

EFFECTIVIDAD DE LOS CEPILLOS LATERALES PARA BARRIDO DE CALLES

Effectiveness of Gutter Brushes for Street Sweeping

RESUMEN

Se estudia experimentalmente la efectividad de los cepillos laterales para barrido de calles para remover varios tipos de basura. Se usa un cepillo cortador y un cepillo F128 bajo diversas condiciones de operación. Se identifican combinaciones apropiadas y óptimas de los parámetros de operación para varios tipos de basura. Se concluye que la gravilla mediana es de fácil remoción, mientras que las partículas pequeñas se tienden a quedar en las irregularidades de la vía y la basura húmeda delgada tiende a adherirse al cepillo y a quedarse en la vía. El cepillo F128 presenta mejor efectividad que el cortador.

PALABRAS CLAVES: barrido, cepillos, cuneta, efectividad de cepillado.

ABSTRACT

The effectiveness of gutter brushes of street sweepers in removing different debris types is investigated by means of experimental tests. Cutting and F128 brushes, under various operating conditions are studied. Appropriate and optimum combinations of operating parameters for different debris types are identified. It is concluded that medium-size gravel may be easy to sweep; fine particles tend to be left in the road irregularities; and wet thin debris may entangle in the brush and be thrown on the road. The F128 brush seems to provide better effectiveness than the cutting brush.

KEYWORDS: brushes, brushing effectiveness, gutter, sweeping.

LIBARDO VANEGAS USECHE

Ingeniero Mecánico, Ph.D.
Profesor Asociado
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira
lvaneegas@utp.edu.co

MAGD M ABDEL WAHAB

Ingeniero Civil, Ph.D.
Senior Lecturer in Mechanics of
Materials and Structural Bonding
School of Engineering
University of Surrey
m.wahab@surrey.ac.uk

GRAHAM A PARKER

Ingeniero Mecánico, Ph.D.
Professor of Mechanical Engineering
School of Engineering
University of Surrey
G.Parker@surrey.ac.uk

1. INTRODUCCIÓN

El barrido de calles puede efectuarse mediante barredoras, las cuales usualmente tienen un cepillo lateral para barrer la cuneta de la vía. La operación de este cepillo es especialmente importante ya que cerca del 80% de la basura se encuentra en la cuneta [1,2]. La función del cepillo lateral es la de barrer la basura de la cuneta, enviándola hacia el sistema de succión o al cepillo central. Se remite al lector a un artículo anterior [3], donde se describe el cepillo lateral.

El barrido de calles presenta algunos problemas. Los tipos de basura, de vías y las condiciones ambientales son variables. Por lo tanto, el cepillo lateral debería ajustarse continuamente de acuerdo a las condiciones encontradas, con el fin de optimizar su funcionamiento, en cuanto a efectividad, consumo de energía y desgaste. Sin embargo, los parámetros de operación óptimos son usualmente desconocidos. Debido a esto y a otras complejidades en la operación de una barredora, la configuración del cepillo lateral se fija usualmente al comienzo del turno y se deja así durante éste.

La revisión de la literatura en barrido de calles (ver Ref. [4]) indica que las publicaciones sobre parámetros de operación óptimos de los cepillos laterales son práctica-

mente inexistentes. Entonces, este trabajo determina configuraciones óptimas de barrido para diversos tipos de basura. Se efectuaron pruebas en un equipo de barrido que opera sobre una superficie de prueba asfaltada. Se estudiaron tres tipos de escombros: gravilla mediana, partículas pequeñas y basura delgada húmeda. Este artículo está organizado así: primero se presenta una revisión de la literatura que complementa una revisión presentada anteriormente [4]. La sección 3 describe el equipo de pruebas. Luego se presenta la metodología general. Los resultados y su análisis se suministran en la sección 5. La sección 6 concluye este trabajo.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

A pesar de la importancia y de los problemas del barrido de calles, la cantidad de publicaciones sobre el tema es muy pequeña. Esta sección se enfoca en los trabajos más relevantes; algunos trabajos investigativos han sido reportados y analizados en un trabajo anterior [4].

Por un lado, la revisión de la literatura sobre eficiencia de procesos de cepillado indica que ésta tiende a ser mejor al aumentar la presión o penetración [5-8], la velocidad de rotación [5-7] y el tiempo de cepillado [5,7]. Sin embargo, para reducir los costos relacionados con el

consumo de energía, tiempo y desgaste, es necesario limitar dichas variables.

Por otro lado, la efectividad de los cepillos laterales ha sido estudiada por Wang [9], mediante el uso del equipo experimental que se describirá en la sección 3. Se usaron dos tipos de superficies: una cama de concreto y un piso de asfalto. Se dan algunas recomendaciones para la configuración del cepillo. Se identifica un número de problemas de barrido, como el barrido hacia atrás, cuando la basura se devuelve a la cuneta, y contacto insuficiente entre el cepillo y la vía.

Sin embargo, existen problemas metodológicos en estas pruebas. Por ejemplo, las características de la cuneta del piso asfaltado no son prácticas, ya que ésta tiene una gran pendiente (10°) y es muy angosta (0,25 m). En la práctica, las cunetas tienden a ser más anchas y a tener pendientes más pequeñas. El área de trabajo del cepillo corresponde normalmente a una superficie relativamente plana, y no a una curvada como la usada por Wang [9]. Por otro lado, se asume que el ancho de la zona de barrido es de 0,45 m. De acuerdo a información teórica y práctica [10], esto es exagerado, ya que debido a la forma en que opera el cepillo, éste sólo tiene que cubrir un ancho de cuneta de 0,25 a 0,30 m aproximadamente.

Debido a estos problemas de metodología, los resultados de dichos ensayos de barrido no son apropiados para vías reales. Por lo tanto, este trabajo ha sido enfocado en satisfacer la necesidad de información útil sobre los parámetros óptimos de barrido.

3. EQUIPO DE PRUEBAS DE BARRIDO

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en el equipo de pruebas de la figura 1. El equipo tiene seis grados de libertad: rotación del cepillo, tres movimientos de translación, ángulo de ataque del cepillo, y ángulo de rotación hacia la cuneta. El ángulo de ataque del cepillo, β , es el ángulo de inclinación de éste con respecto a la horizontal, y el ángulo de rotación hacia la cuneta, es el ángulo que el cepillo inclinado se gira hacia la cuneta, desde la posición de referencia en la cual el cepillo está inclinado hacia delante de la vía. Los primeros cuatro grados de libertad son controlados desde un computador personal, y los otros dos son fijados manualmente. El cepillo es accionado mediante un sistema hidráulico similar al usado en las barredoras.

El equipo tiene una vía asfaltada de $6 \times 2 \text{ m}^2$ con dos secciones. La primera es la sección usada por Wang [9], que, como se dijo, tiene una cuneta de forma y pendientes inadecuadas. La segunda tiene una cuneta con una pendiente de $6,5^\circ \pm 0,5^\circ$ y de 0,50 m de ancho (figura 2). Entonces, esta parte de la vía de pruebas es más apropiada para la realización de los ensayos experimentales. En este trabajo se usó esta sección.

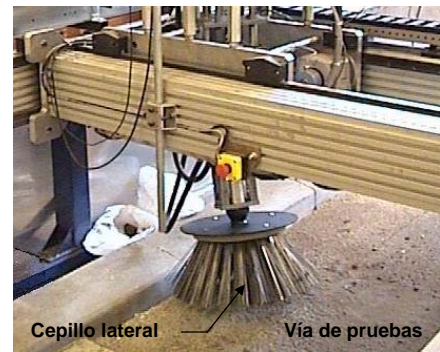


Figura 1. Equipo de pruebas de barrido.

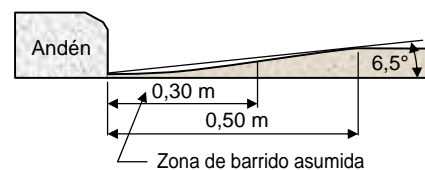


Figura 2. Representación esquemática de la cuneta de pruebas.

La figura 3 muestra los dos cepillos comerciales que se usaron. Estos cepillos son uno cortador ($\gamma = 0^\circ$) y uno con un ángulo de orientación de cerda de $\gamma = 128^\circ$, llamado aquí cepillo F128. El ángulo γ se muestra en la figura 3. Los datos de los cepillos son: longitud promedio de cerdas: 250 mm (cepillo cortador) y 240 mm (cepillo F128), número de cerdas por grupo: 60, 2 filas de grupos, 24 grupos en cada fila, ángulo de inclinación de la cerda: $\phi = 27^\circ$ (ver figura 3), radios de montaje de las filas: 115 mm y 90 mm, cerdas de sección transversal rectangular de $2 \times 0,5 \text{ mm}^2$.



Figura 3. Cepillos laterales usados en los ensayos.

4. METODOLOGÍA GENERAL

Se efectuaron ensayos de barrido bajo diversos parámetros de operación con el fin de determinar configuraciones de cepillado apropiadas. A menos que se indique lo contrario, el cepillo se puso a rotar a 100 rpm (velocidad estándar [9]) y a trasladar a 0,8 m/s (velocidad máxima del equipo). Se asume un ancho de la zona de barrido de 0,30 m, y se utilizó un ángulo de rotación del cepillo hacia la cuneta de 60° (de acuerdo a recomendaciones dadas por Peel [10]). Debido al diseño del equipo, se usaron ángulos de ataque, β , de 5°, 10° y 15°. La basura se dispersó aleatoriamente en una área de $0,3 \times 0,6 \text{ m}^2$. Cada experimento se ejecutó hasta cinco veces para mejorar la precisión de los resultados. La efectividad se calculó como el promedio de los datos; con estos datos se calcularon también los errores estándar, e .

La siguiente sección presenta y analiza los resultados efectuados para gravilla mediana, partículas pequeñas y basura delgada húmeda. Se dan además detalles metodológicos particulares para cada tipo de basura.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1. Gravilla Mediana

5.1.1. Procedimiento

Se utilizó gravilla de dimensiones entre 5 y 30 mm, con tamaño promedio entre 15 y 20 mm y altura promedio de ~10 mm. En cada ensayo se usaron 100 piezas de gravilla. La figura 4 muestra la distribución de ésta. La efectividad se calcula como la relación entre las piezas barridas y el número inicial de piezas.



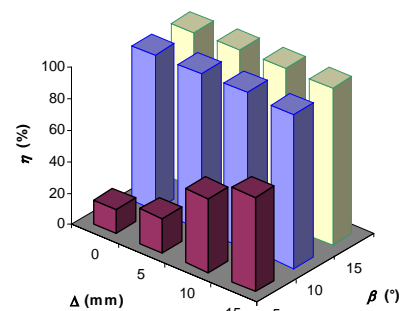
Figura 4. Distribución de gravilla mediana.

5.1.2. Cepillo F128

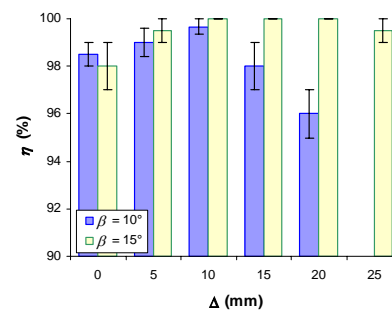
La figura 5(a) presenta la efectividad, η , del cepillo F128 para 12 configuraciones. Para $\beta = 5^\circ$, η es muy pequeño debido a que el cepillo tiende a hacer contacto con la vía en su parte trasera, barriendo la gravilla hacia la cuneta y no desde ella (barrido hacia atrás). La efectividad aumenta con la penetración, Δ (distancia vertical que se penetra el cepillo desde el primer contacto de cerda con la superficie), debido a que la probabilidad de que la gravilla quede atrapada entre las cerdas se reduce.

Cuando $\beta = 10^\circ$ ó 15° , η tiende a ser muy alto. Por esto, la figura 5(b) presenta un diagrama usando una escala diferente. El valor de η aumenta con la penetración hasta

10 mm, debido al mejor contacto cerda-superficie. Observaciones experimentales indican que tiende a haber un cierto grado de barrido hacia atrás cuando $\beta = 10^\circ$ para cualquier penetración. Debido a esto, η no llega al 100%. La efectividad se reduce desde $\Delta \approx 10 \text{ mm}$, para $\beta = 10^\circ$, debido a que ocurre barrido hacia atrás. Cuando $\beta = 15^\circ$, η alcanza 100% cuando $\Delta \approx 10 \text{ mm}$, y no se observa barrido hacia atrás hasta $\Delta = 20 \text{ mm}$.



(a) $\beta = 5^\circ, 10^\circ$ y 15°



(b) $\beta = 10^\circ$ y 15°

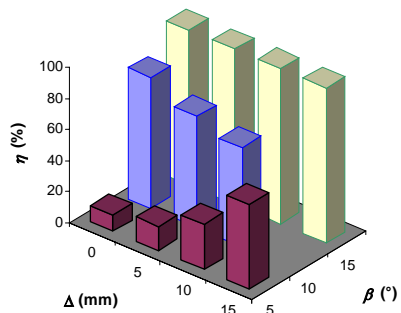
Figura 5. Efectividad del cepillo F128 – gravilla mediana; $e_{max} = 5\%$ para $\beta = 5^\circ$.

5.1.3. Cepillo Cortador

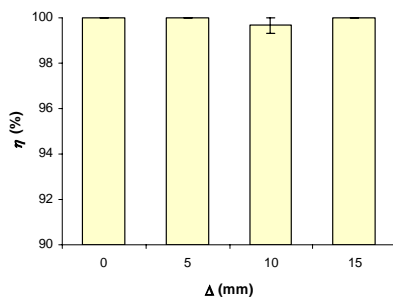
La figura 6 presenta los resultados para el cepillo cortador. Cuando $\beta = 5^\circ$, η es pequeño debido al alto grado de barrido hacia atrás, aún cuando $\Delta = 0$. Esto se debe a que $\beta = 5^\circ$ corresponde a un ángulo de ataque negativo relativo a la cuneta. Cuando Δ es pequeño (0 ó 5 mm), las cerdas no tocan el fondo de la cuneta, pero tienden a tocar la vía cuando el cepillo está girando hacia la cuneta. Como ocurre con el cepillo F128, η aumenta con Δ debido al mejor contacto cerda-superficie.

Cuando $\beta = 10^\circ$, hay una gran tendencia de algunas cerdas de “colapsar”, deformándose hacia adentro (en vez de radialmente hacia afuera, como se muestra en la figura 3(a)). Esta deformación es producida principalmente por la rugosidad de la superficie que hace que la punta de la cerda se atasque. Debido a la inclinación de las cerdas (ángulo ϕ), las cerdas colapsadas están sometidas a una gran deformación, incrementándose el ángulo de contacto del cepillo. Por esto, se produce barrido hacia atrás. El

incremento de Δ aumenta el nivel de colapso y, consecuentemente, el barrido hacia atrás, reduciéndose η . Finalmente, para $\beta = 15^\circ$, η es muy alto. Aún cuando $\Delta = 0$, hay algo de colapso que suministra suficiente contacto cerda-vía. No se detectó barrido hacia atrás.



(a) $\beta = 5^\circ, 10^\circ$ y 15°



(b) $\beta = 15^\circ$

Figura 6. Efectividad del cepillo cortador – gravilla mediana; e_{max} es 6%, 4% y 0,3% para $\beta = 5^\circ, 10^\circ$ y 15° , respectivamente.

5.1.4. Configuraciones Recomendadas

Con base en las figuras 5(b) y 6(b), para gravilla mediana se recomienda: $\beta = 15^\circ$ y $10 \leq \Delta \leq 20$ mm, para el cepillo F128, o $\Delta = 0$ hasta al menos $\Delta = 15$ mm, para el cortador. Para minimizar consumo de energía y desgaste, se debe escoger el menor Δ . De acuerdo a los resultados, ambos cepillos producen 100% de efectividad.

5.2. Partículas Pequeñas

5.2.1. Procedimiento

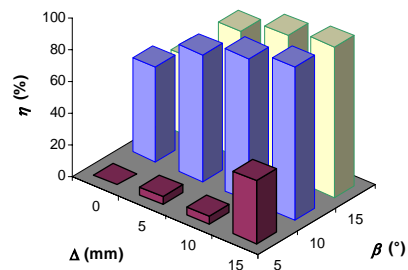
En este caso se usa una mezcla de partículas de arena ($\sim 0,1$ a ~ 1 mm) y piedras pequeñas (hasta 5 mm en su gran mayoría). La cantidad de partículas fue de $\sim 1,5$ kg. Como éstas tendían a ser dispersadas en el aire, la cantidad en cada ensayo fue en general más pequeña.

La efectividad en este caso se obtuvo aproximadamente, estimando el porcentaje de partículas removidas mediante observación. Para mejorar la estimación de η , una pequeña cantidad de partículas fue pesada y dispersada sobre la superficie. Se hizo además una comparación sistemática de fotografías tomadas después de cada

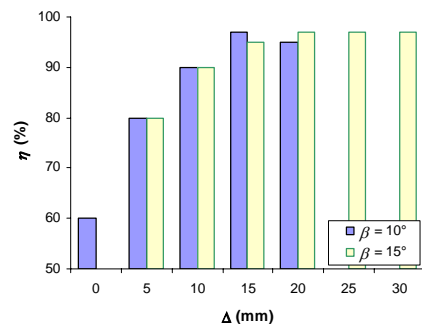
ensayo. Debe tenerse en cuenta que la efectividad en este caso depende en gran medida de la rugosidad de la superficie, ya que las partículas tienden a quedarse en las concavidades y grietas. Los valores de efectividad en vías reales podrían ser mayores a los reportados aquí, ya que la vía de ensayo es algo rugosa.

5.2.2. Cepillo F128

De acuerdo a la figura 7, para $\beta = 5^\circ$, η es muy pequeño y tiende a aumentar con Δ , al menos para $\Delta \leq 15$ mm. Cuando $\Delta = 0$, no hay contacto cerda-partículas, y el contacto cerda-superficie ocurre fuera de la zona de barrido (debido a que $\beta = 5^\circ$ corresponde a un ángulo negativo relativo a la cuneta). Al aumentar Δ , se mejora el contacto cerda-partículas, aumentándose η . Pero, como el contacto ocurre en la parte posterior del cepillo, hay un grado creciente de barrido hacia atrás.



(a) $\beta = 5^\circ, 10^\circ$ y 15°



(b) $\beta = 10^\circ$ y 15°

Figura 7. Efectividad del cepillo F128 – partículas pequeñas.

Cuando $\beta = 10^\circ$, η aumenta y luego disminuye con Δ (Fig. 7(b)). Al incrementar Δ desde cero, el ángulo de contacto del cepillo aumenta y se mejora el contacto cerda-partículas, aumentándose η . Sin embargo, cuando $\Delta \geq 15$ mm ocurre barrido hacia atrás, reduciéndose la efectividad. Cuando $\beta = 15^\circ$ ocurre algo similar, pero no se detectó barrido hacia atrás para $\Delta \leq 30$ mm. La efectividad alcanza un máximo ($\eta \approx 97\%$) cuando $\Delta = 20$ mm y permanece constante a pesar de aumentar más Δ . Las grandes penetraciones no tienden a mejorar el barrido porque las cerdas se vuelven inefectivas para alcanzar las concavidades de la superficie.

5.2.3. Cepillo Cortador

La figura 8 presenta los resultados para el cepillo cortador. Cuando $\beta = 5^\circ$, $\eta \approx 0$ para Δ en $[0, 20 \text{ mm}]$. Para $\Delta = 0$ y 5 mm, no ocurre contacto cerda-partículas debido al espacio cepillo-superficie en la zona de barrido. Al incrementar Δ desde 5 a 20 mm, se tiende a mejorar el contacto, aunque el alto ángulo de contacto del cepillo (producido por el colapso de éste) hace que casi todas las partículas se barran hacia la cuneta. Este comportamiento es diferente al del cepillo F128, para el cual η aumenta con Δ (al menos hasta $\Delta = 15 \text{ mm}$) (Fig. 7(a)). La diferencia radica en que en el cepillo F128 hay un mejor contacto en la zona de barrido, mientras que en el cepillo cortador, el contacto tiende a ocurrir fuera de esta zona.

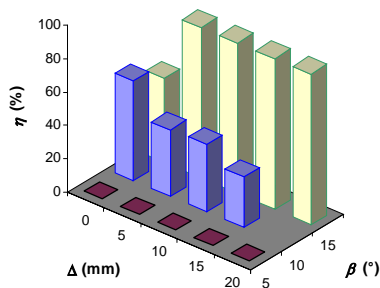


Figura 8. Efectividad del cepillo cortador – partículas pequeñas.

Cuando $\beta = 10^\circ$, el contacto comienza ($\Delta = 0$) en el fondo de la cuneta y se extiende hacia toda la zona de contacto. El mejor contacto para mayores valores de Δ es contrarrestado por el grado creciente de barrido hacia atrás. Entonces, η disminuye con Δ . Cuando $\beta = 15^\circ$, no parece ocurrir barrido hacia atrás para $\Delta \leq 10 \text{ mm}$. Por lo tanto, η tiende a ser más alto para este ángulo de ataque. Aumenta desde $\eta \approx 50\%$ ($\Delta = 0$) hasta $\eta \approx 90\%$ ($\Delta = 5 \text{ mm}$), donde permanece prácticamente constante hasta $\Delta = 20 \text{ mm}$ (figura 8). Sin embargo, se notó un cierto grado de barrido hacia atrás para $\Delta = 15$ y 20 mm , principalmente para las piedras más grandes (~5 a 8 mm).

5.2.4. Configuraciones Recomendadas

Las configuraciones recomendadas para este tipo de basura son $\beta = 15^\circ$, $\Delta = 20 \text{ mm}$ ó $\beta = 10^\circ$, $\Delta = 15 \text{ mm}$ (cepillo F128) y $\beta = 15^\circ$, $\Delta = 5 \text{ mm}$ (cepillo cortador). La efectividad del cepillo F128 para cualquiera de las dos configuraciones recomendadas es de ~97%, mientras que para el cortador es de ~90%. Por lo tanto, el cepillo F128 tiene mejor desempeño. Esto se debe principalmente a que el cepillo F128 barre con el ancho de las cerdas (2 mm), mientras que el cortador con el espesor (0,5 mm). Entonces, las cerdas F128 cubren un área efectiva mayor.

5.3. Basura Húmeda Delgada

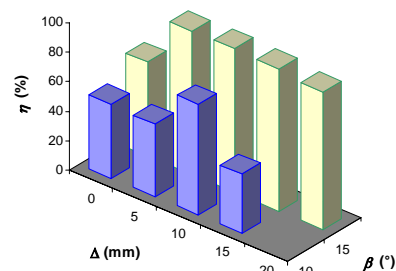
5.3.1. Procedimiento

Basura delgada, tal como hojas y maleza, podrían ser difíciles de barrer debido a su pequeña altura y a que

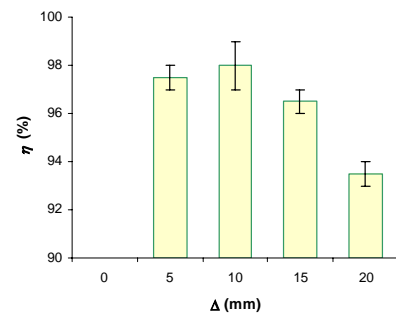
pueden adherirse a la superficie de la vía. Para estudiar este caso, se usaron pedazos de papel humedecidos con agua. En cada ensayo se usaron 50 pedazos con dimensiones entre ~5 y 15 cm. Se descartó $\beta = 5^\circ$, ya que su efecto fue estudiado en los casos anteriores, y se demostró que es inapropiado.

5.3.2. Resultados

Las figuras 9 y 10 presentan los valores de η para los dos tipos de cepillos. El comportamiento es similar al de los dos tipos de basura estudiados anteriormente. Sin embargo, el problema de barrido hacia atrás se debe no sólo a un gran ángulo de contacto del cepillo, sino también a que los pedazos de papel se enredan en éste.



(a) $\beta = 10^\circ$ y 15°



(b) $\beta = 15^\circ$

Figura 9. Efectividad del cepillo F128 – basura delgada; $e_{max} = 11\%$ para $\beta = 10^\circ$.

5.3.3. Configuraciones Recomendadas

Las siguientes configuraciones parecen ser las adecuadas: $\beta = 15^\circ$, $\Delta = 10 \text{ mm}$, para el cepillo F128, y $\beta = 15^\circ$, $\Delta = 0$, para el cortador. Se prefiere el F128, ya que suministra ~98%, mientras que el cortador da una efectividad de ~90%. Esta gran diferencia se debe en parte a que el cepillo cortador tiende a producir más barrido hacia atrás (debido al colapso del cepillo). Además, las cerdas cortadoras tienden a perforar los pedazos de papel, ya que barren con los espesores (0,5 mm), y tienden a atraparlos y luego soltarlos (algunas veces en la cuneta). Se debe tener en cuenta que las características de la basura delgada son variables en la práctica. Entonces, podrían ser necesarias pruebas adicionales.

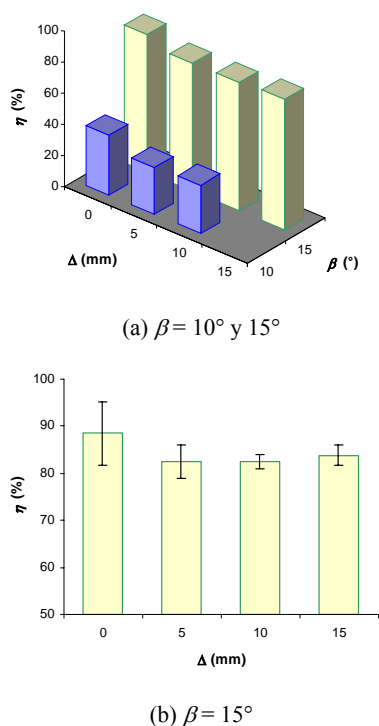


Figura 10. Efectividad del cepillo cortador – basura delgada; $e_{max} = 8\%$ para $\beta = 10^\circ$.

5.4. Notas Finales

En esta sección se incluye una predicción de los parámetros óptimos de barrido para una mezcla de los tres tipos de basura estudiados. La selección de Δ se basa en el logro de un contacto adecuado cepillo-basura y en la prevención de barrido hacia atrás para todos los tipos de basura. Se recomienda lo siguiente: $\beta = 15^\circ$, $\Delta = 15$ mm, para el cepillo F128, y $\beta = 15^\circ$, $\Delta = 10$ mm, para el cortador. Se prefiere el cepillo F128.

Es de anotar que para todos los tipos de basura, el ángulo de ataque recomendado es de 15° y que el cepillo cortador no supera al F128 en ningún caso. Entonces, este último podría usarse en todos los casos estudiados en este trabajo. Además, los resultados presentados aquí son válidos para las condiciones de las pruebas efectuadas. Las condiciones en las vías son cambiantes y los resultados deberían ser adaptados. En particular, para una cuneta de pendiente diferente, se puede calcular un ángulo de ataque equivalente, β_{eq} :

$$\beta_{eq} = \beta + \tan^{-1}(\tan \theta_{RG} \sin \xi) - \tan^{-1}(\tan \theta_{TG} \sin \xi), \quad (1)$$

donde β es el ángulo de ataque recomendado aquí, ξ es el ángulo de rotación del cepillo hacia la cuneta (60°), θ_{RG} es la pendiente de la cuneta real y θ_{TG} es la pendiente de la cuneta de pruebas ($6,5^\circ$).

6. CONCLUSIONES

Se presentó la metodología y los resultados de ensayos experimentales de barrido, efectuados para determinar configuraciones de barrido óptimas para gravilla mediana, partículas pequeñas y basura delgada húmeda. Se investigaron dos cepillos, el cortador y el F128. Se encontró que las partículas pequeñas tienden a ser difíciles de barrer, debido principalmente a que tienden a quedarse atrapadas en las irregularidades de la vía. En el caso de la basura húmeda delgada, ésta se tiende a atascar en las cerdas y a quedarse en la vía. Se propusieron configuraciones de barrido para los tres tipos de escombros, y se hizo una predicción de la configuración óptima para una mezcla de estos tres. Finalmente, se encontró que el cepillo F128 tiende a tener una mejor efectividad que el cortador. Este cepillo podría usarse casi exclusivamente con un ángulo de ataque constante.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó con el apoyo de la Universidad Tecnológica de Pereira, la Universidad de Surrey (Reino Unido) y el Programa Alban, Programa de becas de alto nivel de la Unión Europea para América Latina, n° de identificación (E03D04976CO). Se agradece también al evaluador de este artículo por sus sugerencias.

REFERENCIAS

- [1] G. Peel, M. Michielen, and G. Parker, "Some aspects of road sweeping vehicle automation," *2001 IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intellig. Mechatronics Proc., I-II*, pp. 337-342.
- [2] M. Michielen, G. A. Parker, "Detecting debris using forward looking sensors mounted on road sweeping vehicles," *Proc. Mechatronics 2000*, No.: M2000-094.
- [3] L. V. Vanegas Useche, M. M. Abdel Wahab, and G. A. Parker, "Dinámica de cepillos laterales para barrido de calles," *Sci. Tech.*, vol. 30, pp. 197-202, 2006.
- [4] L. V. Vanegas Useche and G. A. Parker, "Barrido de calles y vehículos barredores," *Sci. Tech.*, vol. 26, pp. 85-90, 2004.
- [5] N. Moumen and A. A. Busnaina, "Removal of submicrometre alumina particles from silicon oxide substrates," *Surface Eng.*, vol. 17, pp. 422-424, 2001.
- [6] W. L. III Moden, C. L. Peterson, and M. C. Hall, "Cleaning sugarbeets with fiber brushes," *Applied Eng. Agriculture*, vol. 4, pp. 501-506, 1989.
- [7] G. Zhang, G. Burdick, F. Dai, T. Bibby, and S. Beaudoin, "Assessment of post-CMP cleaning mechanisms using statistically-designed experiments," *Thin Solid Films*, vol. 332, pp. 379-384, 1998.
- [8] G. M. Burdick, N. S. Berman, and S. P. Beaudoin, "A theoretical evaluation of hydrodynamic and brush contact effects on particle removal during brush scrubbing," *J. Electrochemical Soc.*, vol. 150, pp. G658-G665, 2003.
- [9] C. Wang, "Brush modelling and control techniques for automatic debris removal during road sweeping," Ph.D. thesis, School of Engineering, Univ. of Surrey, UK, 2005.
- [10] G. Peel, "A general theory for channel brush design for street sweeping," Ph.D. thesis, School of Engineering, University of Surrey, UK, 2002.