

Caracterización del factor de forma real para arenas industriales transportadas por bandas

Claudio José Ricaurte-Machado
Arístides Alejandro Legrá-Lobaina

Resumen

Para el diseño correcto de transportadores de banda que acarreen materiales a granel es preciso conocer el valor adecuado de los ángulos mínimo y tangencial que caracterizan el factor de forma de la carga acarreada. Para las arenas industriales, los ángulos mínimo y tangencial, así como el factor de forma y su correspondiente sección de carga son funciones de la granulometría y la humedad. Mediante un sistema de experimentos se obtuvieron los valores de estos ángulos para diferentes tipos de arenas industriales, clasificadas según sus valores de granulometría y humedad; a partir de estos resultados se establece la caracterización particular del factor de forma para cada tipo de arena industrial.

Palabras clave

Banda transportadora; ángulo de reposo; arenas industriales.

Form factor characterization for industrial sand transportation by belt conveyors

Abstract

For the design of belt conveyors used for transportation of bulk materials, it is required to know minimum and tangential angles that characterize loads according to the form factor. Minimum and tangential angles for industrial sand as well as the form factor and its corresponding section of load are functions of particle size distribution and moisture content. A series of experiments was performed to obtain the angle values for different types of industrial sand classified according to its particle size distribution and moisture content. The test results were used as a basis for the characterization of the form factor specific to each type of industrial sand.

Keywords

Belt conveyor; angle of repose; industrial sand.

1. INTRODUCCIÓN

La productividad de un transportador de banda que acarrea materiales a granel (Oriol 1995) se calcula mediante la expresión:

$$Q = 3600 A v \gamma \psi \quad (1)$$

Donde Q es la productividad (kN/h); γ el peso específico de material (kN/ m³); v es la velocidad (m/s); A es el área de la sección de la carga (m²) y ψ es el coeficiente de deslizamiento. Según Ricaurte-Machado & Legrá-Lobaina (2010) el valor de A se calcula mediante la fórmula:

$$A = b_o^2 K_f \quad (2)$$

Donde b_o corresponde al ancho de la sección de la carga y K_f es el llamado factor de forma, el cual depende de los valores de los ángulos máximo (φ_m) y tangencial (φ_t). El primero representa el ángulo entre la horizontal o la base b_o de la sección y la línea que une a uno de los extremos de dicha sección con el punto de altura máxima que esta alcanza; el segundo, el ángulo entre la horizontal y la tangente a la superficie lateral de la carga trazada en uno de los puntos extremos de la base de dicha carga. Las expresiones del K_f para cada sección de la carga dependen de la geometría de la sección transversal, según se expresa en la Tabla 1:

Tabla 1. Expresiones del K_f para distintas geometrías de la sección de carga (tomado de Ricaurte-Machado & Legrá-Lobaina 2010, tabla 2)

Geometría	Expresión	
Triangular	$K_f = \frac{\tan(\varphi_m)}{4}$	
Parabólica	Grado n	$K_f = \frac{1}{2} \left(\frac{n}{n+1} \right) \tan(\varphi_m)$
	Grado 2	$K_f = \frac{1}{3} \tan(\varphi_m)$
Semi-elíptica	$K_f = \frac{\pi}{8} \tan(\varphi_m)$	
Hiperbólica	$K_f = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\tan^2(\varphi_m) \tan(\varphi_t)}{[\tan(\varphi_m) - \tan(\varphi_t)]^2} \operatorname{Ln} \left[\frac{\tan(\varphi_m)}{\tan(\varphi_t)} \right] - \frac{\tan(\varphi_m) \tan(\varphi_t)}{\tan(\varphi_m) - \tan(\varphi_t)} \right\}$	

Considerando el algoritmo descrito en la Figura 1, la geometría se determina atendiendo a los valores de los ángulos φ_m y φ_t :

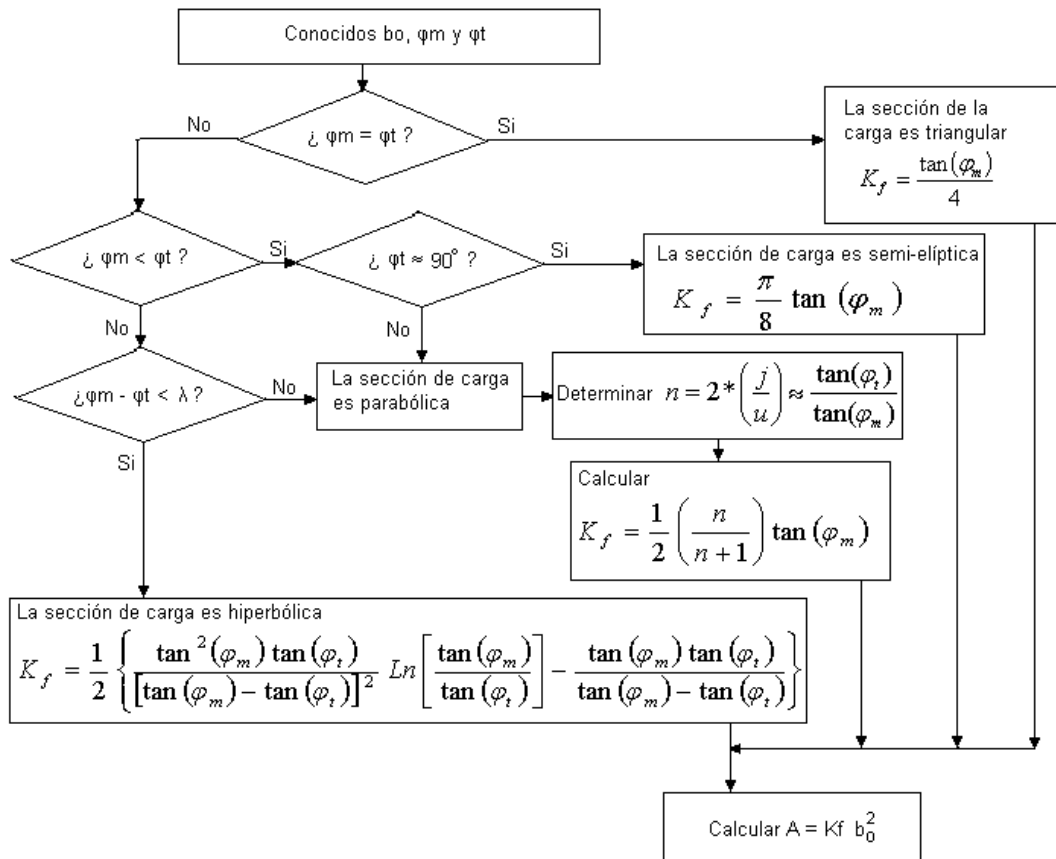


Figura 1. Diagrama de flujo para el cálculo del área de la sección de la carga (tomado de [Ricaurte-Machado y Legrá-Lobaina 2010](#), tabla 5).

Lo anterior plantea la necesidad de determinar el valor de los ángulos φ_m y φ_t para los distintos materiales que se transportan y, en los casos donde sea posible, conocer el valor de estos ángulos cuando varían las propiedades físico-mecánicas de un material.

Las arenas industriales frecuentemente se acarrean por transportadores de banda. Estas arenas se utilizan en la elaboración de mezclas para la construcción, junto con cemento y otros agregados. Se les denomina también agregados y se clasifican en función del valor de su dimensión en: agregados finos (arenas finas con granulometría menor que 0,075 mm), intermedios (gravillas, con granulometría mayor o igual que 0,075 mm y menor que 8,23 mm) y gruesos (gravas, con granulometría mayor o igual que 8,23 mm).

El objetivo del presente trabajo es determinar los valores de los ángulos φ_m y φ_t para agregados intermedios y gruesos, considerando

los valores de su granulometría y humedad con el fin de obtener el coeficiente de forma para cada tipo de agregado y así caracterizar el área de la sección transversal de la carga. Como antecedentes metodológicos de la presente investigación se toman los trabajos de [Sierra \(2006\)](#) y [Sierra et al. \(2009\)](#).

2. METODOLOGÍA

2.1. Granulometría y humedad

La granulometría promedio y la humedad ejercen influencia sobre el comportamiento de los ángulos ϕ_t y ϕ_m . La composición granulométrica corresponde a la distribución cuantitativa de las partículas que conforman una muestra de material a granel en función de su tamaño ([Otaño 1981](#)).

Para determinar la granulometría se empleó el método de tamizado que consiste en cernir las muestras a través del juego de tamices estándar y en determinar la masa porcentual del material retenido en cada tamiz, respecto a la masa de la muestra.

El procedimiento [COVENIN \(1998\)](#) para determinar la composición granulométrica de una muestra es el siguiente: se determina su masa inicial (M) en una balanza y, habiendo seleccionado y distribuido adecuadamente el juego de tamices a utilizar, se vacía la muestra en el mayor tamiz y se cierne durante 4 min. Se recolecta el material retenido en cada tamiz y se determina la masa (m) de cada porción de cernido. Para cada porción se determina la composición granulométrica a través de la relación (3):

$$\text{Composición granulométrica} = \frac{m}{M} * 100 \quad (3)$$

La granulometría promedio es una propiedad dada por la granulometría de aquellos materiales con una homogeneidad cercana a la unidad. Los materiales que se obtienen en la retención mediante el proceso de tamizado tienen esta propiedad ya que el material más fino no es retenido en el tamizado actual y el material más grueso fue retenido en el tamizado anterior.

La humedad que interesa en esta investigación es la que resulta de la diferencia entre la masa del material húmedo y la masa del material seco. Esta agua (no enlazada químicamente con el material) está presente en la superficie de las partículas y en el espacio entre ellas.

2.1.1. Diseño de los experimentos

El experimento se dividió en dos grupos. El experimento A se realizó con las arenas intermedias y el experimento P con las gruesas. Se siguieron los siguientes pasos:

1. Se tomaron tres muestras de arena gruesa de 8 000 g cada una y tres muestras de arena intermedia de 2 000 g. Las muestras de arena intermedia se cribaron en el tamiz #200 para eliminar las partículas menores que 0,075 mm o sea, las arenas finas. Del material resultante se tomaron tres muestras (A1, A2 y A3) y se cribaron en una tamizadora para agregado intermedio. De forma similar, en las arenas gruesas se seleccionaron tres muestras (P1, P2 y P3) y se cribaron en una tamizadora para agregado grueso. Del tamizado de A1, A2 y A3 se obtuvieron las porciones A11, A21 y A31 con granulometría promedio de 4,76 mm; A12, A22 y A32 con granulometría promedio de 2,38 mm y A13, A23, A33 con granulometría promedio de 1,68 mm.
De un modo análogo se procedió con P1, P2 y P3 y, después de eliminar las arenas finas e intermedias de las muestras, mediante el cribado se obtuvieron: tres porciones P11, P21 y P31 de material con granulometría promedio de 25,4 mm; otras tres porciones P12, P22 y P32 de material con granulometría promedio de 19,05 mm y finalmente tres porciones P13, P23, P33 de material con granulometría promedio de 12,7 mm.
2. Se mezclaron las porciones de igual granulometría, tanto de las arenas intermedias como de las arenas gruesas, de manera que se obtuvo para los experimentos posteriores las muestras identificadas como AD1, AD2, AD3 para las arenas intermedias y PD1, PD2, PD3 para las arenas gruesas, de la siguiente forma:
 - $AD1 = A11 + A21 + A31$
 - $AD2 = A12 + A22 + A32$
 - $AD3 = A13 + A23 + A33$
 - $PD1 = P11 + P21 + P31$
 - $PD2 = P12 + P22 + P32$
 - $PD3 = P13 + P23 + P33$
3. Las muestras AD1, AD2, AD3, PD1, PD2 y PD3 se humedecieron totalmente y sometieron a proceso de secado controlado en cinco etapas: H0 (totalmente húmedo), H1 (dos horas de secado), H2 (cuatro horas de secado), H3 (seis horas de secado) y H4 (veinte y cuatro horas de secado). En cada etapa se determinó la humedad de cada muestra.
4. En cada etapa (H0 a H4) y para cada muestra AD1, AD2, AD3, PD1, PD2 y PD3 se conformaron pilas y se realizaron mediciones de las variables:

b_0 : Ancho de la pila en su base

h : Altura máxima de la pila

φ_m : Ángulo máximo de la pila

φ_t : Ángulo tangencial de la pila

5. Las conformación de pilas y las mediciones para cada par (AD1, H0), (AD1, H1)... (PD3, H4) se repitieron en 15 ocasiones con el fin de descartar en las mediciones la influencia de factores importantes no controlados (Miller *et al.* 2005).

Los autores del presente trabajo asumen que, bajo criterios heurísticos, el diseño que se ha presentado en esta experimentación es suficiente para establecer la tipología de las arenas industriales más usadas respecto a la granulometría promedio y la humedad así como los valores de los ángulos φ_m y φ_t para cada tipo de arena industrial objeto de estudio.

2.1.2. Técnicas e instrumentación experimentales

Para determinar la granulometría de las muestras de arenas intermedias se utilizó un juego de tamices normalizados para ensayos, del laboratorio de materiales de construcciones civiles del Instituto Universitario de Tecnología (IUT), región capital (Caracas, República Bolivariana de Venezuela), cuya designación, según la norma venezolana COVENIN 254-1998 es la siguiente: # 4, # 8, # 12, # 16, # 30, # 50, # 100 y a los cuales le corresponden los siguientes valores dimensionales promedio: 4,76 mm; 2,38 mm; 1,9 mm; 1,68mm; 0,595 mm; 0,297 mm; 0,149 mm.

La granulometría de las muestras de arenas gruesas se obtuvo con un juego de tamices normalizados para ensayos, disponibles en el laboratorio de Materiales de Construcciones Civiles del IUT, con valores dimensionales promedios de: 25,4 mm; 19,05 mm; 12,7 cm; 9,51mm; 6,35 mm; 4,76 mm. Vale señalar que ninguno de los juegos de tamices posee razón constante entre cada par de medidas consecutivas.

Se cribó durante cuatro minutos en tamizadoras eléctricas. Para las muestras de arena A1, A2 y A3 se utilizó una del Modelo L150 Teyler para agregado intermedio, con capacidad para 2 000 g de material; para el agregado grueso P1, P2 y P3, una Modelo TS-2, con capacidad para 8 000 g.

Se recolectaron nueve porciones de arenas intermedias retenidas: A11, A12, A13, A21, A22, A23, A31, A32 y A33, encontrándose que las porciones de mayor cantidad correspondieron a los tres primeros tamices (4,76 mm; 2,38 mm; 1,9 mm) entre los cuales se

retuvo el 88,347 % de la masa total de las muestras. Por tal razón se decidió tomar como porciones para análisis posteriores la suma de cada una de las porciones retenidas en cada uno de estos tamices; a estas sumas se les denominó AD1, AD2 y AD3, respectivamente. De manera semejante se obtuvo para las arenas gruesas las sumas PD1, PD2 y PD3, correspondientes a los tamices de dimensiones 25,4 mm; 19,05mm; 12,7 mm.

Para determinar la humedad inicial a la granulometría correspondiente cada muestra se remojó con agua destilada durante 24 horas, para luego determinar su masa en estado húmedo en una balanza de alta precisión Marca OHAUS, Modelo Explorer, con una capacidad máxima de 20 000 g y una medida mínima de 0,1 g. Seguidamente se secaron a una temperatura constante de 110 °C en un horno Marca MEMMERT, Modelo SCHWABACH 854 durante otras 24 horas, finalmente se procedió a determinar la masa de cada muestra en estado seco.

La diferencia entre valor de la masa húmeda y el valor de la masa seca correspondiente, dividida entre el valor de la masa seca y multiplicado por cien, dio como resultado el contenido porcentual de humedad en la muestra. Mediante procedimientos similares se determinó la humedad parcial en los tiempos considerados H1, H2, H3 y H4 para cada una de las muestras.

Para generar las pilas de material requeridas y medir las variables b_o , h , ϕ_m y ϕ_t en cada muestra y para cada humedad, se utilizaron cilindros huecos de plástico con diámetros de 76,2 mm y 152,4 mm y alturas de 150 mm y 200 mm para las arenas y las piedras, respectivamente. Los cilindros fueron llenados, sin apilar, con el material de la muestra correspondiente a cada caso de estudio y fueron levantados en posición vertical y con cuidado, dejando caer dicho material sobre la banda de goma, generándose de esta forma la pila a ser estudiada.

Sobre dichas pilas se midieron el ancho de la base, la altura y los ángulos tangencial y máximo correspondientes. El ancho y la altura de cada pila se midieron con reglas y escuadras graduadas, los ángulos se midieron con goniómetros o transportadores de ángulos graduados de alta precisión, Marca Mitutuyo, Modelo 187-908, con las siguientes características técnicas: rango de medición de 0 a 360°; medida mínima de cinco minutos.

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Composición granulométrica

Tabla 2. Composición granulométrica de las arenas intermedias

Arenas intermedias				
Clase mm	Muestra A1	Muestra A2	Muestra A3	
	Masa (g) 1585,4	Masa (g) 1286	Masa (g) 1843,9	
	Masa retenida (g)	Masa retenida (g)	Masa retenida (g)	% Granulometría
+4,76	A11: 843,4	A21: 575,4	A31: 891,7	48,763
-4,76+2,38	A12: 449,5	A22: 318,1	A32: 493,5	26,615
-2,38+1,68	A13: 107,4	A23: 96,8	A33: 129,8	7,113
-1,68	185,1	295,7	328,9	17,508

Tabla 3. Composición granulométrica de las arenas gruesas

Arenas gruesas				
Clase Mm	Muestra P1	Muestra P2	Muestra P3	
	Masa (g) 8 000	Masa (g) 8 000	Masa (g) 8 000	
	Masa retenida (g)	Masa retenida (g)	Masa retenida (g)	% Granulometría
+25,4	P11: 843,6	P21: 837,4	P31: 891,6	10,719
-25,4+19,05	P12: 4246,4	P22: 4345,7	P32: 4493,3	54,522
-19,05+12,7	P13: 2530,5	P23: 2533,7	P33: 2412,4	31,152
-12,7	379,5	283,2	202,7	3,606

Los resultados promedios de la experimentación con las arenas intermedias que indican el comportamiento de la humedad, en relación con la granulometría y el tiempo de secado para las arenas, se muestra en la Figura 2. De manera análoga los resultados promedios para las arenas gruesas se representan en la Figura 3.

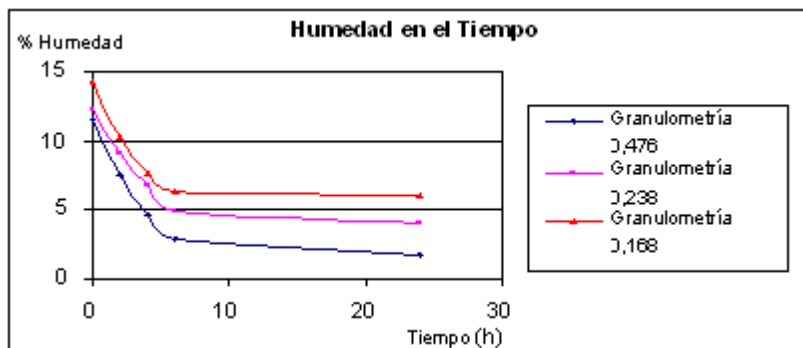


Figura 2. Comportamiento de la humedad en relación con la granulometría y el tiempo de secado para las arenas intermedias.

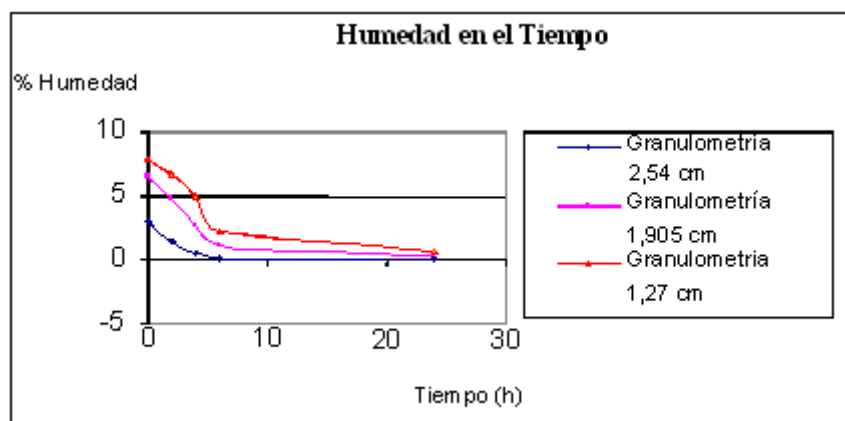


Figura 3. Comportamiento de la humedad en relación con la granulometría y el tiempo de secado para las arenas gruesas.

Las muestras de arena intermedia de mayor granulometría promedio disminuyen su humedad con mayor rapidez pero tardan más tiempo en alcanzar una humedad estable. Las muestras de arena gruesa con mayor granulometría promedio disminuyen más rápidamente su humedad respecto a las muestras de menor granulometría promedio. También es importante destacar que todas desprendieron casi el total de la humedad durante el proceso de secado.

El siguiente análisis estadístico realizado mediante el software Tierra (Legrá 2005) argumenta la baja variabilidad de los ángulos en las arenas cuando se realizaron 15 repeticiones. En la Tabla 4 se muestra el comportamiento del ángulo máximo para las arenas intermedias y en la Tabla 5 para las arenas gruesas.

Tabla 4. Comportamiento estadístico del ángulo máximo (φ_m) promedio para las arenas intermedias

Granulometría mm	Humedad %	φ_m grados sexagesimales	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación %
0,476	11,635	36,58	4,45	12,16
0,238	12,369	35,3	2,31	6,55
0,168	14,242	38,3	4,96	12,96
0,476	7,617	35,57	2,15	6,06
0,238	9,023	36,8	2	5,43
0,168	10,233	37,93	1,92	5,05
0,476	4,662	33,97	3,37	9,91
0,238	6,843	36,9	2,15	5,82
0,168	7,674	31,97	1,59	4,96
0,476	3,034	33,37	3,38	10,14
0,238	4,888	31,83	1,93	6,07
0,168	6,378	30,4	1,91	6,28
0,476	1,818	33,37	3,38	10,14
0,238	4,056	31,83	1,93	6,07
0,168	6,025	30,4	1,91	6,28

Tabla 5. Comportamiento estadístico del ángulo tangencial promedio (φ_t) para las arenas intermedias

Granulometría mm	Humedad %	φ_t grados sexagesimales	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación %
0,476	11,635	49,59	2,45	4,93
0,238	12,369	46,99	3,91	8,32
0,168	14,242	51,97	3,61	6,94
0,476	7,617	46	4,52	9,83
0,238	9,023	52,37	2,85	5,44
0,168	10,233	52,62	0,86	1,63
0,476	4,662	51,63	2,29	4,43
0,238	6,843	51,57	2,21	4,29
0,168	7,674	42,3	1,71	4,04
0,476	3,034	49,25	3,51	7,12
0,238	4,888	42,33	1,95	4,61
0,168	6,378	39,3	1,93	4,92
0,476	1,818	49,25	3,51	7,12
0,238	4,056	42,33	1,95	4,61
0,168	6,025	39,3	1,93	4,92

Nótese que el coeficiente de variación indica una variación relativa de φ_m en las 15 repeticiones de cada experimento, que no es mayor de un 13 %, lo cual debe interpretarse como un indicador de la estabilidad de los resultados de las mediciones de φ_m .

También en este caso el coeficiente de variación indica una variación relativa de φ_t no mayor del 10 % en las 15 repeticiones de cada experimento con las arenas intermedias, lo que evidencia la adecuada precisión de las mediciones realizadas.

La variabilidad o el comportamiento de los ángulos φ_m y φ_t en función de la humedad y para cada granulometría considerada de las arenas intermedias se muestran en las Figuras 4, 5 y 6.

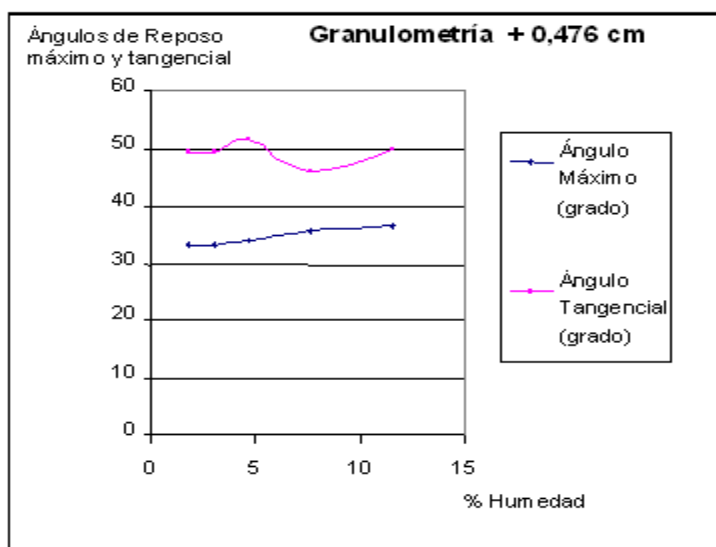


Figura 4. Comportamiento de φ_m y φ_t para la granulometría + 0,476 cm (arenas intermedias).

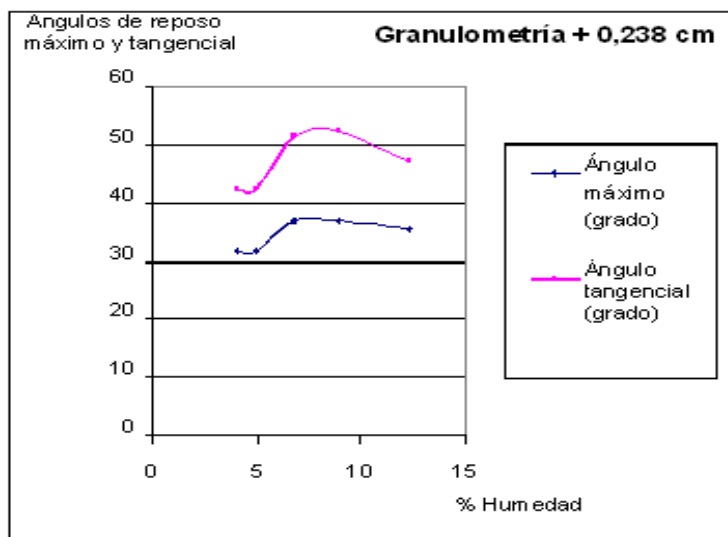


Figura 5. Comportamiento de φ_m y φ_t para la granulometría + 0,238 cm (arenas intermedias).

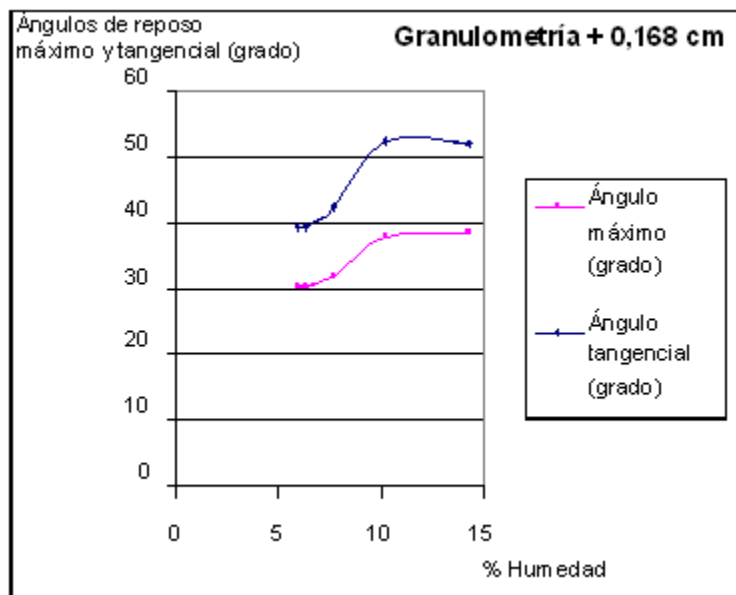


Figura 6. Comportamiento de ϕ_m y ϕ_t para la granulometría + 0,168 cm (arenas intermedias).

De forma similar para las arenas gruesas se muestran en la Tabla 6 los resultados del análisis estadístico básico que argumenta la baja variabilidad de los ángulos ϕ_m y ϕ_t en 15 repeticiones.

Tabla 6. Comportamiento estadístico del ángulo máximo ϕ_m promedio en las arenas gruesas

Granulometría	Humedad	ϕ_m promedio	DE	CV
2,54	3,0029	42,72	1,79	4,19
1,905	6,536	38,82	4,01	10,34
1,27	7,876	32,07	2,91	9,09
2,54	1,401	43,23	1,91	4,41
1,905	4,719	41,77	2,04	4,89
1,27	6,791	40,93	2,46	6
2,54	0,35	39,47	2,5	6,32
1,905	2,786	35,43	2,18	6,15
1,27	5,051	31,83	1,48	4,66
2,54	0,00564	39,1	1,67	4,27
1,905	0,961	33,8	1,1	3,25
1,27	2,26	32,33	1,29	3,99
2,54	0,00138	42,52	1,16	2,72
1,905	0,218	36,73	1,89	5,14
1,27	0,576	40,57	1,33	3,29

El coeficiente de variación indica una variación relativa de ϕ_m que no es mayor de un 10 % en las 15 repeticiones de cada experimento, lo cual indica la estabilidad de los resultados.

En la Tabla 7 se muestra el comportamiento estadístico de los ángulos tangenciales.

Tabla 7. Comportamiento estadístico del ángulo tangencial (ϕ_t) promedio para las arenas gruesas

Granulometría	Humedad	ϕ_t promedio	DE	CV
2,54	3,0029	9,9	1,38	13,92
1,905	6,536	13,01	0,97	7,42
1,27	7,876	10,42	0,99	9,46
2,54	1,401	13,7	1,47	10,76
1,905	4,719	12,89	0,79	6,11
1,27	6,791	12,8	0,53	4,12
2,54	0,35	9,44	1,24	13,13
1,905	2,786	11,33	0,77	6,82
1,27	5,051	11,46	0,71	6,21
2,54	0,00564	10,92	0,77	7,06
1,905	0,961	11,17	0,69	6,13
1,27	2,26	9,84	0,91	9,2
2,54	0,00138	8,83	0,48	5,44
1,905	0,218	9,8	0,41	4,14
1,27	0,576	11,79	0,52	4,41

Dado que el coeficiente de variación indica hasta un 13,92 % de variación relativa de ϕ_t en las 15 repeticiones de cada experimento, entonces se asume una aceptable estabilidad en los resultados de las mediciones.

La variabilidad o el comportamiento de los ángulos ϕ_m y ϕ_t , en función de la humedad y para cada granulometría considerada de las arenas gruesas, se muestran en las Figuras 7, 8 y 9.

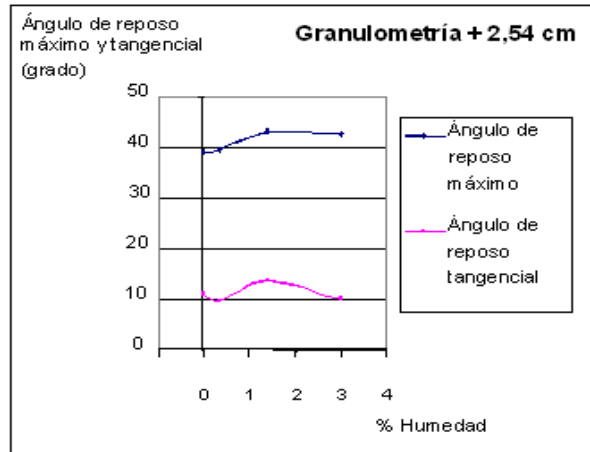


Figura 7. Comportamiento de ϕ_m y ϕ_t para la granulometría +2.54 cm (arenas gruesas).

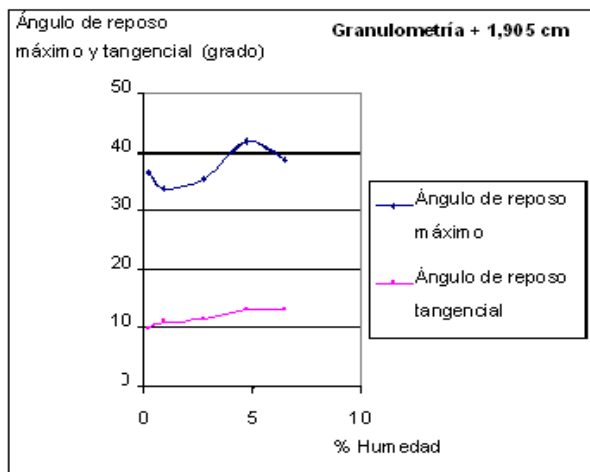


Figura 8. Comportamiento de ϕ_m y ϕ_t para la granulometría +1,905 cm (arenas gruesas).

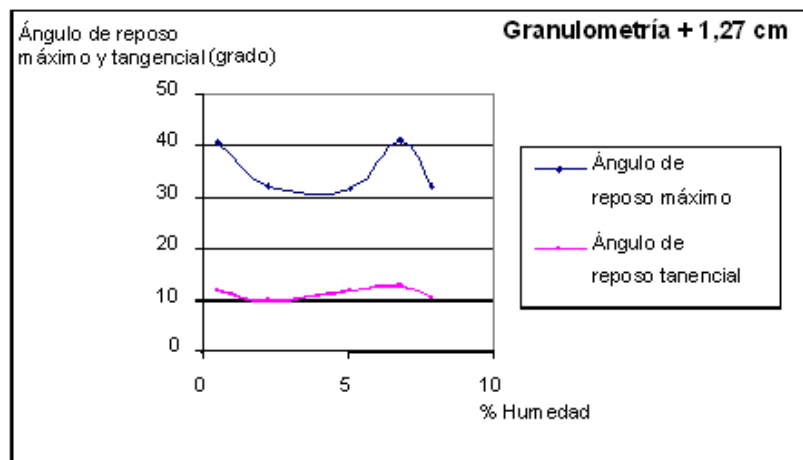


Figura 9. Comportamiento de ϕ_m y ϕ_t para la granulometría +1,27 cm (arenas gruesas).

Según las Figuras 7, 8 y 9, es posible apreciar que existe mayor uniformidad en los valores de los ángulos ϕ_m y ϕ_t para las muestras de arenas gruesas de mayor granulometría promedio.

En este punto lo más importante es asociar a cada tipo de arena (definidas en función de la Granulometría Promedio y de la Humedad) el valor del factor de forma correcto en dependencia de los valores del ángulo tangencial y del ángulo máximo. Ese resultado se muestra en la Tabla 8 donde, además, la última columna indica el error porcentual en que se incurre mediante la aplicación de la fórmula clásica, indicando las mejoras que se obtendrán en el cálculo de la productividad y los restantes parámetros que se determinan al diseñar un transportador de banda de lo cual se infiere un impacto económico positivo.

Tabla 8. Resultados experimentales para las arenas industriales

Granulometría Promedio cm	Humedad %	ϕ_m promedio grados	ϕ_t promedio grados	K_{FR}	K_{FT}	Error relativo %
0,168	14,242	38,3	51,97	0,2524	0,3196	-26,64
0,168	10,233	37,93	52,62	0,2524	0,3272	-29,645
0,168	7,674	31,97	42,3	0,1888	0,2275	-20,489
0,168	6,378	30,4	39,3	0,1657	0,2046	-23,49
0,168	6,025	30,4	39,3	0,1657	0,2046	-23,49
0,238	12,369	35,3	46,99	0,2055	0,268	-30,413
0,238	9,023	36,8	52,37	0,2217	0,3243	-46,27
0,238	6,843	36,9	51,57	0,2217	0,3151	-42,121
0,238	4,888	31,83	42,33	0,1888	0,2277	-20,615
0,238	4,056	31,83	42,33	0,1888	0,2277	-20,615
0,476	11,635	36,58	49,59	0,2217	0,2936	-32,452
0,476	7,617	35,57	46	0,2055	0,2589	-25,977
0,476	4,662	33,97	51,63	0,2217	0,3158	-42,427
0,476	3,034	33,37	49,25	0,2217	0,2901	-30,87
0,476	1,818	33,37	49,25	0,2217	0,2901	-30,87
1,27	7,876	32,07	10,42	0,0782	0,046	41,21
1,27	6,791	40,93	12,8	0,0817	0,0568	30,479
1,27	5,051	31,83	11,46	0,0782	0,0507	35,19
1,27	2,26	32,33	9,84	0,0782	0,0434	44,55
1,27	0,576	40,57	11,79	0,0782	0,0522	33,271
1,905	6,536	38,82	13,01	0,0817	0,0578	29,299
1,905	4,719	41,77	12,89	0,0817	0,0572	29,973
1,905	2,786	35,43	11,33	0,0782	0,0501	35,945
1,905	0,961	33,8	11,17	0,0782	0,0494	36,873
1,905	0,218	36,73	9,8	0,0782	0,0432	44,779
2,54	3,0029	42,72	9,9	0,0817	0,0436	46,595
2,54	1,401	43,23	13,7	0,0847	0,0609	28,048
2,54	0,35	39,47	9,44	0,0817	0,0416	49,123
2,54	0,00564	39,1	10,92	0,0817	0,0482	40,963
2,54	0,00138	42,52	8,83	0,0782	0,0388	50,337

A modo de ilustración, en la Tabla 9 se muestran los valores calculados del ancho de banda B_T (triangular clásico) y B_R (real) para un transportador de arena plano cuya productividad es $Q=14\ 700$ kN/h con las condiciones de granulometría y humedad dadas para cada caso; el peso específico se considera de $19,6$ kN/m³ y la velocidad de transportación, de 3 m/s. En la columna Condición se muestra qué ocurre si el transportador se diseña por el método triangular clásico: sub-dimensionamiento del transportador ($B_T < B_R$) o sobre-dimensionamiento ($B_T > B_R$).

Tabla 9. Anchos de banda B_T y B_R y la condición de diseño para un caso de estudio

Granulometría cm	Humedad en %	ϕ_m	ϕ_t	B_T	B_R	Condición
0,168	14,242	38,3	51,97	567,72	631,98798	Sub-dimensionado
0,168	10,233	37,93	52,62	561,74	631,98798	Sub-dimensionado
0,168	7,674	31,97	42,3	662,77	722,12996	Sub-dimensionado
0,168	6,378	30,4	39,3	695,82	767,11508	Sub-dimensionado
0,168	6,025	30,4	39,3	695,82	767,11508	Sub-dimensionado
0,238	12,369	35,3	46,99	614,94	694,44843	Sub-dimensionado
0,238	9,023	36,8	52,37	564,04	670,6425	Sub-dimensionado
0,238	6,843	36,9	51,57	571,42	670,6425	Sub-dimensionado
0,238	4,888	31,83	42,33	662,45	722,12996	Sub-dimensionado
0,238	4,056	31,83	42,33	662,45	722,12996	Sub-dimensionado
0,476	11,635	36,58	49,59	589,93	670,6425	Sub-dimensionado
0,476	7,617	35,57	46	624,72	694,44843	Sub-dimensionado
0,476	4,662	33,97	51,63	570,86	670,6425	Sub-dimensionado
0,476	3,034	33,37	49,25	593,16	670,6425	Sub-dimensionado
0,476	1,818	33,37	49,25	593,16	670,6425	Sub-dimensionado
1,27	7,876	32,07	10,42	1406,94	1091,5925	Sobre-dimensionado
1,27	6,791	40,93	12,8	1271,31	1069,1458	Sobre-dimensionado
1,27	5,051	31,83	11,46	1342,62	1091,5925	Sobre-dimensionado
1,27	2,26	32,33	9,84	1447,05	1091,5925	Sobre-dimensionado
1,27	0,576	40,57	11,79	1323,97	1091,5925	Sobre-dimensionado
1,905	6,536	38,82	13,01	1261,11	1069,1458	Sobre-dimensionado
1,905	4,719	41,77	12,89	1266,91	1069,1458	Sobre-dimensionado
1,905	2,786	35,43	11,33	1350,18	1091,5925	Sobre-dimensionado
1,905	0,961	33,8	11,17	1359,67	1091,5925	Sobre-dimensionado
1,905	0,218	36,73	9,8	1449,95	1091,5925	Sobre-dimensionado
2,54	3,0029	42,72	9,9	1442,74	1069,1458	Sobre-dimensionado
2,54	1,401	43,23	13,7	1229,22	1051,0238	Sobre-dimensionado
2,54	0,35	39,47	9,44	1476,8	1069,1458	Sobre-dimensionado
2,54	0,00564	39,1	10,92	1374,9	1069,1458	Sobre-dimensionado
2,54	0,00138	42,52	8,83	1525,94	1091,5925	Sobre-dimensionado

La tabla anterior muestra que si se calcula el ancho B_T asumiendo que la sección de la carga es triangular, para el caso de las arenas intermedias, en general, resulta un transportador sub-dimensionado, donde probablemente se presenten fallas prematuras ya que el ancho

de banda que se obtiene bajo esta consideración resulta menor que el ancho de banda necesario B_R calculado bajo el principio de que la sección de la carga es función de los ángulos de reposo φ_m y φ_t . En el caso de las arenas gruesas se puede observar que generalmente resulta un transportador sobre-dimensionado con su consecuente impacto económico negativo.

Ahora, a partir de los valores de las columnas 1ra (Granulometría Promedio en cm), 2da (Humedad en %) y 5ta (K_{fR}) de la Tabla 10, así como del valor de b_o , es posible determinar el valor del área de la sección transversal del transportador mediante la ecuación 2.

4. CONCLUSIONES

El sistema de experimentos desarrollado permitió obtener los valores del ángulo máximo y del ángulo tangencial para arenas industriales clasificadas en los tipos intermedias y gruesas, según los valores de sus respectivas granulometría y humedad.

A partir de estos valores de φ_m y φ_t se ha caracterizado el factor de forma real para cada tipo de material así como la geometría del área de la sección transversal de la carga. Comparando los valores del ancho de banda que se obtienen en cada caso para los modelos triangulares clásicos y para los nuevos modelos propuestos argumentan la necesidad de utilizar estos últimos para evitar el sub-dimensionamiento o el sobre-dimensionamiento durante el diseño de los transportadores.

5. REFERENCIAS

- COVENIN 1998:** *Norma 254-1998. Cedazos de Ensayo*. FONDONORMA, Caracas, 26 p.
- LEGRA-LOBAINA, A. A. 2005: *Software TIERRA, Versión 2.6*. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Holguín, Cuba.
- MILLER, I. R.; FREUND, J. Y JOHNSON, R. 2005:** *Probabilidades y Estadísticas para ingenieros*. Volumen I y II. Félix Varela, La Habana, 624 p.
- ORIO, G.; AGUILAR, F. 1992:** *Máquinas de Transporte Continuo*. Tomo I. Pueblo y Educación, La Habana, 236 p.
- OTAÑO, J. 1981:** *Elementos de Física de las Rocas*. Pueblo y Educación, La Habana, 84 p.
- RICAUARTE-MACHADO, C. J. Y LEGRÁ-LOBAINA, A. A. 2010:** Contribución al cálculo del área de la sección de la carga en la banda transportadora de mineral laterítico. *Minería y Geología* 26(3): 1-22.

SIERRA-PÉREZ, R. J. 2006: Estudio de las Propiedades Físico-Mecánicas del Mineral Laterítico influyentes en los Transportadores de Banda. *Ingeniería, Investigación y Desarrollo* II(1): 48-52.

SIERRA-PÉREZ, R. J.; LEGRÁ-LOBAINA, A. A.; DONATIÉN-CARBONEL, A.; MATOS, L. 2009: Caracterización de la mena laterítica para el ajuste de parámetros tecnológicos del transportador de banda. *Minería y Geología* 25(3): 1-18.

Claudio José Ricaurte-Machado

Master en Ciencias Electromecánicas. Profesor Auxiliar.
Instituto Universitario de Tecnología Dr. Federico Rivero Palacio,
Caracas, Venezuela.

claudioricaurtee2@hotmail.com

Arístides Alejandro Legrá-Lobaina

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa,
Holguín, Cuba.

alegra@ismm.edu.cu