

Caracterización de la mena laterítica para el ajuste de parámetros tecnológicos del transportador de banda

Roberto Johan Sierra Pérez¹ rsierra@ismm.edu.cu
Arístides Alejandro Legrá Lobaina¹ alegra@ismm.edu.cu
Alfredo Donatien Carbonel² adonatien@ecg.moa.minbas.cu
Licinio Matos Elías² lmatos@ecg.moa.minbas.cu

Resumen

En las plantas niqueleras cubanas los parámetros de explotación de los transportadores de banda no se corresponden con las características físico-mecánicas de la mena laterítica que es acarreada, lo que conlleva subutilización de la capacidad de carga y de la potencia de accionamiento de estos equipos. Se realizó una investigación experimental en la planta metalúrgica Ernesto Che Guevara con el fin de elevar la eficiencia del transportador, para ello se evaluó el comportamiento de las propiedades físico-mecánicas de mayor influencia sobre los parámetros tecnológicos de este dispositivo de transporte. En muestras de mena laterítica mullida y homogenizada se determinó la composición granulométrica, masa volumétrica, coeficiente de esponjamiento, humedad y ángulo del talud natural y dinámico, aplicando métodos tradicionales conocidos, como diferencia de pesadas, tamizado y volumétricos. Como resultado, quedaron establecidos para la mena objeto de transporte los rangos de variación de las propiedades físico-mecánicas antes referidas y se obtuvieron relaciones funcionales entre ellas que permiten establecer el régimen de explotación en tiempo real y elegir el diseño más eficaz para el transportador de banda.

Palabras clave

Mena laterítica, parámetros tecnológicos, propiedades físico-mecánicas, transportador de banda.

Characterization of ore bodies for the correct selection of belt conveyors technological parameters

Abstract

The operating parameters of the belt conveyors which are presently operated in Cuban nickel industries do not tally with the physical-mechanical properties of the ore body in exploitation; which is why the load capacity and drive of this equipment are underused. To improve the efficiency of the conveyor, an experimental research was carried out in Ernesto Guevara Nickel Plant. An evaluation was completed on the physical mechanical properties of greater impact on the technological parameters of the conveyor. Grading composition, volumetric mass, swelling factor, moisture and natural and dynamic sump angle were analyzed for soft and homogenized samples of ore by applying traditional known methods such as weight, screening and volumetric differences. As a result, the variation ranges of the physical mechanical properties above mentioned were identified, thus obtaining functional relations among them that allow operating rates be established in real time and the most effective design be selected for the belt conveyor.

Key words

Belt conveyor, ore body, physical-mechanical properties, technological parameters

INTRODUCCIÓN

En las plantas metalúrgicas de la industria cubana del níquel, los transportadores de banda que acarrean la mena laterítica desde la mina hasta la planta de preparación mecánica, no son explotados eficientemente al no utilizar toda la capacidad de carga por ser el ancho de la banda superior al requerido y emplear una potencia de accionamiento por encima de la necesaria, lo que ocasiona frecuentes averías o fallos.

El elemento principal del transportador es la banda, encargada de portar la carga y a su vez hace función de órgano de tracción. El ancho de la banda (B) se determina por la expresión:

$$B = 1,1 \left(\sqrt{\frac{Q}{K \cdot \gamma \cdot v \cdot \psi}} + 0,05 \right) ; \text{ mm} \quad [1]$$

Donde:

Q : productividad, t/h.

K : coeficiente de forma o constructivo.

γ : masa volumétrica del mineral laterítico acarreado, t/m³.

ψ : coeficiente que tiene en cuenta el ángulo de inclinación del transportador.

v : velocidad de movimiento de la anda, m/s.

El valor del coeficiente de forma (K) define el ancho de la banda (B); actualmente el valor de este coeficiente se toma de la literatura especializada. Varios autores lo establecen de forma general y considerando ángulos del talud de la carga diferentes de los del talud del material laterítico y para ángulos no óptimos de los rodillos laterales (Sierra, 2005). En ningún caso hay establecida una expresión para su determinación.

Según varios investigadores (Tarasob, 1980; Potapob, 1980; Spibakoskii & Potapob, 1983; Grigoriev *et al.*, 1986; Shubin, 1986; Tijonov, 1987; Shajmiester & Diitriev, 1987; Diakov, 1996; Pereda & Polanco, 1999 y Vasilieb *et al.*, 2006) el coeficiente K se obtiene para

ángulos de 15 y 20° del talud de la carga acarreada, y ángulo de inclinación de los rodillos laterales de 15, 20, 25, 30, 35 y 40°. El coeficiente K toma valores de 240 a 325 para bandas de artesas planas y de 450 a 655 para bandas de artesas acanaladas.

Sierra (2005) obtiene, para el material laterítico, los modelos para determinar los coeficientes constructivos o de forma para bandas con artesas planas y acanaladas. La forma de la artesa está en función de sus dimensiones geométricas, es decir, del ancho ocupado por la carga mineral sobre la banda y del ángulo de inclinación de los rodillos laterales, así como de las propiedades del material transportado (ángulo del talud, humedad y composición granulométrica).

Para el material laterítico homogenizado se desconocen las relaciones funcionales entre las propiedades físico-mecánicas que lo caracterizan, tales como humedad, composición granulométrica, ángulo del talud dinámico y esponjamiento. Tampoco son conocidas para este material las relaciones funcionales entre la masa volumétrica y la humedad (Sierra 2005). Las propiedades antes mencionadas determinarían el ancho adecuado de la banda para el acarreo de la mena laterítica; como es sabido, el ancho de la banda decide el valor de la potencia de accionamiento requerida y el costo del transportador, al representar el 50 % de este último (Vacilieb *et al.*, 2006).

Partiendo de que las composiciones mineralógicas son semejantes en los yacimientos lateríticos, esta investigación se enfoca al estudio de la relación existente entre la masa volumétrica mullida, la distribución granulométrica, el nivel de humedad de la mena y la influencia de estas dos últimas propiedades en el ángulo del talud de la carga. La investigación tuvo como objetivo determinar las propiedades físico-mecánicas del mineral laterítico mullido y la relación entre ellas durante su acarreo, a partir de valores experimentales, para la proyección y explotación de los transportadores de banda.

MATERIAL Y MÉTODO

Las propiedades físico-mecánicas se determinaron experimentalmente. Los ensayos se realizaron en la mina de la Empresa Ernesto Che Guevara (ECG) utilizando el mineral laterítico acarreado desde el frente de trabajo y el depósito de homogenización hasta el proceso tecnológico.

Diseño de experimentos

El número de experimentos se determinó aplicando un diseño factorial por la siguiente ecuación:

$$N=n^k \quad [2]$$

Donde:

n, es el número de niveles de cada variable o factor.

k, es el número de factores o variables consideradas.

En todos los casos las muestras se tomaron del depósito de homogenización exterior y en los transportadores de banda TR-2, TR-4A y TR-4B del Taller 01 de la ECG durante el acarreo del mineral laterítico homogenizado. Los experimentos se realizaron en condiciones naturales y en distintos momentos durante el proceso de acarreo de la mena con transportador de banda. Se realizaron las determinaciones siguientes:

1. Humedad.
2. Coeficiente de esponjamiento.
3. Clases de tamaño en función de la humedad.
4. Masa volumétrica en función de la humedad.
5. Relaciones funcionales entre el ángulo del talud, la humedad y la clase de tamaño del mineral laterítico.

Humedad

La humedad de la mena se determinó por diferencia de pesadas, por ser un método sencillo de fácil aplicación. Se tomaron muestras de mena de diferentes puntos del depósito de

homogenización exterior en pilas de 1, 2, 4, 8, 16 y 32 t, expuestas a la intemperie y removidas al cabo de 8 y 6 días, sucesivamente. Se utilizó la expresión:

$$H = \frac{W_I - W_F}{W_I} \cdot 100 \quad [3]$$

Donde:

H- Contenido de humedad, %

W_I - Peso inicial de la muestra, N

W_F - Peso final de la muestra secada hasta una temperatura de 120°, N.

Tamaño del grano

Esta propiedad define el tamaño medio (Te) o el tamaño máximo (T_{max}) de las partículas. Para cargas clasificadas se utiliza Te y para cargas ordinarias se utiliza T_{max} . A partir de la distribución granulométrica del material que se señala para cada rango granulométrico $[r_j, r_{j+1}]$ un porcentaje p_j de partículas corresponde al valor de T_{max} y se determina como el mayor valor r_{j+1} para los rangos en los cuales se cumpla que $p_j \geq 10\%$. De forma semejante se determina el valor del tamaño mínimo T_{min} . El valor Te se determina según [4]:

$$Te = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} ; \quad [4]$$

La granulometría del material mullido debe tenerse en cuenta para determinar las dimensiones de la banda del transportador y porque influye en el ángulo del talud del mineral laterítico. Para determinarla se empleó el método de tamizado (Andreiev, 1980), usando rejillas de 75, 50 y 25 mm y un tiempo de tamización de 180 s. Se trabajó con 12 muestras de 105 kg de peso como promedio, realizando 10 réplicas en cada experimento, para valores de humedad de la mena de 30, 34, 38 y 42 %.

Masa volumétrica mullida

El material mullido homogenizado debe cumplir requisitos tecnológicos establecidos. La masa volumétrica mullida (MVM) se refiere a aquella cuando el material ha sido removido del macizo y

sujeto a preparación mecánica; se obtuvo por diferencia de pesadas. Esta variable precisa las dimensiones geométricas del transportador (ancho de banda) y define su productividad (Q).

Para conocer la influencia de la humedad en el comportamiento de la MVM se tomaron 5 muestras en cada una de las 4 pilas de secado de la mina de la ECG. A cada una de estas pilas (según el tiempo de secado natural) se determinó la humedad promedio. El número de réplicas se asumió como 5 debido al alto nivel de homogenización del material que tienen las pilas y a las características tecnológicas que poseen los instrumentos con los cuales se realizaron las mediciones.

Ángulo de reposo

Es el ángulo que la superficie lateral de la carga forma con el plano horizontal cuando dicho material es depositado sobre una superficie plana. Se denomina φ y caracteriza el grado de intermovilidad de las partículas que conforman el material, o sea, el grado de fluidez del mismo (Shubin & Pedre, 1986; Oriol & Aguilar 1995). Según Ricaurte (2009) el ángulo de reposo puede ser medido de dos formas:

1. Tomando como lados la base del material y la línea que une el punto más alto de la carga. A este ángulo se le denomina ángulo de reposo maximal φ_m
2. Tomando como lados la base del material y la línea tangente a la superficie en la dirección del punto más alto de la carga. A este ángulo se le denomina ángulo de reposo tangencial φ_t

La magnitud del ángulo de reposo estático φ o dinámico φ_d dependerá de las fuerzas de adherencia entre las distintas partículas que conforman al material y de las fuerzas de rozamiento que surgen durante el desplazamiento relativo de las partículas que lo conforman. La relación entre ángulo φ y φ_d se expresa a través de la siguiente relación (Spibacoski & Potapob, 1983; Vasilieb y Nikolaieb, 2003 y Vasilieb *et al.*, 2006).

Los ángulos maximal (φ_m) y tangencial (φ_t) de talud del mineral laterítico mullido se miden con el siguiente procedimiento:

1. Se introduce una muestra de mineral laterítico mullido dentro de un cilindro hueco colocado sobre una superficie horizontal (Figura 1). El cilindro tiene un diámetro de 0,28 m y una capacidad de 0,022 m³.
2. Se levanta el cilindro suavemente para que las partículas que componen el material formen una pila cuya sección se corresponde con una de las formas descritas en la figura 1.
3. Se miden los ángulos φ_m y φ_t mediante un goniómetro o transportador de ángulo.

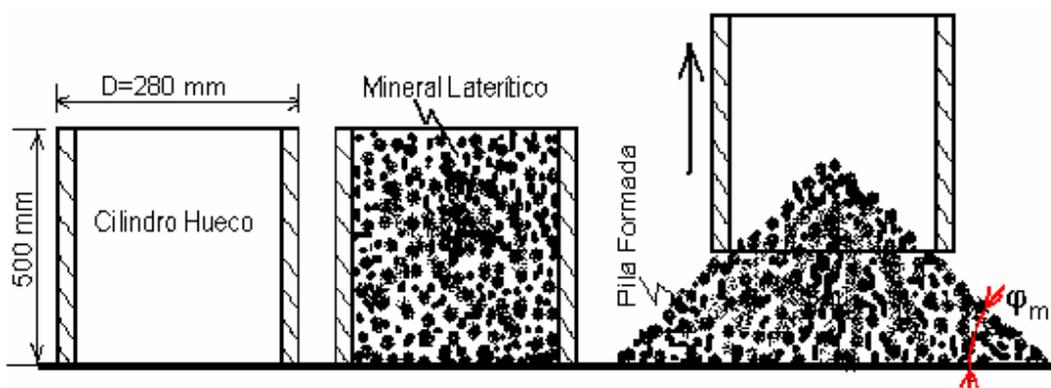


Figura 1. Procedimiento de formación de la pila de mineral para la medición del ángulo del talud.

Coefficiente de esponjamiento

Se obtiene como la relación entre la masa volumétrica compacta y la mullida. Este coeficiente es importante para determinar la productividad a partir de conocer el volumen de la mena en el macizo. Cuando se desconoce la masa volumétrica compacta (antes de remover la mena) el coeficiente de esponjamiento se determina mediante el siguiente procedimiento: se extrae con la cuchara de una excavadora una cantidad determinada de mena del frente de explotación, luego se mide el volumen de la cavidad resultante (V_2) de la extracción. Este material se deposita en una superficie definida y se procede a medir el volumen de la pila formada (V_1) de mena mullida. La relación existente entre los volúmenes V_1 y V_2 , da el coeficiente de esponjamiento.

Para determinar la confiabilidad de los parámetros del transportador que dependen de las propiedades físico-mecánicas estudiadas se realizaron análisis de varianza de los datos.

ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Tamaño del grano/Humedad

Los resultados se muestran en la Tabla 1. Nótese que la variabilidad disminuye hacia las clases más pequeñas. Para la clase +75 mm se tiene que la variabilidad aumenta según disminuye la humedad. En el resto de las clases, la variabilidad aumenta hasta valor de humedad 38 % para luego disminuir hasta humedad de 30 %. La tabla 2 reúne los valores en mm de T_{max} y T_{min} para cada porcentaje de humedad.

Tabla 1. Comportamiento porcentual de la granulometría al variar la humedad del mineral

Resultados	Clases;	Humedad en %			
	en mm	42	38	34	30
Promedio	+75	7,986	11,5032	12,5276	1,602
	-75 +50	8,236	6,6144	5,4335	5,3203
	-50 +25	12,209	10,6538	11,1389	8,0325
	-25 + 0	71,509	71,3126	70,9	85,0852
Coefficiente de Variación	+75	14,43	19,31	20,79	41,60
	-75 +50	9,46	22,09	20,48	16,74
	-50 +25	6,84	20,47	7,27	5,82
	-25 + 0	1,75	4,58	3,10	1,39

Como se conoce que el valor medio anual de humedad en la mena laterítica es de 36 % puede tomarse, a partir de los resultados tabulados anteriormente, un valor de tamaño medio (T_e) de 87,5 mm.

Tabla 2. Valores T_{max} , T_{min} y T_e (en mm) al variar la humedad del material

Humedad en %	Réplicas											
	1			2			3			4		
	T_{min}	T_{max}	T_e									
42	25	50	37,5	25	50	37,5	25	50	37,5	25	50	37,5
38	25	50	37,5	75	100	87,5	75	100	87,5	25	50	37,5
34	75	100	87,5	75	100	87,5	75	100	87,5	75	100	87,5
30	0	25	12,5	0	25	12,5	0	25	12,5	0	25	12,5
Humedad en %	5			6			7			8		
	T_{min}	T_{max}	T_e									
	42	25	50	37,5	25	50	37,5	25	50	37,5	25	50
38	75	100	87,5	75	100	87,5	25	50	37,5	75	100	87,5
34	75	100	87,5	25	50	37,5	25	50	37,5	25	50	37,5
30	0	25	12,5	0	25	12,5	0	25	12,5	0	25	12,5
Humedad en %	9			10			Promedio					
	T_{min}	T_{max}	T_e	T_{min}	T_{max}	T_e	T_{min}	T_{max}	T_e			
	42	25	50	37,5	25	50	37,5	25	50	37,5		
38	75	100	87,5	25	50	37,5	75	100	87,5			
34	75	100	87,5	75	100	87,5	75	100	87,5			
30	0	25	12,5	0	25	12,5	0	25	12,5			

Masa Volumétrica Mullida/Humedad

De la Tabla 1 se obtienen los indicadores estadísticos (Tabla 3) sobre las distribuciones granulométricas para cuatro niveles de humedad. De estos resultados se infiere que para cualquier porcentaje de humedad, el 72% (o más) del material posee una buena estabilidad granulométrica, pues sus coeficientes de variación son menores de un 10%, lo que indica un adecuado índice de homogenización granulométrica. Se asume entonces que todo el material con un mismo nivel de humedad tiene la misma distribución granulométrica. En consecuencia, aunque la MVM depende de la distribución granulométrica (Otaño, 1981), en este caso no es necesario un estudio particular de esta relación debido a que esta última propiedad puede asumirse como invariante para cada nivel de humedad. La Tabla 4 expone los resultados de la MVM para los valores de humedad analizados. El coeficiente de esponjamiento del mena laterítica en la mina de la ECG es de 1, 206.

Tabla 3. Promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de las distribuciones granulométricas para diferentes porcentajes de humedad.

Para 42% de Humedad			
Clases en mm	Promedio en %	Desviación Estándar en %	Coeficiente de Variación en %
+75	8,49	0,79	9,27
-75 +50	8,37	1,00	11,90
-50 +25	12,22	0,22	1,77
-25 + 0	70,72	1,69	2,39
Para 38% de Humedad			
Clases en mm	Promedio en %	Desviación Estándar en %	Coeficiente de Variación en %
+75	11,61	2,45	21,12
-75 +50	6,57	1,52	23,20
-50 +25	10,00	2,23	22,29
-25 + 0	72,10	3,43	4,76
Para 34% de Humedad			
Clases en mm	Promedio en %	Desviación Estándar en %	Coeficiente de Variación en %
+75	15,35	2,71	17,65
-75 +50	5,32	1,39	26,09
-50 +25	10,76	0,75	7,00
-25 + 0	68,58	1,47	2,14
Para 30% de Humedad			
Clases en mm	Promedio en %	Desviación Estándar en %	Coeficiente de Variación en %
+75	1,57	0,40	25,59
-75 +50	5,15	0,80	15,58
-50 +25	8,08	0,28	3,49
-25 + 0	85,34	1,18	1,39

Tabla 4. Comportamiento de la masa volumétrica (t/m^3) de la mena laterítica al variar la humedad.

REPLICAS	Humedad en %			
	42	38	34	30
1	1,340	1,310	1,180	1,140
2	1,370	1,230	1,210	1,090
3	1,360	1,210	1,190	1,050
4	1,370	1,300	1,220	1,110
5	1,380	1,330	1,200	1,150
Promedio	1,364	1,278	1,200	1,108
Desviación Estándar	0,0152	0,0527	0,0158	0,0402
Coefficiente de Variación %	1,11	4,13	1,32	3,63
Promedio General	1,2375			

El análisis de varianza realizado para un 99 % de confianza, demuestra que existe una importante relación entre la humedad y la MVM. Para fines de pronóstico se obtuvo la ecuación [5] a partir de la modelación mediante el Método de los Mínimos Cuadrados la cual indica la posibilidad de obtener un valor confiable de MVM si se conoce la humedad:

$$MVM = 0,4774 + 0,0211 * H \quad [5]$$

Variación explicada: 0,17808

Grados de libertad: 1

Variación residual: 0,019736

Grados de libertad: 18

Variación total: 0,19782

Grados de libertad: 19

Error estándar de una estimación: 0,0340729

Error probable de una observación: 0,0223345

Coefficiente de correlación, $r = 0,9488$

Para una prueba con nivel de confianza 0,95:

Intervalo de confianza de r : [0,8727; 0,9799]

Para una prueba F de Fisher, con nivel de confianza 0,95 se tiene:

Valor de F_c para el ajuste: 162,4195

Valor de F_t por la tabla: 3,5916

El ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.

Prueba para los Coeficientes no Independientes del Modelo (0,95)

Valor teórico (t de Student) $t = 1,734$

Valor de coeficiente de humedad, $t = 12,7444$

El coeficiente de humedad (H) es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_2)$.

Intervalos de Confianza para los Coeficientes del Modelo (0,95)

Valor teórico (t de Student) $t = 2,101$

$S_{xy} = 0,033113$

Intervalo de Confianza de b_0 : [0,3512 ; 0,6036]

Intervalo de Confianza de b_1 : [0,0176 ; 0,0246]

Para determinar el valor máximo de la MVM para una humedad H dada basta con sustituir este valor en la ecuación $MVM = 0,6036 + 0,0246 * H$ (2,60). Por ejemplo para $H=36\%$ el valor esperado de MVM es 1,237; la MVM máxima que se puede obtener es 1,4892. Para H entre 34 y 38 %, la MVM está entre 1,1948 y 1,2792 t/m³.

Ángulos de reposo maximal y tangencial

El comportamiento de estos ángulos se obtuvo de las mediciones de las variables siguientes: granulometría promedio del material (Te); humedad en por ciento (H); ángulo maximal de la pila (φ_m) y ángulo tangencial de la pila (φ_t). Al analizar la relación entre el ángulo del talud maximal con respecto a la granulometría Te y la humedad H , se puede obtener el siguiente modelo mínimo cuadrado:

$$\varphi_m = 30,58 - 0,4592 Te - 0,00496 Te H + 0,00651 Te^2 + 0,01109 H^2 \quad [6]$$

Variación explicada: 630,98	Grados de libertad:	4
Variación residual: 35,2891	Grados de libertad:	20
Variación total: 666,2646	Grados de libertad:	24
Error estándar de una estimación: 1,3628		
Error probable de una observación: 0,895957		
Coeficiente de correlación, $r = 0,97316$		
Para una prueba con nivel de confianza 0,95:		
Intervalo de confianza de r : [0,939 ; 0,988]		

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0,95:

Valor de F_c para el ajuste: 89,4009

Valor de F_t por la tabla: 2,7402

El ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.

Coefficientes de correlación parcial:

Para el coeficiente de T_e : -0,82

Para el coeficiente de $T_e H$: -0,56

Para el coeficiente de T_e^2 : 0,95

Para el coeficiente de H^2 : 0,88

Prueba para los Coeficientes del Modelo (0,95 de nivel de confianza)

Valor teórico (t de Student) = 1,725

Para el coeficiente de T_e , $t_2 = -6,46$

Es estadísticamente significativo ya que $t < = \text{abs}(t_2)$.

Para el coeficiente de $T_e H$, $t_3 = -3,01$

Es estadísticamente significativo ya que $t < = \text{abs}(t_3)$.

Para el coeficiente de T_e^2 , $t_4 = 13,13$

Es estadísticamente significativo ya que $t < = \text{abs}(t_4)$.

Para el coeficiente de H^2 , $t_5 = 8,41$

Es estadísticamente significativo ya que $t < = \text{abs}(t_5)$.

En sentido general pueden obtenerse buenas predicciones de φ_m si se conocen T_e y H dentro de los rangos estudiados.

Al estudiar la relación entre el ángulo tangencial con respecto a la granulometría y la humedad se obtuvo el siguiente modelo mínimo cuadrado:

$$\varphi_t = 33,25 - 0,505 T_e - 0,0025 T_e H + 0,0062 T_e^2 + 0,008 H^2 \quad [7]$$

Variación explicada: 492,684	Grados de libertad:	4
Variación residual: 36,383	Grados de libertad:	20
Variación total: 529,068	Grados de libertad:	24

Error estándar de una estimación: 1,3838

Error probable de una observación: 0,9097

Coefficiente de correlación, $r = 0,965$

Para una prueba con nivel de confianza 0,95:

Intervalo de confianza de r : [0,921 ; 0,985]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0,95:

Valor de F_c para el ajuste: 67,7075

Valor de F_t por la tabla: 2,7402

El ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.

Coefficientes de correlación parcial:

Para el coeficiente de T_e : -0,84

Para el coeficiente de $T_e H$: -0,32

Para el coeficiente de T_e^2 : 0,94

Para el coeficiente de H^2 : 0,80

Prueba para los Coeficientes del Modelo (0,95 de nivel de confianza)

Valor teórico (t de Student), $t = 1,725$

Para el coeficiente de T_e , $t_2 = -6,99$

Es estadísticamente significativo ya que $t < = \text{abs}(t_2)$.

Para el coeficiente de $T_e H$, $t_3 = -1,5$

No es estadísticamente significativo ya que $t < = \text{abs}(t_3)$. Sin embargo para un nivel de confianza de 90% se obtienen el valor de $t = 1,325$ y la prueba es superada. Este resultado induce a aceptar el término $T_e H$ en el modelo.

Para el coeficiente de T_e^2 , $t_4 = 12,24$

Es estadísticamente significativo ya que $t < = \text{abs}(t_4)$.

Para el coeficiente de H^2 , $t_5 = 5,96$

Es estadísticamente significativo ya que $t < = \text{abs}(t_5)$.

En este caso, también pueden obtenerse buenas predicciones de φ_t si se conocen T_e y H dentro de los rangos estudiados. Para el mineral laterítico mullido y homogenizado la relación entre el ángulo del talud natural φ y el ángulo de talud dinámico φ_d se establece por $\varphi_d = (0.89 \text{ a } 0.92) \cdot \varphi$. En el cálculo de transportadores se utiliza φ_d .

Desde un punto de vista cualitativo puede deducirse de la Figura 2 que para valores de humedad entre 32 y 34% el comportamiento de los ángulos tangencial y maximal es semejante (la sección de la pila es triangular). Para $H > 34\%$ los ángulos maximales son mayores que los tangenciales (la sección de la pila es hiperbólica o parabólica con exponente menor que uno) y para $H < 30\%$ sucede lo contrario (la sección de la pila es parabólica con exponente mayor que uno).

Se obtuvo que cuando aumenta la granulometría, el comportamiento de los ángulos decrece desde $Te=5$ hasta $Te=50$ y luego crece desde $Te=50$ hasta $Te=78$. Esto puede deberse a que la forma de los granos cuando $Te \geq 75$ es menos redonda, lo cual aumenta la estabilidad de la pila.

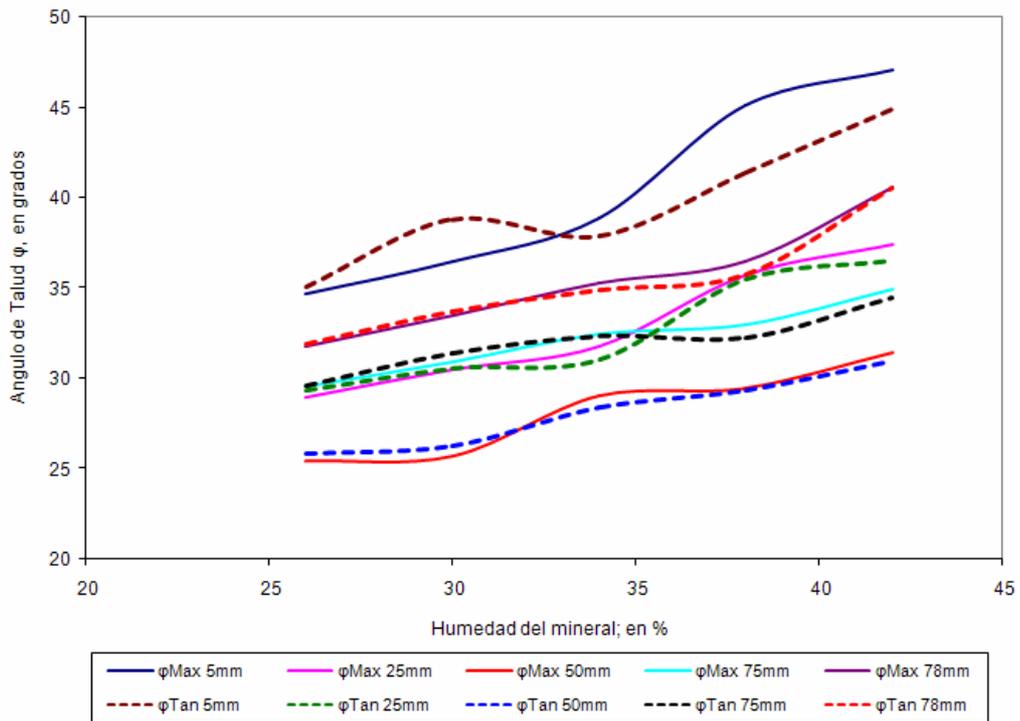


Figura 2. Comportamiento de los ángulos maximal φ_{max} y tangencial φ_{Tan} al variar la humedad porcentual para diferentes granulometrías.

CONCLUSIONES

En la mena laterítica las propiedades físico-mecánicas estudiadas tienen los siguientes valores promedios: humedad (36%), ángulo del talud (36°), masa volumétrica ($1,2375; t/m^3$), composición granulométrica (87,5 mm) y coeficiente de esponjamiento del mineral laterítico (1, 206). Se establecieron las relaciones funcionales entre la masa volumétrica y la humedad, la granulometría en función de la humedad y ángulo del talud en función de la composición granulométrica y la humedad. Se encontró que para la mena laterítica la relación entre el ángulo del talud natural y el ángulo del talud dinámico es del 89 al 92%. Estos resultados indican lo

adecuado de transportar la mena laterítica con una composición granulométrica menor de 5 mm para conseguir un ángulo del talud elevado, lo cual garantiza la productividad máxima del transportador de banda.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ANDREIEV, S. E.; PEVOV, V. A. & ZVERIEVCH, V. V. 1980. *Trituración, desmenuzamiento y cribado de materiales*. Editorial Mir, Moscú.
- DIAKOV, V. A. 1996. *Máquinas de transporte en la minería a cielo abierto*. Editorial Niedra, Moscú (en ruso).
- GRIGORIEV, B. N. 1986. *Máquinas y complejos de transporte para el laboreo subterráneo*. Editorial Niedra, Moscú (en ruso).
- ORIO GUERRA, J. M. & AGUILAR PARÉS, FRANCISCO. 1995. *Máquinas de transporte continuo*. Tomo I. Editorial Pueblo y Educación, La Habana.
- OTAÑO NOGUEL, JOSÉ. 1981. *Elementos de física de las rocas*. Editorial Pueblo y Educación, La Habana.
- PEREDA, H. S. & POLANCO, A. R. G. 1999. *Transporte minero*. Editorial Félix Varela, La Habana.
- POTAPOB, N. G. 1980. *Máquinas de transporte*. Editorial Niedra. (en ruso)
- RICAURTE MACHADO, C. J. 2009. Precisiones en la determinación del factor de forma de las arenas industriales en transportadores de banda. [Instituto Superior Minero Metalúrgico] Moa (Tesis de Maestría) 74 p.
- SHAJMIESTER, L. G. & DIITRIEV, V. G. 1987. *Teoría y cálculo de los transportadores de banda*. Editorial Mashinostoinie, Moscú (en ruso).
- SHUBIN, V. S. & PEDRE, C. 1986. *Diseño de máquinas industriales*. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, T. III.
- SIERRA PÉREZ, ROBERTO. 2005. Metodología de cálculo de los transportadores de banda para el mineral laterítico. [Instituto Superior Minero Metalúrgico]. Moa (Tesis de maestría) 77 p.
- SPIBACOSKI, A. O. & POTAPOB, M. G. 1983. *Máquinas y complejos de transporte en las labores mineras*. Editorial Niedra (en ruso).
- TARASOB, U. D. 1980. *Construcción y cálculo de las máquinas y complejos de transporte*. Leningrado (en ruso).
- TIJONOV, N. V. 1987. *Máquinas de transporte en las empresas mineras*. Editorial Niedra, Moscú (en ruso).
- VASILIEB, K. A.; NIKOLAIEB, A. K. & CAZONOB, K. G. 2003. *Máquinas de transporte*. Editorial Naúka. San Petersburgo (en ruso).

VASILIEB, K. A.; NIKOLAIEB, A. K. & CAZONOB, K. G. 2006. *Máquinas de cargas y transporte de las Plantas de Beneficio de Minerales*. Editorial Naúka, San Petersburgo (en ruso).