, es decir,

$$E_c = mg(h_i - h_c) \tag{27}$$

que en términos del radio de giro del cm, r_c , y los ángulos ϕ_i y ϕ_f , resulta en:

$$E_e = mgr_e \left(\cos\varphi_f - \cos\varphi_i\right) \tag{37}$$

Bajo esta consideración, el dispositivo propuesto, similar a un péndulo de impacto, con el cual comparte la mayoría de sus características, posee una geometría ligeramente diferente, una base modificada para retener una probeta cilíndrica de concreto asfáltico, elementos que permiten ajustar el ángulo de ataque de la herramienta cortante y la profundidad inicial de la penetración, así como accesorios que permiten el intercambio de herramientas para probar distintas geometrías de corte.

Banco para Pruebas de Corte Circular

Los componentes principales y la descripción del funcionamiento del péndulo diseñado, se indican en la Figura 17, la cual es como sigue: el cuerpo principal (4), se apoya sobre rodamientos que le permiten el típico movimiento de vaivén alrededor del eje de giro (6); el soporte (7) del péndulo, al igual que el resto de la estructura, está especialmente reforzado con perfiles tubulares rectangulares para proporcionarle una mayor rigidez; la base (9), para la colocación de la probeta de concreto asfáltico (13), posee un pequeño marco (3) para sujetar la probeta durante la prueba; el módulo de sujeción (12) de la herramienta de corte (11), permite el cambio del ángulo de ataque y el ajuste de la punta de la herramienta con la trayectoria del centro de percusión del péndulo. La profundidad de corte se define colocando pequeñas placas (10) entre la base de soporte y la probeta de concreto, elevándola hasta el valor de profundidad deseado. La estructura se apoya en una serie de tornillos (8) que facilitan la nivelación del péndulo.

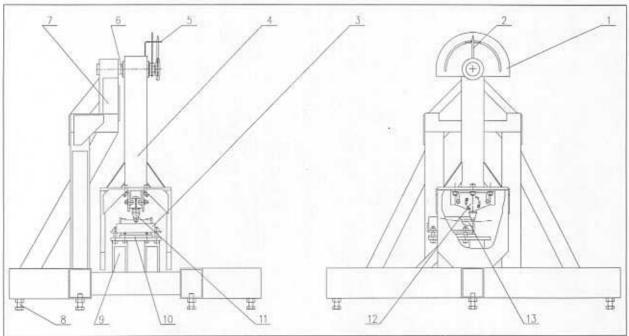


Figura 17. Esquema del péndulo para pruebas de corte circular.

El cuerpo principal es posicionado hasta un ángulo (altura del centro de masa) preestablecido, girando con el cuerpo la placa de arrastre (5), que sirve como tope inicial para la aguja indicadora (2), la cual se coloca manualmente en la posición inicial del péndulo y que puede intercambiarse a ambos lados de la aguja, dependiendo de la dirección del corte. Una vez liberado el péndulo desde una altura definida, la placa de arrastre se lleva en su movimiento a la aguja indicadora hasta el máximo desplazamiento angular, pudiendo observarse el cambio en la posición en la placa de referencia (1).

El cálculo de la energía de corte se obtiene con la ecuación (37), determinando las alturas h_i y h_f a partir de los ángulos indicados por la posición del péndulo en la placa de referencia, mientras que la velocidad de la punta de la herramienta al inicio y al término del corte, v_I y v_2 , respectivamente, obtenidas a partir de la expresión de conservación de la energía, son:

$$v_{1} = \frac{r_{p}}{r_{c}} \sqrt{\frac{2mgr_{c}^{2}h_{i}}{mr_{c}^{2} + I}}$$
 (38a)

$$v_{2} = \frac{r_{p}}{r_{c}} \sqrt{\frac{2mgr_{c}^{2}(h_{f} - h_{s})}{mr_{c}^{2} + I}}$$
 (38b)

donde h_s , la profundidad inicial de corte, se indica en la Figura 18, con sentido de rotación de las agujas del reloj, siendo, además la velocidad media de corte v_c ,

$$v_c = \frac{v_1 + v_2}{2} \tag{38c}$$

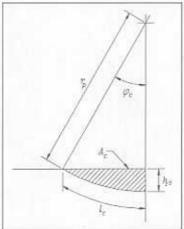


Figura 18. Area de corte removida y ángulo de corte sobre la probeta.

El ángulo de corte, de acuerdo a la Figura 18, se obtiene en función de la profundidad de corte, es decir, de la altura al final del contacto de la herramienta con el material, siendo:

$$\cos \varphi_c = 1 - \frac{h_z}{r_p} \tag{39}$$

con un arco de corte, denominado como Ic,

$$l_c = r_p \varphi_c \tag{40}$$

y con un área de corte en el plano vertical central de la herramienta de corte, expresado como:

$$A_c = \frac{r_p^2}{2} (\varphi_c - \operatorname{sen}\varphi_c \cos\varphi_c) \tag{41}$$

La profundidad de corte promedio h_{prom} , a partir de la relación entre A_c y I_c , resulta:

$$h_{prom} = r_p \left(1 - \frac{\operatorname{sen}\varphi_c \operatorname{cos}\varphi_c}{\varphi_c} \right) \tag{42}$$

Considerando los aspectos anteriores, el péndulo de impacto tiene la capacidad para determinar la energía de corte en función de la profundidad de corte, del ángulo de ataque de la herramienta cortante, del tipo de concreto asfáltico y de la geometría de la herramienta cortante.

4.3. Corte trocoidal

Como se mencionó anteriormente, el fresado de pavimentos se realiza por medio de máquinas especiales que poseen un mecanismo de corte rotatorio, al que se le suministra el movimiento de giro a través de un sistema de transmisión, que puede ser mecánico (empleando bandas y poleas), hidráulico o híbrido. Invariablemente, el movimiento de avance para el corte es aprovechado por el desplazamiento mismo de la máquina.

En este apartado se presenta el diseño de una polea experimental para ser instrumentada con galgas extensométricas para conocer la potencia de corte del

mecanismo fresador en una máquina real, a partir de la medición del par y la velocidad de giro, necesarios para desempeñar la operación de corte bajo condiciones normales de operación. La polea; proyectada como elemento transductor, es un elemento transmisor de la potencia dentro del sistema de transmisión como el que posee la máquina fresadora mostrada en la Figura 19. Esta es una máquina robusta, de un solo motor, autopropulsada, con un sistema tractivo conformado por 3 orugas.

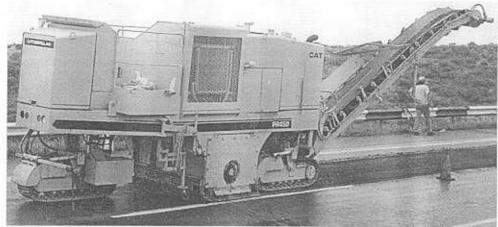


Figura 19. Máquina típica perfiladora de pavimentos.

El sistema de corte, colocado en la parte media inferior de la máquina, lo componen un tambor fresador cilíndrico y los medios de transmisión de la potencia. El tambor tiene sobre su periferia un conjunto de "dientes", arreglados generalmente de manera helicoidal y colocados con una inclinación radial para facilitar la penetración en la carpeta, tal y como se representa en las Figuras 10 y 11. El par de accionamiento del tambor fresador es transmitido por el motor principal a través de bandas y poleas (Figura 20): la polea superior se embraga directamente al eje de potencia del motor y transfiere la potencia a una polea conducida (inferior) por medio de un conjunto de bandas que a su vez impulsan al tambor.

Para este tipo de máquina, se propone sustituir la polea conducida original, seleccionada como el mejor punto de medición, por una polea modificada (Figura 21), diseñada para este fin (Fabela, Hernández, 1998), instrumentada para registrar datos que permitieran calcular el par de accionamiento al tambor. Dentro de sus características se cuenta el de poseer una rigidez menor que la polea original con objeto de promover una deformación angular sensible producida por el par transmitido al tambor fresador, de manera que pueda ser registrada y que permita estimar con precisión este par, conservando las dimensiones características de la polea invariables, para no alterar el funcionamiento normal de la máquina. La instrumentación propuesta consiste en

colocar galgas de deformación con base en una configuración de puente de Wheatstone, en un arreglo que garantice la mayor sensibilidad a la deformación producida por la torsión de la polea, minimizando posibles efectos debidos a cargas de flexión, de tensión y compresión longitudinal o de cargas debidas a la dilatación térmica.

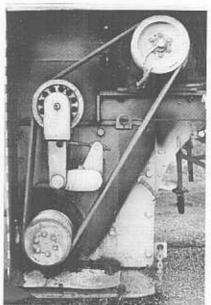


Figura 20. Accionamiento del mecanismo de corte.

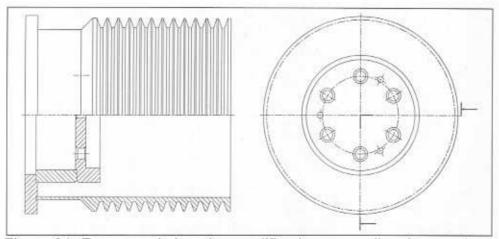


Figura 21. Esquema de la polea modificada para realizar las pruebas, sustituta de la polea conducida original.

Para colectar los datos proporcionados por las galgas durante la operación de corte, se requiere de un sistema de telemetría y de registro de datos, esquematizado en la Figura 22. Este esquema muestra la disposición genérica de los equipos requeridos para el registro de la señal producida por el par y la

velocidad, descrito de manera breve como sigue: El par transmitido a través de la polea (2) hacia la flecha del tambor fresador (1) produce una deformación en la porción esbelta de la polea y por ende, en las galgas extensométricas (3), cuya señal es transmitida por la antena giratoria (4) y recibida por la antena fija (5). Esta señal es decodificada por la unidad de lectura (6), amplificada con el equipo (7), el cual a su vez la envía a la unidad de almacenamiento (9) a través del sistema de adquisición de datos (8), donde queda disponible para un manejo de datos posterior.

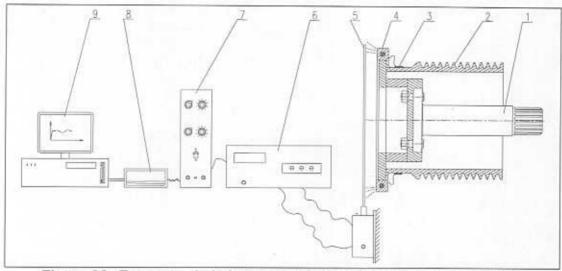


Figura 22. Esquema de la instrumentación necesaria en las pruebas.

El uso de esta polea es factible para conocer la potencia suministrada al mecanismo de corte de la máquina fresadora, pero no proporciona una medida directa de la potencia de avance de la máquina, que depende de la fuerza y la velocidad de avance. Sin embargo, a partir de las últimas expresiones en el capítulo 3, se puede obtener una aproximación indirecta de esta potencia. Determinarla directamente requeriría del empleo de algún otro dispositivo con el cual se pudiera medir la fuerza de tracción de la máquina, que no está al alcance de este trabajo.

5. Resultados Experimentales de Pruebas Características

5.1 Comentarios previos

Los resultados que se muestran a continuación, fueron obtenidos de pruebas características realizadas con los dispositivos propuestos en el capítulo anterior y que son ejemplo de la aplicación práctica de éstos en el estudio de la influencia de los diversos parámetros involucrados en el proceso de corte de pavimentos.

Así, en el banco para pruebas de corte lineal, los parámetros de estudio principales son la temperatura del concreto asfáltico, la profundidad de corte y el ángulo de ataque de la herramienta cortante (diente). En el banco para corte circular, se investigan los parámetros de profundidad y ángulo de ataque del diente, de acuerdo a dos tipos distintos de la geometría de la punta cortante y distintos contenidos de asfalto en el concreto asfáltico. Finalmente, en el caso del corte trocoidal, únicamente se empleó un tipo de diente con una inclinación fija, además de que las pruebas fueron sujetas a las condiciones normales de operación en campo de una máquina fresadora de pavimentos comercial, con la cual se llevaron a cabo las pruebas de corte.

Estos resultados se exponen gráficamente, indicándose principalmente valores de corte unitarios como función de los parámetros del proceso, salvo en el caso de la relación básica entre fuerza y potencia con la profundidad de corte.

5.2. Corte lineal

En un estudio en el que se empleó el banco mostrado en el esquema de la Figura 13, se realizaron pruebas de corte utilizando probetas rectangulares de concreto asfáltico preparadas en el laboratorio, cuya composición de agregados pétreos se ajustó a lo establecido en las Normas de Calidad en los Materiales Utilizados para Carpetas y Mezclas Asfálticas, de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 1986), con un contenido de 6 % de asfalto como aglutinante. La herramienta de corte utilizada, fue un diente de corte típico comercial sin desgaste, ilustrado en la Figura 24. Este diente, con una longitud aproximada de 85 mm, de acero dúctil, con una punta prácticamente cónica de carburo de tungsteno, de poco más de 10 mm de largo y 14 mm de diámetro en

su parte más ancha, se montó en el dispositivo del banco, donde fue sujeto a diversas condiciones de corte.



Figura 24. Herramienta cortante tipo fresadora.

Con estas pruebas, se investigó principalmente la dependencia de la resistencia al corte de los parámetros de temperatura del concreto asfáltico, profundidad de corte y ángulo de corte, con una velocidad de avance de 1 cm/s.

Los resultados obtenidos se muestran gráficamente a continuación, indicándose valores de resistencia al corte y potencia en función de la temperatura del concreto asfáltico, de la profundidad de corte y del ángulo de ataque de la herramienta cortante. Normalmente el ángulo de inclinación de la herramienta fue de 30° con la vertical.

Parámetro temperatura

De los parámetros investigados, la temperatura muestra ser el de mayor influencia sobre la resistencia al corte. Con objeto de homologar la comparación con los valores de profundidad, en la Figura 25 se presentan las componentes horizontal y vertical de la fuerza de resistencia por unidad de profundidad, W_{xh} y W_{yh} , respectivamente en el eje vertical izquierdo, y la potencia de avance, también por unidad de profundidad, P_{eh} , en el eje vertical derecho, producida por la componente horizontal de la fuerza de resistencia y la velocidad de avance, graficadas contra la temperatura de la mezcla en el eje horizontal.

En dicha figura, se observa una tendencia de decremento exponencial de la resistencia y de la potencia con la temperatura. Puede verse, por ejemplo, que la componente horizontal de la resistencia y la potencia de corte, disminuyen cerca de un 60 % cuando la temperatura del concreto asfáltico aumenta de 0°C a 25°C, abatiéndose hasta un 82 % para una temperatura de 50°C. Posteriores a esta

temperatura, el comportamiento de la resistencia y la potencia muestra una disminución menos significativa, con respecto al cambio de temperatura.

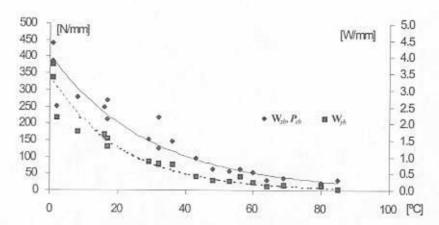


Figura 25. Influencia de la temperatura en el valor de las fuerzas y la potencia presentes en el corte por escarificación

Parámetro profundidad

Dentro del rango de profundidades estudiado, se observó un comportamiento lineal directamente proporcional, de la fuerza de resistencia y la potencia de avance con la profundidad de corte, pues el valor de la resistencia y de la potencia de corte se incrementan como se incrementa la profundidad, según se observa en la Figura 26. En el eje vertical izquierdo se presenta esta relación para la componente horizontal de la resistencia, W_x , y, en el derecho, para la potencia, P_c , como producto de esta componente de la fuerza de resistencia y la velocidad de avance de la herramienta cortante.

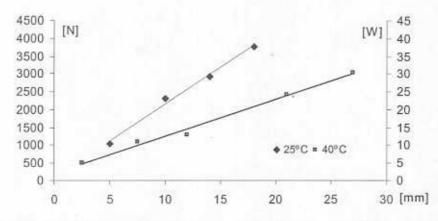


Figura 26. Relación de la resistencia (componente horizontal) y la potencia con la profundidad de corte para 25 y 40°C.

Observando las líneas de comportamiento de la Figura 26, puede decirse que la fuerza unitaria de corte para 25°C es de aproximadamente 210 N/mm y de 2.1 W/mm para la potencia. En cambio, para la mayor temperatura (40°C) la fuerza unitaria es de aproximadamente 115 N/mm, en tanto que la potencia es de 1.1 W/mm, casi un 50 % menor que para la temperatura de 25°C.

Parámetro ángulo de ataque

La Figura 27 muestra la relación entre la fuerza de resistencia al corte por unidad de profundidad, W_{xh} , en el eje de las ordenadas, y el ángulo de inclinación de la herramienta cortante (ángulo de ataque, α), en el eje de las abscisas, para dos distintas temperaturas de la mezcla asfáltica, en un rango de 0 a 60° de inclinación de la herramienta, correspondiendo a 0° una posición vertical.

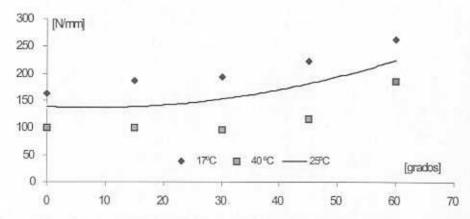


Figura 27. Relación entre el ángulo de ataque y la fuerza de resistencia para dos temperaturas de la carpeta asfáltica.

Aunque los puntos denotan una tendencia en una curva con aparentes cambios suaves de pendiente, es decir, no hay grandes variaciones para distintos valores del ángulo de ataque, sí se nota una separación significativa que hace patente nuevamente la influencia de la temperatura de la mezcla asfáltica, puesto que para la temperatura más baja, la resistencia a ser cortada es mayor y la tendencia es más suave, tendiendo a linealizarse, comparada con la correspondiente a la resistencia ofrecida por el concreto asfáltico a mayor temperatura.

En la misma figura, se presenta también la curva estimada de esta fuerza unitaria de resistencia para una temperatura de 25°C, conjugando los datos mostrados de la gráfica en la Figura 25 y los presentados en esta gráfica.

5.3. Corte circular

Empleando un prototipo del péndulo mostrado en la Figura 17, se realizaron pruebas en las que se determinó la energía requerida para efectuar una ranura en una probeta cilíndrica de concreto asfáltico y, a partir de ésta, se realizaron las estimaciones de fuerza y potencia utilizadas en el proceso. Estas pruebas consideraron el estudio de los siguientes parámetros:

profundidad de corte ángulo de ataque de la herramienta cortante contenido de aglutinante (asfalto) en la mezcla asfáltica geometría de la herramienta cortante.

Los tipos de geometría del diente empleados en estas pruebas, son los mostrados en la Figura 28, con un ancho de corte promedio de 10 mm.



Figura 28. Herramientas cortantes empleadas en el corte circular.



Figura 29. Tipo de probeta de concreto asfáltico utilizada.

Los tipos de probetas de concreto asfáltico usadas en este estudio, se muestran en la Figura 29, elaboradas de acuerdo a las especificaciones indicadas en las Normas de Calidad de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT, 1986), siendo divididas en tres grupos, dependiendo del contenido de asfalto en la mezcla: 4, 5 y 6%. También se dispuso de probetas de concreto asfáltico tomadas de la carretera, con contenido de asfalto de 7.8 %.

La temperatura del laboratorio, durante el desarrollo de las pruebas, fue en promedio de 26° C. La velocidad en la punta de la herramienta, al inicio del contacto con el material, fue de aproximadamente 3.2 m/s, controlada por la altura inicial de caída del péndulo. De estas pruebas, el ángulo de corte ϕ_c resultó menor a 10° , por lo que se considera prácticamente que la dirección de la velocidad de la herramienta de corte en este ángulo es horizontal y, con esta misma suposición, también la fuerza de corte, por lo que se estima la potencia de corte, con base en este esquema, como se indica en la expresión (23).

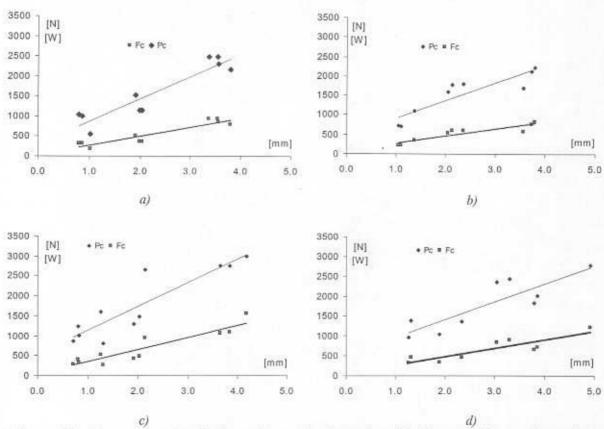


Figura 30. Fuerza y potencia de corte contra la profundidad promedio, empleando un diente cónico en probetas con contenido de asfalto y ángulo de ataque del diente de: a) 4% y 0°, b) 5% y 0°, c) 6% y 0°, d) 7.8 % y 50°.

Efecto de la profundidad

El efecto de la profundidad sobre la resistencia (fuerza de corte) y la potencia estimada de corte, se presentan en la Figura 30, al emplear un diente con punta cónica, y en la Figura 31, al emplear un diente de punta rectangular. En estas gráficas, el mismo eje vertical corresponde a la fuerza de corte \mathbf{F}_c [N] y a la potencia de corte \mathbf{P}_c [W], mientras que en el eje horizontal se representa la profundidad promedio h_{prom} [mm]. Estas pruebas fueron realizadas con un ángulo de inclinación de la herramienta (ataque) de 0° con respecto al eje radial del péndulo, es decir, al inicio del corte el diente pasaba por una posición vertical.

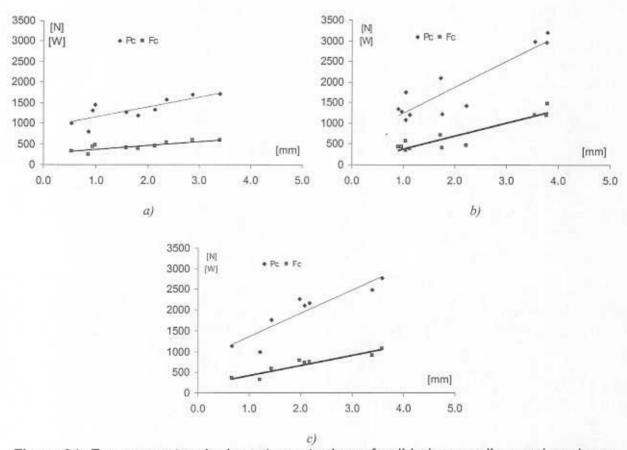


Figura 31. Fuerza y potencia de corte contra la profundidad promedio, empleando un diente rectangular con un ángulo de ataque de 0°, en probetas con contenido de asfalto de: a) 4%, b) 5%, c) 6%.

De estas gráficas, se desprende que el comportamiento de la fuerza y la potencia de corte, en relación con la profundidad, tienen un carácter prácticamente lineal, incrementándose los valores de fuerza y potencia empleadas durante el corte a medida que la profundidad es mayor, sin que

pueda predecirse una tendencia clara del valor de resistencia con respecto al contenido de asfalto en el concreto.

Efecto del ángulo de ataque

Para mostrar el efecto que tiene el ángulo de ataque sobre la fuerza requerida para realizar el corte, en la Figura 32 se muestran resultados obtenidos al emplear un diente cónico a distintas inclinaciones de corte, sobre probetas de concreto asfáltico con contenidos de asfalto típicos, mientras que en la Figura 33 se muestran aquéllos al emplear un diente de punta rectangular. El eje vertical de las gráficas mostradas, corresponde a F_{cu} , fuerza de corte por unidad de profundidad, correspondiendo el eje horizontal al ángulo de ataque α del diente, en esas pruebas.

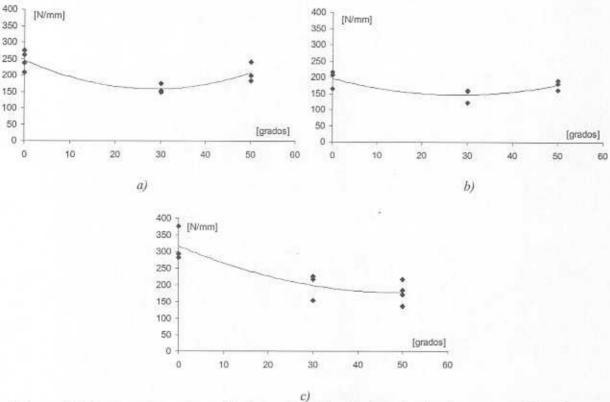


Figura 32. Fuerza de corte unitaria en función del ángulo de ataque, empleando un diente cónico en probetas con contenido de asfalto de: a) 4%, b) 5%, c) 6%.

En las gráficas mostradas en ambas figuras, se aprecia un comportamiento no lineal de la fuerza con respecto al ángulo de inclinación (ataque) del diente, con la particularidad de que en el caso del empleo de un diente cónico, el ángulo en

el que se requirió menor fuerza por unidad de profundidad, es cercano a los 30°, excepto para el contenido de asfalto de 6 %, mientras que para el caso del diente rectangular, la menor resistencia se ve favorecida para ángulos de ataque mayores.

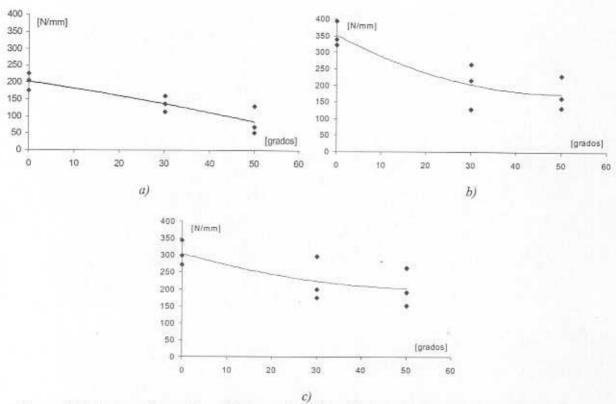


Figura 33. Fuerza de corte unitaria en función del ángulo de ataque, empleando un diente rectangular en probetas con contenido de asfalto de: a) 4%, b) 5%, c) 6%.

5.4. Corte trocoidal

Empleando el dispositivo propuesto en la Figura 21, se realizaron pruebas de campo con una máquina perfiladora de pavimentos, acondicionada e instrumentada de acuerdo al esquema de la Figura 22, aprovechando que el sistema de fresado de este tipo de máquinas produce que la herramienta de corte describa una trayectoria trocoidal. El ángulo de inclinación de la herramienta en su configuración de trabajo, fue de 50° con respecto a una línea radial. Las pruebas se realizaron sobre un pavimento asfáltico con un contenido de asfalto de 7.8 %, sujeto a la temperatura ambiente, situándose alrededor de 25 °C. De estas pruebas, se midió el par, la profundidad de corte y las velocidades de avance y de rotación del sistema de fresado. La velocidad de avance durante las pruebas se mantuvo en un intervalo entre 1 y 3 m/min,

mientras que la velocidad de rotación produjo una velocidad tangencial en la punta de la herramienta, de aproximadamente 270 m/min. Las mediciones de los parámetros mencionados, permitieron estimar la fuerza y la potencia requeridos durante el proceso de corte.

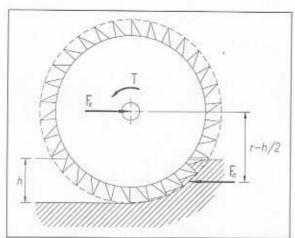


Figura 34. Suposición de la línea de acción de F_a, con respecto al radio del tambor fresador (r) y de la profundidad global de corte (h).

En términos generales, las estimaciones de fuerza se consideraron con base en el par medido y, considerando que el fresado es una combinación de dos movimientos, se estimaron dos tipos de fuerza de resistencia, una de acuerdo a la suposición de un avance de desplazamiento lineal, F_a , Figura 34, y otra de acuerdo al desplazamiento angular, F_t , Figura 10 y expresión (29a), ajustadas por unidad de profundidad (F_{ah} y F_{th} , respectivamente), considerando, en este último caso, que la herramienta describe prácticamente una trayectoria circular, para las velocidades de operación normal de la máquina durante las pruebas.

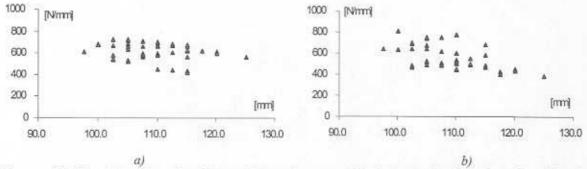


Figura 35. Resistencia al corte por fresado por unidad de profundidad en función de la profundidad global de corte. a) F_{ah} , b) F_{th} .

Así, en la Figura 35, se muestran los resultados obtenidos para las fuerzas unitarias con respecto a la profundidad global de corte (h, en la Figura 34), mientras que, en la Figura 36, se presenta la relación de estas mismas fuerzas unitarias, pero con respecto a la profundidad promedio, que se genera por la trayectoria trocoidal de un solo diente.

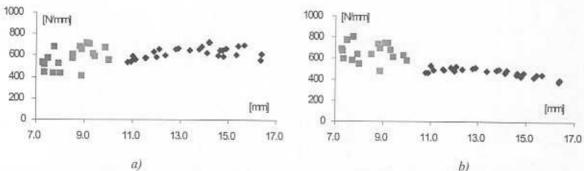


Figura 36. Resistencia al corte por fresado por unidad de profundidad en función de la profundidad de corte para un solo diente en trayectoria trocoidal. a) \mathbf{F}_{ah} , b) \mathbf{F}_{th} .

En apariencia, las gráficas de la Figura 35 muestran que para las pruebas realizadas en la máquina fresadora, no hay relación entre las fuerzas de corte unitarias con la profundidad global durante el proceso de fresado. Sin embargo, en las gráficas mostradas en la Figura 36, puede observarse una relación tangible para una porción de la profundidad individual de corte, con valores que no experimentan cambios de tendencia bruscos, pudiendo observarse un valor promedio general de alrededor de 600 N/mm para el caso de F_{ah} y de 500 N/mm para F_{th} .

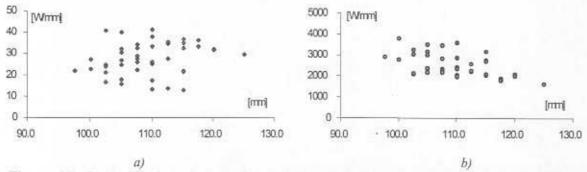


Figura 37. Potencia de corte por fresado por unidad de profundidad en función de la profundidad global de corte. a) producida por F_{ah}, b) producida por F_{th}.

Con respecto a la potencia unitaria (producida por estas fuerzas unitarias y la velocidad en su dirección), la Figuras 37 y 38 muestran gráficamente la distribución de estas estimaciones, con respecto a la profundidad global y la

profundidad que se genera con la trayectoria del diente en la trayectoria trocoidal.

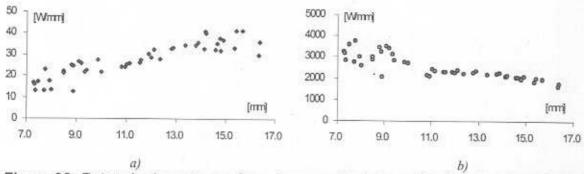


Figura 38. Potencia de corte por fresado por unidad de profundidad en función de la profundidad de corte para un solo diente en trayectoria trocoidal. a) producida por \mathbf{F}_{ah} , b) producida por \mathbf{F}_{th} .

Semejante al comentario derivado sobre las gráficas de la fuerza de corte unitaria, en la Figura 37 no se aprecia una relación estrecha de la potencia producida por estas fuerzas unitarias, correspondientes con la profundidad global de corte, mientras que en la Figura 38 se observa una tendencia clara: para la potencia de avance, la producida por la fuerza \mathbf{F}_{ah} y la velocidad de avance, se incrementa conforme mayor es la profundidad promedio de corte individual del diente, siendo al contrario para la potencia de giro, producida por la fuerza \mathbf{F}_{th} y la velocidad tangencial de la herramienta cortante. Comparando ambas gráficas, se observa que el principal requerimiento de la potencia en el fresado es en la potencia de giro, siendo prácticamente 100 veces mayor que la de avance, en este caso.

Comentarios Generales

Los fundamentos contenidos en este trabajo, constituyen la base teóricopráctica mínima para el estudio de los procesos de remoción de pavimentos. El enfoque aquí presentado se refiere principalmente a las fuerzas que actúan sobre los mecanismos de corte, en especial a la herramienta cortante, por lo que estos fundamentos son aplicables a cualquier material de naturaleza similar al pavimento.

Para estudiar el proceso de corte de pavimentos por medio del fresado, se requiere analizar dos movimientos principales: uno de avance lineal y otro de giro, como ya se hubo mencionado. Este análisis permite conocer la cinemática del proceso general y determinar la influencia que tienen los distintos parámetros involucrados en el proceso de corte sobre la demanda de potencia y energía. Analizando separadamente cada uno de estos movimientos y proponiendo configuraciones sencillas para su determinación experimental, es posible establecer una forma de comparación y determinación de la relación entre estos parámetros que intervienen en el fresado de pavimentos.

El material presentado en este documento, permite el estudio del proceso de corte de pavimentos, a partir de la determinación de la potencia de corte; parámetro que por su carácter escalar, simplifica el análisis y la comparación de resultados.

Los resultados presentados constituyen una muestra del enfoque discutido a lo largo de este documento, haciendo factible la aplicación de los dispositivos propuestos sobre el conocimiento del proceso de remoción de pavimentos, cuya aplicación es extrapolable para otros materiales empleados en los pavimentos de las carreteras.

Referencias

- ARRA. 1986. "Guideline Specifications For Cold Planing". Asphalt Recycling and Reclaiming Association; Annapolis, Maryland, USA.
- ARRA. 1992. "An Overview Of Recycling And Reclamation Methods For Asphalt Pavement Rehabilitation". Asphalt Recycling and Reclaiming Association; Annapolis, Maryland, USA.
- Balowniew, W.I.; M. P. Baratatchwili, 1989. "Investigación del Proceso Mecánico del Trabajo de Corte de Carpetas Asfálticas". Maquinaria para Construcción y Carreteras No. 1, pp. 20-22. URSS (En ruso).
- Better Roads. "Pavement Maintenance: A Better Way". Better Roads, Dec. 1991, pp 16-18.
- Bibikow, W.N. 1971. "Sobre La Modelación de los Procesos de Trabajo de las Máquinas Tipo Fresadoras para Construcción y para Carreteras, incluyendo el Desgaste del Elemento Cortante y el Factor de Escala". Revista de los Trabajos Científicos del Instituto Tecnológico de Gorki, Tomo XXVII, No. 8 pp 14-17. Gorki, URSS. (En ruso).
- Construction Equipment. "Paving: Getting the most from your new profiler". Construction Equipment, May 1987, pp 95-99.
- Construction Equipment. "Paving Technology '89. Milling Machines: Users Want Power, Utility And Greater Reliability". Construction Equipment, Feb. 1989, pp 86-90.
- Drescher, A.; Kim, J. R.; Newcomb, D. E. 1993. "Permanent Deformation in Asphaltic Concrete". Journal of Materials in Civil Engineering 5(1):112-128.
- Fabela Gallegos, M. J. 1992. "Definición de Parámetros para el Diseño de un Banco de Pruebas para el Análisis del Corte de Pavimentos Asfálticos". Reporte Interno. IMT-SCT. Sanfandila, Qro.
- Fabela Gallegos, M. J.; Hernández Guzmán, A. 1998. "Polea para la Medición del Par de Corte en Pavimentos Asfálticos". Memorias del IV Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, A. C. (SOMIM), 22 y 23 de octubre de 1998, Cd. Juárez, Chih., pp 283-287.
- Fabela Gallegos, M. J.; Lozano Guzmán, A.; Jaworski, J. 1998. "Péndulo para Pruebas de Corte en Concreto Asfáltico. Memorias del IV Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, A. C. (SOMIM), 22 y 23 de octubre de 1998, Cd. Juárez, Chih., pp 145-149.

- Hendrick, J. G.; W. R. Gill, 1971a. "Rotary Tiller Design Parameters, I: Direction of Rotation". TRANSACTIONS of the ASAE 14(4):669-674, 683.
- Hendrick, J. G.; W. R. Gill, 1971b. "Rotary Tiller Design Parameters, II: Depth of Rotation". TRANSACTIONS of the ASAE 14(4):675-678.
- Hendrick, J. G.; W. R. Gill, 1971c. "Rotary Tiller Design Parameters, III: Ratio Of Peripheral And Forward Velocities". TRANSACTIONS of the ASAE 14(4):679-683.
- Hendrick, J. G.; W. R. Gill, 1974. "Rotary Tiller Design Parameters, IV: Blade Clarance Angle". TRANSACTIONS of the ASAE 17(1):4-7.
- Hendrick, J. G.; W. R. Gill, 1978. "Rotary Tiller Design Parameters, V: Kinematics". TRANSACTIONS of the ASAE 21():658-660.
- International Construction 1987, "Asphalt Paving: Cut And Come Again". International Construction 26(7):46-55.
- International Construction. 1990. "Road Repair: Forward Thinking". International Construction 29(11):36-42.
- International Construction. 1997. "International Highways. Maintenance: Investing In The Future". International Construction 36(4):94-101.
- Jaworski, J. 1993. "Resistencia Al Corte Del Hormigón Asfáltico". Memorias del XIX Congreso de la Academia Nacional de Ingeniería, A. C. Acapulco, Gro. pp 142-147.
- Khedr, S. A. 1986. "Deformation Mechanism in Asphaltic Concrete". Journal of Transportation Engineering 112(1):29-45.
- Kuliepow, Wictor E. 1984. "Investigación del Proceso del Corte de Carpetas Asfálticas con Máquinas de Discos Fresadores" (En ruso) Abreviación de la Disertación Doctoral. Gorki, URSS.
- Lewinski, J.; Muñoz Hernández, M.; Guillén Sánchez, J.; Galicia Reyes, M. 1994. "Desarrollo de un Tren de Maquinaria con Planta de Asfalto Integrada para Procesar Material en Sitio en Caliente". Reporte Técnico de la Ingeniería Conceptual a Base de Sistemas y Componentes Probados en la Industria. Reporte de CIATEQ para el IMT. Querétaro, Qro.
- McLeod, N. W. 1987. "Using Paving Asphalt Rheology To Impair Or Improve Asphalt Pavement Design And Performance". Asphalt Rheology: Relationship to Mixture, ASTM STP 941, O. E. Briscoe, Ed. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA; pp 51-75.

- Nisnevik, A.R.; A. R. Aleksandrov; V. N. Melvnik, 1971. "Selección de una Temperatura Racional para el Corte de Masas Asfálticas" (Revista de Transporte Automotriz y Carreteras) pp. 77-79 Kiev, URSS. (En ruso).
- Perl, M.; Uzan, J.; Sides, A. 1983. "Visco-Elasto-Plastic Constitutive Law For A Bituminous Mixture Under Repeated Loading". Transportation Research Record 911; pp 20-27.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). 1986. Libro 4: NORMAS DE CONSTRUCCION, Parte 01: CARRETERAS Y AEROPISTAS, Título 03: MATERIALES PARA PAVIMENTOS, Capítulo 010: MATERIALES PETREOS PARA CARPETAS Y MEZCLAS ASFALTICAS. México, D. F.
- Wood, L. E.; White, T. D.; Nelson, T. B. 1988. "Current Practice Of Cold In-Place Recycling Of Asphalt Pavements". Transportation Research Record 1178; pp 31-37.

CIUDAD DE MEXICO

Av. Popocatépetl 506 B Xoco-Benito Juárez 03330 México, D.F. Tels, 688 76 29 688 76 03 Fax 688 76 08

SANFANDILA

Km 4+000, Carretera Los Cues-Galindo 76700 P. Escobedo, Qro. Tels. (42) 16 97 77 16 96 46 16 95 97 Fax (42) 16 96 71 Internet http://www.imt.mx