

# INFLUENCIA DE LOS PROCESOS DE CARGA DEL MINERAL LATERÍTICO EN LOS TRANSPORTADORES DE BANDA

(Lateritic Mineral Loading Process' Influence in the Conveyors)

Roberto Johan Sierra Pérez, Mario Feliú Rosado

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (Holguín, Cuba),  
rsierra@ismm.edu.cu - mfeliu@ismm.edu.cu

(Recibido Junio 6 de 2006 y aceptado abril 15 de 2007)

<p><b>Resumen:</b> El proceso de carga del mineral laterítico en los transportadores de banda en la Empresa <i>Ernesto Che Guevara</i> presenta irregularidades durante la explotación de estos transportadores, provocan el desgaste de la banda y su destrucción paulatina. En este trabajo se determina la resistencia en los puntos de carga considerando el tamaño de los pedazos, la forma y la altura de caída. Esto permite determinar la longitud del punto de carga en función de la velocidad y del desplazamiento de las partículas sobre la banda de forma teórica y experimentalmente para los minerales lateríticos.</p>	<p><b>Abstract:</b> The conveyors used in the lateritic mineral loading's process of the "Ernesto Che Guevara Company", present irregularities that cause the deterioration of the band and its gradual destruction. Here the resistance in the load points is determined considering the size of the pieces, the form and the fall height. This allows to find the length of the load point, in the speed and the displacement function of the pieces on the band, in a theoretical and experimentally way for the lateritic mineral.</p>
<p><b>Palabras clave:</b> Transportador de banda, Longitud de carga, Resistencia punto de carga.</p>	<p><b>Key words:</b> Conveyor, Feeding, Load Length, Resistance Load Point.</p>

## 1. INTRODUCCIÓN

El transporte constituye uno de los principales eslabones del proceso tecnológico en las plantas metalúrgicas. Estas deben crear una corriente de carga de determinada potencia y dirección. Especial importancia tiene el transporte de mineral laterítico por medio de los transportadores de banda en la Empresa *Comandante Ernesto Che Guevara* (ECECG). En la industria cubana del níquel, cuyo desarrollo va en ascenso, en los últimos años se han presentados algunos problemas relacionados con los niveles de utilización de la capacidad de carga, los consumos energéticos (Loyola, 2002; Sierra, 2006) y la influencia de la altura y dirección en los puntos de carga (Rodríguez, 2006). La realización de nuevas inversiones para incrementar la producción de las plantas en explotación actualmente y la instalación de nuevas empresas productoras lleva a perfeccionar constantemente los procesos tecnológicos y a que se eleve la eficiencia energética de estos (Méndez, 2002). Actualmente hay instalados más de 34 transportadores de banda que acarrear el mineral con una productividad promedio de 800 t/h desde la descarga de los camiones VOLVO A40D, procedentes de la mina, hasta los secaderos de mineral, y de este hasta los hornos de reducción.

En el transportador de banda el material que se traslada se pone en contacto con la banda en dos zonas fundamentales, que son la de alimentación y la de reposo relativo. Esto es producto de

los cambios de dirección del movimiento de las partículas, las variaciones de su velocidad y con ello su deslizamiento y choques fuertes que ocurren durante la operación de alimentación del material (Sierra, 2005).

El transportador puede ser alimentado por uno o varios puntos a lo largo de su trayectoria. Cuando el material alimentado es a granel, la operación de alimentación debe hacerse lo más constante y uniforme posible, ya que el material se alimentará en forma de una vena continua y de dos formas fundamentales (Oriol, 1985): a) directamente desde otra máquina transportadora y b) a través de tolvas de alimentación. En ambos caso el eslabón anterior al transportador deberá tener una productividad igual o ligeramente inferior a este para garantizar el flujo productivo. Para garantizar el buen funcionamiento del transportador, la operación de los materiales a granel deberá cumplir ciertas condiciones, a saber:

- La descarga del material sobre la banda debe de ser centrada y fluir uniformemente.
- Se deben disminuir los efectos nocivos originados al caer el material sobre la banda y los apoyos de rodillos amortiguadores.
- No debe producirse derramamiento del material en la zona de alimentación, ni estancamiento.
- La alimentación no debe realizarse en todo el ancho de la banda.

El mayor desgaste de la banda tiene lugar en la zona de alimentación, debido al deslizamiento del material por esta y también a los choques producidos durante la caída libre de las partículas, sobre todo de las de gran tamaño. El deslizamiento del material es resultado de la diferencia de velocidades entre las partículas alimentadas y la banda. El uso de canales inclinadas a favor del movimiento de la banda atenúa grandemente este efecto. A mayor diferencia de velocidades entre la banda y el material, mayor será el desgaste de la primera, debido a que las partículas necesitarán mayor espacio para lograr alcanzar la velocidad de la banda a costa de la fricción entre ambas, producto de lo cual surge una resistencia concentrada que influye en el funcionamiento del sistema.

Considerando lo expresado, el propósito de este trabajo es determinar la longitud racional de la zona de carga del mineral laterítico, considerando el tamaño y la forma de la partícula para diferentes alturas de caída en función de la velocidad de movimiento de la banda, de manera experimental y teórica.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso de alimentación del material laterítico sobre la banda está muy documentado por Toll (1993) y Rodríguez (2006), considerando que la banda esté totalmente libre. Al caer el material desde cierta altura, las partículas adquieren energía cinética en virtud de la altura de caída libre y producto de la transformación de la energía potencial en energía cinética (Masso, 1982); este movimiento se ve bruscamente frenado por encontrarse la banda como un obstáculo que impide la continuidad del movimiento, posiblemente porque posee otra dirección de movimiento y otra energía cinética. Si la banda no tuviera movimiento y se obviarán las características elásticas de esta y de las partículas, la velocidad de estas, al producirse el choque, se anularía. Sin embargo, esto en la realidad no es así. Debido a las propiedades elásticas de la banda y de las partículas, ambas se deforman, y en mayor medida la banda cuando es de goma, propiciando la aparición de grietas y rajaduras al ser vencido su límite de elasticidad y penetrar las partículas en su estructura. Además, sucede el salto de las partículas al ser rechazadas por la banda, siempre que no supere su límite de elasticidad. El movimiento de la banda arrastra consigo las partículas que caen sobre ella y les transmite su energía cinética por medio de la fricción hasta que quedan en reposo relativo.

Al comenzar la alimentación se produce en toda la zona, con una alimentación perfectamente uniforme (en la realidad es muy irregular) en toda el área, la colocación de una primera capa de material que se desplaza conjuntamente con la banda. A esta capa le sigue otra que caerá en un intervalo de tiempo  $dt$  posterior. Esta segunda capa no cae completamente sobre la primera que debido al movimiento de la banda ya se habrá movido una distancia  $dl$ . Lo mismo ocurre con las restantes capas, por lo cual se irá incrementando la altura del material depositado en la dirección de la banda en dicha zona. Al mismo tiempo, la altura del área de contacto del material con las guarderas laterales se incrementa en la dirección del movimiento por comportarse como una pared contenedora, y el material, al salir de la zona de alimentación y de las guarderas,

se acomoda de acuerdo con su ángulo de talud dinámico, llenando el ancho de la banda según la cantidad que haya alimentado.

De este análisis se concluye que la resistencia total en la zona de carga está provocada por el cambio de dirección y asimilación de la energía cinética por parte del material; durante este proceso actúa el coeficiente de rozamiento entre el material y la banda y las guarderas. La obtención de las ecuaciones que rigen esta resistencia y su vinculación con la velocidad de transporte para poder establecer los criterios de selección fue determinada por Sierra (2005) para los minerales lateríticos.

La ecuación que rige la magnitud de la fuerza de resistencia por el cambio de dirección de la velocidad de movimiento de la banda ( $v_2$ ) y la velocidad de movimiento de la carga ( $v_1$ ) en el mismo sentido que la banda (signo -) y contrario (signo +) es, en m/s:

$$w_{za} = \frac{Q \cdot [v_2^2 \pm v_1^2]}{2 \cdot 3,6 \cdot g \cdot [v_2 \pm v_1]} \text{ [N]} \quad (1)$$

Donde  $Q$  es la productividad del transportador en t/h.

Al analizar el proceso de alimentación se plantea la irregularidad en la distribución del material en la zona de carga. De este análisis se concluye que el peso lineal del material en la zona ( $q_{za}$ ) es igual a la mitad del peso lineal en la zona de reposo relativo (zona cargada) ( $q$ ); esto es debido al incremento de la cantidad de material desde un valor nulo hasta la magnitud del peso lineal del material en la zona de reposo relativo. De otra forma, el peso lineal del material en la zona de alimentación es el peso contenido en dicha zona con respecto a su longitud.

El material contenido en la zona de alimentación ofrece resistencia a su movimiento al ponerse en contacto con la banda y con las guarderas, provocando por ello el desgaste de estos elementos por la fricción aparecida. Existirán, por lo tanto, dos fuerzas de resistencia: una sobre la banda y otra sobre las guarderas.

$$w_{za} = \frac{k \cdot f_r \cdot Q \cdot l_{za}}{2 \cdot 3,6 \cdot v} \text{ [N]} \quad (2)$$

La magnitud del coeficiente de proporcionalidad  $k$  da la medida de cuánto se diferencia la partícula irregular de la forma cúbica; el coeficiente de proporcionalidad es la razón entre el volumen real de la partícula y el del cubo imaginario.

De la ecuación (2) se observa que la velocidad de transporte no depende, en lo absoluto, del tamaño de las partículas, sino de la forma de estas, del coeficiente de fricción del material con la banda y de la componente de la velocidad de caída de las partículas en el sentido del movimiento de la banda.

La longitud de la zona de alimentación ( $l_{za}$ ) no es una zona arbitraria, ni tiene por qué coincidir con la longitud de las

guarderas laterales; su sentido físico coincide con la longitud del deslizamiento del material sobre la banda ( $L_d$ ) hasta alcanzar la velocidad de esta, y teóricamente se puede determinar por:

$$L_d = \frac{v \cdot [v^2 \pm v_0^2]}{g \cdot [v \pm v_0]} \quad (3)$$

Obsérvese que en (3) no se considera el coeficiente de forma, las guarderas laterales y el coeficiente de fricción. Si el material se alimenta verticalmente, entonces (3) se simplifica y se utilizará para mostrar su veracidad con los datos experimentales. En este sentido se trata de comprobar que partículas de forma similar y diferentes tamaños tienen igual comportamiento, y que partículas de configuración irregular y disímil se comportan de forma heterogénea. El desempeño de las partículas se establece en virtud del desplazamiento de estas sobre la banda desde su caída hasta que adquieran el estado de reposo relativo, siendo alimentadas desde diferentes alturas (ver tabla 3).

El mineral laterítico utilizado como materia prima para obtener Ni más Co se caracteriza por: Peso volumétrico: 1,21 t/m<sup>3</sup>; Humedad: 36,5%; Contenido promedio: (Ni-1,92%), (CO-0,105%), (Fe-38,5%); Granulometría menor de 700 mm y Ángulo del talud dinámico 36°.

Cuando los experimentos se efectúan directamente en el objeto funcionando se presentan dificultades inevitables, como al realizar las mediciones se pueda afectar el flujo de producción o problemas para la obtención del resultado experimental de las variables deseadas.

Como instalaciones experimentales se emplearon los transportadores de banda escala industrial, utilizados en el flujo tecnológico de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Para el ajuste de la velocidad de movimiento de la banda se determinó experimentalmente la longitud de la zona de alimentación para partículas de diferente forma, diámetros y alturas de alimentación.

**Tabla 1.** Datos técnicos de los transportadores utilizados en las mediciones.

Transportador	TR-2	TR-5	TR-7	TR-15
Longitud; m	133,50	222,40	195,50	110,00
Ancho Banda; m	1,60	1,40	1,60	1,60
Productividad	1800 t/h	750 t/h	750 t/h	1800 t/h
Velocidad; m/s	2,08	1,87	1,97	2,45

### 3. RESULTADOS

Para ejecutar el experimento se tomaron muestras del mineral de diferentes tamaños y configuraciones similares (redondeadas, aplanadas y cuadradas), las cuales se dejaron caer desde diferentes alturas (0,5 m, 1,0 m y 3,0 m) sobre el

transportador con velocidad constante de la banda. Midiendo previamente la altura de caída y conociendo el tamaño de la muestra, se realizó la medición del desplazamiento de la muestra sobre la banda hasta su reposo relativo y también la distancia entre el punto de caída y el punto donde deja de deslizarse, alcanzando el reposo relativo. Los resultados alcanzados se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2.** Valores experimentales promedio.

Transportador	TR-5	TR-7	TR-2	TR-15
Velocidad; m/s	1,87	1,97	2,08	2,45
Lza; m	0,55	0,59	0,671	0,90

De los resultados obtenidos se observa que el recorrido promedio de las muestras tomadas de mineral laterítico, con respecto a la banda, oscila por lo general entre 0,5477 y 0,9000 m, con valores mínimos de 0,290 m y máximos de 1,632 m, independientemente de la altura de caída y que no dependen en gran medida del tamaño de las partículas.

Para determinar el modelo que describe el desplazamiento de las partículas del mineral laterítico sobre la banda (variable dependiente), obtenido a partir de los resultados de las mediciones experimentales, plasmado en la tabla 3, se consideran las variables independientes: diámetro de las partículas de mineral laterítico alimentadas al transportador, velocidad de movimiento de la banda y altura de caída de los pedazos de mineral laterítico sobre la banda en movimiento.

Como la probabilidad de la variable diámetro de las partículas de mineral laterítico alimentadas al transportador es igual a 0,4838 y mayor que 0,05 no es significativa, por tanto se elimina del modelo.

Sierra (2006) hace un análisis de las regularidades del comportamiento de la granulometría con respecto a la humedad del mineral laterítico, que en este caso no se analiza por las razones anteriores. Entonces el modelo queda

$$L_p = 688,84V + 0,192H - 1118,87 \text{ (mm)} \quad (4)$$

$L_p$  (mm): desplazamiento de los pedazos de mineral laterítico al caer sobre la banda hasta su reposo relativo.

$V$  (m/s): velocidad de movimiento de la banda.

$H$  (mm): altura de caída de los pedazos de mineral laterítico sobre la banda en movimiento.

La media del recorrido de la partícula con relación a la banda fue de 0,72 m. A modo de verificación se emplea la ecuación (3) para los datos del transportador, de donde se obtiene que  $l=0,62$  m. Comparando los resultados obtenidos experimentalmente y teóricamente se concluye que no obstante la influencia de las características elásticas, no incluidas en las ecuaciones anteriores, para  $V_0=0$ , los resultados son cercanos y por tanto ello prueba la veracidad de estas expresiones (ver figura 1).

**Tabla 3.** Promedio de los desplazamiento de las partículas de mineral laterítico sobre los transportadores en los puntos de carga

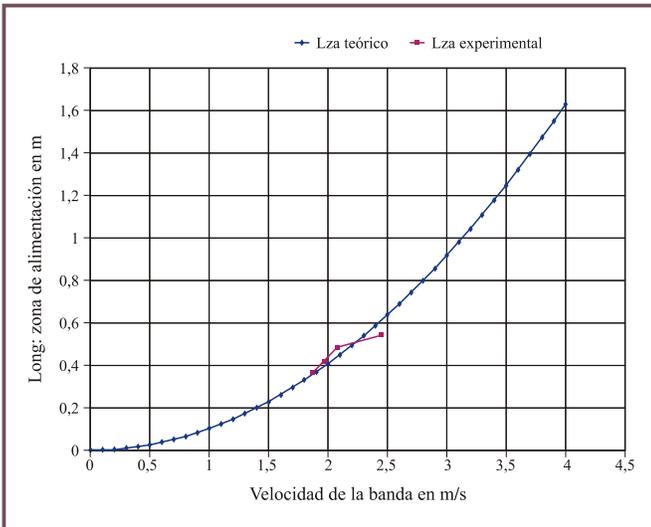
<b>TRANSPORTADOR TR-5 V=1,87 m/s</b>												
Tamaño	Altura de caída de las partículas de mineral laterítico sobre la banda											
	500 mm				1000 mm				>3000 mm			
	a1		a2		a3							
	redon	aplan	cuadr	promed	redon	aplan	cuadr	promed	redon	aplan	cuadr	promed
30	343	311	367	296	462,1	387	413	420,7	678	567	450	565
40	367	332	393,6	364,2	476	402	440	439,333	698	589	522,5	603,17
50	380	362,5	389	358,34	498	408	455	453,667	785	594	579	652,67
60	407	354	405	388,667	488	423	463	458	820	645	687	717,33
70	455	367	380	400,667	589	445	480	504,667	890	676	776	780,67
100	489	421	431	447	612	478	501	530,33	927	887	987	933,67
300	523	456	405	461,333	639		530	584,5	1012	999	1129	1046,7
500	590		411	500,5								
			402,088				484,46				757,02	
<b>TRANSPORTADOR TR-7 V=1,97 m/s</b>												
30	290	330,62	420,65	347,09	541	412	509	487,333	678	395,9	612	561,97
40	395	322	436,9	384,633	567	434	545	515,333	701	456	634	597
50	400	334	421,5	385,167	593	441	576	536,667	743	406,8	656	601,93
60	421	347,6	434	400,867	621	501	593	571,667	892	468	665	675
70	465	361,6	456	427,533	700	512	621	611	956	589	789	778
100					773	530	646	649,667	1008	890	1129	1009
300							728	728	1106	909	1122	1045,7
500									990	934	1089	1004,3
700									987	1034	991	1004
			389,058				585,6				808,54	
<b>TRANSPORTADOR TR-2 V=2,08m/s</b>												
30	442,5	466,7	434	447,733	500	375,2		437,6	789	709	466,5	654,83
40	443,1	415	444	434,033	513	400,8		456,9	798	718	756	757,33
50	463,3	462,5	456	462,9	525	435	504	488	797	745	767	769,67
60	492			492	540,3	542	523	541,15	845		809	827
70	510,2	488,6		499,4	575	520,3	600	565,1	1231		1127	1179
100	567	500	545	537,333	592		619	605,5	1356		1234	1295
300	672	623	666	653,667	668			668	1400		1345	1372,5
			503,867				537,46				979,33	
<b>TRANSPORTADOR TR-15 V=2,45m/s</b>												
30	501	435	523	486,333	675	590	678	647,667	1345	1009		1177
40	523	451,3	532	502,1	689	607	680	658,667	1350	1123		1236,5
50	534	471,8	567	524,267	734	623	730	695,667	1434	1238		1336
60	547,4	512,9	556	538,767	789	690	790	756,333	1467	1311		1389
70	687	669		678	898	703		800,5	1485	1345		1415
100	656	678	690	674,667	930	823	820	857,667	1609	1378		1493,5
300	768								1809	1456		1632,5
			567,356				736,08				1382,8	

En la tabla 2 se muestran los valores experimentales promedio de desplazamiento  $L_{za}$  y la velocidad  $V$  de cada transportador.

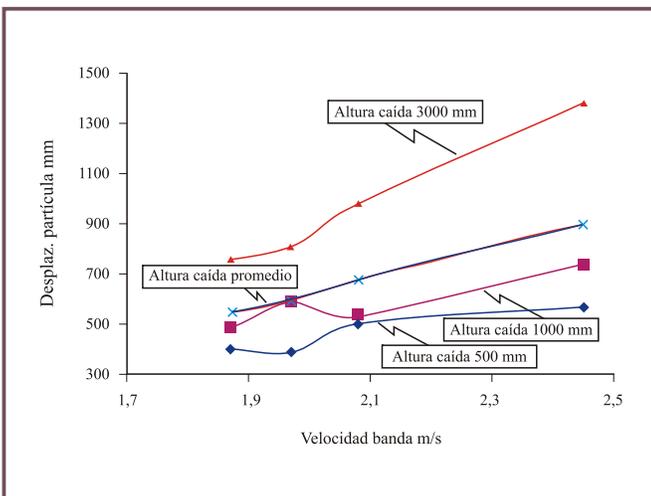
El procesamiento estadístico de los resultados se efectúa mediante los errores admisibles de los valores de las variables, utilizando como herramienta Microsoft Excel, Mathcad Plus 6.0. Los parámetros de cálculo del análisis estadístico son la media aritmética, la desviación media, la varianza muestral, el criterio de la  $t$  de student para una probabilidad de  $t_{0,95}$ . En todos los casos se confirma que  $t$  es menor que  $t_{0,95}$ , por lo que la dispersión entre los resultados obtenidos no es significativa, encontrándose el error estándar de la media aritmética por debajo del 5%. La validez de los valores experimentales con el modelo teórico se desarrolla a través del error relativo, cuyo

valor máximo obtenido es de  $E=3,24\%$ , que está por debajo del 5%.

La figura 2 representa el desplazamiento de las partículas de mineral laterítico al caer sobre la banda en función de la velocidad del movimiento para diferentes alturas de caída (500, 1000 y 3000 mm). Se aprecia que el desplazamiento de las partículas sobre la banda se incrementa a medida que aumenta la velocidad de movimiento y se hace mayor en el orden que se aumenta la altura de caída del mineral. En consecuencia con estos resultados, se induce que el desgaste de la banda se intensifica con el aumento de la altura de caída del mineral de la superficie de contacto y la longitud de deslizamiento del material, así como el impacto y la presión contra la banda y los



**Figura 1.** Variación de la longitud de desplazamiento de las partículas en la zona de alimentación en función de la velocidad de la banda, teórica y experimentalmente.



**Figura 2.** Desplazamiento de las partículas de mineral laterítico al caer desde distintas altura sobre la banda, en función de la velocidad de movimiento de esta última.

rodillos de apoyo en la zona de carga. Además, como la forma de las partículas es irregular, presentan muchas aristas que intensifican el desprendimiento de pequeñas porciones de la banda por hendidura y fatiga; en este caso, se incrementan para el mineral serpentinitico por tener mayor dureza.

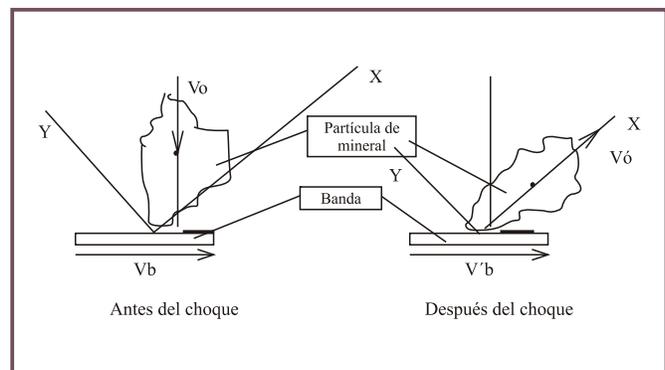
Este problema se observa en el taller de preparación de mineral de la ECECG en los transportadores de banda, donde la altura de alimentación varía desde 2 m hasta más de 12 m. Esto se pone de manifiesto en los siguientes transportadores, donde la frecuencia de avería es alta en comparación con otros transportadores. En los transportadores TR-1A y TR-1B, la altura de caída del mineral es de 14 m, lo que trae como consecuencia rajaduras de la banda, separación de pequeñas

partículas de la banda y destrucción de los apoyos de rodillos en el punto de carga; es decir, desajuste de los rodamientos y soportes, desmontaje, destrucción, avería y afloje de las guarderas, así como grandes vibraciones y ruidos fuertes por encima de los 70 dB.

Para el comportamiento del desplazamiento de las partículas sobre la banda, al caer el material a diferentes alturas se aplicó el siguiente modelo lineal en función de la velocidad de la banda:

$$Despl = 607,74 \cdot v - 593 ; \text{ mm} \quad (5)$$

Se observó que para el movimiento a baja velocidad de la banda, de 1,87 m/s a 2,0 m/s, el desplazamiento de las partículas sobre la banda es más desordenado, teniendo fluctuaciones la distancia recorrida y su dirección. A partir de 2,0 m/s el movimiento es más ordenado en dirección y la longitud recorrida de las partículas aumenta de forma lineal, con respecto a la velocidad de movimiento de la banda, y la pendiente del modelo es mayor con el aumento de la altura de caída del mineral sobre la banda. El fundamento teórico se debe a que con el aumento de la velocidad de la banda la resultante (fuerza o cantidad de movimiento) de la banda sobre las partículas es mayor. El choque de las partículas sobre la banda se comporta como una percusión. La dirección de movimiento de la carga en este caso es perpendicular al movimiento de la banda y la banda se considera como un cuerpo de gran masa.



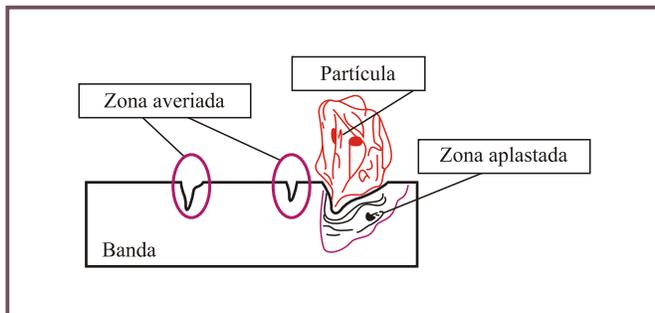
**Figura 3.** Comportamiento de una partícula de mineral laterítico durante el choque con la banda.

Cuando la partícula choca con la banda, esta se deforma durante un periodo y necesita otro periodo de recuperación. El módulo del periodo de la recuperación es menor que el módulo del periodo de la percusión. La relación de ambos módulos se denomina coeficiente de restitución y se puede expresar en función de las velocidades relativas antes y después del choque, según su línea de choque. La fuerza ( $F$ ) aplicada por la partícula sobre la banda varía proporcionalmente de modo continuo a la deformación de la banda desde un valor inicial nulo hasta un valor admisible.

$$F = K \cdot X \quad (6)$$

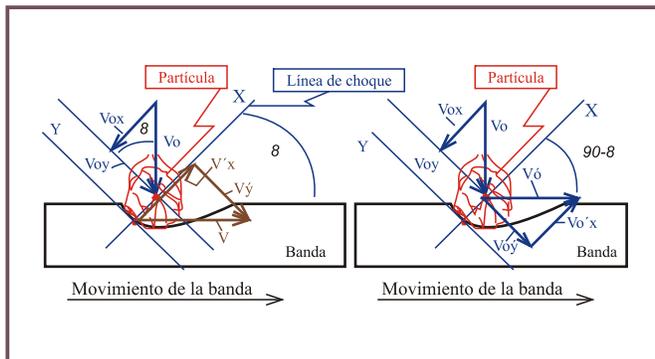
Donde  $K$  (N/m) es el coeficiente de rigidez de la banda o razón de la deformación y  $X$  (m) la deformación de la banda.

Si la energía con que llega la partícula a la banda, que depende de la altura y la masa, supera el valor de la energía potencial elástica de la banda, entonces se produce la ruptura y desprendimiento de partículas del material de la banda. Si a este fenómeno se le añade la forma irregular de las partículas, con aristas cortantes, entonces el tiempo de vida útil de la banda disminuye considerablemente (ver figura 4). Este fenómeno está presente en la alimentación del mineral laterítico sobre los transportadores de banda en la ECECG.



**Figura 4.** Averías y deformaciones de la banda durante la alimentación de los pedazos de mineral laterítico.

Como la banda es elástica y las partículas de mineral de serpentina tienen aristas cortantes y penetran en la banda, sobre la partícula actúa una fuerza elástica opuesta, durante un intervalo de tiempo que está en contacto con la banda (choque). La componente vertical del ímpetu o cantidad de movimiento y, por consiguiente, la componente vertical de la velocidad ( $V_0$ ) de la partícula varía según la línea de choque definida ( $V_0'x$ ), bajo un ángulo (ver figura 5).



**Figura 5.** Deformación de la banda durante el impacto de los pedazos de mineral de serpentina desde alturas considerables.

Como la masa del transportador se puede considerar infinita a todos los efectos, no se conserva el ímpetu. Empleando el coeficiente de restitución ( $e$ )

$$V_0'x - V'x = e(Vx - V_0x) \tag{7}$$

$$V_0x = V_0 \cdot \text{Sen}\theta \tag{8}$$

$$V_0y = V_0 \cdot \text{Cos}\theta \tag{9}$$

$$V_0 = \sqrt{2 \cdot G \cdot H} \tag{10}$$

$$V_0'x = V_0x - \frac{2 \cdot \Delta X \cdot \text{Cos}\theta}{\Delta t} \tag{11}$$

$$V'x = V \cdot \text{Cos}\theta \tag{12}$$

$$V'y = V \cdot \text{Sen}\theta \tag{13}$$

$$V_0'y = V_0y - \frac{2 \cdot \Delta X \cdot \text{Cos}\theta}{\Delta t} \tag{14}$$

sustituyendo en (7) nos queda

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{(e+1)}{2} \cdot \left( V_0 - \frac{V}{\text{Tan}\theta} \right) \tag{15}$$

donde

$V_0$  (m/s): velocidad de caída de la partícula desde una altura  $H$ ;  
 $V$  (m/s): velocidad de movimiento de la banda;  $\Delta X$  (m); es la deformación de la banda durante el impacto del pedazo de mineral.

$$\Delta X = \Delta Xd + \Delta Xf \tag{16}$$

$\Delta Xd$ : es la deformación, hendidura o aplastamiento de la banda por el impacto de los pedazos de mineral al caer, en m.

$\Delta Xf$ : es la flexión de la banda cuando los pedazos caen entre dos apoyos de rodillos; en m.

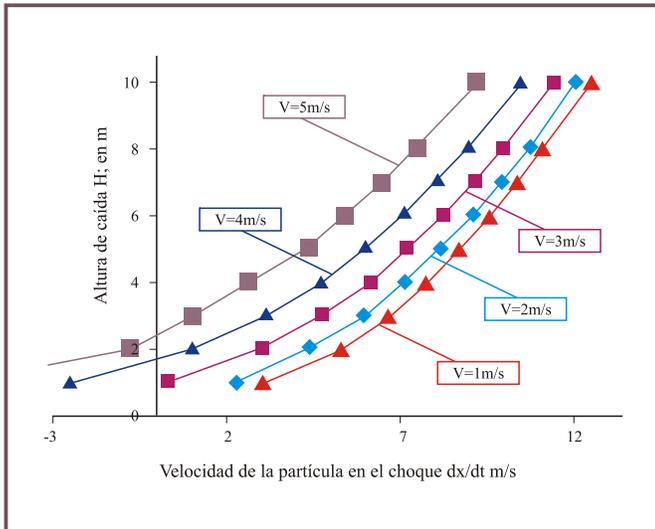
$\Delta t$ : es el tiempo durante el cual se realiza el choque; en seg.

La ecuación (15) obtenida representa el modelo teórico para determinar la velocidad media de deformación y restitución de la banda por el choque de ella con los pedazos de material alimentado desde diferentes alturas. Representa la energía potencial elástica durante la colisión, las pérdidas de energía mecánica de deformación.

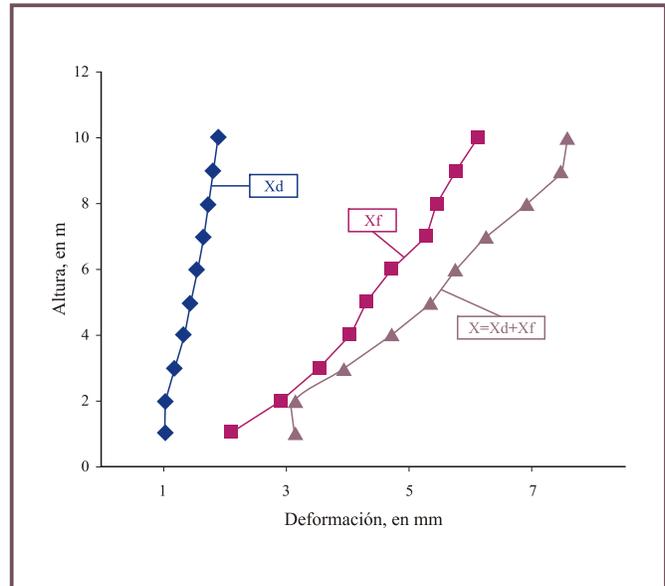
De la figura 6 se observa que a medida que aumenta la velocidad de movimiento de la banda para una misma altura, disminuye la velocidad de deformación de la banda; incluso para determinados valores, el material se desplaza en sentido contrario al movimiento de la banda en el punto de carga.

$$\Delta Xd = \Delta Xsd + \sqrt{\Delta Xsd^2 + 2 \cdot H \cdot \Delta Xsd} \tag{17}$$

$$\Delta Xf = \Delta Xsf + \sqrt{\Delta Xsf^2 + 2 \cdot H \cdot \Delta Xsf} \tag{18}$$



**Figura 6.** Variación de la velocidad de deformación de la banda por aplastamiento y flexión para distintos valores de velocidad de la banda en función de la altura de caída del pedazo de mineral laterítico.



**Figura 7.** Variación de la deformación de la banda en función de la altura de caída del pedazo de mineral laterítico.

Donde

$\Delta X_{sd}$ : deformación estática, hendidura o aplastamiento de la banda provocada por el peso de los pedazos de mineral sobre la banda, en m.

$\Delta X_{sf}$ : flexión estática provocada por el peso de los pedazos de mineral sobre la banda entre dos rodillos, en m.

$$\Delta X_{sd} = \frac{((qc + qb) \cdot Xb)}{E \cdot (0,7 \cdot B)} \quad (19)$$

$$\Delta X_{sf} = \frac{((qc + qb) \cdot lr^4)}{48 \cdot E \cdot \left[ \frac{1}{12} \cdot \left[ \frac{qb}{g} \cdot lr \cdot (lr^2 + Xb^2) \right] \right]} \quad (20)$$

donde:

qc: peso lineal de la carga; en N/m

qb: peso lineal de la banda; en N/m

Xb: espesor de la banda; en m

B: ancho de la banda; en m

E: módulo de elasticidad de la banda, en N/m<sup>2</sup>

Lr: distancia entre dos rodillos en los puntos de carga; en m

En la figura 7 se observa que la deformación de la banda por aplastamiento es mucho menor que la deformación por flexión. En ambos casos se incrementan con el aumento de la altura de caída del pedazo de mineral laterítico. Las observaciones reales de las hendiduras, huecos en la banda por las partes desprendidas, originadas por los impactos de los pedazos de mineral durante la alimentación en los transportadores de la planta de preparación de mineral oscilan entre 1,0 y 6,5 mm, que coincide con aproximación del 90% de los valores teóricos, mostrados en la gráfica.

El valor teórico del ángulo  $\theta$  se puede calcular por

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}}{2 \cdot V} \quad (21)$$

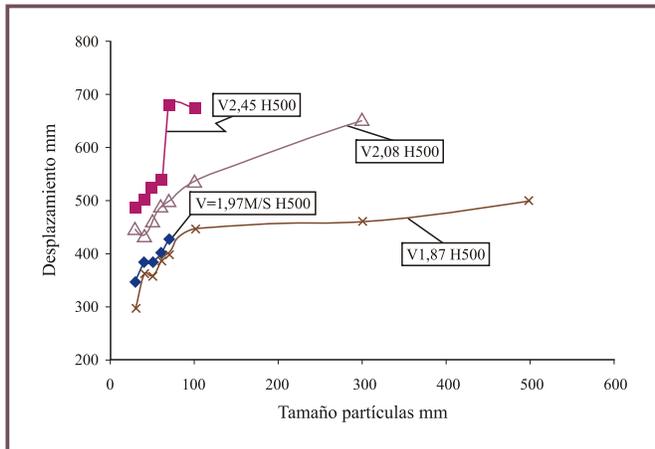
donde H: es la altura de caída del mineral sobre la banda en los puntos de alimentación. En la práctica, este ángulo puede variar por otros factores reales. Si el centro de masa de la partícula no coincide con su línea de choque con la banda, entonces, la partícula gira según el sentido en que esté su centro de masa con respecto a la línea de choque, como se puede apreciar en la figura 3. Y puede suceder en el mismo sentido de movimiento de la banda o contrario. Cuando es contrario al movimiento de la banda, el efecto negativo sobre la banda es mayor. Mientras mayor es el ángulo  $\theta$ , menor es el efecto negativo sobre la banda. De estas irregularidades depende también el desplazamiento de las partículas de mineral sobre la banda, cuyos valores experimentales están en la tabla 3.

Las figuras 8, 9, 10 y 11 representan el desplazamiento de las partículas de mineral laterítico en función de la composición granulométrica para alturas de caída del mineral de 500, 1000 y 3000 mm, con distintas velocidades. En todos los casos observamos que para partículas hasta de 100 mm, al caer desde diferentes alturas, el movimiento de desplazamiento sobre la banda es más desordenado. Por encima de estos tamaños de partículas el desplazamiento de estas sobre la banda tiene una pendiente más suave que el modelo estadístico que describe su proceso. Es importante disminuir la altura de caída del mineral sobre la banda durante el llenado para la carga con partículas de hasta 100 mm por su movimiento irregular en magnitud y dirección, así como para mayores de 100 mm, ya que entonces se incrementa el impacto sobre la banda por tener mayor masa.

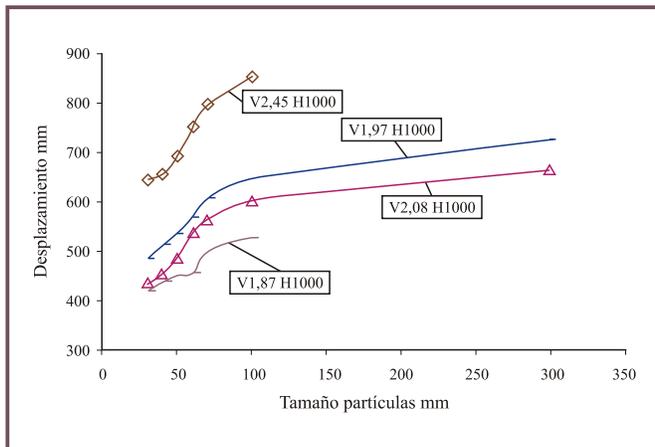
La figura 11 representa el comportamiento del desplazamiento de las partículas de mineral laterítico al caer sobre la banda en movimiento con velocidad constante en función del tamaño de ellas, para diferentes alturas de caída. Se observa que mientras mayor es el diámetro de las partículas, mayor es el desplazamiento sobre la banda. Las partículas hasta de 100 mm presentan un incremento mayor del desplazamiento sobre la banda, que las partículas mayores de 100 mm, como muestra la figura 11 y es descrito por un modelo logarítmico. El desgaste de la banda se incrementa con el aumento del desplazamiento, sin embargo, a partir de 100 mm de tamaño de partículas, el desplazamiento no se incrementa, pero hay que considerar que el efecto que producen contra la banda y los rodillos y las guarderas es mucho mayor.

$$Despl = 135,75 \cdot [Ln(a)] + 89,544 \text{ (mm)} \quad (22)$$

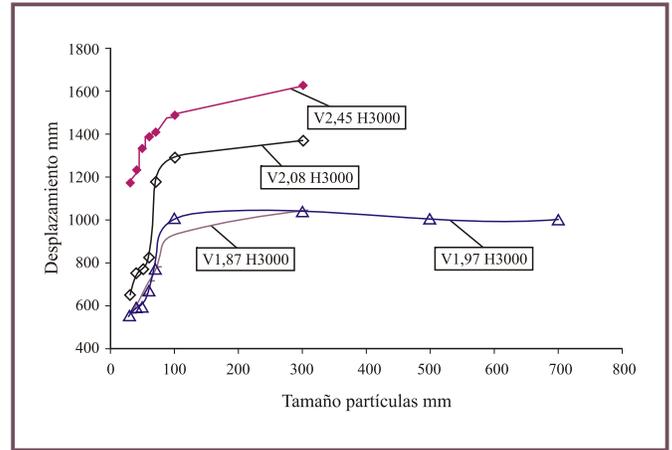
donde a: es tamaño de las partículas, en mm



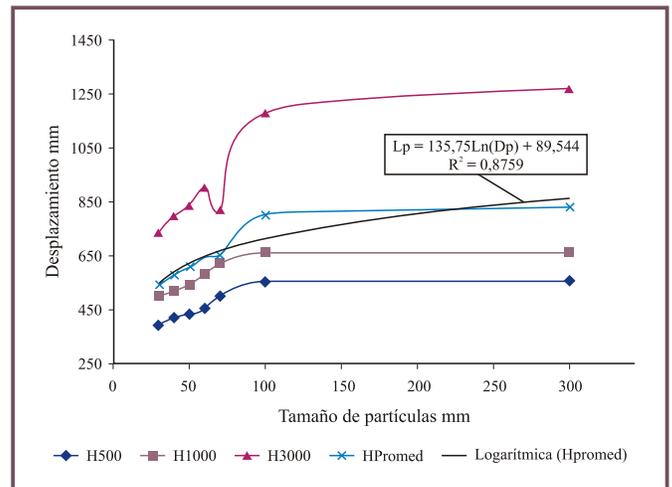
**Figura 8.** Desplazamiento de las partículas de mineral laterítico al caer desde una altura de 500 mm, para diferentes valores velocidades del movimiento de la banda en función del tamaño de las partículas.



**Figura 9.** Desplazamiento de las partículas de mineral laterítico al caer desde una altura de 1000 mm, para diferentes valores velocidades del movimiento de la banda en función del tamaño de las partículas.



**Figura 10.** Desplazamiento de las partículas de mineral laterítico al caer desde una altura de 3000 mm, para diferentes valores velocidades del movimiento de la banda en función del tamaño de las partículas.



**Figura 11.** Desplazamiento promedio de las partículas de mineral laterítico al caer desde diferentes alturas, para diferentes valores velocidades del movimiento de la banda en función del tamaño de las partículas.

## 4. CONCLUSIONES

El desgaste de la banda en los puntos de carga se puede reducir disminuyendo la diferencia de velocidades entre el movimiento de la banda y el desplazamiento de las partículas del mineral laterítico sobre la banda. A medida que se aumenta la velocidad del movimiento de la banda se incrementa la longitud de desplazamiento ( $L_p$ ) de las partículas del mineral laterítico sobre la banda, provocando el desgaste acelerado de la banda.

El impacto de los pedazos de mineral laterítico sobre la banda, que depende de la altura de caída y del tamaño y la forma de estos, incrementa la destrucción de la banda para alturas mayores de 600 mm, cuyos valores reales coinciden con los valores teóricos con un error menor del 5%.

El desplazamiento de las partículas de mineral laterítico sobre la banda depende de la forma, para velocidades menores de 2 m/s, mientras que para velocidades mayores todas las partículas, independientemente de la forma, tienen comportamientos similares.

Se obtiene un modelo teórico que permite determinar y evaluar la variación de la velocidad de deformación de la banda cuando se alimenta la carga desde diferentes alturas.

El desgaste de la banda se incrementa con el aumento del desplazamiento, sin embargo, con partículas de tamaño mayor de 100 mm el desplazamiento no se incrementa, pero hay que considerar que el efecto que producen contra la banda, los rodillos y las guarderas es mucho mayor.

La deformación de la banda por aplastamiento es mucho menor que la deformaron por flexión. En ambos caso se incrementan con el aumento de la altura de caída del pedazo de mineral laterítico sobre la banda.

## 5. REFERENCIAS

- Loyola Fernández, Roberto (2002). Estandarización del Sistema de Transporte por Transportadores de Banda en el Taller 01 de la ECECG. Trabajo de Diploma. Tutor MSc. Ing. Roberto Sierra Pérez. ISMM. Holguín, Cuba.
- Masso Vásquez, F. (2002). Mecánica Teórica, T. I y II. Santiago de Cuba. Oriente, 1982.

- Méndez G. O. (2002). Automatización de metodología de cálculo para los transportadores de banda. Trabajo de Diploma. Tutor MSc. Ing. Roberto Sierra Pérez, Lic. Manuel Lórez Vidal. ISMM. Holguín, Cuba.
- Oriol G., J. M. y Aguilar, P. F. (1995). Máquinas de transporte continuo. T. I. Cuba: Ed. Pueblo y Educación.
- Rodríguez Andro, Luis (2006). Influencia de la alimentación del mineral laterítico sobre los transportadores de banda en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Trabajo de Diploma. ISMM. Tutor Roberto Sierra Pérez.
- Sierra Pérez, R. (1987). Análisis de la explotación de los equipos de transportación de grava y arena en la industria de materiales de construcción de Moa. Revista Minería y Geología. Cuba.
- Sierra Pérez, R. (2005). Metodología de Cálculo de los Transportadores de Banda para el Mineral Laterítico. Tesis de Maestría. ISMM. Moa, Holguín, Cuba.
- Sierra Pérez, R. (2006a). Problemas de los transportadores de banda para la industria del níquel en Cuba. Revista equipos mineros y electromecánicos. N.º 11, Rusia.
- Sierra Pérez, R. (2006b). Estudio de las propiedades físico-mecánicas del mineral laterítico influyente en los transportadores de banda. Ingeniería, Investigación y Desarrollo, Uptc. Vol. 2, N.º 1, pp. 44-47.
- Toll Macías, P. P. (1993). Estudio del movimiento dinámico de las cargas a granel, sobre el órgano portador en los transportadores de banda. ISMM. Fac. Electromecánica, Cuba. Trabajo de Diploma.